

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna  
in cotutela con Wuhan University

DOTTORATO DI RICERCA IN  
INGEGNERIA BIOMEDICA, ELETTRICA E DEI SISTEMI

Ciclo XXXVI

**Settore Concorsuale: 09/E2**

**Settore Scientifico Disciplinare: ING-IND/33**

DISCHARGE CHARACTERISTICS AND DISCHARGE  
SIMULATION MODEL OF LONG AIR GAPS  
CONTAINING A FLOATING CONDUCTOR

**Presentata da:** Jiachen Gao

**Coordinatore Dottorato**

Prof. Michele Monaci

**Supervisore**

Prof. Andrea Cavallini

**Supervisore**

Prof. Linong Wang

**Esame finale anno 2022**

## Abstract

Long air gaps are important dielectrics in high-voltage transmission and substation projects, and their dielectric strength is influenced by the gap spacing and configuration. If a floating conductor is introduced into a long air gap, the spacing and configuration are significantly changed and the dielectric strength is also changed. Long air gaps containing a floating conductor are commonly found in power grids. During the transmission line live-line work, the process of lineman entering the transmission line air gap constitutes a live-line work combined air gap, which is a typical long air gap containing a floating conductor. The live-line work air gap is an important part of the outdoor insulation gaps. In the case of a new voltage level or a major structural change in transmission line towers, the gap size that can guarantee work safety needs to be determined based on the discharge characteristics of air gaps. At present, the main method used to determine the discharge characteristics under positive switching impulses is carrying out actual-scale tests. Combined with the overvoltage level of transmission lines, the minimum live-line work combined air gap can be determined by calculating the risk rate of live-line work. In recent years, Chinese researchers have carried out a lot of studies on live-line work technology and have determined the minimum live-line work combined air gap for several voltage levels of transmission lines. However, most of these studies rely on actual-scale test data and empirical formulas, which lack the sufficient theoretical basis to fully reflect the influence of various factors on the gap discharge characteristics. There are still several issues that need to be addressed, such as the lack of clarity on the laws of breakdown voltage and the lowest breakdown voltage area of the gap, the lack of clarity on the mechanism of the formation of the lowest breakdown voltage area, and the reliance on costly and long-period actual-scale tests to determine the discharge characteristics.

Based on the above issues, this paper carries out research on the discharge characteristics, discharge mechanism, and discharge simulation model of long air gaps containing a floating conductor, respectively, to provide a sufficient theoretical basis and technical support for solving the above engineering issues. The main work and research results of this paper are as follows.

(1) An experimental platform of long air gaps containing a floating conductor was built and was used to investigate the discharge characteristics. The effect of the gap distance, the floating electrode structure, the switching impulse wavefront time, the altitude, and the deviation of the floating conductor from the axis on the breakdown voltage was investigated. The results show that: there is a lowest breakdown voltage area (LBA) in a long air gap containing a floating

conductor, and the location of the LBA varies with the total gap distance. The apparent protrusion of the floating conductor affects the breakdown voltage and the breakdown path of the gap. The breakdown voltage under a long wavefront time switching impulse is higher than that under a standard switching impulse. The breakdown voltage at a high altitude is lower than that under standard atmospheric conditions, and there are limitations to the use of the altitude correction method to correct the breakdown voltage under standard atmospheric conditions to obtain the breakdown voltage at a high altitude. The deviation of the floating conductor from the axis causes a change in the breakdown path and increases the breakdown voltage.

(2) Based on the findings of the study of the discharge characteristics of long air gaps containing a floating conductor, the discharge characteristics of live-line work combined air gaps on transmission lines were analyzed. The results show that: the LBA of the live-line work combined air gaps varies with the tower structure and the size of the gap. During the process of entering or exiting the equipotential condition, the lineman should avoid extending to improve work safety. The minimum combined gap for live-line work on extra-high voltage and ultra-high voltage lines determined by the existing actual-scale test switching impulse waveform is on the strict side. The work safety of the determined minimum combined gap for live-line work in high-altitude environments is less than expected. The process of entering and exiting the equipotential condition by the suspended basket method is safer than expected.

(3) An experimental platform of observation and measurement for discharges in long air gaps containing a floating conductor was built. The platform was used to observe and measure the discharges to investigate the physical discharge process of the gap and the formation mechanism of the LBA. The results show that: The discharge in sub-gap 1 consists mainly of a downward leader-corona region and an upward streamer. The discharge in sub-gap 2 consists mainly of a leader-corona region. The physical process of the discharge is related to the position of the floating conductor. The similarity of the discharge characteristics of long air gaps containing a floating electrode with complex geometrics and sharp protrusions and long air gaps with a rod-shaped floating electrode is caused by similar physical discharge processes. The formation of the LBA is influenced by the breakdown voltage of sub-gap 1 and sub-gap 2.

(4) According to the discharge physical process of a long air gap containing a floating conductor, a discharge simulation model was established based on the discharge criteria and models for long air gaps such as the streamer inception and development model, and the leader inception and development model. By simulating the development of the discharge in sub-gap 1 and sub-gap 2, the discharge simulation model can determine the breakdown or withstand of the air gap. The breakdown voltage can be calculated by simulating the discharge process several times using the up-and-down method. The model was used to calculate the breakdown voltage of

long air gaps containing a floating conductor with simple electrodes and live-line work combined air gaps on transmission lines. The validity of the model was verified by comparison with the test results.

**Keywords:** Long air gaps; Floating Electrode; Live-line work; Discharge characteristics; Discharge simulation model

## 摘 要

长空气间隙是高压输变电工程的重要绝缘介质，其绝缘强度受其间隙长度和空间结构的影响。在长空气间隙中引入悬浮导体后，长空气间隙的间隙长度和空间结构发生了明显改变，间隙的绝缘性能也随之改变。含悬浮导体长空气间隙常见于电力系统中，其中输电线路等电位带电作业过程中带电作业人员进入输电线路空气间隙过程构成的带电作业组合间隙就是典型的含悬浮导体长空气间隙。带电作业间隙是线路外绝缘间隙的重要组成部分，在出现新的电压等级或者线路杆塔结构发生重大改变的时候，需要根据间隙的放电特性确定可以保证作业安全的间隙尺寸。现阶段，主要采用带电作业真型试验确定正极性操作冲击电压下间隙的放电特性，再结合线路过电压水平，通过计算带电作业危险率确定最小组合间隙。近年来，我国学者开展了大量带电作业技术的研究，先后确定了多个电压等级线路的最小组合间隙。但研究过程多依赖真型试验数据与经验公式，缺乏充足的理论依据，难以充分反映各项因素对间隙放电特性的影响规律，仍存在较多亟需解决的问题，例如：带电作业组合间隙击穿电压和最小击穿电压区域规律不明确，间隙最小击穿电压区域形成机理不清楚，依赖成本高、周期长的真型试验确定间隙放电特性等。

基于上述背景，本文分别开展了含悬浮导体长空气间隙放电特性、放电机理及放电仿真模型的研究，为解决上述工程问题提供充足的理论依据和技术支撑。本文的主要内容和主要研究成果如下：

(1) 搭建了含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台，开展了含悬浮导体长空气间隙放电特性研究，研究了间隙长度、悬浮电极结构、操作冲击电压波前时间、海拔高度和悬浮导体偏离轴线等因素对间隙击穿电压的影响规律，研究表明：含悬浮导体长空气间隙存在一个最小击穿电压区域，其位置随总间隙长度变化而改变；悬浮导体凸出物的明显程度会影响间隙的击穿电压和击穿路径；长波前时间操作冲击下的击穿电压高于标准操作冲击下的击穿电压；高海拔环境的击穿电压低于标准大气条件下的击穿电压，利用海拔校正方法校正标准大气条件下击穿电压得到高海拔环境击穿电压的方法具有局限性；悬浮导体偏离轴线会使击穿路径改变，并提高击穿电压。

(2) 基于含悬浮导体长空气间隙放电特性研究的结论，分析了输电线路带电作业组合间隙的放电特性，结果表明：带电作业组合间隙最小击穿电压区域随杆塔结构和间隙尺寸变化而改变；带电作业进出等电位过程中，作业人员应避免伸出四肢，以提高作业安全性；现有真型试验操作冲击电压波形确定的超、特高压线路带电作业最小组合间隙是偏严格的；已确定的高海拔环境带电作业最小组合间隙的作业安全性不及预期；带电作业人员采用吊篮法进出等电位过程的作业安全性比预期更高。

(3) 搭建了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台,开展了含悬浮导体长空气间隙放电观测研究,研究了间隙放电物理过程与最小击穿电压区域形成机理,研究表明:子间隙 1 中放电主要由下行先导-流注体系和上行流注组成,子间隙 2 中放电主要由先导-流注体系组成,间隙放电物理过程与悬浮导体的位置有关;含具有明显凸出物复杂结构悬浮电极长空气间隙与含棒型悬浮电极长空气间隙放电特性相似是由相似的放电物理过程引起的;最小击穿电压区域的形成受子间隙 1 和子间隙 2 击穿电压的影响。

(4) 根据含悬浮导体长空气间隙放电物理过程,基于长空气间隙放电模型,建立了含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型。通过模拟子间隙 1 与子间隙 2 中的放电发展过程,可以判断间隙的击穿或耐受。采用升降法多次模拟间隙放电过程,即可计算间隙击穿电压。利用建立的模型计算了简单电极构成的含悬浮导体长空气间隙与输电线路带电作业组合间隙的击穿电压,通过与试验结果进行对比,验证了模型的有效性。

**关键词:** 长空气间隙; 悬浮导体; 带电作业; 放电特性; 放电仿真模型



# 目 录

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>I</b>
<b>摘 要.....</b>	<b>IV</b>
<b>1 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 长空气间隙放电研究现状 .....	3
1.2.2 含悬浮导体长空气间隙放电研究现状 .....	11
1.2.3 有待研究的问题 .....	14
1.3 论文主要工作 .....	15
<b>2 含悬浮导体长空气间隙放电特性研究.....</b>	<b>17</b>
2.1 含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台及试验方法 .....	17
2.1.1 含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台 .....	17
2.1.2 含悬浮导体长空气间隙放电特性试验方法 .....	19
2.2 间隙长度对放电特性的影响研究 .....	20
2.3 悬浮导体结构对放电特性的影响研究 .....	23
2.4 波前时间对放电特性的影响研究 .....	29
2.5 海拔高度对放电特性的影响研究 .....	31
2.6 悬浮导体偏离轴线对放电特性的影响研究 .....	32
2.7 输电线路带电作业组合间隙放电特性分析 .....	36
2.8 本章小结 .....	37
<b>3 含悬浮导体长空气间隙放电观测研究.....</b>	<b>39</b>
3.1 含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台 .....	39
3.1.1 光学图像摄影系统 .....	40
3.1.2 电流测量系统 .....	40
3.1.3 同步观测方案 .....	46
3.2 低海拔环境含悬浮导体长空气间隙放电观测试验 .....	48
3.2.1 悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙 .....	49
3.2.2 悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙 .....	51
3.2.3 悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙 .....	53



3.3	高海拔环境含悬浮导体长空气间隙放电观测试验 .....	55
3.3.1	悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙 .....	55
3.3.2	悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙 .....	57
3.3.3	悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙 .....	59
3.4	含悬浮导体长空气间隙放电物理过程分析 .....	61
3.5	含复杂结构悬浮电极的长空气间隙放电过程研究 .....	62
3.6	本章小结 .....	66
<b>4</b>	<b>最小击穿电压区域形成机理研究 .....</b>	<b>69</b>
4.1	低海拔环境最小击穿电压区域放电观测试验 .....	69
4.2	高海拔环境最小击穿电压区域放电观测试验 .....	73
4.3	最小击穿电压区域形成机理分析 .....	78
4.4	本章小结 .....	82
<b>5</b>	<b>含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型研究 .....</b>	<b>83</b>
5.1	放电仿真模型计算流程 .....	83
5.2	流注起始与发展模型 .....	87
5.2.1	流注起始判据 .....	87
5.2.2	流注发展模型 .....	90
5.3	先导起始与发展模型 .....	93
5.3.1	先导起始判据 .....	93
5.3.2	先导通道发展模型 .....	93
5.4	放电仿真模型的验证 .....	97
5.5	输电线路带电作业组合间隙击穿电压预测 .....	99
5.6	本章小结 .....	100
<b>6</b>	<b>结论与展望 .....</b>	<b>101</b>
6.1	结论 .....	101
6.2	研究展望 .....	103
	<b>参考文献 .....</b>	<b>104</b>
	攻读博士学位期间发表的论文目录 .....	112
	攻读博士学位期间参与的科研项目 .....	113
	<b>致 谢 .....</b>	<b>114</b>

# 1 绪论

## 1.1 研究背景和意义

空气间隙是高压输变电工程的重要绝缘介质，其绝缘强度直接影响着电力系统运行的安全稳定。开展空气间隙放电特性与放电机理研究，有助于优化绝缘结构，为提高绝缘强度提供理论依据。长空气间隙放电理论是输变电设备外绝缘和防雷保护的基础理论，长期受到国内外学者关注。开展长空气间隙放电特性与放电机理研究是进一步提升我国电力系统运行安全稳定所面临的技术挑战<sup>[1-2]</sup>。

长空气间隙的绝缘性能受其间隙长度和空间结构的影响。在长空气间隙中引入悬浮导体后，长空气间隙的间隙长度和空间结构发生了明显改变，间隙的绝缘性能也会随之改变。含悬浮导体长空气间隙广泛存在于电网中，例如输电线路等电位带电作业过程中带电作业人员进入输电线路空气间隙、鸟类在输电线路空隙中排泄、杆塔上异物坠落以及异物入侵输电走廊等。在上述场景中，带电作业是保障电力系统安全稳定运行的重要手段。特高压输电线路是我国坚强智能电网的重要骨干网架，特高压线路的停运检修不仅会损失大量负荷，还会给大电网的稳定运行造成隐患。因此，带电作业是特高压线路检修、消缺的重要手段，可以最大限度地保证供电可靠性，具有极高的经济效益和社会效益<sup>[3-4]</sup>。

带电作业间隙是线路外绝缘间隙的重要组成部分，在出现新的电压等级或者线路杆塔结构发生重大改变的时候，需要根据间隙的放电特性确定可以保证作业安全的间隙尺寸。等电位带电作业中，身着屏蔽服的作业人员在进出等电位过程中是一个电位悬浮导体，其将导线-杆塔的输电线路空气间隙分割成导线-作业人员和作业人员-杆塔两个子间隙，构成带电作业组合间隙。带电作业组合间隙是典型的含悬浮导体长空气间隙，在作业人员这一悬浮导体的影响下，空气间隙的放电特性发生了改变。当间隙长度缩小、间隙绝缘强度降低到一定程度时，间隙会发生击穿，危害作业人员人身安全。因此，确定确保间隙绝缘强度良好的带电作业最小组合间隙（作业人员与高压带电体和接地体之间的最小间隙距离之和）对保证带电作业安全至关重要。目前，工程中主要采用带电作业真型试验获取正极性操作冲击电压下间隙的击穿电压特性曲线，再结合线路过电压水平，根据国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 标准 IEC 61472-2013<sup>[5]</sup> 和我国国家标准 GB/T 19185-2008<sup>[6]</sup> 推荐的绝缘配合简化统计法计算间隙绝缘失效概率，即带电作业危险率。《带电作业工具基本技术要求及设计导则》中规定带电作业危险率应小于  $1 \times 10^{-5}$ ，依照这一标准即可确定指导带电作业工程应用的最小组合间隙。

过往二十余年中，随着我国超、特高压输电工程的快速发展，我国学者开展了大

量超、特高压线路带电作业技术的研究，先后确定了多个电压等级线路的最小组合间隙<sup>[7-13]</sup>。然而，研究过程多依赖真型试验数据与经验公式，缺乏充足的理论依据，难以充分反映各项因素对间隙放电特性的影响规律，仍存在较多亟需解决的问题。首先，前期真型试验数据表明，间隙击穿电压与模拟人（人型试验电极）的位置有关，模拟人位置的移动会改变间隙的击穿电压，随着模拟人从高压导线向杆塔方向移动，间隙击穿电压会先下降、后上升，在不同间隙尺寸的超、特高压线路杆塔中，间隙击穿电压的最小值都出现在模拟人距离高压导线 0.4 m 的位置。而 CIGRE 带电作业报告<sup>[14]</sup>与文献<sup>[15]</sup>则报道，含悬浮导体长空气间隙的最小击穿电压位置出现在距离高压电极 1/3 至 1/4 的位置，这与真型试验数据有一定区别。由于悬浮导体改变了空气间隙的空间结构，现有长空气间隙放电理论无法解释最小击穿电压位置的出现规律与产生机理。其次，实际带电作业中作业人员姿态多样，真型试验难以穷举所有间隙结构，作业人员姿态变化对间隙放电特性的影响仍属未知，目前也鲜有研究报道不同结构悬浮电极对间隙放电特性的影响规律。再次，操作冲击电压波形和高海拔环境（低气压）对长空气间隙放电特性有明显影响<sup>[16]</sup>，但这两个因素对于带电作业组合间隙放电特性的影响尚未可知，目前也还未有这两个因素对含悬浮导体长空气间隙放电特性影响规律的报道。最后，实际超、特高压线路带电作业中作业人员常采用吊篮法从杆塔上方荡至导线，组合间隙长度因电极间最短路径的长度改变而增长，有时甚至会会长于导线-杆塔的长空气间隙。组合间隙长度的变化可能会改变放电击穿路径，从高压导线-作业人员-杆塔的击穿路径变为高压导线-杆塔的击穿路径，从而变相提升作业人员的作业安全性，但目前尚无悬浮导体偏离长空气间隙轴线时间隙放电路径变化规律的报道。解决上述问题有助于进一步提升输电线路带电作业的安全性，因此深入开展含悬浮导体长空气间隙放电特性与放电机理研究具有重要的意义。

除上述问题外，开展带电作业真型试验还存在试验量繁重、试验周期长及试验成本高的问题。每当出现新的电压等级或者线路杆塔结构发生重大改变时，都需要重新开展带电作业真型试验以获取间隙放电特性。然而，杆塔模型，特别是超、特高压线路杆塔模型，尺寸巨大，不利于试验布置，且制作需消耗大量钢材。并且，试验中需使用绝缘绳或绝缘杆将模拟人吊在空中，不断调整模拟人位置以满足不同间隙长度，这也进一步增加了试验布置的难度与试验工作量。此外，获取间隙击穿电压需要数十次重复施加操作冲击电压，也会耗费巨大的人力、物力。目前，在普通长空气间隙（不包含悬浮导体的长空气间隙）放电研究中，随着仿真计算技术的快速发展和放电机理研究的不断深入，利用计算高电压工程学手段<sup>[17]</sup>模拟放电演变过程、预测放电物理参数、计算间隙击穿电压<sup>[18-22]</sup>已不再困难。但在含悬浮导体长空气间隙中，由于悬浮导体改变了间隙空间结构，现有长空气间隙放电仿真模型无法直接应用于间隙放电的仿真计算，使得真型试验仍是获取间隙击穿电压的唯一方法。因此，建立可以描述放电物理过程、预测间隙击穿电压的含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型代替或部分代替

带电作业真型试验，对节省真型试验成本具有重要的意义。

针对上述问题，本文以含悬浮导体长空气间隙为研究对象，首先开展了放电特性试验研究，研究了不同影响因素对间隙击穿电压的影响规律。之后，搭建了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台，开展了间隙放电物理过程观测试验研究，确定了间隙放电物理过程。随后，开展了间隙最小击穿电压区域形成机理研究，揭示了最小击穿电压区域的产生原因。最后，根据间隙放电物理过程，基于长空气间隙放电仿真模型，建立了可以描述放电物理过程、预测计算间隙击穿电压的放电仿真模型。本文研究结论可以为提升输电线路带电作业安全性和节省带电作业真型试验成本提供理论参考和技术支撑。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 长空气间隙放电研究现状

#### 1.2.1.1 长空气间隙放电特性研究

长空气间隙是输变电设备外绝缘的主要介质，开展长空气间隙放电特性与放电机理研究可为输变电设备外绝缘设计和雷电防护提供理论依据，具有重要的工程意义。在输电工程中，随着线路电压等级的提高，所需空气绝缘距离也随之增加，对长空气间隙放电理论的研究需求也愈发迫切。

20世纪60年代起，美国、意大利、法国、俄罗斯、加拿大、日本等国学者先后开展了不同间隙结构和间隙尺寸的放电试验研究，获得了棒-板间隙、棒-棒间隙、导线-板间隙、导线-棒间隙、球-板间隙等一系列典型间隙<sup>[23-27]</sup>和345 kV、500 kV、1000 kV等超特高压输电线路杆塔间隙的放电特性<sup>[28-33]</sup>，根据试验数据拟合得到了长空气间隙击穿电压经验公式，探索了超、特高压输电线路的外绝缘设计依据。其中，Paris等学者开展了棒-板间隙、棒-棒间隙、导线-板间隙等典型长空气间隙的操作冲击放电试验，根据试验数据中击穿电压和间隙长度之间的关系，提出了间隙系数的概念，认为间隙击穿电压与间隙长度和间隙几何结构有关<sup>[24-25]</sup>。不同几何结构的间隙击穿电压可以根据间隙系数与间隙长度计算得到<sup>[24]</sup>：

$$U_{50} = KU_{50RP} \quad (1.1)$$

$$U_{50RP} = 500d^{0.6} \quad (1.2)$$

式中， $U_{50}$ 为间隙长度为 $d$ 的待求间隙50%击穿电压，kV； $K$ 为待求间隙的间隙系数，表征待求间隙与棒-板间隙的间隙几何结构差异； $U_{50RP}$ 为间隙长度为 $d$ 的棒-板间隙的50%击穿电压，kV； $d$ 为间隙长度，m。

随后, Gallet 等学者沿用 Paris 间隙系数的思路, 根据间隙长度为 1 m 至 23 m 的间隙试验数据拟合得到了不同几何结构间隙的临界操作冲击电压计算经验公式<sup>[26]</sup>:

$$U_{50crit+} = K \frac{3400}{1 + \frac{8}{d}} \quad (1.3)$$

式中,  $U_{50crit+}$  为正极性临界操作冲击下的间隙 50% 击穿电压, kV。

之后, Watanabe 等学者进一步开展了典型间隙的操作冲击放电试验, 研究了电极形状、电压波形、电压极性等因素对间隙放电特性的影响<sup>[32]</sup>, 并提出了间隙长度为 1 m 至 25 m 棒-板间隙的临界操作冲击电压计算经验公式<sup>[33]</sup>:

$$U_{50crit+} = 1080 \ln(0.46d + 1) \quad (1.4)$$

上述研究结论在我国输变电工程发展阶段起到了重要的参考作用。随着我国社会对电能需求的日益高涨, 发展超、特高压输电线路成为我国经济技术发展的必然需求。为同时保证输电线路的安全性与经济性, 我国学者相继开展了 500 kV<sup>[34]</sup>、750 kV<sup>[35-37]</sup>、1000 kV<sup>[38-40]</sup> 等多个电压等级交流输变电工程外绝缘间隙的放电特性试验研究<sup>[41]</sup>, 获得了大量试验数据, 为超、特高压交流输变电工程外绝缘设计提供了重要依据。针对直流输变电工程, 中国电力科学研究院开展了  $\pm 800$  kV 和  $\pm 1100$  kV 直流输电线路塔头间隙的放电特性试验研究<sup>[42-48]</sup>, 为特高压直流输变电工程建设提供技术支撑。近年来, 陈赦、耿江海等学者开展了直流输电工程换流站阀厅中屏蔽球金具对地放电特性的研究, 研究了电极尺寸、表面缺陷等因素对放电特性的影响规律<sup>[49-52]</sup>。此外, 由于我国大约 2/3 国土面积的海拔高度超过 1000 m, 输变电工程在高海拔环境中的外绝缘特性也长期受到国内学者们的关注。原武汉高压研究所、重庆大学、南方电网科学研究院和中国电力科学研究院等单位开展了棒-板间隙、棒-棒间隙等典型空气间隙的高海拔放电试验, 获得了间隙放电特性, 并提出了高海拔地区空气间隙击穿电压的校正方法<sup>[53-60]</sup>。近年来, 南方电网科学研究院和中国电力科学研究院还开展了高海拔环境中直流输电线路塔头间隙的放电试验, 获得了高海拔试验数据, 为高海拔环境直流线路的建设提供技术支撑<sup>[61-64]</sup>。

### 1.2.1.2 长空气间隙放电机理研究

长空气间隙放电机理研究主要是利用放电观测设备观察放电过程、测量关键放电物理参数, 分析放电观测数据揭示不同放电阶段机理, 为解释放电宏观特性和建立放电仿真模型提供理论依据。

20 世纪 70 年代, Les Renardi ères Group 搭建了基于光学与电学观测设备的放电观测平台<sup>[65]</sup>。在光学观测设备方面, 利用图像变换器拍摄到了长空气间隙放电的发展过程, 利用光电倍增管获得了放电不同阶段的光强信号, 利用纹影技术确定了先导通道热力学参数。在电学观测设备方面, 利用分压器测量了施加电压数据, 利用电流测量

装置测量了放电电流数据，利用电场传感器测量了放电间隙的空间电场。Les Renardières Group 开展了一系列放电观测试验<sup>[66]</sup>，并基于观测试验结果，确定了正极性施加电压下长空气间隙放电的基本物理过程主要由初始电晕起始、流注-先导转化、先导发展、末跃和击穿等阶段组成。长空气间隙放电物理过程如图 1.1 所示，具体过程为：高压电极上施加电压升高，电极表面空间电场达到起晕条件后，经过电场上升率等因素造成的时延后，高压电极表面出现由流注丝构成的初始电晕( $t_1$ )。放电发展产生的自由电子会经初始电晕中流注丝根部注入高压电极，流注丝根部呈现为一条发光的通道，被称为流注茎。放电电流会使流注茎的温度不断升高，当温度达到负离子脱附的临界温度（约 1500 K）时，流注茎中的负离子会转化为自由电子和中性分子，提升流注茎通道的电导率，流注茎转化为先导( $t_2$ )。之后，放电以先导-流注体系向前发展，放电发展产生的自由电子从流注区域注入先导通道，先导通道不断延伸( $t_2 \sim t_3$ )。当先导通道前的流注区域到达接地电极时，放电进入末跃阶段( $t_3$ )。末跃阶段中，先导发展速度会显著增加，直至放电通道贯穿整个间隙，间隙击穿。

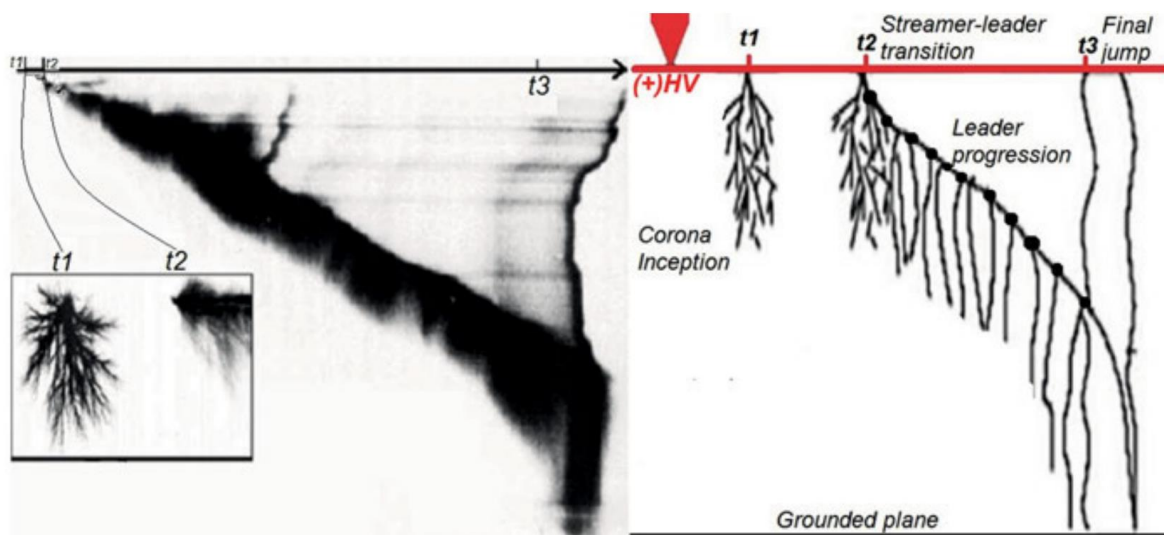


图 1.1 正极性长空气间隙放电物理过程示意图<sup>[72]</sup> (Diaz 根据文献<sup>[73]</sup>改编绘制)

20 世纪 90 年代起，我国学者也先后建立了不同的长空气间隙放电观测平台，开展了放电不同阶段的关键放电物理参数测量研究。1991 年，文习山等学者利用高电位分流器电阻和变象仪观测了长空气间隙的放电过程，研究了放电电流特性、先导发展速度以及限流电阻对放电的影响<sup>[74]</sup>。1995 年，张海燕等学者研制了自由电位式二维暂态电场传感器，搭建了长空气间隙放电电场测量平台，测量了雷电冲击下长空气间隙流注放电的空间电场变化，分析了长空气间隙流注发展特性<sup>[75]</sup>。2009 年，谷山强等学者搭建了由普通摄像机、高速摄影仪、冲击电压分压器、Rogowski 线圈电流测量仪和暂态电场测量仪组成的长空气间隙放电观测系统，观察了棒-板间隙的放电物理过程与放电物理参数，得到了清晰直观的光学图像和大量放电数据<sup>[76]</sup>。2011 年以来，曾嵘等学者先后研制了瞬态电场测量仪器、放电电流测量系统、光电倍增管、Mach-Zehnder 干

涉仪等设备，搭建了多个空气间隙放电物理参数测量试验平台，观测了长空气间隙放电的放电电压、放电电流、空间电场、放电形态等放电物理参数<sup>[78-82]</sup>。2012 年以来，何俊佳、贺恒鑫等学者利用高速摄影仪、电流测量系统、瞬态电场测量系统、定量纹影系统等设备观测了长空气间隙放电物理过程、放电通道形态及电学、热学特性<sup>[83-87]</sup>。2019 年以来，律方成等学者利用电场传感器、光电倍增管、Rogowski 线圈、背景定量纹影系统等设备观测了流注放电路径、流注发展空间电场和放电通道热特性等放电物理参数<sup>[88-91]</sup>。上述研究对揭示长空气间隙放电机理和解释长空气间隙放电宏观特性做出了重要贡献，也为建立长空气间隙放电仿真模型提供了重要依据。

### 1.2.1.3 长空气间隙放电模型研究

长空气间隙放电模型是模拟、计算长空气间隙特性的手段，主要分为工程模型和物理模型。长空气间隙放电工程模型是根据间隙放电物理过程、基于部分合理假设近似或拟合长空气间隙击穿电压数据和观测数据而建立的放电模型，主要有 Lemke 模型、Carrara-Thione 临界电晕半径模型和 Rizk 模型。

#### (1) Lemke 模型<sup>[92]</sup>

Lemke 等学者根据长空气间隙放电进入未跃阶段后间隙不可避免击穿的特性，认为间隙两端电压由先导通道的压降和流注区域的压降组成。流注区域与先导通道的压降表达式为：

$$U_s = E_s l_s = E_s a_0 \left(1 + \ln \frac{d}{a_0}\right) \quad (1.5)$$

$$U_l = E_l (d - l_s) = E_l \left[ d - a_0 \left(1 + \ln \frac{d}{a_0}\right) \right] \quad (1.6)$$

式中， $U_s$  为流注区域压降，kV； $U_l$  为先导通道压降，kV； $E_s$  为流注区域平均场强，kV/m； $E_l$  为先导通道的平均场强，kV/m； $l_s$  为流注长度，m； $a_0$  为间隙结构相关的常数； $d$  为间隙长度，m。

#### (2) Carrara-Thione 临界电晕半径模型<sup>[93]</sup>

Carrara 与 Thione 根据长空气间隙放电物理过程，提出了临界电晕半径的概念。在同一间隙长度的间隙中，在具有临界波前时间的正极性操作冲击电压下，若高压电极的曲率半径小于临界电晕半径，电极曲率半径变化几乎不改变间隙的击穿电压；当高压电极的曲率半径超过临界电晕半径，间隙的击穿电压会随着电极曲率半径增加而显著增加。此外，Carrara 与 Thione 认为间隙的 50% 击穿电压由连续先导起始电压、先导通道压降和统计电压增量组成，即：

$$U_{50} = U_l + \Delta U_l + \Delta U_\sigma \quad (1.7)$$

式中,  $U_l$  为连续先导起始电压, kV;  $\Delta U_l$  为先导通道压降, kV;  $\Delta U_\sigma$  为统计电压增量, kV, 即 50% 击穿电压  $U_{50}$  与最小击穿电压  $U_B$  的差值。

### (3) Rizk 模型<sup>[94-95]</sup>

Rizk 基于正极性操作冲击下连续先导起始的先决条件, 针对高压电极曲率半径小于临界电晕半径的长空气间隙, 提出了一种长空气间隙先导起始电压的计算模型<sup>[95]</sup>:

$$U_l = \frac{U_{\infty}}{1 + \frac{A}{R}} \quad (1.8)$$

式中,  $U_{\infty}$  为先导起始电压的饱和值, kV;  $A$  为与高压电极结构有关的参数, m;  $R$  为间隙特性函数, 反映间隙结构和间隙距离等特性。Rizk 根据棒-板间隙和导线-板间隙的击穿电压数据, 分别推导得到了高压电极为棒型电极和导线型电极的长空气间隙先导起始电压计算模型:

$$U_{lr} = \frac{1556}{1 + \frac{3.89}{d}} \quad (1.9)$$

$$U_{lc} = \frac{2247}{1 + \frac{5.15 - 5.49 \ln a}{d \ln(2d/a)}} \quad (1.10)$$

式中,  $U_{lr}$  为棒-板间隙连续先导起始电压, kV;  $U_{lc}$  为导线-板间隙连续先导起始电压, kV;  $a$  为导线电极的半径, m。

Rizk 借鉴 Jones 模型<sup>[96]</sup>与 Hutzler 模型<sup>[97]</sup>的思路, 将先导通道视为电弧通道, 提出了先导通道压降的计算模型<sup>[94]</sup>:

$$\Delta U_l = 50l_z + 37.5 \ln \left[ 8 - 7e^{-1.33l_z} \right] \quad (1.11)$$

式中,  $l_z$  为先导通道的长度, m。基于 Carrara-Thione 临界电晕模型<sup>[93]</sup>, Rizk 给出了最小击穿电压  $U_B$  和 50% 击穿电压  $U_{50}$  的计算模型:

$$U_{50} = \frac{U_B}{1 - 3\sigma} = \frac{U_l + \Delta U_l}{1 - 3\sigma} \quad (1.12)$$

式中,  $\sigma$  为相对标准偏差。近年来, 文献[98-100]基于 Rizk 模型, 提出了利用有限元仿真分析软件计算复杂间隙结构间隙特性函数  $R$  的方法, 并在输变电工程长空气间隙中应用。

长空气间隙放电物理模型是根据间隙放电物理过程每个阶段依次建立起始判据和发展模型的放电模型, 可用于模拟放电演变过程、预测放电物理参数、计算间隙击穿电压。

#### (1) 流注起始判据

流注放电是长空气间隙放电的开端。经典流注理论认为, 当初始电子崩头部的电荷数超过临界电荷数时, 电极表面空间电场强度足够支撑二次电子崩的发展, 流注起



始，判据表达式为<sup>[101]</sup>：

$$N_1 = \exp\left[\int_{R_0}^R (\alpha - \eta) dx\right] > N_{cri} \quad (1.13)$$

式中， $N_1$  为初始电子崩头部的电荷数； $\alpha$  为碰撞电离系数， $\eta$  为电子附着系数，二者都是电场强度的函数； $R_0$  为  $\alpha = \eta$  的边界； $R$  为电极半径，代表电极表面位置； $N_{cri}$  是流注起始所需的临界电荷数。

基于光电离的流注起始判据认为，碰撞电离会引起空气分子的激发，向外辐射光子，空气分子吸收光子后发生光电离，产生的光电子会在电场作用下向电极移动，碰撞电离形成二次电子崩。流注起始条件为二次电子崩中包含的电荷数不小于初始电子崩中的电荷数，判据表达式为<sup>[102]</sup>：

$$N_1 = \exp\left[\int_{R_0}^R (\alpha - \eta) dx\right] \quad (1.14)$$

$$N_2 = \int_{R_0}^{R+r} f_1 f_2 N_1 g(l) \exp\left[-\mu l + \int_{R+l}^{R+r} (\alpha - \eta) dx\right] dl \quad (1.15)$$

$$N_2 \geq N_1 \quad (1.16)$$

式中， $N_2$  为二次电子崩中的电荷数； $r$  为电子崩头部的半径； $f_1$  为一次碰撞电离同时辐射的光子数； $f_2$  为空气分子吸收光子后产生光电离的概率； $g(l)$  为反映部分光子消失于电极的特性函数；将电离区域分割成数层，每层的厚度为  $dl$ 。

正极性冲击电压下，流注起始需满足两个条件：一是电极表面电场强度要达到临界场强，二是电极头部的临界体积内要出现足够的自由电子。根据这两个条件，Les Renardières Group 提出了临界体积模型计算流注起始特性<sup>[65]</sup>，随后 Allen, Poli, Diaz 等学者对此模型进行了改进<sup>[103-105]</sup>。

## (2) 流注发展模型

流注发展模型主要用于描述流注的长度与形态，并计算流注区域的空间电荷量。Gallimberti 基于能量守恒思想，提出了流注发展的等效电子崩模型，可以计算单根流注分支的电流与发展长度，再根据试验获取的流注分支数和分支系数即可计算流注区域的空间电荷量<sup>[106]</sup>。Fofana 基于长空气间隙放电过程，提出了等效电路放电模型，假设流注区域为一个顶角 120° 的扇形，并根据流注区域与接地电极间的等效电容计算流注区域的空间电荷量<sup>[107]</sup>。如图 1.2 所示，Goelian 和 Lalande 等学者简化了流注发展等效电子崩模型，利用流注区域空间电荷对间隙放电路径电位分布的畸变量计算流注区域的长度和空间电荷量<sup>[108]</sup>。Beccera 和 Cooray 借鉴 Goelian-Lalande 模型思路，将流注区域视为含有环形电荷顶角为 120° 的锥体，利用模拟电荷法计算流注区域的空间电荷量<sup>[109-110]</sup>。Arevalo 和 Cooray 等学者在 Beccera-Cooray 模型的基础上，利用有限元仿真分析软件建立了流注区域随空间电位变化的流注发展模型（如图 1.3 所示）<sup>[111]</sup>，并在后续多个放电模型<sup>[19,112]</sup>中广泛应用。

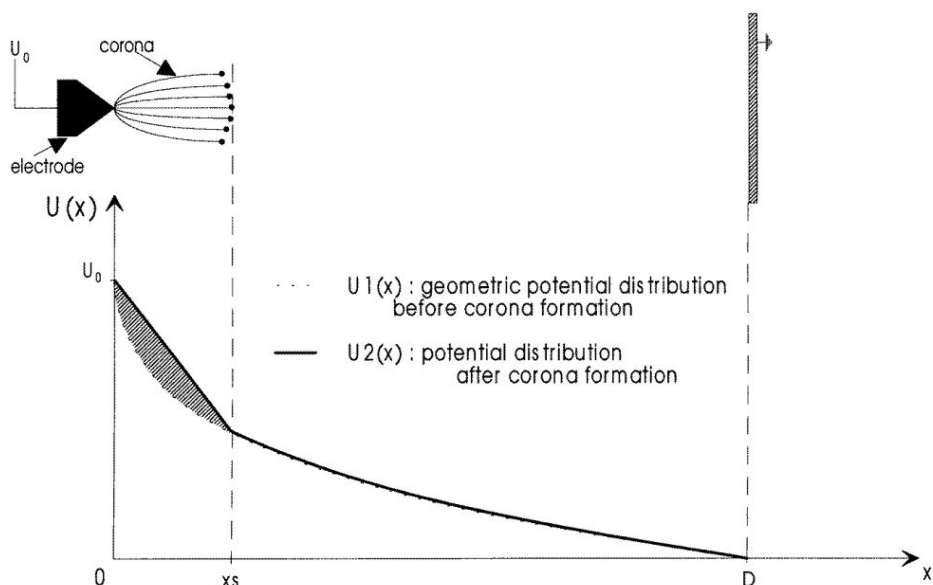


图 1.2 Goelian 和 Lalande 计算流注区域长度与空间电荷量方法示意图<sup>[108]</sup>

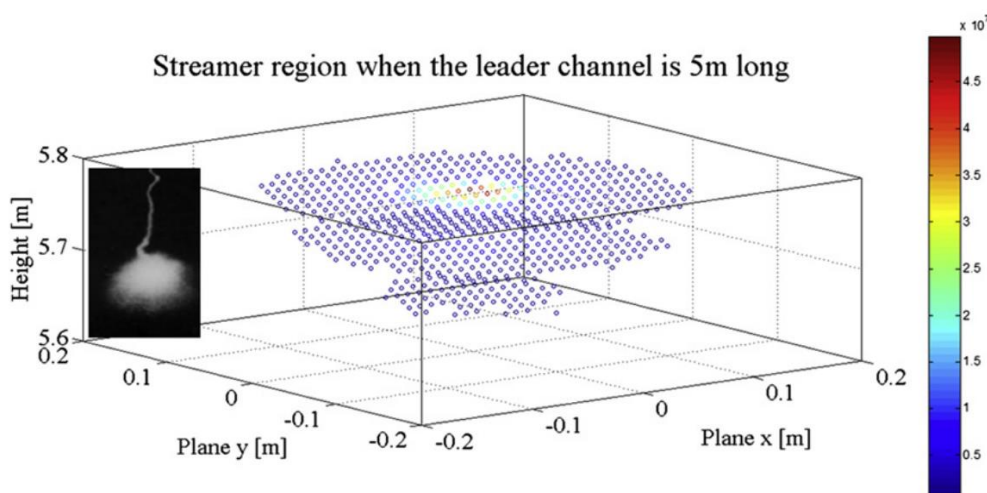


图 1.3 Arevalo 流注发展模型示意图<sup>[111]</sup>

### (3) 先导起始判据

先导放电是长空气间隙放电的第二个过程，也是长空气间隙放电研究中最受关注的放电阶段。先导起始，是长空气间隙从流注放电转向先导-流注体系发展的标志。Gallimberti<sup>[113]</sup>根据长空气间隙放电观测试验数据，认为流注区域产生的自由电子会经流注茎注入高压电极，电子移动过程中会与流注茎中气体分子发生弹性碰撞和非弹性碰撞，使流注茎温度升高，直至负离子脱附的临界温度时，流注茎中的负离子会转化为自由电子和中性分子，流注茎通道的电导率快速提升，流注茎转化为先导。据此，Bondiou 和 Gallimberti<sup>[114]</sup>基于热平衡方程计算了流注茎中分子温度的变化，并提出了先导起始的  $1 \mu\text{C}$  临界电荷判据。该判据广泛应用在 Beccera-Cooray 模型<sup>[109-110]</sup>，Arevalo 模型<sup>[111]</sup>和 Diaz 模型<sup>[19]</sup>中。Petrov 与 Bazelyan 等学者则根据长空气间隙放电试验数据，

提出了基于流注长度的先导起始判据<sup>[115-118]</sup>。近年来，谢耀恒、Arevalo 等学者通过开展试验研究和模型计算的方式，分析认为  $1 \mu\text{C}$  临界电荷判据可能过于严苛<sup>[84, 119]</sup>。谢耀恒等学者开展了棒-板间隙先导起始观测试验，认为  $0.22 \mu\text{C}$  可以作为流注先导转化的临界电荷量，并建立了考虑振动能弛豫过程的前导起始模型<sup>[84]</sup>。

#### (4) 先导-流注体系发展模型

先导起始后，长空气间隙放电以先导-流注体系向前发展。先导-流注体系发展模型主要用于描述先导通道特性及其发展速度。Waters<sup>[120]</sup>认为先导通道中电荷是由电子和中性粒子碰撞产生的，提出了先导通道的非局部热平衡方程。通过假设先导通道中能量全部以热的形式直接转化为气体，获得了任意位置的能量平衡方程，用于计算先导通道的电场强度。Galimberti<sup>[106]</sup>也提出了一个简化的非局部热平衡方程，假设先导通道是一个被包裹的均匀圆柱体，并且其内部压力、温度和粒子密度是恒定的，还假设先导通道的边界没有损耗，通道以恒定的质量扩张。通过计算非局部热平衡方程，可以确定先导内部电场强度。在 Galimberti 模型的基础上，Goelian 和 Lalande<sup>[108]</sup>等学者提出了另一种先导-流注体系发展模型，可以根据流注区域发展产生的新空间电荷计算每一步先导段的半径和内部电场强度。Fofana<sup>[107]</sup>等学者视先导通道为等效电阻，与流注区域的等效电容组成等效电路，可以计算放电发展过程中注入先导的电流。谢耀恒等学者开展了先导发展重燃现象的观测研究，揭示了先导发展重燃现象的机理，并建立了考虑重燃的先导-流注体系发展模型<sup>[84]</sup>。

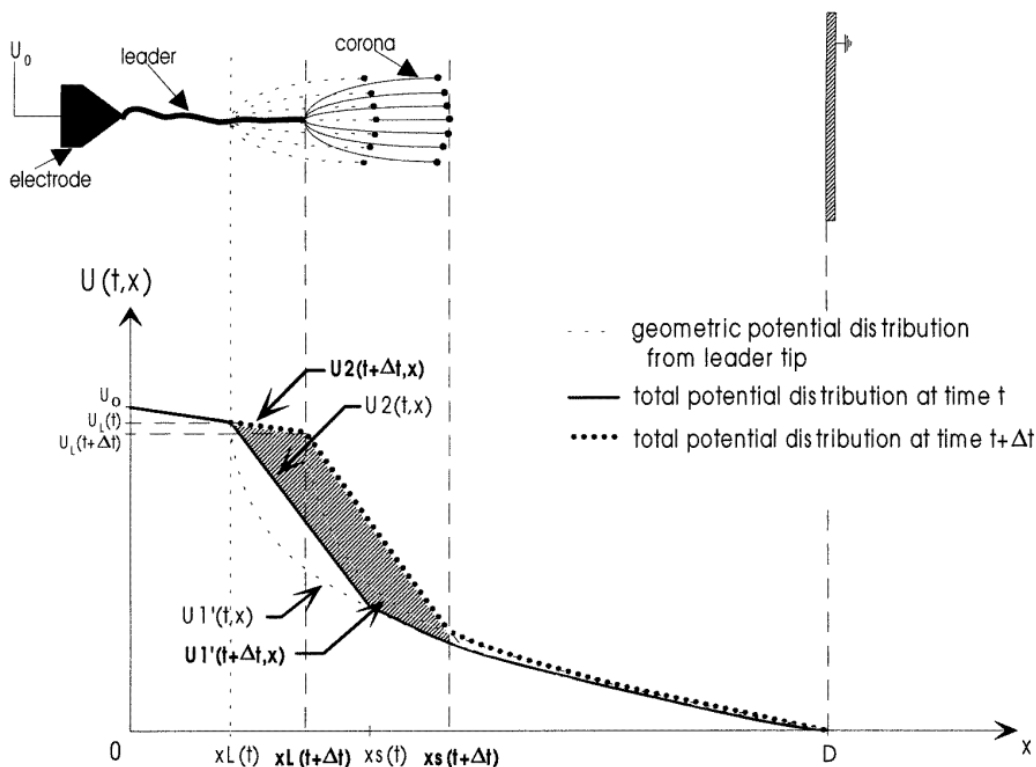


图 1.4 Goelian 和 Lalande 先导-流注体系发展模型计算示意图<sup>[108]</sup>

### 1.2.2 含悬浮导体长空气间隙放电研究现状

在长空气间隙中引入导体物质后，其间隙长度和空间结构发生了改变，直接影响了间隙的放电过程和绝缘性能。20 世纪 80 年代，Hutzler 和 Baldo 等学者分别开展了含悬浮导体长空气间隙放电特性的试验研究。Hutzler<sup>[121]</sup>开展了波形为 60/900  $\mu\text{s}$  冲击电压下的含悬浮导体长空气间隙放电试验研究，试验结果表明含有凸出物的悬浮导体会明显降低长空气间隙的绝缘强度。Hutzler 基于试验数据，采用外插与内插方法分析悬浮导体对绝缘强度的影响，提出了计算含悬浮导体长空气间隙击穿电压的经验公式。Baldo<sup>[122]</sup>研究了含悬浮导体对长空气间隙击穿电压的影响规律，发现悬浮导体在靠近高压电极一定距离时会出现一个临界位置，在此处间隙击穿电压最低；发现悬浮导体越长，占据间隙的空间越多，间隙绝缘强度下降越大；发现当悬浮导体结构不同时，间隙绝缘强度的变化也不相同。上述研究报道了含悬浮导体长空气间隙放电特性，但目前关于间隙长度、悬浮电极相似性、长波前时间、海拔高度和悬浮导体偏离间隙轴线等因素对放电特性影响规律的研究报道较少。

1995 年，Rizk<sup>[15]</sup>基于长空气间隙放电机理和含悬浮导体长空气间隙放电特性试验数据，分析了含悬浮导体长空气间隙的放电机理。Rizk 视含悬浮导体长空气间隙为两个独立的子间隙，即高压电极-悬浮电极间隙的子间隙 1 和悬浮电极-接地电极间隙的子间隙 2，通过分别计算子间隙 1 和子间隙 2 的击穿电压，建立了临界波前时间操作冲击电压下的含悬浮导体长空气间隙放电模型。Rizk 认为，随着悬浮导体在长空气间隙中移动，会在距离高压端 1/3~1/4 的位置出现最小击穿电压位置，这一结论在 CIGRE 带电作业报告<sup>[14]</sup>中也有类似报道。Rizk 模型是一个基于放电过程假设和试验数据近似拟合建立的工程模型，缺乏对放电物理过程的描述。目前，尚无基于含悬浮导体长空气间隙放电物理过程的放电仿真物理模型。

2009 年，Viljoen<sup>[123]</sup>开展了冲击电压下含棒型电极的棒-棒间隙放电观测试验，发现当悬浮棒电极位于不同位置时，间隙放电过程不同，但由于拍摄速率低，没有拍摄到完整的放电发展过程。Viljoen 还利用 Rizk 建立的含悬浮导体长空气间隙放电模型计算了间隙击穿电压，结果表明在悬浮导体靠近高压电极时，模型预测结果高于试验结果，误差较大。2018 年，王胜辉<sup>[124]</sup>等学者开展了雷电冲击电压下含棒型电极的棒-板间隙放电观测试验，获取了间隙放电过程（如图 1.5 所示），但由于雷电冲击电压下间隙的放电击穿速度快，放电发展过程时间短，高速相机难以拍摄到完整的放电发展过程。2020 年，鲁海亮<sup>[126]</sup>等学者开展了雷电冲击电压下含板型悬浮电极的棒-棒间隙的放电特性试验研究，研究了板型悬浮电极对击穿电压及击穿路径的影响。2021 年，王黎明<sup>[128]</sup>等学者开展了工频电压下含悬浮导体的 80 cm 长棒-板间隙的放电特性试验研究，利用高速相机拍摄到了工频电压下间隙的放电过程，并分析了放电路径出现“绕

过”悬浮电极击穿现象的产生原因。上述研究报道了含悬浮导体长空气间隙放电过程，但由于观测结果发展较快，且施加电压存在差异，目前操作冲击电压下含悬浮导体长空气间隙放电物理过程的仍不够明确，也缺乏最小击穿电压区域形成机理的观测研究。

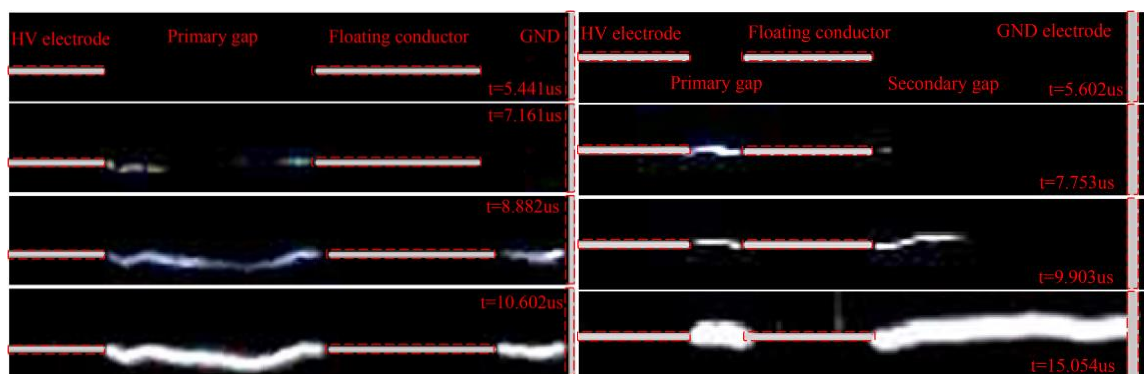


图 1.5 雷电冲击电压下含棒型悬浮导体的棒-板间隙放电过程<sup>[125]</sup>

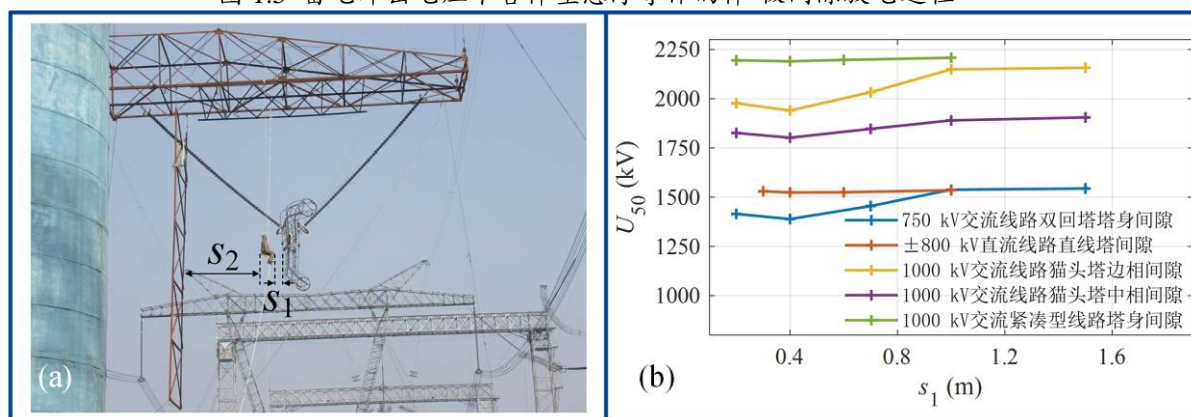


图 1.6 输电线路带电作业组合间隙真型试验<sup>[129-132]</sup>

(a) 真型试验现场布置图 (b) 真型试验击穿电压数据

在输变电工程领域，国内外学者也开展了大量工程中含悬浮导体长空气间隙放电的研究。我国从 20 世纪 90 年代起，随着高压输电网络的逐步建成和电压等级的不断提升，带电作业已成为线路检修、消缺的重要手段。为满足带电作业技术研究的需求，原武汉高压研究所（院）、中国电力科学研究院等单位针对各类输电杆塔结构中带电作业组合间隙的放电特性，开展了大量的间隙放电特性真型试验研究，通过带电作业危险率计算确定了不同情况下的最小组合间隙<sup>[7-13,129-132]</sup>。真型试验现场布置图和部分间隙击穿电压数据如图 1.6 所示，数据表明在不同杆塔结构中，最小击穿电压都出现在模拟人到导线距离  $s_1=0.4$  m 的位置，这与 CIGRE 带电作业报告中的结论有一定差异。针对这一差异，胡毅等学者探索了带电作业组合间隙的放电机理，认为最小击穿电压位置主要由作业人员对空间电场畸变和放电发展过程的影响决定，并通过分析作业人员进入等电位过程中的空间电场和电位分布特性，在 Rizk 含悬浮导体长空气间隙放电模型基础上，提出了适用于特高压线路带电作业组合间隙的改进模型<sup>[133]</sup>。现有研究为超、特高压线路带电作业的开展起到重要支撑作用，但仍存在可以进一步提升作

业安全性的工程问题。第一，最小击穿电压区域对作业人员人身安全具有最大威胁，现有研究较少关注最小击穿电压区域，探索最小击穿电压区域出现规律、揭示最小击穿电压区域形成机理对提升输电线路带电作业安全具有重要意义。第二，实际带电作业中作业人员姿态多样，真型试验难以穷举所有间隙结构，确定作业人员姿态变化对间隙放电特性的影响也有助于进一步确保作业人员的人身安全。第三，操作冲击电压波形和高海拔环境（低气压）会对空气间隙放电特性有明显影响<sup>[16]</sup>，明确这两个因素对于带电作业组合间隙放电特性的影响有助于进一步评估现有研究结论的安全性。第四，实际超、特高压线路带电作业中作业人员常采用吊篮法从杆塔上方荡至导线，导线-作业人员-杆塔的组合间隙长度有时会长于导线-杆塔的长空气间隙，研究放电击穿路径的特性可以为寻找更安全的进出等电位路径提供新思路。针对这些工程问题，现有含悬浮导体长空气间隙放电特性与放电机理研究尚无法提供充足的理论依据和科学解释。此外，开展带电作业真型试验还存在试验量繁重、试验周期长及试验成本高的问题。每当出现新的电压等级或者线路杆塔结构发生重大改变时，都需要重新开展带电作业真型试验以获取间隙放电特性，会耗费巨大的人力、物力。现有含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型适用性有限，且不能准确模拟放电发展过程，且无法在带电作业组合间隙放电中应用，目前还没有可以准确预测带电作业组合间隙放电特性的放电仿真模型。

除带电作业组合间隙外，输变电工程领域中还有其他含悬浮导体长空气间隙长期受到国内外学者关注。在输电走廊发生山火时，输电线路空气间隙中含有大量微粒，改变了空间电场分布，对放电产生明显促进作用，易导致输电线路跳闸。Naidoo<sup>[134]</sup>等学者开展了不同植被颗粒在线路间隙不同位置对间隙的绝缘强度影响的试验研究，试验结果表明高介电常数或高电导率材料对间隙绝缘强度影响明显，并且颗粒在靠近高压导体时，间隙击穿电压下降最为明显。黄道春<sup>[135-136]</sup>等学者搭建了山火模拟试验平台，模拟了山火对线路间隙影响的模拟试验，分析了火焰温度、高度、导热系数、放热率等燃烧特性对间隙的影响，还采集了不同植被的燃烧灰烬，分析了各类颗粒对空间电场分布和绝缘强度的影响规律。此外，近年来，输电线路涉鸟类故障频发，其中鸟类排泄造成的鸟粪类故障占比较高，是造成涉鸟线路跳闸的主要原因。鸟类在横担上排泄出含有水分与电解质的排泄物，排泄物下落过程中形成一条细长导体，缩短了线路空气间隙的距离，易造成间隙击穿。周远翔<sup>[137]</sup>等学者开展了输电线路鸟粪闪络试验，研究了鸟粪体积、电导率和粘度等因素对闪络的影响，分析了线路闪络的高风险区域。华北电力大学学者分析了鸟粪通道下落过程造成输电线路闪络的三种下落模式，分别研究了交流线路和直流线路中模拟鸟粪对间隙绝缘强度的影响，提出了考虑鸟粪故障的线路最小空气间隙距离<sup>[138-139]</sup>。

另外，飞机在飞行过程中会遭受到雷击，每 1000 个飞行小时就会有一架商用飞机遭受一次雷击。飞机遭受雷击多是由飞机产生双向先导引发的，在强电场中，飞机是



一悬浮导体，其两端会产生正极性与负极性先导，先导的不断发展导致空气间隙击穿。Castellani<sup>[140-141]</sup>等学者开展了冲击电压下板电极-悬浮导体-板电极间隙的放电试验，以模拟飞机遭受雷击的场景。试验观测了放电的发展过程，比较了正极性先导与负极性先导的放电特征，分析了起始电压、流注电荷和先导发展速度等物理参数。根据飞机双向先导放电物理过程和长空气间隙放电模型，Das 与 Kumar 提出了飞机在强电场中产生双向先导的仿真模型<sup>[142]</sup>。

### 1.2.3 有待研究的问题

根据上述研究现状分析可知，目前针对长空气间隙放电特性、放电机理与放电模型的研究已较为成熟，研究结论为输变电设备外绝缘设计和雷电防护提供了重要的理论依据与技术支撑。但是，目前针对冲击电压下含悬浮导体长空气间隙放电的研究还有所欠缺，主要体现在：含悬浮导体长空气间隙放电特性研究不够全面，各类因素对击穿电压和最小击穿电压区域的影响规律尚不明确；完整的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程尚不确定，最小击穿电压的形成机理尚不明确；缺少可以描述物理过程、计算间隙击穿电压的放电仿真模型。这就导致现有含悬浮导体长空气间隙放电研究尚无法为输电线路带电作业组合间隙等工程领域中存在的工程问题提供足够的理论依据与科学解释，例如：带电作业组合间隙击穿电压和最小击穿电压区域规律不明确，间隙最小击穿电压区域形成机理不清楚，依赖成本高、周期长的真型试验确定间隙放电特性。因此，亟需开展对含悬浮导体长空气间隙放电特性、放电机理及放电仿真模型的研究。有待研究的问题如下：

#### (1) 含悬浮导体长空气间隙放电特性

长空气间隙击穿电压主要受间隙长度、电极结构、波前时间和海拔高度等因素的影响。这些因素对含悬浮导体长空气间隙击穿电压的影响规律目前尚不清楚。悬浮导体的介入会改变长空气间隙的空间结构，从而影响间隙击穿电压，但当悬浮导体偏离间隙的轴线时，其对空间结构的影响减小，对击穿电压的影响规律也有待研究。此外，随着悬浮导体位置的变化，含悬浮导体长空气间隙中会出现一个最小击穿电压区域，上述因素在影响击穿电压时，也可能会影响最小击穿电压区域的分布，目前还未有相关研究结论报道。针对这些问题，有必要开展含悬浮导体长空气间隙放电特性试验，获取不同情况下间隙的击穿电压，从而确定各类因素对含悬浮导体长空气间隙放电特性的影响规律。

#### (2) 含悬浮导体长空气间隙放电机理

长空气间隙放电主要由初始电晕起始、流注-先导转化、先导发展、末跃和击穿等阶段组成。长空气间隙放电的发展与其间隙结构有密切联系，显著的间隙结构改变会影响上述放电阶段的起始与发展。在含悬浮导体长空气间隙中，悬浮导体的介入明显

改变了间隙的空间结构, 间隙由原有的高压电极-接地电极间隙变成了高压电极-悬浮电极-接地电极间隙, 其放电发展过程因此发生变化。现有研究中还少有报道完整的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程, 因此有必要开展含悬浮导体长空气间隙放电观测试验, 确定悬浮导体在间隙不同位置时间隙的放电物理过程。另外, 针对含悬浮导体长空气间隙具有最小击穿电压区域的特性, 有必要有针对性地开展悬浮导体位于最小击穿电压区域时的放电观测试验, 解释最小击穿电压区域的形成机理。

### (3) 含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型

空气间隙放电仿真模型是模拟放电演变过程、计算间隙击穿电压的重要手段。现有长空气间隙放电仿真模型已较为成熟, 但无法直接应用在含悬浮导体长空气间隙放电中, 导致含悬浮导体长空气间隙放电特性的确定仍依赖于放电特性试验。针对这一问题, 有必要根据含悬浮导体长空气间隙放电机理建立可以描述放电物理过程、预测间隙击穿电压的放电仿真模型。

## 1.3 论文主要工作

本文在特高压工程技术(昆明)国家工程实验室开放基金项目“组合空气间隙放电仿真模型”和电网环境保护国家重点实验室开放基金项目“带电作业电位转移放电与转移机制及特征参数仿真建模研究”等项目资助下, 开展了含悬浮导体长空气间隙放电特性、放电机理及放电仿真模型的研究。论文主要工作如下:

第 1 章为绪论, 介绍了含悬浮导体长空气间隙放电特性与放电仿真模型的研究背景和意义, 分析了相关领域国内外研究现状及有待研究的问题, 介绍了本论文的主要研究内容。

第 2 章开展了含悬浮导体长空气间隙放电特性研究。分别在武汉大学高电压试验大厅、国家电网公司武汉特高压交流试验基地、南方电网公司昆明特高压试验基地搭建了含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台, 研究了间隙长度、悬浮电极结构、操作冲击电压波前时间、海拔高度和悬浮导体偏离轴线等因素对间隙击穿电压的影响规律, 确定了含悬浮导体长空气间隙的放电特性。基于含悬浮导体长空气间隙放电特性研究得到的结论, 分析了输电线路带电作业组合间隙的放电特性。

第 3 章开展了含悬浮导体长空气间隙放电观测研究。设计了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台, 并分别在武汉大学高电压试验大厅和南方电网公司昆明特高压试验基地搭建平台开展了低海拔环境和高海拔环境的放电观测试验, 确定了间隙放电物理过程。对比分析了含棒型悬浮电极间隙和含具有明显凸出物复杂结构悬浮电极间隙的放电过程, 解释了两类间隙击穿电压相似的原因。

第 4 章开展了含悬浮导体长空气间隙最小击穿电压区域形成机理研究。开展了低海拔环境和高海拔环境中悬浮导体位于最小击穿电压区域时间隙的放电观测试验, 根



据最小击穿电压区域中放电物理过程的变化规律，揭示了含悬浮导体长空气间隙中最小击穿电压区域的形成机理。

第 5 章开展了含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型研究。根据观测到的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程，利用长空气间隙放电中流注起始与发展模型、先导起始与发展模型，建立了可以描述放电物理过程、计算间隙击穿电压的含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型。使用建立的放电仿真模型分别预测计算了简单电极构成的含悬浮导体长空气间隙和输电线路带电作业组合间隙的击穿电压，利用放电特性试验数据证明了放电仿真模型的有效性。

第 6 章为结论与展望，对本文的主要研究结论进行了总结，并提出进一步研究的方向与展望。

各章的主要内容与相互关系如图 1.7 所示。

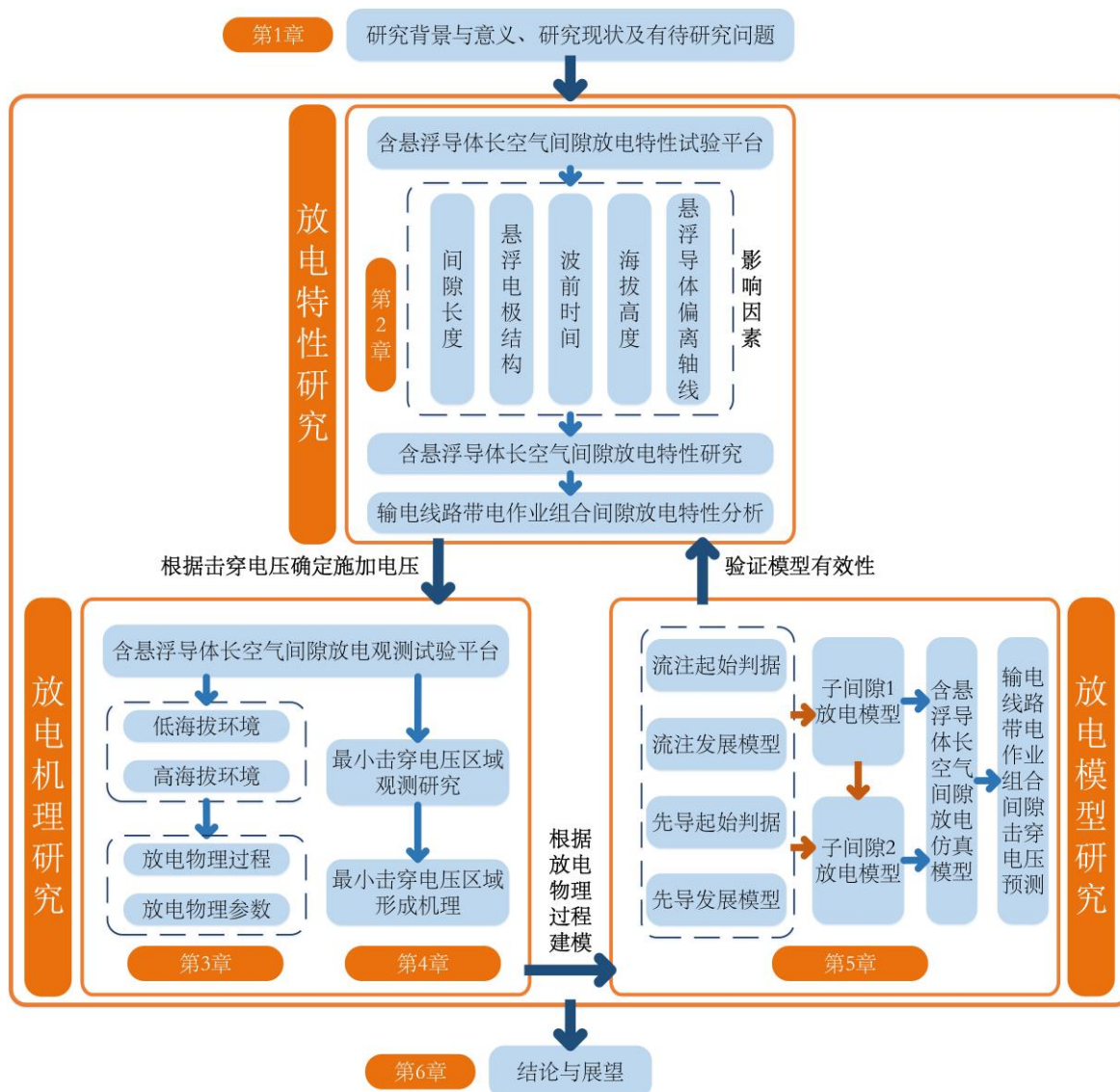


图 1.7 各章主要内容与相互关系

## 2 含悬浮导体长空气间隙放电特性研究

带电作业组合间隙的放电特性是确定最小组合间隙的重要依据。我国超、特高压线路带电作业组合间隙真型试验数据显示，随着模拟人由导线向杆塔移动，间隙击穿电压会先下降再上升，出现一个最小击穿电压位置。并且，在不同间隙尺寸的超、特高压线路杆塔中，最小击穿电压位置都出现在距离导线 0.4 m 的位置<sup>[7-13,129-132]</sup>。这与 CIGRE 带电作业报告<sup>[14]</sup>与文献[15]中报道的含悬浮导体长空气间隙的最小击穿电压位置出现在距离高压电极 1/3 至 1/4 的位置有一定区别。含悬浮导体长空气间隙的间隙长度是否影响最小击穿电压位置有待深入研究。其次，实际带电作业中作业人员姿态多样，真型试验难以穷举所有间隙结构，悬浮导体结构变化对击穿电压及最小击穿电压位置的影响规律也是进一步确定带电作业作业人员安全性的关键。再次，操作冲击电压波形和高海拔环境（低气压）对长空气间隙放电特性有明显影响<sup>[16]</sup>，但这两个因素对于含悬浮导体长空气间隙放电特性的影响尚未可知。最后，实际超、特高压线路带电作业中作业人员常采用吊篮法从杆塔上方荡至导线，导线-作业人员-杆塔的组合间隙长度有时会长于导线-杆塔的长空气间隙。悬浮导体偏离长空气间隙轴线对放电特性的影响规律有助于寻找更安全的进出等电位路径。因此，针对上述问题，本章搭建了含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台，分别开展了间隙长度、悬浮导体结构、操作冲击电压波前时间、海拔高度和悬浮导体偏离轴线等因素对间隙放电特性影响的试验研究。根据试验结果确定了上述因素的影响规律，并基于此分析了带电作业组合间隙的放电特性。此外，本节试验结果还可以为后续放电观测研究与放电仿真模型研究提供数据支撑。

### 2.1 含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台及试验方法

#### 2.1.1 含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台

本文分别在武汉大学高电压试验大厅、国家电网公司武汉特高压交流试验基地、南方电网公司昆明特高压试验基地搭建了含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台，如图 2.1 所示。

试验使用的施加电压为正极性操作冲击电压，分别由 3000 kV 冲击电压发生器（武汉大学高电压试验大厅）、7500 kV 冲击电压发生器（国家电网公司武汉特高压交流试验基地）、7200 kV 冲击电压发生器（南方电网公司昆明特高压试验基地）产生。施加电压通过分压器和高精度示波器进行测量。分压器顶端与冲击电压发生器输出端相连，衰减后的电压信号通过信号线传输到高精度示波器。根据示波器获得的波形乘以衰减

倍数即可确定施加电压的波形。使用网线连接示波器与电脑，从电脑端即可读取电压数据。微单相机用于拍摄间隙放电的击穿路径，所用微单相机型号为 Panasonic DC-G9L，采用 60 fps 连拍模式，在施加电压前 1 秒内（通过加压警铃或者充电电压判断）按下快门即可抓拍到间隙击穿路径。

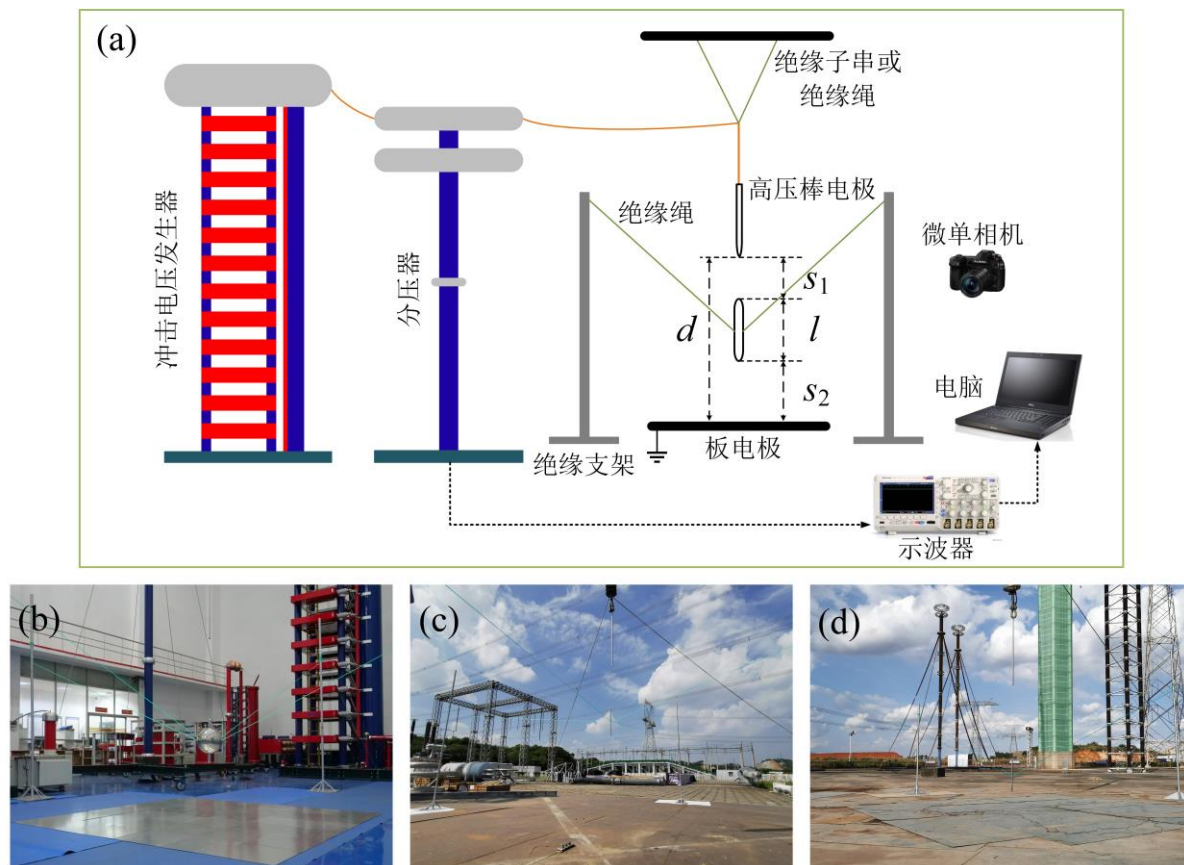


图 2.1 含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台

(a) 示意图 (b) 武汉大学高电压试验大厅

(c) 国家电网公司武汉特高压交流试验基地 (d) 南方电网公司昆明特高压试验基地

试验以棒-板长空气间隙为研究对象，模拟带电作业组合间隙中导线-杆塔间隙。高压棒电极长 1 m，半径 10 mm，末端为半球形。高压棒电极通过高压引线与冲击电压发生器输出端相连。接地板电极由多块金属板紧密拼接而成，金属板下布有铜线或金属网以保证良好电气连接。悬浮导体由 4 组绝缘支架和绝缘绳吊起，绝缘支架为涂有绝缘漆的可旋转式不锈钢支架，绝缘绳为直径 10 mm 的聚乙烯绳。绝缘绳一端固定在一侧绝缘支架，另一端穿过悬浮导体固定在对侧绝缘支架上（应用于棒型悬浮电极），或者直接固定在悬浮电极的螺母上（应用于球型悬浮电极）。绝缘支架位于两两垂直的四个方向，使悬浮电极可以稳定悬于空中。通过旋转绝缘支架可以调整绝缘绳的松紧程度，调整悬浮电极不同方向的拉力，从而调整悬浮电极到高压电极和板电极的距离。间隙长度的定义如图 2.1(a)中所示，高压棒电极到板电极的距离为总间隙长度  $d$ ，悬浮电极长度为  $l$ ，高压棒电极到悬浮电极的距离为子间隙 1 长度  $s_1$ ，悬浮电极到板电极的

距离为子间隙 2 长度  $s_2$ 。

### 2.1.2 含悬浮导体长空气间隙放电特性试验方法

试验采用国家标准 GB/T 16927.1-2011《高电压试验技术第一部分：一般试验要求》<sup>[143]</sup>推荐的升降法确定间隙的 50% 击穿电压。首次加压前预估间隙的 50% 击穿电压  $U_0$ ，以  $U_0$  作为初试电压值施加在高压电极上。取级差  $\Delta U=(1.5\% \sim 3\%)U_0$ ，若加压后，间隙未击穿，则下次施加电压升高  $\Delta U$ ；若间隙击穿，则下次施加电压降低  $\Delta U$ 。重复上述步骤对每个间隙多次加压，连续两次试验时间间隔不低于 90 s。有效试验次数从第一个重复出现的施加电压值开始计数，有效试验次数不低于 20 次。间隙 50% 击穿电压  $U_{50}$ 、标准差  $\sigma$  和相对标准偏差  $RSD$  按照下列公式计算：

$$U_{50} = \frac{\sum n_i \times U_i}{n} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - U_{50})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$RSD = \sigma / U_{50} \quad (2.3)$$

式中， $U_i$  为所施加的电压，kV； $n_i$  为施加同一电压  $U_i$  的试验次数； $n$  为有效试验的总次数。95% 置信区间（95% CI）计算公式为：

$$\left[ U_{50} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, U_{50} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (2.4)$$

在每次放电试验开始前和结束后分别记录气象参数，包括气压  $p$ 、环境温度  $t$  和相对湿度  $RH$ ，并取试验前后两次测量值的平均值作为该次试验的气象参数。相对空气密度  $\delta$  和绝对湿度  $h$  可以根据记录的气象参数按照下列公式计算得到：

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} \quad (2.5)$$

$$h = \frac{6.11 \times RH \times e^{\frac{17.6t}{243+t}}}{0.4615 \times (273+t)} \quad (2.6)$$

式中， $p$  和  $p_0$  分别为试验地点和标准条件下的大气压力， $p_0=101.3$  kPa； $t$  和  $t_0$  分别为试验地点和标准条件下的温度， $t_0=20^\circ\text{C}$ 。放电试验结果  $U_{50}$  的大气修正采用 IEC 标准 60060-1: 2010<sup>[143]</sup> 和我国国家标准 GB/T 16927.1-2011<sup>[143]</sup> 中推荐的外绝缘破坏性放电电压大气条件修正方法。破坏性放电电压值正比于大气修正因数  $K_t$ ，将试验条件下获得的破坏性放电电压  $U$  除以  $K_t$ ，可以得到标准大气条件（温度  $20^\circ\text{C}$ ，绝对压力 101.3 kPa，

绝对湿度  $11 \text{ g/m}^3$ ) 下的电压值  $U_0$ :

$$U_0 = U/K_t \quad (2.7)$$

大气修正因数  $K_t$  是空气密度校正系数  $k_1$  和湿度校正系数  $k_2$  的乘积:

$$K_t = k_1 k_2 \quad (2.8)$$

空气密度校正系数  $k_1$  与湿度校正系数  $k_2$  的表达式为:

$$k_1 = \delta^m \quad (2.9)$$

$$k_2 = k^w \quad (2.10)$$

式中,  $k$  为与试验电压类型有关的参数, 冲击电压下  $k=1+0.01(h/\delta-11)$ ; 指数  $m$  和  $w$  根据参数  $g$  的范围确定, 如表 2.1 所示。参数  $g$  的计算公式为:

$$g = \frac{U_{50}}{500L\delta k} \quad (2.11)$$

式中,  $U_{50}$  为实际大气条件下的 50% 放电电压, kV;  $L$  为最短放电路径长度, m。

表 2.1 空气密度校正指数  $m$  和湿度校正指数  $w$  与参数  $g$  的关系

$g$	$m$	$w$
$<0.2$	0	0
0.2~1.0	$g(g-0.2)/0.8$	$g(g-0.2)/0.8$
1.0~1.2	1.0	1.0
1.2~2.0	1.0	$(2.2-g)(2-g)/0.8$
$>2.0$	1.0	0

## 2.2 间隙长度对放电特性的影响研究

带电作业组合间隙真型试验结果表明, 在不同尺寸间隙中最小击穿电压位置都出现在距离高压导线 0.4 m 的位置, 但考虑到真型试验中选取的模拟人位置点较少, 间隙长度对最小击穿电压位置的影响规律还不能完全确定。因此, 本节开展了含悬浮导体长空气间隙长度对放电特性影响的研究。本节试验分别于武汉大学高电压试验大厅开展了总间隙长度  $d=1.5 \text{ m}$ ,  $2 \text{ m}$ ,  $2.5 \text{ m}$  的含悬浮导体长空气间隙的放电试验, 于国家电网公司武汉特高压交流试验基地开展了总间隙长度  $d=3 \text{ m}$  的含悬浮导体长空气间隙的放电试验。两个试验场地都位于湖北省武汉市, 武汉大学高电压试验大厅的海拔高度  $H$  约为 41 m, 国家电网公司武汉特高压交流试验基地的海拔高度  $H$  约为 38 m<sup>[145]</sup>。

试验使用的施加电压为波形 250/2500  $\mu\text{s}$  的正极性标准操作冲击电压。参考带电作业人员占位 0.5 m 的特点, 试验选用悬浮电极 A——长 50 cm、直径 20 mm、两端为半球的棒型电极作为悬浮导体。悬浮电极 A 的中间区域有四个开孔, 可以穿过绝缘绳使其悬于空中。本节试验中, 在不同总间隙长度和子间隙长度的间隙中, 共开展有效放电试验 703 次, 试验确定了间隙的击穿电压, 并利用相机拍摄了间隙的击穿路径。试

验中环境温度为 30.3°C~34.6°C，相对湿度为 58%~68%，气压为 99.2~101.5 kPa。根据 2.1.2 节中的大气条件修正方法，将试验确定的击穿电压修正至标准大气压下的击穿电压，击穿电压数据如表 2.2 所示。

表 2.2 不同间隙长度间隙的击穿电压

$d$ (m)	$s_1$ (cm)	$U_{50}$ (kV)	$RSD$ (%)	95% CI (kV)
1.5	10	428.4	2.5	[424.5, 432.3]
	30	410.7	3.2	[405.9, 415.4]
	40	381.0	2.4	[377.7, 384.3]
	50	409.4	2.5	[405.8, 413.0]
	60	457.4	2.2	[453.8, 461.0]
	70	490.0	2.1	[486.4, 493.6]
2	10	612.6	1.9	[608.5, 616.8]
	30	607.6	2.7	[601.9, 613.3]
	50	556.1	3.1	[549.9, 562.3]
	60	538.1	2.7	[532.9, 543.2]
	70	568.6	1.7	[565.3, 572.0]
	90	654.6	3.8	[646.1, 663.2]
	120	693.8	2.1	[688.6, 699.0]
2.5	20	740.8	2.3	[734.8, 746.8]
	40	740.6	1.8	[736.0, 745.2]
	60	682.5	2.4	[676.6, 688.3]
	70	667.6	2.0	[662.8, 672.5]
	80	677.4	2.8	[670.7, 684.0]
	90	677.3	1.7	[673.3, 681.3]
	120	773.6	2.0	[768.1, 779.0]
3	40	855.1	3.4	[843.3, 866.9]
	80	807.9	3.3	[797.1, 818.6]
	120	867.5	3.5	[854.8, 880.2]
	160	933.2	3.3	[920.7, 945.6]

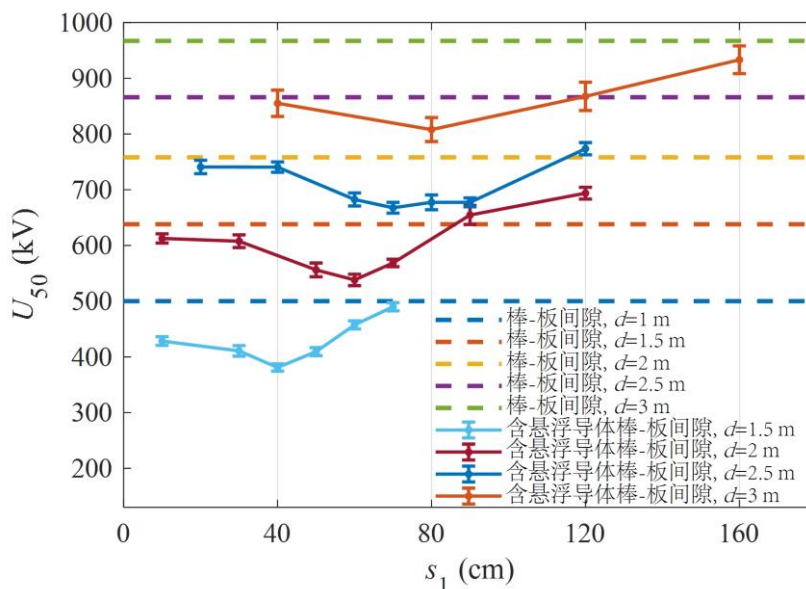


图 2.2 不同间隙长度的含悬浮导体长空气间隙击穿电压

为更直观体现含悬浮导体长空气间隙击穿电压受间隙长度的影响规律，图 2.2 绘制了不同间隙长度间隙的击穿电压曲线，此外还绘制了利用公式(1.2)计算的间隙长度分别为 1 m，1.5 m，2 m，2.5 m 和 3 m 的棒-板间隙击穿电压，用于分析悬浮导体对长空



气间隙击穿电压的影响规律。

图 2.2 中击穿电压曲线表明,在总间隙长度为 1.5~3 m 的含悬浮导体长空气间隙中,随着悬浮电极沿间隙轴线逐渐远离高压电极 ( $s_1$  逐渐增加),击穿电压  $U_{50}$  先下降后上升,击穿电压曲线会出现一个拐点。在  $d=1.5$  m 的间隙中,击穿电压曲线的拐点出现在  $s_1=40$  cm 的位置;在  $d=2$  m 的间隙中,击穿电压曲线的拐点出现在  $s_1=60$  cm 的位置;在  $d=2.5$  m 的间隙中,击穿电压曲线的拐点出现在  $s_1=70$  cm 的位置;在  $d=4$  m 的间隙中,击穿电压曲线的拐点出现在  $s_1=80$  cm 的位置。但由于试验中选取的悬浮电极位置是离散的,试验结果中出现击穿电压曲线拐点的位置不一定是含悬浮导体长空气间隙实际的最小击穿电压位置。因此,只能认为最小击穿电压位置出现在试验结果最小值位置及其周围的区域(定义为最小击穿电压区域)中。由此,本文认为在悬浮电极 A 的影响下, $d=1.5$  m 的间隙中最小击穿电压位置在  $s_1=30\sim 50$  cm 的范围内, $d=2$  m 的间隙中最小击穿电压位置在  $s_1=50\sim 70$  cm 的范围内, $d=2.5$  m 的间隙中最小击穿电压位置在  $s_1=60\sim 80$  cm 的范围内, $d=3$  m 的间隙中最小击穿电压位置在  $s_1=40\sim 120$  cm 的范围内。上述结果表明,随着含悬浮导体长空气间隙总间隙长度的变化,最小击穿电压区域也会发生变化。

图 2.2 中击穿电压曲线还表明,当在长空气间隙中引入悬浮导体时,悬浮导体的存在显著降低了空气间隙的击穿电压。在  $d=1.5$  m、2 m、2.5 m 和 3 m 的间隙中,击穿电压的最大下降率分别为 40%、29%、23%和 16%。上述结果表明,带有明显凸出物的悬浮导体可以显著降低长空气间隙的击穿电压,随着总间隙长度的增加,悬浮导体对击穿电压影响的最大下降率会降低。

此外,图 2.2 中击穿电压曲线还可以用于比较间隙长度之和相同的棒-板间隙和含悬浮导体棒-板间隙的击穿电压的差异。 $d=1.5$  m 的含悬浮导体棒-板间隙(间隙长度之和为  $s_1+s_2=1$  m)的击穿电压与间隙长度为 1 m 的棒-板间隙击穿电压相比,当悬浮导体靠近高压电极时,前者明显小于后者,最大差距达到 23.8%;当悬浮导体逐渐远离高压电极时,两者的差距逐渐缩小,趋于一致,在  $s_1=70$  cm 时,差距仅为 2%。而在  $d=2$  m、2.5 m 和 3 m 含悬浮导体棒-板间隙(间隙长度之和分别为  $s_1+s_2=1.5$  m、2 m 和 2.5 m)的击穿电压与间隙长度分别为 1.5 m、2 m 和 2.5 m 的棒-板间隙击穿电压的比较中,当悬浮导体位于最小击穿电压区域附近时( $d=2$  m 间隙中,  $s_1=50\sim 70$  cm;  $d=2.5$  m 间隙中,  $s_1=50\sim 70$  cm;  $d=3$  m 间隙中,  $s_1=80$  cm),前者明显小于后者,最大差距分别为 15.7%、11.9%、6.7%;当悬浮导体靠近高压电极时( $d=2$  m 间隙中,  $s_1=10\sim 30$  cm;  $d=2.5$  m 间隙中,  $s_1=20\sim 40$  cm;  $d=3$  m 间隙中,  $s_1=40$  cm),前者与后者较为接近,最小差距分别为 4%、2.3%、1.3%;当悬浮导体靠近接地电极时( $d=2$  m 间隙中,  $s_1=90\sim 120$  cm;  $d=2.5$  m 间隙中,  $s_1=120$  cm;  $d=3$  m 间隙中,  $s_1=120\sim 160$  cm),前者接近或者大于后者。上述两种对比的差异,可能是由  $d=1.5$  m 含悬浮导体棒-板间隙的最小击穿电压区域靠近高压电极造成的,因此在这一间隙中也可以看作悬浮导体位于最小击穿电

压区域时，间隙击穿电压小于  $d=1$  m 长空气间隙击穿电压。综上，本文认为，当悬浮导体位于最小击穿电压区域附近，含悬浮导体长空气间隙的击穿电压明显小于间隙长度为子间隙长度之和的长空气间隙的击穿电压；当悬浮导体在其他位置时，前者接近或者高于后者。

### 2.3 悬浮导体结构对放电特性的影响研究

实际输电线路带电作业过程中，带电作业人员姿态多样，而真型试验使用的模拟人难以穷举所有的作业人员姿态，作业人员姿态的变化可能是间隙击穿电压及最小击穿电压位置的影响因素。研究姿态变化的影响规律对确定带电作业人员安全性有着重要的意义。因此，本节在武汉大学高电压试验大厅开展了悬浮导体结构对含悬浮导体长空气间隙放电特性影响的研究。

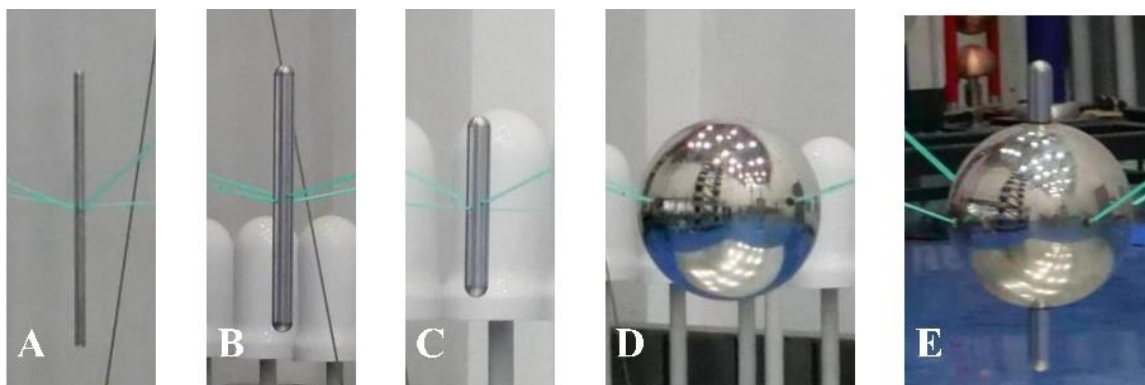


图 2.3 不同结构的悬浮电极图片

在 2.2 节试验中，悬浮导体为长 0.5 m、直径 20 mm 的棒型悬浮电极 A。考虑到电极直径可能是影响间隙放电特性的因素，制作了直径大于悬浮电极 A 直径的悬浮电极 B——长 50 cm、直径 40 mm、两端为半球的棒型电极。考虑到悬浮电极 A 在间隙中的占比与作业人员在线路间隙中的占比相比偏大，制作了长度小于悬浮电极 A 和悬浮电极 B 的悬浮电极 C——长 30 cm、直径 40 mm、两端为半球的棒型电极。考虑到进出等电位时，作业人员可能会蜷缩身体，形成不具有明显凸出物的电极，制作了悬浮电极 D——半径为 15 cm 的球型电极。考虑到人体体积大，但是具有头部、手部、脚部、膝盖等凸出物，建立了悬浮电极 E——半径 15 cm 的球型，两端有总长 50 cm、半径 20 mm、两端为半球的棒型凸出物的组合电极。五种悬浮电极结构如图 2.3 所示。悬浮电极 A、B、C 的中间区域有四个开孔，可以穿过绝缘绳，使电极保持悬浮状态；悬浮电极 D、E 的球型电极上焊有四个不同方向的螺母，可以用绝缘绳固定，使电极保持悬浮状态。悬浮电极 D、E 的螺母凸出于球电极表面，会畸变电场分布，放电特性与无凸出物的单一球电极相比有一定区别。

试验使用的施加电压为波形 250/2500  $\mu$ s 的正极性标准操作冲击电压。本节开展了两部分试验，分别研究不同尺寸、结构的悬浮电极对同一间隙长度长空气间隙击穿电



压的影响和不同尺寸、结果的悬浮电极对相同子间隙长度之和间隙击穿电压的影响。第一部分试验为不同悬浮电极对同一间隙长度长空气间隙击穿电压影响的试验，开展了总间隙长度  $d=2\text{ m}$  的含悬浮电极 B、C、D、E 的棒-板间隙放电试验，共开展有效放电试验 1147 次，试验中环境温度为  $21.6^{\circ}\text{C}\sim 28.3^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为  $58\%\sim 73\%$ ，气压为  $99.9\sim 101.5\text{ kPa}$ 。第二部分试验为不同悬浮电极对相同子间隙长度之和间隙击穿电压影响的试验，开展了总间隙长度  $d=1.8\text{ m}$  的含悬浮电极 C、D 的棒-板间隙放电试验，子间隙之和  $s_1+s_2$  之和为  $1.5\text{ m}$ ，与总间隙长度  $d=2\text{ m}$  含悬浮电极 A、B、E 的棒-板间隙相同，共开展有效放电试验 304 次，试验中环境温度为  $8.4^{\circ}\text{C}\sim 11^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为  $34\%\sim 39\%$ ，气压为  $102.3\sim 103.5\text{ kPa}$ 。根据 2.1.2 节中的大气条件修正方法，将试验确定的击穿电压修正至标准大气压下的击穿电压，击穿电压数据如表 2.3 所示。试验中使用相机拍摄到的含有不同结构悬浮电极的长空气间隙击穿路径如图 2.4 所示。

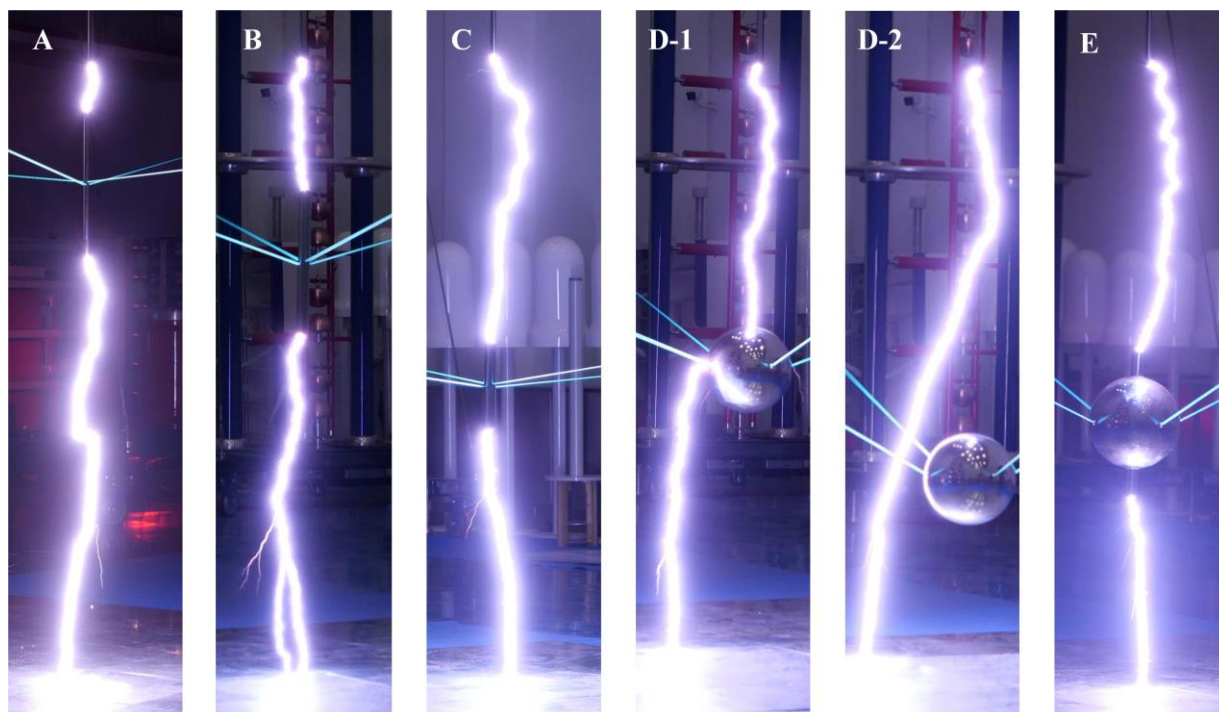


图 2.4 含有不同结构悬浮电极长空气间隙击穿路径

图 2.4 显示在含有棒型悬浮导体（即悬浮电极 A、B、C）的空气间隙中，击穿路径由两段放电通道组成，分别连接了高压棒电极末端和悬浮导体上端，以及悬浮导体下端和板电极。在含有悬浮电极 D 的空气间隙中，出现了两类击穿路径。第一类击穿路径由两段放电通道组成，第一段放电通道连接了高压棒末端和球电极上表面，第二段放电通道连接了球电极侧面用于固定绝缘绳的螺母和板电极；第二类击穿路径只有一段放电通道，放电通道绕过球电极，直接连接了高压棒末端和板电极，这一类放电路径出现次数较少，在 303 次试验中只出现了 3 次，并且都出现在  $s_1=120\text{ cm}$  处。在含有组合悬浮电极 E 的空气间隙中，击穿路径与含有棒型悬浮导体的空气间隙相似，击穿路径由两段放电通道组成，分别连接了高压棒电极末端和悬浮导体上端，以及悬浮

导体下端和板电极。

表 2.3 含不同结构悬浮电极间隙的击穿电压

$d$ (m)	悬浮电极	$s_1$ (cm)	$U_{50}$ (kV)	$RSD(\%)$	95% CI (kV)
2	B	10	618.1	2.1	[613.6, 622.7]
		20	605.8	1.8	[601.9, 609.8]
		30	603.4	2.6	[597.7, 609.1]
		40	576.6	1.7	[573.1, 580.2]
		50	570.5	2.1	[566.3, 574.8]
		60	559.8	2.6	[554.7, 564.9]
		70	588.4	2.5	[583.1, 593.6]
		90	645.6	1.7	[641.8, 649.4]
	C	120	718.6	2.4	[712.6, 724.6]
		10	688.5	1.7	[684.5, 692.4]
		20	672.8	1.3	[669.7, 675.9]
		30	670.8	2.7	[664.4, 677.3]
		40	642.4	2.3	[637.3, 647.5]
		50	611.0	3.0	[604.5, 617.5]
		60	627.9	2.0	[623.3, 632.4]
		90	702.7	2.9	[695.5, 709.9]
	D	120	751.4	1.7	[747.0, 755.7]
		10	768.1	2.1	[762.3, 773.8]
		20	748.2	1.5	[744.1, 752.2]
		30	729.7	1.8	[725.1, 734.3]
		40	722.8	2.3	[717.7, 727.9]
		50	717.9	2.0	[712.7, 723.1]
		60	666.5	2.6	[660.5, 672.4]
		70	686.3	2.5	[680.3, 692.4]
E	90	708.6	2.1	[703.3, 713.9]	
	120	747.0	1.3	[743.7, 750.3]	
	10	615.5	1.9	[611.4, 619.6]	
	20	605.3	2.2	[601.2, 609.5]	
	30	606.4	2.5	[600.9, 611.9]	
	40	581.9	3.2	[575.3, 588.6]	
	50	554.0	2.3	[549.4, 558.6]	
	60	542.2	2.1	[538.4, 546.1]	
C	70	560.2	3.2	[553.9, 566.6]	
	90	646.3	2.5	[640.5, 652.0]	
	120	700.4	1.7	[696.2, 704.6]	
	10	630.4	1.8	[625.5, 635.4]	
	30	585.0	2.4	[579.0, 591.1]	
	40	573.9	2.1	[568.7, 579.2]	
	50	546.7	2.9	[539.8, 553.5]	
	60	601.0	1.7	[596.7, 605.3]	
D	90	687.9	3.0	[679.6, 696.2]	
	120	713.6	1.9	[707.8, 719.3]	
	10	677.6	1.8	[672.3, 682.9]	
	30	640.0	1.7	[635.3, 644.8]	
	50	601.6	3.1	[593.4, 609.9]	
	55	576.9	1.6	[572.9, 580.9]	
	60	587.4	2.4	[581.5, 593.3]	
	70	637.6	1.8	[632.7, 642.6]	
1.8	90	672.9	1.6	[668.2, 677.5]	
	120	696.4	2.1	[690.0, 702.9]	

图 2.5 根据表 2.2 与表 2.3 中数据分别绘制了不同结构悬浮电极对  $d=2$  m 长空气间

隙击穿电压的影响规律（图 2.5(a)）和含有不同结构悬浮电极的相同子间隙长度之和（ $s_1+s_2=1.5\text{ m}$ ）间隙的击穿电压规律（图 2.5(b)）。图中棒-板长空气间隙击穿电压由公式(1.2)计算得到。

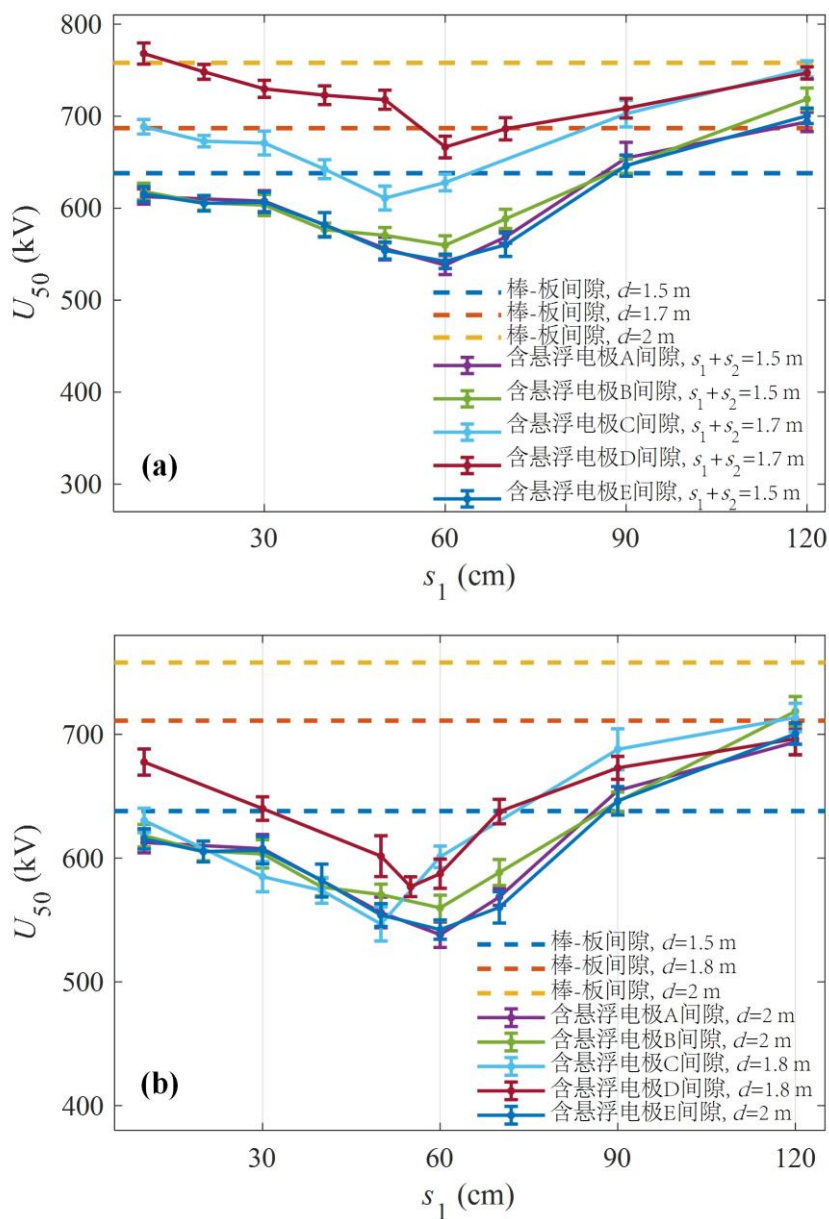


图 2.5 含不同结构悬浮电极长空气间隙击穿电压

(a) 不同结构悬浮电极对  $d=2\text{ m}$  长空气间隙击穿电压的影响

(b) 含有不同结构悬浮电极的相同子间隙长度之和（ $s_1+s_2=1.5\text{ m}$ ）间隙的击穿电压

图 2.5(a)显示在含有不同结构悬浮电极的  $d=2\text{ m}$  长空气间隙中，随着子间隙 1 长度  $s_1$  的逐渐增大，间隙击穿电压  $U_{50}$  都呈现先下降后上升的趋势，产生一个最小击穿电压区域。在含有悬浮电极 A 的  $d=2\text{ m}$  间隙中，最小击穿电压位置在  $s_1=50\sim 70\text{ cm}$  的范围内；在含有悬浮电极 B 的  $d=2\text{ m}$  间隙中，最小击穿电压位置在  $s_1=50\sim 70\text{ cm}$  的范围内；在含有悬浮电极 C 的  $d=2\text{ m}$  间隙中，最小击穿电压位置在  $s_1=40\sim 60\text{ cm}$  的范围内；在

含有悬浮电极 D 的  $d=2$  m 间隙中, 最小击穿电压位置在  $s_1=50\sim 70$  cm 的范围内; 在含有悬浮电极 E 的  $d=2$  m 间隙中, 最小击穿电压位置在  $s_1=50\sim 70$  cm 的范围内。

图 2.5(a)还显示, 具有明显凸出物的悬浮电极 A、B、C、E 显著降低了长空气间隙的击穿电压  $U_{50}$ , 最大下降率分别达到了 29%、26%、20% 和 29%。而在含有悬浮电极 D 的长空气间隙中, 当  $s_1=10$  cm 时, 间隙击穿电压超过了  $d=2$  m 长空气间隙的击穿电压, 击穿电压提升约 1.3%, 表明悬浮电极 D 的介入提高了长空气间隙的击穿电压。这一现象的产生可能是因为悬浮电极 D 尺寸大、表面凸出物不明显, 导致长空气间隙电场的均匀度降低, 击穿电压升高。不过, 这一现象随着悬浮电极 D 远离高压棒电极而消失, 当  $s_1\geq 20$  cm 后, 间隙击穿电压逐渐降低, 并在  $s_1=60$  cm 时达到最大下降率 12%。因此, 本文认为具有不明显凸出物的悬浮导体可能会在极靠近高压电极时提升间隙击穿电压, 而当其远离高压电极时与具有明显凸出物的悬浮导体相同, 仍具有降低间隙击穿电压的特性。

图 2.5(a)中的各类击穿电压曲线之间还具有一定相似性与差异性。首先, 悬浮电极 A 与悬浮电极 B 都为棒型电极, 虽然二者直径有差异, 但二者对间隙击穿电压的影响较为相似。其次, 悬浮电极 E 与悬浮电极 A、B 相比具有相同的电极长度  $l$ , 不过前者结构与后二者相比差异较大, 但含有三类电极间隙的击穿电压却具有较高的相似性。最后, 悬浮电极 C 与悬浮电极 D 具有相同电极长度  $l$  和不同的电极结构, 而含有两类电极的间隙击穿电压在悬浮电极靠近高压电极和悬浮电极位于间隙中央时差异较大, 在悬浮电极靠近接地电极时差异缩小。

含不同结构悬浮电极长空气间隙的击穿电压相似性和差异性与电极结构有密切关系, 本文利用悬浮电极对空间电场的畸变分析上述现象。在空气间隙放电中, 放电的发展会伴随着大量空间电荷的产生, 使得放电过程的实际电场不易计算。虽然不考虑空间电荷的影响使放电过程中电场分布计算不够精准, 但拉普拉斯电场分布仍是工程中常用的评估放电特性的方法。本文使用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 分别计算了含有五类悬浮电极间隙的空间电场分布。计算过程中, 采用二维轴对称方式按照试验布置建立间隙结构, 高压棒电极电位设置为 1 V, 悬浮电极电位设置为“悬浮电位”, 板电极设置为接地。分别计算了悬浮导体靠近高压电极 ( $s_1=30$  cm)、悬浮导体位于间隙中央 ( $s_1=75$  cm) 和悬浮导体靠近接地板电极 ( $s_1=120$  cm) 时的空间电场  $E$ , 并导出轴线电场分布, 计算结果如图 2.6 所示。

图 2.6 中显示, 悬浮电极 A、B、C、E 的上下端有明显的凸出物, 两端附近的电场出现明显畸变, 所以放电更容易在两端发生, 这与图 2.4 拍摄到的击穿路径一致。而悬浮电极 D 结构较为均匀, 除侧边的螺母外没有凸出物, 对空间电场的畸变较小, 强电场集中在上表面与侧边的螺母凸起位置, 因此这两个位置更容易发生放电, 也与图 2.4 拍摄到的击穿路径一致。当悬浮电极 D 远离高压电极, 靠近接地电极时, 其对空间电场的畸变影响不明显, 局部空间电场较均匀, 因此在操作冲击放电随机性的影响下,

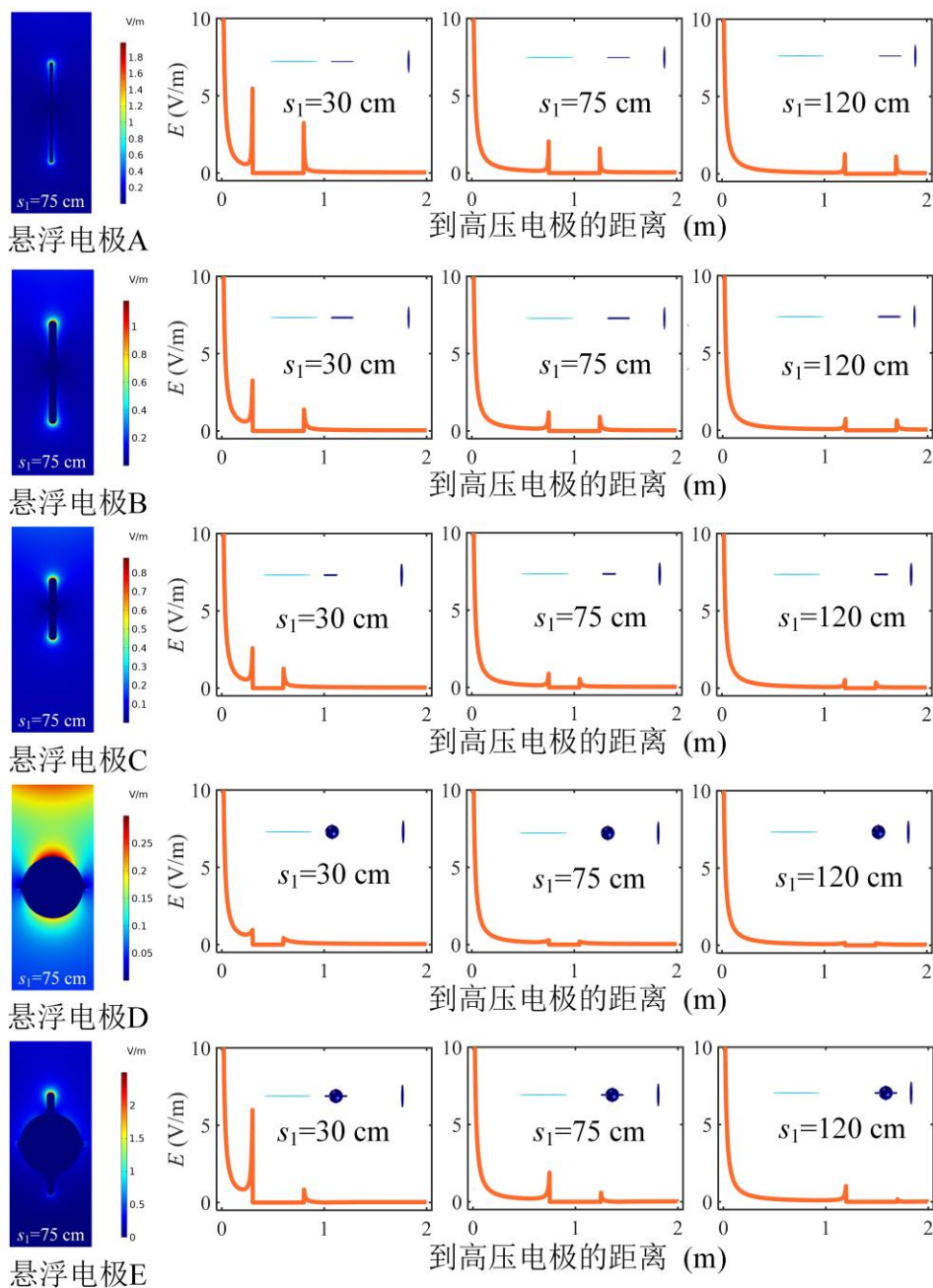


图 2.6 含悬浮导体间隙轴线电场分布

会出现图 2.4 中放电通道绕过悬浮电极 D 的现象。在击穿电压方面，虽然悬浮电极 A 和悬浮电极 B 直径有差异，但二者对空间电场畸变程度差别不大，所以两类间隙击穿电压相似。同理，虽然悬浮电极 E 结构更复杂，但对空间电场畸变的影响主要集中在上下端，与悬浮电极 A 和悬浮电极 B 相似，因此含有悬浮电极 E 间隙的击穿电压与其他两类间隙也具有相似性。而对于悬浮电极 C 和悬浮电极 D，当悬浮电极靠近高压电极时，悬浮电极 C 对空间电场畸变影响较大，悬浮电极 D 对空间电场畸变影响较小，因此两类间隙存在较明显的差异；当悬浮电极靠近接地电极时，悬浮电极 C 对空间电场畸变影响减小，两类间隙的空间电场差异缩小，击穿电压差异也逐渐缩小。因此，



本文认为含悬浮导体长空气间隙的击穿电压与悬浮导体的凸出物尺寸有关，凸出物越明显，对空间电场的畸变越强，间隙击穿电压越低；反之，如果凸出物不够明显，甚至没有凸出物，其对空间电场的畸变影响小，间隙的绝缘强度会更高。

图 2.5(b)展示了含有不同结构悬浮电极的相同子间隙长度之和 ( $s_1+s_2=1.5\text{ m}$ ) 间隙的击穿电压曲线。在含有悬浮电极 C 的  $d=1.8\text{ m}$  间隙中，最小击穿电压位置在  $s_1=50\sim 70\text{ cm}$  的范围内；在含有悬浮电极 D 的  $d=1.8\text{ m}$  间隙中，最小击穿电压位置在  $s_1=50\sim 60\text{ cm}$  的范围内。虽然含有悬浮电极 C 的  $d=1.8\text{ m}$  间隙与含有悬浮电极 A、B、E 的  $d=2\text{ m}$  间隙的子间隙长度之和  $s_1+s_2$  相同，但间隙击穿电压不尽相同，并且最小击穿电压区域也存在差异。在含有悬浮电极 D 的  $d=1.8\text{ m}$  间隙中，在最小击穿电压区域前，间隙的击穿电压与含有悬浮电极 A、B、E 的  $d=2\text{ m}$  间隙的击穿电压相似，而在最小击穿电压区域后，间隙的击穿电压高于含有悬浮电极 A、B、E 的  $d=2\text{ m}$  间隙的击穿电压，最大差异达到 9.8%，这一现象可能是两类间隙的总间隙长度  $d$  不同造成的。因此，本文认为在子间隙长度之和相同的两个间隙中，如果总间隙长度不同，间隙的击穿电压曲线也会存在差异。

在含有悬浮电极 C 的  $d=1.8\text{ m}$  间隙与含有悬浮电极 D 的  $d=1.8\text{ m}$  间隙的击穿电压对比中，存在着与两个悬浮电极在  $d=2\text{ m}$  间隙中相似的现象，在悬浮电极靠近高压电极时两者击穿电压差距较大，在悬浮电极靠近接地电极时两者击穿电压差距较小。

## 2.4 波前时间对放电特性的影响研究

带电作业组合间隙真型试验常使用波形为  $250/2500\text{ }\mu\text{s}$  的标准操作冲击电压进行试验，但实际线路过电压波形的波前时间往往更长。长波前时间的过电压下，带电作业组合间隙是否仍具有良好绝缘强度也是确保带电作业人员安全的重要问题。因此，本节开展了波前时间对含悬浮导体长空气间隙放电特性影响的研究，在国家电网公司武汉特高压交流试验基地开展了  $420/2500\text{ }\mu\text{s}$  操作冲击电压下  $d=3\text{ m}$  含悬浮导体长空气间隙的放电试验。

本节试验所用悬浮导体为悬浮电极 A，在不同子间隙长度的间隙中，共开展有效放电试验 81 次，试验确定了间隙的击穿电压，并利用相机拍摄了间隙的击穿路径，如图 2.7 所示。试验中环境温度为  $28^\circ\text{C}\sim 29.7^\circ\text{C}$ ，相对湿度为  $55\%\sim 56\%$ ，气压为  $101.4\sim 101.5\text{ kPa}$ 。根据 2.1.2 节中的大气条件修正方法，将试验确定的击穿电压修正至标准大气压下的击穿电压，击穿电压数据如表 2.4 所示。

表 2.4  $420/2500\text{ }\mu\text{s}$  操作冲击电压下  $d=3\text{ m}$  含悬浮导体间隙的击穿电压

$s_1\text{ (cm)}$	$U_{50}\text{ (kV)}$	$RSD\text{ (}\%\text{)}$	$95\%\text{ CI (kV)}$
40	914.5	2.6	[904.2, 924.8]
80	873.5	2.8	[863.0, 884.1]
120	911.6	2.4	[902.0, 921.2]
160	989.1	4.6	[969.7, 1008.5]



图 2.7 420/2500  $\mu\text{s}$  操作冲击电压下  $d=3\text{ m}$  含悬浮导体长空气间隙击穿路径

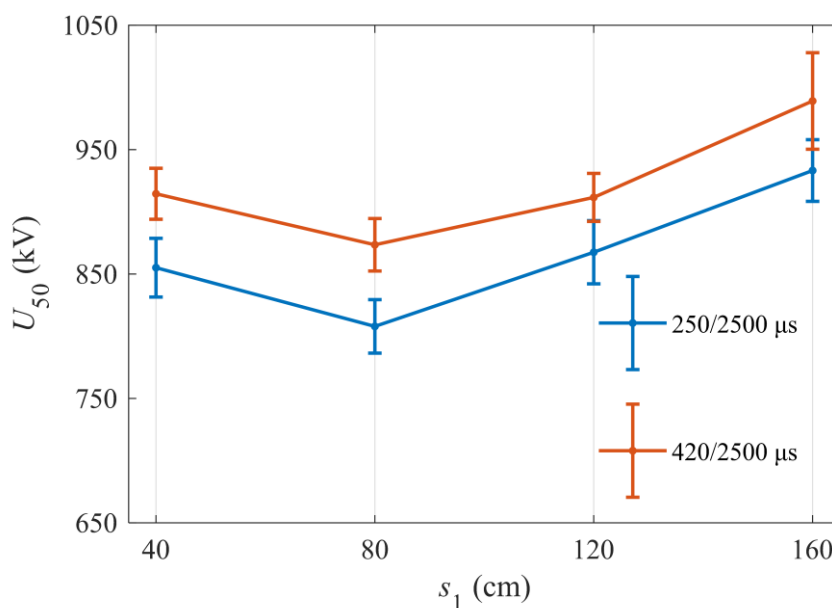


图 2.8 不同波前时间操作冲击电压下含悬浮导体长空气间隙击穿电压

图 2.8 对比了 250/2500  $\mu\text{s}$  标准操作冲击电压和 420/2500  $\mu\text{s}$  操作冲击电压下  $d=3\text{ m}$  含悬浮导体长空气间隙的击穿电压  $U_{50}$ 。图 2.8 显示在 420/2500  $\mu\text{s}$  操作冲击电压下，间隙击穿电压也呈现先下降后上升的趋势，并在  $s_1=80\text{ cm}$  处出现拐点。在相同间隙长度下，420/2500  $\mu\text{s}$  操作冲击电压下的间隙击穿电压  $U_{50}$  明显高于标准操作冲击电压下的间隙击穿电压  $U_{50}$ ，间隙击穿电压提升 5%~7%。

因此，本文认为随着操作冲击电压波前时间增长，含悬浮导体长空气间隙击穿电压  $U_{50}$  也会随之提升。不过，需要注意的是，虽然试验得到了两种波形对击穿电压的影响，但波前时间对击穿特性的实际影响可能更为复杂。长空气间隙放电试验表明，长空气间隙的击穿电压具有临界波前时间的特性<sup>[2]</sup>。在含悬浮导体长空气间隙中，当波前时间小于临界波前时间时，波前时间的增长有可能会出现击穿电压降低的现象。然而，由于超、特高压输电线路操作过电压的波前时间通常远大于间隙临界波前时间和标

准操作冲击电压的波前时间，因此本节试验得到的规律仍然具有一定工程意义。

## 2.5 海拔高度对放电特性的影响研究

海拔高度是输电线路外绝缘放电特性的重要影响因素。现有高海拔环境带电作业组合间隙放电特性主要通过海拔校正方法校正标准大气条件下的间隙放电特性确定。通过这种方法确定的带电作业组合间隙放电特性是否与实际值吻合，是确保高海拔带电作业人员安全的重要问题。因此，本节开展了海拔高度对含悬浮导体长空气间隙放电特性影响的研究，在南方电网公司昆明特高压试验基地开展了高海拔环境含悬浮导体长空气间隙的放电试验。南方电网公司昆明特高压试验基地位于云南省昆明市，海拔高度  $H$  约为 2050 m<sup>[145]</sup>。

试验使用的施加电压为波形 250/2500  $\mu\text{s}$  的标准操作冲击电压，总间隙长度  $d=2\text{ m}$ ，所用悬浮导体为悬浮电极 A。试验中，在不同子间隙长度的间隙中，共开展有效放电试验 170 次，试验记录了气象参数，确定了间隙的击穿电压，如表 2.5 所示，并利用相机拍摄了间隙的击穿路径，如图 2.9 所示。

表 2.5 不同间隙长度间隙的击穿电压

$s_1$ (cm)	$U_{50}$ (kV)	RSD (%)	95% CI (kV)	$p$ (kPa)	$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	RH (%)
10	493.3	2.1	[488.7, 497.9]	79.8	26.5	42
30	488.5	1.9	[484.5, 492.5]	79.8	21	67
40	449.7	1.7	[446.3, 453.1]	79.8	27	33
50	415.5	2.4	[411.2, 419.8]	79.8	28.5	34
60	450.4	1.9	[446.5, 454.2]	79.8	19	79
75	506.7	3.7	[500.1, 513.3]	79.8	28	35
90	514.0	2.9	[507.5, 520.4]	79.8	27	36
120	574.8	4.0	[564.8, 584.7]	79.8	22	56



图 2.9 高海拔环境含悬浮导体长空气间隙击穿路径

图 2.10 对比了高海拔环境和标准大气条件下  $d=2\text{ m}$  含悬浮导体长空气间隙的击穿电压  $U_{50}$ 。图 2.10 显示高海拔环境的间隙击穿电压  $U_{50}$  明显低于标准大气条件下的间隙击穿电压  $U_{50}$ ，相同的间隙结构中击穿电压最大差距达到 25.3%。高海拔环境间隙的击



穿电压曲线也呈先下降后上升的趋势,但最小击穿电压位置出现在  $s_1=40\sim 60$  cm 的范围内,与标准大气条件下间隙最小击穿电压区域  $s_1=50\sim 70$  cm 有差异。

图 2.10 还采用 IEC 标准 60071-2: 1996<sup>[146]</sup>和我国国家标准 GB 311.1-2012<sup>[147]</sup>中推荐的外绝缘放电电压海拔校正方法,校正标准大气条件下间隙击穿电压计算预测了高海拔环境间隙击穿电压。高海拔环境击穿电压计算值与试验值对比表明,计算值与试验值的最小击穿电压区域有差异,校正得到的最小击穿电压区域仍位于  $s_1=50\sim 70$  cm。此外,校正得到的最小击穿电压计算值在最小击穿电压区域前明显高于试验结果,计算值与试验值最小电压差距达到 11%。

因此,本文认为高海拔环境含悬浮导体长空气间隙击穿电压明显低于标准大气条件下相同结构间隙的击穿电压,并且最小击穿电压区域比标准大气条件下间隙最小击穿电压区域更靠近高压电极,而通过海拔校正、基于标准大气条件下间隙击穿电压计算预测高海拔环境间隙击穿电压的方法具有一定局限性。

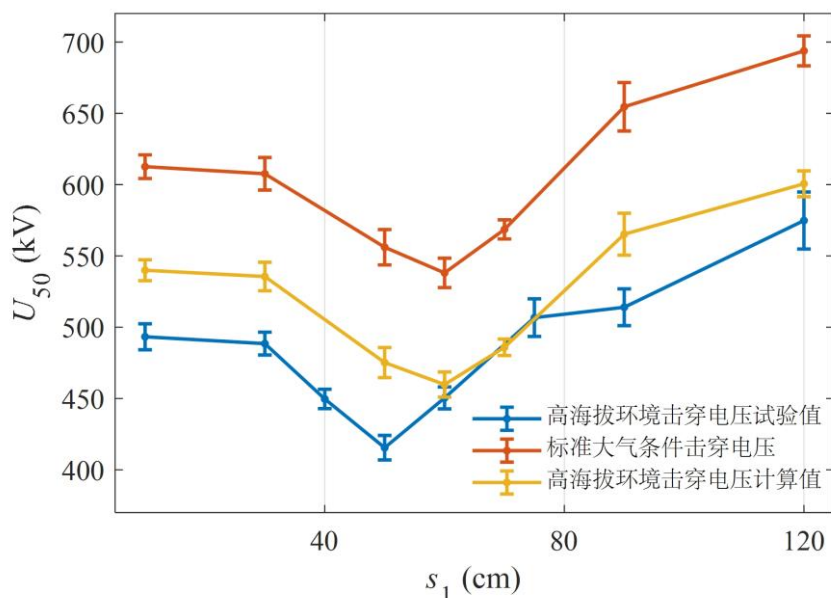


图 2.10 高海拔环境与标准大气条件下含悬浮导体长空气间隙击穿电压

## 2.6 悬浮导体偏离轴线对放电特性的影响研究

输电线路带电作业中作业人员常采用吊篮法从杆塔上方荡至导线,组合间隙长度因电极间最短路径的长度改变而增长,有时甚至会会长于导线-杆塔的长空气间隙。组合间隙长度的变化可能会改变放电击穿路径,从高压导线-作业人员-杆塔的击穿路径变为高压导线-杆塔的击穿路径,从而变相提升作业人员的作业安全性。本节试验针对这一场景研究了悬浮导体偏离轴线对含悬浮导体长空气间隙放电特性的影响,在武汉大学高电压试验大厅开展了总间隙长度  $d=1.5$  m 的含不同位置悬浮导体长空气间隙的放电试验。

试验使用的施加电压为波形 250/2500  $\mu\text{s}$  的标准操作冲击电压，所用悬浮导体为悬浮电极 B 和悬浮电极 C。悬浮导体偏离轴线间隙结构布置如图 2.11 所示。高压棒电极到接地板电极距离仍为总间隙长度  $d$ ，悬浮电极长度仍为  $l$ ，悬浮电极与高压电极的水平距离为  $x$ 、竖直距离为  $s_1$ ，悬浮电极头部与高压电极的竖直方向夹角为  $\theta$ ，悬浮电极到板电极距离仍为  $s_2$ 。试验中多次调整间隙位置，在不同间隙结构中共开展有效放电试验 795 次，试验中环境温度为 11.7°C~15.8°C，相对湿度为 42%~71%，气压为 101~103.1 kPa。试验拍摄到了两种间隙击穿路径，如图 2.12 所示。根据 2.1.2 节中的大气条件修正方法，将试验确定的击穿电压修正至标准大气压下的击穿电压，击穿电压数据如表 2.6 所示。

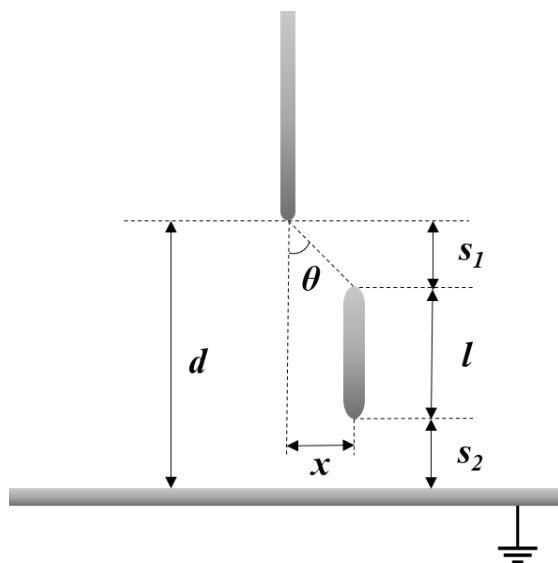


图 2.11 悬浮导体偏离轴线间隙结构示意图

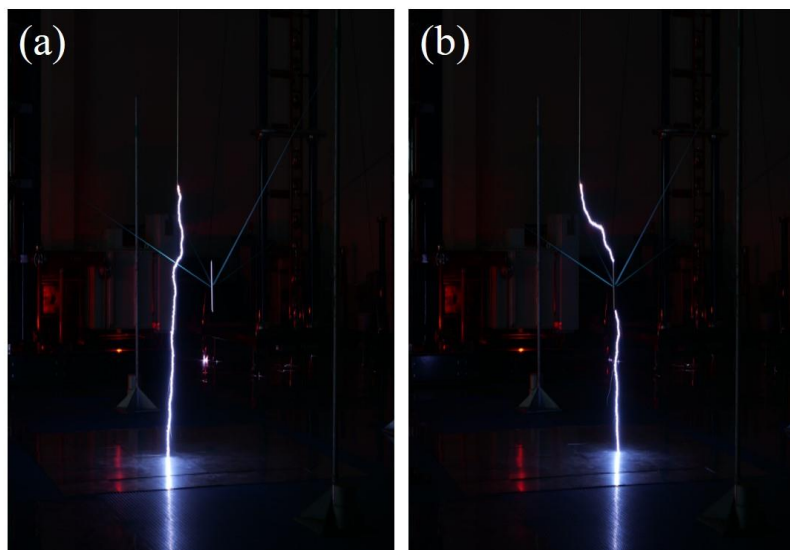


图 2.12 悬浮导体偏离轴线间隙击穿路径

图 2.12 中的击穿路径(a)是放电通道直接连接了高压棒电极与板电极，与图 2.4 中 D-2 击穿路径相似；击穿路径(b)由两段放电通道组成，分别连接了高压棒电极与悬浮

电极和悬浮电极与板电极，与悬浮导体位于轴线时相似。击穿路径的差异是由于悬浮导体偏离轴线时，其对长空气间隙空间电场畸变影响减弱，在操作冲击放电随机性影响下，放电通道会朝不同方向发展。当悬浮电极偏离轴线距离逐渐增加时，其对长空气间隙空间电场畸变逐渐减弱，放电通道更容易直接向接地电极发展。

表 2.6 悬浮电极偏离轴线间隙的击穿电压

悬浮电极	$s_1$ (cm)	$x$ (cm)	$U_{50}$ (kV)	$RSD$ (%)	95%CI (kV)
B	20	0	418.6	3.3	[413.6, 423.5]
		20	425.0	2.9	[420.6, 429.4]
		40	447.9	2.5	[443.9, 451.9]
		60	585.5	1.7	[582.0, 589.1]
		80	612.2	1.7	[608.5, 615.9]
	40	0	397.0	3.0	[392.7, 401.2]
		20	430.7	3.2	[425.8, 435.7]
		40	502.1	3.4	[496.0, 508.2]
		60	584.1	2.8	[578.3, 590.0]
		80	616.6	2.2	[611.7, 621.4]
	60	0	467.0	2.5	[462.8, 471.2]
		20	495.3	2.1	[491.6, 499.1]
		40	524.5	2.2	[520.4, 528.6]
		60	603.6	2.2	[598.8, 608.3]
		80	626.7	2.3	[621.6, 631.9]
	80	0	511.3	2.7	[506.3, 516.2]
		20	518.4	3.0	[512.8, 523.9]
		40	558.5	1.8	[554.9, 562.1]
		60	599.0	1.5	[595.8, 602.2]
		80	625.5	1.3	[622.6, 628.4]
C	20	0	505.0	2.9	[499.8, 510.2]
		20	519.0	2.0	[515.3, 522.7]
		40	602.9	2.4	[597.7, 608.0]
		60	609.7	2.7	[603.8, 615.6]
		80	624.6	2.5	[619.0, 630.2]
	40	0	458.7	2.9	[454.0, 463.4]
		20	481.6	2.6	[477.1, 486.1]
		40	591.1	3.0	[584.7, 597.4]
		60	623.3	1.4	[620.2, 626.5]
		80	638.5	2.3	[633.3, 643.8]
	60	0	541.7	2.2	[537.4, 545.9]
		20	548.8	2.6	[543.7, 553.9]
		40	620.9	2.6	[615.1, 626.7]
		60	624.6	1.6	[621.0, 628.2]
		80	628.6	1.3	[625.7, 631.5]
	80	0	577.9	2.6	[572.6, 583.3]
		20	597.5	2.0	[593.2, 601.8]
		40	604.0	1.6	[600.5, 607.4]
		60	634.8	1.7	[630.9, 638.6]
		80	620.8	1.8	[616.8, 624.8]

表 2.7 统计了试验中悬浮电极在不同位置间隙击穿路径为高压棒直接连接板电极的概率  $P$ 。结果显示含有不同长度悬浮电极间隙的放电路径有差异，在含悬浮电极 B 的间隙中，当水平移动距离  $x=80$  cm 时，击穿路径仍有一定概率为高压棒电极-悬浮电极-接地板电极，如图 2.13 所示；而在含悬浮电极 C 的间隙中，在同样的水平移动距离时，

击穿路径都为高压棒电极-接地板电极。相似的，在含悬浮电极 B 的间隙中，当水平移动距离  $x=40\text{ cm}$  时，击穿路径都为高压棒电极-悬浮电极-接地板电极；而在相同水平距离的含悬浮电极 C 间隙中，击穿路径仍有一定概率为高压棒电极-板电极。结果还显示，在竖直移动距离  $s_1$  不变的情况下，随着悬浮电极的连续右移，当水平移动距离  $x$  大于某个特定值时，击穿路径为高压棒电极-板电极的概率开始显著增加。对于悬浮电极 B，该特定值为  $40\text{ cm}$ ；对于悬浮电极 C，该特定值为  $20\text{ cm}$ 。

表 2.7 击穿路径为高压棒直接连接板电极的概率

悬浮电极	$s_1\text{ (cm)}$	$P$				
		$x=0\text{ cm}$	$x=20\text{ cm}$	$x=40\text{ cm}$	$x=60\text{ cm}$	$x=80\text{ cm}$
B	20	0	0	0	20%	100%
	40	0	0	0	20%	100%
	60	0	0	0	40%	90%
	80	0	0	0	20%	80%
C	20	0	0	30%	70%	100%
	40	0	0	20%	80%	100%
	60	0	0	20%	100%	100%
	80	0	0	30%	60%	100%

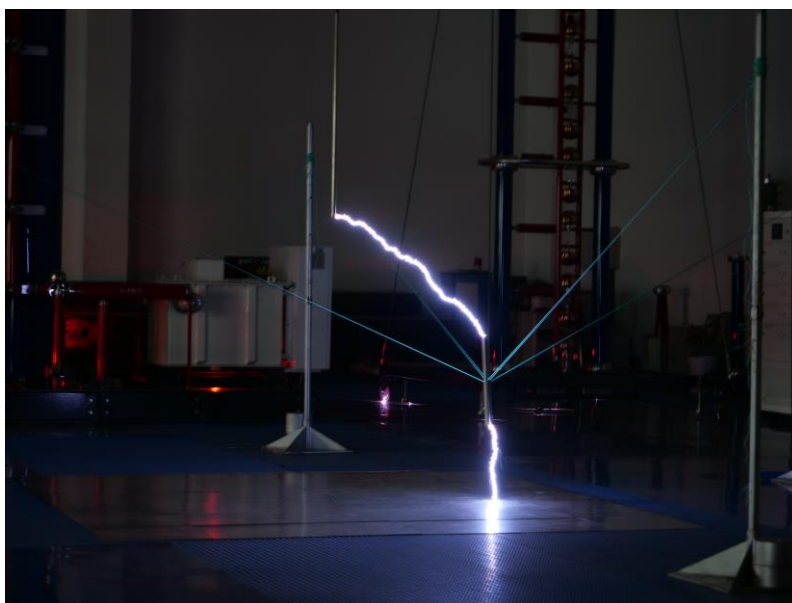


图 2.13 悬浮导体偏离轴线时间隙击穿路径 ( $l=50\text{ cm}, s_1=60\text{ cm}, x=80\text{ cm}$ )

图 2.14 根据表 2.6 中击穿电压数据比较了悬浮电极在不同位置时的击穿电压和  $d=1.5\text{ m}$  棒-板间隙击穿电压。数据表明，当悬浮电极逐渐偏离轴线，间隙击穿电压  $U_{50}$  逐渐上升，并最终与棒-板间隙击穿电压趋于一致，这表明当悬浮电极偏离轴线一定距离后，其对长空气间隙放电已无影响，这与击穿路径的规律一致。此外，比较发现，悬浮电极偏离轴线同样距离的情况下，悬浮电极 B 对长空气间隙击穿电压的影响比悬浮电极 C 的影响更大。因此，本文认为在含悬浮导体长空气间隙中，当悬浮导体逐渐偏离轴线，间隙的击穿路径除高压电极-悬浮导体-接地电极以外，还可能会出现高压电极-接地电极的击穿路径，而击穿电压  $U_{50}$  也会随之而提高。当悬浮导体偏离到一定距

离后，其对长空气间隙的影响可以忽略，间隙击穿路径全部为高压电极-接地电极，而间隙击穿电压也恢复为长空气间隙击穿电压。不同长度悬浮导体的偏离对长空气间隙的影响规律不同，长度更长的悬浮导体需要偏离更多距离才能忽略其对长空气间隙的影响。

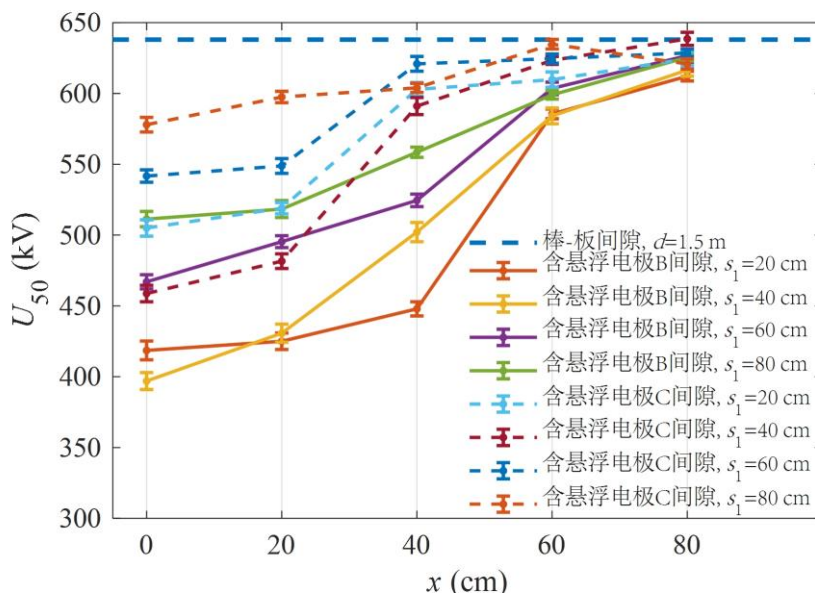


图 2.14 悬浮电极位于不同位置的含悬浮导体长空气间隙击穿电压

## 2.7 输电线路带电作业组合间隙放电特性分析

本节根据上述含悬浮导体长空气间隙放电特性试验获得的结论分析了输电线路带电作业组合间隙放电特性。

在间隙长度的影响方面，2.2 节开展了总间隙长度不同的含悬浮导体长空气间隙放电特性试验，试验结果表明具有明显凸出物的悬浮电极会降低长空气间隙的击穿电压，随着悬浮电极从高压电极向接地电极移动，击穿电压先下降、后上升，产生一个最小击穿电压区域，这与带电作业组合间隙的放电特性一致。试验结果还表明，随着总间隙长度的增加，最小击穿电压区域会发生移动，逐渐远离高压电极。基于这一结论，本文认为带电作业组合间隙放电特性中最小击穿电压出现在距离高压电极 0.4 m 位置处的结论具有局限性，随着杆塔结构和间隙尺寸的改变，最小击穿电压区域也会发生变化。目前，真型试验结果中最小击穿电压都出现在距离高压电极 0.4 m 位置处的原因可能是试验中模拟人位置选取步长较大，如果开展更细致的试验，选取更多模拟人位置，放电特性结果会出现不同的最小击穿电压区域。

在悬浮导体结构的影响方面，2.3 节开展了含有不同结构悬浮导体长空气间隙放电特性试验，试验结果表明含悬浮导体长空气间隙击穿电压与悬浮导体凸出物对空间电场畸变程度有关，间隙击穿电压随畸变程度提升而降低，并且悬浮导体电场畸变明显

的位置更容易发生放电。在带电作业组合间隙真型试验中，模拟人膝盖、脚部、手部、头部等结构都属于明显凸出物，更容易发生放电，而在模拟人后背部分，可能会存在屏蔽服褶皱等结构，也可能发生放电。另外，在真型试验中，虽然模拟人不能穷举所有人体姿态，但如果不同姿态所造成的电场畸变程度是接近的，那么间隙的击穿电压也不会有明显变化。而在实际带电作业进出等电位过程中，作业人员应避免伸出四肢，可以有效降低电场的畸变程度，从而保证良好的空气间隙绝缘强度，是提高安全性的有效措施。

在操作冲击电压波前时间的影响方面，2.4 节开展了长波前时间操作冲击电压下含悬浮导体长空气间隙放电特性试验，试验结果表明随着操作冲击电压波前时间增长，含悬浮导体长空气间隙击穿电压也会随之提升。在特高压输电线路中，操作过电压的波前时间约为  $1000 \mu\text{s}$ ，远大于现有真型试验采用的操作冲击电压波前时间，因此根据现有真型试验操作冲击电压波形下的间隙放电特性确定的最小组合间隙距离是偏严格的，可以有效保证作业人员的安全性。

在海拔高度的影响方面，2.5 节开展了高海拔环境含悬浮导体长空气间隙放电特性试验，研究表明通过海拔校正、基于标准大气条件下间隙击穿电压计算预测高海拔环境间隙击穿电压的方法具有一定局限性。而现有带电作业最小组合间隙研究多在低海拔环境开展真型试验，并根据低海拔环境获得的放电特性通过海拔校正方法确定高海拔环境的放电特性，再据此计算带电作业最小组合间隙。根据前文结论，本文认为通过海拔校正方法，校正低海拔环境间隙放电特性得到高海拔环境间隙放电特性，并计算最小组合间隙的方法具有一定局限性。对于已确定的高海拔环境带电作业最小组合间隙，虽然在确定过程中留有一定裕度以确保作业人员的安全，但高海拔环境中带电作业人员面临的风险仍会超过预期。

在悬浮导体偏离轴线的影晌方面，2.6 节开展了悬浮导体位于不同位置时的含悬浮导体长空气间隙放电特性试验，试验结果表明悬浮导体偏离轴线的过程中，间隙放电会出现高压电极-接地电极的击穿路径，当偏离到一定距离后，悬浮导体对长空气间隙的影响可以忽略，间隙击穿路径全部为高压电极-接地电极。实际超、特高压输电线路带电作业中，作业人员常采用吊篮法从杆塔上方荡至导线，组合间隙长度会长于作业人员位于水平方向时的组合间隙长度。本文认为，作业人员采用吊篮法进出等电位过程中，组合间隙长度的增长会提升间隙的绝缘强度，而放电路径有概率绕过作业人员、直接连接高压导线与杆塔也会进一步提升作业的安全性，因此采用吊篮法进出等电位的方式比预期更安全。

## 2.8 本章小结

本章分别在武汉大学高电压试验大厅、国家电网公司武汉特高压交流试验基地、



南方电网公司昆明特高压试验基地搭建了含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台，开展了 2000 余次操作冲击放电试验，先后研究了间隙长度、悬浮导体结构、操作冲击电压波前时间、海拔高度和悬浮导体偏离轴线等因素对间隙放电特性影响，得到以下结论：

(1) 具有明显凸出物的悬浮导体会降低长空气间隙击穿电压，击穿电压最大下降率随总间隙长度增长而降低。含悬浮导体长空气间隙击穿电压随子间隙  $l$  增长呈现先下降后上升趋势，产生一个最小击穿电压区域，其位置随总间隙长度变化而改变。

(2) 含悬浮导体长空气间隙击穿电压与悬浮导体凸出物对空间电场畸变程度有关，间隙击穿电压随畸变程度提升而降低。具有不明显凸出物的悬浮导体可能会在极靠近高压电极时提升间隙击穿电压，在远离高压电极时与具有明显凸出物的悬浮导体相同，仍具有降低击穿电压的特性，在靠近接地电极时间隙击穿路径可能会绕过悬浮导体直接连接高压电极与接地电极。总间隙长度不同、子间隙长度之和相同的含悬浮导体长空气间隙放电特性曲线存在差异。

(3) 含悬浮导体长空气间隙在长波前时间操作冲击下的击穿电压高于标准操作冲击下的击穿电压。

(4) 含悬浮导体长空气间隙在高海拔环境的击穿电压低于标准大气条件下的击穿电压，且高海拔环境的最小击穿电压区域位置更靠近高压电极。通过海拔校正方法校正标准大气条件下间隙击穿电压预测高海拔环境击穿电压的方法具有一定局限性。

(5) 悬浮导体逐渐偏离轴线的过程中，间隙放电会出现高压电极-接地电极的击穿路径，击穿电压也会随之提高。当偏离到一定距离后，悬浮导体对长空气间隙的影响可以忽略，间隙击穿路径全部为高压电极-接地电极，间隙击穿电压也恢复为长空气间隙击穿电压。不同长度悬浮导体的偏离对长空气间隙的影响规律不同，长度更长的悬浮导体需要偏离更多距离才能忽略对长空气间隙的影响。

根据上述结论，分析了输电线路带电作业组合间隙的放电特性，得到以下结论：

(1) 带电作业组合间隙最小击穿电压区域会随杆塔结构和间隙尺寸变化而改变。

(2) 带电作业组合间隙真型试验中，模拟人的膝盖、脚部、手部、头部以及屏蔽服褶皱等结构更容易发生放电。实际带电作业进出等电位过程中，作业人员应避免伸出四肢，以提高作业安全性。

(3) 现有真型试验操作冲击电压波形确定的超、特高压线路带电作业最小组合间隙是偏严格的。

(4) 通过海拔校正方法，校正低海拔环境带电作业组合间隙放电特性得到高海拔环境带电作业组合间隙放电特性，并计算最小组合间隙的方法具有局限性。已确定的高海拔环境带电作业最小组合间隙的作业安全性不及预期。

(5) 带电作业人员采用吊篮法进出等电位过程的作业安全性比预期更高。

### 3 含悬浮导体长空气间隙放电观测研究

长空气间隙放电主要由初始电晕起始、流注-先导转化、先导-流注体系发展、末跃和击穿等阶段组成。长空气间隙放电的发展与其间隙结构有密切联系，显著的间隙结构改变会影响上述放电阶段的起始与发展。在含悬浮导体长空气间隙中，悬浮导体的介入明显改变了间隙的空间结构，间隙由原有的高压电极-接地电极间隙变成了高压电极-悬浮电极-接地电极间隙，其放电发展过程因此发生变化。本章搭建了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台，分别开展了低海拔环境和高海拔环境的放电观测试验，确定了间隙放电物理过程，试验结果可以为建立含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型提供依据。开展了含具有明显凸出物复杂结构悬浮电极的长空气间隙放电观测试验，对比了其放电发展过程与含棒型悬浮电极长空气间隙放电发展过程的差异，解释了两类间隙击穿电压特性相似的原因。

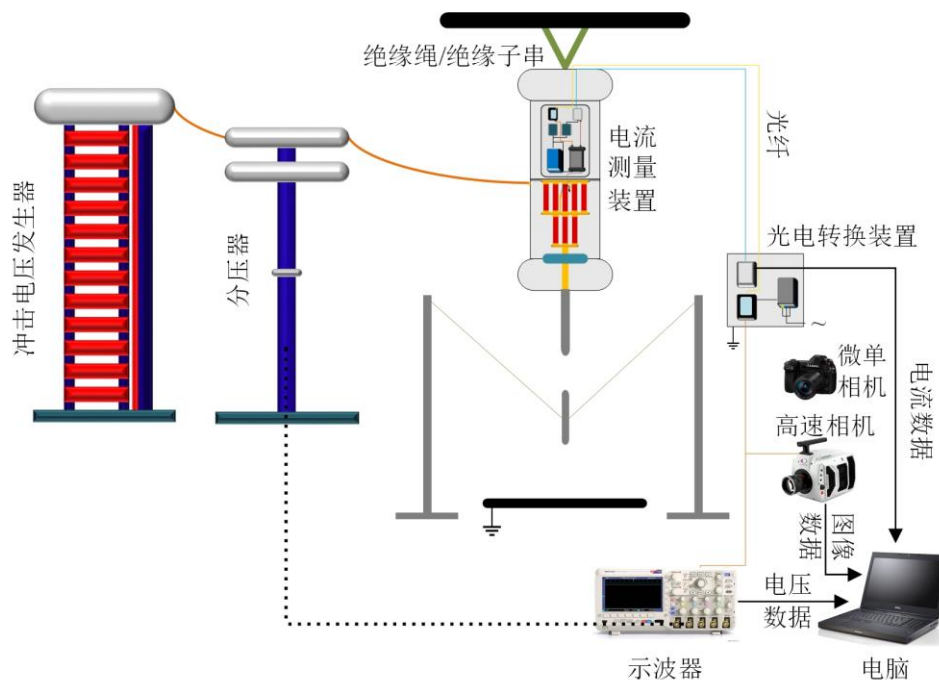


图 3.1 含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台示意图

#### 3.1 含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台

本文分别在武汉大学高电压试验大厅和南方电网公司昆明特高压试验基地搭建了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台，观测试验平台示意图如图 3.1 所示。与第 2 章的含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台相比，观测试验平台增加了光学图像摄影系统与电流测量系统。光学图像摄影系统用于拍摄含悬浮导体长空气间隙放电发展的光学图像，电流测量系统用于测量放电发展过程产生的放电电流，分析放电发展的图像与放电电流的变化即可确定含悬浮导体长空气间隙的放电物理过程。



### 3.1.1 光学图像摄影系统

20 世纪 70 年代, Les Renardi ères Group 使用图像变换器开展了长空气间隙放电物理过程的光学观测研究<sup>[65]</sup>。观测结果表明长空气间隙放电中流注、先导、末跃具有明显的光学特性, 放电通道为一条发光通道, 流注的发展速度约为  $1 \times 10^5$  m/s, 正极性先导发展的平均速度约为  $1.5 \times 10^4$  m/s。虽然含悬浮导体长空气间隙的间隙结构与普通长空气间隙有着明显区别, 但是其放电过程仍遵循空气间隙放电机理。因此, 含悬浮导体长空气间隙的放电物理过程仍由流注、先导、末跃等放电阶段组成。为拍摄到完整的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程, 需要选取合适的光学图像摄影设备。

综合考虑试验场地布置、图像分辨率、拍摄速率、持续拍摄时间等因素, 本文选取 Phantom V2512 高速相机作为含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台中的光学图像摄影设备, 该设备最大拍摄速率为 670,000 fps, 最大拍摄速率对应的分辨率为  $128 \times 64$ , 最小曝光时间为  $1 \mu\text{s}$ 。选用的镜头为 Nikon 24-85mm f/2.8-4D, 最大光圈为 F2.8, 最小光圈为 F22, 焦距范围为 24~85 mm。拍摄参数的设置可以根据拍摄距离和拍摄要求来确定。根据高速相机的成像原理, 拍摄预放电弱发射通道时可以使用较低的拍摄速度和较小的光圈值, 而拍摄先导放电通道时可以使用较高的拍摄速度和较大的光圈值。为拍摄到完整的含悬浮导体长空气间隙放电发展过程, 在两个试验场地的试验采用两种分辨率进行拍摄, 分别为  $128 \times 128$  和  $128 \times 64$ , 两种分辨率下最大拍摄速率, 分别为 460,000 fps 和 670,000 fps, 对应的每帧拍摄时间分别约为  $2.17 \mu\text{s}$  与  $1.48 \mu\text{s}$ 。试验选取的曝光时间为  $1 \mu\text{s}$ , 选取的光圈值为  $F=2.8$ 。

试验中, 使用不间断电源 (UPS) 为高速相机供电, 防止含悬浮导体长空气间隙击穿后反击对设备造成影响。使用网线连接高速相机与笔记本电脑, 构成局域网进行实时数据通讯, 实现在笔记本电脑端操控高速相机并处理拍摄结果。高速相机的 Trigger 输入端与示波器 AUX OUT 输出端通过同轴电缆相连, 当示波器被触发时, 其 AUX OUT 端口会输出一个方波触发信号, 从而触发高速相机记录图像数据。

### 3.1.2 电流测量系统

放电电流是反映放电物理过程的关键参数之一。光学图像摄影系统拍摄到的放电过程是不连续的, 无法精确判断各阶段的起始过程。在长空气间隙中, 流注起始、先导起始、连续先导发展等放电物理过程都会产生相应的放电电流, 因此测量空气间隙放电电流是确定放电物理过程的重要手段。本文以长空气间隙放电电流的特点作为电流测量系统的设计依据。

### 3.1.2.1 电流测量系统设计与测量原理

长空气间隙放电观测重点关注流注与先导两个放电发展阶段，放电电流幅值在几十毫安到几百安培的范围内，高频分量集中在 15 MHz 以下。根据放电电流特点，本文设计了一套高电位与地电位隔离的电流测量系统，由处于高电位的电流测量装置和处于地电位的光电转换装置组成。

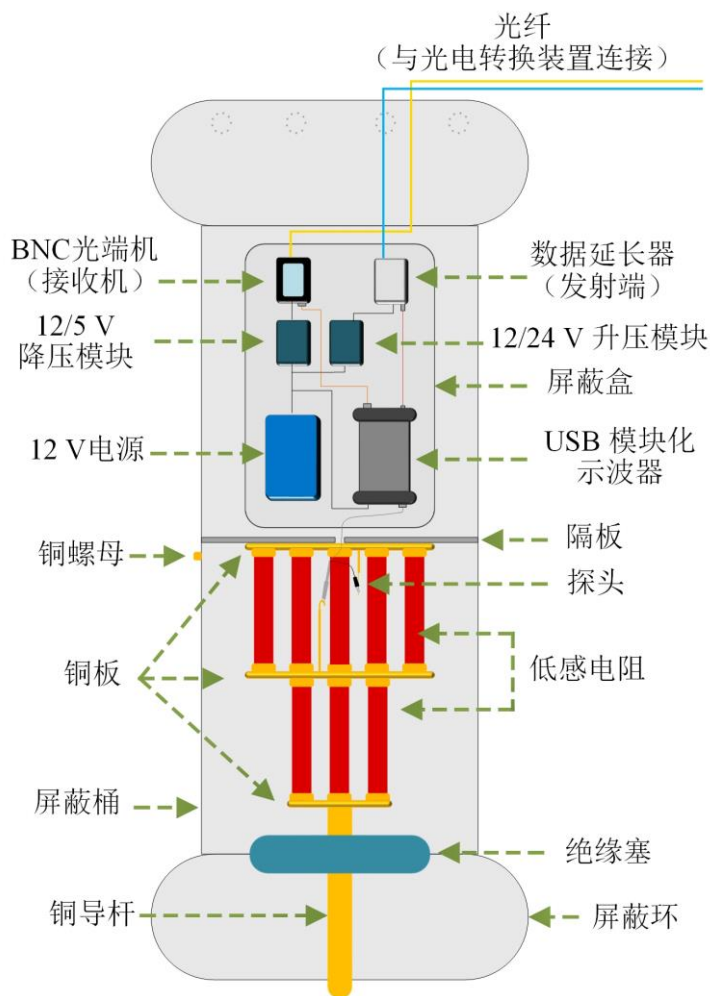


图 3.2 电流测量装置示意图

如图 3.2 所示，高电位的电流测量装置主要由屏蔽外壳、电阻室和数据室组成。屏蔽外壳是一个两端套有屏蔽环的桶型结构，由铝材制成。屏蔽桶高 1000 mm，外径为 300 mm，厚度为 5 mm，桶中央有一块厚 30 mm 的铝制隔板将桶分为两个室。屏蔽环高度为 90 mm，内径与外径分别为 320 mm 和 410 mm。在屏蔽桶的外侧装有一个铜螺母，用于固定和冲击电压发生器连接的高压引线，使屏蔽桶处于高电位。屏蔽外壳用于屏蔽强电场，减少强电场对电流测量装置内部信号的影响。屏蔽环底部为实心板，利用螺丝固定在屏蔽桶上，也用于密封屏蔽桶两端的开口。上屏蔽环中有四个小型吊环，便于悬挂整个电流测量装置。在下屏蔽环中央用环氧胶粘有一个圆环型环氧绝缘

塞，以保证塞内电极与屏蔽外壳绝缘。绝缘塞厚度为 40 mm，内径为 40 mm，外径为 110 mm。

电阻室包含一根导杆、三块铜板和低感电阻。导杆由铜材制成，一端穿过屏蔽外壳端部的绝缘塞与高压电极相连接，另一端与一块铜板连接。导杆与高压电极相连的一端内部做有内螺纹，便于高压电极固定。在电阻室内部，低感电阻两端采用螺丝固定在铜板上，电阻与铜板整体采用螺丝固定在屏蔽桶内的隔板上。在所有组件连接处都塞有薄铜片，以确保可靠连接。使用的低感电阻分为限流电阻和测量电阻，限流电阻与导杆相接，测量电阻与隔板相接。限流电阻用于保护采集装置免受大电流危害，由 6 支 600 Ω/200 W 低感电阻并联组成。测量电阻用作电流测量传感器，由 10 支 200 Ω/75 W 低感电阻并联组成。限流电阻与测量电阻实测电阻值分别为 98.2 Ω 和 20.3 Ω，整体电感实测值约为 100 nH。在测量电阻两端铜板的内侧焊有两根细铜杆，用于固定高压探头。使用的探头为 Keysight 10076C 高压无源探头，衰减比为 100:1，带宽为 500 MHz，最大输入电压为 4000 V<sub>pk</sub>。

数据室包含数据采集设备、数据传输设备和供电设备，所有设备都装在一个屏蔽盒中，一方面便于安装，另一方面进一步确保信号免受残余强电场的干扰。数据采集设备为 Keysight U2702A USB 模块化示波器，带宽为 200 MHz，最高采样率为 1 GSa/s，具有两个测量通道和一个外部触发通道。USB 模块化示波器一端与穿过隔板的探头接口相连，另一端通过 USB 数据线与数据延长器（发射机）相连，将电压信号转换为数字数据。使用的数据延长器为 ICRON Ranger 2324，数据有效传输距离可达 500 m，其将数据转换为光信号，通过光纤跳线传输到远端的数据延长器（接收机）。USB 模块化示波器的远程触发通过 BNC 光端机实现，USB 模块化示波器的外部触发通道与 BNC 光端机（接收机）通过同轴电缆连接。BNC 光端机（接收机）接收到远端传输的触发信号后，即可触发 USB 模块化示波器记录数据。数据室中的上述设备都由一块 12 V 锂电池和变压模块供电。

放电电流的测量原理如图 3.3 所示。当含悬浮导体长空气间隙在正极性操作冲击电压下放电时，放电产生的电子注入高压电极中，形成放电电流。电子通过两组电阻移动到屏蔽桶中央的隔离板，随后沿高压引线向冲击电压发生器移动。放电电流的方向与电子移动方向相反，从隔离板经两组电阻达到高压电极。通过测量电阻的电流会形成电压，通过测量电阻两端电压即可计算电流，计算公式为：

$$e(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3.1)$$

式中， $e$  为测量到的电压， $R$  为电阻阻值， $i$  为测量电流， $L$  为电阻的电感。

然而，如图 3.3 所示，在实际测量到的电流中，除放电电流外还存在由杂散电容产生的位移电流。由于含悬浮导体长空气间隙的间隙结构复杂，很难直接计算出高压电极与各物体间的杂散电容。对于一个固定的间隙结构，杂散电容是固定的，位移电流

与杂散电容的关系式为：

$$i_d(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (3.2)$$

式中， $i_d$ 为位移电流， $C$ 为杂散电容， $u$ 为施加电压。公式(3.2)表明位移电流与杂散电容成正比。因此，本文提出两种计算杂散电容的方法。第一个方法是，在试验前先施加一个较小的电压，确保间隙不会发生放电。此时测量到的电流全部为位移电流，根据公式(3.2)即可计算间隙结构的杂散电容。第二个方法是，直接在试验数据中确定杂散电容。虽然试验数据包含位移电流和放电电流，但是在电压上升初期，间隙还没有发生放电，此时测量到的电流只有位移电流，不包含放电电流，由此即可计算间隙结构的杂散电容。为了确保初始电流数据中不包含放电电流，可以将电流曲线与施加电压变化率的曲线进行对比，如果二者曲线趋势吻合，则可确定这些电流为位移电流。

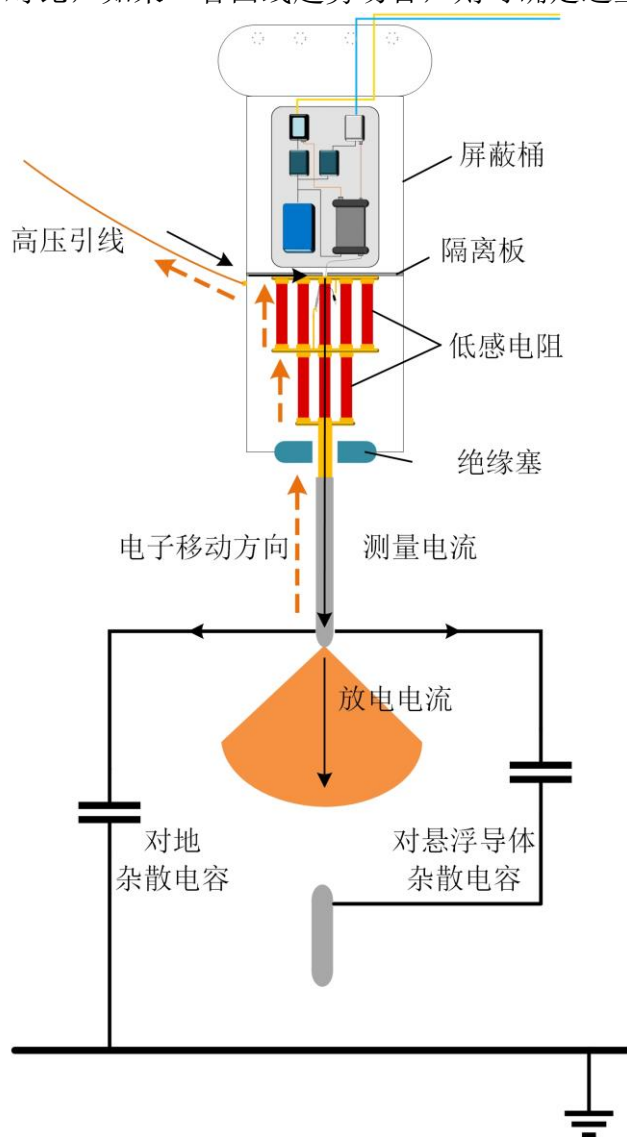


图 3.3 电流测量原理

为明确电流测量装置对空气间隙放电的影响，本文搭建了间隙长度为 2 m 的电流测量装置+棒电极-板电极间隙和棒电极-板电极间隙的三维几何模型，使用有限元分析

软件 COMSOL Multiphysics 计算高压电极施加 1 V 电压时间隙轴线空间静态电场分布，计算结果如图 3.4 所示。计算结果显示，两种间隙轴线空间电场分布几乎一致，只有在高压电极端部电场强度存在少许差异，因此本文认为电流测量装置对空气间隙放电几乎没有影响，可以满足放电电流的测量需求。

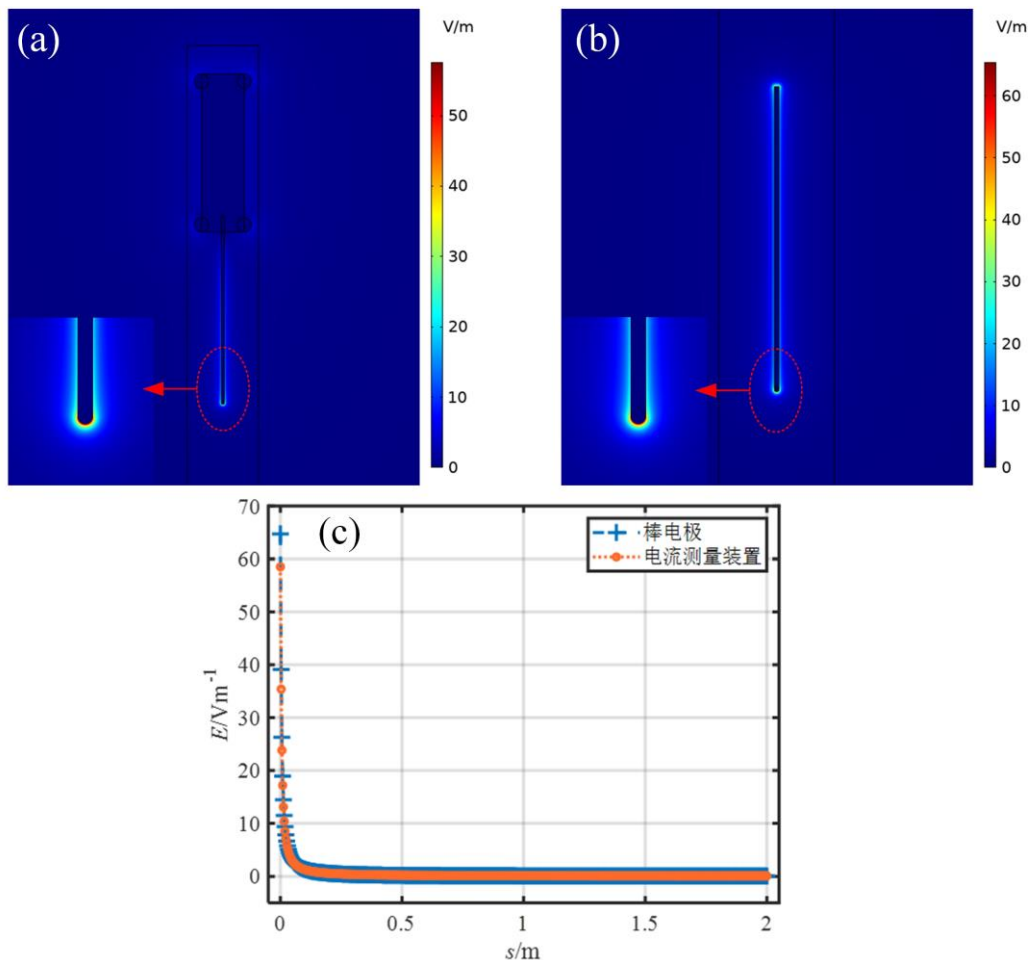


图 3.4 电流测量装置对间隙的影响

(a) 电流测量装置+棒电极的电场分布 (b) 棒电极的电场分布 (c) 轴线电场对比

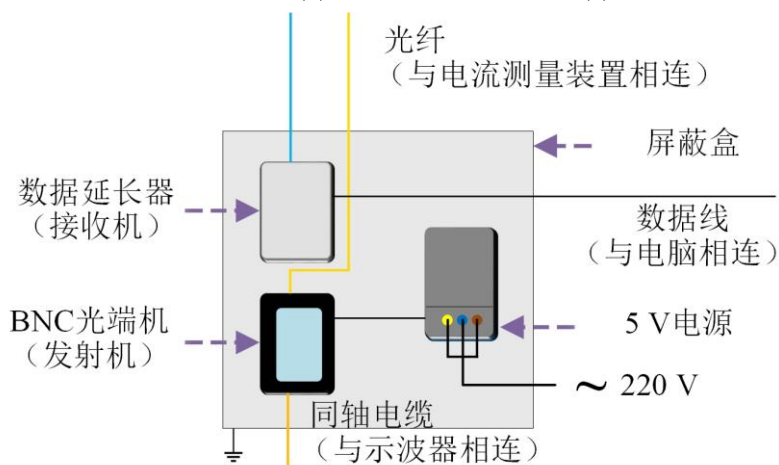


图 3.5 光电转换装置示意图

如图 3.5 所示,地电位的光电转换装置包含数据延长器(接收机)、BNC 光端机(发射机)和 5 V 电源。上述设备放于一个接地的屏蔽盒中,以确保电场不会干扰信号。数据延长器(接收机)用于将数据延长器(发射机)传输的光信号转换为数字数据,通过 USB 数据线传输到笔记本电脑。BNC 光端机(发射机)与示波器相连,用于将触发信号转换为光信号,传输给 BNC 光端机(接收机)。与高速相机一样,当示波器触发时,BNC 光端机(发射机)就会收到方波触发信号,即可触发电流测量系统。供电方面,BNC 光端机(发射机)由一个 5 V 电源供电,该电源由一个连接市电的 12 V 开关电源和一个 12/5 V 的降压模块组成;数据延长器(接收机)则由笔记本电脑通过 USB 数据线供电。

### 3.1.2.2 电流测量系统可靠性评估

电流测量系统测量的可靠性对准确确定放电物理过程具有重要意义,测量结果的幅值与频率响应的准确度是衡量可靠性的关键指标。本文搭建了如图 3.6(a)、(b)所示的电流测量系统可靠性评估试验平台。其中,电压信号由 FY2300H 型信号发生器产生,信号发生器连接测量电阻构成回路。将回路中一段导线放置于 Pearson 110 线圈中央,线圈测得的电流信号通过同轴电缆传输到示波器中。电流测量系统测得的电流信号为衰减探头测量电阻两端电压信号根据公式(3.1)计算所得,电压信号经过多次光电转换后输入到笔记本电脑的可视化操作软件中。

试验中,通过改变脉冲宽度,控制信号发生器发出不同类型的高频脉冲,模拟实际间隙放电过程中的脉冲波形。采用的脉冲宽度分别为 50 ns, 100 ns 和 500 ns。测量结果如图 3.6(c)、(d)、(e)所示,电流测量系统与 Pearson 110 线圈测量结果具有高度一致性。为了更加直观可靠地反映电流测量系统测得信号与 Pearson 110 线圈测得信号的差异程度,根据下列公式计算幅值偏差和波形偏差:

$$\Delta I_m = |\max(I_{\text{Pearson}}) - \max(I_{\text{CMD}})| \quad (3.3)$$

$$\Delta I = \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{\text{Pearson},i} - I_{\text{CMD},i})^2} \quad (3.4)$$

式中,  $\Delta I_m$  和  $\Delta I$  分别表示幅值偏差和波形偏差,  $I_{\text{Pearson}}$  和  $I_{\text{CMD}}$  分别表示 Pearson 110 线圈和电流测量装置(Current Measurement Device, CMD)测得的电流量列。计算得到二者测量结果的幅值偏差分别为 2.3866 mA、1.0066 mA、1.5706 mA,波形偏差分别为 10.3687 mA、1.1626 mA、2.6414 mA。幅值偏差反映测量的最大值的偏离程度,计算结果表明,  $w=50$  ns 时幅值有一定偏差,  $w=100$  ns 与  $w=500$  ns 时幅值偏差均可忽略不计。波形偏差反映整体测量波形的差异程度,采用常用回归评价指标均方根差(Root



Mean Square Error, RMSE)表征, 计算结果表明, 使用电流测量装置与 Pearson 110 线圈测量的信号整体具有较高一致性。综上, 电流测量系统与 Pearson 110 线圈测得的电流信号基本一致, 证明电流测量系统具有较高可靠性, 满足含悬浮导体长空气间隙放电电流的测量要求。

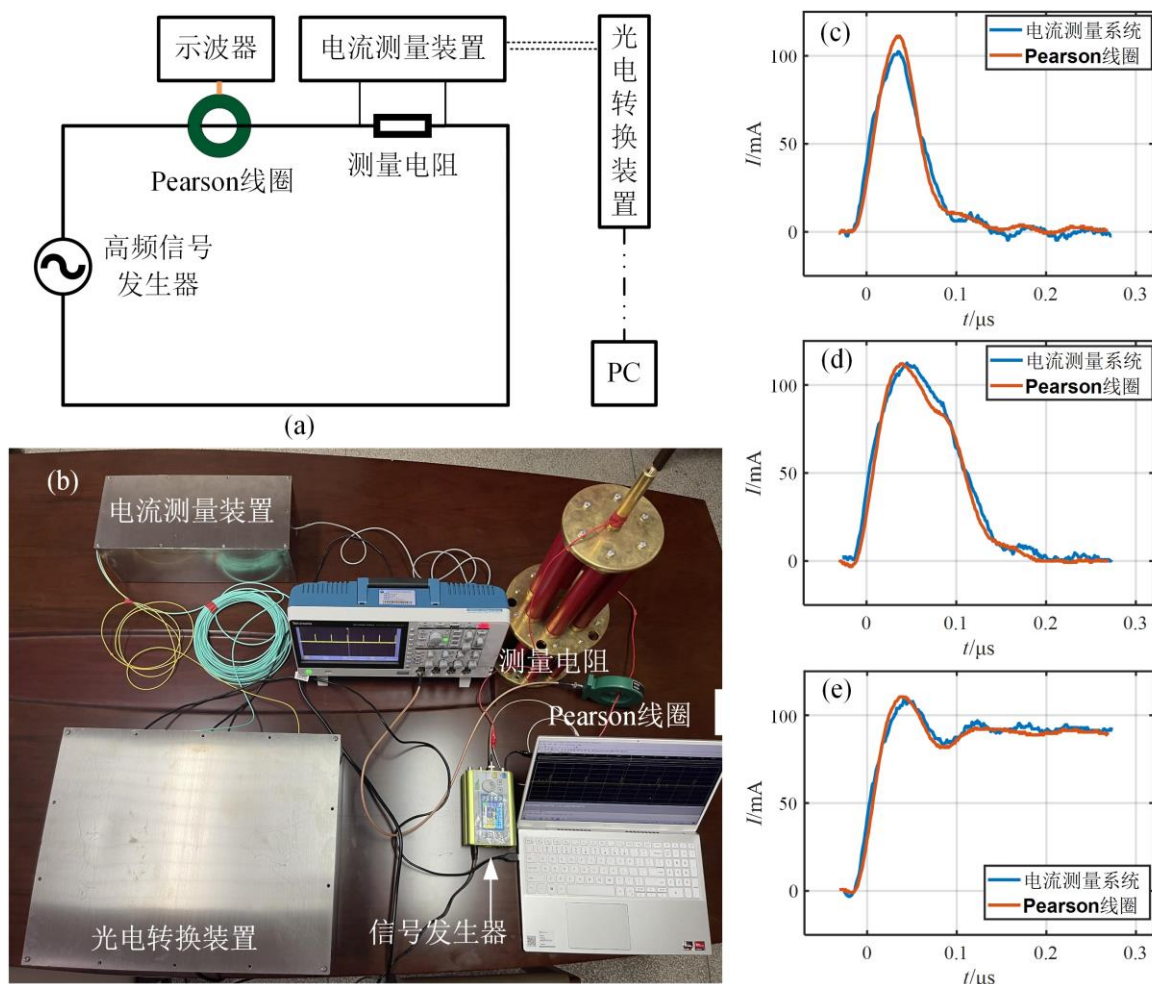


图 3.6 电流测量系统可靠性评估试验

(a) 电流测量系统可靠性评估试验方案 (b) 电流测量系统可靠性评估试验实物图

(c)  $w=50$  ns, 电流测量系统与 Pearson 110 线圈测量电流信号对比

(d)  $w=100$  ns, 电流测量系统与 Pearson 110 线圈测量电流信号对比

(e)  $w=500$  ns, 电流测量系统与 Pearson 110 线圈测量电流信号对比

### 3.1.3 同步观测方案

含悬浮导体长空气间隙放电物理过程的确定需要同时考虑分压器与示波器测量到的施加电压、光学图像摄影系统拍摄到的放电发展光学图像以及电流测量系统测量到的放电电流等观测数据。因此, 需要提出不同测量设备之间的同步观测方案。

实现不同测量设备的同步观测主要需要建立不同测量设备触发时刻之间的关系。

如图 3.7 所示，同步观测方案中，以施加电压上升时刻  $t=t_0$  为基准时刻。设置示波器的触发电平，当分压器的电压信号超过触发电平时，示波器触发，记录冲击电压发生器输出的施加电压波形，此时  $t=t_1$ 。示波器触发的同时，其 AUX OUT 输出端会输出一个方波触发信号。在 AUX OUT 输出端接三通 BNC 接口，两个 BNC 接口通过同轴电缆分别连接 BNC 光端机（发射机）的 BNC 接口和高速相机的 Trigger 输入端。电流测量系统中，BNC 光端机（发射机）接收到方波触发信号后，将该电信号光电转换为光信号，并通过光纤跳线传输到 BNC 光端机（接收机）。接收机接收到该光信号，将其光电转换为电信号，通过同轴电缆传输到 USB 模块化示波器外部触发通道。USB 模块化示波器持续工作，在接收到触发信号后，设定该时刻为其触发时刻 ( $t=t_1+t_2$ )，并记录触发时刻前后的放电电流波形。光学图像摄影系统中，高速相机持续工作，在接收到方波触发信号后，设定该时刻为其触发时刻 ( $t=t_1+t_3$ )，并记录触发时刻前后的光学图像。可见，相比于基准时刻 ( $t=t_0$ )，示波器、电流测量系统和光学图像摄影系统的触发时刻均存在一定延迟。示波器的延迟  $t_1$  可以通过获取到的冲击电压波形计算确定。电流测量系统的延迟包括示波器的延迟  $t_1$  和方波触发信号从示波器到模块化示波器的传输时间  $t_2$ 。光学图像摄影系统的延迟包括示波器的延迟  $t_1$  和方波触发信号从示波器到高速相机的传输时间  $t_3$ 。在同一个试验平台中，延迟  $t_2$  和  $t_3$  是固定的，可以将触发高速相机和 USB 模块化示波器的两根同轴电缆同时接在示波器上，手动触发示波器即可测得  $t_2$  和  $t_3$  值。试验获取观测数据后，计算不同测量设备的延迟，即可实现观测数据的同步分析。

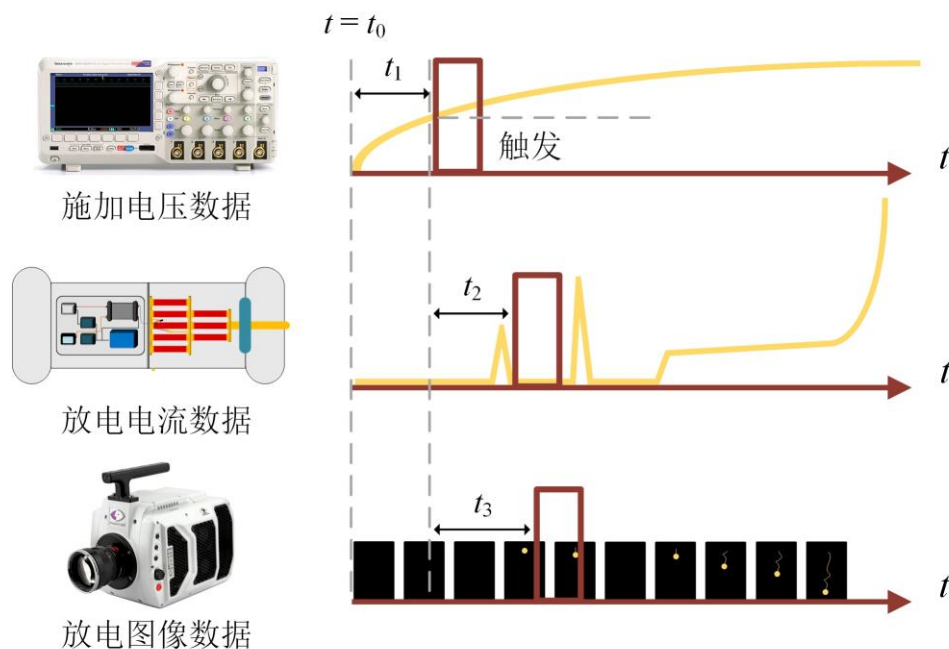


图 3.7 同步观测方案示意图

根据上述试验方案，搭建了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台，试验平台



实物图如图 3.8 所示。

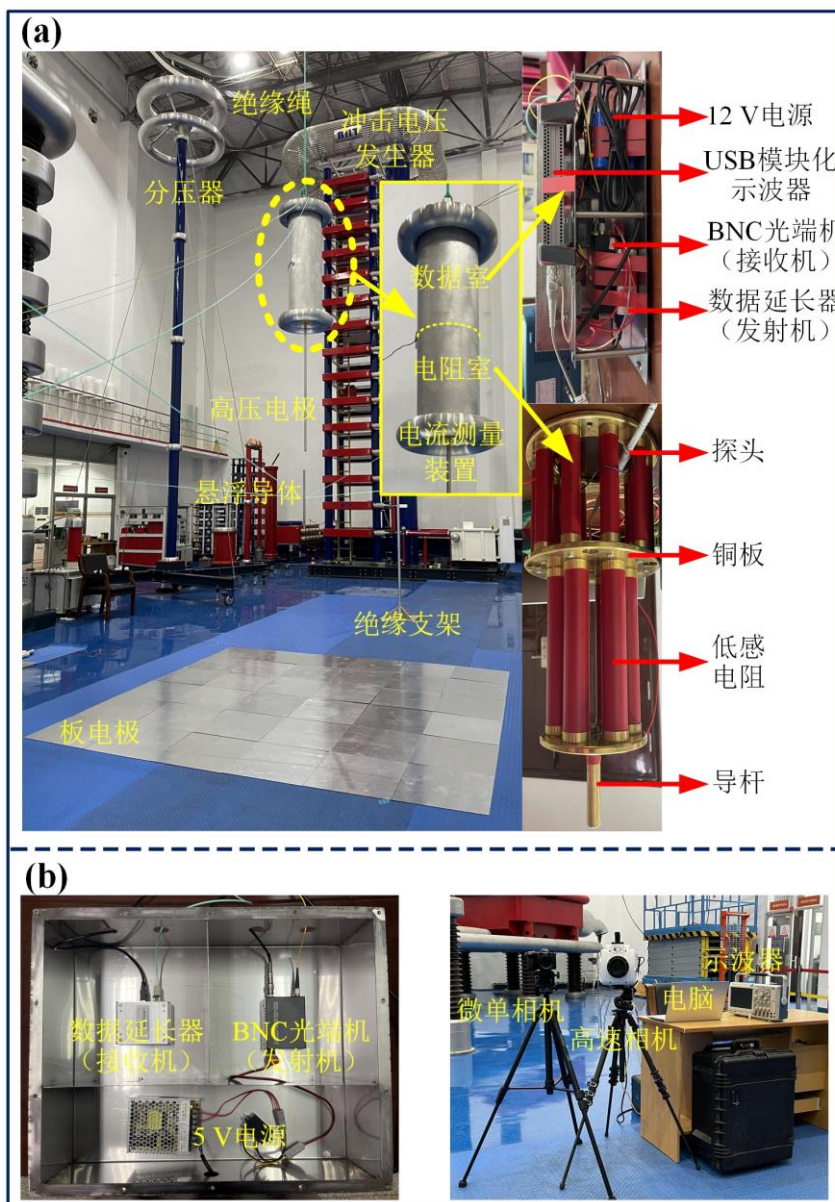


图 3.8 含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台实物图

(a) 高压侧试验装置 (b) 操作端试验装置

### 3.2 低海拔环境含悬浮导体长空气间隙放电观测试验

本节试验在武汉大学高电压试验大厅开展了低海拔环境 ( $H=41\text{ m}$ ) 含悬浮导体长空气间隙放电观测试验。悬浮导体在长空气间隙中的移动会形成不同间隙尺寸的间隙，子间隙长度的改变可能会造成放电物理过程的改变。悬浮导体的位置是无穷的，试验难以穷举所有间隙尺寸的含悬浮导体长空气间隙。为获取具有代表性的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程，选取了三种不同间隙尺寸的间隙开展放电观测试验，如表 3.1 所示，三类间隙分别代表悬浮导体靠近高压电极、悬浮导体位于间隙中央和悬浮导体

靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙。

表 3.1 放电观测试验间隙尺寸

$d$ (m)	悬浮电极	$s_1$ (m)	$s_1/(s_1+s_2)$ (%)	类型
2	A	0.3	20	悬浮导体靠近高压电极
		0.75	50	悬浮导体位于间隙中央
		1.2	80	悬浮导体靠近接地电极

试验使用的施加电压为波形 250/2500  $\mu\text{s}$  的正极性标准操作冲击电压，电压幅值为间隙的 50% 击穿电压  $U_{50}$ ，在子间隙 1 长度  $s_1=0.3$  m、1.2 m 的间隙试验中，施加电压幅值直接采用第 2 章获取的击穿电压  $U_{50}$ ；在子间隙 1 长度  $s_1=0.75$  m 的间隙试验中，根据第 2 章中击穿电压  $U_{50}$  曲线，利用插值法计算相应的击穿电压作为施加电压幅值。针对每一类间隙施加至少 20 次冲击电压，保证至少出现 10 次间隙击穿，记录观测数据，并分析放电物理过程。试验中环境温度为 28°C~34°C，相对湿度为 55%~68%，气压为 99.5~100.1 kPa。

### 3.2.1 悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙

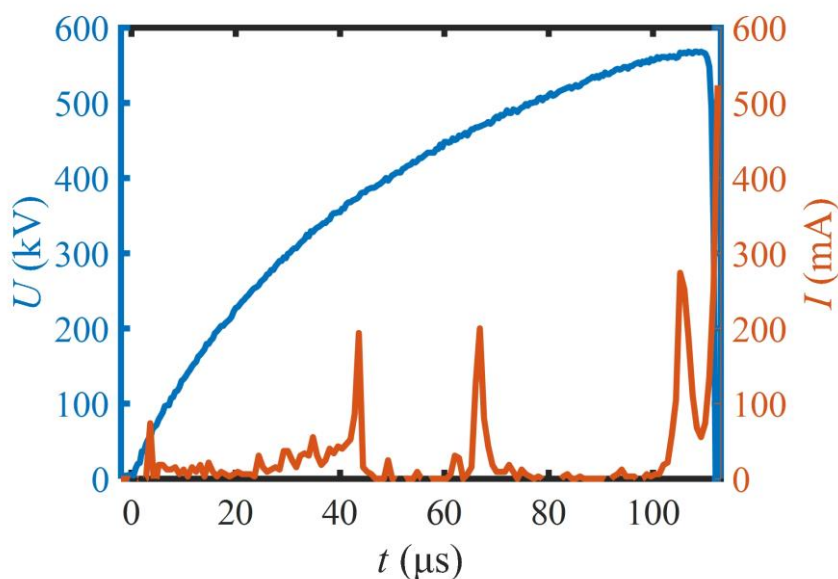


图 3.9 低海拔环境悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙施加电压与放电电流观测数据

图 3.9 与图 3.10 为一次低海拔环境悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程观测结果，其中图 3.9 为分压器与示波器测量得到的施加电压数据和电流测量系统测量得到的放电电流数据，图 3.10 为光学图像摄影系统获取的放电过程光学图像数据。设定冲击电压发生器产生冲击电压的时刻为  $t=0$   $\mu\text{s}$ 。当  $t=3.6$   $\mu\text{s}$  时，放电电流出现第一个脉冲，此时子间隙 1 中流注起始，与之相对应地，在  $t=3.88$   $\mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到了高压棒电极表面出现弱发光通道。此后，放电电流出现多个较小脉冲，放电持续进行。在  $t=12.56$   $\mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到第二个弱发光通道，此时子间隙 1

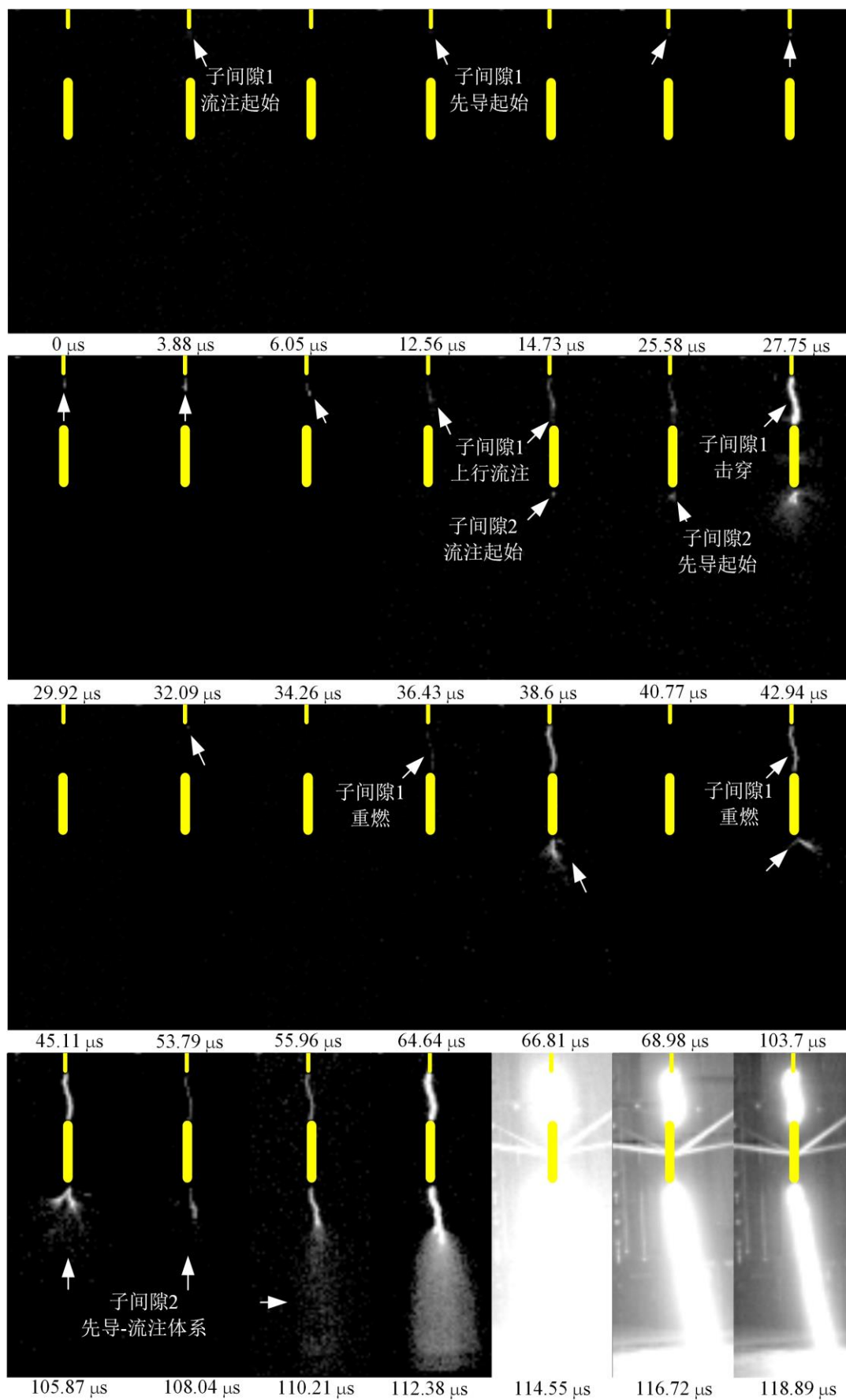


图 3.10 低海拔环境悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙放电过程光学图像

中先导起始，放电以先导-流注体系向前发展。在  $t=38.6 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 1 中的先导-流注体系已发展到接近悬浮电极，悬浮电极的上下端出现了流注，一个是子间隙 1 中的上行流注，一个是子间隙 2 中的下行流注。在  $t=40.77 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 1 中下行的先导-流注体系与悬浮电极产生的上行流注相遇，子间隙 1 进入跃变阶段；与此同时，子间隙 2 中先导起始。随后，在  $t=42.8 \mu\text{s}$  时，放电电流出现明显脉冲，与之相对应地，在  $t=42.94 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到高压棒电极与悬浮电极被电弧完全连接，子间隙 1 击穿。此后，子间隙 2 中放电仍以先导-流注体系向前发展，子间隙 2 中发生的明显放电会使放电电流出现明显增长，导致子间隙 1 出现了多次重燃现象（ $t=66.81 \mu\text{s}$ 、 $103.7 \mu\text{s}$  的光学图像）。在  $t=112.38 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 2 中先导前端的流注已到达接地板电极，放电进入末跃阶段。随后，在  $t=114.55 \mu\text{s}$  时，子间隙 1 与子间隙 2 全部击穿。

根据 10 次悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙击穿观测数据，统计计算子间隙 1 与子间隙 2 中先导自由发展阶段（跃变前）轴向发展的平均速度分别为  $1.11 \text{ cm}/\mu\text{s}$  和  $0.41 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ，子间隙 2 中的平均末跃高度为  $89.3 \text{ cm}$ ，占子间隙 2 长度的 74.4%。子间隙 1 中先导轴向发展平均速度与子间隙 2 中平均末跃高度与长空气间隙中观测到的结果较一致，但子间隙 2 中先导轴向发展平均速度较小，是因为在子间隙 1 未击穿前，悬浮电极的电位较低，不足以支持子间隙 2 中的先导快速发展。

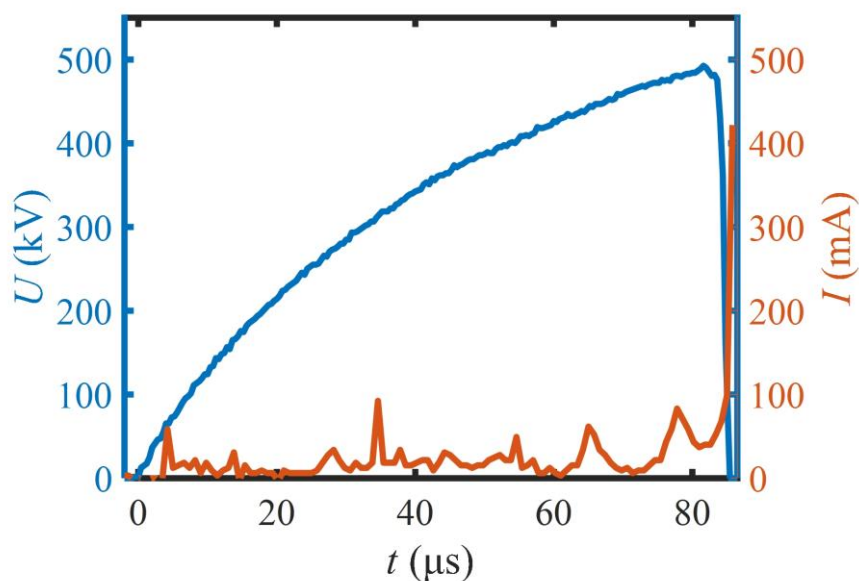


图 3.11 低海拔环境悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙施加电压与放电电流观测数据

### 3.2.2 悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙

图 3.11 与图 3.12 为一次低海拔环境悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程观测结果，其中图 3.11 为施加电压数据和放电电流数据，图 3.12 为放电过程光学图像。设定冲击电压发生器产生冲击电压的时刻为  $t=0 \mu\text{s}$ 。当  $t=4.2 \mu\text{s}$  时，



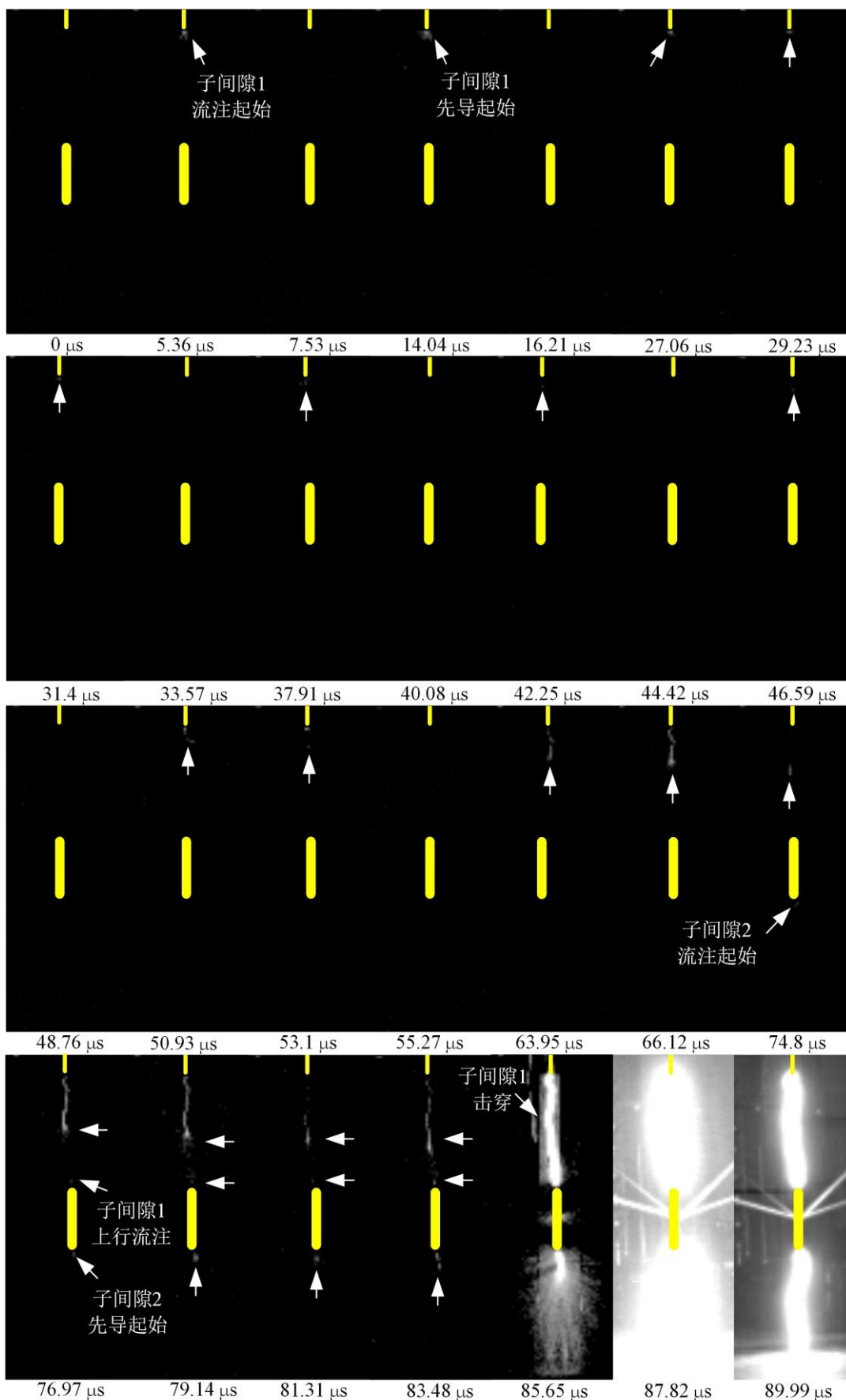


图 3.12 低海拔环境悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙放电过程光学图像

放电电流出现第一个脉冲，与之相对应地，高速相机在  $t=5.36 \mu\text{s}$  时拍摄到了弱发光通道，子间隙 1 中流注起始。随后，在  $t=13.8 \mu\text{s}$  时，放电电流出现了第二次明显脉冲，高速相机在  $t=14.04 \mu\text{s}$  时拍摄到了第二个弱发光通道，子间隙 1 中先导起始。此后，子间隙 1 中放电以先导-流注体系向前发展。在  $t=74.8 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到悬浮电极下端出现了弱发光通道，子间隙 2 流注起始，此后两个子间隙中的放电通道同时发展。在  $t=76.97 \mu\text{s}$  时，子间隙 1 中放电通道发展到了约 1/2 子间隙 1 长度时，悬浮电极上端出现了弱发光通道，悬浮电极表面出现了上行流注。此后，在子间隙 1 中，放电双向发展，放电过程由下行的先导-流注体系和上行流注共同组成。与此同时，子间隙 2 中放电进入了连续先导发展的过程，在  $t=85.65 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 1 完全击穿，子间隙 2 也进入了跃变阶段。与悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙放电区别较大的是，子间隙 2 在击穿前放电发展较快，在  $t=83.48 \mu\text{s}$  到  $t=85.65 \mu\text{s}$  之间，子间隙 2 中的放电通道长度也从约 15 cm 直接发展到了 75 cm。随后，在  $t=87.82 \mu\text{s}$  时，子间隙 1 与子间隙 2 全部击穿。

根据 10 次悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙击穿的观测数据，统计计算子间隙 1 与子间隙 2 中先导自由发展阶段轴向发展的平均速度分别为  $0.75 \text{ cm}/\mu\text{s}$  和  $1.76 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ，子间隙 2 中的平均末跃高度为 56.8 cm，占子间隙 2 长度的 75.7%。相比于悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙，子间隙 1 中先导发展速度变缓，子间隙 2 中先导发展速度有明显提升，末跃高度占子间隙 2 长度的比例没有明显变化。

### 3.2.3 悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙

图 3.13 与图 3.14 为一次低海拔环境悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程观测结果，其中图 3.13 为施加电压数据和放电电流数据，图 3.14 为放

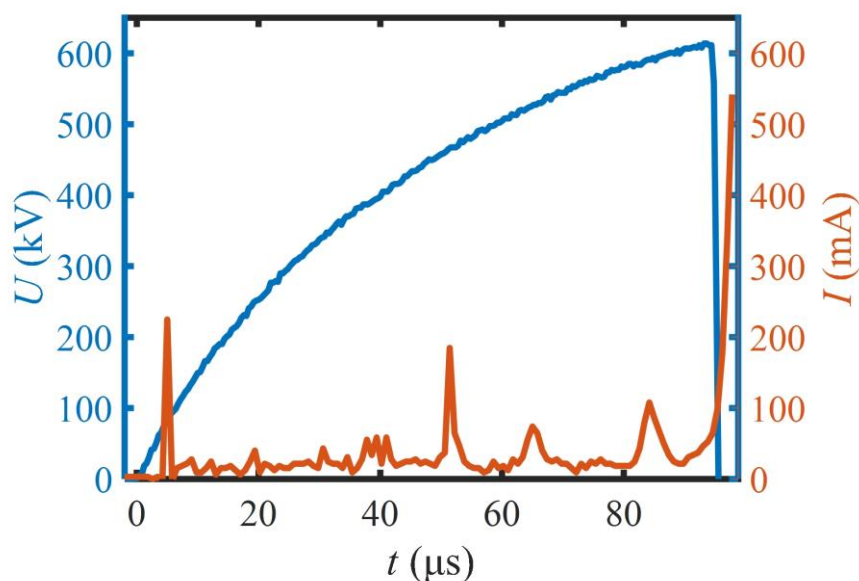


图 3.13 低海拔环境悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙施加电压与放电电流观测数据

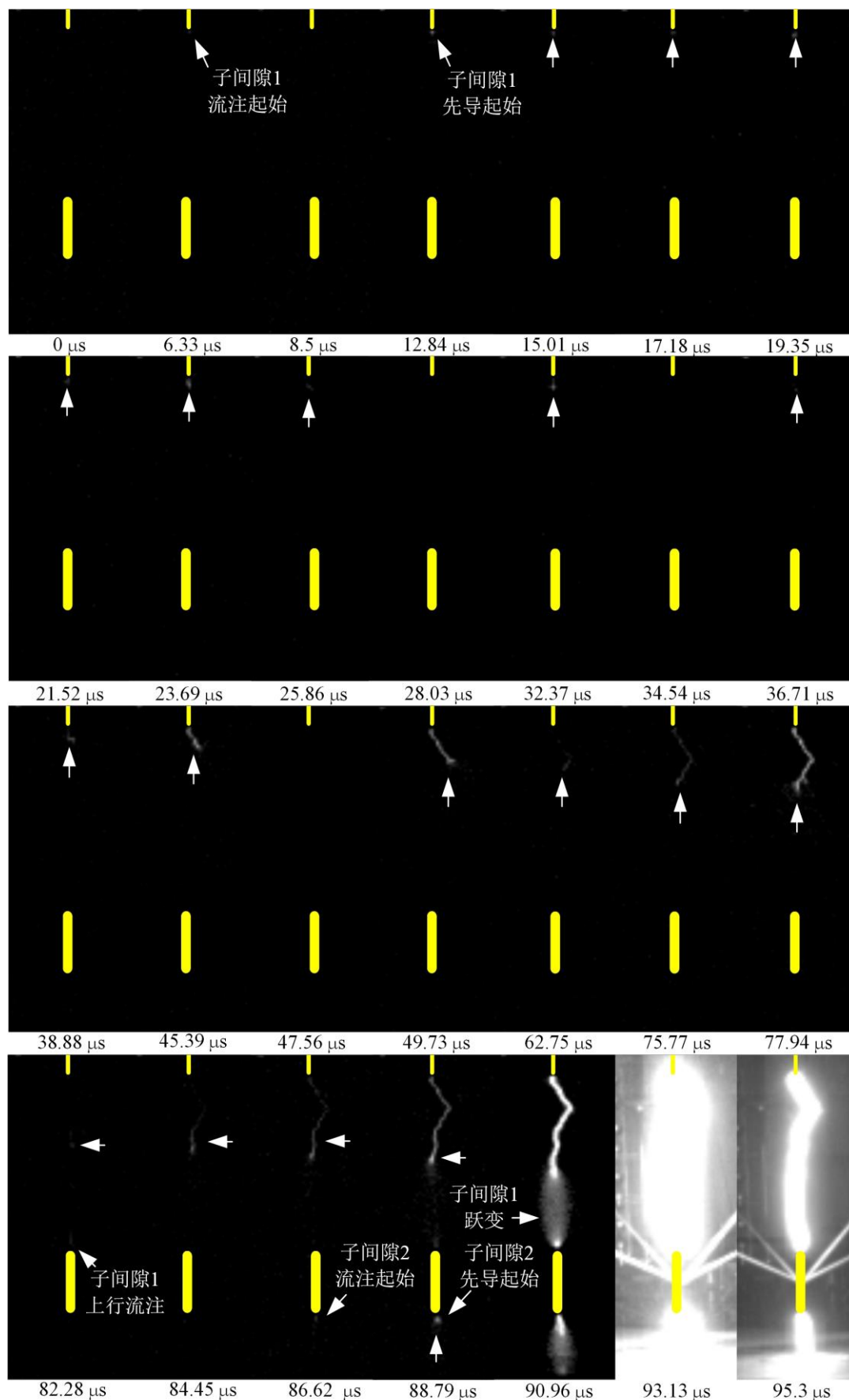


图 3.14 低海拔环境悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙放电过程光学图像

电过程光学图像。设定冲击电压发生器产生冲击电压的时刻为  $t=0 \mu\text{s}$ 。当  $t=5 \mu\text{s}$  时，放电电流出现第一个脉冲，与之相对应地，高速相机也在  $t=6.33 \mu\text{s}$  时拍摄到了弱发光通道，子间隙 1 中流注起始。在  $t=12.84 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到第二个弱发光通道，此时子间隙 1 中先导起始，放电以先导-流注体系不断向前发展。放电发展过程中，高速相机多次拍摄到了先导通道的熄灭与重燃现象，放电电流数据中也测量到了多次脉冲。随后，在  $t=82.28 \mu\text{s}$  时，当子间隙 1 中的先导-流注体系发展到约 50 cm 时，悬浮电极上端出现了弱发光通道，悬浮电极表面出现了上行流注，不过，在  $t=84.45 \mu\text{s}$  时，上行流注消失。在  $t=86.62 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到悬浮电极下端出现了弱发光通道，子间隙 2 流注起始，此后两个子间隙中的放电通道同时发展。在  $t=88.79 \mu\text{s}$  时，子间隙 1 中的上行流注再次出现，同时悬浮导体下端先导起始，子间隙 2 中放电进入了连续先导发展的过程，放电以连续先导-流注体系向前发展。在  $t=90.96 \mu\text{s}$  时，子间隙 1 中的下行流注与上行流注相遇，子间隙 2 中的流注也发展到了接地电极处，两个子间隙同时进入跃变阶段。在  $t=93.13 \mu\text{s}$  时，子间隙 1 与子间隙 2 全部击穿。

根据 10 次悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙击穿的观测数据，统计计算子间隙 1 中先导自由发展阶段轴向发展的平均速度分别为  $0.79 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 。由于子间隙 2 长度较短，无法统计其中先导发展速度与末跃高度。

### 3.3 高海拔环境含悬浮导体长空气间隙放电观测试验

本节试验在南方电网公司昆明特高压试验基地开展了高海拔环境 ( $H=2050 \text{ m}$ ) 含悬浮导体长空气间隙放电观测试验。间隙结构、总间隙长度、施加电压波形等试验布置与试验条件与 3.2 节一致，子间隙 1 长度仍选取  $s_1=0.3 \text{ m}$ 、 $0.75 \text{ m}$  和  $1.2 \text{ m}$ ，施加电压幅值为间隙的 50% 击穿电压  $U_{50}$ 。试验中环境温度为  $19^\circ\text{C}\sim 21^\circ\text{C}$ ，相对湿度为  $67\%\sim 72\%$ ，气压为  $79.8 \text{ kPa}$ 。

#### 3.3.1 悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙

图 3.15 与图 3.16 为一次高海拔环境悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程观测结果，其中图 3.15 为光学图像摄影系统获取的放电过程光学图像数据，图 3.16 为分压器与示波器测量得到的施加电压数据和电流测量系统测量得到的放电电流数据。设定冲击电压发生器产生冲击电压的时刻为  $t=0 \mu\text{s}$ 。在  $t=8.18 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到了高压棒电极表面出现微弱发光通道，子间隙 1 中流注起始。在这一阶段，放电电流也出现了较小脉冲，但幅值不够显著，这可能与子间隙 1 长度较小导致放电量小有关。随后，在  $t=18.6 \mu\text{s}$  时放电电流数据出现明显脉冲，子间隙 1 中先导起始。在  $t=53.97 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 2 中出现弱发光通道，子间隙 2 出现下



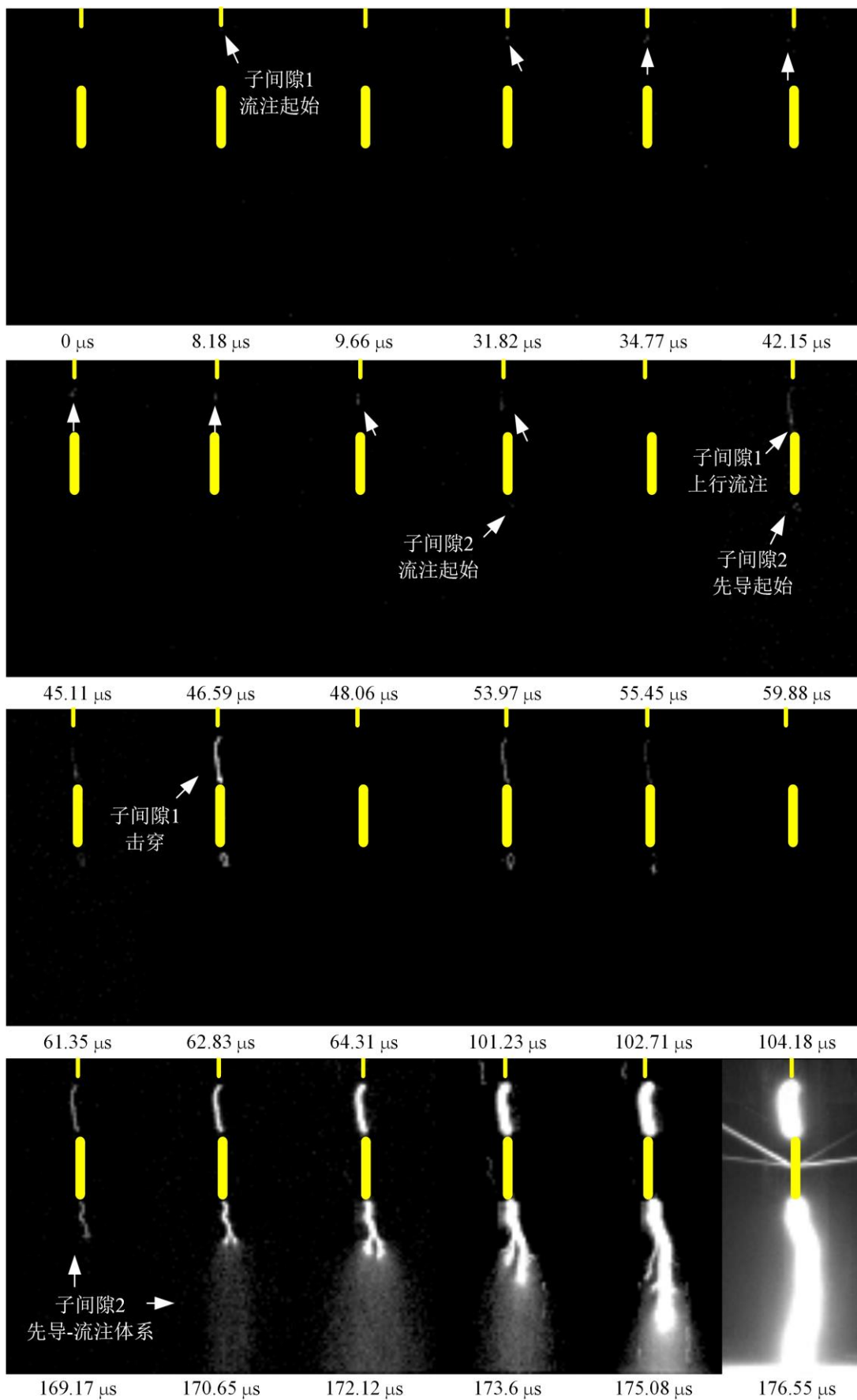


图 3.15 高海拔环境悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙放电过程光学图像

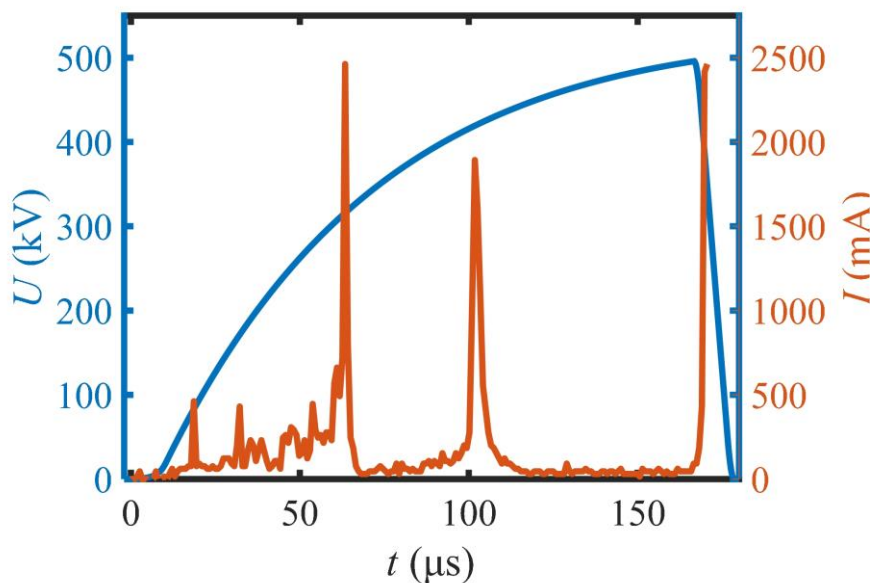


图 3.16 高海拔环境悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙施加电压与放电电流观测数据行流注。在  $t=59.88 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 1 中的先导-流注体系已发展到接近悬浮电极，悬浮电极的上端出现了流注，子间隙 1 中上行流注起始。同一时刻，子间隙 2 中再次出现弱发光通道，子间隙 2 中先导起始。在  $t=62.83 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 1 中已完全被放电通道连接，子间隙 1 击穿。此后，子间隙 2 中放电仍以先导-流注体系向前发展，子间隙 2 中发生的明显放电会使放电电流出现明显增长，导致子间隙 1 出现了多次重燃现象。在  $t=170.65 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 2 中先导前端的流注已到达接地板电极，放电进入末跃阶段。随后，在  $t=176.55 \mu\text{s}$  时，子间隙 1 与子间隙 2 全部击穿。

根据 10 次悬浮导体靠近高压电极的含悬浮导体长空气间隙击穿的观测数据，统计计算子间隙 1 与子间隙 2 中先导自由发展阶段轴向发展的平均速度分别为  $0.78 \text{ cm}/\mu\text{s}$  和  $0.39 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ，子间隙 2 中的平均末跃高度为  $85.4 \text{ cm}$ ，占子间隙 2 长度的 71.1%。相比于低海拔环境中相同类型的含悬浮导体长空气间隙放电观测试验结果，高海拔环境中空气间隙放电发展速度更缓慢，末跃高度基本一致。

### 3.3.2 悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙

图 3.17 与图 3.18 为一次高海拔环境悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程观测结果，其中图 3.17 为光学图像摄影系统获取的放电过程光学图像数据，图 3.18 为施加电压数据和放电电流数据。设定冲击电压发生器产生冲击电压的时刻为  $t=0 \mu\text{s}$ 。在  $t=8.14 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到高压棒电极表面出现微弱发光通道，子间隙 1 中流注起始。在  $t=12.57 \mu\text{s}$  的光学图像中，高压棒电极表面再次出现弱发光通道，子间隙 1 中先导起始。随后，子间隙 1 中放电以先导-流注体系不断向前发展。在  $t=89.37 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 2 中悬浮电极下表面出现弱发光通道，子间隙 2

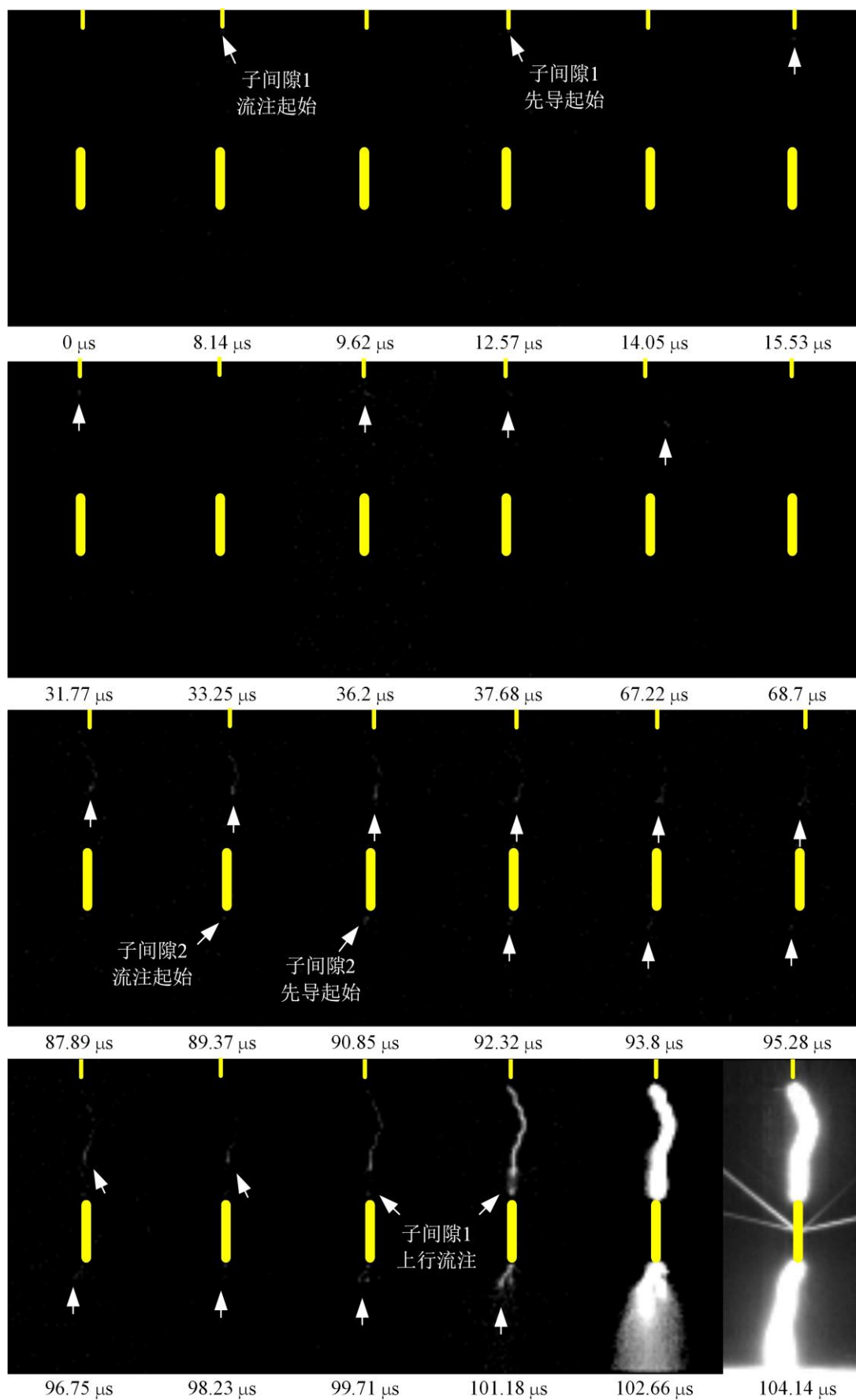


图 3.17 高海拔环境悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙放电过程光学图像

出现下行流注。随后，在  $t=90.85 \mu\text{s}$  的光学图像中，子间隙 2 中仍存在弱发光通道，子间隙 2 中先导起始，放电以先导-流注体系向前发展。在  $t=99.71 \mu\text{s}$  的光学图像中，悬浮电极上表面出现弱发光通道，子间隙 1 中上行流注起始，并随后在  $t=101.18 \mu\text{s}$  的光学图像中可见子间隙 1 中下行先导-流注体系和上行流注相遇，放电进入跃变阶段。在  $t=102.66 \mu\text{s}$  的光学图像中，随着子间隙 1 的击穿，子间隙 2 也进入了末跃阶段，并使整个间隙最终击穿。

根据 10 次悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙击穿的观测数据，统计计算子间隙 1 与子间隙 2 中先导自由发展阶段轴向发展的平均速度分别为  $0.73 \text{ cm}/\mu\text{s}$  和  $1.51 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ，子间隙 2 中的平均末跃高度为  $54.5 \text{ cm}$ ，占子间隙 2 长度的  $72.7\%$ 。相比于低海拔环境中相同类型的含悬浮导体长空气间隙放电观测试验结果，高海拔环境中间隙放电发展速度更缓慢，末跃高度基本一致。

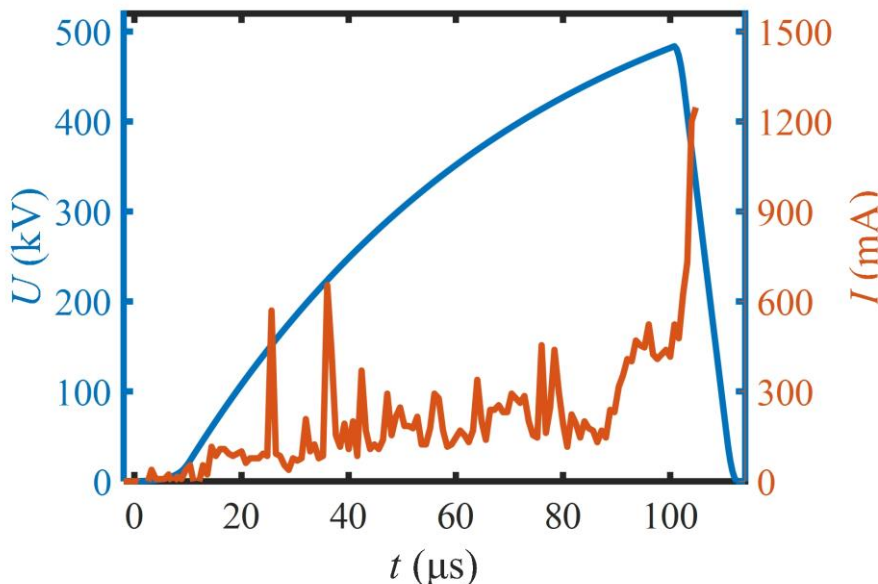


图 3.18 高海拔环境悬浮导体位于间隙中央的含悬浮导体长空气间隙施加电压与放电电流观测数据

### 3.3.3 悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙

图 3.19 与图 3.20 为一次高海拔环境悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程观测结果，其中图 3.19 为施加电压数据和放电电流数据，图 3.20 为放电过程光学图像。设定冲击电压发生器产生冲击电压的时刻为  $t=0 \mu\text{s}$ 。当  $t=4.6 \mu\text{s}$  时，放电电流出现第一个脉冲，此时子间隙 1 中流注起始。在  $t=19.88 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到弱发光通道，此时子间隙 1 中先导起始，放电以先导-流注体系不断向前发展。在  $t=109.31 \mu\text{s}$  的光学图像中，悬浮电极下表面出现了弱发光通道，子间隙 2 中流注起始。随后，在  $t=110.79 \mu\text{s}$  的光学图像中，悬浮电极上下表面都出现了弱发光通道，子间隙 1 中上行流注起始，子间隙 2 中先导起始。此后，子间隙 1 和子间隙 2 中都以前导-流注体系继续发展。在  $t=115.22 \mu\text{s}$  的光学图像中，子间隙 1 和子间隙 2 都进入跃变阶段，

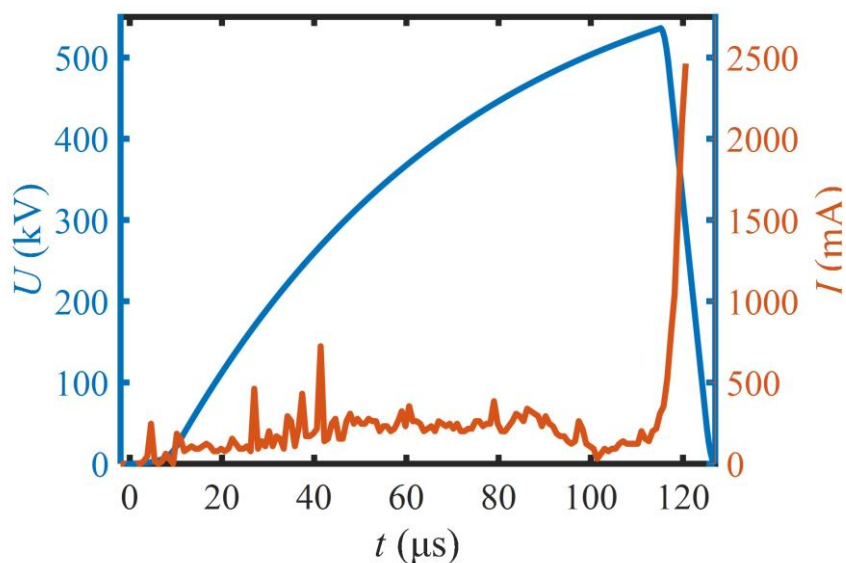


图 3.19 高海拔环境悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙施加电压与放电电流观测数据

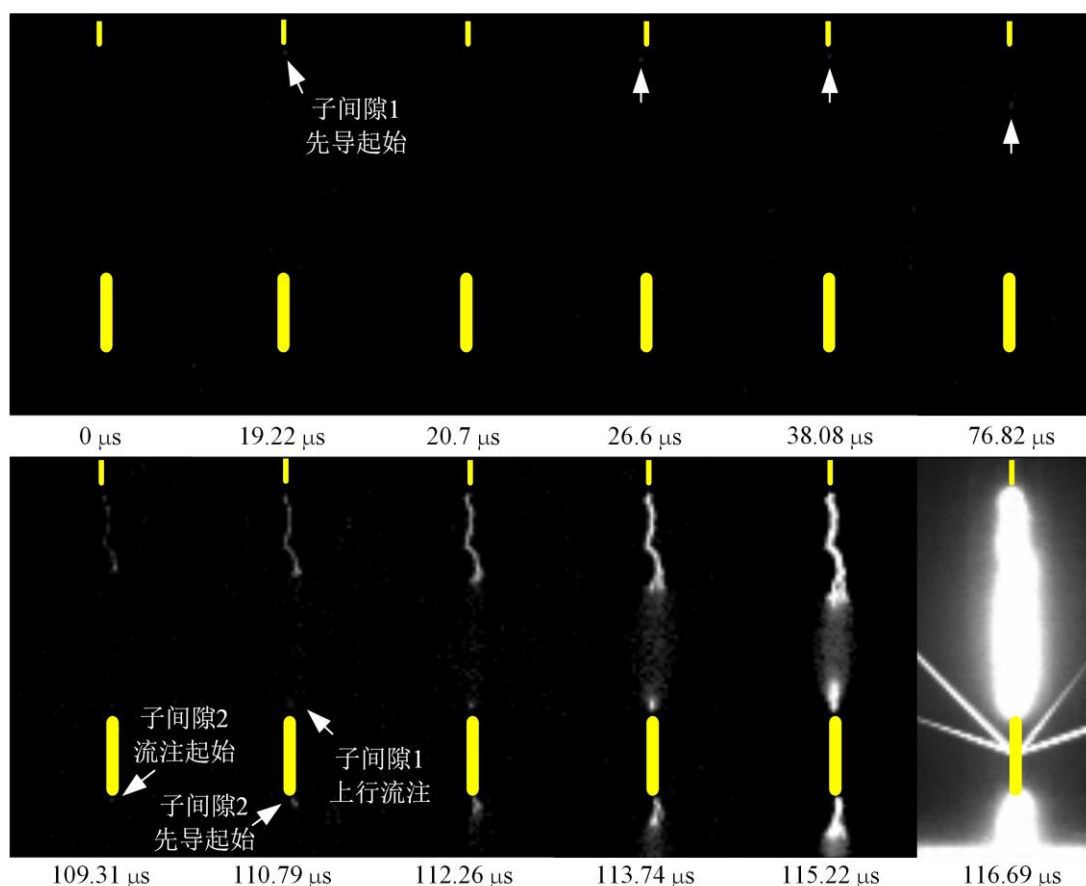


图 3.20 高海拔环境悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙放电过程光学图像并在  $t=116.69 \mu\text{s}$  的光学图像中，整个间隙击穿。

根据 10 次悬浮导体靠近接地电极的含悬浮导体长空气间隙击穿的观测数据，统计计算子间隙 1 中先导自由发展阶段轴向发展的平均速度分别为  $0.63 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 。由于子间隙 2 长度较短，无法统计其中先导发展速度与末跃高度。相比于低海拔环境中相同类型的

含悬浮导体长空气间隙放电观测试验结果，高海拔环境中间隙放电发展速度更缓慢。

### 3.4 含悬浮导体长空气间隙放电物理过程分析

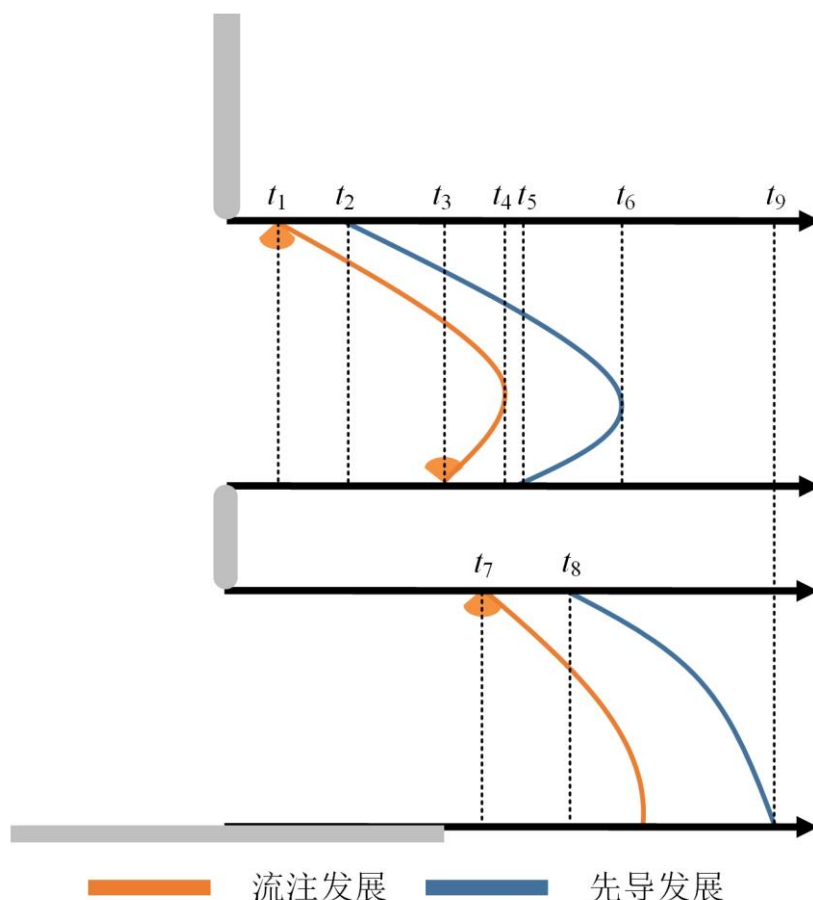


图 3.21 含悬浮导体长空气间隙放电物理过程

比较低海拔环境与高海拔环境含悬浮导体长空气间隙放电观测试验结果发现，高海拔环境中间隙先导发展速度小于低海拔环境中间隙先导发展速度，子间隙 2 末跃高度基本一致。比较悬浮导体位于不同位置的间隙放电物理过程发现，冲击电压下含悬浮导体长空气间隙的放电会在子间隙 1 与子间隙 2 中同时发展。图 3.21 根据观测试验结果总结了含悬浮导体长空气间隙的放电物理过程，其中子间隙 1 中放电主要由下行先导-流注体系和上行流注组成， $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_5$ 、 $t_6$  分别代表流注起始时刻、下行先导起始时刻、上行流注起始时刻、子间隙 1 跃变起始时刻、上行先导起始时刻以及子间隙 1 击穿时刻；子间隙 2 中放电主要由先导-流注体系组成， $t_7$ 、 $t_8$  分别代表流注起始时刻和先导起始时刻， $t_9$  代表子间隙 2 击穿，同时也代表整个间隙击穿。间隙放电物理过程与悬浮导体的位置有关，悬浮导体位于不同位置时，间隙放电物理过程中上述时刻存在差异。不过，放电物理过程也具有一定普遍的规律：悬浮导体在任意位置时，放电全部从子间隙 1 率先开始；悬浮导体在任意位置时，子间隙 2 中放电都会于子间隙 1 击穿前起始；悬浮导体在任意位置时，子间隙 2 击穿不会早于子间隙 1 击穿。而



当悬浮导体靠近高压电极时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中放电通道仍需较长时间发展才能完成击穿；而当悬浮导体位于间隙中央或靠近接地电极时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 在很短时间内即完成击穿。观测试验结果还发现，与普通长空气间隙放电光学图像相比，子间隙 1 中流注区域长度较小，这可能与悬浮导体的存在有关。子间隙 1 放电过程中，空间电荷的产生会改变悬浮导体电位及空间的电位分布，相比于普通长空气间隙，在空间电荷影响下，子间隙 1 轴线电位下降更平缓，与背景电势的电位差也会更大。根据观测到的光学图像中先导长度与流注区域长度，利用施加电压波形和公式(1.11)计算的先导压降可以确定先导头部电位，对比其与背景电势相比，可以推算子间隙 1 中流注区域的平均电场可能达到 600 kV/m。而观测试验结果中子间隙 2 的区域与普通长空气间隙相似，通过同样计算方法，子间隙 2 中流注区域平均电场约为 440 kV/m，这与普通长空气间隙中流注区域平均电场 400~500 kV/m 的值<sup>[21]</sup>相当。上述研究结论可以作为含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型建立的理论依据。

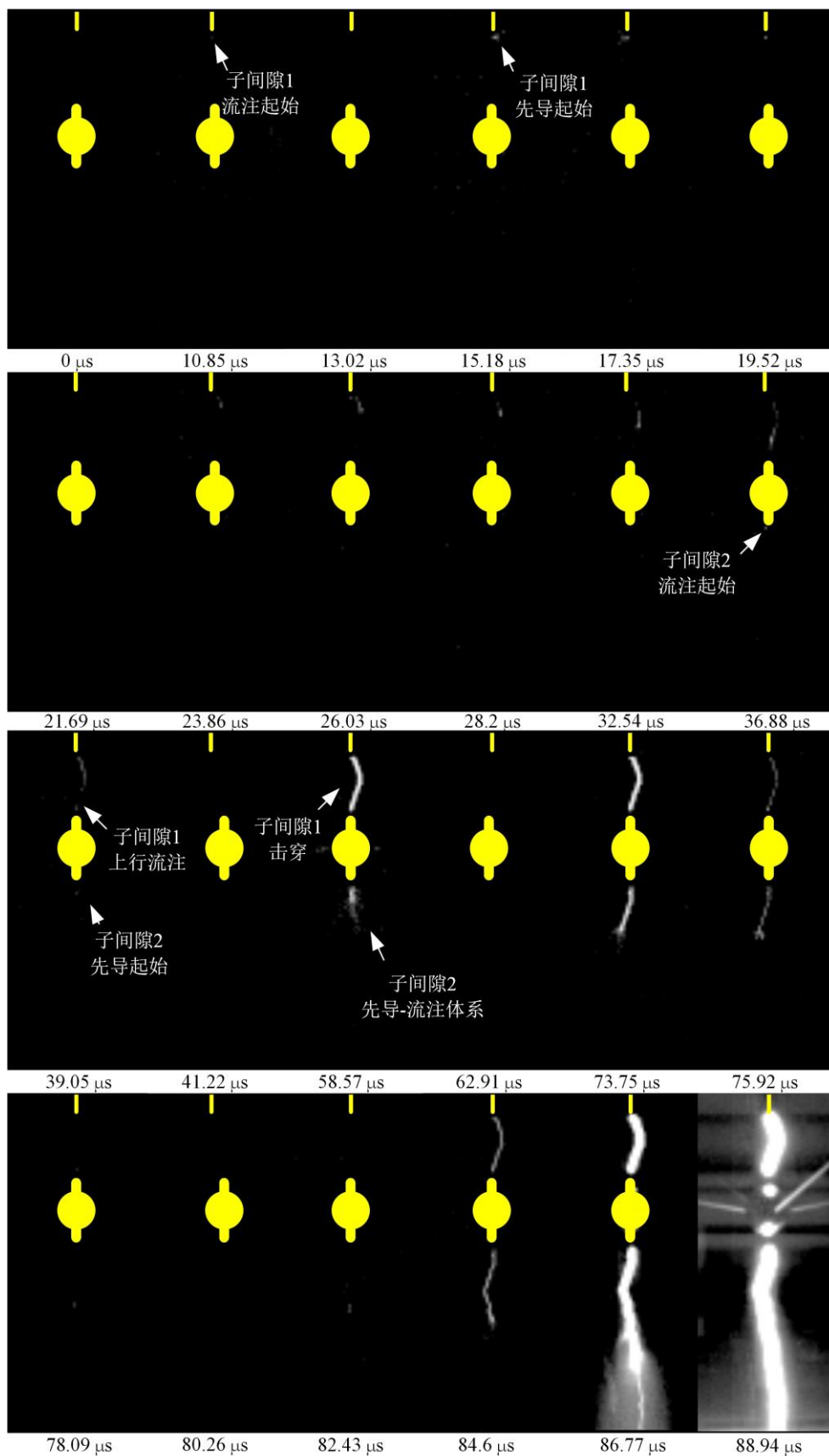
### 3.5 含复杂结构悬浮电极的长空气间隙放电过程研究

2.3 节发现具有棒型凸出物的球型组合悬浮电极 E 对长空气间隙击穿电压的影响与棒型悬浮电极 A、B 对间隙击穿电压的影响相似。本节利用高速相机拍摄了含悬浮电极 E 长空气间隙放电过程的光学图像，比较分析了含具有明显凸出物复杂结构悬浮电极长空气间隙与含棒型悬浮电极长空气间隙放电发展过程的差异，解释了两类间隙击穿电压特性相似的原因。

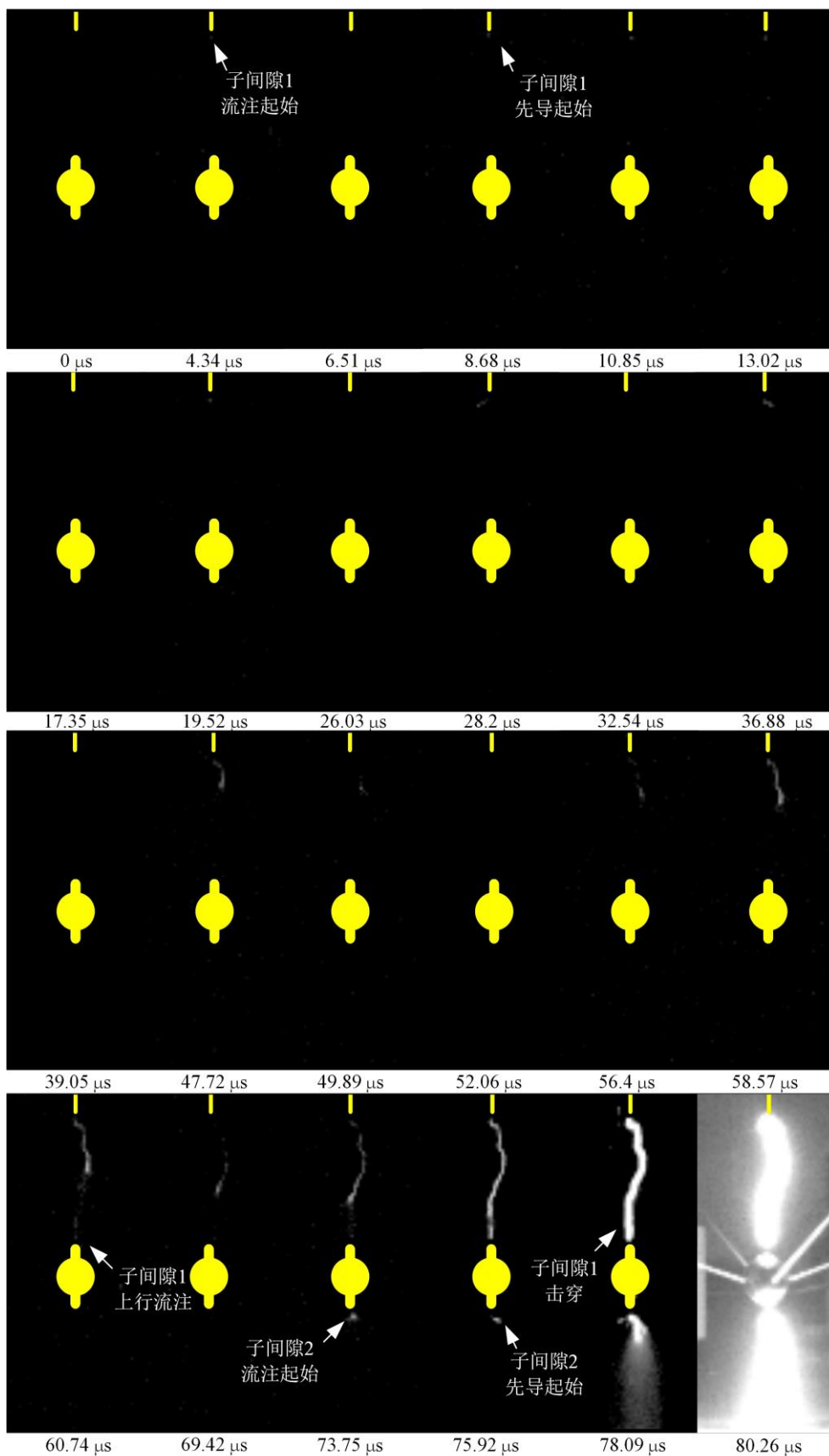
本节试验除悬浮电极采用悬浮电极 E 外，总间隙长度、施加电压波形等试验布置与试验条件与 3.2 节一致，先后拍摄了  $s_1=0.3\text{ m}$ 、 $0.75\text{ m}$  和  $1.2\text{ m}$  间隙的放电过程，试验结果如图 3.22 所示。图 3.22(a)展示了一次悬浮电极靠近高压电极时的间隙放电过程。放电始于  $t=10.85\text{ }\mu\text{s}$  左右，子间隙 1 中流注起始。随后  $t=15.18\text{ }\mu\text{s}$  左右，先导起始，子间隙 1 中放电开始以先导-流注体系向前发展。在  $t=36.88\text{ }\mu\text{s}$  的图像中，悬浮电极下表面出现弱发光通道，子间隙 2 中流注起始。在  $t=39.05\text{ }\mu\text{s}$  的图像中，悬浮电极上下表面均出现弱发光通道，子间隙 1 中上行流注起始，子间隙 2 中先导起始。此后，在子间隙 2 中放电也开始以先导-流注体系向前发展。在  $t=58.57\text{ }\mu\text{s}$  的图像中，子间隙 1 被放电通道短接，子间隙 1 击穿。随后，子间隙 2 中的先导-流注体系于  $t=86.77\text{ }\mu\text{s}$  左右发展至接地板电极，放电进入末跃阶段并使得整个间隙击穿。上述放电发展过程与 3.2.1 中悬浮导体靠近高压电极的含棒型悬浮导体长空气间隙放电发展过程基本一致。

图 3.22(b)展示了一次悬浮电极位于间隙中央时的间隙放电过程。在  $t=4.34\text{ }\mu\text{s}$  的放电光学图像中，高压电极表面出现弱发光通道，此时子间隙 1 中流注起始。随后，经

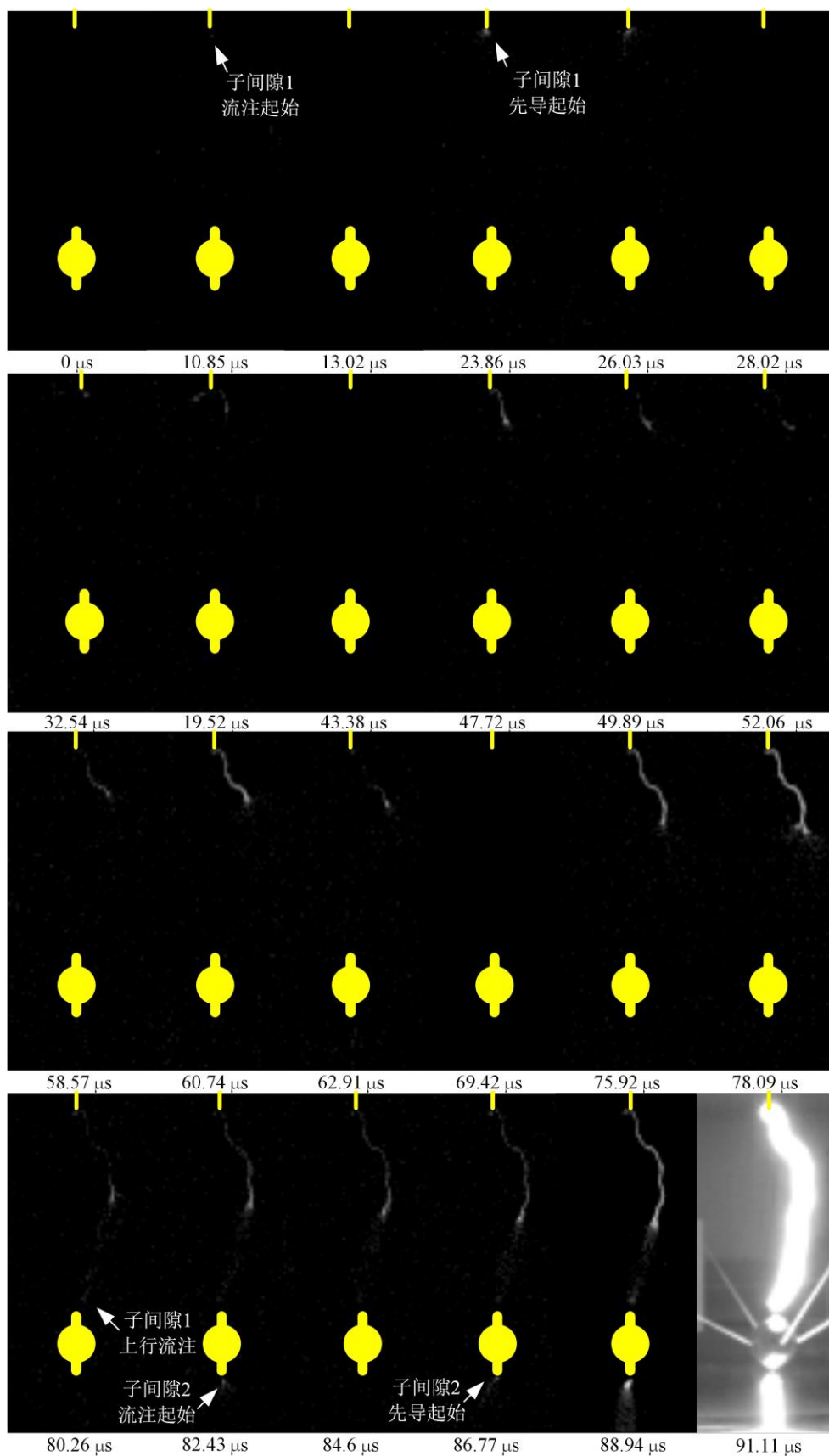




(a) 悬浮导体靠近高压电极



(b) 悬浮导体位于间隙中央



(c) 悬浮导体靠近接地电极

图 3.22 含复杂结构悬浮电极长空气间隙放电过程光学图像

过一段时间的暗期后，子间隙 1 于  $t=8.68 \mu\text{s}$  左右先导起始，放电以先导-流注体系向前发展。在  $t=60.74 \mu\text{s}$  的图像中，悬浮电极上表面出现弱发光通道，子间隙 1 上行流注起始。悬浮电极下表面的弱发光通道首次出现于  $t=73.75 \mu\text{s}$  的图像中，此时子间隙 2 中流注起始。在  $t=75.92 \mu\text{s}$  的图像中，子间隙 1 中的下行先导-流注体系与上行流注相遇，放电进入跃变阶段，而子间隙 2 中仍有明显的弱发光通道，此时子间隙 2 中放电已进入先导-流注体系发展阶段。随后，在  $t=78.09 \mu\text{s}$  的图像中，子间隙 1 被放电通道短接，子间隙 1 击穿，子间隙 2 进入了末跃阶段并使整个间隙最终击穿。上述放电发展过程与 3.2.2 中悬浮导体位于间隙中央的含棒型悬浮导体长空气间隙放电发展过程相比，子间隙 2 中放电起始较晚，这可能与复杂结构悬浮电极几何结构更均匀使得电极下端场强畸变较弱有关。不过，在子间隙 1 击穿后，子间隙 2 也直接进入了末跃阶段，并使整个间隙在短时间内击穿，因此可以认为两类间隙放电发展过程基本一致。

图 3.22(c)展示了一次悬浮电极靠近接地电极时的间隙放电过程。在  $t=10.85 \mu\text{s}$  的放电光学图像中，高压电极表面出现弱发光通道，此时子间隙 1 中流注起始。随后，经过一段时间的暗期后，子间隙 1 于  $t=23.86 \mu\text{s}$  左右先导起始，放电以先导-流注体系向前发展，在经历过多次熄灭和重燃后不断向悬浮电极发展。在  $t=80.26 \mu\text{s}$  的图像中，悬浮电极上表面出现弱发光通道，子间隙 1 上行流注起始。悬浮电极下表面的弱发光通道首次出现于  $t=82.43 \mu\text{s}$  的图像中，此时子间隙 2 中流注起始。随后，在  $t=86.77 \mu\text{s}$  左右，子间隙 2 中先导起始。在  $t=88.94 \mu\text{s}$  的图像中，子间隙 1 中的下行流注与上行流注相遇，子间隙 2 中的流注也发展到了接地电极处，两个子间隙都进入了跃变阶段，并使整个间隙最终击穿。上述放电发展过程与 3.2.3 中悬浮导体靠近接地电极的含棒型悬浮导体长空气间隙放电发展过程基本一致。

上述研究表明，含具有明显凸出物复杂结构悬浮电极的长空气间隙放电发展过程与含棒型悬浮电极长空气间隙放电发展过程基本一致，两类间隙击穿电压特性的相似性是由相似的间隙放电物理过程引起的。

在带电作业组合间隙的真型试验中，模拟人为一占位长约 0.5 m、高约 1.45 m 的人型电极，模拟人的躯干较均匀，而膝盖、脚部、手部、头部等结构都属于明显凸出物，因此模拟人也为一整体均匀、但具有明显凸出物的电极。根据前文试验结果，本文认为带电作业组合间隙的放电物理过程与本章确定的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程一致。

### 3.6 本章小结

本章建立了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台，在第 2 章含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台的基础上，观测试验平台增加了光学图像摄影系统与电流测量系统，可以测量间隙放电的光学图像数据、电流数据和电压数据，从而确定含悬浮

导体长空气间隙的放电物理过程。

本章分别在武汉大学高电压试验大厅和南方电网公司昆明特高压试验基地开展了低海拔环境和高海拔环境中含悬浮导体长空气间隙放电观测试验，确定了含悬浮导体长空气间隙的放电物理过程和放电物理参数。含悬浮导体长空气间隙放电中，子间隙 1 中放电主要由下行先导-流注体系和上行流注组成，子间隙 2 中放电主要由先导-流注体系组成，间隙放电物理过程与悬浮导体的位置有关，悬浮导体位于不同位置时，间隙放电物理过程中各阶段起始时刻存在差异。放电物理过程也具有一定普遍的规律：悬浮导体在任意位置时，放电全部从子间隙 1 率先开始，子间隙 2 中放电都会在子间隙 1 击穿前起始，子间隙 2 击穿不会早于子间隙 1 击穿。上述研究结论可以作为含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型建立的理论依据。

本章开展了含具有明显凸出物复杂结构悬浮电极的长空气间隙放电观测试验，对比了其放电发展过程与含棒型悬浮电极长空气间隙放电发展过程的差异。结果表明，含具有明显凸出物复杂结构悬浮电极的长空气间隙放电发展过程与含棒型悬浮电极长空气间隙放电发展过程基本一致，两类间隙击穿电压特性的相似性是由相似的间隙放电物理过程引起的。考虑到带电作业真型试验中模拟人为具有明显凸出物的复杂结构电极，认为带电作业组合间隙的放电物理过程与确定的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程一致。



## 4 最小击穿电压区域形成机理研究

含悬浮导体长空气间隙中，随着悬浮导体沿轴线逐渐远离高压电极，间隙击穿电压先下降后上升，产生一个最小击穿电压区域。最小击穿电压区域是空气间隙绝缘强度最薄弱的区域，在输电线路带电作业中，带电作业组合间隙最小击穿电压位置的击穿电压是确定最小组合间隙的关键，对保证带电作业人员安全具有重要意义。研究最小击穿电压区域形成机理一方面有助于更准确确定最小击穿电压区域的位置，并进一步保障带电作业人员的人身安全，另一方面也可以为含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型的建立提供依据。本章利用含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台，分别开展了低海拔环境和高海拔环境中含悬浮导体长空气间隙最小击穿电压区域的观测试验，根据最小击穿电压区域中间隙放电物理过程的变化规律，揭示了含悬浮导体长空气间隙中最小击穿电压区域的形成机理。

### 4.1 低海拔环境最小击穿电压区域放电观测试验

本节在武汉大学高电压试验大厅开展了低海拔环境含悬浮导体长空气间隙最小击穿电压区域放电观测试验，试验的总间隙长度、施加电压波形等试验布置与试验条件与 3.2 节一致。在前文 2.2 节中，开展了低海拔环境总间隙长度为 2 m 的含悬浮电极 A 间隙的放电特性试验，试验结果显示间隙最小击穿电压区域为  $s_1=50\sim 70$  cm。本节试验针对  $s_1=50$  cm、60 cm 和 70 cm 的该类间隙开展观测试验，其中  $s_1=50$  cm 的间隙代表最小击穿电压位置前的间隙类型， $s_1=60$  cm 的间隙代表最小击穿电压位置附近的间隙类型， $s_1=70$  cm 的间隙代表最小击穿电压位置后的间隙类型。试验施加电压幅值设定为 2.2 节中确定的间隙击穿电压  $U_{50}$ 。试验中环境温度为  $28^\circ\text{C}\sim 34^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 55%~68%，气压为 99.5~100.1 kPa。

图 4.1 与图 4.2 为  $s_1=50$  cm 间隙放电物理过程观测结果，其中图 4.1 为分压器与示波器测量得到的施加电压数据和电流测量系统测量得到的放电电流数据，图 4.2 为光学图像摄影系统获取的放电过程光学图像数据。在  $t=6\ \mu\text{s}$  时，放电电流出现一个明显脉冲，此时子间隙 1 中流注起始。随后，放电电流出现多次脉冲，相对应地，在  $t=18.1\ \mu\text{s}$  到  $t=57.15\ \mu\text{s}$  的范围内，光学图像数据中也多次拍摄到弱发光通道，表明子间隙 1 中先导起始并不断向前发展。在  $t=57.15\ \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 1 中的先导-流注体系已发展到接近悬浮电极，悬浮电极的上端出现了弱发光通道，子间隙 1 中上行流注起始。在  $t=63.35\ \mu\text{s}$  的光学图像数据中，拍摄到悬浮电极下端出现了弱发光通道，子间隙 2 中流注起始。随后，随着子间隙 1 中下行的先导-流注体系与上行流注相遇，子间隙 1 进入跃变阶段，并在  $t=72\ \mu\text{s}$  左右击穿。而子间隙 2 中，随着悬浮电极的电位升高，放电以先导-流注体系不断向前发展。在  $t=74.5\ \mu\text{s}$  到  $t=150.42\ \mu\text{s}$  的范围内，光学图像



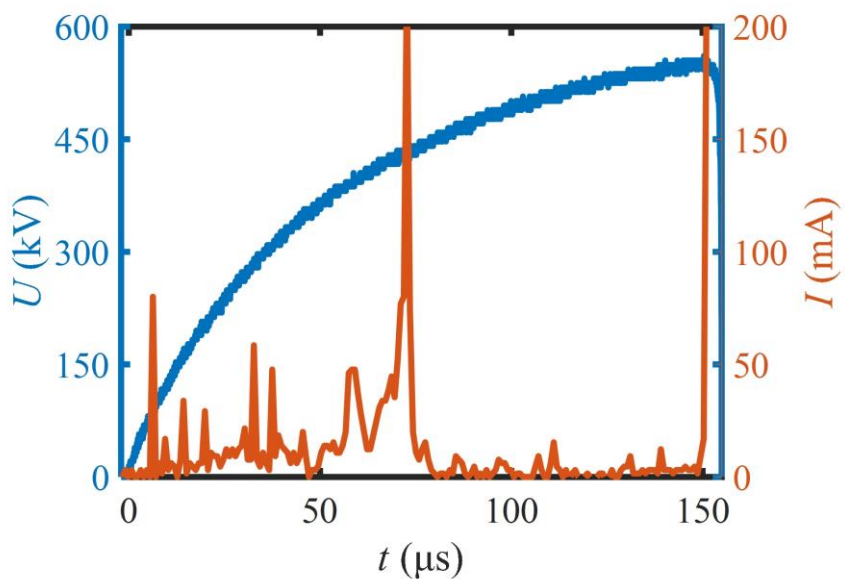


图 4.1 低海拔环境最小击穿电压位置前 ( $s_1=50$  cm) 间隙放电施加电压与放电电流观测数据

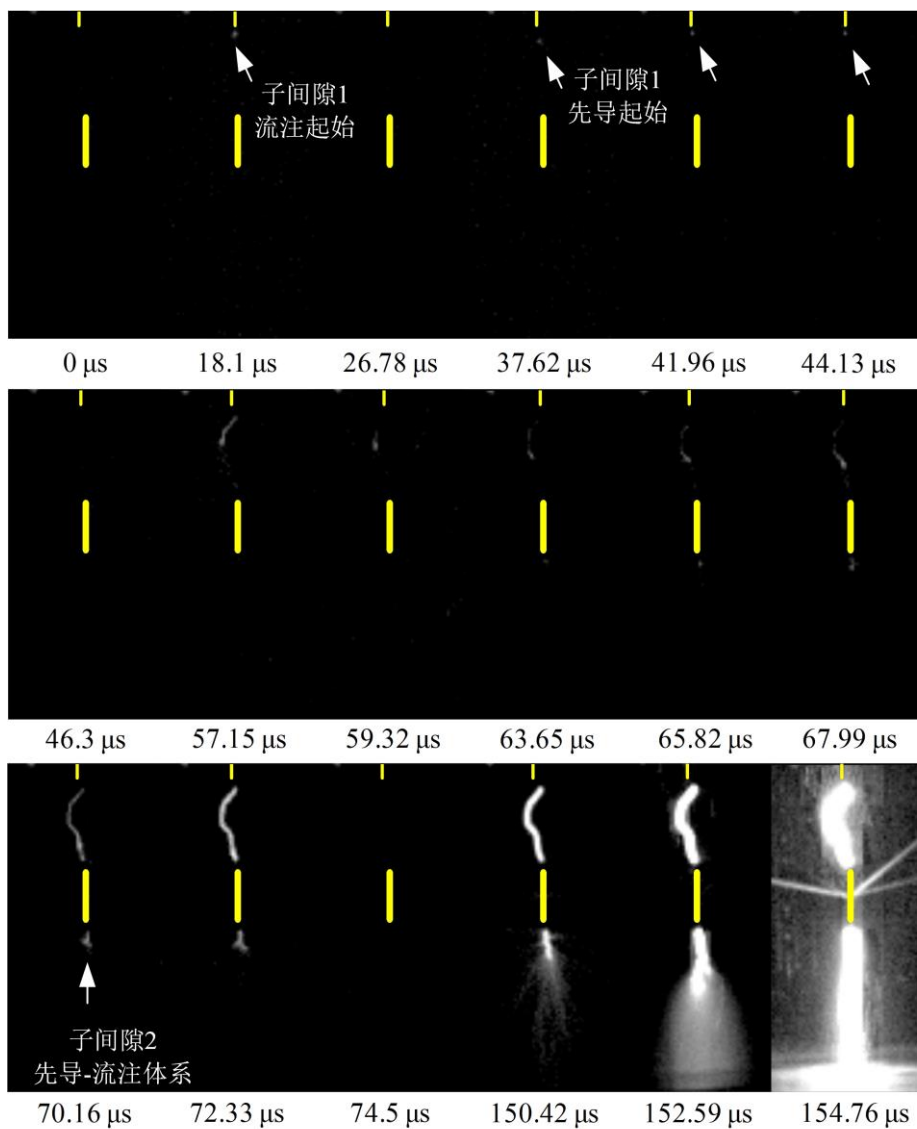


图 4.2 低海拔环境最小击穿电压位置前 ( $s_1=50$  cm) 间隙放电过程光学图像

数据显示放电通道熄灭，没有出现明显的发光通道。在  $t=150.42 \mu\text{s}$  左右，高速相机再次拍摄到了发光通道，子间隙 2 中先导通道出现重燃现象，同时子间隙 1 中的放电通道也出现重燃现象。随后，子间隙 2 中的先导-流注体系发展至接地板电极，放电进入末跃阶段，并在  $t=154.76 \mu\text{s}$  左右，整个间隙击穿。

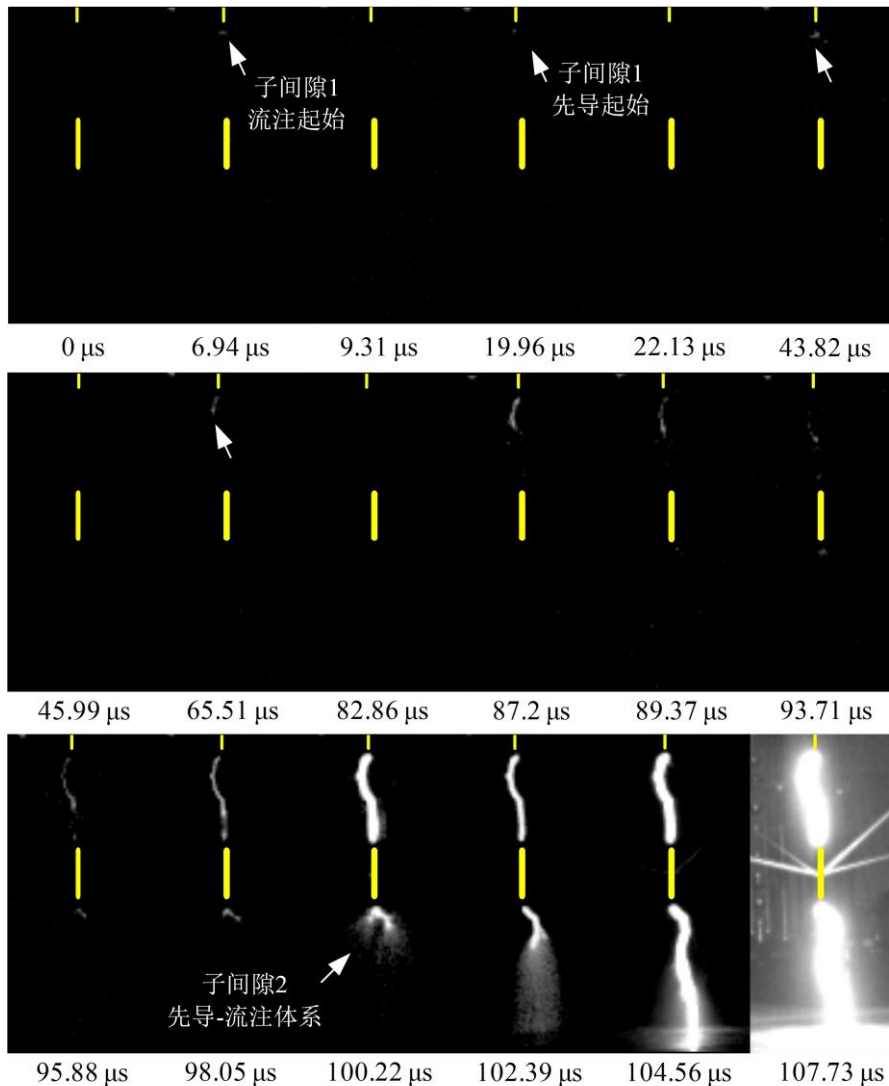


图 4.3 低海拔环境最小击穿电压位置附近 ( $s_1=60 \text{ cm}$ ) 间隙放电过程光学图像

图 4.3 与图 4.4 为  $s_1=60 \text{ cm}$  间隙放电物理过程观测结果，其中图 4.3 为光学图像数据，图 4.4 为施加电压数据和放电电流数据。在  $t=6.4 \mu\text{s}$  时，放电电流出现一个明显脉冲，相对应地，在  $t=6.94 \mu\text{s}$  的光学图像数据中，拍摄到高压棒电极表面出现弱发光通道，此时子间隙 1 中流注起始。随后，放电电流出现多次脉冲，相对应地，在  $t=19.96 \mu\text{s}$  到  $t=89.37 \mu\text{s}$  的范围内，光学图像数据中也多次拍摄到弱发光通道，表明子间隙 1 中先导起始并不断向前发展。在  $t=89.37 \mu\text{s}$  的光学图像数据中，拍摄到悬浮电极下端出现了弱发光通道，子间隙 2 中流注起始。在  $t=93.71 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 1 中的先导-流注体系已发展到接近悬浮电极，悬浮电极的上端出现了弱发光通道，子间隙 1 中上行流注起始。随着下行的先导-流注体系与上行流注相遇，子间隙 1 进入跃变

阶段，并在  $t=100.22 \mu\text{s}$  左右击穿。在子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中先导-流注体系继续向前发展，并在很短时间内进入末跃阶段，并在  $t=107.73 \mu\text{s}$  左右，整个间隙击穿。

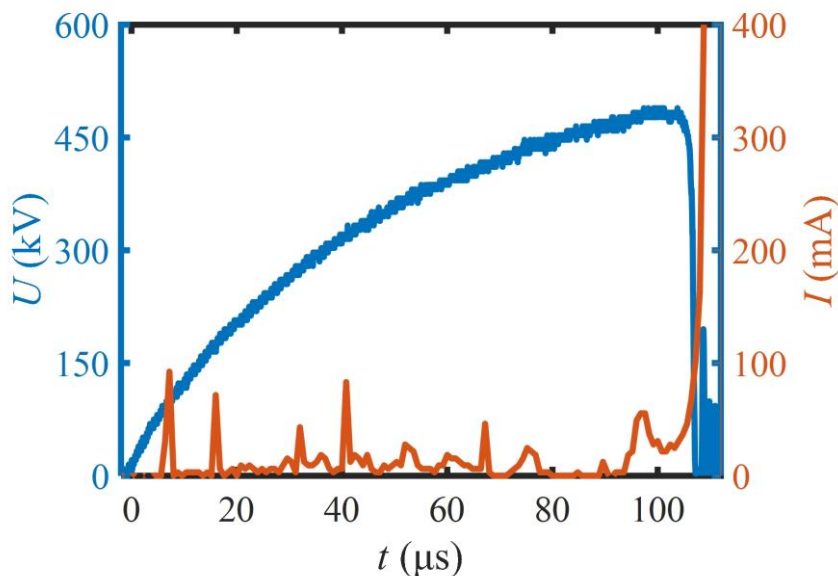


图 4.4 低海拔环境最小击穿电压位置附近 ( $s_1=60 \text{ cm}$ ) 间隙放电施加电压与放电电流观测数据

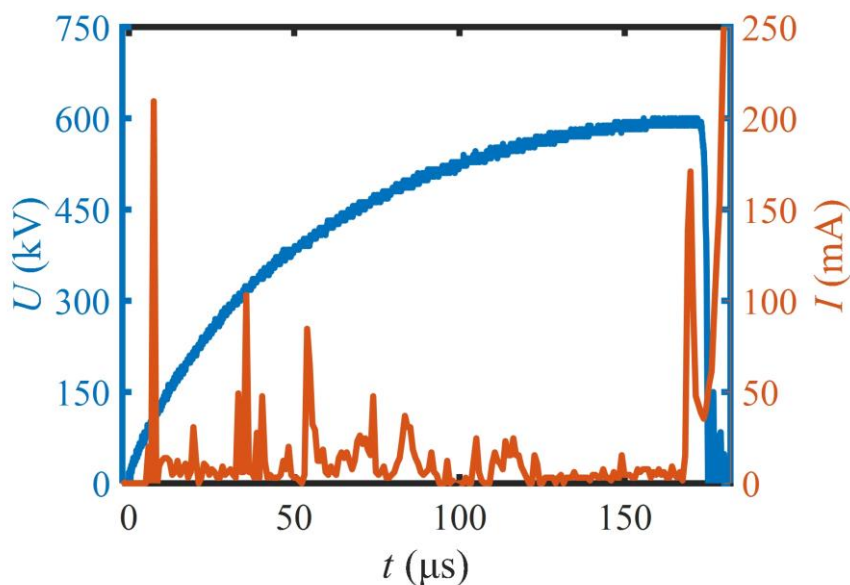


图 4.5 低海拔环境最小击穿电压位置后 ( $s_1=70 \text{ cm}$ ) 间隙放电施加电压与放电电流观测数据

图 4.5 与图 4.6 为  $s_1=70 \text{ cm}$  间隙放电物理过程观测结果，其中图 4.5 为施加电压数据和放电电流数据，图 4.6 为光学图像数据。在  $t=7.5 \mu\text{s}$  时，放电电流出现一个明显脉冲，相对应地，在  $t=7.6 \mu\text{s}$  的光学图像数据中，拍摄到高压棒电极表面出现弱发光通道，此时子间隙 1 中流注起始。随后，放电电流出现多次脉冲，相对应地，在  $t=42.31 \mu\text{s}$  到  $t=74.84 \mu\text{s}$  的范围内，光学图像数据中也多次拍摄到弱发光通道，表明子间隙 1 中先导起始并不断向前发展。光学图像数据中，在  $t=77.1 \mu\text{s}$  到  $t=103.04 \mu\text{s}$  的范围内，没有拍摄到明显的发光通道。随后，在  $t=103.04 \mu\text{s}$  的光学图像数据中，高速相机拍摄到弱发光通道，先导重燃。不过，在之后的一段时间内，先导又再次熄灭，直至  $t=155.11 \mu\text{s}$

左右，高速相机再次拍摄到先导重燃现象。在  $t=155.27 \mu\text{s}$  时，高速相机拍摄到子间隙 1 中的先导-流注体系已发展到接近悬浮电极，悬浮电极的上端出现了弱发光通道，子间隙 1 中上行流注起始。同时，悬浮电极下端中也出现弱发光通道，子间隙 2 中流注起始。随后，在  $t=165.95 \mu\text{s}$  的光学图像数据中，随着下行的先导-流注体系与上行流注相遇，子间隙 1 进入跃变阶段。在  $t=168.12 \mu\text{s}$  的光学图像数据中，子间隙 1 击穿，子间隙 2 也进入了末跃阶段，并在  $t=170.29 \mu\text{s}$  左右，整个间隙击穿。

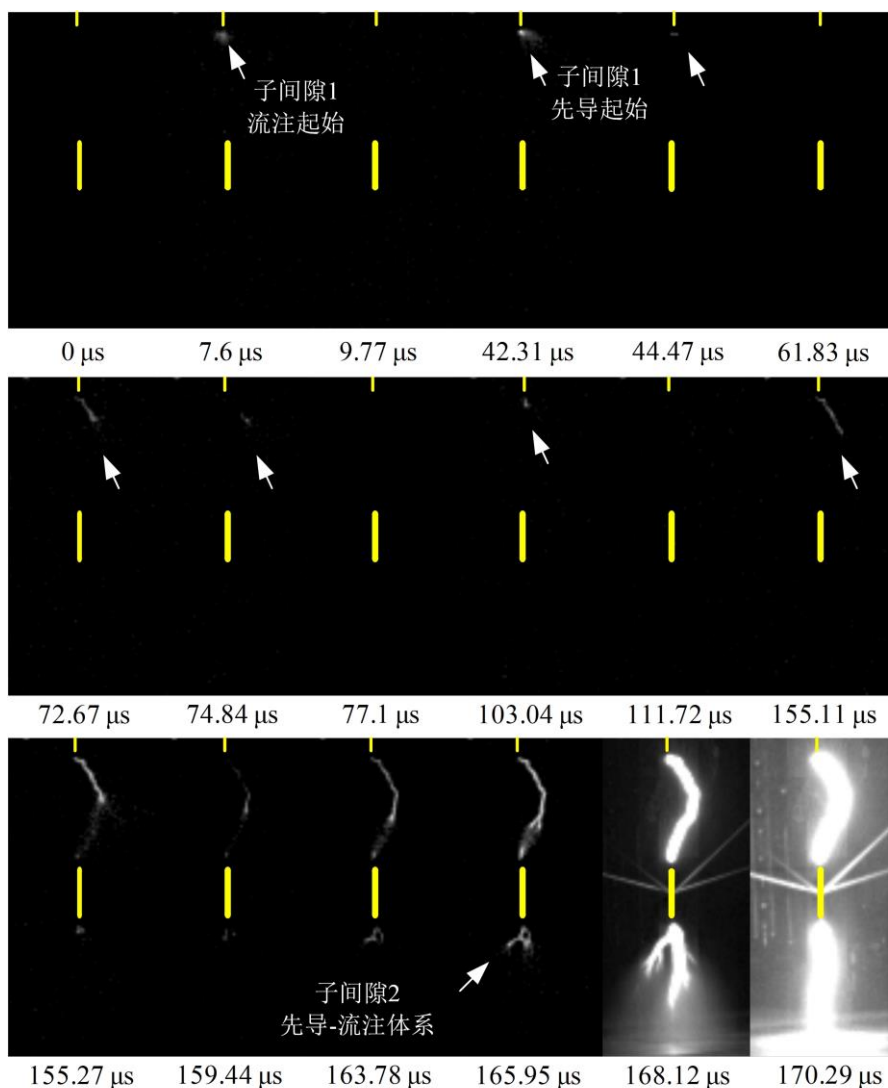


图 4.6 低海拔环境最小击穿电压位置后 ( $s_1=70 \text{ cm}$ ) 间隙放电过程光学图像

## 4.2 高海拔环境最小击穿电压区域放电观测试验

本节在南方电网公司昆明特高压试验基地开展了高海拔环境含悬浮导体长空气间隙最小击穿电压区域放电观测试验，试验的总间隙长度、施加电压波形等试验布置与试验条件与 3.2 节一致。在前文 2.5 节中，开展了高海拔环境中总间隙长度为 2 m 的含悬浮电极 A 间隙的放电特性试验，试验结果显示间隙最小击穿电压区域为  $s_1=40\sim60$

cm。本节试验针对  $s_1=40\text{ cm}$ 、 $50\text{ cm}$  和  $60\text{ cm}$  的该类间隙开展观测试验，其中  $s_1=40\text{ cm}$  的间隙代表最小击穿电压位置前的间隙类型， $s_1=50\text{ cm}$  的间隙代表最小击穿电压位置附近的间隙类型， $s_1=60\text{ cm}$  的间隙代表最小击穿电压位置后的间隙类型。试验施加电压幅值设定为 2.2 节中确定的间隙击穿电压  $U_{50}$ 。试验中环境温度为  $19^\circ\text{C}\sim 22^\circ\text{C}$ ，相对湿度为  $56\%\sim 79\%$ ，气压为  $79.8\text{ kPa}$ 。

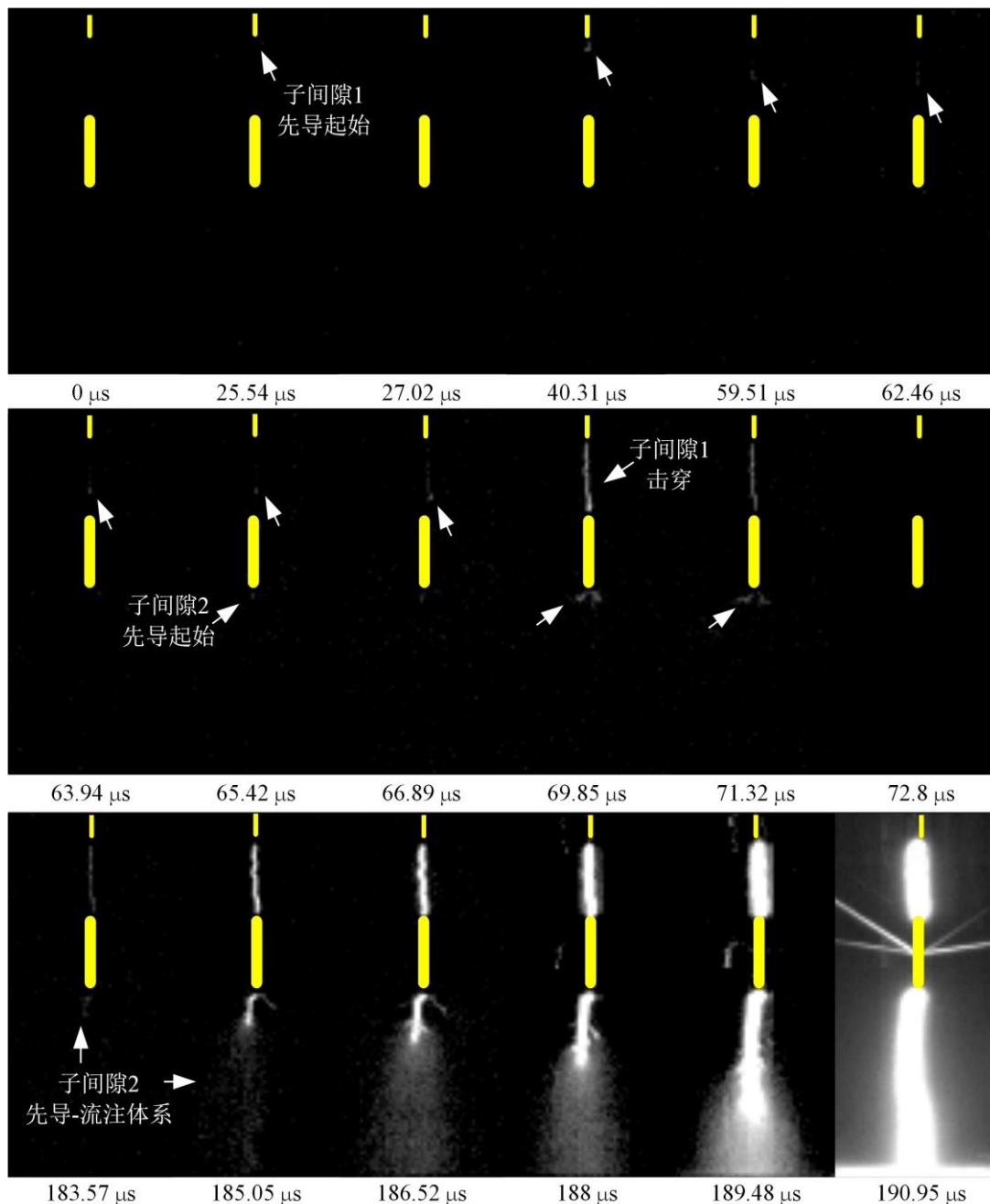


图 4.7 高海拔环境最小击穿电压位置前 ( $s_1=40\text{ cm}$ ) 间隙放电过程光学图像

图 4.7 与图 4.8 为  $s_1=40\text{ cm}$  间隙放电物理过程观测结果，其中图 4.7 为光学图像数据，图 4.8 为施加电压数据和放电电流数据。在  $t=5.3\text{ }\mu\text{s}$  时，放电电流出现一个明显脉冲，此时子间隙 1 中流注起始。随后，放电电流出现多次脉冲，子间隙 1 中先导起始

并不断向前发展。在  $t=69.85 \mu\text{s}$  左右，高速相机拍摄到了子间隙 1 被放电通道贯穿，与之相对应地，放电电流数据中也出现了明显的脉冲电流，此时子间隙 1 击穿。随后，在  $t=72.8 \mu\text{s}$  到  $t=183.57 \mu\text{s}$  的范围内，光学图像数据显示放电通道熄灭，没有出现明显的发光通道。在  $t=183.57 \mu\text{s}$  左右，高速相机再次拍摄到了发光通道，子间隙 1 中的放电通道与子间隙 2 中的先导出现重燃现象。随后， $t=186.52 \mu\text{s}$  左右，光学图像数据显示子间隙 2 中的先导-流注体系发展至接地板电极，放电进入末跃阶段，并在  $t=190.95 \mu\text{s}$  左右，整个间隙击穿。

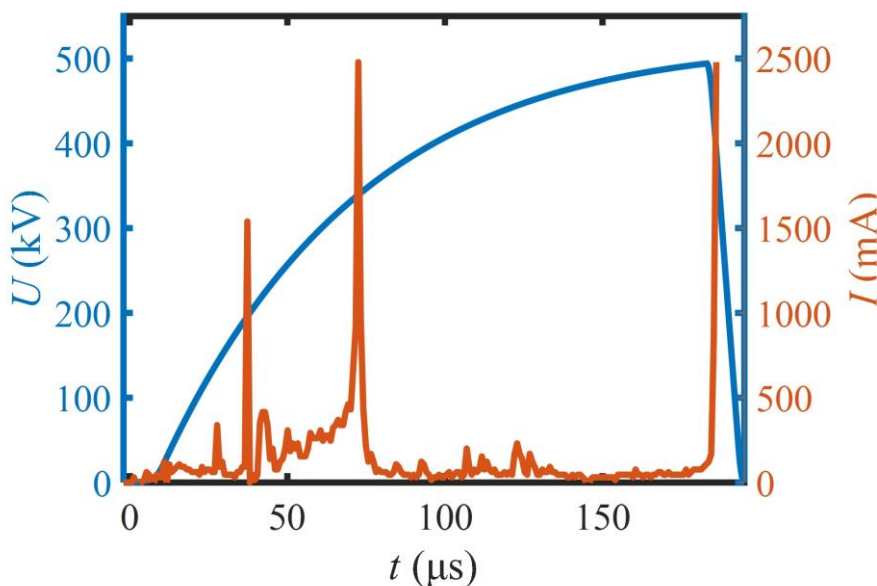


图 4.8 高海拔环境最小击穿电压位置前 ( $s_1=40 \text{ cm}$ ) 间隙放电施加电压与放电电流观测数据

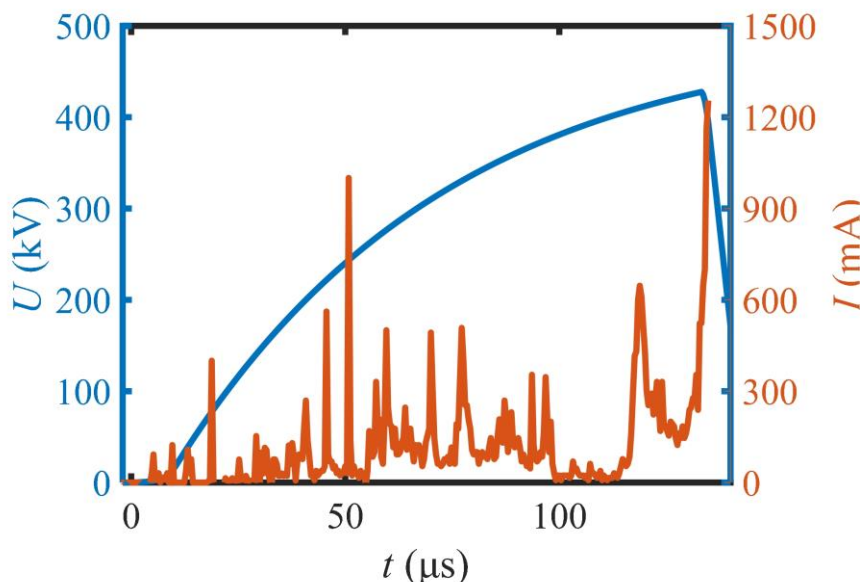


图 4.9 高海拔环境最小击穿电压位置附近 ( $s_1=50 \text{ cm}$ ) 间隙放电施加电压与放电电流观测数据

图 4.9 与图 4.10 为  $s_1=50 \text{ cm}$  间隙放电物理过程观测结果，其中图 4.9 为施加电压数据和放电电流数据，图 4.8 为光学图像数据。在  $t=5.2 \mu\text{s}$  时，放电电流出现一个明显脉冲，此时子间隙 1 中流注起始。随后，放电电流出现多次脉冲，子间隙 1 中先导起



始并不断向前发展。在  $t=123.68 \mu\text{s}$  左右，高速相机拍摄到了子间隙 1 被放电通道贯穿，与之相对应地，放电电流数据中也出现了明显的脉冲电流，此时子间隙 1 击穿。随后，放电电流数据在短暂下降后，又迅速上升，与之相对应地，光学图像数据中，子间隙 2 中先导-流注体系在短暂地发展后，于  $t=128.11 \mu\text{s}$  左右，放电进入末跃阶段，并在  $t=132.54 \mu\text{s}$  左右，整个间隙击穿。

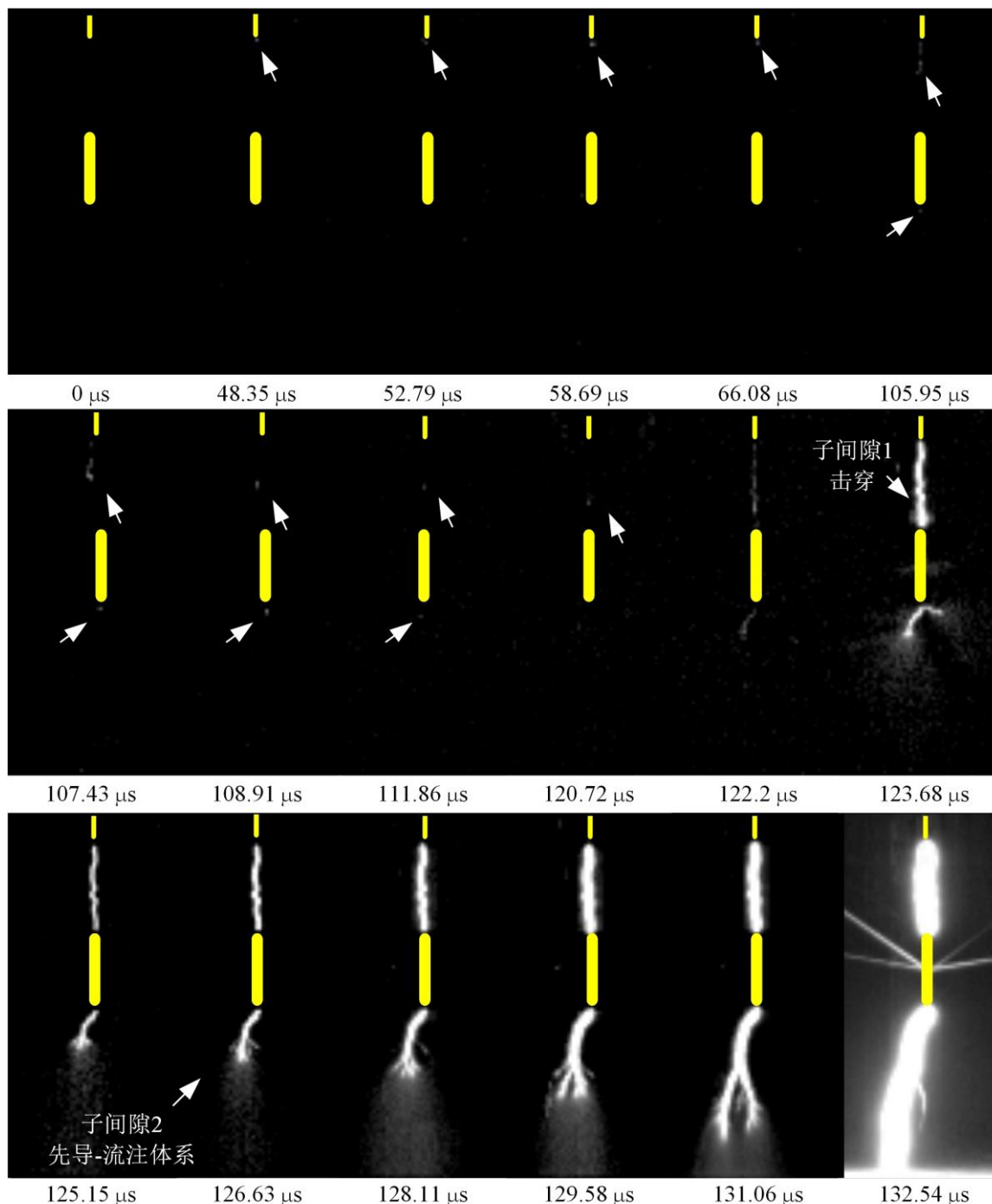


图 4.10 高海拔环境最小击穿电压位置附近 ( $s_1=50 \text{ cm}$ ) 间隙放电过程光学图像

图 4.11 与图 4.12 为  $s_1=60 \text{ cm}$  间隙放电物理过程观测结果，其中图 4.11 为光学图像数据，图 4.12 为施加电压数据和放电电流数据。在  $t=6 \mu\text{s}$  时，放电电流出现一个明显



脉冲，此时子间隙 1 中流注起始。随后，放电电流出现多次脉冲，子间隙 1 中先导起始并不断向前发展。在  $t=119.72 \mu\text{s}$  左右，高速相机拍摄到了子间隙 1 被放电通道贯穿，与之相对应地，放电电流数据中也出现了明显的脉冲电流，此时子间隙 1 击穿。子间隙 1 击穿的脉冲电流出现后立即下降又迅速上升，相对应地，在光学图像数据中，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中先导-流注体系在短暂地发展后，于  $t=124.15 \mu\text{s}$  左右，放电进入末跃阶段，并在  $t=128.58 \mu\text{s}$  左右，整个间隙击穿。

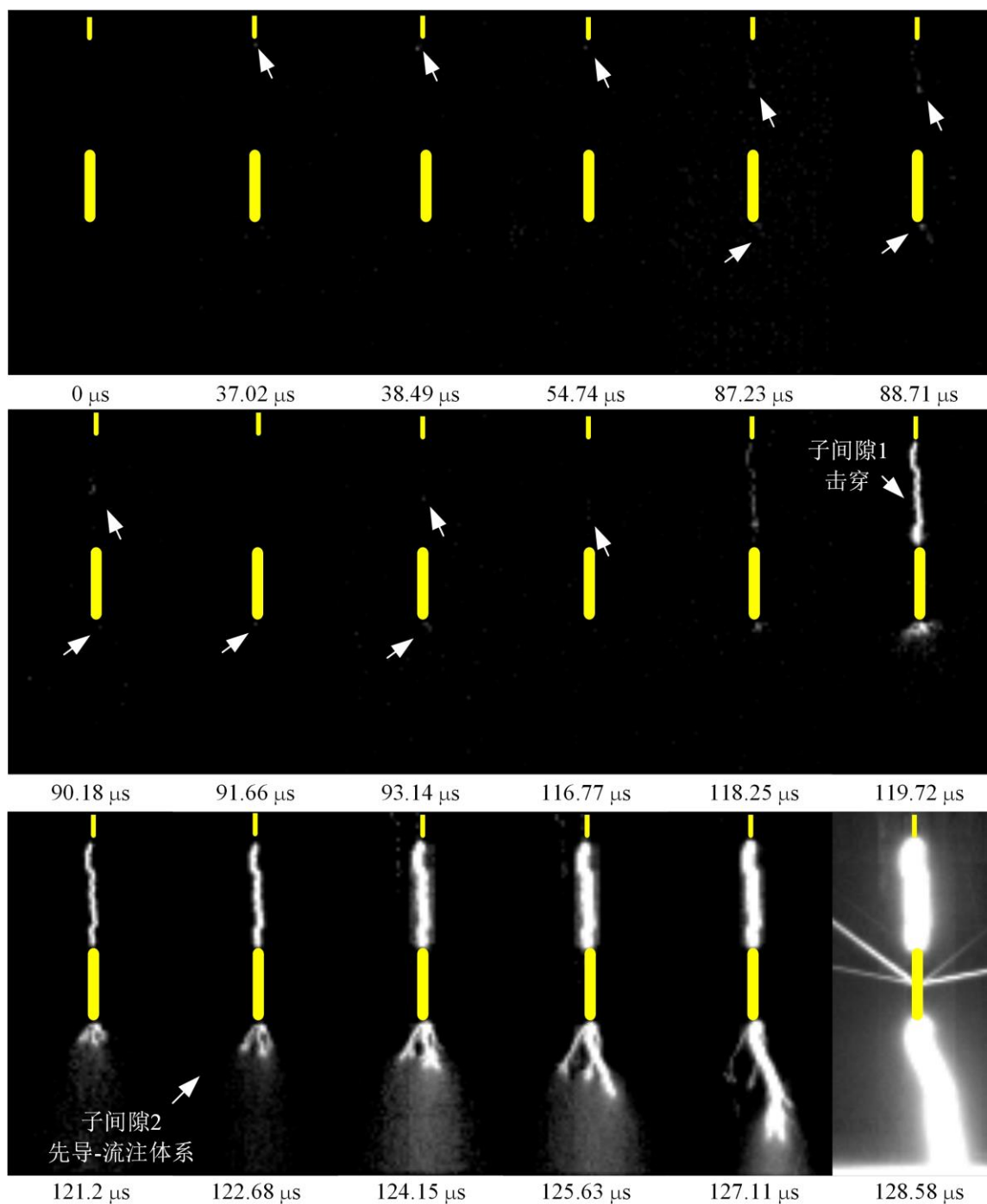


图 4.11 高海拔环境最小击穿电压位置后 ( $s_1=60 \text{ cm}$ ) 间隙放电过程光学图像

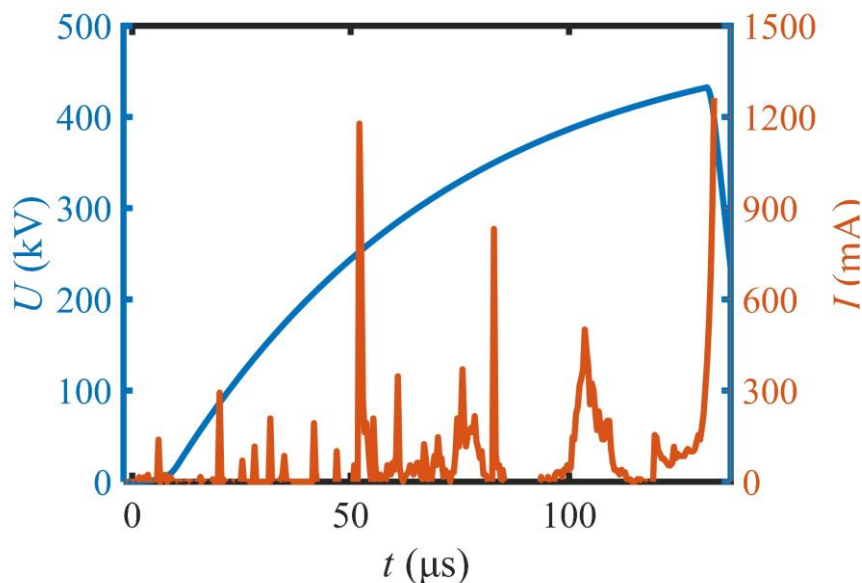


图 4.12 高海拔环境最小击穿电压位置后 ( $s_1=60$  cm) 间隙放电施加电压与放电电流观测数据

### 4.3 最小击穿电压区域形成机理分析

分别对比低海拔环境和高海拔环境间隙最小击穿电压区域放电观测试验确定的放电过程，发现所有间隙的子间隙 1 放电过程是相似的，放电主要由下行先导-流注体系和上行流注组成；但子间隙 2 的放电过程存在较大区别。在悬浮电极位于最小击穿电压位置前（低海拔环境  $s_1=50$  cm，高海拔环境  $s_1=40$  cm）时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中放电会先经历较长时间的暗期，随后才会逐渐发展至末跃阶段并击穿整个间隙。以低海拔环境  $s_1=50$  cm 的间隙为例，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中放电现象不明显，直至施加电压提升约 120 kV 后，子间隙 2 才进入末跃阶段。这表明子间隙 1 击穿后，悬浮电极的电位不足以支持子间隙 2 中放电快速发展，需要更高的施加电压激励才能使子间隙 2 击穿。而在悬浮电极位于最小击穿电压位置附近（低海拔环境  $s_1=60$  cm，高海拔环境  $s_1=50$  cm）或者位于最小击穿电压位置后（低海拔环境  $s_1=70$  cm，高海拔环境  $s_1=60$  cm）时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 在很短时间内即进入末跃并击穿整个间隙。以低海拔环境  $s_1=60$  cm 和 70 cm 的间隙为例，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中具有显著的发光通道，放电现象明显，而子间隙 2 进入末跃阶段前施加电压几乎没有再次提升。这表明，子间隙 1 击穿后，悬浮电极的电位足以支持子间隙 2 中放电快速发展，不需要更高的施加电压激励即可使子间隙 2 击穿。

第 3 章开展了悬浮导体位于不同位置时含悬浮导体长空气间隙放电物理过程研究，研究结果表明当悬浮导体靠近高压电极时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中放电通道仍需较长时间发展才能完成击穿；而当悬浮导体位于间隙中央或靠近接地电极时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 在很短时间内即完成击穿。通过本节试验研究发现，上述两种

放电物理过程的差异与悬浮导体位于靠近高压电极处、位于间隙中央和靠近接地电极处无关，而与最小击穿电压区域有关，当悬浮导体在最小击穿电压区域与高压电极之间时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中放电通道需较长时间发展才能完成击穿；当悬浮导体在最小击穿电压区域与接地电极之间时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 在很短时间内即完成击穿。

放电过程的差异可以用子间隙 1 放电通道电压降、悬浮导体电位、和子间隙 2 中放电进入末跃阶段所需电压的差异解释。当子间隙 1 被击穿，高压棒电极与悬浮棒电极间被放电通道连接。该放电通道为一具有电弧特征的通道，Rizk 根据电弧动力学方程提出了放电通道的电压降计算方法<sup>[94]</sup>：

$$\Delta U_1 = l_z E_\infty + x_0 E_\infty \ln \left[ \frac{E_i}{E_\infty} - \frac{E_i - E_\infty}{E_\infty} e^{-l_z/x_0} \right] \quad (4.1)$$

式中， $\Delta U_1$  为放电通道电压降，kV； $l_z$  为放电通道的长度，m； $E_i$  为放电通道中电场的初始值，取 400 kV/m； $E_\infty$  为放电通道中的稳定场强，50 kV/m； $x_0$  为一长度常数，取 0.75 m。

子间隙 2 可以视为一个棒-板间隙。在子间隙 2 中，放电进入末跃阶段代表着间隙将会不可避免地击穿。因此，进入末跃阶段所需的电压幅值即为间隙的击穿电压。据此，Rizk 提出了棒-板间隙的击穿电压计算公式，可用于计算子间隙 2 的击穿电压<sup>[94]</sup>：

$$U_2 = \frac{\frac{1556 + 50s_2}{1 + \frac{3.89}{s_2}} + 37.5 \ln \left[ 8 - 7 \exp \left( \frac{-1.33s_2}{1 + \frac{3.89}{s_2}} \right) \right]}{1 - 3\sigma} \quad (4.2)$$

式中， $\sigma$  为相对标准偏差，在棒-板间隙中可取 5%。需要注意的是，公式(4.2)计算的是临界波前时间操作冲击电压下棒-板间隙的击穿电压，与悬浮电极上电压波形有一定区别。悬浮电极上电位在子间隙 1 击穿前主要由高压电极的感应电位和空间电荷的感应电位组成，在子间隙 1 击穿后变为高压电极电压和放电通道电压降的差。虽然悬浮电极上波形有一定区别，但考虑子间隙 1 击穿后波形近似于操作冲击电压，因此仍使用此公式近似计算子间隙 2 击穿电压。

如表 4.1 所示，使用公式(4.1)和(4.2)计算了低海拔环境最小击穿电压区域内放电通道电压降  $\Delta U_1$ 、悬浮电极电位  $U_f$  和子间隙 2 击穿电压  $U_2$ ，并比较了子间隙 1 击穿瞬间（时刻 I）和子间隙 2 中放电进入末跃阶段的瞬间（时刻 II）时悬浮电极电位  $U_f$  和子间隙 2 击穿电压  $U_2$  的大小关系。悬浮电极电位  $U_f$  可根据施加电压  $U_{app}$  和放电通道电压降  $\Delta U_1$  计算得到，表达式为：

$$U_f = U_{app} - \Delta U_1 \quad (4.3)$$

表 4.1 低海拔环境最小电压区域间隙电压参数计算

$s_1$ (cm)	$s_2$ (cm)	时刻	$U_{app}$ (kV)	$\Delta U_1$ (kV)	$U_f$ (kV)	$U_2$ (kV)
50	100	I	435	81	354	430
		II	555		474	
60	90	I	483	89	394	393
		II	483		394	
70	80	I	594	97	497	354
		II	594		497	

时刻 I 为子间隙 1 击穿瞬间；时刻 II 为子间隙 2 中放电进入末跃的瞬间。

在  $s_1=50$  cm 的间隙中，在时刻 I，悬浮电极电位  $U_f$  远小于子间隙 2 击穿电压  $U_2$ ，因此子间隙 2 中的放电并没有立即发展，而是进入了暗期；随后，在时刻 II，悬浮电极电位  $U_f$  超过子间隙 2 击穿电压  $U_2$ ，子间隙 2 中放电进入末跃阶段。在  $s_1=60$  cm 的间隙中，在时刻 I 和时刻 II，悬浮电极电位  $U_f$  与子间隙 2 击穿电压  $U_2$  相近，因此子间隙 2 中的放电没有出现暗期，直接依次进入稳定先导发展阶段和末跃阶段。在  $s_1=70$  cm 的间隙中，在时刻 I 和时刻 II，悬浮电极电位  $U_f$  远大于子间隙 2 击穿电压  $U_2$ ，因此子间隙 2 中的放电也没有出现暗期，直接进入末跃阶段。综上所述，本文认为当子间隙 1 击穿时，如果悬浮电极电位  $U_f$  小于子间隙 2 击穿电压  $U_2$ ，间隙需要更高的施加电压才能击穿，如果悬浮电极电位  $U_f$  大于子间隙 2 击穿电压  $U_2$ ，间隙会在短时间内击穿，不需要更高的施加电压。

上述分析也可以解释悬浮导体位于最小击穿电压区域间隙击穿电压较低的原因。假设最小击穿电压区域中最小击穿电压出现在  $s_1=s_c$  位置处。在  $s_1<s_c$  的间隙中，子间隙 1 击穿后，悬浮电极电位  $U_f$  小于子间隙 2 击穿电压  $U_2$ ，需要额外的施加电压才能击穿间隙，并且随着  $s_1$  减小， $s_2$  增大，子间隙 2 击穿电压  $U_2$  增大，需要更高的额外施加电压，间隙的击穿电压因此提升。因此，在放电特性曲线中，随着  $s_1$  增大，击穿电压呈现下降趋势。同时，也可以分析得出最小击穿电压位置  $s_c$  位于子间隙 1 击穿后，悬浮电极电位  $U_f$  等于子间隙 2 击穿电压  $U_2$  的临界位置。在  $s_1>s_c$  的间隙中，子间隙 1 击穿后，悬浮电极电位  $U_f$  大于子间隙 2 击穿电压  $U_2$ ，不需要额外的施加电压间隙即可击穿。而在子间隙 1 击穿前，子间隙 1 击穿所需的电压会随  $s_1$  增加而提升，因此在放电特性曲线中，随着  $s_1$  增大，击穿电压呈现上升趋势。

以上分析解释了含悬浮导体长空气间隙最小击穿电压区域的形成机理。最小击穿电压区域的形成与子间隙 1 和子间隙 2 的击穿电压有关。当悬浮导体比最小击穿电压区域更靠近高压电极时，击穿电压提升是因为子间隙 1 击穿后，悬浮导体的电位没有达到子间隙 2 的击穿电压，需要更高的施加电压击穿间隙；当悬浮导体比最小击穿电压区域更远离高压电极时，击穿电压提升是因为子间隙 1 击穿需要更高的电压；最小击穿电压区域形成于这两种提升击穿电压影响因素的转换区域。

最小击穿电压区域的形成机理可以用于解释与分析不同类型含悬浮导体长空气间隙放电特性中出现的现象。第 2 章开展了含不同结构悬浮电极长空气间隙的放电特性

试验,研究了悬浮电极结构对间隙击穿电压的影响。图 2.5(b)对比了  $s_1+s_2=1.5\text{ m}$  的含有悬浮电极 C 的  $d=1.8\text{ m}$  间隙与含有悬浮电极 A、B、E 的  $d=2\text{ m}$  间隙的击穿电压,试验结果表明在最小击穿电压区域前,两类间隙放电特性曲线高度相似。根据最小击穿电压区域的形成机理,悬浮导体位于最小击穿电压区域前时,间隙击穿电压主要受子间隙 2 击穿电压的影响,由于  $s_2$  相同的两类间隙子间隙 2 击穿电压相同,而两类间隙  $s_1$  相同又使得子间隙 1 放电通道压降相同,因此在  $s_1$  与  $s_2$  相同的情况下,悬浮导体位于最小击穿电压区域前时两类间隙击穿电压呈现高度相似性。

图 2.5(a)与图 2.5(b)对比了具有相同电极长度  $l$  的悬浮电极 C 和悬浮电极 D 对间隙击穿电压的影响规律,试验结果表明在悬浮导体靠近高压电极时两者击穿电压差距较大,在悬浮电极靠近接地电极时两者击穿电压差距较小。当悬浮导体靠近高压电极时,其位于最小击穿电压区域前,间隙击穿电压主要受子间隙 2 击穿电压影响。图 2.4 中间隙击穿路径显示,在含悬浮电极 C 的间隙中,子间隙 2 的击穿路径为悬浮电极 C 下端向接地板电极放电,而在含悬浮电极 D 的间隙中,子间隙 2 的击穿路径一般为悬浮电极 D 侧边的螺母向接地板电极放电,由于后者的子间隙 2 击穿路径最短距离长于前者,因此子间隙 2 击穿电压也会更大。另一方面,悬浮电极 D 相比于悬浮电极 C 结构更均匀,凸出物不够明显,对空间电场畸变较小,因此子间隙 2 击穿电压也会更大。在这两个因素的影响下,当悬浮导体靠近高压电极时,含悬浮电极 D 间隙的击穿电压会明显高于含悬浮电极 C 间隙的击穿电压。而在悬浮导体靠近接地板电极时,其位于最小击穿电压区域后,间隙击穿电压主要受子间隙 1 击穿电压的影响。随着悬浮电极逐渐靠近接地电极,两个悬浮电极周围电场差异对子间隙 1 中放电发展影响减弱,两类间隙子间隙 1 击穿电压趋于相同,使得两类间隙击穿电压差距缩小。而两类间隙最小击穿电压区域位置有差异也是由于子间隙击穿电压不同导致的。

图 1.6 对比了不同结构杆塔中带电作业组合间隙真型试验确定的间隙放电特性,试验结果表明不同类型带电作业组合间隙的击穿电压不同,但最小击穿电压区域相似,试验确定的最小击穿电压位置都出现在模拟人距离高压导线  $0.4\text{ m}$  的位置。根据最小击穿电压区域的形成机理,最小击穿电压区域的形成与子间隙 1 和子间隙 2 的击穿电压有关。杆塔结构的差异会使子间隙 1 与子间隙 2 的击穿电压发生变化,在真型试验结果中,间隙击穿电压也确实因子间隙的击穿电压的差异而不同,那么根据最小击穿电压区域的形成机理,间隙的最小击穿电压区域也应存在相应的差异。本文认为,真型试验发现最小击穿电压区域相似,是因为试验中模拟人位置选取步长较大有关,如果在  $0.2\sim 0.7\text{ m}$  范围内选取更多试验位置,可以获得范围更小、精度更高的最小击穿电压区域。然而,真型试验尺寸大,难以精准控制间隙距离等参数,并且还存在着试验量繁重、试验周期长等问题,因此通过真型试验的方法确定范围更小、精度更高的最小击穿电压区域难度较大。随着仿真计算技术的快速发展,利用计算高电压工程学手段计算间隙击穿电压已成为可能。因此,有必要建立含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型

来代替试验，通过仿真计算的方法确定范围更小、精度更高的最小击穿电压区域，进一步提高输电线路带电作业的作业安全性。

#### 4.4 本章小结

本章利用第 3 章建立的含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台，分别在武汉大学高电压试验大厅和南方电网公司昆明特高压试验基地开展了低海拔环境和高海拔环境含悬浮导体长空气间隙最小击穿电压区域放电观测试验，确定了悬浮导体位于最小击穿电压区域时间隙的放电物理过程。当悬浮导体在最小击穿电压区域与高压电极之间时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 中放电通道需较长时间发展才能完成击穿；当悬浮导体在最小击穿电压区域与接地电极之间时，子间隙 1 击穿后，子间隙 2 在很短时间内即完成击穿。根据悬浮导体位于不同位置时间隙放电物理过程的差异，分析了最小击穿电压区域的形成机理，研究表明，最小击穿电压区域的形成与子间隙 1 和子间隙 2 的击穿电压有关。当悬浮导体比最小击穿电压区域更靠近高压电极时，击穿电压提升是因为子间隙 1 击穿后，悬浮导体的电位没有达到子间隙 2 的击穿电压，需要更高的施加电压击穿间隙；当悬浮导体比最小击穿电压区域更远离高压电极时，击穿电压提升是因为子间隙 1 击穿需要更高的电压；最小击穿电压区域形成于这两种提升击穿电压影响因素的转换区域。

## 5 含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型研究

空气间隙放电仿真模型是模拟放电演变过程、计算间隙击穿电压的重要手段。现有长空气间隙放电仿真模型已较为成熟，但无法直接应用于含悬浮导体长空气间隙放电中。本章根据含悬浮导体长空气间隙放电物理过程，基于长空气间隙放电流注起始与发展模型、先导起始与发展模型等判据与模型，分别建立了子间隙 1 和子间隙 2 的放电仿真模型。建立的含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型可以描述间隙放电的物理过程，通过升降法多次模拟不同施加电压下间隙放电的耐受或击穿，可以预测间隙的 50% 击穿电压。利用建立的放电仿真模型分别预测计算了简单电极构成的含悬浮导体长空气间隙和输电线路带电作业组合间隙的击穿电压，计算结果与试验结果吻合较好，证明了放电仿真模型的有效性。

### 5.1 放电仿真模型计算流程

本文第 3 章与第 4 章开展了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验，确定了间隙的放电物理过程。研究表明，子间隙 1 中放电主要由下行先导-流注体系和上行流注组成，子间隙 2 中放电主要由先导-流注体系组成，悬浮导体位于不同位置时，两个子间隙中放电物理过程各阶段起始时刻存在差异。不过，放电物理过程也具有一定普遍的规律：悬浮导体在任意位置时，放电全部从子间隙 1 率先开始，子间隙 2 中放电都会在子间隙 1 击穿前起始，子间隙 2 击穿不会早于子间隙 1 击穿。因此，建立的含悬浮导体长空气间隙放电仿真物理模型应从判断子间隙 1 流注起始开始，而子间隙 2 中的流注起始应在子间隙 1 击穿前判断，子间隙 1 与子间隙 2 的仿真计算流程存在重叠的时间段。根据含悬浮导体长空气间隙放电物理过程，本文利用长空气间隙放电流注起始与发展模型、先导起始与发展模型等判据与模型，分别描述子间隙 1 与子间隙 2 中的放电发展过程，构成了含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型。子间隙 1 与子间隙 2 的放电仿真模型计算流程如图 5.1 与图 5.2 所示。

含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型的模拟计算是根据施加电压波形，计算每一时间步长情况下间隙放电的发展状态，循环计算判断，直至间隙耐受或击穿。建模使用的施加电压波形为正极性操作冲击电压，波形可以用双指数函数表示：

$$U_{app}(t) = A(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (5.1)$$

式中， $A$  为幅值系数， $\tau_2$  和  $\tau_1$  分别为波尾和波前时间常数。对于 250/2500  $\mu\text{s}$  的正极性标准操作冲击电压，具有如下关系：

$$U_{app}(250) = U_{max} \quad (5.2)$$



$$U_{app}(2500) = 0.5U_{max} \quad (5.3)$$

$$\left. \frac{dU_{app}}{dt} \right|_{t=250} = 0 \quad (5.4)$$

式中， $U_{max}$  为操作冲击电压的幅值。根据上述关系，即可计算幅值系数  $A$  和时间常数  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 。

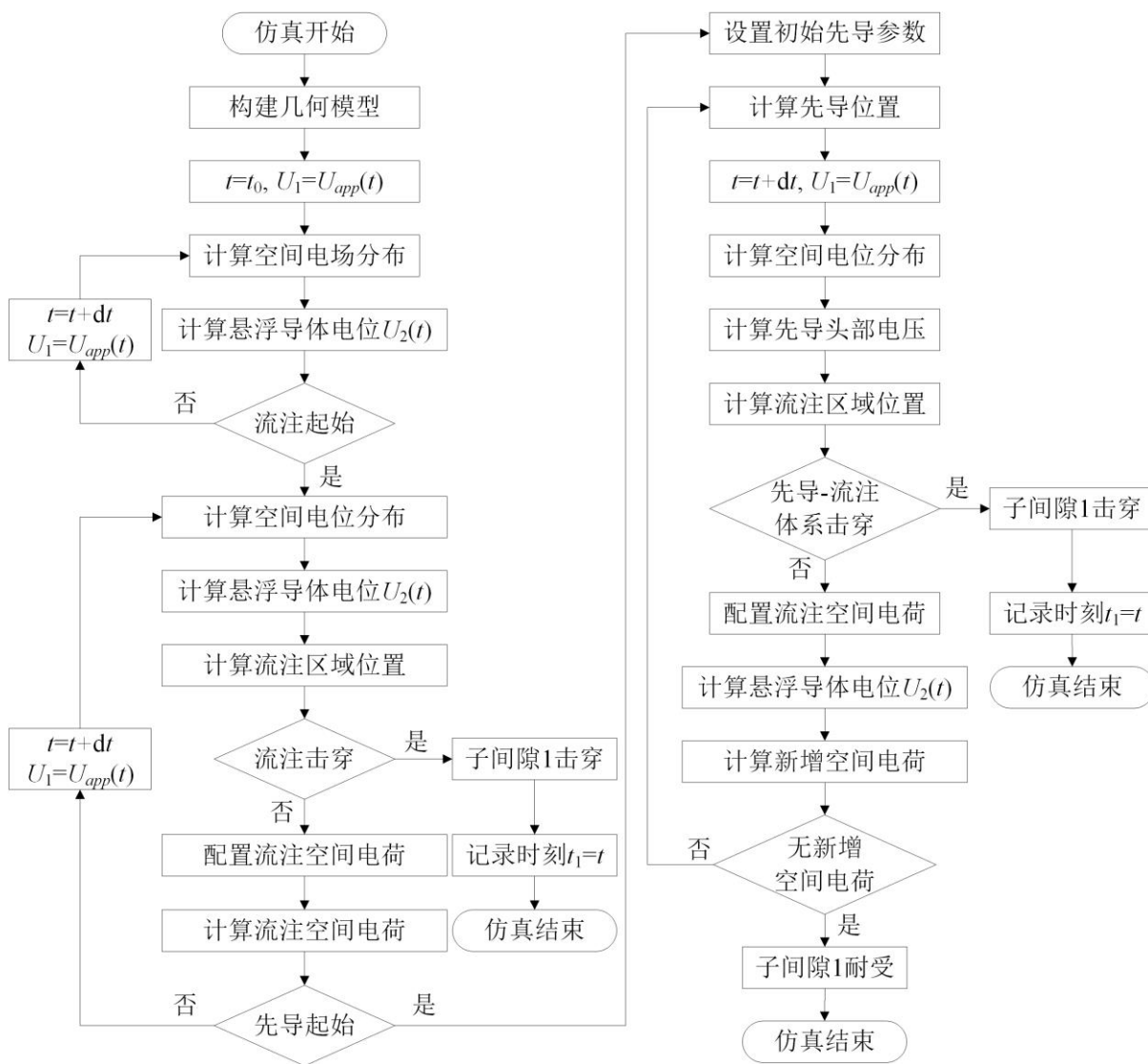


图 5.1 子间隙 1 放电仿真模型计算流程

图 5.1 为子间隙 1 放电仿真模型的计算流程，仿真利用 MATLAB 与 COMSOL Multiphysics 联合计算实现，子间隙 1 中高压电极上的电压为施加电压  $U_{app}$ 。首先，根据所求间隙的几何结构建立相应的含悬浮导体长空气间隙几何模型，计算初始时间  $t_0$  时，初始施加电压  $U_{app}(t_0)$  下间隙轴线的空间电场分布，同时计算此时悬浮导体的电位  $U_2(t)$ ，为子间隙 2 放电仿真模型计算提供电压数据。随后，根据空间电场分布，利用流注起始判据判断子间隙 1 中流注是否起始，如若流注未起始，则多次重复上述过程，

计算下一时刻  $t=t+dt$  时间隙轴线的空间电场分布和悬浮导体电位  $U_2(t)$ ，直至子间隙 1 中出现流注起始后，放电进入流注发展阶段。流注发展阶段中，首先需要计算间隙轴线的空间电位分布（背景电势），同时计算此时悬浮导体电位  $U_2(t)$ 。随后，利用计算确定的间隙空间电位分布、下行流注通道平均电场  $E_{sp1}$  和上行流注通道平均电场  $E_{sm}$  即可判断下行流注区域与上行流注区域的范围。虽然在第 3 章与第 4 章的观测试验中没有观测到子间隙 1 被流注直接击穿的现象，但这可能是由于试验中选取子间隙 1 长度  $s_1$  较大引起的，因此在放电仿真模型中仍考虑子间隙 1 被流注直接击穿的情况，判断方法为流注区域范围是否大于子间隙 1 长度  $s_1$ ，如若前者大于后者，则子间隙 1 直接被流注击穿，需要记录此时时刻  $t_1=t$ ，为子间隙 2 放电仿真模型计算提供电压变化时刻的数据，此时子间隙 1 仿真结束。如若子间隙 1 未被流注击穿，则需要利用流注发展模型配置流注区域空间电荷，并判断电荷数量是否达到先导起始所需的电荷量。如若先导未起始，则多次重复上述过程，计算下一时刻  $t=t+dt$  时的空间电位分布与悬浮导体电位  $U_2(t)$ ，并重新判断流注是否击穿子间隙 1 和先导是否起始。如若子间隙 1 中先导起始，则放电进入先导-流注体系发展阶段。先导-流注体系发展阶段中，首先需要设定初始先导段长度、电场、半径等参数。随后，根据先导发展模型确定此时先导的位置。之后，计算下一时刻  $t=t+dt$  时间隙轴线的空间电位分布（背景电势），根据先导发展模型计算先导通道压降并计算先导头部电压，再利用下行流注通道平均电场  $E_{sp}$  和上行流注通道平均电场  $E_{sm}$  判断此时流注区域的范围。此时，需要根据确定的先导轴线长度与流注区域范围判断子间隙 1 是否被先导-流注体系击穿，如若下行流注区域发展至上行流注区域或者悬浮导体上表面的位置，则子间隙 1 进入跃变，并被先导-流注体系击穿，需要记录此时时刻  $t_1=t$ ，子间隙 1 仿真结束。由于观测试验中发现，子间隙 1 跃变在很短时间内（不足  $2 \mu\text{s}$ ）即可完成，因此在仿真模型中忽略跃变时间，默认间隙直接击穿。如若子间隙 1 未被先导-流注体系击穿，先导-流注体系继续发展，此时需要利用流注发展模型配置流注区域空间电荷，并计算此时悬浮导体电位  $U_2(t)$ 。随后，利用计算得到的新增空间电荷判断放电是否继续发展，如若无新增空间电荷，则子间隙 1 放电停止，间隙耐受，仿真结束，并且，根据观测到的放电物理过程，若子间隙 1 未击穿，子间隙 2 也无法击穿，因此整个间隙的仿真计算结束。若存在新增空间电荷，先导-流注体系继续发展，则多次重复上述过程，分别计算下一时刻  $t=t+dt$  时先导的位置、空间电位分布、先导头部电压和流注区域范围，若子间隙 1 仍未被先导-流注体系击穿，则继续配置流注空间电荷、计算悬浮导体电位  $U_2(t)$ 、计算新增空间电荷，循环判断直至子间隙 1 击穿或耐受。

通过子间隙 1 放电仿真模型计算确定子间隙 1 击穿后，即可进行子间隙 2 的放电仿真模型计算。图 5.2 为子间隙 2 放电仿真模型的计算流程，仿真同样利用 MATLAB 与 COMSOL Multiphysics 联合计算实现。子间隙 2 中悬浮导体电位在子间隙 1 击穿前由高压电极上施加电压的感应电位和空间电荷的感应电位组成，取值在子间隙 1 的仿

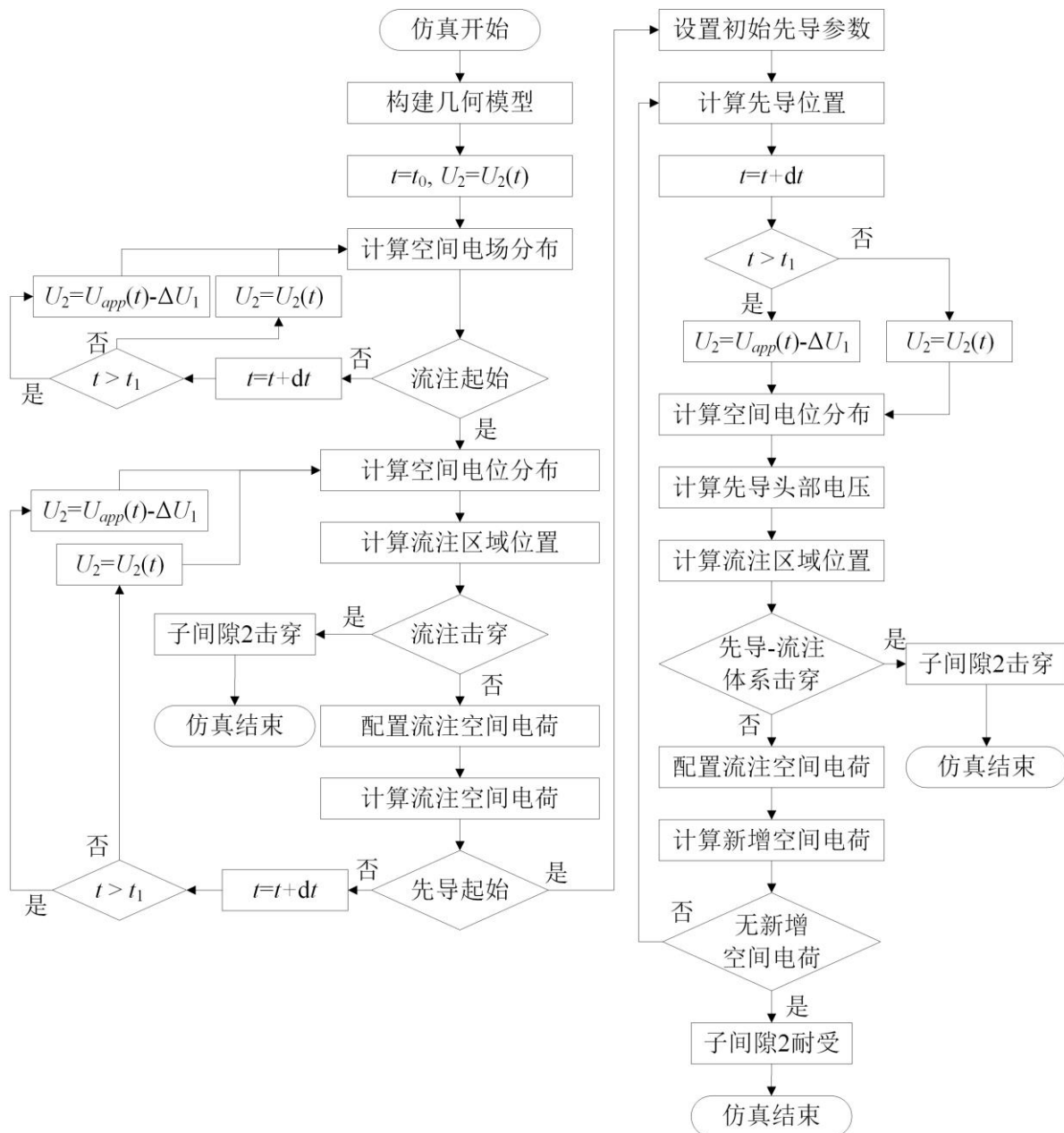


图 5.2 子间隙 2 放电仿真模型计算流程

真计算中已确定，可以直接调用；在子间隙 1 击穿后，悬浮导体电位为施加电压  $U_{app}$  和子间隙 1 放电通道电压降  $\Delta U_1$  的差，可根据公式(4.1)和(4.3)计算；子间隙 1 是否击穿，可根据计算时刻  $t$  与子间隙 1 击穿时间  $t_1$  大小判断。仿真计算中，首先根据所求间隙的几何结构建立相应的几何模型，计算初始时间  $t_0$  时，初始施加电压  $U_{app}(t_0)$  下间隙轴线的空间电场分布，并利用流注起始判据判断子间隙 2 中流注是否起始，如若流注未起始，则多次重复上述过程，计算下一时刻  $t=t+dt$  时间隙轴线的空间电场分布，直至子间隙 2 中流注起始后，放电进入流注发展阶段。流注发展阶段中，需要计算间隙轴线的空间电位分布（背景电势），并根据流注通道平均电场  $E_{sp2}$  判断流注区域的范围。与子间隙 1 中相同，虽然观测试验中没有观测到子间隙 2 被流注直接击穿的现象，但

在放电仿真模型中仍考虑子间隙 2 被流注直接击穿的情况，判断方法为流注区域范围是否大于子间隙 2 长度  $s_2$ ，如若前者大于后者，则子间隙 2 直接被流注击穿，子间隙 2 仿真结束。如若子间隙 2 未被流注击穿，则需要配置流注空间电荷，并判断流注区域电荷量是否达到先导起始所需的电荷量。如若先导未起始，则多次重复上述过程，计算下一时刻  $t=t+dt$  时的空间电位分布，并重新判断子间隙 2 是否被流注直接击穿和先导是否起始。如若子间隙 2 中先导起始，则放电进入先导-流注体系发展阶段。先导-流注体系发展阶段中，首先需要设定初始先导参数。随后，分别计算先导位置，下一时刻  $t=t+dt$  时间隙轴线的空间电位分布、先导头部电压和流注区域范围，并根据先导轴线长度与流注区域范围判断子间隙 2 是否被先导-流注体系击穿。如若流注区域发展至接地电极，则子间隙 2 进入末跃并击穿，子间隙 2 仿真结束。如若子间隙 2 未被先导-流注体系击穿，先导-流注体系继续发展，此时需要利用流注发展模型配置流注区域空间电荷，并计算判断是否有新增电荷。如若无新增空间电荷，则子间隙 2 放电停止，间隙耐受，仿真结束。若存在新增空间电荷，先导-流注体系继续发展，则多次重复上述过程，分别计算下一时刻  $t=t+dt$  时先导的位置、空间电位分布、先导头部电压和流注区域范围，若子间隙 2 仍未被先导-流注体系击穿，则继续配置流注空间电荷、计算新增空间电荷，循环判断直至子间隙 2 击穿或耐受。

以上为含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型的计算流程，使用到的判据与模型细节如下所述。

## 5.2 流注起始与发展模型

### 5.2.1 流注起始判据

流注放电是含悬浮导体长空气间隙放电的开端。基于光电离的流注起始判据认为，碰撞电离会引起空气分子的激发，向外辐射光子，空气分子吸收光子后发生光电离，产生的光电子会在电场作用下向电极移动，碰撞电离形成二次电子崩。

随着高压电极上施加电压的增加，电极周围空间电场明显提升，在特定区域内电离系数  $\alpha$  超过附着系数  $\eta$ ，此特定区域即为电离区。电离区内的自由电子在电场作用下向高压电极移动，与空气分子发生碰撞产生电离，导致初始电子崩。

如图 5.3 所示，初始电子崩发生在电离区的边界  $z=z_i$  处，电子数为<sup>[102]</sup>：

$$N_1 = \exp\left(\int_{z_1}^{z_i} [\alpha(z) - \eta(z)] dz\right) \quad (5.5)$$

式中，电离系数  $\alpha$  和附着系数  $\eta$  均为电场强度与气压的函数，可以使用玻尔兹曼方程求解软件 BOLSIG+<sup>[148]</sup>确定电场强度对应的取值。

初始电子崩头部的半径为：

$$r = \sqrt{6 \int_{z_1}^{z_i} \frac{D_e}{v_e} dz} \quad (5.6)$$

式中， $D_e$  是电子的扩散系数， $v_e$  是电子的漂移速度，二者均为电场强度的函数：

$$D_e = 5.3 \times 10^5 \left( \frac{E}{760} \right)^{1.21} / E \quad (5.7)$$

$$v_e = 1 \times 10^6 \left( \frac{E}{760} \right)^{0.715} \quad (5.8)$$

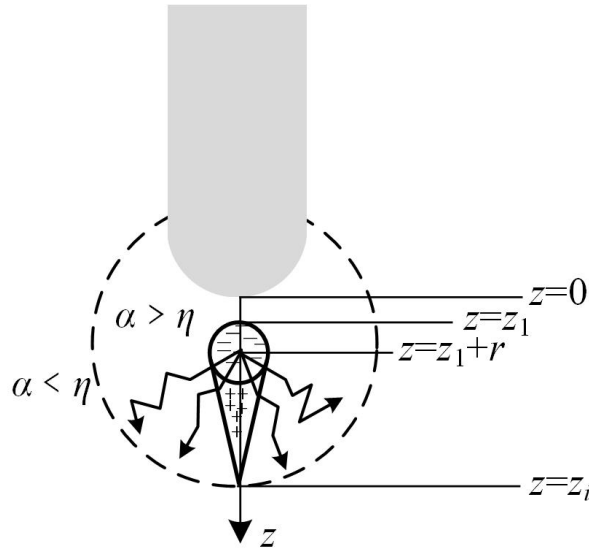


图 5.3 电离区示意图

电子和空气分子的碰撞电离会导致空气分子的激发并向外辐射光子，空气分子吸收光子后会发生光电离，产生的光电子在电场的作用下向高压电极移动，并与空气分子发生碰撞产生碰撞电离形成二次电子崩。二次电子崩头部的电子向初始电子崩尾部的正空间电荷区域集中，形成充满正、负带电粒子的导电通道，即流注通道。假设一次碰撞电离辐射的光子数为  $f_1$ ，那么电子崩头部辐射出的光子数即为  $f_1 N_1$ 。假设电离区边界  $z=z_i$  到初始电子崩处  $z=z_1+r$  的区域被分为若干层，每层的厚度为  $dl$ 。由于产生的光子中一部分会被空气吸收，无法到达高压电极表面，厚度为  $l$  的一层 ( $z=z_1+l$ ) 内接收的光子数为  $f_1 N_1 e^{-\mu l} g(l)$ ，其中  $\mu$  为光子吸收系数， $g(l)$  为考虑部分光子在电离区内未被吸收而消失的面积因子。假设空气吸收一个光子释放的光电子数为  $f_2$ ，那么层内产生的光电子总数  $f_1 f_2 N_1 e^{-\mu l} g(l)$ 。这些光子从  $z=z_1+l$  到  $z=z_1+r$  产生二次电子崩，数目为：

$$f_1 f_2 N_1 e^{-\mu l} g(l) \exp \left[ \int_{z_1+l}^{z_1+r} (\alpha - \eta) dz \right] \quad (5.9)$$

在二次电子崩过程中，产生的电子总数为各层电子数之和：

$$N_2 = \int_{z_i}^{z_1+r} f_1 f_2 N_1 g(l) \exp \left[ -\mu l + \int_{z_1+l}^{z_1+r} (\alpha - \eta) dz \right] dl \quad (5.10)$$

式中,  $f_1 f_2$  取  $1 \times 10^{-3}$ ,  $\mu$  取  $6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $g(l)$  可以用径向分量  $g_{rad}(l)$  与轴向分量  $g_{axi}(l)$  的乘积表示<sup>[149-150]</sup>。

由于初始电子崩向外辐射的大部分光子都是在电子崩增长的最后几步产生的, 因此电子崩头部接近电极 ( $z_1 \approx 0$ )。当二次电子崩中包含的电子总数不小于初始电子崩中的电子时, 电晕能够持续发展形成流注, 即:

$$N_2 \geq N_1 \quad (5.11)$$

满足公式(5.11)时的施加电压即为流注临界起始电压  $U_{si0}$ , 对应的流注临界起始时间为  $t_{si0}$ 。在操作冲击电压的作用下, 有效自由电子的出现会具有一定时延, 因此实际流注起始时刻  $t_{si}$  会大于流注临界起始时间  $t_{si0}$ , 而实际流注起始电压  $U_{si}$  也会大于流注临界起始电压  $U_{si0}$ 。如图 5.4 所示, 当施加电压达到  $U_{si0}$  后, 随着电压的进一步提升, 电离区会向外扩张, 自由电子必须出现在高压电极附近特定的区域内, 即临界体积内。图 5.4 中  $z=z_i$  和  $z=z_t$  分别为临界体积的内外边界, 其中内边界为初始电子能引发持续电离的位置, 随着电压的提升内边界向靠近高压电极的方向移动。外边界上电离系数等于附着系数, 随着电压的提升外边界向远离高压电极的方向移动。

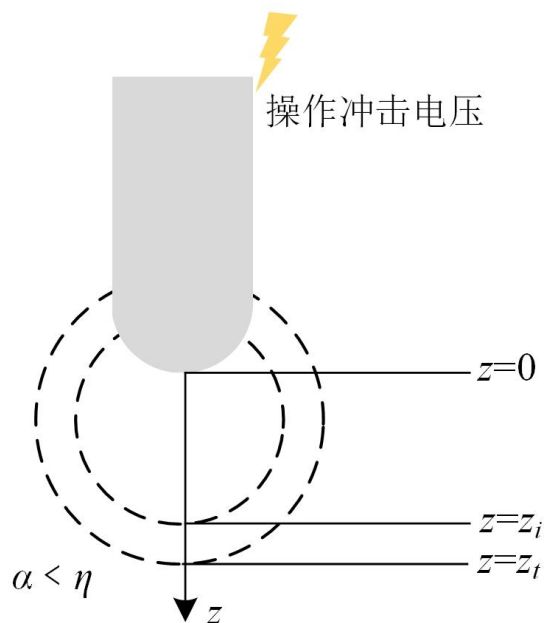


图 5.4 操作冲击电压下流注起始示意图

Baldo 基于长空气间隙放电试验, 研究了流注起始时延的概率, 提出了计算时延的模型<sup>[151]</sup>:

$$p_i(t) = p_e(t) \cdot \exp\left[-\int_0^t p_e(t) dt\right] \quad (5.12)$$

$$p_e(t) = k \cdot \frac{dE}{dt} \cdot t \quad (5.13)$$

式中,  $p_i(t)$  为流注起始概率密度;  $p_e(t)$  是自由电子产生率, 是电场上升率与时间的函数;

$k$  为一常数，可取  $0.3 \text{ cm/kV}\cdot\mu\text{s}$ 。在计算过程中，可以通过概率密度  $p_i(t)$  来计算流注起始的累积概率分布确定时延，并确定相应的施加电压  $U_{si}$ 。

### 5.2.2 流注发展模型

流注起始后，随着施加电压进一步提升，流注继续向前发展。流注稳定发展时的最低电场为流注稳定电场  $E_{st}$ ，研究表明，流注发展过程中，流注区域内部电位梯度  $E_s$  等于稳定电场  $E_{st}$ <sup>[113]</sup>。根据这一原理，Gallimberti、Bondiou<sup>[114]</sup>等学者提出了流注发展模型，利用空间电位分布（背景电势）和流注区域内部电位梯度  $E_s$  即可计算流注区域的长度，如图 5.5 所示。流注区域轴向长度  $x_s$  表达式为：

$$U(x_s) = U(0) - E_s x_s \tag{5.14}$$

图 5.5 中， $U_1(x)$  为间隙轴线的空间电位分布（背景电势）。流注发展过程中，流注区域内的正极性空间电荷会抬升轴线空间电位  $U_1(x)$  至  $U_2(x)$ ，抬升后局部电位的斜率即为流注区域的平均场强  $E_s$ 。与正极性流注发展相似的，随着悬浮导体表面电场增强，负极性上行流注会从悬浮导体向高压电极方向发展，其轴向长度也可以通过空间电位分布与负极性流注电位梯度  $E_{sn}$ （约为  $750 \text{ kV/m}$ ）<sup>[73]</sup> 确定。

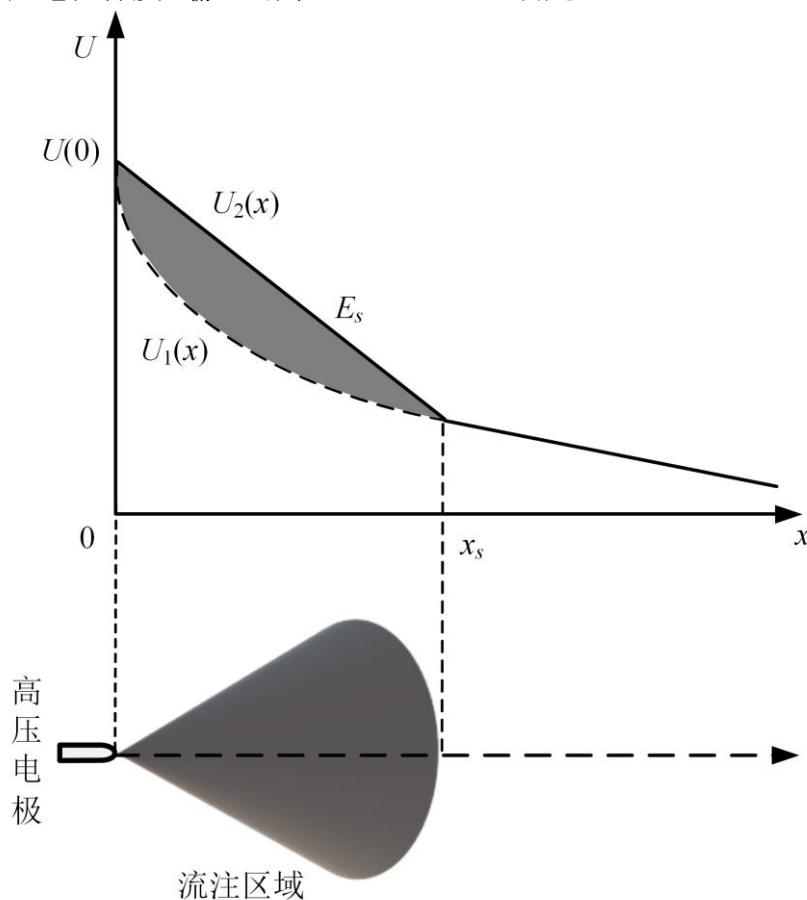


图 5.5 流注区域长度计算示意图



在确定流注区域长度后，需计算流注区域的空间电荷量，以判断放电是否达到先导起始条件。考虑到含悬浮导体长空气间隙中悬浮导体处于悬浮电位的特殊性，使用简化流注空间电荷计算模型不易计算空间电位与悬浮导体的电位，因此本文采用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 计算间隙电位分布，并配置流注区域中的空间电荷以计算电荷量。

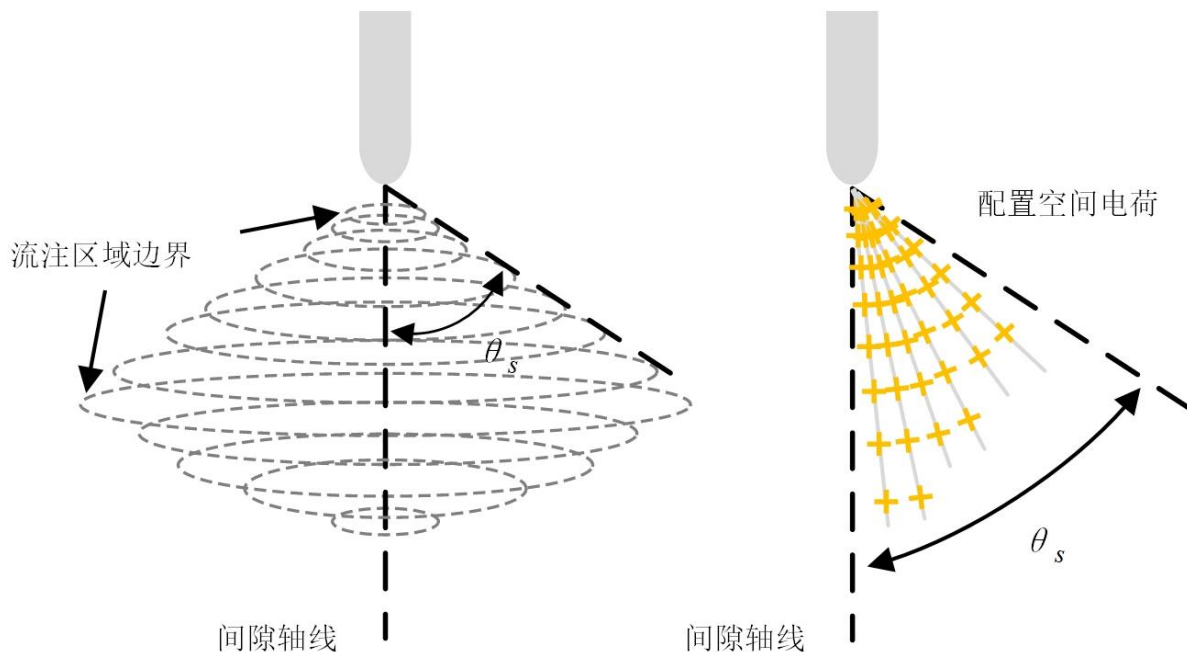


图 5.6 流注区域空间电荷示意图

如图 5.6 流注区域空间电荷示意图所示，本文基于 Becerra<sup>[109-110]</sup>等学者的假设，设定流注区域为一个顶角为 120° 的虚拟锥体，虚拟锥体的半径为流注区域的轴向长度，虚拟锥体边界上的电位以流注区域电位梯度下降。本文参考 Arevalo<sup>[111]</sup>与 Diaz<sup>[19]</sup>等学者计算流注区域空间电荷量的方法，将虚拟流注区域分为数层，每一层皆由虚拟环形电荷组成，虚拟环形电荷平行于接地板电极布置。通过计算各层环形电荷量，即可确定流注区域空间电荷总量。本文采用电容矩阵法<sup>[19]</sup>计算空间电荷总量，通过积分整个模拟域  $\Omega$  中每一个具有电位  $U_i$  的电极和虚拟环形电荷的电场密度  $W_E$ ，计算相应的电容矩阵  $C_{ij}$ ：

$$C_{ij} = \frac{2}{U_i^2} \oint_{\Omega} W_E \cdot d\Omega \quad (5.15)$$

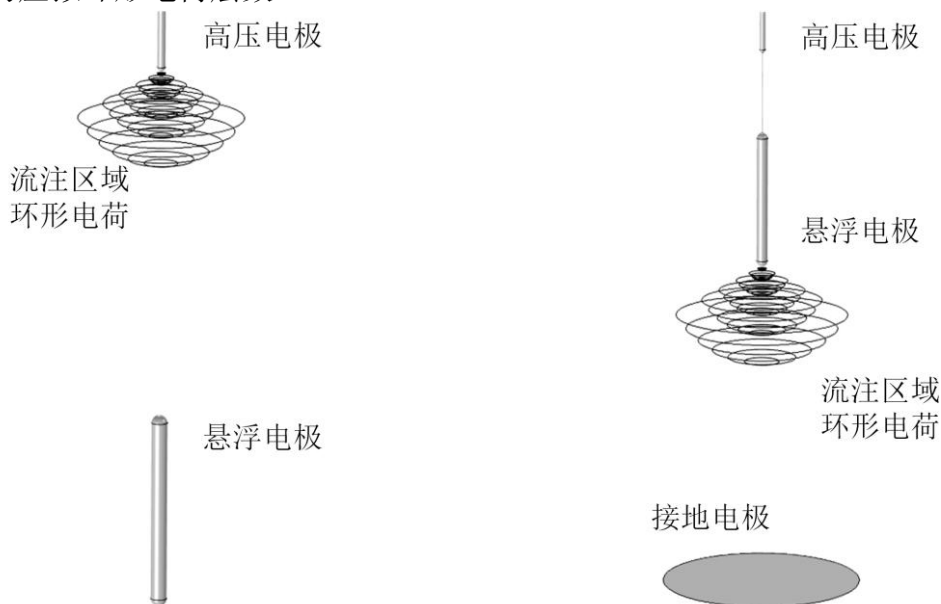
随后，根据每一层虚拟环形电荷的电位，即可确定每一层环形电荷的电荷量，计算公式为：

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{i1} & \cdots & C_{ii} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_i \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

最后，将每一层虚拟环形电荷的电荷量  $Q_i$  相加，即可计算流注区域的空间电荷总量  $Q_s$ ：

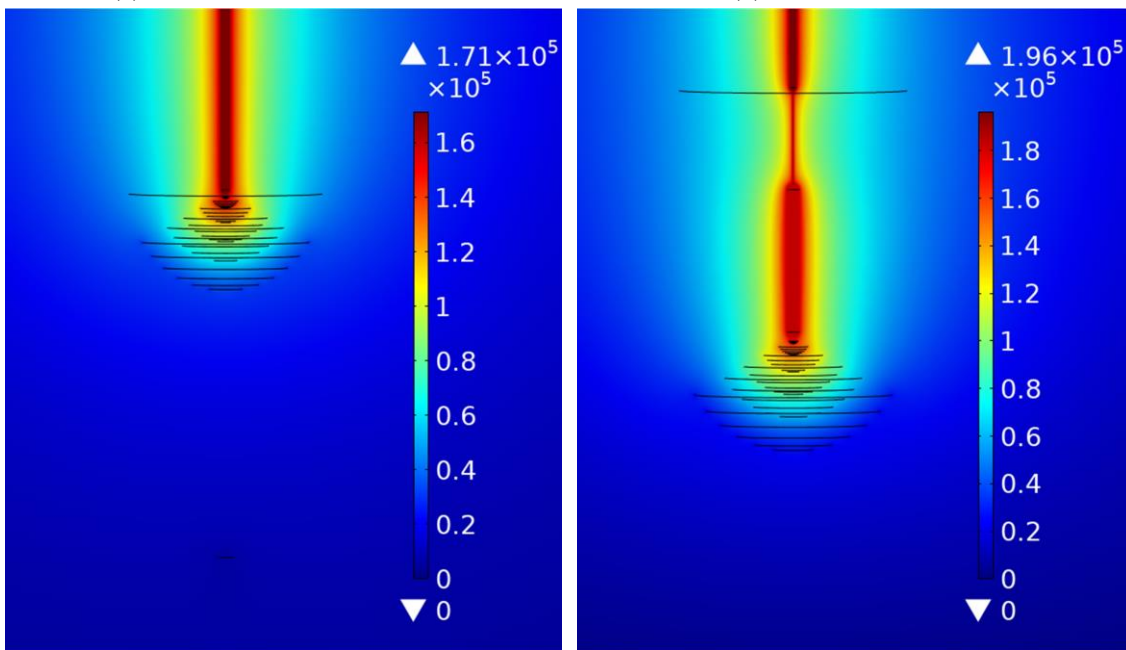
$$Q_s = \sum_{i=1}^{i=k} Q_i \quad (5.17)$$

式中， $k$  为虚拟环形电荷层数。



(a) 子间隙 1 结构示意图

(b) 子间隙 2 结构示意图



(c) 子间隙 1 电位分布示意图

(d) 子间隙 2 电位分布示意图

图 5.7 流注区域发展仿真计算示意图

本文使用 COMSOL Multiphysics 建立间隙结构的几何模型，并计算电容矩阵。由于研究的棒型电极及虚拟环形电荷都具有轴对称性，为提高计算效率，使用 COMSOL

Multiphysics 中二维轴对称的空间维度进行建模计算。图 5.7 分别展示了本文建立的子间隙 1 与子间隙 2 间隙结构几何模型与虚拟环形电荷二维旋转后的结构示意图, 以及配置流注空间电荷后间隙截面的空间电位分布图。利用 COMSOL Multiphysics 获得电容矩阵后, 根据流注区域的电位分布, 可以利用公式(5.16)计算环形电荷的电荷量, 再利用公式(5.17)计算确定流注区域的空间电荷总量。

## 5.3 先导起始与发展模型

### 5.3.1 先导起始判据

先导放电是含悬浮导体长空气间隙放电的第二个阶段。先导起始, 是间隙从流注放电转向先导-流注体系发展的标志。Gallimberti 根据长空气间隙放电观测结果认为流注区域产生的自由电子会经流注茎进入高压电极, 电子移动过程中会与流注茎中气体分子发生弹性碰撞和非弹性碰撞, 使流注茎温度升高, 直至负离子脱附的临界温度(约为 1500 K)时, 流注茎中的负离子会转化为自由电子和中性分子, 流注茎通道的电导率快速提升, 流注茎转化为先导<sup>[113]</sup>。

Bondiou 和 Gallimberti 根据上述原理, 建立了流注茎内能热平衡方程组, 计算流注茎内分子温度的变化<sup>[114]</sup>。利用该热平衡方程组, 分析负离子脱附的临界温度所对应的流注空间临界电荷量, Gallimberti 提出了先导起始的  $1 \mu\text{C}$  临界电荷判据, 即, 当流注区域空间电荷量达到  $1 \mu\text{C}$  时, 先导起始, 放电以先导-流注体系向前发展。

### 5.3.2 先导通道发展模型

先导-流注体系发展过程中, 流注区域头部电离区产生的电子移动进入先导-流注体系中, 在流注根部移动过程中再次发生弹性碰撞和非弹性碰撞, 使转化区温度上升, 在温度达到临界温度后, 形成了新的先导管。先导通道电导率较高, 内部电场较小, 先导通道的增长也促使流注区域头部电场增强, 进一步促进电离的发生。

先导-流注体系发展计算中, 先导-流注体系空间电荷计算是放电仿真模型计算的关键。图 5.8 是先导-流注体系发展的示意图, 时刻  $t$  时, 在施加电压  $U_0(t)$  的影响下, 间隙轴线空间电位分布(背景电势)为  $U_1(t, x)$ 。考虑先导通道中的正极性空间电荷和先导通道的压降, 先导头部的电位为  $U_l(t)$ , 流注区域的背景电势为  $U_1'(t, x)$ 。在流注区域正极性空间电荷的影响下, 间隙轴线空间电位由背景电势  $U_1'(t, x)$  抬升为  $U_2(t, x)$ , 抬升后局部电位的斜率即为流注区域的平均场强  $E_s$ 。这一阶段对应的先导通道的长度为  $x_l(t)$ , 流注区域的长度为  $x_s(t)$ 。当流注区域头部电离区继续电离产生新的电子并注入先导-流注体系后, 先导-流注体系继续向前发展。经过时间段时刻  $dt$  后, 时刻  $t+dt$  时,

在施加电压  $U_0(t+dt)$  的影响下，间隙轴线空间电位分布（背景电势）为  $U_1(t+dt, x)$ ，新增的先导段头部电位为  $U_l(t)$ ，流注区域的背景电势变为  $U_1'(t+dt, x)$ 。此时，在流注区域空间电荷的影响下，间隙轴线空间电位由背景电势  $U_1'(t+dt, x)$  抬升为  $U_2(t+dt, x)$ 。这一阶段对应的先导通道的长度为  $x_l(t+dt)$ ，流注区域的长度为  $x_s(t+dt)$ 。对比发现，在  $dt$  时间段内，新增空间电荷即为阴影部分面积，物理意义即为先导-流注体系发展前后流注区域空间电荷的增量。

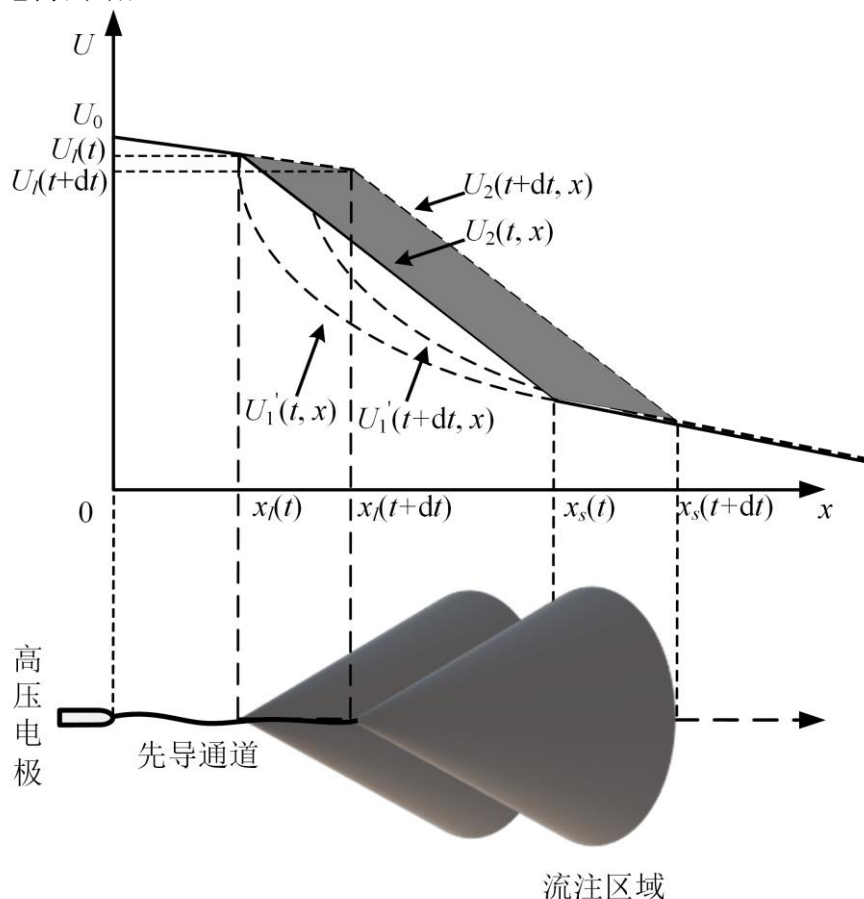


图 5.8 流注区域空间电荷示意图

流注区域范围的确定以及流注区域空间电荷的计算可使用 5.2.2 节中流注发展模型计算。但与流注发展阶段有区别的是，流注区域末端电位不再为高压电极上的施加电压，而是先导头部的电位，并且流注区域也不再是从高压电极向前发展，而是从先导头部延伸，因此有必要确定先导头部的电位和位置。本文采用 Lalande 等学者提出的先导发展模型计算先导通道的增长，该模型基于 Gallimberti 的假设<sup>[113]</sup>，认为先导段为一被包裹的均匀圆柱体，其内部压力、温度和粒子密度是恒定的。在 Gallimberti 模型的基础上，Lalande 等学者使用流注区域产生的新增空间电荷表征先导通道内部热力学特性，计算公式为<sup>[108]</sup>：

$$a_i^2(t+dt) = a_i^2(t) + \frac{(\gamma-1) \cdot E_{Li}(t) \cdot \Delta Q_s}{\pi \cdot \gamma \cdot p_0} \quad (5.18)$$

$$E_{Li}(t+dt) = E_{Li}(t) \cdot \frac{a_i^2(t)}{a_i^2(t+dt)} \quad (5.19)$$

式中， $a_i$  为第  $i$  段先导段的半径； $\gamma$  为定压比热容和定容比热容的比值，取 1.4<sup>[73]</sup>； $E_{Li}$  为第  $i$  段先导段的内部电场； $\Delta Q_s$  为新增空间电荷量； $p_0$  为气压。对于由流注茎转化成的初始先导段，假设其半径为 0.001 m，内部电场为 400 kV/m，长度为 0.02 m<sup>[109]</sup>。

在确定每一段先导段的内部电场后，即可计算整个先导通道的电压降  $\Delta U_L$ ，计算公式为：

$$\Delta U_L = \sum_1^k E_{Li}(t) \Delta x_{Li} \quad (5.20)$$

式中， $k$  为先导段的数量， $\Delta x_{Li}$  为先导段间隙轴线分量的长度。

因此，根据高压电极上的施加电压，即可确定先导头部电压  $U_{tip}(t)$ ，计算公式为：

$$U_{tip}(t) = U_0(t) - \Delta U_L \quad (5.21)$$

根据电荷守恒原理，流注区域头部电离区产生的进入先导-流注体系的电子与残留的空间电荷量相等，因此使用以下公式可以计算新增先导段的长度：

$$\Delta X_{Li} = \frac{\Delta Q_s}{q_L} \quad (5.22)$$

式中， $\Delta X_{Li}$  为新增先导段的长度， $q_L$  为单位长度先导通道的电荷量，取 50  $\mu\text{C}/\text{m}$ <sup>[151]</sup>。

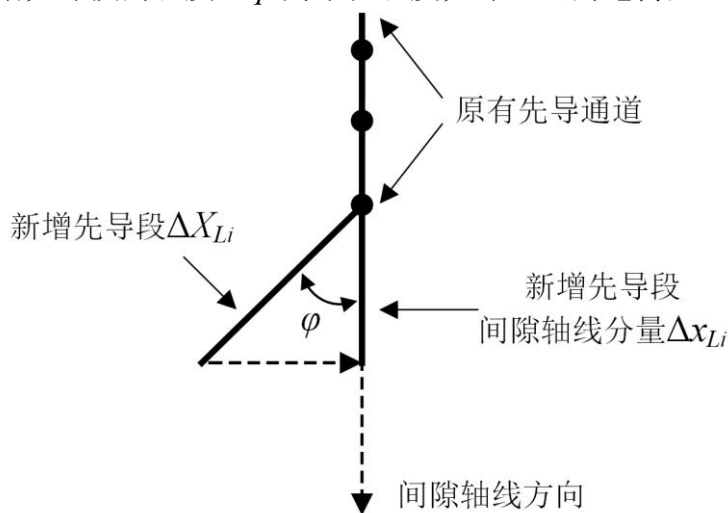


图 5.9 先导通道发展路径随机性示意图

如图 5.9 所示，先导通道的发展具有明显的随机性，先导段长度  $\Delta X_{Li}$  与先导段间隙轴线分量的长度  $\Delta x_{Li}$  具有如下关系：

$$\Delta X_{Li} = \mu \Delta x_{Li} \quad (5.23)$$

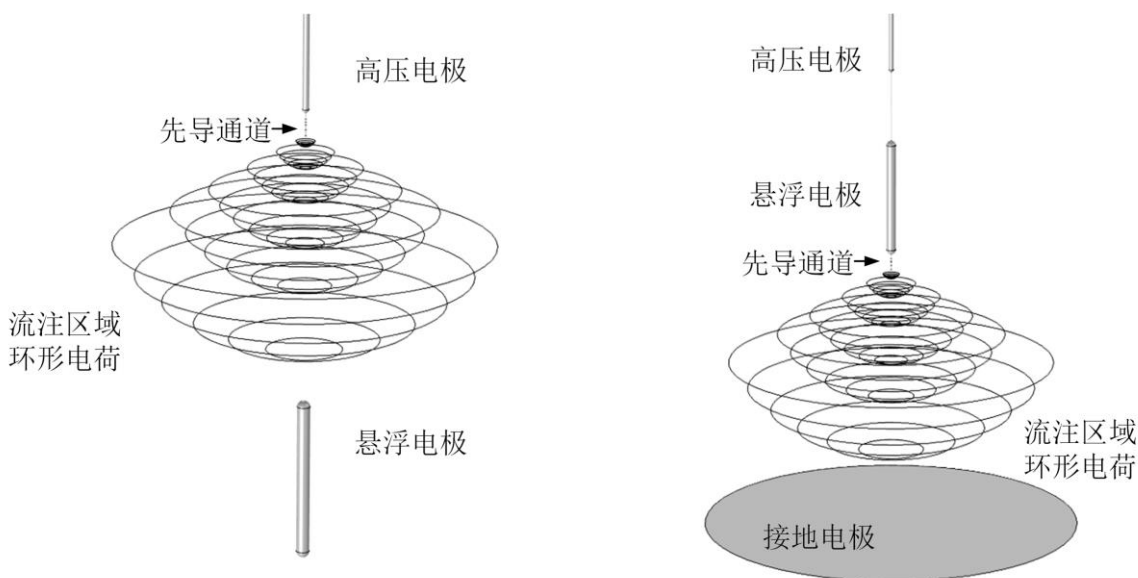
式中， $\mu$  为先导发展路径的随机系数，表达式为：

$$\mu = \frac{1}{\cos \varphi} \tag{5.24}$$

式中， $\varphi$  为先导段与间隙轴线间的夹角，角度范围取  $0 \sim 90^\circ$ 。根据长空气间隙放电试验数据，确定了  $\varphi$  的分布，满足以下公式<sup>[112]</sup>：

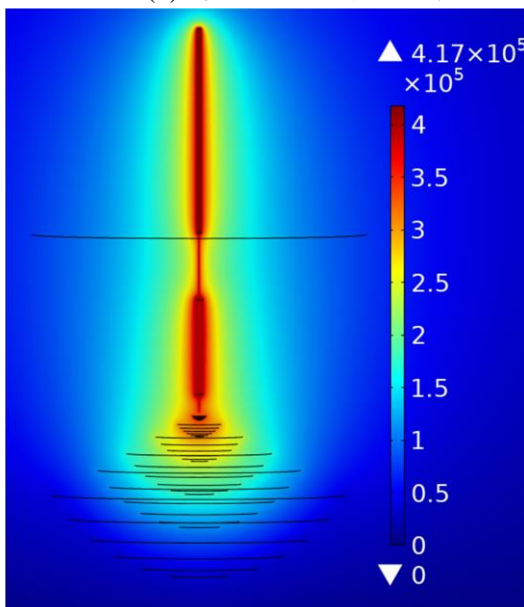
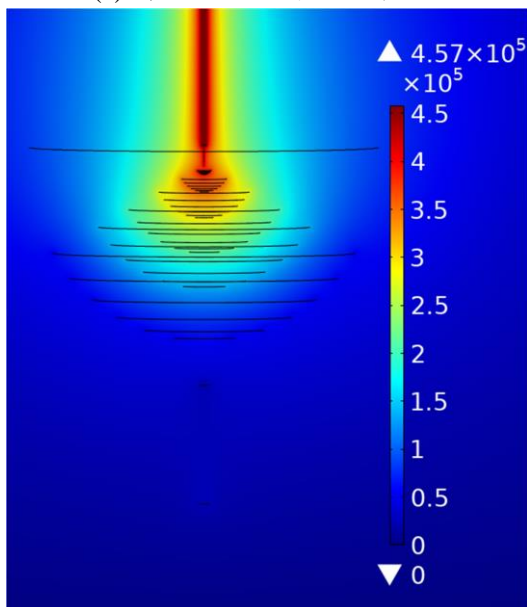
$$f(\varphi) = a_1 \cdot e^{-\frac{(\varphi-b_1)^2}{c_1}} \tag{5.25}$$

式中， $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  通过试验数据拟合得到，在高压电极为棒型电极的间隙中， $a_1=3.67$ ， $b_1=0.052$ ， $c_1=0.2893$ 。通过计算符合公式(5.25)的随机数，即可确定新增先导段间隙轴线分量的长度  $\Delta x_{Li}$ 。



(a) 子间隙 1 结构示意图

(b) 子间隙 2 结构示意图



(c) 子间隙 1 电位分布示意图

(d) 子间隙 2 电位分布示意图

图 5.10 先导-流注体系发展仿真计算示意图

确定先导头部电位和位置后，即可使用 5.2.2 节中流注发展模型确定流注区域范围并计算流注区域空间电荷。图 5.10 分别展示了先导-流注体系发展阶段中，本文建立的子间隙 1 与子间隙 2 间隙结构几何模型、先导通道以及虚拟环形电荷二维旋转后的结构示意图，以及配置流注空间电荷后间隙截面的空间电位分布图。

## 5.4 放电仿真模型的验证

本节根据 5.1 节中提出的放电仿真模型计算流程，利用 5.2 节与 5.3 节中给出的判据与放电发展模型，多次模拟了  $d=1.5\text{ m}$ 、 $2\text{ m}$  和  $2.5\text{ m}$  的含悬浮导体长空气间隙放电发展过程，使用的试验波形为  $250/2500\text{ }\mu\text{s}$  的正极性标准操作冲击电压，建立的几何模型与 2.2 节中使用的试验电极结构相同。模拟计算参考了放电试验中利用升降法确定间隙 50% 击穿电压的思路：在间隙出现耐受后，下一次模拟施加电压增加；在间隙出现击穿后，下一次模拟施加电压降低；通过这一方法可以预测计算间隙的 50% 击穿电压。

上述每一类间隙仿真计算 30 次，并利用公式(2.1)计算间隙 50% 击穿电压，预测计算结果如表 5.1 所示。

表 5.1 放电仿真模型预测计算的含悬浮导体长空气间隙击穿电压

$d\text{ (m)}$	$s_1\text{ (cm)}$	$U_{50}\text{ 计算值 (kV)}$	$U_{50}\text{ 试验值 (kV)}$	误差
1.5	10	455	428.4	6.21%
	30	385	410.7	-6.26%
	40	355	381.0	-6.82%
	50	405	409.4	-1.07%
	60	415	457.4	-9.27%
	70	495	490.0	1.02%
2	10	635	612.6	3.66%
	30	595	607.6	-2.07%
	50	535	556.1	-3.79%
	60	475	538.1	-11.73%
	70	525	568.6	-7.67%
	90	615	654.6	-6.05%
2.5	120	735	693.8	5.94%
	20	835	740.8	12.72%
	40	785	740.6	6.00%
	60	675	682.5	-1.10%
	70	638	667.6	-4.43%
	80	634	677.4	-6.41%
	90	665	677.3	-1.82%
	120	765	773.6	-1.11%

图 5.11 根据表 5.1 中数据，绘制了含悬浮导体长空气间隙放电特性的计算值和试验值。对比放电仿真模型计算的放电特性和放电试验确定的放电特性发现，放电仿真模型计算的间隙击穿电压与试验确定的击穿电压基本一致，最大误差为 12.72%。除  $d=2\text{ m}$ 、 $s_1=60\text{ cm}$  的间隙和  $d=2.5\text{ m}$ 、 $s_1=20\text{ cm}$  的间隙外，其余间隙计算值与试验值误差均小于 10%。此外，利用放电仿真模型计算的间隙放电特性数据中， $d=1.5\text{ m}$  间隙的最小



击穿电压区域为  $s_1=30\sim 50$  cm，这与试验获取的最小击穿电压区域一致； $d=2$  m 间隙的最小击穿电压区域为  $s_1=50\sim 70$  cm，这也与试验获取的最小击穿电压区域一致； $d=2.5$  m 间隙的最小击穿电压区域为  $s_1=70\sim 90$  cm，与试验获取的最小击穿电压区域  $s_1=60\sim 80$  cm 不一致。计算值与试验值中最小击穿电压区域不一致的原因具有两种可能。第一，仿真计算与放电试验中  $s_1$  在  $60\sim 90$  cm 区域步长为 10 cm，实际最小击穿电压位置可能存在于  $s_1=70\sim 80$  cm 的范围，位于两类最小击穿电压区域的重合处，导致计算值与试验值中最小击穿电压区域在更大的范围内不一致；第二，间隙击穿电压计算值存在较大误差，导致计算值中最小击穿电压区域存在偏差，但考虑到  $s_1=70$  cm 和 80 cm 的间隙击穿电压计算值仅相差 4 kV，本文认为该误差仍在可接受范围内。综上，本文认为利用含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型计算得到的间隙击穿电压与通过放电试验确定的击穿电压具有较高一致性，证明了放电仿真模型的有效性。

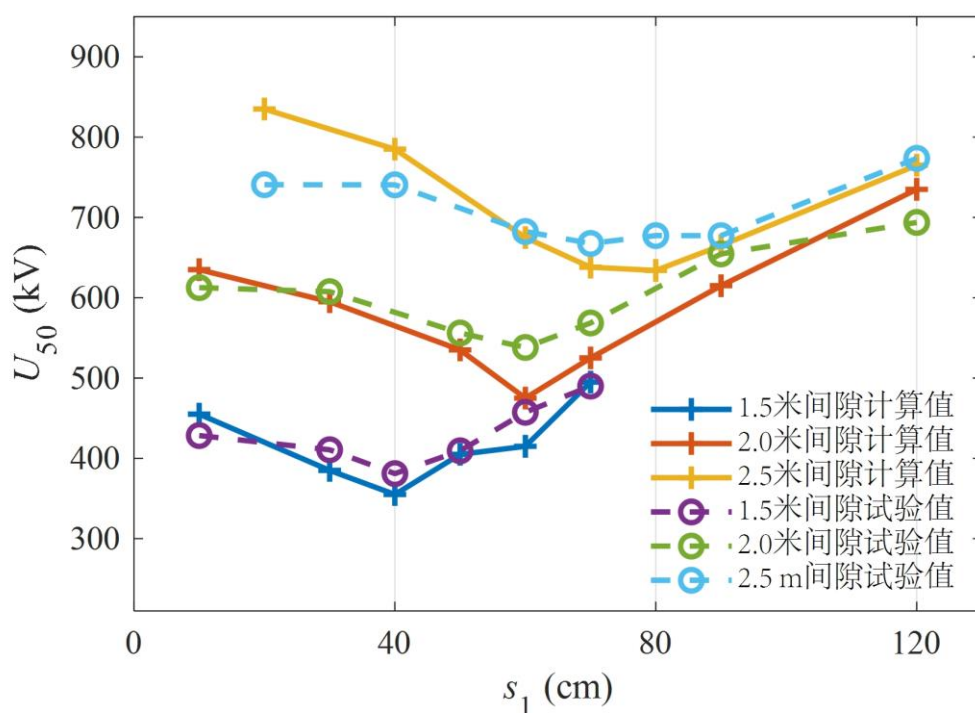


图 5.11 含悬浮导体长空气间隙击穿电压计算值与试验值

不过，在计算过程中仍发现本文建立的含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型的两点不足。第一，仿真计算中发现，子间隙 1 中悬浮导体上行流注发展不明显，这可能与上行流注电位梯度  $E_{sn}$  取值与实际值差异较大有关，后续应开展更全面的含悬浮导体长空气间隙放电观测试验，确定准确的放电参数，进一步提高放电仿真模型的准确性。第二，仿真计算耗时较长，在一台 i5-10400F、64G 内存、1T 固态硬盘和 1T 机械硬盘的电脑上，计算  $d=1.5$  m 含悬浮导体长空气间隙的 50% 击穿电压需耗时至少 20 小时，若计算间隙长度更大、结构更复杂的间隙将会耗时更长，后续应寻找简化部分仿真计算环节的方法，提高仿真计算速度。

## 5.5 输电线路带电作业组合间隙击穿电压预测

输电线路带电作业组合间隙是一类典型的含悬浮导体长空气间隙，其放电特性是确定带电作业最小组合间隙的重要参数。本节利用建立的含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型预测计算了输电线路带电作业组合间隙的击穿电压，进一步验证放电仿真模型的适用性。

以 750 kV 直线塔带电作业组合间隙为例。原武汉高压研究所研究了 750 kV 输电线路带电作业安全距离等特征参数，开展了不同杆塔中带电作业组合间隙放电特性的真型试验<sup>[152]</sup>。图 5.12 为直线塔带电作业组合间隙真型试验的布置图，模拟杆塔塔宽约为 1.4 m，绝缘子串挂在模拟横担下，到塔腿的距离可自由调节。绝缘子串下挂有模拟导线，离地高度为 26 m。模拟人由铝合金制成，与实际人体的形态及结构一致，四肢可以弯曲，坐姿高 1.8 m，身宽为 0.5 m。开展带电作业组合间隙放电特性研究过程中，保持模拟人距离高压导线  $s_1=0.4$  m，调整总间隙长度  $d=3.5$  m、3.9 m、4.5 m、4.9 m、5.4 m，利用升降法确定的间隙击穿电压如表 5.2 所示，试验结果已根据 GB/T 16927.1-1997<sup>[153]</sup>进行气象修正。



图 5.12 直线塔带电作业组合间隙真型试验的布置图

表 5.2 直线塔带电作业组合间隙真型试验结果

$s_1$ (m)	$d$ (m)	$U_{50}$ (kV)	$RSD$ (%)
0.4	3.5	1383	4.8
	3.9	1435	3.7
	4.5	1516	6.9
	4.9	1635	6.0
	5.4	1762	6.8

根据真型试验现场布置，搭建了直线塔带电作业组合间隙三维模型，如图 5.13 所示。利用建立的含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型，采用升降法改变施加电压，多

次模拟上述间隙的放电过程。每一类间隙仿真计算 30 次, 并利用公式(2.1)计算间隙 50% 击穿电压, 计算结果如表 5.3 所示。比较发现, 计算值与试验值吻合较好, 二者最大误差仅为 6.20%, 证明了建立的含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型在输电线路带电作业组合间隙中的适用性。

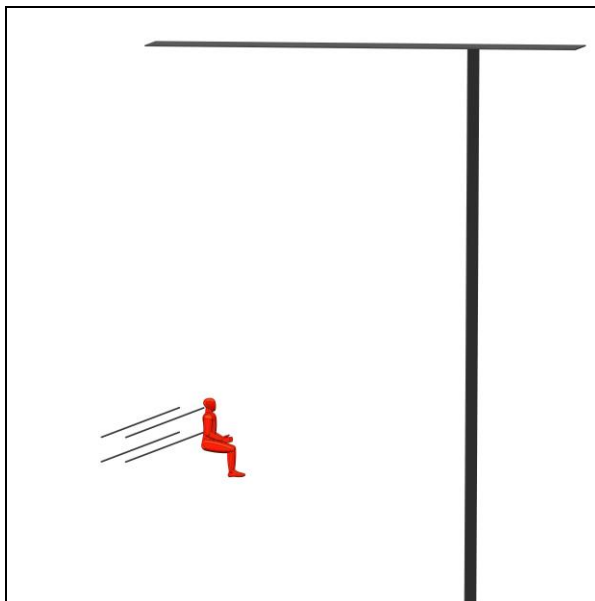


图 5.13 直线塔带电作业组合间隙三维模型

表 5.3 直线塔带电作业组合间隙预测计算结果

$s_1$ (m)	$d$ (m)	$U_{50}$ 计算值 (kV)	$U_{50}$ 试验值 (kV)	误差 (%)
0.4	3.5	1330	1383	-3.83
	3.9	1450	1435	1.05
	4.5	1610	1516	6.20
	4.9	1710	1635	4.59
	5.4	1830	1762	3.86

## 5.6 本章小结

本章根据含悬浮导体长空气间隙放电物理过程, 基于长空气间隙放电流注起始与发展模型、先导起始与发展模型等判据与模型, 建立了含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型。通过模拟子间隙 1 与子间隙 2 中的放电发展过程, 放电仿真模型可以判断含悬浮导体长空气间隙的击穿或耐受。采用升降法多次仿真计算间隙放电过程, 即可计算间隙的 50% 击穿电压。本文利用建立的放电仿真模型预测计算了不同间隙长度含悬浮导体长空气间隙的击穿电压, 并与放电试验确定的击穿电压进行比较, 结果表明计算值与试验值吻合较好, 证明了放电仿真模型的有效性。利用放电仿真模型预测计算了输电线路带电作业组合间隙的击穿电压, 计算值与真型试验结果吻合较好, 证明了放电仿真模型在输电线路带电作业组合间隙中的适用性。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

带电作业组合间隙是典型的含悬浮导体长空气间隙，在出现新的电压等级或者线路杆塔结构发生重大改变的时候，需要根据间隙的放电特性确定可以保证作业安全的间隙尺寸。本文针对目前带电作业组合间隙放电特性研究中击穿电压和最小击穿电压区域规律不明确，间隙最小击穿电压区域形成机理不清楚，依赖成本高、周期长的真型试验确定间隙放电特性等问题，开展了含悬浮导体长空气间隙放电特性、放电机理及放电仿真模型的研究，为解决上述工程问题提供充足的理论依据和科学解释。本文的主要工作和研究结论如下：

(1) 在武汉大学高电压试验大厅、国家电网公司武汉特高压交流试验基地、南方电网公司昆明特高压试验基地搭建了含悬浮导体长空气间隙放电特性试验平台，开展了含悬浮导体长空气间隙放电特性研究，研究表明：

1) 具有明显凸出物的悬浮导体会降低长空气间隙击穿电压，击穿电压最大下降率随总间隙长度增长而降低。含悬浮导体长空气间隙击穿电压随子间隙  $l_1$  增长呈现先下降后上升趋势，产生一个最小击穿电压区域，其位置随总间隙长度变化而改变。

2) 含悬浮导体长空气间隙击穿电压与悬浮导体凸出物对空间电场畸变程度有关，间隙击穿电压随畸变程度提升而降低。具有不明显凸出物的悬浮导体可能会在极靠近高压电极时提升间隙击穿电压，在远离高压电极时与具有明显凸出物的悬浮导体相同，仍具有降低击穿电压的特性，在靠近接地电极时间隙击穿路径可能会绕过悬浮导体直接连接高压电极与接地电极。总间隙长度不同、子间隙长度之和相同的含悬浮导体长空气间隙放电特性曲线存在差异。

3) 含悬浮导体长空气间隙在长波前时间操作冲击下的击穿电压高于标准操作冲击下的击穿电压。

4) 含悬浮导体长空气间隙在高海拔环境的击穿电压低于标准大气条件下的击穿电压，且高海拔环境的最小击穿电压区域位置更靠近高压电极。通过海拔校正方法校正标准大气条件下间隙击穿电压预测高海拔环境击穿电压的方法具有一定局限性。

5) 悬浮导体逐渐偏离轴线的过程中，间隙放电会出现高压电极-接地电极的击穿路径，击穿电压也会随之提高。当偏离到一定距离后，悬浮导体对长空气间隙的影响可以忽略，间隙击穿路径全部为高压电极-接地电极，间隙击穿电压也恢复为长空气间隙击穿电压。不同长度悬浮导体的偏离对长空气间隙的影响规律不同，长度更长的悬浮导体需要偏离更多距离才能忽略对长空气间隙的影响。

(2) 基于含悬浮导体长空气间隙放电特性研究得到的结论，分析了输电线路带电作

业组合间隙的放电特性，得到以下结论：

- 1) 带电作业组合间隙最小击穿电压区域随杆塔结构和间隙尺寸变化而改变。
- 2) 带电作业进出等电位过程中，作业人员应避免伸出四肢，以提高作业安全性。
- 3) 现有真型试验操作冲击电压波形确定的超、特高压线路带电作业最小组合间隙是偏严格的。
- 4) 通过海拔校正方法，校正低海拔环境带电作业组合间隙放电特性得到高海拔环境带电作业组合间隙放电特性，并计算最小组合间隙的方法具有局限性。已确定的高海拔环境带电作业最小组合间隙的作业安全性不及预期。

5) 带电作业人员采用吊篮法进出等电位过程的作业安全性比预期更高。

(3) 在武汉大学高电压试验大厅和南方电网公司昆明特高压试验基地搭建了含悬浮导体长空气间隙放电观测试验平台，开展了低海拔环境和高海拔环境中含悬浮导体长空气间隙放电观测试验，研究表明：

1) 含悬浮导体长空气间隙放电中，子间隙 1 中放电主要由下行先导-流注体系和上行流注组成，子间隙 2 中放电主要由先导-流注体系组成，悬浮导体位于不同位置时，间隙放电物理过程中各阶段起始时刻存在差异。悬浮导体在任意位置时，间隙放电物理过程的普遍规律有：放电全部从子间隙 1 率先开始，子间隙 2 中放电在子间隙 1 击穿前起始，子间隙 2 击穿不早于子间隙 1 击穿。

2) 含具有明显凸出物复杂结构悬浮电极的长空气间隙放电发展过程与含棒型悬浮电极长空气间隙放电发展过程一致，两类间隙击穿电压特性的相似性是由相似的间隙放电物理过程引起的。带电作业组合间隙的放电物理过程与确定的含悬浮导体长空气间隙放电物理过程一致。

3) 最小击穿电压区域的形成与子间隙 1 和子间隙 2 的击穿电压有关。当悬浮导体比最小击穿电压区域更靠近高压电极时，击穿电压提升是因为子间隙 1 击穿后，悬浮导体的电位没有达到子间隙 2 的击穿电压，需要更高的施加电压击穿间隙；当悬浮导体比最小击穿电压区域更远离高压电极时，击穿电压提升是因为子间隙 1 击穿需要更高的电压；最小击穿电压区域形成于这两种提升击穿电压影响因素的转换区域。

(4) 根据含悬浮导体长空气间隙放电物理过程，基于长空气间隙放电流注起始与发展模型、先导起始与发展模型等判据与模型，建立了含悬浮导体长空气间隙放电仿真模型。通过模拟子间隙 1 与子间隙 2 中的放电发展过程，放电仿真模型可以判断含悬浮导体长空气间隙的击穿或耐受。采用升降法多次仿真计算间隙放电过程，即可计算间隙的 50% 击穿电压。利用建立的放电仿真模型分别预测计算了简单电极构成的含悬浮导体长空气间隙和输电线路带电作业组合间隙的击穿电压，计算结果与试验结果吻合较好，证明了放电仿真模型的有效性。

## 6.2 研究展望

本文开展了含悬浮导体长空气间隙放电特性、放电机理及放电仿真模型的研究，取得了一些初步的研究成果，但在很多方面还有待深入研究，有待进一步开展的工作如下：

(1) 确定含悬浮导体长空气间隙更精确的放电参数，进一步提高放电仿真模型的准确性；寻找简化部分仿真计算环节的方法，提高仿真计算速度。结合数字孪生技术与计算高电压工程学手段，在输电线路带电作业工程场景中应用建立的放电仿真模型，为带电作业最小组合间隙的确定、带电作业安全性评估等工程需求提供技术支撑。

(2) 本文研究的含悬浮导体长空气间隙放电主要针对悬浮导体对极不均匀电场长空气间隙放电的影响。而飞机在飞行过程中遭受雷击的现象也属于一类含悬浮导体长空气间隙放电现象，此时空间电场较为均匀，飞机两端会在强电场中出现双向先导放电现象。后续可以基于本文研究成果，开展飞机在双向先导机制下的放电物理过程观测研究，明确间隙放电物理过程，获取放电特征参数，并建立相应的放电仿真模型。

## 参考文献

- [1] 陈维江, 曾嵘, 贺恒鑫. 长空气间隙放电研究进展[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1281-95.
- [2] 万启发, 霍锋, 谢梁, 等. 长空气间隙放电特性研究综述[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2499-2505.
- [3] 胡毅, 刘凯, 彭勇, 等. 带电作业关键技术研究进展与趋势[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1921-1931.
- [4] 胡毅, 刘凯, 刘庭, 等. 超/特高压交直流输电线路带电作业[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1809-1820.
- [5] IEC 61472-2013. Live working-Minimum approach distances for a.c. systems in the voltage range 72.5 kV to 800 kV-A method of calculation[S]. 2013.
- [6] GB/T 19185-2008. 交流线路带电作业安全距离计算方法[S]. 2008.
- [7] 丁玉剑, 宋刚, 陈稼苗, 等. 500 kV 同塔双回垂直排列紧凑型输电线路带电作业试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3281-3287.
- [8] 胡毅, 王力农, 邵瑰玮, 等. 750 kV 输电线路带电作业的试验研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 14-18.
- [9] 肖宾, 王力农, 刘凯, 等. 750 kV 同塔双回紧凑型线路带电作业技术试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2863-2868.
- [10] 陶留海, 唐盼, 刘凯, 等. 哈郑±800 kV 直流接地极架空线路带电作业安全距离研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 976-981.
- [11] 胡毅, 王力农, 邵瑰玮, 等. 1000 kV 级交流输电线路带电作业的试验研究[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 8-13.
- [12] 胡毅, 刘凯, 王力农, 等. 1000 kV 同塔双回输电线路带电作业技术试验研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2668-2673.
- [13] 彭勇, 肖宾, 雷兴列, 等. 超特高压交流紧凑型输电线路带电作业试验分析[J]. 高电压技术, 2015, 38(6): 33-38.
- [14] CIGRE Working Group 33.07 Report. Guidelines for insulation coordination in live working[J]. Electra, 2000, 188(2): 139-143.
- [15] Rizk F A M. Effect of floating conducting objects on critical switching impulse breakdown of air insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1360-1370.
- [16] Liao Y, Gao C, Li R, et al. Long front time switching impulse tests of long air gap in UHV projects at an altitude of 2100 m[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 982-987.
- [17] 李立涅, 饶宏, 董旭柱, 等. 计算高电压工程学的思考与展望[J]. 高电压技术, 2018, 44(33): 3441-3453.
- [18] Arevalo L, Cooray V, Montano R. Numerical simulation of long sparks generated by positive switching impulses[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67: 228-234.
- [19] Diaz O, Cooray V, Arevalo L. Numerical modeling of electrical discharges in long air gaps tested with positive switching impulses[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(3): 611-621.
- [20] 谷山强, 谢施君, 向念文, 等. 长间隙正极性放电电流注-先导发展 3 维物理仿真研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2903-2910.
- [21] 谢耀恒. 正极性长空气间隙放电过程物理模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文,



- 2013.
- [22] 谢耀恒, 刘赞, 叶会生, 等. 正极性操作冲击下棒-棒间隙先导发展试验与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5983-5989.
- [23] Schneider H M, Turner F J. Switching-surge flashover characteristics of long sphere-plane gaps for UHV station design[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 551-560.
- [24] Paris L. Influence of air gap characteristics on line-to-ground switching surge strength[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(4): 936-947.
- [25] Paris L, Cortina R. Switching and lightning impulse discharge characteristics of large air gaps and long insulator strings[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(4): 947-957.
- [26] Gallet G, Bettler M, Leroy G, et al. Switching impulse results obtained on the outdoor testing area at Renardieres[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(2): 580-585.
- [27] Aleksandrov G N, Podporkyn G V. Analysis of experimental data on the electric strength of long air gaps[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2): 597-605.
- [28] Barnes H C, Winters D E. UHV transmission design requirements-switching surge flashover characteristics of extra long air gaps[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(4): 1579-1589.
- [29] Atwood A W, Hileman A R, Skooglund J W, et al. Switching surge tests on simulated and full-scale EHV tower-insulator systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(4): 293-303.
- [30] Menemenlis C, Isaksson K. Influence of the various parts of the switching impulse front on discharge development[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1725-1733.
- [31] Cortina R, Carbagnati E, Pignini A, et al. Switching impulse strength of phase-to-earth UHV external insulation-research at the 1000 kV project[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(11): 3161-3168.
- [32] Watanabe Y. Switching surge flashover characteristics of extremely long air gaps[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86(8): 933-936.
- [33] Kishizama I, Matsumoto K, Watanabe Y. New facilities for phase-to-phase switching impulse tests and some test results[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(6): 1211-1216.
- [34] 霍锋, 万启发, 谷定燮, 等. 1000 kV 与 500 kV 交流线路同塔架设相间放电特性及绝缘配合[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 142-150.
- [35] 陈勇, 孟刚, 谢梁, 等. 750 kV 同塔双回输电线路空气间隙放电特性研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2118-2123.
- [36] 陈勇, 万启发, 孟刚, 等. 750 kV 输电线路杆塔间隙和塔宽对操作冲击放电电压的影响[J]. 电网与水力发电进展, 2007, 23(9): 8-11.
- [37] 杜澍春. 交流 750 kV 单回线路杆塔空气间隙的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 1-4.
- [38] 谷定燮, 周沛洪, 陈勇, 等. 1000 kV 线路杆塔空气间隙距离选择[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 15-19.
- [39] 焦保利, 霍锋, 陈勇, 等. 特高压同塔双回交流线路的外绝缘特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1526-1532.
- [40] 胡伟, 霍锋, 徐涛, 等. 特高压倒 V 型串杆塔间隙放电特性及绝缘配置分析[J]. 高电压技术,

- 2017, 43(12): 4117-4122.
- [41] 谷琛, 张文亮, 范建斌. 超/特高压输电工程典型间隙操作冲击放电特性试验研究综述[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 11-17.
- [42] 丁玉剑, 律方成, 李鹏, 等.  $\pm 1100$  kV 特高压直流杆塔间隙放电特性[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1032-1038.
- [43] 丁玉剑, 廖蔚明, 宿志一, 等.  $\pm 800$  kV 同塔双回直流线路杆塔空气间隙的放电特性影响因素研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2983-2989.
- [44] 张文亮, 谷琛, 廖蔚明, 等. 超/特高压直流输电线路塔头间隙冲击放电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 1-5.
- [45] 孙昭英, 李庆峰, 宿志一, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电空气间隙外绝缘特性研究[J]. 中国电力, 2006, 39(10): 47-51.
- [46] 丁玉剑, 律方成, 李鹏, 等.  $\pm 1100$  kV 特高压直流杆塔间隙放电特性[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1032-1038.
- [47] 丁玉剑, 廖蔚明, 宿志一, 等.  $\pm 800$  kV 同塔双回直流线路杆塔空气间隙的放电特性影响因素研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2983-2989.
- [48] 张文亮, 谷琛, 廖蔚明, 等. 超/特高压直流输电线路塔头间隙冲击放电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 1-5.
- [49] Chen She, Zeng Rong, Zhuang Chijie, et al. Switching impulse breakdown characteristics of large sphere-plane air gaps compared with rod-plane air gap[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 839-844.
- [50] Geng Jianghai, Lv Fangcheng, Ding Yujian, et al. Influences of surface tips of a shield ball on the discharge characteristics of a long sphere-plane air gap under positive switching impulses[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(7): 902-906.
- [51] Lv Fangcheng, Geng Jianghai, Yuchen Qin, et al. Influence of protrusions on the positive switching impulse breakdown voltage of sphere-plane air gaps in high-altitude areas[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(4): 499-504.
- [52] 耿江海. 电极表面状态对阀厅球-板间隙放电特性影响及机理研究[D]. 北京: 华北电力大学博士学位论文, 2020.
- [53] 谷琛, 张文亮, 范建斌, 等. 棒-板间隙操作冲击放电电压的海拔校正[J]. 高电压技术, 2012, 38(01): 140-146.
- [54] 廖永力, 李锐海, 李小建, 等. 典型空气间隙放电电压修正的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 171-176.
- [55] 丁玉剑, 李庆峰, 廖蔚明, 等. 高海拔地区典型长空气间隙的操作冲击放电特性和海拔校正[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1441-1446.
- [56] 蒋兴良, 王军, 胡建林, 等. 1m 棒-板空气间隙正极性操作冲击放电特性及电压校正[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 137-143.
- [57] 蒋兴良, 于亮, 苑吉河, 等. 低气压棒-板间隙操作冲击放电特性及电压校正[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 70-74.
- [58] 蒋兴良, 王军, 苑吉河, 等. 模拟与自然环境下 0.5~1.5m 空气间隙正极性操作冲击放电电压校正方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 13-17.
- [59] Jiang Xingliang, Shu Lichun, Hu Jianlin, et al. Positive switching impulse discharge performance and voltage correction of rod-plane air gap based on tests at high-altitude sites[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 302-310.

- [60] 丁玉剑, 周松松, 范建斌, 等. 基于  $g$  参数法的棒-板长空气间隙操作冲击电压海拔校正分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2783-2789.
- [61] 丁玉剑, 廖蔚明, 孙昭英, 等.  $\pm 1000\text{kV}$  直流输电线路塔头间隙冲击放电特性试验及海拔校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 156-162.
- [62] 廖蔚明, 丁玉剑, 孙昭英, 等. 高压直流输电线路 V 型串塔头间隙操作冲击放电电压的海拔校正[J]. 电网技术, 2012, 36(01): 182-188.
- [63] Liao Yongli, Li Ruihai, Gao Chao, et al. Flashover tests on air gap of  $\pm 800\text{ kV}$  DC transmission line under composite DC and switching impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5), 2095-2101.
- [64] Liao Yongli, Gao Chao, Li Ruihai, et al. Long front time switching impulse tests of long air gap in UHV projects at altitude of 2100 m[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3), 982-987.
- [65] Les Renardières Group. Research on long air gap discharges at Les Renardières[J]. Electra, 1972(23): 53-157.
- [66] Les Renardières Group. Research on long air gap discharges at Les Renardières—1973 results[J]. Electra, 1974(35): 49-156.
- [67] Les Renardières Group. Positive discharges in long air gap discharges at Les Renardières—1975 results and conclusions[J]. Electra, 1977(53): 31-153.
- [68] Les Renardières Group. Double impulse tests of long air gaps. Part 1: Engineering problems and physical processes: the basis of recent tests[J]. Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A, 1986, 133(7):395-409.
- [69] Les Renardières Group. Double impulse tests of long air gaps. Part 2: Leader decay and reactivation[J]. Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A, 1986, 133(7):410-437.
- [70] Les Renardières Group. Double impulse tests of long air gaps. Part 3: Voltage front perturbation effects[J]. Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A, 1986, 133(7):438-468.
- [71] Les Renardières Group. Double impulse tests of long air gaps. Part 4: Effects of pre-existing space charge on positive discharge development[J]. Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A, 1986, 133(7):469-483.
- [72] Diaz O. Numerical modelling of positive electrical discharges in long air gaps[D]. Uppsala: Uppsala University, 2016.
- [73] Gallimberti I, Bacchiega G, Bondiou-clergerie A, et al. Fundamental processes in long air gap discharges[J]. Comptes Rendus Physique, 2002, 10(3):1335–1359.
- [74] 文习山, 陈慈萱, 解广润. 带串联电阻的长间隙放电变象仪摄影研究[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(2): 8-14.
- [75] 张海燕, 王文瑞. 长间隙中雷电冲击电场测量的研究[J]. 高电压技术, 1995, 21(3): 15 -17.
- [76] 谷山强, 陈家宏, 陈维江, 等. 长间隙放电综合观测系统的建立[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2640-2646.
- [77] Gu Shanqiang, Chen Weijiang, Chen Jiahong, et al. Observation of the streamer-leader propagation processes of long air-gap discharges[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(2): 214-217.
- [78] 曾嵘, 耿屹楠, 牛犇, 等. 空气间隙放电物理参数测量研究进展[J]. 高电压技术, 2011,

- 37(3): 528-536.
- [79] 耿屹楠, 庄池杰, 曾嵘, 等. 正极性雷电冲击电压下空间电荷电场测量研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 167-173.
- [80] 周旋, 曾嵘, 庄池杰, 等. 激光干涉法在空气间隙放电参数测量中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2073-2078.
- [81] 王泽众, 庄池杰, 张赟, 等. 基于光电倍增管的流注发展速度测量[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 920-925.
- [82] Cui Yingzhe, Zhuang Chijie, Zeng Rong, et al. Shock wave in a long-air-gap leader discharge[J]. AIP Advances, 2019, 9(6): 065011.
- [83] He Hengxin, He Junjia, Chen Weijiang, et al. Comparison of Positive Leader Propagation in Rod-Plane and Inverted Rod-Plane Gaps[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(1): 22-28.
- [84] 谢耀恒. 正极性长空气间隙放电过程物理模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2013.
- [85] 吴传奇. 冲击电压下长空气间隙正极性流注放电特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2014.
- [86] 赵贤根. 正极性冲击电压下长空气间隙流注茎特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2017.
- [87] 肖佩. 长间隙放电暗区阶段正极性流注茎的实验与仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2020.
- [88] 律方成, 钦雨晨, 王平, 等. 正极性操作冲击电压下流注发展过程中空间电场变化规律[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2964-2970.
- [89] Geng Jianghai, Wang Xinyu, Lv Fangcheng, et al. Design and application of electron energy measurement system based on silicon photodiode[J]. AIP Advances, 2020, 10(1): 015146.
- [90] Wang Quansheng, Geng Jianghai, Wang Ping, et al. Measurement of discharge channel based on background oriented schlieren technique using an optimized algorithm[J]. AIP Advances, 2021, 11(6): 065114.
- [91] 律方成, 刘晓敏, 王权圣, 等. 正极性操作冲击电压下流注放电路径随机发展特性[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), online.
- [92] Mosch W, Lemke E, Larionov V P, et al. An estimation of the voltage-time characteristic of long rod plane gaps in air at positive switching impulse voltages[C]. 13th International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Berlin, Germany: IEEE, 1977: 427-430.
- [93] Carrara G, Thione L. Switching surge strength of large long air gaps: a physical approach[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, 1976, 95(2): 512-524.
- [94] Rizk F A M. A model for switching impulse leader inception and breakdown of long air-gaps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1):596-606.
- [95] Rizk F A M. Switching impulse strength of air insulation: leader inception criterion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4):2187-2195.
- [96] Jones B, Waters R T. Air insulation in large spacings[J]. Proceedings of IEE, 1978, 125(11R): 1152-1176.
- [97] Hutzler B, Hutzlerbarre D. Leader Propagation Model for Predetermination of Switching Surge Flashover Voltage of Large Air Gaps[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1978, PAS-97(4): 1087-1096.

- [98] Jiachen Gao, Linong Wang, Qiushi Zhang, et al. Switching Impulse Discharge Characteristics of UHV Transmission Line Air Gaps[J]. *IEEJ Transactions on electrical and electronic engineering*, 2019, 14(5), 735-741.
- [99] Jiachen Gao, Linong Wang, Zhangxiang Lian, et al. Engineering model of dielectric strength in phase-to-phase air gaps[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2020, 14(19), 4179-4185.
- [100] Jiachen Gao, Linong Wang, Guanlin Li, et al. Discharge of Air Gaps During Ground Potential Live-Line Work on Transmission Lines[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 187, 106519.
- [101] Abdel-Salam M, Anis H, El-Morshedy A, et al. *High-voltage engineering: theory and practice*[M]. New York, Marcel Dekker, 2000.
- [102] Abdel-Salam M, Allen N L. Current-voltage characteristics of corona in rod-plane gaps as influenced by temperature [J]. *IEE Science, Measurement and Technology*, 2003, 150(3): 135-139.
- [103] Allen N L, Berger G, Dring D, et al. Effects on humidity on corona inception in a diverging field[J]. *IEE Proceedings A: Physical Science, Management and Education-Reviews*, 1981, 128(8):565-570.
- [104] Poli E. A comparison between positive and negative impulse corona[C]. *7th International Conference on Gas Discharge*. London, UK, 1982: 132-135.
- [105] Diaz R R, Ruhling F, Heilbronner F, et al. The corona inception under negative impulse voltage in homogeneous fields[C]. *11th International Symposium on High Voltage Engineering*. London, UK, 1999: 155-158.
- [106] Gallimberti I. A computer model for streamer propagation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 5(12): 2179-2189.
- [107] Fofana I, B éroual A. A model for long air gap discharge using an equivalent electrical network[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1996, 3(2): 273-282.
- [108] Goelian N, Lalande P, Bondiou A, et al. A simplified model for the simulation of positive-spark development in long air gaps[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997, 30(17): 2441-2452.
- [109] Becerra M, Cooray V. A self-consistent upward leader propagation model[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(16): 3708-3715.
- [110] Becerra M, Cooray V. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(2): 897-908.
- [111] Arevalo L, Cooray V, Wu Dong, et al. A new static calculation of the streamer region for long spark gaps[J]. *Journal of Electrostatics*, 2012, 70: 15-19.
- [112] Arevalo L, Wu D, Jacobson B. A consistent approach to estimate the breakdown voltage of high voltage electrodes under positive switching impulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114: 083301.
- [113] Gallimberti I. The mechanism of long spark formation[J]. *Journal of Physique Collective*, 1972, 40(C7): 193-250.
- [114] Bondiou A, Gallimberti I. Theoretical modelling of the development of the positive spark in long gaps[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1994, 27(6):1252.
- [115] Petrov N I, D'Alessandro F. Assessment of protection system positioning and models using observations of lightning strikes to structures[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2002, 458: 723-742.
- [116] Petrov N I, D'Alessandro F. Theoretical analysis of the processes involved in lightning attachment to earthed structures[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(14): 1788-1795.
- [117] Aleksandrov N L, Bazelyan E M, Raizer Y P. Initiation and development of first lightning leader:

- The effects of corona and position of lightning origin[J]. Atmospheric research, 2005, 76(1): 307-329.
- [118] Aleksandrov N L, Bazelyan E M, D'Alessandro F, et al. Numerical simulations of thunderstorm-induced corona processes near lightning rods installed on grounded structures[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(12): 802-816.
- [119] Arevalo L, Cooray V. Streamer to leader transition criteria for propagation of long sparks and lightning leaders[C]. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014.
- [120] Waters R T. Breakdown in nonuniform fields[J]. IEE Proceedings A, 1981, 128(4): 319-328.
- [121] Hutzler B. Switching Impulse Strength of Air Gaps Containing a Metallic Body at Floating Potential[C]. 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, 1987.
- [122] Baldo G. Floating potential bodies and their interaction with discharge development[C]. 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, 1989.
- [123] Viljoen R. Flashover performance of a rod-rod gap containing a floating rod under switching impulses with critical and near critical times to crest [D]. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2009.
- [124] 王胜辉, 杨广华, 陈维江, 等. 含有电位悬浮导体的组合空气间隙放电特性实验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 1-7.
- [125] Yang G, Wang S, Chen W, et al. Effect of a floating conductor on the breakdown performance of a rod-plane air gap[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 3160-3163.
- [126] 朱真兵, 王欣, 张恒志, 等. 含悬浮金属板的棒-板-棒组合间隙操作冲击放电特性研究[J]. 电磁避雷器, 2020, 293: 29-35.
- [127] 杨跃光, 苏俊源, 孙泽中, 等. 棒-板-棒组合间隙雷电冲击放电特性试验研究[J]. 电磁避雷器, 2020, 295: 68-73.
- [128] 邵天颖, 梅红伟, 曾向君, 等. 含悬浮导体的棒板间隙工频击穿特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 1046-1054.
- [129] 胡毅, 王力农, 邵瑰伟, 等. 750kV 同塔双回输电线路带电作业技术研究[R]. 武汉: 国网武汉高压研究院, 2006.
- [130] ±800kV 直流特高压线路带电作业最小安全距离、最小组合间隙研究[R]. 武汉: 国网电力科学研究院, 2009.
- [131] 胡毅, 王力农, 邵瑰伟, 等. 1000kV 级交流输变电工程带电作业技术研究[R]. 武汉: 国网武汉高压研究院, 2006.
- [132] 彭勇, 肖宾, 刘庭, 等. 特高压交流紧凑型输电线路带电作业技术研究[R]. 武汉: 中国电力科学研究院, 2016.
- [133] 王力农, 胡毅, 刘凯, 等. 特高压输电线路带电作业组合间隙的放电机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(05): 1224-1231.
- [134] Naidoo P, Swift D A. Large Particle initiated breakdown of an atmospheric air gap: relating to AC power line faults caused by sugar cane fires[C]. 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, 1989.
- [135] Huang Daochun, Lu Wei, Yao Tao, et al. Study on the breakdown characteristics of conductor-plane gap under vegetation fire condition based on the combustion features[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 2884-2889.
- [136] Huang Daochun, Lu Wei, Long Mingyang, et al. Influence of the typical vegetation ashes/particles

- on discharge characteristics of conductor-plane air gap[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 16: 3214-3218.
- [137] Zhou Y X, Xu X, Nie Q, et al. Bird streamer caused flashover in EHV transmission line[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(1): 69-76.
- [138] 杨广华. 直流架空输电线路鸟粪闪络特性及机理研究[D]. 北京: 华北电力大学硕士学位论文, 2019.
- [139] 邓畅宇. 交流架空输电线路鸟粪闪络特性的模拟试验研究[D]. 北京: 华北电力大学硕士学位论文, 2019.
- [140] Castellani A, Bondiou-Clergerie A, Lalande P, et al. Laboratory study of the bi-leader process from an electrically floating conductor. Part 1: General results[J]. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 1998, 145(6): 185-192.
- [141] Castellani A, Bondiou-Clergerie A, Lalande P, et al. Laboratory study of the bi-leader process from an electrically floating conductor. Part 2: Bi-leader properties[J]. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 1998, 145(6): 193-199.
- [142] Das S, and Kumar U. Modeling of Bi-Polar Leader Inception and Propagation from Flying Aircraft Prior to a Lightning Strike[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(6): 943.
- [143] GB/T 16927.1-2011, 高电压试验技术第 1 部分: 一般定义及试验要求[S]. 2011.
- [144] IEC 60060-1: 2010, High-voltage Test Techniques, Part 1: General Definitions and Requirements[S]. 2010.
- [145] <https://zh-cn.topographic-map.com>, 中国地形图.
- [146] IEC 60071-2: 1996, Insulation co-ordination-Part 2: Application guide[S]. 1996.
- [147] GB 311.1-2012, 绝缘配合第 1 部分: 定义、原则和规则[S]. 2012.
- [148] Hagelaar G J M, and Pitchford L C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2005, 14(4): 722-733.
- [149] Abdel-Salam M. Positive wire-to-plane coronas as influenced by atmospheric humidity[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, 21(1): 35-40.
- [150] Naidis G V. On photoionization produced by discharges in air[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2006, 15(2): 253-255.
- [151] Baldo G, Gallimberti I, Garcia H N, et al. Breakdown phenomena of long gaps under switching impulse conditions influence of distance and voltage level[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1975, 94(4): 1131-1140.
- [152] 750kV 线路带电作业安全间距及组合间隙的试验研究报告[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.
- [153] GB/T 16927.1-1997, 高电压试验技术第 1 部分: 一般定义及试验要求[S]. 1997.



## 攻读博士学位期间发表的论文目录

- [1] **Jiachen Gao**, Linong Wang\*, Shaocheng Wu, et al. Breakdown Characteristics of a Long Air Gap Containing a Floating Conductor under Positive Switching Impulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5), 1913-1922.
- [2] **Jiachen Gao**, Linong Wang, Shaocheng Wu, Kai Liu\*, et al. Prediction of Breakdown Voltage of Equipotential Live-Line Work Air Gaps in Transmission Lines: A Computational Discharge Model[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, early access.
- [3] Cheng Xie, Linong Wang, **Jiachen Gao\***, et al. Experimental Investigation of Discharge Path Selectivity of a Long Air Gap Containing a Floating Conductor[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(5), 1278-1287.
- [4] Shaocheng Wu, Linong Wang, **Jiachen Gao\***, et al. Breakdown characteristics of combined air gaps under lightning impulse[J]. AIP Advances, 2022, 12, 035024.
- [5] **Jiachen Gao**, Linong Wang\*, Shaocheng Wu, et al. Effect of a floating conductor on discharge characteristics of a long air gap under switching impulse[J]. Journal of Electrostatics, 2021, 114, 103629.
- [6] **Jiachen Gao**, Linong Wang, Yaqi Fang, Daochun Huang\*, et al. Aging performance investigation and improvement of modified polyurethane composites for composite overhead transmission line towers[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191, 106880.
- [7] **Jiachen Gao**, Linong Wang\*, Zhangxiang Lian, et al. Engineering model of dielectric strength in phase-to-phase air gaps[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(19), 4179-4185.
- [8] **Jiachen Gao**, Linong Wang\*, Guanlin Li, et al. Discharge of Air Gaps During Ground Potential Live-Line Work on Transmission Lines[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187, 106519.
- [9] **Jiachen Gao**, Linong Wang\*, Guanlin Li, et al. Discharge characteristics of ground potential live-line work air gaps in cup towers and double circuit towers[J]. Energy Reports, 2022, 8(S5), 285-291.
- [10] Shaocheng Wu, Linong Wang, **Jiachen Gao\***, et al. Breakdown voltage characteristics of combined air gaps under negative lightning impulse[J]. Energy Reports, 2022, 8(S13), 1230-1236.
- [11] Cheng Xie, Linong Wang, **Jiachen Gao\***, et al. Simulation analysis of potential transfer process in live-line maintenance [J]. Energy Reports, 2022, 8(S13), 498-505.
- [12] Chuanyang Li, ..., **Jiachen Gao**, ..., Yunlong Zi\*. Insulating materials for realising carbon neutrality: Opportunities, remaining issues and challenges[J]. High Voltage, 2022, 7(4), 610-632.
- [13] Yaqi Fang\*, Linong Wang, Rui Li, **Jiachen Gao**, Bin Song, Kai Liu. Modelling for switching impulse breakdown of live working gaps between equipotential worker and transmission towers[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(7), 1271-1278.

## 攻读博士学位期间参与的科研项目

- [1] 特高压工程技术（昆明）国家工程实验室开放基金项目：组合空气间隙放电仿真模型研究。
- [2] 电网环境保护国家重点实验室开放基金项目：带电作业电位转移放电与转移机制及特征参数仿真建模研究。
- [3] 中国南方电网有限责任公司科技项目：不停电作业线路设计优化技术研究与应用。
- [4] 国家电网公司总部科技项目：基于多波段小型雷达的重要输电通道综合灾害精细化监测预警技术研究。
- [5] 国网浙江省电力有限公司科技项目：中低压架空线及电缆典型综合不停电作业方法研究。
- [6] 南网贵州电网有限责任公司科技项目：输电线路避雷器对带电作业的影响及带电拆除工艺研究。
- [7] **Research Council of Norway: Insulation stressed with fast rise time repetitive voltages from high voltage power electronics (FastTrans).**

## 致 谢

本论文是在我的导师王力农教授和 Prof. Andrea Cavallini 的精心指导下完成的，在论文完成之际，特向两位恩师表示衷心的感谢和崇高的敬意。

2017 年 9 月，已经硕士研究生入学但还未选择导师的我，每日都在为人生方向而迷茫，并常常陷入对自我科研能力的怀疑。在机缘巧合下，我有幸认识了王力农老师并拜入王老师门下，从此便开始了在高电压与电力新材料团队（3517 实验室）的科研学习生活。回首过去的五年，与王老师交流讨论的场景仍然历历在目，王老师渊博的学识，严谨的治学态度，务实的工作作风，乐观的人生态度深深地感染了我。王老师如一盏明灯，在学习、科研、工作、生活、为人等方面为我指明前进的方向。每当我遇到困难与挫折时，王老师总能为我找到解决问题的方法或思路，也总会给予我足够的支持与鼓励。科研工作中，王老师尽职尽责，为我提供了优越的科研环境；生活中，王老师体贴学生，给予了我充足的生活支持。在王老师的指导与帮助下，曾经对自己科研能力的怀疑转化为进步的动力，激励自己一步步前进；而在王老师丰富的人生阅历的感染下，我也寻找到了自己的努力方向，不再迷茫。攻读硕士与博士的五年，不仅仅是专业学习与科研能力训练的五年，更是向王老师学习为人处事与人生哲学的五年。王老师的教诲令我受益匪浅，受用终生。

在意大利博洛尼亚大学科研学习的经历也是我人生中一笔宝贵的财富。衷心感谢 Prof. Andrea Cavallini 对我科研和生活上的关心和帮助。Prof. Cavallini 在本文试验数据总结与分析方面给予了我许多建议和指导，指导我完善了放电仿真模型的部分环节，在小论文的撰写和修改过程中给予了我许多帮助。除此之外，Prof. Cavallini 还指导我进入了新的研究领域，开展了电气化交通绝缘技术的研究，拓宽了我今后科研工作的研究方向。Prof. Cavallini 平易近人、事无巨细、事必躬亲，他严谨的科研态度、忘我的工作作风、豁达乐观的人生态度都是我学习的榜样。

再次向两位恩师致以最崇高的敬意和最诚挚的感谢！

在武汉大学攻读硕士与博士期间，3517 实验室是我生活、工作的家，美好而温馨。感谢 3517 实验室宋斌老师、师姐张秋实博士、师姐方雅琪博士、师兄李恩文博士对我的指导和帮助。感谢师弟伍绍铖、谢诚、李冠霖、谭启鹏、哈衣那尔、王文郁等帮助我完成博士课题研究。感谢 3517 实验室的所有师兄姐妹们的支持与陪伴，让我度过了愉快的硕士与博士生活。

在 UNIBO 攻读博士期间，LIMES 的老师和同事们给予了我许多关心与帮助。感谢 Prof. Davide Fabiani、Prof. Paolo Seri 对我的指导与照顾，感谢 Alberto Rumi、Jacopo Marinelli、Leonardo Cirioni、Dr. Simone Vincenzo Suraci 对我课题研究的帮助，感谢贺逸飞、Dr. Giacomo Selleri、Daniele Mariani、Leonardo Gasperini 等所有同事们的陪伴，

让我在意大利的科研生活充实有趣。

本论文的完成也离不开许多老师、同学与工程师的帮助。感谢武汉大学黄道春老师、文习山老师、杜志叶老师、王建国老师、蔡力老师、周蜜老师、王羽老师、王建平老师、邓冶强博士、王福坤、吴强、黄达等老师和同学的指导与帮助。感谢南方电网科学研究院师兄李恩文博士、王强强等工程师，中国电力科学研究院马业明等工程师在试验中的大力协助。

感谢特高压工程技术（昆明）国家工程实验室开放基金项目“组合空气间隙放电仿真模型”、电网环境保护国家重点实验室开放基金项目“带电作业电位转移放电与转移机制及特征参数仿真建模研究”以及国家留学基金委的资助。

感谢所有给予我鼓励、帮助与陪伴的朋友们，是你们的支持让我拥有快乐充实的博士生活。

感谢我的父母、妻子和亲人长期以来对我无微不至的关怀，感谢你们在我求学道路上给予我的支持与理解，让我顺利完成学业。

最后，向在百忙之中对我论文进行评阅和参加论文答辩的各位专家、教授表示衷心的感谢！