

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 25320131151813

UDC _____

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

架空导线热力耦合问题研究和应用

Research and Applications on Thermal-mechanical Problems of
Overhead Conductors

刘永斗

指导教师姓名: 古 泉 教授

专 业 名 称: 建筑与土木工程

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 6 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于年
月 日解密，解密后适用上述授权。
2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

热力耦合问题是非常普遍的工程问题。在许多实际问题的计算分析中，温度场、位移场以及应力场之间的耦合是非常重要的。解决这类问题的关键在于准确模拟温度场和温度应变（热胀/冷缩）以及位移场与传热参数之间的耦合关系。本文主要研究自然运营条件下架空导线的温度场、应力、弧垂以及温度拐点的计算方法和变化规律。

本文旨在准确计算架空导线在运营条件下的温度、应力、弧垂以及拐点温度，这对于确保输送电能最大化的情况下，保证架空线的强度和弧垂安全具有重要的意义。本文提出了一套完整的基于架空导线细观温度场和分层应力求解导线拐点温度的数值计算方法，即先利用有限元法求解考虑孔隙的细观温度场，再求解导线分层应力和弧垂特性，其中考虑了横向变形对分层应力、温度对弧垂的影响以及弧垂对导线受力的影响，最后根据应力计算方法迭代求解导线的温度拐点，分析并拟合了拐点温度与初始拉应力、风速和环境温度等因素的函数关系。本文通过对比温度场、应力场和弧垂等数值计算和实验结果，验证了所提方法的正确性和工程实用性。

关键词：架空导线；钢芯铝绞线；热力耦合；有限元法；

ABSTRACT

The thermal coupling problems are very common engineering problems. In the calculation and analysis of many practical engineering problems, the coupling between the temperature, displacement and the stress fields cannot be ignored. To solve these kinds of problems, the coupling relationships between the temperature field, thermal strain (expansion/ contraction due to temperature changes), displacement field and parameters of heat conductivity. In this dissertation, the calculation methods and regularities of stress, sag and critical point of temperature (CPT) of overhead conductors under natural operating conditions are studied.

This paper is aimed at accurately calculating the temperature, stress, sag and CPT of overhead conductors under the condition of operation, which is of great significance to ensure the safety of the strength and deformation of the overhead line, at the same time, with an efficient transmission of electric power. At this part(ie. chapter 2th to 5th), a complete numerical method of calculating temperature field, layered stresses and CPT of the overhead conductor is proposed to solve the CPT of the conductor(ie. using the finite element method to solve pore meso temperature field firstly, calculating the layered stress and sag secondly, computing the CPT based on the method of stress calculation finally). And, the relationship between the CPT and the initial tensile stress, wind speed and ambient temperature is analyzed. At last, the correctness and practicability of the proposed method is verified through the comparison of the experimental and numerical results of temperature field, stress field and sag.

Key words: Overhead conductors, Aluminium conductor steel reinforced(ACSR), Thermal mechanical coupling, Finite element method

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪论	- 1 -
1.1 研究背景与研究意义	- 1 -
1.2 研究现状	- 4 -
1.3 研究内容	- 5 -
1.4 主要工作和创新点	- 6 -
第 2 章 架空导线温度场研究	- 7 -
2.1 导线平均温度计算方法	- 7 -
2.2 细观温度场计算原理	- 24 -
2.3 架空导线的热源与散热	- 26 -
2.4 导线径向温度场的数值迭代求解	- 31 -
2.5 数值模拟与试验结果的对比分析	- 33 -
2.6 算例	- 34 -
2.6 本章小结	- 53 -
第 3 章 导线应力弧垂及安全系数研究	- 55 -
3.1 导线分层应力、弧垂求解原理	- 55 -
3.2 安全系数求解方法	- 59 -
3.3 算例 1: 分层应力、弧垂与安全系数研究	- 61 -
3.4 算例 2: JL/LB1A-300/50 型钢芯铝绞线分层应力计算	- 69 -

3.6 本章小结	- 72 -
第 4 章 导线拐点温度研究与软件系统介绍	- 74 -
4.1 拐点温度的定义	- 74 -
4.2 拐点温度的计算方法	- 74 -
4.3 拐点温度计算流程	- 75 -
4.4 软件系统介绍	- 77 -
4.5 拐点温度计算方法实验验证	- 85 -
4.6 本章小结	- 91 -
第 5 章 导线拐点温度影响因素和规律研究	- 93 -
5.1 拐点温度影响因素分析	- 93 -
5.2 拐点温度与拐点电流敏感性因素函数曲线拟合	- 95 -
5.3 拐点电流敏感性因素回归分析（多因素）	- 102 -
5.4 本章小结	- 106 -
第 6 章 总结与展望	- 107 -
6.1 总结	- 107 -
6.2 展望	- 107 -
参考文献	- 109 -
致谢	- 111 -

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	- 1 -
1.1 Background and Significance	- 1 -
1.2 Situation	- 4 -
1.3 Research Contents.....	- 5 -
1.4 Work and Innovation Points.....	- 6 -
Chapter 2 Research on Temperature field of Overhead Conductor .	- 7 -
2.1 Calculation Methods of Average Temperature of Conductor	- 7 -
2.2 Calculation Principle of Micro Temperature Field	- 24 -
2.3 Heat Source and Dissipation of Overhead Conductor	- 26 -
2.4 Numerical Iteration of Radial Temperature of Conductor.....	- 31 -
2.5 Comparative Analysis of Numerical Simulation and Experimental Results	- 33 -
2.6 Examples.....	- 34 -
2.6 Summary	- 53 -
Chapter 3 Study on Stress Sag and Safety Factor of Conductor	- 55 -
3.1 The Principles of Layered Stress and Sag of Conductor	- 55 -
3.2 Method for Solving the Safety Factor	- 59 -
3.3 Example 1: Study of Stratified Stress, Sag and Safety Factor.....	- 61 -
3.4 Example 2: the Calculation of the Layered Stress of the Steel Core Aluminum Stranded Wire	- 69 -
3.6 Summary	- 72 -

Chapter 4 Study on the Critical Point Temperature(CPT) of the Wire and the Introduction of Software System - 74 -

 4.1 Definition of CPT - 74 -

 4.2 Calculation Method of CPT - 74 -

 4.3 Calculation Process of CPT - 75 -

 4.4 Introduction of Software System - 77 -

 4.5 Experimental Verification of the Calculation Method of CPT - 85 -

 4.6 Summary - 91 -

Chapter 5 Study on the Influencing Factors and Laws of the CPT of Conductor..... - 93 -

 5.1 Analysis of Influencing Factors of CPT - 93 -

 5.2 The Curve Fitting (Single Factor Method) of Sensitivity Factor Function of Critical Point current(CPC) and CPT - 95 -

 5.3 The Regression Analysis of Sensitivity Factors (multi factors) of CPC - 102 -

 5.4 Summary - 106 -

Chapter 6 Conclusion and Prospect - 107 -

 6.1 Conclusion - 107 -

 6.2 Prospect..... - 107 -

Reference - 109 -

Acknowledgements - 111 -

第 1 章 绪论

本文主要研究架空输电导线的热力耦合工程问题，即自然运营条件下架空导线的温度场、应力、弧垂以及拐点温度计算方法和变化规律。

1.1 研究背景与研究意义

随着用电量持续快速增加，随之而来的是全国各地大量的电网改造工程和大型电厂的建设。目前我国已形成华北、东北、华东、华中、西北和南方电网共 6 个跨省区电网以及海南、新疆和西藏 3 个独立省网^[1]，如图 1.1 所示。就电力资源的供需角度而言，西部地区电力资源丰富而需求量不大，与之相反的是东部地区电力资源较匮乏而需求量巨大，我国部分东部地区已出现供需紧张的局面，如图 1.2 所示。为了使全国范围内的电力资源得到优化配置，提出了西电东送、南北互供、全国联网的电力供配模式，使发电能源密集地区的发电中心能够通过远距离输电线路为缺乏能源的中心供电，我国电力资源的走向如图 1.3 所示。



图 1.1 我国电网分布情况



图 1.2 电力供需量紧张的省份

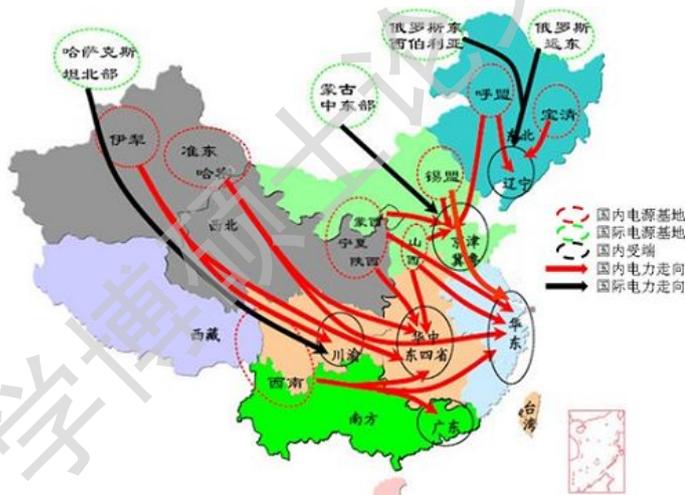


图 1.3 我国电力资源的走向情况

输电导线是电力系统中重要的载体，其安全性关系到整个电力系统的正常运转。导线于露天长期服役，属于典型的柔性结构，容易在强风、高温、低温覆冰等强烈环境荷载作用下引起损伤累积甚至导致输电线路体系的整体失效破坏^[2-3]。据国内外相关统计，输电线路发生的灾害事故中，由于导线损伤断裂所引发的灾害事故占了相当大的比例。特别是近年来，随着全国对用电需求的日益增大，普通的输电导线已经无法满足要求，一些可承受更高负荷的新型导线，例如铝合金导线，得到了越来越多的应用。这类新型导线具有耐热性能好的优点，可适合于

高压送电，但相比传统导线会在送电过程中产生更多热能，温度荷载较大。另外，导线是由外层铝股和内层钢芯所组成的复合体系，导线的外层和内芯在导热和机械等性能方面都存在着较大差异，从而导致运营过程中，内部温度的不均匀分布会进一步引起和加剧张力的不均匀分布。在高温作用下，导线发生强烈热膨胀，在张力和温度应力作用下，内芯的张力较大，而外层铝股张力较小。而在覆冰等低温荷载作用下则张力分布正好相反，内芯受力较小而外层铝股受力较大。有鉴于此，在某一个升高到某一特定温度，外层铝股可能退出工作，完全由内层钢芯承受外力荷载，这种受力状态的突变可以认为是一种“张力拐点”。“张力拐点”效应的存在，使得不同材料的导线运营状态下的受力平衡状态有较大差异，可能造成导线内部钢芯强度破坏。导线实际运营期间应当尽量避免这种“张力拐点”，因而限制了导线的最大电流。而“张力拐点”对应的导线输出电流并非定值，还和导线垂度、外界温度、日照、风速等有关系，是个比较复杂的问题。而导线在实际运营中无法完全避免到达甚至超过“张力拐点”的温度的情况。因此，如果导线初始设计选型过程中没有充分考虑这种差异，就容易导致导线的设计荷载与实际荷载不符，甚至有可能引发导线由于强度不足而导致的损伤断裂事故。

准确分析输电线的“张力拐点”，获取导线内沿径向方向的温度分布是关键。研究发现，影响导线内温度分布的主要因素有：铝层电流、电阻大小以及导线的有效热导率。由于导线内密封的空气绝缘性较好，致使导线的有效热导率较导线组成材料的热导率小很多。导线的有效热导率越小，径向温度差越大。具体的实例分析发现，基于有限元进行导线径向温度分布的仿真方法原则上可行，但需要特别注意，参数选取应采用合理的导线有效热导率。

综上所述，输电导线由于张力分布不均容易产生“张力拐点”效应并容易引发损伤断裂事故。这种不利的受力状况随着导线服役地区的不同、档距的不同、承受温度荷载和风荷载的不同既表现出了一些具有共性的承载力特点，也表现出了很多不同的受力特点。显然，由输电导线的损伤断裂所引发的输电线路破坏甚至整体倒塌，将直接威胁铁塔安全及线路的稳定运行。这不仅严重地影响人们的生产建设、生活秩序和防灾减灾工作，而且还会产生重大的次生灾害，给社会和人民的生命财产造成严重的后果。但目前国内外关于导线“张力拐点”演变模式、

损伤断裂机理以及相应的导线服役性能优化技术的研究和工程应用工作还很匮乏。因此，结合广东电网的多次导线损伤断线灾变实际，系统开展强烈荷载作用下的导线服役性能及其优化处置技术研究和应用具有非常重要的工程意义和社会经济意义，这对于提高输电杆塔的服役维护管理水平也是具有直接的现实意义。

1.2 研究现状

对于某一架空输电线路，导线的机械、物理方面基本已处于稳定状态，当导线的吸热与散热达到动态平衡，导线温度是基本稳定的。故一般情况下可基于导线发、散热的热平衡方程估算出导线的平均温度。通过讨论分析具有代表性的 IEEE 标准、CIGRE 标准和我国标准中关于导线温度发、散热的计算方法，可看出影响导线发、散热的元素很多，总结起来可以分为两类：第一类是外界环境条件，如风速、日照强度、环境温度、纬度和海拔高度等，这与输电线路所处的自然条件相关；第二类与导线自身特点和状态相关，如导线的吸热系数、辐射散热系数、导线允许温度、导线直径等。此外，通过比较分析这三种标准关于各发、散热量给出的计算方法，可发现：（1）计算电流发热量时，三种标准均通过修正焦耳发热项来综合考虑电流发热量，其中 CIGRE 标准采用直流电流等效替代交流电流的方法，IEEE 标准和我国标准则采用修正交流电阻的方法；（2）计算日照发热量时，CIGRE 标准考虑直射辐射，反射辐射和漫射辐射的影响，计算方法较复杂，适合于实时运行环境；IEEE 标准则只考虑了直射辐射的影响，若采用太阳总辐射量可简化计算，如我国标准和 CIGRE 标准中都提出了简化计算式；（3）计算对流散热时，CIGRE 标准和 IEEE 标准针对强制和自然对流分别给出了不同的计算方法，同时修正了风向影响，不同的是 CIGRE 标准综合了雷诺数和导线绞曲程度的影响，而 IEEE 标准只考虑了雷诺数的影响，我国标准给出的方法同 CIGRE 标准，但是假定雷诺数为 100~3000；（4）计算辐射散热时，三种标准给出了一样的计算方法。

大量的调查研究了导线断股、断线现象产生的种种原因，其中固然有局部地段线路覆冰超载、导线温度荷载超载、风致振动等因素，但也反映了对导线机械性能的认识不足，例如未考虑导致的输电导线张力分配不均，导致导线设计选型不合理，其原因可以归结为以下几点：

1) 由于目前的电网建设任务繁重，疏于开展针对现代电网导线力学性能和设

计方法的研究，不得不过多的沿用传统的经验设计方法，使有关导线结构分析和计算不可避免的存在问题；

2) 现有的电力工程高压送电线路设计手册中，尚缺乏对导线各股应力分布的设计依据；而相关文献对此问题的研究结论也说法不一，有待深入的研究，因而存在严重的设计隐患；

3) 导线整体结构与各股间的力载荷形式复杂，已有解释的假设条件较多，尚缺乏合理的分析模型表述，因而难以获得准确的计算结果，特别是对强烈外荷载作用下的导线张力“拐点效应”及其演变模式缺乏足够的理解和认识；

4) 缺乏导线结构计算分析和设计方法的支持，缺乏实用的设计工具，难以根据实际荷载情况提出优化的导线选型技术方案。

1.3 研究内容

对于正常运营环境下圆线同心绞线（钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线、耐热铝合金绞线等）“温度拐点”问题的研究而言，建立导线细观温度场、应力弧垂及其安全系数模型是关键，分析研究拐点温度的影响因素并建立其函数关系是重点，关于软件系统的介绍也必不可少。本文主要分为四个部分，即架空导线温度场研究、架空导线应力弧垂及安全系数研究、架空导线拐点温度与安全系数研究及其软件系统介绍、架空导线拐点温度影响因素和规律研究，各部分的主要内容概括如下：

架空导线温度场研究。a.介绍了基于热平衡方程的导线温度估计方法，讨论和比较了国内外采用最多的几个标准中关于导线温度估计方法的异同点。b.分析了导线内部的传热机理和影响导线径向温度分布的关键因素，基于热传导理论建立导线径向温度求解方程，提供了方程中的热源和复合散热率等基本参数的求解方法，归纳总结了导线细观温度场的求解流程。c.通过实验数据验证了计算方法的可靠性，并将计算方法应用到三种不同类型的钢芯铝绞线（JL/LB1A-300/50 型、LHA2/LB1A-227/10 型和 JL/LB1A-620/40 型），研究了导线细观温度场的分布规律和影响因素。

架空导线应力弧垂及安全系数研究。a.提出了一套完整的基于架空导线细观温

度场和分层应力场求解导线弧垂的数值计算方法，即先利用有限元法求解考虑孔隙的细观温度场，再求解导线分层应力和弧垂特性，考虑了横向变形对分层应力、温度对弧垂的影响以及弧垂对导线受力的影响。b.以钢芯铝绞线 JL/G1A315/50 和 JL/LB1A-300/50 为例，研究了分层应力、安全系数以及弧垂的变化规律。

架空导线拐点温度与安全系数研究及其软件系统介绍。a.归纳总结了一套求解架空导线拐点载流量、拐点温度的计算方法。b.将该方法用于多种型号的耐热铝合金导线，并与试验结果对比，验证了算法的正确性。c.介绍了架空导线细观温度场分层应力及其拐点温度与安全系数软件系统的开发背景、基本功能及适用范围、基本操作步骤和方法。

架空导线拐点温度影响因素和规律研究。a.以耐热铝合金导线 NRLH₈GJ-400/65 的实验结果，验证了拐点温度算法的正确性，分析了架空导线拐点温度的影响因素，并通过单因素法确定了其中的敏感因素。b.研究了拐点温度的影响因素。为了便于工程应用，本章中拟合了敏感因素与拐点温度的函数关系式。

1.4 主要工作和创新点

硕士阶段的主要工作和创新点如下：

(1) 基于经典的传热原理，建立了考虑孔隙和复杂热对流散热的精细化的温度场求解方法，并开发了相应的有限元计算程序（Fortran 语言）。

(2) 经分析架空圆导线的几何特性设计了其网格自动划分算法，开发了架空圆导线温度场计算有限元网格（三角形网格）自动划分程序，实现了网格的参数化，大大简化了求解过程。

(3) 在分层应力和弧垂的求解过程中，考虑了细观温度场对应力和弧垂的影响，整理了现有的弧垂和应力的解析计算公式，建立了分层应力和弧垂求解算法并开发了相应的计算程序，实现了分层应力和弧垂的电算。

(4) 研究了架空导线的工程问题，即拐点电流和拐点温度，开发了架空导线细观温度场分层应力及其拐点温度与安全系数软件系统。

第 2 章 架空导线温度场研究

本章首先介绍了基于热平衡方程的导线温度估计方法，建立了架空导线电流与环境温度、风速、日照强度、导线外径和导线温度的关系，讨论和比较了国内外采用最多的几个标准中关于导线温度估计方法的异同点。然后以此为基础，介绍了架空导线温度场的精细化数值模拟方法：1) 分析了架空导线的构造形式及其内部的传热机理，并基于此建立了二维稳态热传导控制方程；2) 基于二维稳态热传导控制方程，考虑了输电线主要发热源、散热途径、绞合导线内部空隙分布以及每股钢芯和铝层间接触情况，从而建立了精细化的导线径向温度场求解方法，并对实验结果与数值模拟结果进行了对比，验证了计算方法的可靠性；3) 将计算方法应用到三种不同类型的钢芯铝绞线（JL/LB1A-300/50 型、LHA2/LB1A-227/10 型和 JL/LB1A-620/40 型），研究了导线细观温度场的分布规律和影响因素。

2.1 导线平均温度计算方法

近年来，国内外有大量的文献通过理论分析或实地实验的方式研究了影响通电导线温度的因素。文献[4]指出导线温度除主要受电流负载因素的影响，还受到日照、对流、辐射等外界因素的影响。文献[5]对架空导线进行现场的载流温升试验，研究了负载电流、环境温度与导线温升的关系。如图 2.1 (a) 所示，导线温升与负荷电流变化趋势基本相同，但是导线温升滞后于负荷电流曲线的变化。图 2.1 (b) 反映导线温升与环境温度的关系，在环境温度较稳定时段，导线温升主要由电流决定，环境温度变化较大时段，环境温度对导线的温升影响大。文献[6]通过空载导线的温升试验，分析研究了空载导线温升与日照和风速的关系。研究表明，空载的导线会由于日照的影响而产生 9~13℃ 的温升，风速与导线的温升成相反增长关系。当风速较小时，风速增加对导线温升影响很大；但当风速达到一定值，继续增加风速对导线的温升的影响不明显。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.