

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 200329005

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

常压下空气辉光放电等离子体特性
与动力行为研究

Study on Radiation Characteristic and Dynamic Behavior of
Atmospheric Pressure Glow Discharge Plasma in Air

任庆磊

指导教师姓名: 林 麒 教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2006 年 月

论文答辩时间: 2006 年 月

学位授予日期: 2006 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2006 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

空气在常压下的辉光放电（即 APGD: Atmospheric Pressure Glow Discharge）生成的低温等离子体在航空、材料表面改性、环境保护、臭氧合成、医学等诸多领域有着重要的应用价值，对其进行深入研究是非常有意义的。

本文设计了常压下空气辉光放电装置，并在电极板平面上产生了一薄层的表面低温等离子体。

针对产生出的表面等离子体具有光、声、热辐射特性，设计合理的实验测量方案，分别利用光栅光谱仪测量系统、噪音计以及红外测温仪首次对这种 APGD 等离子体的光辐射、声辐射及热辐射特性进行了非接触式测量分析。分析结果表明，APGD 等离子体的辐射光谱面积积分平均值和光谱最高峰值平均值随加载功率变化均呈线性增加关系，放电噪音声强和热辐射也与加载功率基本上呈线性增强关系，电极板的结构也会影响 APGD 的辐射强度。

利用烟和泡沫屑的实验，证实 APGD 等离子体具有顺电电流体动力，由于这种力的存在，使得等离子体周围的空气流场发生改变，但是这种力的产生机理和性质还有待进一步的实验及理论研究。

研究结果说明在获得 APGD 等离子体的辐射特性与加载功率之间的关系后，通过它来控制等离子体的产生量以及描述它的特性都是可行的。这为有效地利用 APGD 低温等离子体提供了一种简便的途径，也为深入研究 APGD 等离子体，寻找 APGD 等离子体特性参数的表达方式奠定了基础。另外研究结果也表明，APGD 等离子体所具有的顺电电流体动力可以用以控制气流流动。

关键词：辉光放电；辐射特性；电流体动力

ABSTRACT

The applications of low temperature plasma due to atmospheric pressure glow discharge (APGD) in air are very important and valuable in many fields, such as, aviation, surface modification of material, environmental protection, ozone generation and medicine field, and so on. It is very significant to further study the APGD plasma.

In this paper, a thin layer low temperature plasma due to atmospheric pressure glow discharge (APGD) in air has been produced on the planar surface of designed electrode plate.

The optical, acoustic and thermal radiation characteristic of the produced plasma were first measured with a grating spectrograph system, sound level meter and infrared thermometer. The method for measurement is proper and non-contact. The data obtained have been analyzed. The results indicate that the intensity of the optical, acoustical and thermal radiation of the APGD plasma grow linearly up basically with the increasing power applied to the electrode plate, and vary with the different configuration of the electrode plates.

The meaningful experiments of smoke and drossy foam were carried out to the produced plasma on the electrode plates. The experimental phenomenon shows the APGD plasma can induce a paraelectric EHD body force, which affects the surrounding airflow near the plasma region. The future experimental and theoretical studies on the paraelectric EHD body force are significant and necessary.

The study shows that it is feasible to describe the behavior of the APGD plasma and to control it quantitatively by the obtained relationship between its radiation characteristic and applied power, which provides a convenient approach for utilizing APGD plasma effectively and also establishes some foundation to investigate APGD plasma further, otherwise that it has potential values to control airflow with the paraelectric EHD body force induced by the APGD plasma.

Key Words: Atmospheric pressure glow discharge; Radiation characteristic; EHD

第一章 绪 论	1
1.1 等离子体	1
1.2 常压辉光放电低温等离子体	2
1.3 本文的研究背景与选题	4
1.4 本文的主要研究工作	6
第二章 常压下空气辉光放电 (APGD) 的建立	8
2.1 APGD实验装置	8
2.2 APGD电参测量及原理分析	11
2.3 本章小结	17
第三章 APGD等离子体辐射特性测量与分析	18
3.1 APGD光辐射测量	18
3.2 APGD声和热辐射测量	33
3.3 本章小结	36
第四章 APGD等离子体力学行为初步研究	37
4.1 EHD流体控制的国外研究.....	37
4.2 APGD等离子体力学行为实验研究	51
4.3 本章小结	57
第五章 总 结	58
5.1 结论.....	58
5.2 回顾与展望	59
参考文献	61
硕士期间发表的学术论文	64
致 谢	65

Contents

Chapter I Introduction	1
1.1 Plasma	1
1.2 Atmospheric pressure glow discharge plasma.....	2
1.3 Research background and topic selection of the thesis	4
1.4 Main research tasks of the thesis	6
Chapter II Atmospheric pressure glow discharge	8
2.1 Experimental apparatus of APGD	8
2.2 Electrical parameters measuring and principle analyzing of APGD.....	11
2.3 Brief summary.....	17
Chapter III Radiation characteristic measurement and analysis of APGD	18
3.1 Optical radiation of APGD.....	18
3.2 Acoustic and thermal radiation of APGD	33
3.3 Brief summary	36
Chapter IV Investigation in dynamic behavior of APGD plasma.....	37
4.1 Overseas study on flow control with plasma EHD	37
4.2 Experimental study on dynamic behavior of APGD plasma	51
4.3 Brief summary	57
Chapter V Summary	58
5.1 Conclusion	58
5.2 Review and outlook.....	59
References	61
Publications	64
Acknowledgements	65

第一章 绪论

1.1 等离子体

众所周知，物质有固态、液态和气态三种基本形态，而等离子体是物质的第四态，是在一定温度下由带负电的自由电子和带正电的离子以及一些中性粒子组成的电离气体，其宏观上呈近似电中性。

物质是如何成为等离子态的呢？处于气态的物质，当它接收外界供给的足够大能量时，气态粒子中电子的动能就会超过原子的电离能，电子将会脱离原子的束缚成为自由电子，而原子则因失去电子而成为带正电的离子，这样被电离了的气体就处于等离子态。这个过程就是气体放电的过程。一般产生等离子体的能量来源可以是高温、强电场或者是 RF（射频）电磁场。

等离子体在自然界中是普遍存在的。宇宙中大部分物质处于等离子体状态，地球上南北极有时发生的五颜六色的极光、夏日雷雨时出现的闪电和绚丽多彩的霓虹灯、日光灯等都与等离子体现象密切相关^[1]。

在这种第四态物质的内部，存在着带电粒子及中性粒子间的复杂碰撞，从而使等离子体具有许多独特的性质。等离子体的存在会伴随着光、热、声的辐射，整体具有类似金属的导电性能，内部粒子运动活跃，可受电磁场的作用，化学活性高。

等离子体由于存在上述这些特性，其技术的应用领域现在越来越广泛，且应用潜力和价值越来越大。图 1.1 列举了等离子体的应用分类^[2]。

通常，等离子体中存在电子、正离子和中性粒子（包括不带电荷的粒子如原子或分子以及原子团）等三种粒子。设它们的密度和温度分别为 n_e , n_i , n_n , T_e , T_i , T_n 。由于 $n_e \approx n_i$ （准电中性），所以电离前气体分子密度为 $(n_e + n_n)$ 。于是，可以定义电离度 $\beta = n_e / (n_e + n_n)$ ，以此来衡量等离子体的电离程度。对于处在等离子态的物质，可以表征其性质的两个普适参数为电子数密度 n_e 和电子温度 T_e 。

根据电离度以及粒子温度的不同，等离子体有高温等离子体和低温等离子体之分。高温等离子体的电离度为 100%，属于完全电离，粒子温度近似相等 ($T_e \approx T_i \approx T_n$)，主要应用于核聚变能源利用及宇宙空间领域。而低温等离子体属于部分

电离，三种粒子温度不同 ($T_e \gg T_i$, $T_e \gg T_n$)，但整体温度不高，在工业中应用最广泛，如在光源、材料处理与加工、环境保护以及航空等领域。

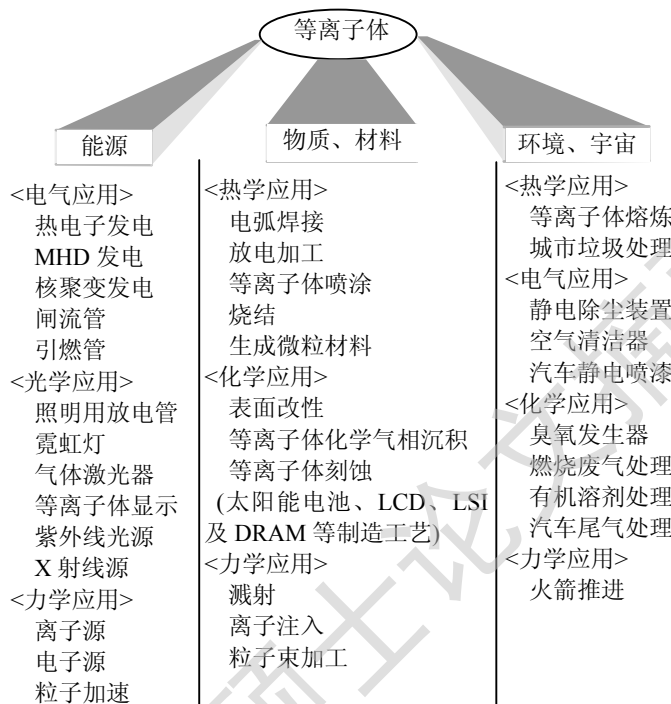


图 1.1 等离子体的应用

1.2 常压辉光放电低温等离子体

目前，在低温等离子体的应用中，气体放电产生低温等离子体的条件往往需要低气压或真空环境，但这会造成应用效率下降和应用成本增高，影响低温等离子体在工业化应用中的普遍推广。因此，研究常压下的低温等离子体就成了人们较关注的课题。

能在常压环境下产生低温等离子体的放电形式有：电晕放电 (Corona Discharge)、电弧放电 (Arc Discharge)、介质阻挡放电 (Dielectric Barrier Discharge)、辉光放电 (Glow Discharge)。^[3,4]

(1) 电晕放电

在放电的两个电极中至少有一个电极曲率半径很小，一般在尖端、边缘或细丝附近产生强电场区。产生电晕放电的条件是：气体压强较高（一般在一个大气压或以上），电场分布很不均匀，并有几千伏以上的电压加到电极上。电晕只发

生在“临界半径”区域之内，所谓“临界半径”是指径向衰减的电场在该处强度正好等于工作气体的击穿场强。电晕是一种自持放电，放电电流一般在微安数量级。在具有强电场的电极表面附近有强烈的激发和电离，并伴有明显的亮光，与天文学中日晕、月晕图像相似。

(2) 弧光放电

它是一种自持放电，其维持电压很低，这是与其他类型放电明显不同之处。放电电压虽然在有些条件下可达到几百伏，但通常只有几十伏，这是电弧很低的阴极位降所决定的。通常表现为一个明亮并且收缩的放电通道，在弧光阴极处电流密度是非常高的，可高达 $10^6 \sim 10^8 \text{A/cm}^2$ 。高电流密度加热阴极表面产生热电子发射。弧光放电等离子体温度可高达上万度。

(3) 介质阻挡放电

它是有绝缘介质插入放电空间的一种气体放电。介质可以覆盖在电极上或者悬挂在放电空间里。这种放电可以用频率从 50Hz 到 MHz 量级的高电压来启动。在大气压下这种放电呈现微通道的放电结构，即通过放电间隙的电流由大量快脉冲电流细丝组成，电流细丝在放电空间和时间上都是无规则分布的，这种电流细丝就称为微放电。正因为如此，介质阻挡放电也常被称为丝状放电。每个微放电的时间过程都非常短促，一般仅 10ns 数量级，而电流密度可高达 $0.1 \sim 1\text{kA/cm}^2$ 。

介质阻挡放电是一种高压下的非平衡放电。在外电场作用下，气体中存在的少量自由电子从电场中获取能量而高速运动。当这些电子与周围的原子或分子碰撞时，电子把自身的能量转移给它们，使它们激发电离，产生电子雪崩。当气体间隙上的外电场电压超过气体的击穿电压时，气体被击穿。由于电极间介质的存在，阻止了放电电流的自由增长，从而阻止了极间火花和弧光的形成。在气压为大气压或更高时，气体击穿会造成大量的电流细丝通道，这就是所谓的微放电。

(4) 辉光放电

通常辉光放电在低气压下较容易实现。低气压下的正常辉光放电具有以下主要特点：

- a. 对长间隙辉光放电而言，放电区由阴极区、负辉区、法拉第暗区、正柱区和阳极区组成；
- b. 相对较薄的阴极区承担了放电通道上的绝大多数电压降，即阴极位降；

c. 电流密度保持不变。因此放电通道的横截面积只占据一部分阴极表面，该面积随电流的增加而线性增大，直至覆盖整个阴极表面。

目前，常压下辉光放电（APGD: Atmospheric Pressure Glow Discharge），一般是指大气压下气体放电在电极之间均匀稳定地产生，但不一定具备低气压下辉光放电的所有特征。

前三种放电由于自身的放电特点，在应用起来都不够理想，尤其在材料处理方面。电晕放电一般发生在极不均匀电场中强电场区域的小范围空间内，对材料处理不够均匀且效率低。电弧放电的温度太高，容易损坏要处理的材料。介质阻挡放电会产生能量集中的放电细丝，对材料处理不会均匀。而辉光放电均匀稳定，功率密度适中，是常压环境下产生低温等离子体的较理想方法。

1.3 本文的研究背景与选题

在航空领域，APGD 等离子体对飞行器飞行性能的影响，以及 APGD 等离子体对边界层空气流动的改善作用和机理是潜在的热门研究课题[5,6]。在这方面，美国田纳西大学的 Roth 教授[7]及斯坦福大学的研究组[8]都进行过成功的实验，国内还未见有报道此相关研究的公开资料。据报道，美国已将相关的等离子体技术应用于 B2 轰炸机，大大地改良了 B2 的飞行性能[9]。但是，美国的这些研究成果至今都属于高级军事机密，尚未解密。已公开发表的学术论文也只是介绍了一些实验现象，并未给出理论上的解释。据外电报道，采用了等离子体技术的 B2 不仅有隐身功能，而且在飞行性能方面也有超乎寻常的表现，例如它可在推力不变条件下，飞行的速度、活动半径和载重量得到提高；同时音障的出现会推迟；可在“超音速”下巡航并在“虚拟的”亚音速条件下作机动飞行。美国取得的这些成果引起了科学家们的关注。

由于常压辉光放电产生的低温等离子体在纺织品和薄膜等材料表面改性方面有着诱人的工业化应用前景，常压辉光放电一直是国际学者探寻的研究重点和热点。早在 1933 年德国的 Von Engel 等人报道了他们的研究成果[10]，即利用裸电极在一个大气压下的氢气和空气中得到直流和交流辉光放电，但放电很不稳定，容易从辉光放电过渡到电弧放电。另外，它需要冷却电极且在低气压下点燃，因此仍需要真空系统。从那以后，人们尝试了许多不同的方法[11]，包括细管放

电、多针阴极放电、微空心阴极放电、电阻性电极放电、等离子体阴极放电等，都希望在大气压下得到较大体积的均匀放电。自 1988 年以来，日本的 Kanazawa[12]，法国的 Massines[13]，美国的 Roth[14-16]等研究小组利用介质阻挡平行板电极结构，通过 RF 放电，先后在多种气体中(氙气、氦气、氩气和丙酮混合气)实现了 APGD。最有工业应用价值的是 Roth 等人的成果，他们在实验室建了一台 APGD 等离子体装置，实现了氙气和氩气的均匀放电，并初步研制成功了空气中的均匀放电，同时获得了改善聚丙烯膜亲水性的结果。

后来国外对 APGD 等离子体的应用研究又延伸到其他领域，如在食品加工和医疗卫生领域中对食品和医疗器械进行杀菌消毒处理[17]，研究结果表明处理效果比传统方法更加有优势。

目前，国内也有一些大学和研究机构正在从事 APGD 及其应用的研究。清华大学研究 APGD 如何实现及分析它存在的问题^[18-20]，西安交通大学研究 APGD 的产生方法^[21]及在空气中对聚四氟乙烯进行表面改性的研究^[22]，东华大学^[23,24]、中国科技大学^[4,25]以及大连理工大学^[26,27]也都对 APGD 的建立进行了研究，并且还用 APGD 对材料表面处理进行了实验研究。由于在此方面的研究具有重要的意义，2003 年，国家自然科学基金委员会将“大气压辉光放电”列为国家重点研究项目。

迄今，对 APGD 等离子体有了一些研究成果，这些研究主要是如何从技术上实现这种放电，对放电产生机理的推测分析、简化模拟仿真^[28-31]，以及尝试性应用实验效果对比分析，但还没有真正付诸于工业化应用。其主要原因有以下三个方面：

(1) 虽然在实验室条件下实现了 APGD，但对它的物理机制还不够清楚，没有成熟的发生机理来判定指导它。有人怀疑它是否是传统意义上低气压下的辉光放电。法国的 Gadri^[28]对大气压下氩气在介质阻挡电极中的放电过程进行了数值模拟，结果表明放电通道中各种参量(电场、电荷密度等)分布和低气压下辉光放电很相似，同样存在相对高场强的阴极位降区和等离子体的正柱区，他认为这确实是大气压下辉光放电。但仍然有不少人认为，在空气中由于大气压和高击穿场强只能形成细丝放电。由于空气成分及其放电时可能发生的物理过程远比氩气复杂，对大气压下空气在介质阻挡电极中的放电过程进行数值模拟的难度很大，目

前仍未解决。

(2) 对APGD等离子体特性参数（如电子密度、电子温度等）缺乏成熟有效的诊断方法和控制机制，即迄今无法通过实验测量给出这些特性参数，或通过某些测量数据进一步给出它们的表达方式，从而有效地在应用时加以控制。朗缪尔（Langmiur）探针是最普遍用来诊断等离子体参数的工具，但是在大气压条件下，等离子体中离子和电子在被探针收集之前与中性粒子发生了频繁碰撞，使电子的平均自由程小于Langmiur探针周围鞘层的德拜长度，因此普遍用于低气压等离子体参数诊断的探针理论和计算公式无法在大气压情况下使用^[5,25]。这使得对APGD等离子体特性参数诊断的有关文献资料报道还很少见到，对APGD等离子体的诊断和控制仍处于摸索研究阶段。

(3) 对于 APGD 的结构特性以及电源的供电特性还有待深入研究。在实验室条件下产生 APGD 等离子体取决于很多因素，关键的是要有合适的供电装置（高频高压电源和匹配等）以及放电电极（结构和材质等）。这方面的研究是 APGD 实验研究的基础，也具有重要的意义。

鉴于前面的论述，要将 APGD 等离子体更好地控制应用于工业工程，尤其是应用于航空领域，就必须充分了解其产生机理和特性，对其参数进行诊断测量，以便更深刻地描述它，这也是国内外研究者普遍遇到的难点。

本论文研究课题的选定正是基于此，为了揭开等离子体技术对飞行器性能产生影响的神秘面纱，首先实现产生出适用于飞行器上的 APGD 等离子体，然后根据 APGD 等离子体具有辐射特性和力学行为，开展 APGD 等离子体的特性研究及其力行为的实验探讨，通过设计合适的实验方案，测量分析它的这些表现特性来更深入地研究 APGD 等离子体的本质。同时本课题得到了 2004 年福建省自然科学基金的资助（项目号是：A0410001）。

1.4 本文的主要研究工作

论文的主要研究工作有：

1. 设计制作放电电极板，并选购匹配的高压电源，在常压下的空气中建立稳定的辉光放电，产生低温等离子体。
2. 对所实现的 APGD 进行放电电参数测量，分析放电原理。

3. 设计合理的实验方案,采用各种测量仪器,对 APGD 等离子体的光、声、热辐射特性进行测量,并通过测量数据的分析研究 APGD 等离子体的各种特性,给出 APGD 等离子体各辐射特性随加载功率变化的规律。

4. 对 APGD 等离子体所展现的力学行为进行初步的实验,观察其表征,并对其力学行为的存在机理进行推测分析。

厦门大学博硕士论文摘要库

第二章 常压下空气辉光放电（APGD）的建立

2.1 APGD 实验装置

根据研究的需要，通过借鉴前人在 APGD 方面所做的研究成果，本论文搭建了一套 APGD 实验装置，其示意图如图 2.1。照片见图 2.2。

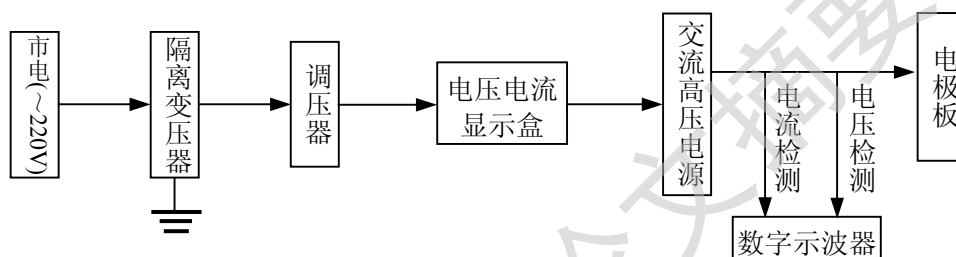


图 2.1 APGD 实验装置示意图



图 2.2 APGD 实验装置照片

装置中关键部分是交流高压电源和放电电极板，当两者匹配恰当时，启动后电极板可以稳定地放电并产生低温等离子体。

交流高压电源是根据所设计的电极板的工作要求从市场上选购的，其输入交

流电压可以在 50 V 至 250 V 之间，最大输出功率 500 W，可以通过调节其输出设置来改变输出量。当输出频率为 20 kHz 左右时，高压输出的最大电压均方根值约为几十 kV。由于实验过程中有高电压的存在，为了其它设备和人身的安全，在给高压电源的前端使用了隔离变压器与电网分离，并保证整套设备可靠接大地。调压器可以改变电源的输入电压，调整范围为 0 到 250 V。电压电流显示盒可以显示供给电源的功率输入电压和电流。

本文的放电电极板是借鉴美国Roth教授公开的论文资料设计制作而成的。Roth教授最初实现APGD的实验设备中，放电发生器主要是采用如图 2.3 所示介质阻挡平行板电极结构^[14-16]。这种结构在两电极板之间生成腔体状分布的低温

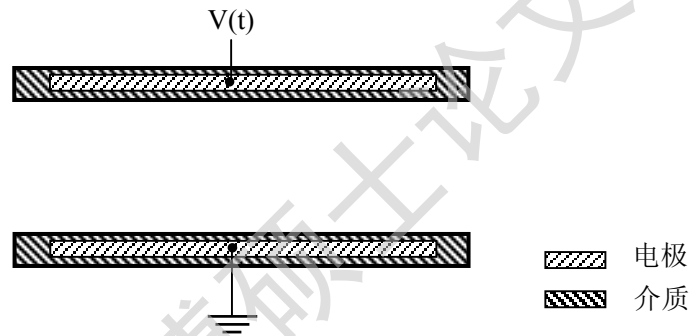


图 2.3 介质阻挡平行板电极结构

等离子体，这对于材料表面的处理还可以方便应用，但不适用于航空器表面的应用。低温等离子体用在航空器上，主要的目的是实现减阻与隐身，这就需要有附于机身外表面的层面状等离子体。Roth研究团队通过改良原先的放电发生器结构，产生出了沿面的表面等离子体，并利用它来进行控制流体边界层的研究^[7,32,33]。参考他们的做法，本论文也设计制作出了可以在常压空气中放电产生表面等离子体的电极板。主要采用了两种电极板结构，具体结构见图 2.4 和图 2.5。图 2.4 为所制作的单面放电产生等离子体的电极板结构图，图 2.5 为所制作的双面放电产生等离子体的电极板结构图。考虑到航空领域的应用要求，电极板的表面需尽可能光滑平整，所以电极板都采用制作 PCB 的方法由双面覆铜板制作而成。这样制成的电极板，附于板表面的电极厚度仅 0.1mm，可以满足要求。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士论文摘要库