

清华大学优秀博士学位论文丛书



Tsinghua
theses

低气压下 气体放电相似性研究

付洋洋 著 Fu Yangyang

Study on the Similarity of Gas Discharges at Low Pressure

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

低气压下 气体放电相似性研究

付洋洋 著 Fu Yangyang

Study on the Similarity of Gas Discharges at Low Pressure



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

气体放电相似性理论主要用于解决超大或超小尺寸放电研究所遇到的困难,包括不同尺寸气体放电器件的设计和放电特性的预测。本论文通过实验研究、数值模拟和理论分析,对低气压下气体放电相似性的某些相关问题进行了研究。

本文适合高等院校、科研机构相关领域的研究人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

低气压下气体放电相似性研究/付洋洋著. —北京:清华大学出版社,2018
(清华大学优秀博士学位论文丛书)
ISBN 978-7-302-45243-0

I. ①低… II. ①付… III. ①放电—研究 IV. ①O461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 244059 号

责任编辑:薛 慧

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:9 字 数:148 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版 印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

产品编号:071008-01

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

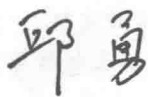
在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生导师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体会和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。

清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

气体放电的研究已经持续 100 多年了。气体作为一种优越的电绝缘介质,早期的研究主要关注气体的绝缘和击穿特性及其在工程中的应用。气体放电所产生的等离子体中包含大量的活性粒子(电子、离子、光子、激发态粒子、化学基团等),这使得近来的气体放电研究主要集中在气体放电等离子体的各种应用。随着气体放电等离子体应用的发展,人们有时需要了解某些超大尺度或超小尺度气隙的放电特性,而直接的实验或诊断在现阶段往往是不可能的。此时,气体放电相似性的研究就是唯一的解决办法。

气体放电相似性是指:对于两个几何形状相似但尺度不同的气隙(即所谓的几何相似气隙),在特定条件下,这两个气隙中的放电是相似的。这两个放电气隙不但外部的伏安特性相同,而且内部的各物理参量(如电场分布、电流密度、电子密度和温度等)呈特定的比例关系。气体放电相似性的研究具有重要的理论意义和应用价值。首先,若未知的 A 放电和已知的 B 放电具有相似性,则可以根据 B 放电来推断 A 放电中发生了哪些基本的物理过程。其次,在预估某些超大尺度或超小尺度气体放电特性时,可以利用尺度合适且易于实验的相似放电气隙进行实验,将所获得的实验结果外推到超大尺度或超小尺度气隙。

本博士论文的研究目标是进一步了解低气压下气体放电的相似性。低气压气体放电通常包括气隙击穿和辉光放电前后两个阶段,本博士论文分别研究了几何相似气隙的击穿电压相似性和辉光放电相似性。本博士论文取得的主要创新性成果包括:①实验发现了平行平板气隙的击穿电压可以表示为 $U_b = f(pd, d/r)$,从数学上证明了该表达式和气体放电相似性理论公式 $U_b = f(pd, E/p)$ 是等价的,并且著名的帕邢定律 $U_b = f(pd)$ 只是该表达式在均匀电场中的一个特例。因此,该表达式将帕邢定律扩展到平行

平板气隙的非均匀电场中。②发现低气压氩气辉光放电的相似性仅仅存在于几何比例系数 k 有限的任意两个几何相似气隙中,随着 k 的增大,逐级电离过程和第二类非弹性碰撞(彭宁电离除外)过程将破坏放电的相似性。

王新新

清华大学电机工程与应用电子技术系

2016年12月

摘 要

气体放电相似性理论主要致力解决超大或超小尺寸放电研究所遇到的困难,同时有助于不同尺寸气体放电器件的设计和放电特性的预测,具有重要的理论与应用价值。本论文通过实验研究、数值模拟和理论分析,对低气压下气体放电相似性的某些相关问题进行了研究,主要工作如下:

建立了一套低气压气体放电实验平台,极限真空达 10^{-5} Pa,配置了相应的外加电源、气路系统、气压监测、电气及图像诊断系统。设计了不同位形的几何相似放电气隙、绝缘外筒以及用于电流密度测量的环形电极。

在不同气隙长度 d 、电极半径 r 和放电管半径 R 的实验条件下,通过分别改变气隙的电场分布参数 d/r 和径向扩散参数 d/R ,对低气压下帕邢曲线分离现象进行了系统研究,提出电场分布的差异是导致大小气隙帕邢曲线分离的主要原因。研究了低气压下帕邢曲线的“交叉”现象。实验和数值计算结果均发现:气隙长度相同但电极半径明显不同的帕邢曲线将在低气压区产生交叉现象,这是由汤森放电击穿条件以及电子碰撞电离系数 $\alpha = f(E/p)$ 决定的。

利用气体放电的流体模型,对三种不同位形(平行平板、棒-板、棒-筒)几何相似气隙的辉光放电进行了数值仿真。对比了两气隙同一放电物理量(电位、电场、电子密度、离子密度等)之间的比例关系,结果表明:如果两个几何相似气隙缩比系数较小并且 $p_1 d_1 = p_2 d_2$,那么两个几何相似气隙的辉光放电是相似的。

通过建立两个不同的辉光放电物理模型,其中一个包含不允许过程(如逐级电离、除彭宁电离以外的第二类非弹性碰撞),另一个不包含上述不允许过程。使用两个模型比较了不同缩比系数下几何相似气隙中的辉光放电数值仿真结果,研究了不允许过程对辉光放电相似性的影响。

实验研究了不同位形(平行平板、棒-板)的几何相似气隙中低气压辉光放电的相似性。对于平行平板间隙,分析了缩比系数和气压对伏安特性的影响,确定了几何相似气隙放电相似时所对应的气压范围,并利用环形电极

测量了正常和反常辉光放电的电流密度,比较了同种辉光放电条件下几何相似气隙中的电流密度。对于棒-板间隙,研究了不同极性下几何相似气隙中辉光放电的相似性,分析了棒电极上部绝缘屏蔽对放电相似性的影响。在平行平板气隙下,通过测量不同实验条件下低气压反常辉光放电阴极位降区的长度,研究了径向扩散条件对相似关系式 $pd_c = f(J/p^2)$ 的影响。

关键词: 相似放电;相似定律;几何相似气隙;帕邢曲线;辉光放电

Abstract

Similarity theory of gas discharge mainly deals with the difficulties encountered in research of ultra-large or ultra-small scale discharge; meanwhile it helps designing and predicting discharge properties of gas-discharge device of different size, which has a vital theoretical and applicative value. In this paper, some problems related to the low-pressure gas discharge similarities were given an in-depth exploitation, based on experimental study, numerical simulation and theoretical analysis. The main work includes:

A low-pressure gas discharge experimental apparatus was constructed, in which the ultimate vacuum was up to 10^{-5} Pa. The appropriate power supply, gas inlet and outlet path, pressure measurement, electrical diagnosis and gas-discharge imaging system were established. Geometrically similar gas gaps in different configurations were designed, as well as the insulation tube. A type of ring electrode was designed for current density measurement.

In experimental conditions of different air-gap lengths d , electrode radius r and discharge-tube radius R , the "segregation" phenomenon of Paschen's curves was studied, by changing the field distribution parameter d/r and the transverse diffusion parameter d/R , respectively. It was proposed that the difference in electric field distribution is the primary reason incurring separation of Paschen's curves in the two gaps. The "intersection" phenomenon of Paschen's curves at low pressure was investigated. Both the experimental results and numerical simulation indicate that, in different gaps whose length is the same but electrode radius is significantly different, the Paschen's curves would cross over at low pressure. Occurrence of this phenomenon can be explained by the Townsend's breakdown criterion and the divergence of electron impact-

ionization coefficient $\alpha = f(E/p)$.

Glow discharge in gaps of three different configurations (parallel plane, rod-plane and rod-tube) was studied adopting a two-dimensional fluid model. In each configuration, the ratios between physical quantities (electric potential, electric field, electron density, ion density, etc.) of two geometrically similar gaps were compared. The results showed that the glow discharges in the two gaps are similar, as long as the scale-down factor is relatively small and the reduced length relation meets the condition $p_1 d_1 = p_2 d_2$.

Two different physical models of glow discharge were established. The forbidden processes, i. e. stepwise ionization, inelastic collision of second kind (except Penning ionization), were included in one model, whereas excluded in the other. The influence of forbidden processes on similarity law of glow discharge was discussed, by comparing simulation results in gaps with different scale-down factors.

Experimental research on similarity of glow discharge was carried out in geometrically similar gaps of different configurations (parallel plane, rod-plane). In the parallel plane gap, the effect of scale-down factor and gas pressure on the voltage-ampere (VA) characteristic was analyzed, and the pressure range where the same VA characteristic holds in geometrically similar gaps was confirmed. The current densities of normal and abnormal glow discharge were measured by using the dedicatedly designed ring electrodes, and the current densities of glow discharge in geometrically similar gaps were compared. For the rod-plane gap, the similarity of glow discharge in different polarities was investigated, and the influence of insulation shielding (on upper rod electrode) on similar discharge was surveyed. As for the parallel-plane gap, by measuring the cathode fall thickness of low-pressure abnormal glow discharge under different experimental conditions, the influence of transverse diffusion of charged particles on the similarity relation $pd_c = f(J/p^2)$ was inspected.

Key words: Similar discharge; Similarity law; Geometrically similar gaps; Paschen's curve; Glow discharge

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 气体放电的相似性	1
1.1.1 气体放电相似性简介	1
1.1.2 相似放电必要条件的物理含义	2
1.1.3 相似放电允许的物理过程	3
1.2 气体放电相似性的早期研究历史	5
1.2.1 气体放电相似性理论体系的建立	5
1.2.2 放电相似性适用范围的扩展	6
1.3 气体放电相似性的近期研究状况	8
1.4 气体放电相似性的最新研究进展	15
1.4.1 超大尺度放电的研究	16
1.4.2 超小尺度放电的研究	19
1.4.3 帕邢曲线相关问题的研究	21
1.5 气体放电相似性研究存在的问题	23
1.5.1 辉光放电相似性的相关问题	23
1.5.2 帕邢曲线的相关问题	24
1.6 本论文的主要工作和意义	25
1.6.1 本论文的研究背景和意义	25
1.6.2 本论文的主要工作	26
第 2 章 实验装置与数值仿真方法	29
2.1 放电实验装置	29
2.1.1 放电室	29
2.1.2 放电电极的设计	29
2.1.3 气压监测系统	32

2.1.4	充气与流量控制	34
2.2	实验的测量与诊断	35
2.2.1	电源与电测量系统	35
2.2.2	击穿电压的测量	35
2.2.3	电流密度的测量	36
2.2.4	放电的图像诊断	37
2.3	气体放电的数值仿真方法	38
2.3.1	气体放电的流体模型	38
2.3.2	放电模型的结构	40
2.3.3	低气压放电的反应过程	41
2.3.4	边界条件的设定	42
2.3.5	求解方法	44
2.3.6	模型有效性的验证	45
2.4	本章小结	46
第3章	帕邢曲线不重合现象的研究	49
3.1	帕邢曲线分离现象的实验研究	49
3.1.1	径向扩散对帕邢曲线分离的影响	50
3.1.2	电场分布对帕邢曲线分离的影响	52
3.2	帕邢曲线分离现象的理论分析	56
3.3	帕邢曲线交叉现象的研究	60
3.3.1	帕邢曲线交叉现象的实验结果	60
3.3.2	帕邢曲线交叉现象的数值模拟	61
3.4	本章小结	63
第4章	辉光放电相似性的数值仿真研究	65
4.1	平行平板气隙辉光放电相似性的研究	65
4.1.1	平行平板气隙放电的数值仿真模型	65
4.1.2	伏安特性曲线的比较	66
4.1.3	气隙内部参量相似性的检验	67
4.2	不允许过程对放电相似性的影响	72
4.2.1	不允许过程导致相似放电的偏离	73