

清华大学优秀博士学位论文丛书



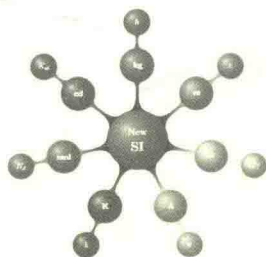
Tsinghua
theses

质量量子基准新方案

——测量惯性质量的摆动周期法研究

李世松 著 · Li Shisong

Absolute Determination of Inertial Mass
by Quasi-elastic Electrostatic Oscillation Method



清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

质量量子基准新方案

——测量惯性质量的摆动周期法研究

李世松 著 Li Shisong

Absolute Determination of Inertial Mass
by Quasi-elastic Electrostatic Oscillation Method

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书介绍了一种质量量子基准新方案及其试验论证过程。通过设计一种摆动天平装置,以时间测量为纽带,建立惯性质量和普朗克常数间的联系,实现对砝码质量的绝对测量。本书基本反映了作者近年来在质量量子基准研究方面的研究成果,并提供了详尽的参考资料。

本书可作为电磁测量专业研究生的参考用书,亦可作为计量领域研究人员的参考用书。

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

质量量子基准新方案:测量惯性质量的摆动周期法研究/李世松著. —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 978-7-302-49418-8

I. ①质… II. ①李… III. ①量子—计量—研究 IV. ①TB939

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 012171 号

责任编辑:刘嘉一 薛 慧

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:宋 林

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:8.75

字 数:152 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:69.00 元

产品编号:071507-01

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。

在博士生指导教师资格确认方面,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,要让更多、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验和调研,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

国际单位制即 SI，共有 7 个基本单位。质量的单位千克，是 SI 的一个基本单位，被定义为国际千克原器的质量。截至目前，千克是最后一个仍以实物作为基准的基本 SI 单位。使用实物作为基准存在的最大问题，是其量值由于受保存环境，例如海拔、湿度、温度、地磁场、空气中某些物质气体成分等的影响，发生未知的漂移。从 1889 年至 2014 年国际计量局共进行了 4 次千克量值的比对实验，测量数据显示，国际千克原器与其他 6 个副基准的质量偏差已经超过 $50\mu\text{g}$ 。千克量值的变化，直接影响 SI 单位制的准确性。因此，为质量的单位千克寻找一个更准确且易于保存、复现的新定义，已成为国际计量界最重要的任务之一。

人类为克服实物基准随时间发生漂移的致命缺陷，探索依托近些年量子物理研究取得的成就，改用量子基准取代经典的实物基准。在全世界计量领域科学家的共同努力下，国际计量领域已达成普遍共识，即采用基本物理常数来定义基本 SI 单位。届时，国际单位制 SI 将会发生重大变革，其基本内容包括：①仍采用现行 SI 单位制的 7 个基本单位；②采用玻尔兹曼常数 k 、电子电荷量 e 、阿伏伽德罗常数 N_A 和普朗克常数 h 分别重新定义基本单位开尔文、安培、摩尔和千克；③基本单位坎德拉、米、秒已经采用基本物理常数定义，原定义只需稍做修改；④保持重新定义的基本单位量值不变。

由于各个基本物理常数之间存在相关性，例如电子电荷量 e 和阿伏伽德罗常数 N_A 的 99.9% 的不确定度，均源于普朗克常数 h 的不确定度分量，关于对 h 的精确测量，是实现基于基本物理常数的新 SI 单位制不可或缺的重要环节。然而，精密测量普朗克常数暨质量量子基准的研究

工作十分艰难,2012年,该项研究被 *Nature* 杂志评为世界第六大科学难题。

目前,国际计量局已经基本通过了关于采用普朗克常数 h 重新定义千克的草案,并提出,实现质量的量子基准,必须至少有三种基于不同原理实现的技术方案的独立试验结果,且以它们测量得到的普朗克常数的不确定度要小于 5×10^{-8} 。而截至2012年,世界多国计量科学家长期探索并开展的质量量子基准研究的技术方法有很多种,但其原理本质上仅属于两种技术方案,即所谓“功率天平”方案和“硅球”方案,并且它们均属于对引力质量的测量。

李世松攻读博士学位期间,创新性地提出了一种完全不同于“功率天平”和“硅球”的技术方案——基于惯性质量测量的质量量子基准研究新方案,其在技术实现方法上,又称摆动周期法。摆动周期法作为一种技术方案,为质量量子基准研究提供了第三种完全独立的技术路线。与此同时,摆动周期法从基本原理上是基于对宏观惯性质量测量,因而具有更为丰富的物理内涵。摆动周期法一经提出,立即就引起了国际同行的密切关注。

李世松在他的博士学位论文中提出了摆动周期法的研究方案,并具体给出了可以证明该方案具有科学合理性的理论框架。具体地,在他的研究中,采用一种等臂式摆动天平实现了砝码质量与其积分量(质心、转动惯量)的解耦,克服了以传统摆动法测量惯性质量时质心难以测准的缺陷;构建了表征摆动天平系统运动特性的微分方程,并通过测量不同砝码和电容两极板间施加不同电压下的摆动周期,建立了电学量与绝对量之间的联系,导出了砝码惯性质量量值和普朗克常数值之间的联系;利用双 Kelvin 电容器系统产生反弹性静电力,从而可将对电磁力的表征由三维转化为一维,明显简化了天平系统的准直问题;构建了双 Kelvin 电容器系统的准弹性模型,降低了电容器两极板之间的工作电压,从而明显改善电压源中电阻分压器的负载效应和电压效应;还推导出了摆动天平系统的相平面运动方程,分析了其非线性,并得到了摆动周期的一般解。

李世松还研制、搭建了一套实现摆动周期法的试验性测量装置。具体地,设计并优化了位移传感器、速度传感器和执行器,实现了一种线性速

度反馈系统,用以控制摆动天平系统的能量;提出了一种新的 Kelvin 电容器产生静电力的工作方式,避免了传统工作方式下中心电极与保护电极同步运动的困难;通过拟合电容与竖直距离的相关特性,有效提高了电容测量的稳定性;研制了可输出 1.6kV 直流电压的精密电压源;设计出了基于 PLC 控制的砝码自动同步加减装置,并实现了摆动天平系统的计算机控制和自动化测量。最终,在所搭建的摆动周期法试验性测量装置上,对普朗克常数值实施了试验测量,并在 10^{-4} 量级上验证了以该方法实现质量单位千克的量子基准的可行性。

以摆动周期法实现质量量子基准的研究方案已得到国际同行的关注,与之相关研究成果也以论文形式发表在 *Metrologia*、*IEEE Trans. Instrum. Meas.* 等国际计量领域的知名期刊上。但李世松很清楚,自己在博士学位论文工作阶段,只是提出了一种完全不同于已有的“功率天平”和“硅球”的技术方案,而要使得以该技术方案构建的试验装置测量普朗克常数的不确定度达到 10^{-8} 的水平,还有许多研究工作要做。为此,李世松毕业后,立即着手开始了博士后研究工作,继续推动该课题研究的不断深入,已经与其他博士生提出一种用环形电容器产生正弹性静电力的方案,有望大幅降低摆动周期法的低频噪声,提高测量的准确性;另外,他还与其他博士生对天平横梁形变引起的系统重心和转动惯量变化进行了深入的研究,发现了这些因素之间存在的物理联系,并根据校准结果,对摆动周期法进行相应补偿,以降低试验装置测量普朗克常数的不确定度。

完全有理由期待和相信,沿着李世松提出的摆动周期法的技术路线持续不断地深入研究下去,精雕细刻地研制、改进相应试验装置的每一个功能单元及其具体细节,由这一独立技术方案实现的普朗克常数的测量不确定度指标将会越来越好,我国在该领域的话语权和国际影响力将会不断提升。

赵 伟

清华大学电机工程与应用电子技术系

2016 年 8 月

摘要

实现质量量子基准是建立以基本物理常数为定义的新 SI 体系中最重要也是最困难的一环,是当今国际计量领域研究的热点和难点之一。根据国际计量委员会的要求,实现质量量子基准必须至少要有三种独立方案测量普朗克常数的不确定度小于 5×10^{-8} 。而目前,世界上正在进行的质量量子基准研究方案仅有两种:功率天平方案和硅球方案,且两者测量的均为引力质量。本论文提出了一种基于惯性质量测量的“摆动周期法”质量量子基准研究方案,其原理不同于功率天平方案和硅球方案,可作为第三种实验方案精确测量普朗克常数。

建立了摆动周期法测量普朗克常数的基本理论框架。用一架等臂式摆动天平实现了砝码质量与其积分量(质心、转动惯量)的解耦,避免了传统摆动法测量惯性质量时质心难以测准的缺陷。推导了摆动天平系统的微分方程,通过测量不同砝码和不同电容极板电压下的摆动周期,建立了电学量与绝对量之间的联系,导出了砝码惯性质量量值和普朗克常数值。利用双 Kelvin 电容器系统产生反弹性静电力,将电磁力由三维转化为一维,简化了系统准直问题。建立了双 Kelvin 电容器系统的准弹性模型,降低了电容器极板工作电压,明显降低了电压源中电阻分压器的温度系数和电压系数。推导了摆动天平系统的相平面运动方程,分析了其非线性,并得到了摆动周期的一般解。

研制了一套摆动周期法试验装置。设计并优化了位移传感器、速度传感器和执行器,实现了一种线性速度反馈系统,用以控制摆动天平系统的能量。提出了一种新的 Kelvin 电容器产生静电力的工作方式,避免了传统工作方式下中心电极和保护电极同步运动的困难。通过拟合电容与竖直距离的相关特征,有效提高了电容测量的稳定性。研制了一台

可输出 1.6kV 直流电压的精密电压源, 其输出在空气中 8h 的稳定性优于 1×10^{-6} 。设计了基于 PLC 控制的砝码自动同步加减装置, 并实现了摆动天平系统的计算机控制和自动化测量。试验测得的普朗克常数值为 $h = 6.62493 \times 10^{-34} \text{Js}$, 相对不确定度为 3.6×10^{-4} , 测量结果验证了本论文所建立的摆动周期法基本理论, 证实了摆动周期法的可行性。

关键词: 惯性质量; 普朗克常数; Kelvin 电容器; 非线性分析; 静电力

Abstract

Establishment for the quantum mass standard is one of the most important procedures in realizing the new international system of units (SI) based on fixing the numerical number of fundamental physical constants, which is also a hot and difficult issue in modern metrology. Based on the CCM requirements for redefining the kilogram, three conditions that at least three independent experiments with the relative uncertainty of 5×10^{-8} should be achieved. Two well-known experiments, the watt balance and the Avogadro project, are being perused worldwide, both of which are based on gravitational mass measurement. In this thesis, a quasi-elastic electrostatic oscillation method is proposed for inertial mass measurement. In a traceability to basic physical constant, the proposed method is independent to either the watt balance or the Avogadro project, and can be employed as a third approach for realizing the kilogram.

An approach for realizing the quantum mass standard, the quasi-elastic electrostatic oscillation method, is proposed for absolute inertial mass measurement. In the design, the test mass is decoupled from its integral quantities (e.g., mass center, moment of inertia) by using the sharp-edged knives of the balance, which avoids the difficulty in measuring the mass center in the conversional pendulum method. The 1990 electrical unit is related to SI unit with derivation of the inertial mass and the Planck constant by measuring oscillation periods of the quasi-elastic electrostatic oscillator with different test masses and applying different dc voltages. A twin-Kelvin-capacitor system is applied for gener-

ating the elastic electrostatic force and the alignment of the electrostatic force is much easier compared to a coil system, because the dimension of the capacitor system is typical one rather than three of the coil system. The quasi-elasticity of the twin-Kelvin-capacitor system is modeled. It is found that the required dc voltage applied on the Kelvin capacitor is only several kilovolt, and in this case, the TCR and VCR of the resistance voltage divider are reduced obviously. The moving equation of the beam-balance oscillator in the phase plane is deviated. By analyzing its nonlinearity, the periodic solution of the quasi-elastic electrostatic oscillation system is obtained.

The primary experimental apparatus is built for testing the principle of the proposal. The displacement sensor, the velocity sensor and the actuator are designed, and a linear velocity feedback system is presented to control the energy of the oscillator. A new electrostatic force realization of the Kelvin capacitor is proposed, which avoids the difficulty in synchronously moving the central and guard-ring electrodes of a conventional voltage balance. By a functional fitting of the Kelvin capacitance and the vertical coordinate, the stability for the capacitance measurement is greatly improved. A high precision dc voltage source with output voltage up to 1.6kV is designed, and the measurement result shows that its output voltage in air has a stability better than 1×10^{-6} in 8 hours. The test masses are synchronously added or removed by a PLC control system, and the whole apparatus is automatically operated by relays based on a computer. The measured value of the Planck constant is $h = 6.62493 \times 10^{-34}$ Js with a relative uncertainty of 3.6×10^{-4} . The measurement results verify basic theories of the quasi-elastic electrostatic oscillation system, which also shows the feasibility of the proposal in this thesis.

Key words: inertial mass, the Planck constant, Kelvin capacitor, non-linear analysis, electrostatic force

缩略语对照表

[AB]	电流天平
[BIPM]	国际计量局
[CCM]	质量及相关量咨询委员会
[CIPM]	国际计量委员会
[CODATA]	国际科学数据委员会
[CSIRO]	澳大利亚科学与工业研究组织
[GPS]	全球定位系统
[INRIM]	意大利国家计量院
[IPK]	国际千克原器
[IRMM]	比利时标准材料测量研究所
[JB]	能量天平
[KRISS]	韩国标准和科学研究院
[LNE]	法国国家计量研究院
[METAS]	瑞士计量认证研究所
[MSL]	新西兰国家计量院
[NIM]	中国计量科学研究院
[NIST]	美国国家标准与技术研究院
[NMIA]	澳大利亚国家测量研究院
[NMIJ/AIST]	日本国家计量院
[NPL]	英国国家物理研究所
[NRC]	加拿大国家研究委员会
[PTB]	联邦德国物理技术研究所