

物理实验系列教材

物理实验教程

——近代物理实验

主编 黄柳宾 王 军

中国石油大学出版社

物理实验系列教材

物理实验教程

——近代物理实验

黄柳宾 王 军

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程—近代物理实验/黄柳宾 王军主编.
—东营:中国石油大学出版社,2006.1

ISBN 7-5636-2151-2

I. 物... II. 黄... III. 物理学-实验-教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 000932 号

书 名: 物理实验教程—近代物理实验
主 编: 黄柳宾 王军

责任编辑: 周洁韶

封面设计: 傅荣治

出版者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://cbs.hdpu.edu.cn>

电子信箱: sanbians@mail.hdpu.edu.cn

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546-8392563)

开 本: 170×225 印张:15.875 字数:267千字

版 次: 2006年1月第1版第1次印刷

册 数: 1—1 000

定 价: 24.00元

内 容 提 要

本书是根据《综合大学物理学专业(四年制)近代物理实验教学基本要求》(1989)的规定,通过总结多年的实验教学经验,在历届近代物理实验讲义的基础上,同时参考了部分其他院校的相关教材编写而成的,它突破了传统实验教材的编写模式,建立了以现代实验技术为线索的新体系,不仅包括在物理学发展过程中发挥过巨大作用的经典近代物理实验项目,而且也适当吸收了部分前沿的实验物理科技成果,从而缩短了教学与科研、教科书与现代科学技术之间的距离,有利于学生科学实践能力的培养。

全书共分9章,含有25个实验项目,可供高等院校理科各专业学生作近代物理实验课程的教材,也可用作实验技术人员及相关教师的参考书。

前 言

Foreword

对于高等院校的物理类专业学生,近代物理实验是一门必修的实验课程,目的是通过严格的实验训练,丰富和活跃学生的物理思想,培养学生对物理现象的观察能力和分析能力,逐步掌握近代物理实验方法、检测技术,牢固树立严谨、求实的科学作风,最终使学生获得一定的用实验方法和技术来研究物理现象和规律的独立工作能力,为学生掌握、应用和发展新技术打好坚实的基础。

但是,由于不同院校有着自身的特点和条件,所开设的近代物理实验项目存在很大差异,因此,并没有一本适合的统一的教材。另外,自 20 世纪中叶后,随着物理学的飞速发展,各种新技术不断投入应用并成熟,从而极大地改变了近代物理实验教学的面貌,原有的教材体系已经不再适合于拓展学生知识层面的需要。正是在这种条件下,我们依据《综合大学物理学专业(四年制)近代物理实验教学基本要求》(1989)的规定,通过总结多年的实验教学经验,在历届近代物理实验讲义的基础上尝试编写了这本教材。

全书共分九章,含有 25 个实验项目,其中经典的近代物理实验项目仍然占有较大的比重,如氢原子光谱实验、夫兰克-赫兹实验、光电效应实验等。尽管这些实验已被重复过成千上万次,在内容上也显得较为落后,但其所包含的深邃的物理思想和实验方法,在任何时候都是我们所需要的,正如一位音乐家要不断地练习贝多芬的小夜曲一样,一个真正的物理学家正是从重复这些人所共知的实验开始训练出来的。历史事实证明,一个新的物理现象的发现,往往需要物理学家从成千上万个几乎相同的物理现象中,发现具有新鲜的、差别微小然而也可能是本质不同的性质,而这种对物理现象的洞察能力是物理学家取得成功的极其可贵的素质。

考虑到现代物理实验技术对丰富和活跃学生的物理思想,缩短教学与科研、教科书与现代科学技术之间的距离,以及培养学生科学实践能力等方面的巨大作用,在教材的编写过程中,我们结合石油工业的特点,精心选择了部分新的实验项目,如吸收光谱实验、低温超导实验等,另外,有些实验项目,尽管在形式上还属于经典近代物理实验的范畴,但在实现方法、检测手段上却充分体现着现代物理实验技术的特点。例如氢原子光谱实验,虽然仍是研究可见光区域的氢光谱,但在分光设备上却由原来的小型棱镜转变为现在的精密光栅,在检测手段上则由摄谱分析转变为光电探测,并用计算机显示与处理,从而使检测准确度和检测速度等都有了质的飞跃,而这些方法和手段正是现代工业生产中所广泛使用的。毫无疑问,通过这样的实验训练,更有助于学生将来的发展。基于这些特点,在新书的编写中,改变了原来的教材体系,建立了以现代物理实验技术为主线的新脉络,具体到每个章节,都以适量的篇幅对相关内容作了概括性的论述,希望读者能从中得到收益。

和普通物理实验相比,近代物理实验是一门涉及知识面广、综合性和技术性更强的实验课程,因此在阅读本书和从事实验时必须注意适当的学习方法,其中最重要的一点是要以自学为主,充分发挥自己的主观能动性。

对于每一个具体的近代物理实验项目,都是一个综合性的选题,可能涉及到力、热、光、电等各个层面的知识,有时甚至会超越学生现有的知识水平,而在教材中又不可能对涉及的所有内容都进行详细论述,这就要求实验前一定要通过查阅文献,认真阅读有关资料,努力做好理论的各种准备,弄明白命题的目标,实验的物理思想,实现的方法,所用的公式,需要什么仪器及其精确度,以及关键的实验步骤等。总之,一个有科学头脑的、善于且勤于学习的学生,应将大部分时间花在实验前的准备上。最初,许多学生对这样做很不习惯并感到费力,但经过自己一段努力,是会有所收获的。

近代物理实验中,随着新技术的广泛应用,自动化程度越来越高,在具体操作时会感到比较“简单”,读取数据的时间和数据量也不需要很多,所以,有许多学生在从事实验时思想比较懈怠,而这是十分危险的。首先,大多数近代物理实验探索的是物质的微观结构,遵循的是量子理论等,所产生的现象会在很大程度上偏离我们常规的设想,如果只对这些现象做简单的记录,而不进行细致的分析和思考,就会失去许多重要的信息。其次,自动化程度较高的成套设备,虽然在很大程度上降低了工作强度,提高了实验速度和测量准确度,但也在一定程度上隐藏了各个环节之间的联系,使得实验方法和手段不是那么

直观,假如实验中只是满足于教材介绍的现有装备,机械地照搬照做,而不对每一步调节去问一个为什么,最终也就不会有所收获。希望学生们一定要记住,用成套的仪器测量所需要的全部实验结果的机会在现实生活中是很少的,一个新的物理现象的发现往往没有现成的成套仪器可以利用。通过实验课要锻炼自己设计实验和选用仪器的能力是十分重要的,这也是我们编写这部教材始终遵循的一个原则。

很多学生会有这样的体会,在进行普通物理实验时,教材或教师对每个实验项目都有特定的要求,学生只要按照这些要求去做,掌握了相应的知识,编写了合格的报告,就可以获得较高的成绩。这种方法对培养学生基本实验技能是十分有效的,但如果用这种特定的思维习惯去从事近代物理实验,则是十分有害的。在近代物理实验中,更强调学生对实验技能的综合运用能力,以及一定的创新能力。尽管在编写教材时,对每个实验项目都给出了具体的方法,但并不意味着这些方法是一成不变的,实验中,我们鼓励学生开动脑筋,提出自己的实验方案。在有的实验项目中,我们也预留了一定的空间,例如核磁共振实验,学生可以自己制作样品进行测试,从而帮助学生提高实际的工作能力。我们也特别希望学生能够对某个实验,或是实验中的某个具体环节,提出自己独到的见解。

最后需要说明的是,一部教材,尤其是实验教材的编写,不是一两个人就可以完成的,它是一项集体事业,凝结着许多实验工作者共同的心血,也包含着多方面的关怀和支持,另外,本书在编写过程中还借鉴了部分兄弟院校的实验教材或讲义,借此机会,对所有为之工作过的同志和兄弟院校表示衷心的感谢。由于编者的水平有限,书中难免会存在一些疏漏,希望广大读者能够给予批评和指正。

编 者

2005年7月

目 录

Contents

第一章 经典近代物理实验	1
实验 1-1 光电效应法测朗克常数	2
实验 1-2 电子电荷的测量	7
实验 1-3 迈克尔逊干涉实验	15
实验 1-4 逸出功的测定	24
实验 1-5 夫兰克-赫兹实验	30
实验 1-6 电子衍射实验	37
第二章 微波技术	51
实验 2-1 微波光学实验	61
第三章 光谱分析技术	69
实验 3-1 氢原子光谱与里德伯常数的测定	71
实验 3-2 光谱法测量透明介质的吸收曲线	82
实验 3-3 塞曼效应实验	90
第四章 声光技术	99
实验 4-1 超声光栅与透明液体中声速的测量	101
实验 4-2 光“拍”的传播与光速的测量	109
第五章 真空与低温物理技术	114
实验 5-1 真空的获得与测量	120
实验 5-2 超导特性研究	133
第六章 激光、全息与光学信息处理技术	144
实验 6-1 脉冲固体激光器输出特性研究	146
实验 6-2 全息照相技术	158

实验 6-3 阿贝成像与空间滤波实验	165
第七章 磁共振技术	171
实验 7-1 核磁共振实验	179
实验 7-2 电子自旋共振实验	190
第八章 磁电阻效应	201
实验 8-1 InSb 磁电阻特性研究	202
第九章 核技术	208
实验 9-1 用 NaI(Tl)单晶 γ 闪烁能谱仪测 γ 能谱	210
实验 9-2 核衰变的统计规律	218
实验 9-3 γ 射线的吸收与物质吸收系数的测定	224
实验 9-4 β 射线的吸收	229
实验 9-5 测量快速电子的动能与动量关系	236
附录 1 物理学常量表	241
附录 2 中华人民共和国法定计量单位	243

第一章 经典近代物理实验

近代物理学是 19 世纪末 20 世纪初以来,为了解释用经典物理不能做出令人满意解释的许多现象而提出的物理理论。相对论和量子论是近代物理学的两大理论支柱,而近代物理的所有重大发现都是在一系列实验中完成的。近代物理实验就是在近代物理发展过程中起过“关键性”作用的一些实验以及与新理论、新技术有关的一些实验。

近代物理学兴起时期,物理学家层出不穷,他们既具备很深的经典物理学基础知识,又不循规蹈矩;既有严谨的科学态度,又富于探索创新的精神。他们完成的诸多著名的实验至今仍具有深远的影响,他们建立的理论已得到广泛应用。

回顾物理学发展史,近代物理实验有如下特点:

- ① 著名的近代物理实验首先完成者,多数都荣获了诺贝尔物理学奖。
- ② 近代物理实验的完成,不仅需要成熟的经典物理实验方法和技术,而且需要不断创新实验方法、实验技术和实验仪器。
- ③ 近代物理实验的设计思想普遍新颖,求异思维起重要作用。
- ④ 完成近代物理实验必须具备细致熟练的实验技能、敏锐的观察能力,以捕捉微小、瞬时、内在的物理现象和规律。

本章选取了近代物理实验中的几个实验:光电效应法测普朗克常数、密立根油滴实验、夫兰克-赫兹实验、迈克尔逊干涉实验、逸出功的测定、电子衍射实验等,均是在近代物理学发展中起过“关键性”作用的实验,是很著名的经典近代物理实验。通过这些实验,我们不仅要学习其中的基本实验方法和技能,而且要从辩证唯物主义的认识论和方法论的角度去分析实验的设计思想,从而提高我们发现问题和解决问题的能力。

实验 1-1 · 光电效应法测普朗克常数

量子理论是近代物理的基础之一,而光电效应则给予量子理论以直观、鲜明、清晰的物理图像。随着科学技术的发展,光电效应已被广泛用于国民经济及国防建设的各个领域之中。

1887年赫兹(G. Hertz)在验证电磁波的存在时意外发现:当一束光照射到金属表面后,会有电子从金属表面即刻逸出,此即为光电效应。1888年以后,斯托列托夫、哈尔瓦克斯、勒纳德等人对光电效应做了长时间的研究,并总结出了光电效应的基本规律,但这些规律难以被当时人们所熟知的光的电磁波理论解释。1905年,爱因斯坦(A. Einstein)推广了普朗克的量子假说,提出“光子”概念,建立了光电效应方程,给出了光电效应现象的圆满解释,从而标志着物理学发展史又进入了一个新的阶段,即由经典理论发展到了近代量子理论。美国科学家密立根经过10年的努力,终于用实验验证了爱因斯坦光电方程,并且第一次直接从光电效应测定了普朗克常数。在本次实验中,我们可以了解到密立根实验所依据的物理思想和基本方法,从中得到应有的教益。

【实验目的】

- ① 了解验证爱因斯坦光电方程的基本实验方法。
- ② 通过测试光电效应基本特性曲线,使学生进一步认识和理解光的量子性。
- ③ 通过对5种不同频率的反向遏止电压的测定,由 $U_s-\nu$ 直线图形,求出截止频率,计算出普朗克常数。

【实验原理】

一定频率的光照射在金属表面后,会有电子从金属表面逸出的现象称为光电效应,从金属表面逸出的电子称为光电子。

图 1-1-1 是研究光电效应实验规律和测量普朗克常数的实验原理图。抽成真空的光电管中,A 为阳极,K 为阴极,光频率为 ν 的光照射到由金属材料做成的阴极 K 上就有光电子逸出金属表面,若在 A、K 间加上电压,就形成光电流 I 。若在阴极 K 和阳极 A 之间加有正向电压 V_{AK} ,则电极 K、A 之间建立

起的电场对光电阴极逸出的光电子起到加速作用。随着正向电压 V_{AK} 的增加,到达阳极的光电子(光电流)将增多(大),当正向电压 V_{AK} 增加到 V_m 之后,光电流不再增大或增大很小时,形成饱和状态,对应的光电流即为饱和光电流;若在阴极 K 和阳极 A 之间加有反向电压 V_{AK} ,则电极 K、A 之间建立起的电场对光电阴极逸出的光电子起减速作用,随着电压 V_{AK} 的增加,到达阳极的光电子(光电流)将减少(小),当 $V_{AK} = U_s$ 时,光电流为零。此时的电压称为遏止电压。光电流 I 和所加电压之间的关系曲线如图 1-1-2 所示。

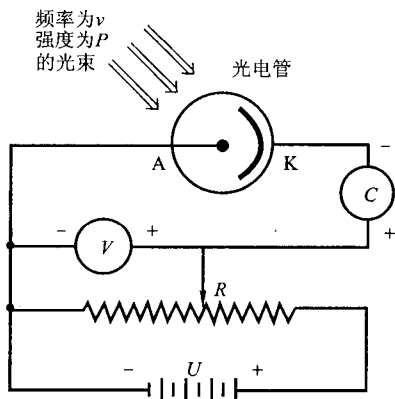


图 1-1-1 实验原理图

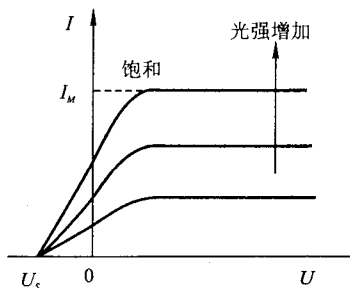


图 1-1-2 光电管的伏安特性的曲线

光电效应具有如下规律:① 在一定频率的单色光照射下,饱和光电流与光强成正比;② 光电效应存在一个阈频率(或称截止频率),当入射光的频率低于某一阈值(截止频率)时,不论光的强度如何,都没有光电子产生,如图 1-1-3 所示;③ 光电子的初动能与光强无关,但与入射光的频率成正比;④ 光电效应是瞬时效应,一经光线照射,立刻产生光电子。

根据普朗克的量子假说,爱因斯坦认为从某点发出的频率为 ν 的光,是以 $h\nu$ 为能量单位(即光子)的形式一份份地向外辐射,而不是按麦克斯韦电磁学说指出的那样以连续分布的形式把能量传播到空间。当频率为 ν 的光,以 $h\nu$ 为能量单位作用于金属中的一个自由电子时,自由电子可获得能量,并克服金属表面的逸出功 W_s 逸出,形成光电子,其初动能 $1/2mv^2$ 与 $h\nu$ 、 W_s 具有如下关系:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W_s \quad (1-1-1)$$

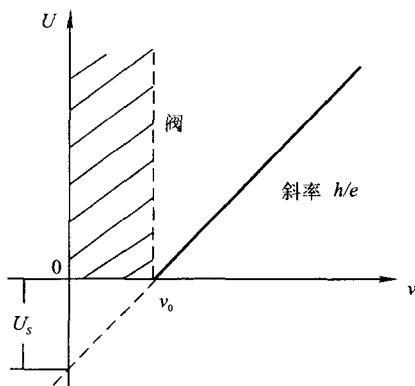


图 1-1-3 入射光的频率与电压的关系

这就是爱因斯坦光电效应方程。式中： h 为普朗克常数，公认值为 $6.62916 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ； m 为电子的质量； v 为光电子逸出金属表面的初速度； ν 为入射光的频率。

在(1-1-1)式中， $\frac{1}{2}mv^2$ 是没有受到空间电荷阻止，从金属中逸出的光电子的最大初动能。入射到金属表面的光频率越高，逸出来的光电子初动能也越大。正因为光电子具有最大初动能，所以即使阳极不加电压也会有光电子到达阳极而形成光电流，甚至阳极相对于阴极电位为负时也会有光电子到达阳极，直到阳极电位低于某一数值时，所有光电子都不能到达阳极，光电流为零。此时相对于阴极为负值的阳极电位 U_s 被称为光电效应的遏止电位。显然

$$eU_s - \frac{1}{2}mv^2 = 0 \quad (1-1-2)$$

将(1-1-2)式代入(1-1-1)式有

$$eU_s = h\nu - W_s \quad (1-1-3)$$

由于金属材料的逸出功 W_s 是金属的固有属性，对于给定的金属材料， W_s 为定值，它与入射光的频率无关，又由于只有当入射光的频率高于截止频率(记作 ν_0)时，才会有光电效应发生，所以

$$h\nu_0 = W_s$$

而(1-1-3)式可改写为

$$U_s = \frac{h\nu}{e} - \frac{W_s}{e} = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0) \quad (1-1-4)$$

(1-1-4)式表明,遏止电位 U_s 是入射光频率 ν 的线性函数。当入射光的频率 $\nu = \nu_0$ 时,遏止电位 U_s 为零,便没有光电子逸出。可见,只要用实验方法测出不同频率的入射光对应的遏止电位 U_s ,再作出直线 $U_s - \nu$,并求出该直线的斜率 k ,就可以求出普朗克常数 h 的数值,即

$$h = ek \quad (1-1-5)$$

其中 $e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$, 是电子的电荷量。

但是在测试中不可避免地存在反向电流,如图 1-1-4 所示。这是因为:① 在制造过程中,无法避免阴极材料溅射到阳极上,因而在光照射时,阳极也会发射光子,形成反向电流。② 由于自由电子热运动的存在,光电管在无光照情况下,有电压时也会产生电流,称为暗电流。由于它们的存在使阴极光电流实测曲线相对理论曲线下移,使 U_s 也下移到 U_s' 点,因此在此实验中测出 U_s' 点即测出了 U_s 。

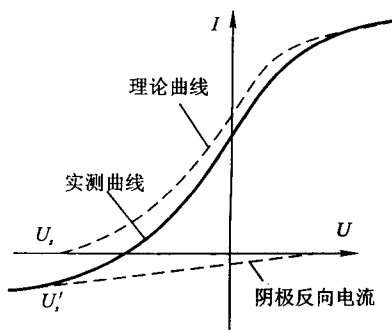


图 1-1-4 遏止电压的实测曲线和理论曲线的区别

【实验装置】

实验仪器包括 5 部分:① 光电效应微电流测试主机;② 光电管;③ 高压汞灯;④ 具有滤选 $3\ 650 \text{ \AA}$ 、 $4\ 047 \text{ \AA}$ 、 $4\ 358 \text{ \AA}$ 、 $5\ 461 \text{ \AA}$ 、 $5\ 770 \text{ \AA}$ 等谱线能力的滤色片;⑤ 减光率分别为 25%、50% 和 75% 中性减光片。

【实验内容】

1. 测试前准备

- ① 首先认真阅读实验桌上仪器使用方法和注意事项两部分内容。
- ② 放置好仪器。用光窗盖分别盖住光电管暗盒的光窗口和光源光窗口,接通光源的电源开关,并预热 $10 \sim 15 \text{ min}$ 。
- ③ 将微电流测试仪与光电管暗盒之间的导线连接好,调节光源光窗口使与光电管暗盒光窗口等高,间距合适为宜。

2. 测量光电管暗电流

- ① 将电流表量程开关拨至 $1 \mu\text{A}$, 电压量程拨至 -3 V 。

② 用“电压调节”旋钮慢慢由 -3 V 上升至 30 V , 观察并记录电流表的读数变化。

3. 测试步骤

① 将电压调至 -3 V : (“电压量程”为 3 V , “电压极性”为负), “电流量程”为 $1\text{ }\mu\text{A}$ 。

② 在暗盒光窗口装上 365 型滤色片, 用“电压调节”旋钮将电压由 -3 V 缓慢升高到 30 V , 在 -3 V 至 30 V 间每隔 1 V 记一个电流值, 但在电流变化剧烈区域应进行细测, 尽可能多记几个点(即找出抬头点), 记录数据。

③ 依次在暗盒光窗口分别装上 406、436、546、577 型滤色片, 重复步骤①和②, 测出其伏安特性。

④ 在暗盒光窗口装上 577 型滤色片, 在光源光窗口分别装上透过率为 25%、50% 和 75% 的中性减光片, 分别记录透光率为 100%、75%、50%、25% 和 0 时所对应的饱和电流值。

⑤ 选择大小合适的坐标纸, 分别作出光电管的伏安特性、光电特性和光谱特性曲线, 由光谱特性 $U_s - \nu$ 直线可求出截止频率 ν_0 和阴极逸出电位 U_s 。

⑥ 若能求出 $U_s - \nu$ 直线斜率 k , 根据 $h = ek$ 关系还能求出普朗克常数 h 。

【思考题】

1. 光电效应的实验规律有哪几个方面?
2. 如何精确测量遏止电压? 本实验使用什么方法测量? 说明测量过程。
3. 光电效应实验是如何验证爱因斯坦方程的?
4. 怎样设计实验步骤才能既快又准找到光电管伏安曲线上的遏止电压?

【参考资料】

- 1 A. M. 波蒂斯, H. B. 杨. 大学物理实验(伯克利物理实验). 北京: 科学出版社, 1982
- 2 复旦大学电光源实验室. 电光源原理. 上海: 上海科学技术出版社, 1979

实验 1-2 电子电荷的测量

——密立根油滴实验

由美国实验物理学家密立根(R. A. Millikan)首先设计并完成的密立根油滴实验,在近代物理学的发展史上具有重要作用,它证明了任何带电体所带的电荷都是某一最小电荷——基本电荷的整数倍;明确了电荷的不连续性;并精确地测定了基本电荷的数值,为从实验上测定其他一些基本物理量提供了可能性。

由于密立根油滴实验设计巧妙、原理清楚、设备简单、结果准确,所以它历来是一个著名而有启发性的物理实验。多少年来,在国内外许多院校的理工实验室里,为千千万万大学生(甚至中学生)重复着。通过学习密立根油滴实验的设计思想和实验技巧,可以提高学生的实验能力和素质。

【实验目的】

- ① 通过对带电油滴在重力场和静电场中运动的测量,证明电荷的不连续性,并测定电子的电荷值 e 。
- ② 通过实验时对仪器的调整、油滴的选择、耐心地跟踪和测量以及数据的处理等,培养学生严肃认真和一丝不苟的科学实验方法和态度。

【实验原理】

用油滴法测量电子的电荷,可以用静态(平衡)测量法或动态(非平衡)测量法。两种测量方法分述如下:

1. 静态(平衡)测量法

用喷雾器将油喷入两块相距为 d 的水平放置的平行板之间。油在喷射撕裂成油滴时,一般都是带电的。设油滴的质量为 m ,所带的电荷为 q ,两极板间的电压为 V ,则油滴在平行极板间将同时受到重力 mg 和静电力 qE 的作用。如图 1-2-1 所示。如果调节两极板间的电压 V ,可使该两力达到平衡,即:

$$mg = qE = q \frac{V}{d} \quad (1-2-1)$$

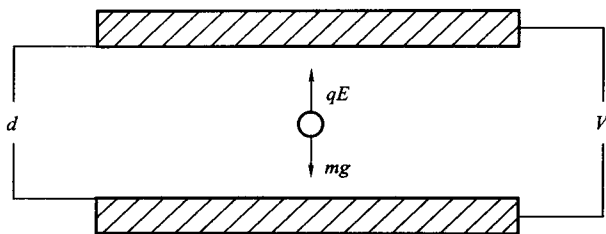


图 1-2-1 实验原理图

可见,为了测出油滴所带的电量 q ,除了需测定 V 和 d 外,还需要测量油滴的质量 m 。因 m 很小,需用如下特殊方法测定:平行极板不加电压时,油滴受重力作用而加速下降,由于空气阻力的作用,下降一段距离达到某一速度 v_g 后,阻力 f_r 与重力 mg 平衡,如图 1-2-2 所示(空气浮力忽略不计),油滴将匀速下降。根据斯托克斯定律,油滴匀速下降时满足:

$$f_r = 6\pi a\eta v_g = mg \quad (1-2-2)$$

式中 η ——空气的粘滞系数;

a ——油滴的半径(由于表面张力的原因,油滴总是呈小球状)。

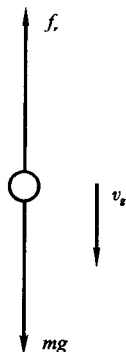


图 1-2-2 油滴受力图

设油的密度为 ρ ,而油滴的质量 m 可以表示为:

$$m = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho \quad (1-2-3)$$

由(1-2-2)式和(1-2-3)式得到油滴的半径,即:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2\rho g}} \quad (1-2-4)$$

对于半径小到 10^{-6} m 的小球,空气的粘滞系数 η 应做如下修正:

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{\rho a}}$$

这时斯托克斯定律应改为:

$$f_r = \frac{6\pi a\eta' v_g}{1 + \frac{b}{\rho a}}$$

式中 b 为修正常数, $b = 8.23 \times 10^{-3} (\text{m} \cdot \text{Pa})$, ρ 为大气压强,因此