

电荷测量技术的研究与应用进展

张欣 高文慧 杨波

(北京科技大学天津学院 天津 301830)

(收稿日期:2023-10-30)

摘要:对电荷测量技术的研究与应用进展进行了综述,首先,介绍了电荷测量技术的发展历程和基本原理,重点探讨了近年来在材料科学、电子工程、生物医学等领域中电荷测量技术的应用情况,并针对不同领域的特点,总结了相应的测量方法,最后,展望了电荷测量技术的发展趋势和未来可能的研究方向,旨在为相关研究人员提供帮助。

关键词:电荷测量技术;发展历程;应用

1 电荷测量技术的发展历程与现状

电荷测量技术是用于测量物体带电状态的一种技术手段,该技术的发展可追溯到古希腊时期,当时科学家们开始研究静电现象,然而,直到17世纪末期,法拉第首次提出了电荷量的概念,并通过实验验证了电荷守恒定律,随着科学的进展,电荷测量技术也逐渐完善。

19世纪初,奥斯特发现磁场对电流运动的影响,为电流测量提供了新的方法,随后,毕奥和法拉第等科学家提出了电磁感应定律,为电磁场的测量提供了理论基础,这使得电荷和电流的测量变得更加精确和可靠。

20世纪初,随着量子力学的发展,出现了一些精密仪器,如钻石电荷计和电容式电荷计,推动了电荷测量技术的进一步发展,目前常见的电荷测量方法包括静电力测量法、电场测量法、法拉第杯法、环境电离室法和电容测量法等,这些方法在电力系统中可以用来监测电力设备的电荷状态,确保系统的稳定运行,在电子设备制造中,电荷测量技术可以检测电路中的电荷分布和漏电情况,此外,电荷测量技术还应用于无线通信、半导体材料研究和生物医学等领域,总的来说,经过多年的研究发展,电荷测量技术已经取得了巨大的进步,并在各个领域得到广泛应用。

2 电荷测量技术

2.1 电荷的概念

电荷是物质的一种属性,确切地说,电荷是构成物体的主要基本粒子——质子和电子自身具有的自然属性,即质子带有一个基本正电荷 $+e$,电子带有一个基本负电荷 $-e$,当一个物体或微小粒子带电时,它被认为是带有电荷的,基本负电荷和基本正电荷的量值大小相等,以电子或质子所携带的电荷绝对值为基本电荷,用 e 表示,带电粒子之间的相互作用力被称为静电力,根据实验证明,带电粒子的电荷量与其自身的运动状态无关,也就是说,从任何参考系观察,带电粒子的电荷量都保持不变,这就是电荷的相对论不变性。

2.2 密立根油滴实验

油滴实验(Oil-drop experiment)是由罗伯特·密立根和哈维·福莱柴尔(Harvey Fletcher)于1909年进行的一项物理实验,实验装置如图1所示,该实验的目的是测量单个电子所带的电荷,实验原理是利用重力和电场力的平衡,使油滴悬浮在两个金属电极之间,通过给定的电场强度,可以计算出油滴中的电荷量,密立根通过对许多小滴的多次实验发现,这些小滴的电荷量都是相同数字的倍数,因此,认为这一数值就是单个电子的电荷 e ,其量值大小为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

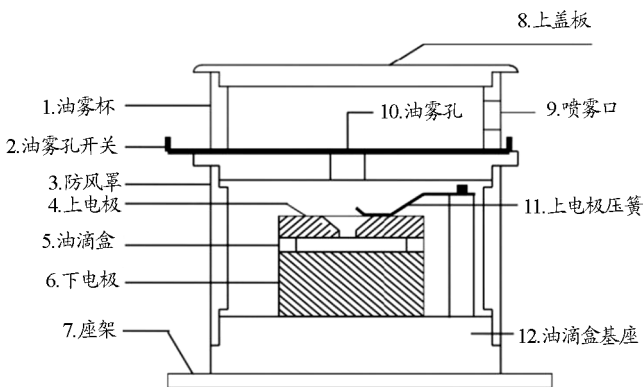


图1 密立根油滴实验装置示意图

2.3 静电荷测量

2.3.1 法拉第笼法

法拉第笼是一种用于测定带电物体上全部电荷的方法。由内外两个金属圆柱体组成，内部圆柱体上安装有平板电容器（具有高绝缘电阻），同时连接一个静电伏特计，而外部圆柱体则接地。在测试时，将带电物体放置在内圆柱体中，由于静电作用，内圆柱体的电势升高到 U_0 。如果内部和外部圆柱体之间的电容为 C （包括平板电容器和静电伏特计输入电容器），则带电物体上的电荷量为 CU_0 。通过调节平板电容器的电容，可以调节充电的范围。这样，利用法拉第笼的测量原理，可以确定带电物体的电荷量^[1]。

2.3.2 电容探针法

电容探针法是一种用于测量电介质中电容的方法。它基于电容的定义，即电容是指导体上存储电荷的能力。在电容探针法中，使用一个探头将电容器连接到测量仪器上，并通过测量探针和周围环境之间形成的电容来获取电容值。该方法的基本原理是，当一个导体或电介质被放置在电场中时，会产生一个电容效应。通过测量探针与待测介质之间的电容，可以得到介质的电容值。使用电容探针法时，一般会使用一个恒定的交流电压源来应用电场，然后测量产生的电容信号。测量仪器可以根据实验需要选择合适的频率范围和测量精度，以获得准确的电容值。

2.4 移动电荷测量

移动电荷测量主要运用电场传感器及电子束流探测进行测量，电场传感器是一种常用的探测器件，用来测量电场强度和方向，从而判断电荷的存在。常见的电场传感器包括平板电容传感器和电场探针

等。通过检测电场的变化，可以确定电荷的位置和运动轨迹。电子束流探测则是一种高精度的电荷检测方法，广泛应用于测量微小电荷或高速电荷的运动。该方法利用引导电子束流到待测物体，并测量束流在物体散射或偏转后的情况，以确定电荷的位置和运动速度。

3 电荷测量技术的应用

3.1 生物医学领域

3.1.1 生物细胞电荷测量

生物电现象是生物体在生理活动过程中所呈现的一种电现象，普遍存在于生物体内。其他细胞如腺细胞、巨噬细胞、纤毛细胞的电位变化对细胞功能的发挥具有关键作用。随着科技的不断进步，人们对生物电现象的认识取得了显著的发展。理论上，我们在单细胞电活动特征、神经传导功能、产电机理，尤其是细胞膜离子流动理论等方面取得了重大突破。在医学应用中，通过生物细胞电荷测量技术来判断器官的功能，检测细胞内电荷的变化，研究细胞的电位变化、膜传导率、离子通道活性等参数，可以了解细胞的功能及病理生理过程。这为深入了解肿瘤细胞的侵袭能力，以及神经元的电信号传递等提供了重要的科学依据。同时，通过检测细胞电荷变化，能够判断器官的功能，为某些疾病的诊断和治疗提供了新的途径。

3.1.2 生物大分子结构分析

电荷测量技术在生物大分子结构分析中扮演着重要的角色。这些技术可以用来研究生物大分子（如蛋白质、核酸）的电荷分布和电荷相互作用，从而揭示它们的结构和功能。一种常用的电荷测量技术称为“电子离子化质谱”（electron ionization mass spectrometry），它可以通过给生物大分子添加电子，将其转化为带有电荷的离子。这些离子可以通过质谱仪进行分析，从而得到与生物大分子相关的电荷信息。另一种重要的技术是“电荷传输质谱”（charge transfer mass spectrometry），它可以通过将荧光染料等电子给体与生物大分子中的靶分子进行电荷转移反应，测量出靶分子的电荷状态^[2]。这种技术可以用来研究生物大分子的结构、构象变

化以及与其他分子之间的相互作用.此外,电荷散射技术也常被应用于生物大分子的结构研究.通过测量生物大分子与电子束之间的散射过程,可以推断出它们的电荷分布和结构信息.总之,电荷测量技术在生物大分子结构分析中起着至关重要的作用,可以帮助科学家们揭示生物大分子的结构、功能以及与其他分子的相互作用.

3.2 材料科学领域

3.2.1 测量材料的导电性与泊松比

电荷测量技术在测量材料的导电性和泊松比方面有广泛的应用.以下是其中的一些主要应用领域.

(1) 导电性测量

电荷测量技术可以用来确定材料的导电性能.通过将电荷或电流施加到待测材料上,并测量相应的电场或电势差,可以计算出材料的电导率.这种测量可以帮助评估材料的导电性,在材料科学和电子工程中具有重要的应用.

(2) 泊松比测量

泊松比是一个描述材料在受到拉伸或压缩时长度变化与横向变化之间关系的参数.电荷测量技术可以用来测量材料在受力下的形变,包括纵向形变和横向形变.通过测量这些形变和应力,可以计算出材料的泊松比.

(3) 电导率和泊松比的关联

电荷测量技术可以用来研究材料的电导率和泊松比之间的关系.通过在不同条件下测量材料的电导率和泊松比,并比较它们的变化趋势,可以揭示材料的微观结构和性质之间的相互关系,对材料设计和工程应用具有指导意义.总之,电荷测量技术在测量材料的导电性和泊松比方面具有重要的应用价值,能够为材料科学与工程提供重要的实验手段和理论依据.

3.2.2 研究材料的静电相互作用

电荷测量技术在研究材料的静电相互作用方面有广泛的应用.静电相互作用是指由于材料之间的电荷分布不均匀而产生的力.以下是其中的一些主要应用领域:首先,电荷测量技术可以用来测量材料表面的电荷分布.通过测量电量密度的变化,可以揭示材料表面的静电势场分布.这种测量可以帮助研

究材料的表面电荷状态,以及电荷在材料表面上的分布和迁移行为.其次,电荷测量技术可以用来研究材料之间的静电相互作用.通过测量材料之间的电荷分布和电荷密度,可以了解材料在静电相互作用下的力学行为和结构变化.这对于理解材料的粘附、聚集、分散和相分离等现象具有重要意义^[3].最后,电荷测量技术可以用来测量材料之间的静电力.通过测量两个带有电荷的材料之间的力的大小和方向,可以了解材料之间的静电相互作用强度和性质.这对于研究材料的粘附性、摩擦性和静电势能等方面具有重要意义.

3.3 环境科学领域

3.3.1 大气电荷测量

电荷测量技术可以用于测量大气中的电荷分布、电场强度和电离参数等.常见的大气电荷测量设备包括电离室、电场传感器和电离电容式传感器等.通过这些设备,可以实时监测大气电荷的变化,并获得有关大气电荷情况的数据.这些数据可以用于研究大气中的闪电放电、电离层和电荷输送等现象,为天气预测和气候研究提供依据.

3.3.2 水体电荷测量

首先,电荷测量技术可以用于测量水体中的电荷密度、离子浓度和电导率等参数.常见的水体电荷测量设备包括离子选择电极、电导仪和电位差计等.利用这些设备,可以对水体中离子种类和浓度进行测量,并评估水质和水体环境的变化情况.其次,水体电荷测量在环境监测、水源管理和水污染治理等领域具有重要应用价值.通过对水体电荷的监测和分析,可以及时了解水质变化和水污染情况,从而采取相应的措施进行水体保护和环境治理.

4 电荷测量技术未来的发展方向

4.1 更高精度和灵敏度的电荷测量

随着科技的进步,我们对电荷测量的要求越来越高,需要实现更高精度和灵敏度的测量.未来,电荷测量技术将致力于发展更为精确的测量方法和装置.研究人员将通过改善测量设备的设计和制造工艺,提高电荷测量的精度和稳定性.同时,借助新材料的应用和纳米技术的进步,可以制造出更灵敏的

传感器,实现对微小电荷的准确测量,以满足更高精度测量的需求。

4.2 非接触式电荷测量技术的发展

为了提高测量的准确性和可操作性,未来的电荷测量技术将趋向于发展非接触式的测量方法。传统的电荷测量通常需要将待测电荷与电荷传感器直接接触,但这种接触可能会对被测物体产生干扰,并且在某些情况下很难实现。因此,未来的发展方向之一是发展基于无线电、激光或光学原理的非接触式电荷测量技术。通过利用非接触式测量方法,可以减少对被测物体的干扰,提高测量的准确性和可靠性^[4]。

4.3 多功能和智能化的电荷测量技术

随着物联网、人工智能和大数据技术的快速发展,电荷测量技术也有望向多功能和智能化方向发展。未来的电荷测量装置可能会具备更多的功能,比如能够实现实时监测、远程控制和自动化测量等。通过将电荷测量技术与智能化系统相结合,可以实现对多个参数的联合测量和数据的综合分析,提高测量的效率和可靠性^[5]。此外,通过利用大数据分析技术,可以挖掘出更多电荷测量数据的有用信息,为电气设备的维护和管理提供更有效的支持。

5 结束语

电荷测量技术是一项发展迅速且应用广泛的技术。从最初的静电计到现在的高精度电荷耦合器件

和原子力显微镜,电荷测量技术经历了长足的进步,得益于科技进步和新材料的发现。它在物理学、化学和生物学等多个领域中得到了广泛应用。在物理学中,电荷测量技术被用于研究电荷的性质和行为,如离子或电子束的研究。在化学中,它帮助研究化学反应和材料表面的性质。在生物学中,电荷测量技术被用于研究生物分子和细胞的功能。此外,电荷测量技术还在材料科学、环境监测和能源研究等领域中得到应用。总的来说,电荷测量技术在科学研究和应用中具有重要作用。随着科技的不断发展和新材料的应用,电荷测量技术将继续拓展其应用领域,并取得更深入的发展。

参考文献

- [1] 万强,郭建华,张岩,等. ASO-S HXI 量能器电荷测量 ASIC 的抗辐照性能研究[J]. 核技术,2023,46(3):29-35.
- [2] 李丹. 原子核电荷的改变反应截面测量和电荷半径分析[J]. 科学技术创新,2022(10):4.
- [3] 王昌贝,左雄,贾焕玉,等. LHAASO 缪子探测器电荷优化测量研究[J]. 天文研究与技术,2023,20(3):258-266.
- [4] 张志斌,任明,宋波,等. 聚合物材料局部放电电荷后续行为研究[J]. 高电压技术,2022,48(6):11.
- [5] 李大雨,侯易岑,张贵新,等. 直流/交流电压下锥形绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 高电压技术,2022,48(4):9. DOI:CNKI:SUN:GDYJ.0.2019-04-011.

Progress in the Research and Application on the Charge Measurement Technology

ZHANG Xin GAO Wenhui YANG Bo

(Tianjin College, University of Science and Technology Beijing, Tianjin 301830)

Abstract: This paper reviews the research and application progress of charge measurement techniques. First, the development process and basic principles of charge measurement technology are introduced. The application of charge measurement technology in materials science, electronic engineering, biomedicine is discussed. According to the characteristics of different fields, the corresponding measurement methods are summarized. Finally, the development trend and possible future research directions are designed to help relevant researchers.

Key words: Charge measurement technology; development process; application