

物理导电性的认识发展

郑锋士 王较过

导电性是描述物质的重要物理性能之一,对物质导电性的研究是人们自认识电现象以来不断探讨的一个研究课题。尤其是进入 20 世纪,在理论上对物质导电性的研究取得了重大突破后,人类对物质导电性的认识提升到了一个新的高度。但人类对物质导电性的认识过程是漫长而艰辛的,回顾整个物质导电性的认识发展历程,将有助于我们从中认清人类认识发展的一般规律、增强从事科学活动的自觉性、提升在科学工作中进行战略分析和作出重大选择判断的能力。

一、物质导电性的实验研究

物质导电性的定性实验研究 早在我国南朝时期,古人便开始了对物质导电性的观察和思考。公元 510 年,我国《南齐书·五行志》中记述齐武帝永明 8 年时会稽山阴保林寺遭雷击“电火烧塔下佛面,而窗户不异也。”公元 1086 年,北宋沈括著《梦溪笔谈》卷 20 中记述内侍李舜举家遭暴雷时,写道:“雷火自窗间出……其漆器银扣者,银悉熔流在地,漆器曾不焦灼。有一宝刀,极坚刚,将刀室中熔为汁,而室亦俨然。”这都反映人们观察到落雷对地面放电过程中,导体(涂金粉的佛面、银扣、宝刀)中因有强大电流通过而发热熔化,但绝缘体(窗户、漆器和刀鞘)却因不导电而未受影响的现象。

我国不仅在对物质的导电性进行了早期的观察与思考,而且还最先加以应用。早在三国和南北朝时代,我国古籍上就出现了“避雷室”一词,这比西方出现避雷针要早一千多年。另外法国旅行家卡·戴马甘兰在游历中国后于 1688 年写的《中国新事》中叙述中国屋宇顶上龙头中有伸出的金属龙舌,舌根有细铁丝直通地下,使房屋免遭雷击。由此可见,当时的中国人已意识到细铁丝能充当导体,并将其成功地应用在建筑物的避雷设施上。

尽管我国很早就对物质导电性的现象进行了观察、记载和应用,但是 300 多年前,随着科学技术在西方的崛起,西方在物质导电性的实验研究方面超过了我们,最先把物质导电性纳入实验室研究领域的当数英国物理学家格雷(S. Gray)。1729 年他通过调整物质的长短、更换物质种类的方法进行导电性

的对比实验,从而发现物质有导体和非导体之分。实验过程中他将待试物质的一端接上感应起电的电荷,让另一端靠近一些轻小物体,通过观察轻小物体能否被吸起来判断物质是否为导体。此外,他还证实了金属丝和人体均能导电。虽然当时格雷的实验研究相当简单和粗糙,但他的研究却留下了非常宝贵而实用的研究方法——对比分析的定性研究法。

1750 年,富兰克林(B. Franklin)首先提出了用“岗亭”实验来验证雷电和地面上的摩擦电或感应电具有同一性的实验思想。1752 年法国电学家达里巴尔(F. Dalibard)最先按其建议进行了实验。他在建造的一座“岗亭”上树立一根高达 44 英尺的铁杆,成功地把云层中的电引进了地面上的莱顿瓶。这样,该实验就不仅证明了富兰克林的猜想,而且还从另一个侧面说明了铁具有导电性。1786 年,伽伐尼(L. Galvani)在做动物解剖的实验中观察到肌肉运动中的电力。这不仅说明了肌肉具有导电性,而且它还为伏打(G. A. Volta)电池的发现奠定了良好的基础。

物质导电性的定量实验研究 1767 年英国著名物理学家普里斯特利(J. Priestley)把物质导电性的研究引入定量研究领域。他在发表的《电学的历史与现状》中阐述了关于不同物质的相对电导率的实验,从相对电导率的大小可以判定物质导电性的强弱。1773~1781 年间,卡文迪什(H. Cavendish)也做了许多实验测定各种物质的相对电导率,并证明了铁的导电能力是蒸馏水的 4 亿倍;他研究了金属电导率与温度的关系,发现温度越高,其导电能力越弱,正是这一开创性的研究,使人们的思维迈向了一个更高的层次——探寻物质导电性与外界环境(如温度、压强等)间的关系。他还研究了溶液的导电能力,建立了电阻和电流的概念,用阻抗表示溶液对电流的阻碍能力,用速度表示电流的大小,通过引入电阻和电流等概念来试图探寻出一些导电性理论上的结论。尽管未能取得满意的结果,但对后人的影响是相当深远的。伟大的物理学、化学家戴维(H. Davy)在《关于由电产生的磁现象的进一步研究》一文中指出:金属的电导率与由该金属制作的导

线的单位长度的质量成正比。由此不难看出，科学家们试图研究物质的导电性与各种内外因素间的定量联系。

1825年，法国物理学家贝克莱尔（A. C. Becquerel）指出：同一金属的各种线的电导率相等的条件是它们的长度之比等于它们的横断面积之比。同年，英国人巴劳（P. Barlow）发现在同一电源条件下，通过导线的电流与导线长度的平方根成反比，与导线直径成正比。同年，欧姆（G. S. Ohm）以铜的电导率为基础，通过实验测定出各金属的相对电导率，并于1826年发表了重要的实验报告——《涉及金属传导接触电的定律的确定及伏打装置和斯威格倍加速器理论的初步方案》，其中介绍了关于电导率实验的情况，提出了电路的实验定律。由此可知一种测量物质导电性大小的思路，即测出电流密度和电场强度的大小便可算出电导率的大小，进而推知其导电性的强弱。这一思路在实验上便体现为用伏安法测定物质的电阻。同时这一系列的实验研究也把物质导电性大小的定量工作推到了一个新的高度。

二、物质导电性的理论探索

物理学的发展一直都在坚持理论和实验两条腿走路，且理论往往是实验的升华。在实验向前迈进的过程中，人们力求提出合理而简捷的理论假说来解释尽可能多的物理现象，然后在理论的指导下设计、完成新的实验，以得到更多的实验现象和结论，最后反过来去推动理论进一步向前发展，从而使人们在理论与实验的相互促进发展中去把握自然界最本质的运动规律。

物质导电性的经典理论 物质导电性的研究也同样如此。在格雷时代，人们为了解释电现象而提出电是一种“流体”的思想，接着在此基础上发展出了电的一元流体学派和电的二元流体学派两大思想体系。1745年，英国电学家瓦特孙（W. Watson）最先提出电的一元流体假说，其主要思想为用物体含电流体的超饱和度表示物体具有正电性，用物体含电流体的欠饱和度表示物体具有负电性，然后把电流体比做水，把电流体的运动比做水流动，进而说明了电的流动是单向的观点。1747年，富兰克林也提出了类似的一元电流体假说及阳电和阴电的概念。1759年，德国的自然哲学家爱宾努斯（F. U. T. Aepinus）在《电和磁的理论尝试》一文中进

一步发展了瓦特孙-富兰克林的一元电流体的假说，提出了失去电的物质粒子间存在着排斥力的大胆假设。著名物理学家汤姆孙（J. J. Thomson）在1935年对这一理论流派作过很高的评价。他说：“在实验室里，我们仍在使用这一理论，如果想知道移动一块铜板时是会增加还是会减少我们所观察到的效应，我们不必求助于高深的数学，而用这种简单的电流体概念，几秒钟内就可告诉我们想知道的一切。”

由此可见，电的一元流体假设对物质导电性的理论发展作出的巨大贡献。然而，在电的一元流体假设向前发展的同时，却有一批物理学家提出了与此不同的观点。1733年，法国物理学家迪非（C. F. Dufay）在《论电》一文中首先提出了电的二元流体思想，他认为存在“玻璃电”和“树脂电”两种电荷。1759年，西默（R. Symmer）进一步将电的二元流体假说具体化。他认为，两种相反的电流体既能共存，也能相互独立，当两种等量电流体共存于一个物体时，物体处于普通状态，但当相互独立时，物体就显示出一种电性，且电是某一种电流体在物体上积累而产生的。后来的库仑（C. A. Coulomb）、安培（A. M. Ampere）、费内希尔（G. T. Fechner）等诸多物理大师都追随了存在两种不同性质电荷的这一思想。这些思想不仅解释了静电实验现象，而且它们的提出对导电性理论形成和发展产生了不可替代的积极影响。

1792年，伏打提出了接触电的理论假说。他认为各种金属含有不同数量的电流体，当两种金属相互接触时，电流体总是倾向于由含量高的金属流向含量低的金属，如果在两种金属中插入某种湿导体并把它们接成回路，电就会产生流动。这一假说不仅成功解释了伽伐尼电现象产生的根本原因，而且为电池的发现奠定了坚实的理论基础。1852~1857年间，德国著名物理学家韦伯（W. E. Weber）逐步形成了第一个有质量电原子的思想。他认为电荷不仅具有电量而且也具有质量，电粒子的荷质比是一常数，电阻是导线中两种不同性质的电粒子在相同运动中不断结合和分解造成的，并运用电原子的运动来解释金属电导现象。这一思想为洛仑兹（H. A. Lorentz）的电子论、黎克（E. Riecke）和德鲁德（P. K. L. Drude）关于物质结构的电子理论的形成创造了良好的条件。

第一次对电的流体思想提出挑战的是英国的物

理化学家法拉第(M. Faraday)。1837年,他在《论感应》一文中提出了电的感应理论:当介质处于电场中时,物质粒子受到极化,极化粒子一个接一个排列构成感应力线,力就是沿着这些感应力线由一个粒子到另一个粒子在介质中进行传递,这种力的传递就是电的传递。1844年,他又提出了建立在空间“力网”基础上的邻接作用理论,即承认只要一个实体存在就能够产生作用场或力场,另一个物体的出现就能把这种作用显示出来。在法拉第力线思想的激励下,汤姆生运用类比方法将其转变为定量描述,在此基础上麦克斯韦(J. C. Maxwell)进一步归纳出了著名的电磁场方程组。这不仅使物质导电性的场理论得到了进一步的完善,而且也把整个经典的电磁场理论推向了高潮。

然而,物质导电性的理论探索并未就此止步。随着电子的发现,1900年德鲁德提出了能够利用微观概念计算实验观测量的第一个固体理论模型——自由电子气模型。他认为:金属内的电子可分为两部分,一部分被原子所束缚,只能在原子内部运动并与原子核构成金属内的正离子;另一部分受到束缚较弱,它们已不属于特定的原子,而是在整块金属中自由运动,称之为自由电子。金属良好的导电性和导热性就是由这些自由电子的运动所决定的。自由电子不断地与金属内的正离子相碰,相互交换能量,在一定温度下达到热平衡,处在热平衡状态的自由电子就像气体分子那样作无规则热运动,因而可以采用气体分子运动论来处理金属内自由电子的运动。运用这一模型,可以从理论上成功地解释欧姆定律和魏得曼-夫兰兹经验定律(即在温度一定的条件下,金属的电导率与热导率成正比)。但由于其基础是经典的,因此无法单独确定热导率和电导率,不能说明电子平均自由程较长和电子对比热贡献小等实验现象。

物质导电性的量子理论 20世纪初量子理论的建立,促进物质导电性理论进一步向前发展。以泡利(W. Pauli)不相容原理、费米(E. Fermi)-狄拉克(P. A. M. Dirac)统计理论为基础,1927年9月,德国人索末菲(A. Sommerfeld)抛弃了德鲁德模型中的玻耳兹曼(L. Boltzmann)统计,提出了金属导电的半经典理论。他认为金属中的电子是服从费米-狄拉克统计的简并电子气,由此得出了费米能级、费米面等一系列重要概念,并成功地解决了电子比热比经

典值小等经典模型所无法解释的问题。但由于他仅采用了量子统计的方法,其理论的出发点依然是经典的,故未能成功解释电阻与温度间的关系。

1927~1928年德国人斯特拉特(M. J. O. Strutt)和美籍瑞士人布洛赫(F. Bloch)建立了固体的能带理论。且布洛赫第一次提出波包在电场中被加速的概念,然后考虑电子与晶格振动的相互作用,经详细推导成功得到了高温下电阻率与温度成正比、低温下电阻率与温度的5次方成正比的结果。另外他还用单电子独立运动的量子描述解释固体导电性,这一开创性的工作带动了固体量子论的深入发展,从而使物质导电性的理论探索进入完全量子化的阶段。

1931年,弗伦克尔(Я. И. Френкель)考虑电子和空穴的相互作用,提出绝缘体和半导体中激子的概念。1933年,英国人威尔逊(H. A. Wilson)在能带理论基础上给出了区分绝缘体、半导体、导体的微观判据,从而使物质导电性的研究沿着绝缘体、半导体、导体三个方向拓展开来。

1939年,苏联的达维多夫(A. C. Давыдов)首先认识到半导体中少数载流子的作用。同年,德国的肖特基(W. Schottky)和英国的莫特(S. N. F. Mott)提出了著名的“扩散理论”。1945年,在贝尔实验室工作的理论物理学家巴丁(J. Bardeen)提出了半导体表面态和表面能级的概念,把半导体理论研究推上了一个新的高度。

1949-1950年间,美国贝尔电话实验室的肖克利(W. Shockley)根据能带理论的基本思想创立了p-n结理论,直接导致了1954年第一只硅晶体管的出现,为半导体事业的飞跃发展奠定了坚实的基础。1958年,日本物理学家江崎(Leo Esaki)对一种特殊掺杂分布的p-n结二极管的正向特性用量子隧道效应从理论上做出了精辟的说明。这不仅在导电性理论上取得了突破性的进展,而且直接导致了隧道二极管的发明和使用。

三、物质导电性研究的展望

在理论日趋完善的过程中,人们对物质导电性的实验探究仍在不断进行。在实验中人们发现:对于具有中、高电导率的物质,为消除电极非欧姆接触对测量结果的影响,常采用直流四端电极法测量试件的电导率;对于半导体物质,室温下通常采用四探针法测量其电导率,进一步判定出它们的导电性;对

试论“普朗克原理”

程民治

德国著名的物理学家、一代宗师马克斯·普朗克(M. Plank, 1858 ~ 1947), 不仅因其发现量子对物理学的发展所做出的卓越贡献而荣膺 1918 年的诺贝尔物理学奖, 而且因他的一段特殊的人生经历而得出的一个深刻教训, 亦即普朗克自称的“一个值得注意的事实”, 而被尊称为“现代物理学发展的精神之父”。现拟就这个在物理学界鲜为人知的“新事实”, 作如下简要的论述。

“普朗克原理”的历史由来及其内涵

普朗克早期主要投身于热力学研究, 并确定以热力学第二定律作为自己博士论文的题目。起初他还想继续克劳修斯的工作, 但在研究的过程中却超出了他的先驱所涉及的范围, 他把全部“热库”包括进来, 从而排除了“当量值”的计算, 并且还简化了第二定律的表述。1878 年, 当普朗克把充斥着这些新思想的博士论文提交给慕尼黑大学的专家组审议时, 出人意料的是, 当时他的教授们却没有一个能够真正理解并热情支持他论文中的新观点。物理学界的老前辈更是对普朗克的真知灼见毫无兴趣, 甚至他的导师——蜚声科坛的亥姆霍兹对他的论文也极力抵制。因此, 普朗克就在自传中写道: “这种经历, 给了我一个了解新事实——一个值得注意的事实——的机会。按照我的意见, 新的科学真理与其说是靠说服反对者并使他们看到光明而获胜的, 莫如说是因为反对者终于死去, 而熟悉它的新一代成长起来了。”普朗克的这段名言, 经常在科学史家、科学哲学家、科学心理学家的著作中传诵, 并被戏称为“普朗克原理”。

“普朗克原理”揭示了物理学史上反复出现的一

个普遍现象: 由于老一辈的科学大师固守传统观念, 或者以学术权威自居, 自以为是, 对于一些暂且还名不见经传的小人物所取得的成果置之不理, 甚至极力贬低和攻击; 致使一位物理工作者取得了一项惊世骇俗的科研成果后, 还需努力争取科学界和全社会的广泛认可, 这同样也是一个艰辛而漫长的历程。其中有的人为此苦等数年, 有的人甚至在有生之前都无法看到自己的成果得到普遍承认。不仅如此, 有时还有一些年长的大科学家, 由于固守传统理论而停滞不前, 结果导致“入了宝山而空手归”。凡此种种, 在物理学创造史上是不胜枚举的。

物理学史上几件令人痛心的憾事

科学家的职业是神圣的。但是, 在物理学绚丽光环的笼罩下, 也曾有过许多不幸、许多悲哀和许多遗憾。

开尔文勋爵(Lord Kelvin, 1824 ~ 1907) 可谓是 19 世纪英国最有成就的物理学家之一。他毕生致力于经典物理学的研究, 共发表了 600 多篇学术论文, 获得过 70 个发明专利。但是晚年的开尔文, 思想却异常的保守。他不仅对 19 世纪与 20 世纪之交物理学一系列的新发现认识不足, 而且在很多场合还错误地反对新理论, 总是力图把一切都归纳到已有的理论框架中。当伦琴发现 X 射线时, 开尔文说这是一场“精心设计的骗局”; 卢瑟福和索迪发现元素嬗变时, 他说那是巧妙捏造出来的; 当迈克尔孙—莫雷用实验检验以太风得到零结果时, 他依旧赞成以太学说, 并把这一否定结果称为经典物理学晴朗天空上的一朵乌云。开尔文还在 1900 年 4 月 27 日英国皇家学会发表的《新年献

量子点器件采用三端电测量法及高压冲击下的四电极垂向引线测量法等。在处理实验数据的过程中, 通常多种方法并用, 特别是图像处理法得到广泛应用。此外, 借助实验, 人们还探测出各物质的导电性与温度、压强、磁场等外界环境间的变化关系。

随着研究的深入, 人们已基本探明各种常见物质的导电性, 也了解到一些合金材料、高分子材料、玻璃、陶瓷、某些液体甚至气体的导电性。然而, 对物质导电性实验的研究将继续进行; 随着人们对物

质微观结构认识的进一步深入, 对物质导电性理论的探索也将进入新的阶段。我们只有在积累前人理论和实验知识的基础上, 不断提升自己的科学素养、改进实验方法和手段、提高实验的精确度、转换思维角度、创造性地去思考导电性的理论和实践问题, 才能在理论与实验的相互作用中取得在物质导电性研究领域的新突破。

(西安陕西师范大学物理学与信息技术学院 710062)