

磁场测量方法及其应用

胡苗苗 刘海顺 李端明 王怀军

磁场测量有着悠久的历史，早在两千多年前，人们就用司南来探测磁场，用于指示方向。随着物理学、材料科学和电子技术的不断发展，磁场测量技术取得了很大进展，磁场测量方法也越来越多。当前，磁场测量技术已广泛应用于地球物理学、空间科学、生物医学、军事技术、工业探伤等领域，成为不可或缺的手段。磁场测量常以磁场强度的大小作为度量标准，针对不同场合下磁场强度的不同，需要采用不同的测量方法。本文将总结与讨论磁场测量的常用方法及其应用。

1. 磁通门法

磁通门法是利用在交变磁场的饱和激励下，处在被测磁场中磁芯的磁感应强度与被测磁场的磁场强度间的非线性关系来测量磁场的一种方法。这种方法主要用于测量恒定的或缓慢变化的弱磁场，在测量电路稍加变化后，也可用于测量低频交变磁场。

磁通门传感器是磁通法测量技术的主要器件，并且具有很高的灵敏度。它能检测到 10^{-10}T — 10^{-4}T 的弱磁场，分辨率约为 10^{-11}T — 10^{-9}T ，还可检测梯度场和向量场，但因其探头以及电路装置体积、重量都较大而限制了它们的广泛应用。随着信息产业的发展，磁通门传感器逐步向微型化和集成化发展，体积和重量大大减小，价格也得到进一步降低，将成为弱磁场检测的最重要的传感器。其中，三分量磁通门传感器的应用较为广泛，已用于舰艇磁场测量、地磁导航中地磁场测量、磁性检测站的磁场测量、水下定点磁场测量、金属探测、磁探伤等场合。近年来，磁饱和磁强计在宇航工程中也得到了重要应用，可用来控制人造卫星和火箭的姿态，测绘来自太阳的“太阳风”以及带电粒子的空间磁场、月球磁场、行星磁场、星际磁场的磁图等。

2. 霍尔效应法

霍尔效应是指当外磁场垂直于流过金属或半导体中的电流时，会在金属或半导体中垂直于电流和外磁场的方向产生电动势的现象。霍尔效应法是在实际应用中比较成熟的一种磁场测量方法，利用霍尔效应法可以连续线性地读数，而且可以用于测量小间隙磁场，还可以使用多探头实现自动化测量和

数据处理。

新型陆上交通工具磁悬浮列车是依靠电磁力将列车悬浮于轨道上，用直线电机推进而运行的。列车中气隙磁场的分布和变化规律对列车的悬浮、推动、导向和车载发电都有很大影响。一般的传感器只能测定某一方向的磁场，而三维磁敏霍尔传感器可以用于测量三维气隙磁场，这种传感器是将六个性能参数相同的霍尔元件分别粘贴在传感器立方体的六个表面上，互相平行的两个面上的霍尔元件以差动的方式进行电路连接，共同完成某一个方向的磁场测量。三维气隙磁场的测量，对磁悬浮列车电磁系统的性能评估和优化设计具有重要意义，因此对测量精度有很高的要求。基于霍尔元件的电压比测量法测量磁场时，可以消除激励电流变化对测量带来的影响，从而提高测量精度。其原理如图 1 所示。霍尔传感器和电阻 R 串联在同一个回路中，当由于磁电阻效应和温度变化引起霍尔传感器内阻变化时，霍尔传感器的激励电流会发生变化，同时流过电阻 R 的电流也会同步发生变化，且霍尔传感器的输出电压和电阻 R 上的压降均与激励电流成正比。计算机控制模拟开关轮流采集霍尔传感器的输出电压和电阻 R 上的压降。由于霍尔传感器的输出电压 $U_H=R_{\text{H}}IB_0$ ，电阻 R 上的压降 $U_R=IR$ ，所以磁场强度 B 可根据 U_H 与 U_R 的比值求出，即 $B=R(U_H/U_R)/K_H$ ，式中不含激励电流 I ，可见采用电压比测量法消除了激励电流变化对磁场测量精度的影响。再通过软件对霍尔传感器的灵敏度系数 K_H 随温度的变化进行补偿，即可得到高精度的磁场测量结果。

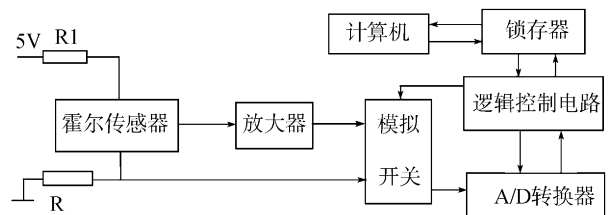


图 1 霍尔效应法测三维气隙磁场原理图

3. 磁阻效应法

磁阻效应是指某些金属或半导体的电阻值随外加磁场变化而变化的现象。同霍尔效应类似，磁阻

效应也是由于载流子在磁场中受到洛伦兹力而产生的。在达到稳态时，如果某一速度的载流子所受到的电场力与洛伦兹力相等，载流子便在两端聚集产生霍尔电场，比该速度慢的载流子将向电场力方向偏转，而比该速度快的载流子则向洛伦兹力方向偏转。这种偏转导致载流子的漂移路径增加，或者说，沿外加电场方向运动的载流子数减少，从而使电阻增加。这种现象称为磁阻效应。若外加磁场与外加电场垂直，称为横向磁阻效应；若外加磁场与外加电场平行，则称为纵向磁阻效应。一般情况下，载流子的有效质量的驰豫时间与方向无关，则纵向磁感强度不引起载流子偏移，因而无纵向磁阻效应。

目前，磁阻效应广泛用于磁传感、磁力计、电子罗盘、位置和角度传感器、车辆探测、仪器仪表、磁存储(磁卡、硬盘)等领域。例如，在智能交通系统的信息采集集中，起重要作用的各向异性磁阻(Anisotropic Magnet Resistive, 简称为 AMR) 固态磁场车辆探测系统(原理图如图 2 所示)就是采用 AMR 传感器作为敏感器件，感测地磁范围内(低于 80 mGs)的磁场。AMR 传感器可以根据一些铁磁物体对地磁的扰动来检测车辆的存在和流向。该系统的探测灵敏度可以达到 2mV/Oe，线性度误差(校准曲线与规定直线之间的最大偏差)达到 0.05%，迟滞误差和重复误差小，均达到 0.08%。磁阻效应响应速度在 1 μ s 量级，该系统采集周期为 10 ms，足以响应车辆行驶靠近该传感器后引起的地磁场变化，且此传感器体积小，从而大大减小了系统的体积。

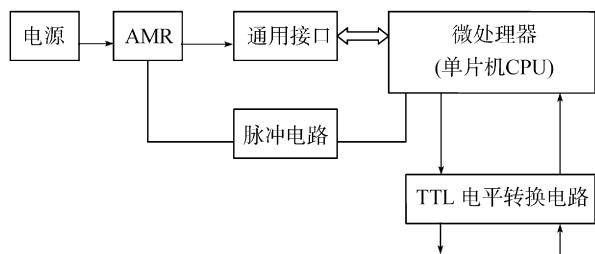


图 2 磁阻效应探测系统原理图

4. 磁共振法

磁共振法是利用物质量子状态变化而测量磁场的一种方法，一般可用来测量均匀的恒定磁场。用磁共振原理测量的方法主要有核磁共振、顺磁共振、光泵磁共振等。其中，核磁共振法是利用具有自旋角动量及磁矩不为零的原子核作共振物质，根据核激励方式和样品的不同，它又可分为核吸收法、核

感应法及章动法，主要用于测量 10^{-2} — 10 T 范围的中强磁场，测量的误差一般可达 10^{-5} ，最高达 10^{-6} ，利用自动跟踪核磁共振磁强计可以自动跟踪缓慢变化的磁场；顺磁共振法是利用顺磁物质中电子或由抗磁物质中顺磁中心的电子所引起磁共振的方法，可以测量 10^{-4} — 10^{-1} T 范围的磁场，测量的误差一般可达 10^{-4} T；光泵磁共振法是利用原子的塞曼效应原理绝对测量弱磁场的一种精密方法，它是通过光(红外线或可见光)照射物质，使物质的原子产生往复的能级跃迁，并最终使原子由低能级升到高能级的方法，可用于测量小于 T 以下的弱磁场，分辨率可达 10^{-11} T。

而光泵法测量磁场精度高，误差小，被广泛应用。以光泵技术为支撑研制的铯光泵磁力仪是一种具有高灵敏度高精度的海洋磁力仪，可用于国防中探测水下潜艇，地磁测量和工程地质探测以及环境地质调查等。随着海上通信的发展，海底光缆、电缆的铺设日益完善，目前可以利用 G880 铯光泵磁力仪探测海底光、电缆的准确位置和是否产生磁异常，并且可以根据磁异常形态曲线确定出光缆的位置。

5. 超导效应法

超导效应法是利用弱耦合超导体中约瑟夫森效应的原理测量磁场的一种方法，它可以测量 0.1 T 以下的恒定磁场和交变磁场。目前我国已建立了自己的超导磁场测试标准，该标准是采用低温核磁共振法准确测量磁场的绝对值，可以覆盖 0.1—13 T 的测量范围，准确度为 5×10^{-5} ，在液氦温度下直接测量，测量距离可达 1.7 m 或更长，可以满足现代大型杜瓦瓶的需要，并且可以灵活地改变并打印探头的坐标及场值，能方便地测量磁场的均匀度。

利用超导效应制成的超导磁强计可以测量和研究人的心磁图、脑磁图和人体中其他部位(如肌肉、肺部等)的磁图，对于人的某些生理活动和病变机理能够提供重要信息，在医学上有助于疾病的分析和诊断；超导效应具有极高的灵敏度和分辨率，用其可以制成磁梯度计，在地质勘探、大地测量、计量技术、生物体内微弱磁场测量、基本粒子结构研究等方面有许多重要应用。超导量子干涉滤波器是一种测量绝对磁场的探测器，它的性能不会受驱动制冷机在压缩机为 55 Hz 时所造成的典型的寄生振荡的影响。目前在商用微型制冷机中运行正常。

聚集太阳光发电

徐 娜

在很早的时候，人们就知道凸透镜或凹面镜可以聚集太阳光，聚集起来的阳光强度很大，甚至可以点燃柴禾。到了现在，人们开始利用太阳能发电了，但是太阳能发电量低一直是困扰人们的大问题。近年来，一些国家的科学家开始尝试用凸透镜或凹面镜聚集阳光的方法，使得太阳能的利用更集中一些，发电的功率更大一些。

美国：凸透镜式太阳能电池板(见图 1)

太阳能电池板可以把照射到表面的太阳光的能量部分转化为电能。照射到电池板表面的阳光越强，电池板转化的电能越多。我们都知道，凸透镜可以聚集太阳光。根据这个原理，美国 IBM 公司开发了凸透镜聚光发电系统，将太阳光经过凸透镜聚集后，再投射到太阳能电池板上，借此增大太阳光的强度，从而增加太阳能电池的发电量。研究表明，利用了凸透镜聚光之后，太阳能电池板的发电功率可提高 4 倍。

其实，利用凸透镜聚光发电的想法早就有人提出。但是，聚光发电遭遇的最大困难是温度问题。经过凸透镜聚光照射之后，太阳能电池板的表面温度可升高到 1000 多摄氏度。而 IBM 公司的这套聚光发电之所以成功，是因为研究人员在传统的太阳

能电池板上加入了特殊的制冷系统，它能将电池板的表面温度从 1600 摄氏度降低到 85 摄氏度，从而有效地避免太阳能电池板被烧毁。



图 1 美国的凸透镜式太阳能电池板

澳大利亚：“太阳球”(见图 2)

目前，相对便宜的太阳能电池板往往效率很低，无法生产出足够的电能；而高效的太阳能电池板却又十分昂贵，无法在普通消费者中推广。澳大利亚的“绿金能源”公司研制的“太阳球”很好地解决了这一问题，它可为那些生活在山区的居民提供充足且廉价的电能。一个“太阳球”的零售价为 1190 美元。如果考虑到每平方米太阳能电池板 74000 美元的高昂价格，1190 美元的售价可以说是相当的廉价了。

6. 磁光效应法

磁光效应法是利用磁场对光和介质的相互作用而产生的磁光效应来测量磁场的一种方法。当偏振光通过磁场作用下的某些各向异性介质时，会造成介质电磁特性的变化，并使光的偏振面(电场振动面)发生旋转，这种现象被称为磁光效应。根据产生磁光效应时通过介质(样品)的光是透射的还是反射的，磁光效应分为法拉第磁光效应和克尔磁光效应。其中，法拉第效应法适用的范围很宽，可以测量 0.1—10 T 之间的磁场，测量误差为 10^{-2} ，克尔效应法可以测量高达 100 T 的强磁场，测量误差为 3×10^{-2} 。

磁光效应法测量磁场具有耐高压、耐腐蚀、耐绝缘的优点，并且由于传感器的温度系数小，测量

的工作温度范围可以自液氮至室温或更高温度；由于宽频带的传输特性，因而可以测量非正弦波磁场；由于利用光传输而没有带点的引线引入磁场，因而在高频中提高了测量的准确性；还可以利用光纤本身的法拉第效应测量高压载流导线周围的磁感应强度，测量范围可以达到 10^{-3} —1 T。

随着计算机、自动化、超大规模集成电路制造等技术的发展以及新材料和新工艺的出现，新的理论和技术将不断融入磁场测量中，磁场测量方法将不断进步，应用范围将不断扩展，磁场测量技术及仪器也必然向着高准确度、高稳定度、高分辨率、微型化、数字化、智能化的方向发展，前景十分广阔。

(江苏省徐州市中国矿业大学理学院 221116)