

超/特高压直流互感器 现场校验技术及装置

胡 灿 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

超/特高压直流互感器 现场校验技术及装置

主 编 胡 灿

副主编 雷 民 周一飞



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着我国超/特高压直流输电工程数量的递增,直流互感器的应用率也越来越高。为更好地校验直流互感器的性能,本书编者针对直流换流站实际的工况,经过多年来的研究、试验和试点工程应用,形成了一套完整的超/特高压直流互感器测量系统现场测试方法和校验装置。

本书共分4章,分别为概述、直流电流互感器原理及试验技术、直流电压互感器原理及试验技术、换流站用直流互感器现场校准方法与设备。书中所介绍的现场校验技术,可用于直流换流站全部互感器的现场校准。

本书可供从事超/特高压直流输电工程的管理人员和运行维护人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

超/特高压直流互感器现场校验技术及装置/胡灿
主编. —北京:中国电力出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-5123-4504-1

I. ①超… II. ①胡… III. ①特高压输电-直流输电-
高电压互感器-校验 IV. ①TM451

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 118401 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 5.75 印张 92 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

进入 21 世纪,中国的高压直流输电技术取得了重大进展,由中国自主研制、设计和建设的向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程,实现了直流输电的电压、电流双提升,输电容量和送电距离的双突破,标志着中国已全面掌握特高压直流输电工程设计、试验、设备制造、工程建设核心技术,占领了世界直流输电技术的制高点,这将推动中国直流输电技术实现新跨越,对特高压输电技术在中国乃至世界的发展都具有重要影响。

随着我国电力发展,超/特高压直流输电工程日益增多。作为关系到直流输电系统安全、稳定、可靠运行的关键设备之一的直流互感器,缺乏相应性能检测手段和试验设备,在投运前、运行中都无法进行现场检测和试验,从而无法判别直流测量互感器实际性能和运行工况。这给国内超/特高压直流输电带来了较大的隐患,一旦出现因直流测量设备性能发生变化而导致的非正常停运,将给电网的稳定可靠运行带来极大威胁。

本书针对当前超/特高压直流换流站中使用较多的直流互感器的基本原理、技术要求和试验体系等进行了介绍,并结合直流换流站实际工况,全面系统地讲述了换流站中光电流互感器、零磁通电流互感器、直流分压器等直流换流站全部互感器现场试验技术。同时,还对直流互感器现场试验设备的构成、原理以及几种现场试验的方法进行阐述。

本书第 1 章、第 2 章由中国电力科学研究院李前、李鹤编写,第 3 章由中国电力科学研究院李登云和四川电力科学研究院王韬编写,第 4 章由中国电力科学研究院雷民和四川电力科学研究院周一飞编写,全书由四川省电力公司胡灿灿统稿。在本书的编写过程中,中国电力科学研究院章述汉高级工程师、四川

电力科学研究院卢斌高级工程师给予了支持和帮助，在此一并致谢。

限于编者水平及编写时间，书中难免存有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月

目 录

前言

1	概述	1
2	直流电流互感器原理及试验技术	3
2.1	直流大电流测量方法	3
2.2	谐波电流测量方法	18
2.3	换流站用直流电流互感器原理	21
2.4	换流站用直流电流互感器标准体系和试验	28
3	直流电压互感器原理及试验技术	40
3.1	直流高电压测量方法	40
3.2	换流站用直流电压互感器原理	49
3.3	换流站用直流电压互感器标准体系和试验	53
4	换流站用直流互感器现场校准方法与设备	64
4.1	换流站用直流电流互感器现场校准方法	64
4.2	换流站用直流电压互感器现场校准方法	66
4.3	换流站用直流互感器现场试验标准装置	69
4.4	换流站用直流互感器现场试验设备	78
	参考文献	85

直流互感器是直流输电系统的重要一次设备，为系统地控制和保护提供准确可靠的测量信息，其运行可靠性和测量准确性直接关系到直流输电系统的安全稳定运行。同时直流互感器也是进行整流与逆变工作状态控制的重要传感装置，通过计量直流侧电能，可以计算出整流与逆变过程中的能量效率，从而判断直流换流设备的运行状态与参数是否达到设计要求，并调整运行参数以优化并达到设备的经济运行的目的。

在未来很长一段时间，我国将建设数条超高压乃至特高压直流输电线路，为解决直流输电系统中直流测量设备无法进行现场性能检测的难题，作为关系到直流输电系统安全、稳定、可靠运行的关键设备之一的直流互感器，缺乏相关性能检测手段和设备，因此在目前国内直流换流站的投运前、运行中一般没有对其进行现场检测和试验，无法掌控直流测量设备实际运行性能。这给国内超/特高压直流输电带来了较大的隐患，一旦出现因直流测量设备性能发生变化而导致的非正常停运，将给电网的稳定可靠、经济运行带来极大威胁。

鉴于我国未来还将大力发展直流输电，此技术将有很广阔的应用前景。从试验的结果看，各种直流测量设备均存在一定问题，进口测量设备的性能不容乐观。试验数据分析结果也表明，一些性能缺陷如 OCT 的变比误差，可以通过现场试验进行校正。因此，应尽快开展换流站直流测量设备的交接试验工作，保障新建换流站设备的准确可靠，同时对已投运的换流站在检修期补做现场校准试验，排查安全隐患，及时对系统进行调整；应起草换流站直流互感器设备的交接验收规范及例行检定规程，制度化、常态化地开展直流互感器的现场校准试验工作，以保证直流输电系统安全运行；应长期跟踪研究直流电流互感器误差特性，摸清各种型式直流电流互感器的特点，有益于直流测量领域的技术进步，提高换流站的控制和保护水平。

本书介绍的技术属国内急缺的关键性校准技术，该技术及设备曾成功应用在我国 800kV 及以下电压等级高压直流输电工程中，用于高压直流输电系统中电压互感器、电流互感器的检定和校准，用于输电线路损耗的测量和输电系统的校准，完善了直流互感器现场试验体系，提升了直流互感器试验能力；同时该技术及装置的现场成功应用也标志着我国直流互感器现场检定能力达到世界先进水平，具有极大的社会效益。未来，该技术还会向国家电网公司系统内各省电科院、南方电网公司、社会公用计量机构等单位积极推广，同时为国家把好直流互感器的质量关，将为高压直流输电稳定运行提供技术保障。

2.1 直流大电流测量方法

2.1.1 分流器

分流器是人们利用电阻量具测量直流最早采用的经典方法，它是通过在被测电流回路中串联电阻上的电压来测量电流，与分流器原理类似的测量方法还有标准电阻法。分流器可以流过比标准电阻大得多的电流，一般用于测量大电流。利用分流器测量直流电流的方法的优点是不受外磁场影响，结构简单。图 2-1 所示为分流器的实物图。

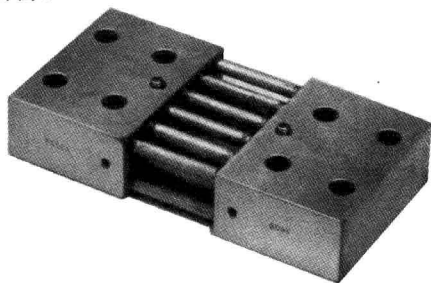


图 2-1 分流器实物图

分流器是一种四端电阻，中间的多个圆棒为分流器的锰铜电阻，这是分流器电阻的核心，电流流过锰铜棒产生电压降，也有用锰铜片制作分流器的。锰铜棒两端的端子排为电流输入端子，一般用符号 P1、P2 表示。图 2-1 中的两个螺丝为电位输出端子，一般用符号 S1、S2 表示。这种四端的结构充分利用了电阻器本体的电阻，消除了引线电阻的影响。在低阻值精密电阻的应用中，这种结构尤为重要。各厂家生产的分流器的输出电压一般都标准化了，如

22.5、50、60、75mV 和 150mV。

分流器是一种非常理想的直流电流测量器具，分流器输出电压与分流器阻值的比值即为被测电流，然而实际测量直流大电流时仍有许多限制。

(1) 锰铜阻值的漂移。分流器的主要传感元件为锰铜棒，其电阻的稳定性直接影响分流器的准确度。下面首先对锰铜电阻阻值不稳定的机理进行说明，主要有下述三点。

1) 锰铜合金成分的不均匀。锰铜主要是由铜、锰、镍三种元素组成。锰铜合金从液体冷却成为结晶的过程中，其晶体内部的成分是不均匀的。随着时间的推移，各晶体间的不均匀状态逐步过渡到均匀状态。在匀化过程中，锰铜电阻的阻值增加 6%~7%。

2) 外界机械作用引起的内应力。分流器的制作过程中，锰铜棒会受到内应力，该内应力会使电阻值增加 2%~6%。随着时间推移，该内应力会由大变，电阻值趋近于稳定。

3) 锰铜合金表面氧化作用的影响。锰铜合金表面氧化之后，表面出现一层无锰层或少锰层。这对于锰铜合金电阻值和电阻温度系数的影响比上述两种因素的影响更为严重。随着时间的变化，锰分子要向外表面扩散，少锰层的锰含量要增加，其电阻值便随着增加。扩散的结果，使电阻值增加 10%左右。

上述三种因素的综合作用，使锰铜合金的电阻值和电阻温度系数的时间不稳定性明显地显示出来。为稳定该电阻值，应对加工完成的分流器进行老化处理。老化处理方法：将加工完成的分流器置于温度 $130 \pm 5^\circ\text{C}$ 的烘箱中，持续 20h，再降至室温，重复 8 次，然后常温放置 2 个月。

(2) 温度系数的影响。与一般电阻不同，锰铜存在着二次电阻温度系数，其理论电阻值 R_T 由式 (2-1) 确定

$$R_T = R_M[1 + \alpha(T - 20) + \beta(T - 20)^2] \quad (2-1)$$

式中 R_M —— 20°C 下分流器的电阻值， Ω ；

α ——一次电阻温度系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

T ——电阻的温度， $^\circ\text{C}$ ；

β ——二次电阻温度系数， $1/ (^\circ\text{C})^2$ 。

假设锰铜为 F1 锰铜合金棒材， $\alpha = (-5 \sim +10) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， $\beta = (-0.25 \sim 0) \times 10^{-6}/ (^\circ\text{C})^2$ 。取 $\alpha = 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， $\beta = -0.25 \times 10^{-6}/ (^\circ\text{C})^2$ ，设 20°C 下锰铜电阻的误差为 0，可以计算得到锰铜电阻的理论温度—误差曲

线，如图 2-2 所示。

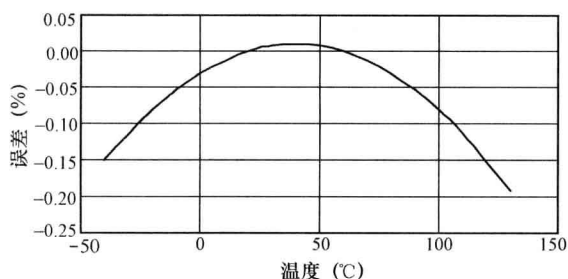


图 2-2 锰铜电阻理论温度—误差曲线

由图 2-2 可以看到，由于锰铜二次电阻温度系数的影响，其温度—误差曲线呈现出一个“驼峰”。

图 2-2 是理论情况，实际中由于锰铜材料的差异，其温度系数与理论值有一定差异，另外实际分流器等效电阻为锰铜电阻、电位端子和锰铜之间的过渡金属铜电阻的串联，而铜的温度系数约为锰铜温度系数的 100 倍以上，因此分流器的温度系数是以上因素综合的结果。

(3) 电流分布不均匀造成的影响。由于分流器安装整体结构的不完全对称、各锰铜棒焊接点接触电阻的差异、分流器端子安装各位置的接触电阻的不同，将使得电流在分流器中不均匀分布，随着时间的推移，这种不均匀分布可能会进一步变化，使得分流器电位端子输出电压发生变化，即分流器的误差发生变化。为了减小电流分布不均匀造成的误差：一种方法是减小电流端子和电位端子之间接头的截面积，另一种方法是增加几对电位端子，并通过均衡电阻将这些电位端子接在一起，如图 2-3 所示。后一种方法可使这种电流分布不均匀所引起的误差减小到 0.5% 以下。



图 2-3 有 3 对电位端子的分流器接线图

(4) 热电动势的影响。热电动势是低电平直流电压测量中最普遍的误差源。当连接不同温度、不同金属的电路时，就会产生热电动势。分析表明，各

种型式的测量直流大电流的分流器的热电动势可达到额定电压的 0.1%，特别是额定电压较小的分流器，该问题不容忽视。为了降低热电动势对分流器误差的影响，可采取以下措施。

1) 尽量减小分流器接触面的接触电阻。分流器的端子板和外壳接触部位镀银，减小大电流流通路径的电阻，降低接触部位的发热，从而减小两头端子板的温差。

2) 设计特殊的散热结构，降低分流器工作时的温升。

3) 合理选择电位端子和电压输出引线的材料。设计分流器时，最好将电流输入端子、电压输出端子和引线的材料均选择为铜，铜与铜之间的热电动势 $< 0.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，这样即可大幅度降低热电动势对测量误差的影响。

分流器只适宜测量 10 000A 以下的电流，对于测量 10 000A 以上的电流，虽然可采用多个分流器并联，但量具的体积会过分庞大，笨重，不仅在制作和安装方面带来比较大的困难，而且由于本身的重力影响，安装后分流器也很难保持原有的准确度。工业用分流器的准确度通常为 0.5 级。

2.1.2 饱和电抗器式直流电流传感器

交流电流互感器 (Current Transformer) 的发展已有一百多年的历史。铁心中的交流励磁磁通在二次绕组中感应的电压产生二次电流，一次被测电流与二次电流按匝数关系成比例。如果简单地将交流电流互感器应用于直流电流测量，会发现铁心被一次直流电流产生的磁通势激励至饱和，其二次绕组无法感应电压，当然更无法产生二次电流。如何利用铁心、绕组来进行直流电流的测量，人们进行了很多的研究。最早的饱和电抗器式直流电流互感器于 1936 年在德国问世，经过不断改进，准确度不断提高。

图 2-4 所示为一种饱和电抗器式直流电流传感器的接线图，该传感器有铁心 I 和铁心 II 两个铁心。两个铁心上均绕有匝数相等的二次绕组，匝数为 W_2 。被测一次直流电流为 I_1 ，一次匝数为 W_1 。两个铁心的一次绕组为正向串联，二次绕组反向串联。 u_2 为二次电路辅助交流电源的输出电压， i_2 为二次电流。由于整流桥的整流作用，流过负载电阻 R 的电流为直流电流，并与一次电流成比例关系。

以二次电流 i_2 的方向作为正方向，相应两个铁心磁通 (用 Φ_I 和 Φ_{II} 表示) 的方向则根据电流 i_2 按右手螺旋定则来确定。

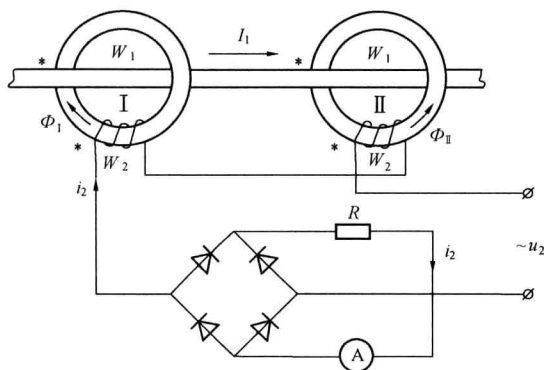


图 2-4 一种饱和电抗器式直流电流传感器接线图

为了简化分析，首先假设：

(1) 二次电路的内阻抗等于零，即认为二次绕组的内阻、漏感和负载阻抗都很小，可以忽略不计。

(2) 铁心具有理想的磁特性曲线，即铁心不存在损耗，磁化曲线为直角形状，如图 2-5 所示，即使在无限小的磁场强度下，磁特性曲线就开始饱和。高磁导率的铁心具有接近理想磁特性的性质。

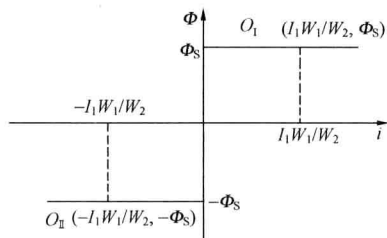


图 2-5 单个铁心的理想磁化曲线

在上述假设条件下，辅助交流电路的电压方程为

$$u_2 = - \frac{d\Phi_I}{dt} - \frac{d\Phi_{II}}{dt} \quad (2-2)$$

式中 Φ_I ——铁心 I 上二次绕组所交链的磁链，Wb；

Φ_{II} ——铁心 II 上二次绕组所交链的磁链，Wb。

设辅助电源电压为

$$u_2 = U_m \sin \omega t \quad (2-3)$$

式中 U_m ——交流辅助电压的峰值, V;

ω ——交流辅助电压的角频率, rad/s。

将式 (2-3) 代入式 (2-2), 求得稳态情况下两个二次绕组的总磁链

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_{II} = \frac{U_m}{\omega} \cos \omega t \quad (2-4)$$

由此可见, 在上面假设条件下, 不论两个铁心磁化过程如何, 在稳态情况下, 两个二次绕组总的磁链数应按与电源同频率的余弦函数变化。

在 Φ 已知条件下, 由于两个二次绕组所交链的磁链并不一定均匀分配 (即 $\Phi_I \neq \Phi_{II} \neq \frac{1}{2}\Phi$), 因此, 一般来说, 只能根据两个铁心的综合磁特性曲线用作图法来求出 $i_2(t)$ 的波形曲线。

如图 2-5 所示, 在恒定电流 I_1 的磁化作用下, 铁心 I 的静态工作点位于磁特性曲线 O_I ($I_1 W_1 / W_2, \Phi_s$) 位置; 铁心 II 的静态工作点位于磁特性曲线 O_{II} ($-I_1 W_1 / W_2, -\Phi_s$) 位置。对于二次交流电路来说, 我们关心的是两个铁心磁通的交变分量, 因此将两个铁心的静态工作点 O_I 和 O_{II} 移至原点位置, 并将这两个铁心动态磁特性曲线 $\Phi_I(i)$ 、 $\Phi_{II}(i)$ 对应于同一横坐标的数值相加, 便可得到综合的动态特性曲线 $\Phi_{I+II}(i)$, 如图 2-6 所示。

根据图 2-6 可以看出两点:

(1) 在理想情况下, 二次电流经过整流后, 在任何瞬时值都满足下列关系式: $i_2 = I_1 W_1 / W_2$ 。如果 I_1 增大, 相应 i_2 也必然增大。因此一次电流的变化在二次电路里可以再现。

(2) 在这种理想情况下, 不论辅助交流电压和磁链的波形曲线如何, 只要波形对横轴对称且半个周期内不过零点, 二次电流总是矩形波, 且 $i_2 = I_1 W_1 / W_2$ 总是成立的。因此, 饱和电抗器式直流电流传感器的读数在很大程度范围内与辅助电压的频率和波形无关。

值得注意的是, 这种直流传感器对交流辅助电压的幅值有一定限制。如果交流电压的幅值太大, 使得磁链 Φ_i 的变化幅值超过铁心饱和时磁链 Φ_s 的两倍, 即 $\Phi_m > 2\Phi_s$, 两个铁心就有可能同时达到饱和, 这样二次绕组将不产生电动势, 二次电流 i_2 只受到二次绕组漏阻抗和负载阻抗的限制而会突然增大, 破坏了正常情况下一、二次电流的比例关系。所以辅助交流电压必须满足:

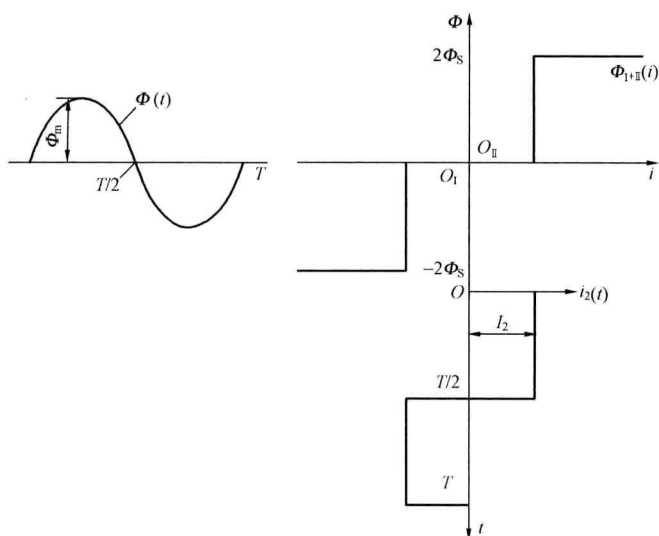


图 2-6 理想综合动态磁特性曲线

$\Phi_m < 2\Phi_s$ 。考虑到式 (2-4) 可以得到

$$U_m < 4\pi f W_2 S B_s \quad (2-5)$$

式中 S ——铁心截面积, m^2 ;

B_s ——铁心饱和磁感应强度, T。

一般选择辅助交流电压应满足下面条件

$$1.5\Phi_s < \Phi_m < 1.8\Phi_s \quad (2-6)$$

这种测量装置的特点是性能稳定, 功率消耗较小 (与分流器相比), 能承受较大的负载; 缺点是该互感器只能测量直流, 易受外磁场影响, 线性度差, 在量程 50% 以下难以满足准确度的要求, 故只适合于在工业测量中使用。

为了保证直流传感器具有足够的准确度, 它的尺寸是随被测电流的增大而增大的。对于额定电流较大的互感器, 为了使铁心尺寸不过分加大, 被测电流所产生的磁通势, 其中大部分用另一补偿绕组通过直流予以补偿。补偿绕组直流由辅助交流电路供给, 或者用另一独立直流电源供给。这样做不仅可以减小铁心尺寸, 而且可以提高测量准确度。现在采用这种方法制成的直流互感器的误差可以降低到 0.1%, 甚至可达 0.01%。补偿式直流传感器一直是直流传感器发展的一个重要途径。

2.1.3 霍尔变换器式直流电流传感器

被测直流电流产生的磁场的大小可以表征被测电流的大小，而磁场大小可以通过霍尔变换器来测量。霍尔变换器的原理如图 2-7 所示。

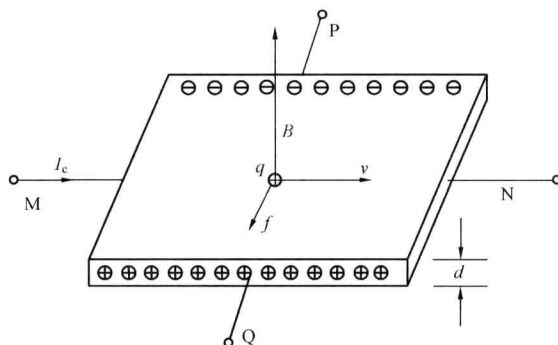


图 2-7 霍尔变换器原理图

载流半导体在磁场中会产生霍尔电动势，如图 2-7 所示。当在霍尔半导体薄片的两个极 M、N 上加电压，施加一个控制电流 I_c ，半导体薄片的垂直方向再加上磁场 B ，半导体载流子（电子和空穴，图 2-7 中以空穴为例）由于受到洛伦兹力 f 的作用，在薄片的两个较长的边不断积累电荷，其中一边为正电荷，另一边为负电荷，于是就形成霍尔电场。该电场对载流子也产生力的作用，此时的载流子不但受到洛伦兹力，而且还受到霍尔电场的相反力作用，载流子在这两个力的作用下最终达到稳定状态。此时半导体薄片两个长边（P、Q 两个电极所对应的边）所呈现的电动势称之为霍尔电势，在理想情况下为

$$U_h = R_h B I_c / d \quad (2-7)$$

式中 U_h —— 霍尔电势，V；

R_h —— 霍尔效应系数， $V \cdot m / (T \cdot A)$ ；

B —— 磁感应强度，T；

I_c —— 外加控制电流，A；

d —— 霍尔片的厚度，m。

由式 (2-7) 可知霍尔变换器的灵敏度，即电磁灵敏度为

$$S = U_h / (B I_c) = R_h / d \quad (2-8)$$

它表示在单位磁感应强度和单位控制电流下霍尔电势的大小，单位为

$V/(A \cdot T)$ 。式(2-8)表明霍尔变换器的霍尔系数越大,半导体片的厚度越薄,电磁灵敏度越高。霍尔片的制造过程中,通常采取减小厚度来增加电磁灵敏度。

霍尔变换器的种类很多,灵敏度为 $(0.5 \sim 100) V/(A \cdot T)$ 。

在大电流测量中,人们关心的是霍尔变换器对磁感应强度的灵敏度,即磁灵敏度。它表示在某一控制电流下,霍尔电势与磁感应强度的比值。一般锗和硅霍尔变换器的控制电流为 $5 \sim 50 \text{mA}$,砷化镓和锑化镓霍尔变换器的控制电流为 $100 \sim 400 \text{mA}$ 。大批量生产的霍尔变换器,磁灵敏度一般在 $(0.1 \text{V/T}$ 至几伏/T) 范围内。

霍尔变换器的转换准确度受以下几个因素的影响。

(1) 不等位电动势。由于变换器两个侧面的霍尔电极不对称、变换器形状不对称和材料不均匀,控制电流将在霍尔电极产生不等位电动势。霍尔变换器不等位电动势的数值可能在 $100 \mu\text{V}$ 以下。

(2) 热电动势。由于材料不均匀,沿半导体薄片的热量分布不一致,因此在霍尔电极之间存在温差,进而引起了热电动势。

(3) 干扰电动势。霍尔片内部载流子浓度局部起伏,温度分布随时间、空间变化等原因所引起。

说明:以上三种电动势统称为剩余电动势,其依赖于变换器结构和制造工艺,可能有几百微伏到几十毫伏,且与控制电流大小有关。剩余电动势的技术指标通常以它与控制电流的比值来描述,在大批量生产中,这个比值大致为 $0.001 \sim 0.4 \Omega$ 。

(4) 非线性特性。霍尔变换器的磁灵敏度与磁感应强度大小有关,该非线性特性与霍尔片的材料性质和几何尺寸相关,其造成的线性误差可能达到 0.5% 。

(5) 外磁场影响。外界干扰磁场的作用,使得霍尔变换器产生测量误差,所以必须对其进行合理的磁屏蔽以降低外磁场影响。

(6) 温度影响。霍尔变换器的霍尔系数、剩余电动势都与温度密切相关,因此霍尔变换器存在着较大的温度误差。对于较好的霍尔变换器,其温度系数大致在 $(100 \sim 200) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

将一个热敏电阻并联到输入电极,或者与变换器负载相串联,可以减小温度变化对测量的影响。因为霍尔电势与温度存在着非常复杂的关系,因此在宽