

自动化丛书

带霍尔变送器 及磁阻变送器的装置

[苏联] B. H. 鲍戈马洛夫著 張先尧 叶新安译

上海科学技术出版社

帶霍尔變送器 及磁阻變送器的裝置

〔蘇聯〕B. H. 鮑戈馬洛夫 著

張先堯 叶新安 譯

上海科學技術出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书介紹了有关霍尔效应和磁阻效应的知識,以及这些效应的变送器的基本特性。本书还介紹了制造变送器所用的最新材料的一些数据。因此,在某种程度上,本书可以当作一本手册来使用。

本书可供从事自动化工作的工程技术人员閱讀。对有关专业的高等学校师生,也有参考价值。

УСТРОЙСТВА С ДАТЧИКАМИ ХОЛЛА И ДАТЧИКАМИ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

В. Н. Богомолов

Госэнергоиздат • 1961

自动化丛书(45)

带霍尔变送器及磁阻变送器的装置

張先尧 叶新安 譯

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海市印刷六厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 5 18/32 排版字数 121,000

1965 年 3 月第 1 版 1965 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—9,000

統一书号 15119·1785 定价(科六) 0.65 元

原 序

自从 1949 年出现半导体管以后,就立即着手改进高纯度物质的提纯工艺。同时还发现高纯度的半导体物质具有一些特有的性质。例如,经过提纯物质的,其中所发生的某些物理现象就极为显著,因而能够利用这些现象来制成一些仪器,解决许多实际问题。霍尔效应和在磁场中电阻发生变化的效应(或称磁阻效应^①),就属于这一类现象。

霍尔效应是 1879 年发现的^[1]。它的基本概念是:如果把通有电流 I 的导体放在磁场强度为 H 的磁场中,而磁场方向又垂直于电流方向,那么在垂直于电流与磁场的方向上,就会产生一个正比于电流和磁场强度的电动势(参阅图 1):

$$U_x \propto IH$$

了解这个现象之后,就可以提出一个这样的机构:在一个线圈中通以电流 I' 以产生磁场,在此线圈的磁场中,放置一个通有电流 I 的导体。于是,在导体的两侧就产生一个电压

$$U_x \propto II'$$

这种机构就是最简单的乘法环节,而且也是霍尔效应的大多数工程应用的基础。在电工学、无线电工程、自动装置、计算技术和测量仪器等等中,两个电量相乘的运算是很多问题的基础。在上述技术领域,处处均可利用霍尔效应乘法环节;至少,从原理上说是可以利用的。由于以下原因,这种元件的应用愈来愈广。第一,利用霍尔效应的乘法机构非常简单。第二,它没有接点也没有运动部分,对于机械作用比较稳定。第三,使用寿命极长。第四,动态范围很大和准确度高。

① 本书所指“磁阻”并非导体所表现的磁阻(磁导的倒数)。——校注

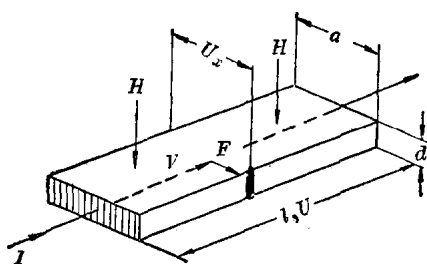


图 1

高。由于霍尔乘法环节的效率极低这个主要缺点，使它目前在求两量之积方面尚不能满足全部技术要求。为了在这个元件的输出端得到相当大的电压，就要求有很大的磁场。从发现霍尔效应时起，工程界就在如何利用这个效应的优点和克服其缺点——效率低的问题上努力。自从能够获得高纯度的半导体物质以后，在工程上就开始广泛采用霍尔效应。迄今为止，已在应用霍尔元件的利弊、困难及特点等问题上，积累了相当丰富的资料。适于制造变送器的物质日益增多，因而变送器的应用范围日广。同时，由于许多最新的技术部门不断出现，虽然霍尔变送器的效率较低，但在上述最新技术部门中使用此种变送器，不但使很多难题易于解决，而且使至今尚不能用其他方法解决的一些问题得到了解决。目前，对机械强度和可靠性的要求不断提高，这也是人们之所以重视霍尔效应元件的理由之一。

另一物理效应，就是导体的电阻在磁场中要发生变化的效应，或称磁阻效应。这种效应在工程装置中应用较少。然而，这种情况并非由于磁阻效应的优点比霍尔效应少，而是由于在应用磁阻效应方面尚存在一些技术上的困难。如果一个电阻的阻值可用磁场来调节，那确实是一定的益处的。不

妨回顾一下,大多数放大装置,例如,电子管或半导体管,同样是一些可以调节的电阻,但它们具有在电气上不能与控制信号隔离开来的缺点。这种效应的应用范围之一是产生电振荡和放大电流(其中包括直流),但必须把磁阻元件(变送器)保持在低温的条件下,这是它的应用受到限制的原因。虽然将霍尔变送器冷却也可以提高其效能,对磁阻变送器说来,冷却与否会严重影响到该效应的大小和能否将磁阻元件用到实际装置中去。

这两种效应都是近年来迅速获得实际应用的物理学上的成就。尽管目前这两种效应的应用范围已很广泛,但随着阐述这类现象的物理学,即固体物理学,特别是半导体物理学的继续发展,无疑将更加扩大霍尔变送器元件和磁阻变送器元件的应用范围。

目 录

原 序

第1章 霍尔效应和磁阻效应的物理原理	1
第2章 霍尔变送器和磁阻变送器	14
1. 霍尔变送器的形状和传递系数	16
2. 霍尔变送器的输入、输出电阻及接有外部负载时的工作 情况	23
3. 霍尔变送器的效率及其功率消耗	26
4. 不等位系数及其如何减小和进行温度补偿的方法	28
5. 整流系数	32
6. 热电干扰与热磁干扰	32
7. 抗扰系数	33
8. 电压灵敏度	36
9. 有关霍尔变送器连接方法的几个问题	39
10. 磁阻变送器	40
11. 变送器的稳定性	42
12. 霍尔常数、载流子迁移率与磁场强弱的关系以及提高霍 尔变送器及磁阻变送器准确度的方法	43
13. 变送器参数对温度的依从关系	46
14. 变送器的噪声及噪声的频率特性	47
15. 霍尔变送器及磁阻变送器的铭牌数据	49
第3章 制造霍尔变送器和磁阻变送器的材料、变送器制造工艺 概述	51
16. 晶体变送器	51
17. 薄膜式变送器	65
第4章 变送器的温度补偿和恒温	69
18. 当电压是输入信号时, 输入回路中的温度补偿	70

19. 当电流是輸入訊号时, 輸入回路中的温度补偿	72
20. 当电压是輸入訊号时, 輸出回路中的温度补偿	74
21. 当电流是輸入訊号时, 輸出回路中的温度补偿	75
22. 温度补偿綫路的选择	76
23. 霍尔变送器的串、并联温度补偿实例	77
24. 变送器的恒温	83
第5章 磁場	86
25. 外磁場	86
26. 电磁鉄的磁場	87
第6章 变送器与导磁体	93
第7章 带霍尔变送器的裝置的某些应用	98
27. 測量恒定、交变磁場或根据磁場来測量电流	98
28. 磁場梯度与磁場形状的測量	109
29. 直綫位移和角位移变送器	109
30. 磁化曲綫的測量, 存儲設備和磁記錄讀头	111
31. 放大直流与产生振蕩	112
32. 調制器与混頻器	114
33. 求若干个电量与磁量之和	115
34. 乘法裝置	116
35. 求两电量之比値	120
36. 平方和开方	121
37. 綫性(相敏)檢波器	123
38. 測量相位差	125
39. 測量功率	126
40. 功率方向继电器	128
41. 电、磁訊号頻譜的分析	129
42. 将直流轉換为交流	131
43. 回轉器	135
44. 将热能直接轉換为电能	140

第8章 几种应用磁阻变送器的装置	142
45. 倍頻器	143
46. 直流-交流轉換器	143
47. 以磁阻变送器为基础的放大器	148
48. 振蕩器	152
49. 帶磁阻变送器的桥式綫路	157
参考文献	159

第 1 章

霍尔效应和磁阻效应的物理原理

在发现电学定律和开始进行大电流实验后不久，就发现了作用在磁场中载流导体上的机械力。这个现象在动力工程的发展中起了巨大的作用。轻便而经济的电动机出现了；供给电动机的大功率能源——发电机也出现了。目前，很难想象工业部门不需要应用电机的动力。各种电机的原理不过是利用了一个简单的物理效应，即处于外磁场中的载流导体上作用着一个机械力。现在对这个现象已有足够的了解。产生这种现象是由于电流的磁场和外磁场相互作用的结果。电流通过导体是由于电荷（电子）在运动。如果把导体放在外磁场中，则磁场可以穿入导体的内部。于是，在静止导体中运动着的电子，也以平均速度 v 在磁场 H 中运动。同时，在每一个电子上将作用着一个垂直于磁场及速度矢量的力 $\mathbf{F}$ 。这种现象可用图 1 来表示。磁场越强，电子的速度越大，于是作用力也越大。这些量和它们的方向之间的关系可用下式来确定：

$$\mathbf{F} = \frac{e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}] \quad (1)$$

式中 e ——一个电子的电荷；

c ——光速。

引起电子沿导体运动的原因是电子受到某一个力，此力取决于导体上所加的电压 U 。这个电压在导体内产生电场，电子就在电场的作用下发生运动。电荷受电场和磁场所作用的合力，称为洛伦兹力。表达式(1)只是此力中与磁场有关的一部分。力 F 施加在每一个沿磁场中的导体运动的电子上，力的方向与电流方向成 90° 角。因此，电子就挤向导体的侧。但由于电子不可能跑出导体的范围，所以这些力最后就施加在导体上面。必须指出，如果电子挤向导体的侧，形成了电荷的积聚，那就会使负电荷过剩，因而在导体的横截面上产生电位差 U_x 。可以说，当电荷流过磁场中的导体时，导体上就作用着一个机械力，而且就在这个力的方向上产生了电位差。所有的电机都是建立在第一个现象的基础上的，而第二个现象就叫作霍尔效应，工程上应用霍尔效应就是建立在这个现象的基础上的。由此看来，这两个效应不过是同一物理过程(电子在磁场中运动)的两个方面。以第一个现象为基础的装置，在动力工程、测量技术等领域中已获得了广泛应用。第二个现象，即霍尔效应，只能用在能量问题不重要的装置中，因为它们所消耗的能量总是很少的。

如果说，在发现了作用于磁场中的载流导体上的机械力之后，电机就得到了迅速的发展，那末霍尔效应的工程应用则开始得较迟。要是注意一下这两种效应之间的一个重大差别，那末它们在应用上的不同遭遇也就一目了然。

我们认为，通过导体的电流 I 是 n 个电子以速度 v 运动的结果。于是可以写出

$$I \propto nev \quad (2)$$

现在，若将载有此电流的导体放入磁场 H 中，则在整个导体上将作用着等效力 F_x ，它等于各电荷所受力之总和：

$$F_x = n\mathbf{F} \propto ne[\mathbf{v} \times \mathbf{H}]$$

利用表达式(2), 則得

$$\mathbf{F}_x \propto [\mathbf{I} \times \mathbf{H}] \quad (3)$$

因此, 外磁場中的載流导体上的作用力, 除与外磁場的强弱有关外, 还与流过导体的电流有关。此力与导体的特性无关。不管导体中的电子是多还是少, 也不管电子运动起来是很困难还是很自由, 只要电流强度相同, 机械力就永远是相等的。电荷数量的减少可以用增大其速度的办法来补偿, 因为这时加大了作用在每个电子上的力。

現在我們就用同样的观点来研究霍尔效应。我們来探索一下: 电压 U_x 是如何形成的, 它可以由那些因素来决定? 当电流 I 流经处于外磁場中的靜止导体时, 以速度 v 运动着的电子将偏移到力 F 的方向上去, 直到积聚了一定的同名电荷, 同时它們所产生的排斥电子的力等于或大于驅使电子到此处的力时为止。这时, 对每个电子而言, 洛伦兹力的磁場力部分(1)被其电場力部分(即靜电排斥力)所平衡。同时, 在导体内部所有的电子都受到电場 E_x (即单位距离上的电位差)的作用

$$E_x = \frac{U_x}{a} \quad (\text{参閱图 1})$$

在靜电場中, 作用在电荷上的力是 eE_x 。于是, 当两力平衡时, 即有

$$e\mathbf{E}_x = \frac{e}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{H}]$$

因为这两力的方向一致, 故

$$E_x = \frac{1}{c} v H \quad (4)$$

霍尔效应就可以用这个公式来表示。

比較式(3)与(4)就可以說明机械力效应与霍尔效应的差別。霍尔效应的大小与电流无关,仅由电子在导体中运动的速度来决定。后面这一点有两个方面的重要意义:第一,它能說明为什么在克服了一定的困难之后就可以用这个效应来解决一些技术問題;第二,它便于鉴定霍尔元件的性能。电子在导体中的速度越大,則霍尔电动势也就越大。現在并不能說导体的材料可以是任意的。从式(2)可知,当电流相等时,若某导体中参与导电的电子数較多,則其电子的速度要比另一电子数較少的导体中的电子速度低一些

$$I \propto n v e$$

因此,当磁場中两不同导体的电流相等时,其机械力相等,而霍尔电压却不同。由于很难找到一种物质,其中电子可高速运动(即其电子极其活潑),故使如何在工程上采用霍尔效应的問題复杂起来了。

为了便于选择合用的材料,特引入載流子迁移率的概念。在某一具有一定載流子(电子)濃度的导体中,电流与电子运动速度均取决于这个导体上所加的电压 U 及导体电阻 r_r 的大小;因此,要說出霍尔效应大不大是有困难的。如果知道每一种导电物质的載流子迁移率,即电子在电压作用下运动的能力,那末就容易选定所需的物质。

在常温下,导体中的电子以各种不同的速度进行着不規則的热运动。然而,如果在导体內形成一电場 E ,則所有的电子将以某一平均速度 v 沿該电場的方向运动。这个速度与該导体內的电場强度之比称为載流子迁移率

$$\mu = \frac{v}{E} \text{ 厘米}^2/\text{伏} \cdot \text{秒} \quad (5)$$

迁移率的大小,取决于电子在运动时与固体晶格碰撞的

頻繁程度、这些晶格的结构以及晶格被杂质破坏的程度等等。必須着重指出，霍尔电动势的数值很大并不意味着該物质的霍尔效应强及該物质适合在工程上采用。提高速度，即增大施于导体上的电场 E 或电压 U （因而要消耗很大的电功率），就可以得到很大的电动势。同时在其他材料中，由于其中载流子迁移率較大，故得到同样的霍尔电动势和同样的载流子迁移速度，所花费的能量要小得多。就制作霍尔电动势变送器这类工程应用來說，后面这种物质就更为优越一些。現在我們常常用迁移率的概念来代替电子运动速度的概念，在某种意义上迁移率是一个相对的概念。总之，为了能在工程上应用霍尔效应，需要载流子迁移率很高而能量上又最经济的物质。

从导体中电荷轉移过程的这个简单概念出发，可得出霍尔效应的定性的概念。电荷轉移的概念虽然简单，但对于正确地导出我們所需的一些結論來說，是完全足够的。因此，現在要推出一些公式，以便从定量方面来評价某些采用霍尔效应的装置的性能和对这些装置进行計算，就比較容易。

我們再来研究一下图 1。如在导体上加以电压 U ，便有一个相应的电流 I 流經此导体。电子以平均速度 v 运动着。在磁场 H 中，在电子上作用着力 F ；同时，霍尔电场 $E_x = \frac{vH}{c}$ [参閱式(4)]又要产生一个静电排斥力。最后，力 F 要与静电排斥力平衡。現在，就用电压 U 和迁移率 μ 来表示电场 E_x 和平均速度 v 。在图 1 中， l 、 a 与 d 均表示导体的尺寸。于是迁移率 $\mu = \frac{v}{U/l}$ ，而霍尔电动势 $U_x = E_x a$ 。現在式(4)可写成

$$\frac{U_x}{a} = \frac{\mu U}{lc} H$$

或

$$\frac{U_x}{U} = \frac{\mu H}{c l/a} = k' \quad (6)$$

在給定的磁場值及一定的导体尺寸之下，所得电压与外加电压之比称为傳遞系数；这种連同接点及导綫在内的整个装置，則称为霍尔变送器。在推导式(6)时，沒有考虑接点对霍尔电动势的影响，因为我們暂时认为 $l/a \gg 1$ 。如果注意到霍尔变送器的主要用途是一个电的乘法环节，那末傳遞系数也就是轉換系数。虽然这两个名称各有某些特点，但它們是等效的。根据式(6)，我們能够将两个电量相乘(磁場或与其对应的电流乘上电压或与其对应的电流)，而且求得的结果也可用电压或电流的形式表示出来。如果现在来估計霍尔变送器的效率，那末就发现它与迁移率(它是决定某物质是否能作霍尔变送器的一个主要特性)的平方有关。式(6)是今后评价和計算帶霍尔变送器的装置的基本公式。为方便起见，也常用輸入电流 I ，磁場 H 和霍尔常数 R 来表示所得的霍尔电压。

因为 $U \propto I$ ，所以可把霍尔电动势的表达式写成

$$U_x = A_0 I H \quad (7)$$

式中， A_0 为比例常数。

电流 I 是单位体积中电荷数 n 、平均速度 v 和电荷所通过的面积(ad)之积

$$I = envad \quad (8)$$

現在式(7)可写为

$$U_x = A_0 envadH$$

将此式与式(6)

$$U_x = k' U = U \mu H \frac{1}{c l/a}$$

比較,則得

$$A_0 = \frac{1}{encd} = \frac{R}{d}$$

这里, R 称为霍尔常数, 它仅与物质性质和载流子的浓度 n 有关,

$$R = \frac{1}{enc} \quad (9)$$

$$U_x = \frac{1}{d} R I H \quad (10)$$

然而, 大量电子在磁场中以平均速度 v 运动, 是产生霍尔电动势的主要原因。对适合作霍尔变送器的大多数高迁移率物质而言, 若准确地求出电子的平均速度, 则霍尔常数具有如下的形式

$$R = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{enc}$$

以后, 我们将此修正值略而不计, 因为在采用霍尔变送器时, 通常并不利用迁移率及霍尔常数的计算值, 而是利用在测量变送器参数时所得出的迁移率及霍尔常数值。图 1 所示霍尔变送器的电阻, 可以按下式计算

$$r_x = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{ad} \quad (11)$$

因此容易证明, 电导率为

$$\sigma = \frac{\mu}{R} \quad (12)$$

如果式(6)与(10)中的各量以实用单位表示之, 则

$$k' = \frac{U_x}{U} = \frac{\mu [\text{厘米}^2/\text{伏} \cdot \text{秒}] \cdot H [\text{奥}]}{l/a} \cdot 10^{-8} \quad (13)$$

$$U_x [\text{伏}] = R [\text{厘米}^3/\text{库仑}] I [\text{安}] H [\text{奥}] \cdot \frac{10^{-8}}{d [\text{厘米}]} \quad (14)$$

若已知给定物质的迁移率或霍尔常数，就可以利用这些公式来评价霍尔变送器的性能。

在任一载流子迁移率不为零的导体中，在一定的条件下都能产生霍尔电动势。甚至在金属中也有这种电动势。例如，在电机工作时其绕组中总是要产生霍尔电动势的。不过，迁移率越大，导体上的外施电压（此电压决定着电子的速度）越大，则电动势之值也越大。为了能在导体上施加大电压，就必须使变送器的电阻尽可能大一些。在兼有最大迁移率和最大电阻的物质上，可以获得最大的霍尔电动势。

有很多半导体可以满足这一条件。它们的室温迁移率达到数万厘米²/伏·秒，而电导率仅为几个欧⁻¹·厘米⁻¹的数量级。大多数金属的迁移率最多只有几十厘米²/伏·秒，而电导率比半导体高好几个数量级，因为在金属中载流子浓度很大。由于霍尔常数与载流子浓度成反比，所以这就表明金属的霍尔常数很小。另一方面，绝缘体的霍尔常数很大，但它往往不适于用作霍尔变送器，因为绝缘体中的载流子迁移率实在太小了。现有的绝大多数带霍尔变送器的装置都是半导体制成的。把含有杂质的半导体高度提纯，既可降低其载流子浓度和提高它的电阻，同时也把它的迁移率增大了。

由于迁移率和霍尔常数对温度有很大的依从关系，就给工程上应用霍尔效应造成了很多困难。不解决温度对变送器参数影响的问题，大多数带霍尔变送器的装置就不可能实现。当用它们来求电压和磁场值的乘积时 [参阅式(13)]，迁移率对温度的依从关系起着主要作用。如果要求电流和磁场强度的乘积时 [参阅式(14)]，则霍尔常数对温度的依从关系起着主要作用。一般说来，霍尔变送器材料的电阻率随温度而变化的变化并不严重，但有时亦须注意到