

研  
究  
开  
发

## 霍尔元件在电流传感器中的应用

米哲涛, 曹 雷

(宁波南车时代传感技术有限公司, 浙江 宁波 315021)



作者简介: 米哲涛(1981-), 男, 工程师, 主要从事电流传感器的研发工作。

**摘要:** 以霍尔效应为出发点, 从霍尔元件的结构、驱动电路、技术参数、引脚及霍尔铁心的配合关系展开, 并结合实例进行佐证, 详细叙述了霍尔元件在电流传感器应用中的关键顶点, 为电流传感器设计中霍尔元件的应用提供了参考。

**关键词:** 霍尔效应; 霍尔元件; 技术参数; 电流传感器; 电磁感应

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2011)01-0032-04

## Hall Element Used in the Current Sensor

MI Zhe-tao, CAO Lei

(Ningbo CSR Times Transducer Technique Co., Ltd, Ningbo, Zhejiang 315021, China)

**Abstract:** This paper took the Hall effect as a starting point to expound relationship of the Hall element structure, the driving circuit, the technical parameters, the pins and Hall iron core. At the same time, it cited living instances to perform verifications, further more, the key points about the application of the Hall in circuit sensor were presented. This paper provides the references to the application of Hall elements in circuit sensor design.

**Key words:** Hall effect; Hall element; technical parameter; current sensor; electromagnetic induction

## 0 引言

霍尔电流传感器是一种磁敏传感器, 具有精度高、响应时间快、可靠性高等优点, 在轨道交通、工业变频及电力行业等领域应用广泛。

霍尔电流传感器经历了电-磁-电的转换过程。载流导体通过电流, 在其周围会产生正比于该电流的磁场, 用霍尔元件来测量磁场, 可得到正比于该磁场的霍尔电势, 通过测量霍尔电势的大小来间接测量电流的大小。

作为霍尔电流传感器的核心器件之一的霍尔元件起着非常重要的作用。本文以霍尔效应为出发点, 对其技术参数与应用要点展开叙述。

## 1 霍尔效应

在半导体薄片两端通霍尔电流  $I_c$ , 并在薄片的垂

直方向施加磁感应强度为  $B$  的磁场, 则在垂直于电流和磁场的方向上, 将产生电势差为  $V_H$  的霍尔电压, 霍尔电压  $V_H$  与霍尔电流  $I_c$  及磁感应强度  $B$  的乘积成正比, 见式(1)。霍尔效应示意图如图1所示。

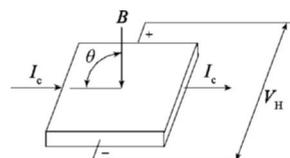


图1 霍尔效应示意图

$$V_H = K I_c B \quad (1)$$

式中:  $K = R_H / d$ ,  $K$  称为灵敏度,  $R_H$  称为霍尔系数, 由半导体材料的性质决定,  $d$  为半导体材料的厚度。

## 2 霍尔元件结构

霍尔元件由衬底、十字形霍尔元件、电极引线及磁性体顶端等构成(见图2)。十字形霍尔元件4个端部的引线, 有一对是电流输入端, 另一对为霍尔电压输出端; 铁磁体顶端起集中磁力线和提高元件灵敏度的

作用, 它的体积越大, 元件的输出灵敏度越高。

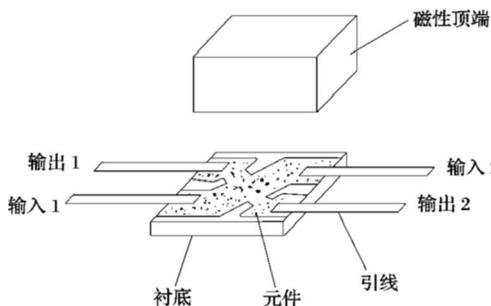


图 2 霍尔元件内部结构

半导体材料 Ge(锗)、Si(硅)、InSb(锑化铟)、InAs(砷化铟)、GaAs(砷化镓) 等都用来制作霍尔元件, 比较常用的有 InSb 与 GaAs。常用的霍尔元件其外形结构有 3 种: 单端引出线型、卧式型、双端引出线型(见图 3)。

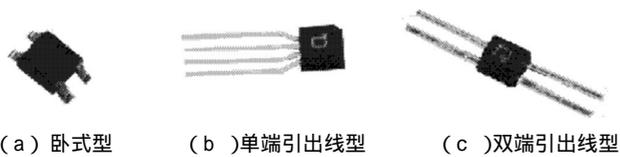


图 3 霍尔元件外形

### 3 霍尔元件驱动电路

霍尔元件驱动电路有恒流与恒压 2 种方式(见图 4)。恒流驱动电路是流过元件输入端电流保持恒定的电路, 恒压驱动电路是元件输入端的电压保持恒定的电路。

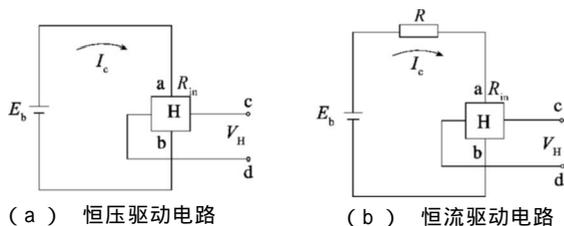


图 4 霍尔驱动电路

恒压驱动电路的主要特点: 施加在霍尔元件输入端的电压  $E_b$  恒定不变, 但霍尔电流  $I_c$  会发生变化, 霍尔电压  $V_H$  的温度变化大。

恒流驱动电路的主要特点: 霍尔串联电阻  $R \gg R_{in}$  时, 霍尔电流  $I_c$  恒定, 当元件间电压发生变化时, 霍尔电压  $V_H$  变化大。

### 4 技术参数

霍尔元件的主要参数有: 输入内阻  $R_{in}$ 、输出内阻  $R_{out}$ 、霍尔电流  $I_c$ 、霍尔电压  $V_H$ 、功耗  $P_D$ 、霍尔偏置电压  $V_{0s}$  及温度系数  $\alpha_{VH}$  等。InSb(锑化铟) 与 GaAs(砷化镓) 材料的霍尔元件应用中要注意以下几点:

GaAs(砷化镓) 材料的霍尔元件恒流驱动时  $\alpha_{VH}$  小, InSb(锑化铟) 材料的霍尔元件在恒压驱动时  $\alpha_{VH}$  小;

设计时, 根据器件降额准则,  $I_c$  设置为极限值的

$$1/2 \text{ 左右 } I_c = V_H / R_d;$$

$V_H$  参数是在特定测试条件下给出的, 应用条件不同时, 可能会大于给出的范围;

$P_D$  不能超过极限要求, 设计时, 其计算公式为  $P_D = I_c^2 R_d$ ;

$V_{0s}$  越小, 霍尔元件测量精度越高;

元件的工作与储存温度应大于电流传感器的技术参数要求。

特性	额定值
霍尔电流 $I_c$	20 mA
工作温度 $T_A$	-40 ~ +110
储存温度 $T_{atg}$	-40 ~ +125

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值
输入电阻 $R_{in}$	$I_c=0.1 \text{ mA}$ $B=0 \text{ T}$	240		450
输出电阻 $R_{out}$	$I_c=0.1 \text{ mA}$ $B=0 \text{ T}$	240		450
霍尔电压 $V_H$	$B=50 \text{ mT}$ , $V_c=1 \text{ V}$ , 恒压驱动	122 mV		274 mV
偏置电压 $V_{0s}$	$V_c=1 \text{ V}$ $B=0.1 \text{ T}$	-12 mV		+12 mV
$V_H$ 的温度系数 $\alpha_{VH}$	$B=50 \text{ mT}$ , $V_c=1 \text{ V}$ $B=50 \text{ mT}$ , $I_c=5 \text{ mA}$		-0.2%/ -1.8%/	

特性	额定值
霍尔电流 $I_c$	直流, 10 mA 1s, 15 mA
功耗 $P_D$	150 mW
工作温度 $T_A$	-55 ~ +125
储存温度 $T_{atg}$	-55 ~ +150

可能会大于规定参数的范围, 对使用 THS119 的电流传感器进行测试发现: 测试电流到 600 A 时(见表 5), 霍尔输出  $V_H$  与  $I_p$  仍有良好的线性关系, 因此判断霍尔元件 THS119 在 300 mV 仍能正常工作, 远大于参数中的 140 mV。

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值
输入电阻 $R_{in}$	$I_c=5 \text{ mA}$	450		900
输出电阻 $R_{out}$		450		1 350
霍尔电压 $V_H$	$I_c=5 \text{ mA}$ $B=0.1 \text{ T}$	55 mV		140 mV
$V_H$ 的温度系数 $\alpha_{VH}$	$B=50 \text{ mT}$ , $V_c=4 \text{ V}$ $B=50 \text{ mT}$ , $I_c=5 \text{ mA}$		-0.2%/ -0.06%/	

测试电流 $I_p / \text{A}$	200	400	600	800	1 000
霍尔输出 $V_H / \text{mV}$	99.77	199	299	414.8	500

### 5 引脚定义

霍尔元件的引脚定义一般分 2 种情况, 见图 5 示。元件引脚定义与图 5(a) 相同的, 其电流输入端 1、3 脚

在电路中可按照图6 所示2种接法进行连线;元件引脚定义与图5(b)相同的,其1、3脚连线只能按图6(a)情况进行连线。

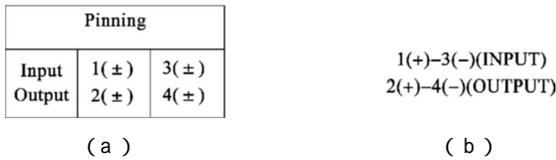


图5 引脚定义

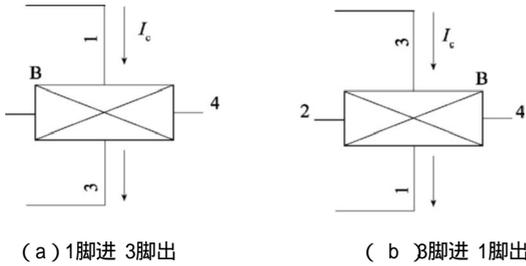


图6 霍尔元件输入端接线方式

注意:霍尔元件2、4输出的电压高低由霍尔电流 $I_c$ 方向与测量电流产生的磁场方向共同决定。

对使用THS119的电流传感器进行试验,试验后发现: $I_c$ 由3脚进1脚出(与引脚定义相反)进行连线时,电流传感器直流输出正常,交流输出波形则存在反向现象,见图7。

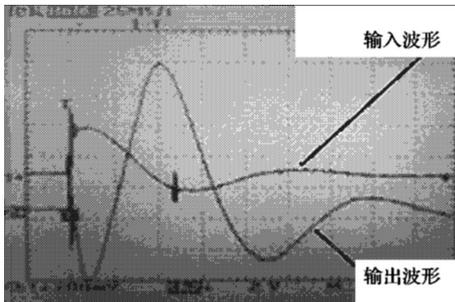


图7 交流输入特性

## 6 霍尔与铁心的装配

### 6.1 霍尔与铁心气隙数量

一般情况下,电流传感器铁心气隙开孔数与霍尔元件的使用数一一对应。霍尔元件的使用数量直接取决于电流传感器的原理。

直放式电流传感器(如图8)应用中霍尔元件是磁场检测器,它检测的是铁心气隙中的磁感应强

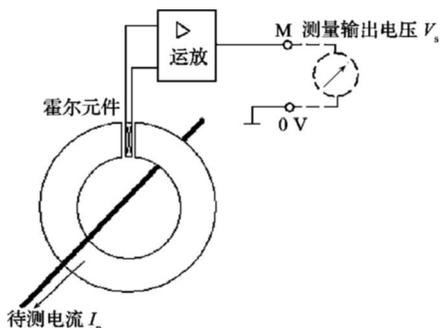


图8 直放式电流传感器

度。电流增大后,铁心可能达到饱和,随着频率升高,铁心中的涡流损耗、磁滞损耗也会增加,这些直接影响了传感器的测量精度。为此,通过多个霍尔并联来避免。

零磁通式电流传感器(如图9)应用中霍尔元件处于零磁通状态,铁心中的磁感应强度极低(理想状态为0),铁心不会饱和,涡流损耗及磁滞损耗也很小。实际应用中,霍尔元件与铁心气隙数量常常只需要一个就够了。

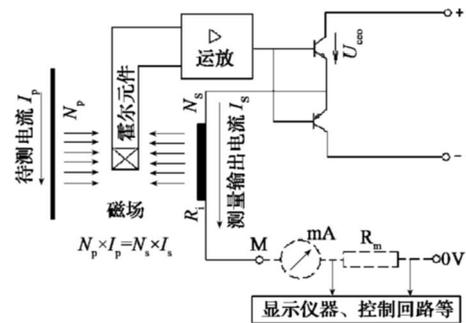


图9 零磁通式电流传感器

### 6.2 多霍尔并联方案

霍尔元件并联使用时,相当于霍尔各自的输出电压和输出电阻串联之后再并联,见图10所示。

根据戴维南定理分析,C、D开路时, $I=(V_{H1}-V_{H2})/(R_1+R_2)$ ,因此并联后的霍尔输出 $V_H$ 满足关系式:

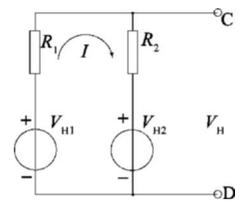


图10 双霍尔并联式

$$V_H = V_{H2} + R_2(V_{H1} - V_{H2}) / (R_1 + R_2) \quad (2)$$

在霍尔元件规格相同、输出电阻离散性很小的情况下,近似有 $R_1=R_2$ ,公式(2)可简化为:

$$V_H = (V_{H1} + V_{H2}) / 2 \quad (3)$$

由双霍尔并联得知,并联后的霍尔输出为2个霍尔输出的平均值。推而广之,多霍尔并联,并联后的霍尔输出为多个霍尔输出的平均值。

#### 1) 电流产生的磁场分布

由安培定律可知,通过载流导体的测量电流 $I$ 产生的磁场部分如图11所示,距离导体越远则磁场感应强度 $B$ 越小。

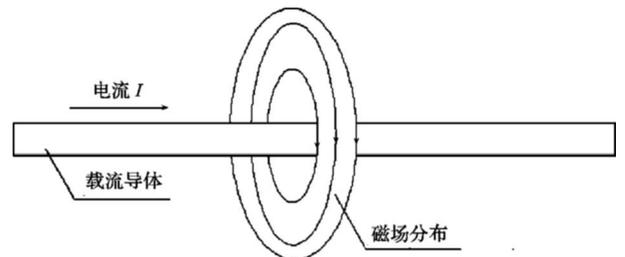


图11 通过载流导体的电流 $I$ 产生的磁场分布

#### 2) 霍尔元件朝向

测量电流方向一定时,其感应的磁场方向一定。

由霍尔效应可知, 磁场方向一定的情况下霍尔输出只受霍尔电流  $I_H$  方向影响。而霍尔电流  $I_H$  方向除与电流输入端引脚定义连线有关外, 还受霍尔元件朝向影响。

测量电流方向与霍尔元件放置按图 12 所示时, 其霍尔输出电压端 2 脚电位高于 4 脚电位; 在不改变电流方向, 霍尔元件标识面位于引脚右侧时, 其霍尔输出电压端 2 脚电位低于 4 脚电位。

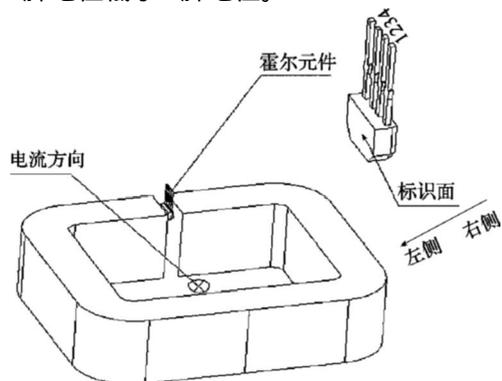


图 12 霍尔元件面朝向

测量电流方向与图 12 相反, 霍尔元件标识面在引脚左侧时, 其霍尔输出电压端 2 脚电位低于 4 脚电位; 不改变电流方向, 霍尔元件标识面在霍尔引脚右侧时, 其霍尔输出电压端 2 脚电位高于 4 脚电位。

### 3) 同侧与异侧方案选择

霍尔元件在铁心同侧及异侧如图 13 示, 同侧主要应用在输入电流小或穿心孔宽度小的场合, 异侧主要应用在输入电流大或穿心孔宽度大的场合。母排移动示意图如图 14 所示。

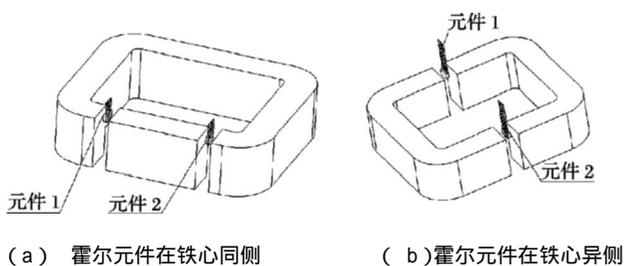


图 13 霍尔气隙方案

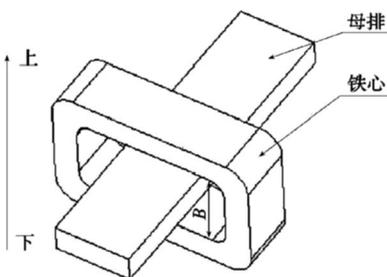


图 14 母排移动示意图  
B —— 穿心孔宽度

下面对 2 个方案进行验证。

方案一: 长度 = 44.5 cm, 宽度 = 25.5 cm, 测试结果见表 6。

表 6 电流传感器性能测试

参数	输入电流 / A		
	1 500	2 000	2 500
传感器标准输出 / V	4.00	5.33	6.66
母排移动到上部顶端, 传感器输出 / V	3.98	5.19	6.05
母排移动到下部低端, 传感器输出 / V	3.97	5.07	5.78
上下输出差异 / V	0.01	0.12	0.27

方案二: 长度 = 44.5 cm, 宽度 = 35.5 cm, 测试结果见表 7。

表 7 电流传感器性能测试

参数	输入电流 / A		
	1 500	2 000	2 500
传感器标准输出 / V	4.00	5.33	6.66
母排移动到上部顶端, 传感器输出 / V	4.02	5.10	5.95
母排移动到下部低端, 传感器输出 / V	3.96	4.78	5.34
上下输出差异 / V	0.06	0.32	0.61

方案一与方案二采用相同的气隙尺寸、穿心孔长度, 不同的穿心孔宽度, 见图 15。从表 6、表 7 可以看出, 母排上下移动时, 穿心孔宽度越大, 其上下输出差异越大, 与传感器标准输出差距越大。

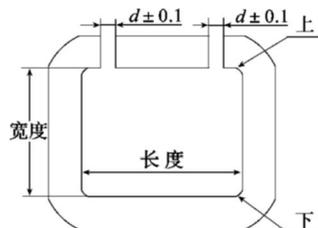


图 15 同侧方案

方案三: 长度宽度同方案二, 区别在于采用异侧开孔, 见图 16, 测试数据见表 8。

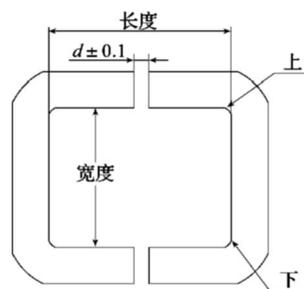


图 16 异侧方案

表 6 电流传感器性能测试

参数	输入电流 / A		
	1 500	2 000	2 500
传感器标准输出 / V	4.00	5.33	6.67
母排移动到上部顶端, 传感器输出 / V	4.00	5.34	6.67
母排移动到下部低端, 传感器输出 / V	3.99	5.36	6.70
上下输出差异 / V	0.01	-0.02	-0.03

方案三与前 2 个方案相比, 其母排上下移动时, 传感器输出变化小, 且在每一档输入电流时, 母排上下移动与传感器标准输出差异极小。 (下转第 39 页)

载速度是 $18^\circ/\text{min}$ , 扭转角度为 $\pm 23^\circ$ , 试验曲线如图14所示。产品的扭转刚度为 $12.69 \text{ Nm}/(\text{^\circ})$ , 有限元分析结果和试验结果相比误差为 $-11.2\%$ 。

为了检验产品的扭转疲劳性能, 在径向加载的情况下, 施加扭转载荷, 按照试验大纲的要求, 经过10万次疲劳试验后, 产品性能满足设计要求。

### 3 结语

橡胶金属关节的结构种类较多, 设计时应根据不同的受力工况、生产工艺及刚度配比选择合适的产品结构。

对于压装结构的橡胶产品, 必须采用专用压装工具、合理的压装工艺对产品进行压装, 采用专用量具对产品结构进行检测。

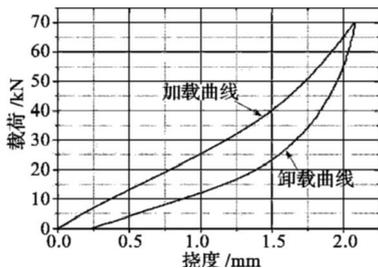


图 13 产品径向刚度曲线

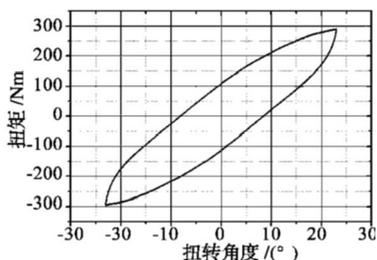


图 14 产品扭转刚度曲线

采用有限元分析方法可以优化压装结构橡胶金属关节产品的型面, 并对产品的刚度进行预测, 指导产品设计开发。

通过有限元分析结果和试验结果进行比较, 验证了采用ABAQUS有限元分析软件对于产品刚度分析的可行性及正确性。结合设计经验, 通过系数修正的方法可以使计算结果更接近于产品的试验结果, 最后产品结构的合理性通过相关试验得到验证。

### 参考文献:

- [1] 户原春彦. 防振橡胶及其应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.
- [2] 唐先贺, 张春良, 等. 大功率交流传动机车橡胶弹性元件[J]. 机车电传动, 2008(3): 27-30.
- [3] 荣继刚, 黄友剑, 等. 预压量对橡胶金属关节综合性能的影响[J]. 特种橡胶制品, 2006(2): 36-38.
- [4] 王 进, 彭立群, 等. 轨道交通用橡胶金属关节的结构与特性[J]. 世界橡胶工业, 2006(8): 22-25.
- [5] 吴安伟, 王明星, 等. 有限元分析在翻边橡胶金属关节设计中的应用[A]/DS SIMULIA中国区用户大会2008用户论文集, 2008: 255-260.
- [6] HKS. ABAQUS Theory Manual[M]. Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) Inc., 2007.
- [7] 黄友剑. 城市地铁轨道减振器结构及性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.

(上接第35页)

### 6.3 霍尔在铁心气隙中的位置

当霍尔半导体薄面全部放入铁心气隙内时, 通过霍尔元件的磁场为匀强磁场(见图17)。因此霍尔电流传感器设计时, 霍尔半导体薄面必须全部放入铁心气隙内。

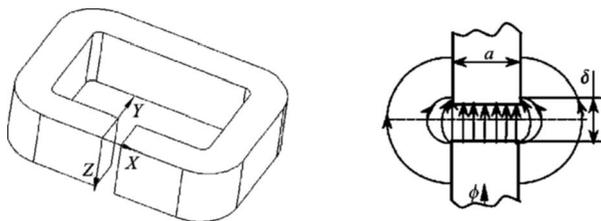


图 17 气隙处磁场分布

### 7 结语

本文对霍尔元件的技术参数及与磁路设计做了全

方位的阐述, 对元件参数中未曾叙述的, 实际应用时需要注意的, 通过多次试验验证, 进行了总结, 意在指导霍尔元件在电流传感器上的应用。

### 参考文献:

- [1] J A 斯特莱顿. 电磁场理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1986.
- [2] 黄继昌, 徐巧鱼, 张海贵. 传感器工作原理及应用实例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998.
- [3] 何希才, 任力颖, 杨 静. 实用传感器接口电路实例[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 卢文科, 朱长纯, 方建安. 霍尔元件与电子检测应用电路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [5] 赵修科. 实用电源技术手册磁性元器件分册[M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2002.