

传统电流检测磁芯设计选型方案

编制人：王毅超

日期：2024年7月1日

简介

电流检测在现代社会中起到了非常重要的作用。例如逆变器、电机控制、电源管理、OBC、电池管理等，都需要检测电流来进行控制，提高系统的效率和安全性。Matrixsens 提供了霍尔电流传感器磁芯设计建议及评估磁芯样品，来满足各类电流检测应用及产品设计需求。

在文档中，我们将针对传统电流检测磁芯设计选型方案进行介绍。本应用手册分为五个主要部分：

- 一. 霍尔效应简介；
- 二. 传统霍尔传感器原理及构成简介；
- 三. 磁芯材料及特性简介；
- 四. 磁芯设计与选型：Matrixsens 可提供的有关如何获得磁芯最佳设计的一些见解及工程方案评估磁芯选型和注意事项；
- 五. 磁芯使用注意事项及芯片装配位置的推荐。

一. 霍尔效应

霍尔效应

霍尔效应在 1879 年由美国物理学家埃德温·赫伯特·霍尔（Edwin Herbert Hall）发现。霍尔效应（Hall effect）是指当固体导体放置在一个磁场内，且有电流通过时，导体内的电荷载流子受到洛伦兹力而偏向一边，继而产生电压（霍尔电压）的现象。

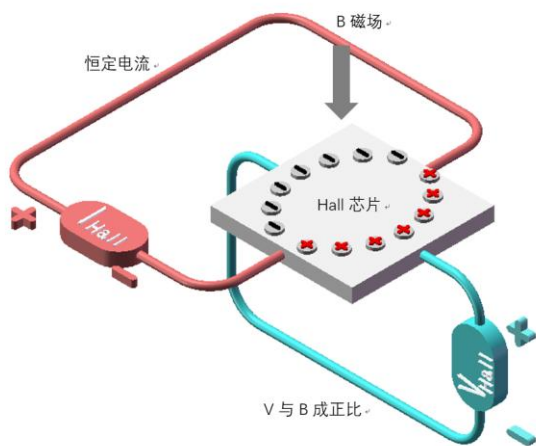


图 1：霍尔效应示意图

二. 霍尔电流传感器

1. 霍尔效应电流传感器原理

根据霍尔原理制造成的霍尔元件，在外磁场影响下，其会定

向产生霍尔电压，霍尔电压和磁场大小成正比关系。

根据安培环路定理，通电直导线周围会产生环形磁场，固定位置处磁场大小正比于电流大小。

因此霍尔电压与电流存在正比关系，根据此原理制造的电流传感器称为霍尔电流传感器。

2. 传统的霍尔电流传感器结构简介

传统的霍尔传感器如图 2 所示，被测电流周围的磁场反比于测试点与导线的间距，因此为了提高被测信号强度，所以传统的电流传感器由磁芯及芯片共同组成，在典型的应用中电流导体穿过磁芯穿孔，其磁感应线其中在磁芯气隙中（通常气隙尺寸在 2-10mm）。

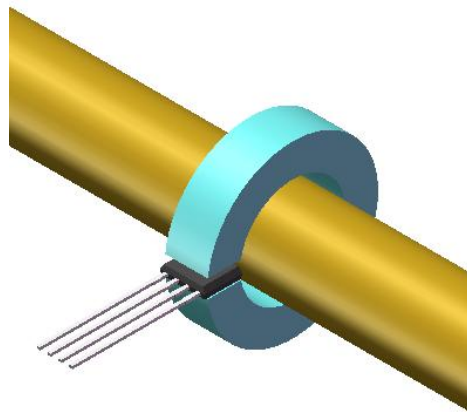


图 2：传统霍尔传感器示意图

3. 常见的霍尔电流传感器结构及特性简介

(1) 传统的霍尔传感器通常是置于在磁芯（环形或是矩形）的气隙中，包裹在电流导体的周围（如图 3 所示）。

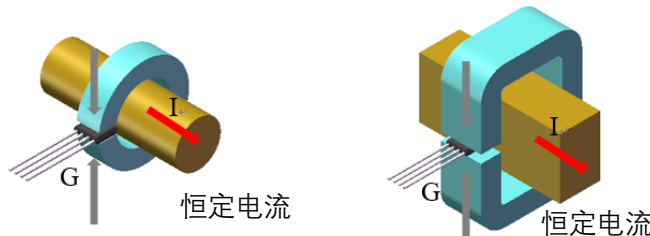


图 3：传统霍尔传感器的安装视图

(2) 对于电流 I (A)、气隙处磁场 B (mT)、气隙尺寸 G (mm) 的公式关系如下。

$$B \approx 1.25 \times (I/G)$$

(3) 对于气隙 G 其尺寸大小推荐在 2-10mm，如将气隙加

大其带来的优点是可以提高电流磁饱和能力，由于气隙处的加大使得磁芯内部磁畴需要更大的电流能量来使磁畴进行排序使其饱和。但其对应的缺点就是气隙 G 尺寸的加大将会对其抵抗外部干扰的能力变弱。对于饱和与抗干扰能力的平衡点选取，需要使用者自行评估。

三. 磁芯材料及特性简介

1. 磁芯材料

Matrixsens 将推荐两种磁芯材料分别是铁硅系合金（硅钢）和铁基纳米晶合金（纳米晶），这两种磁芯在各个参数性能上面各有优劣，下面将对其进行介绍：

(1) 硅钢

硅钢是一种合金是在纯铁中加入少量的硅（4.5%以下）形成的铁硅系合金。

硅钢片具有较高的磁饱和强度、价格便宜、机械应力影响小等特点。对于硅钢片带材来说，其磁芯可采用卷绕及冲片的方式加工。冲片的加工精度高，但模具费用高，适合批量低成本的生产；卷绕的加工精度相比冲片低，但模具成本低，适合小批量生产使用。

硅钢片带材可分为：冷轧取向、冷轧无取向、高磁感取向、激光斜纹（刻痕）磁区细化处理、高频低铁损极薄无取向等。带材厚度一般有 0.23mm、0.27mm、0.3mm、0.35mm、0.5mm 等。另外，各种材料的损耗也不尽相同，在实际选择磁芯材料时，可综合价格、性能等方面考虑。

(2) 纳米晶

纳米晶磁芯是铁基合金材料通过特殊工艺制成，由铁、硅、硼、铌、铜等组成的软磁材料。

纳米晶带材是由铁基非晶合金在晶化温度以上退火时，会形成非常细小的晶粒组织，晶粒组织尺寸仅有 10-20 纳米，这种非晶合金经过特殊的晶化退火而形成的晶态材料称为纳米晶合金。

纳米晶材料具有高饱和磁感应强度、高磁导率、低矫顽力、低损耗及良好的稳定性、高强韧性及耐磨耐蚀等优异特性。

四. 磁芯设计与选型及注意事项

1. 磁芯设计

(1) 不同材料磁芯特性对比（同尺寸外观下）

特性参数	纳米晶材料	硅钢材料
量程	0-500A (图 8 外观)	0-2000A (图 8 外观)
矫顽力	低（约为硅钢材料的 10-20%）	高
线性度	0.5%	1%
带宽	>1MHZ	<200KHZ
成本	高	低

注：上表中硅钢磁芯为 0.2mm 厚度取向硅钢带材卷绕

(2) 磁芯设计关键参数选择

①**外形**：磁芯的外形尺寸取决于电流导体的形状及被测电流的量程，主要有**环形**或者**矩形**磁芯。

为了获得较好的磁性能，一般设计为矩形，主要原因在于矩形磁芯结构在温度改变的情况下比环形结构的形变小，尤其是针对体积较大情况，环形磁芯形变更明显。

另外，磁芯内外径设计时需考虑，内外径之差 D 至少 3mm（考虑体积及成本限制），以便取得最优的磁聚集效果（实际经验要求内外径之比大 0.8）。而且，推荐设计的磁芯内径各个方向距离穿心电流导体的距离至少 3mm，从而确保在大电流情况下磁芯不会饱和。

②**内径**：磁芯的穿孔尺寸取决于电流导体的尺寸。

③**气隙**：开口气隙的尺寸取决于饱和特性和抗干扰能力的平衡，气隙越小其抗干扰能力越强，但其饱和特性会下降。

④**截面积**：截面积的大小取决于饱和特性，截面积越大其饱和特性越好。

⑤**长宽比**：对于矩形磁芯还需要考虑长宽比，长宽比不合适会导致饱和特性下降。

(3) 其他设计要点

磁芯截面积 S 的选择主要考虑产品体积、输入电流大小及开口气隙 G 等因素。按照上述描述，给定的电流 I 计算出的开口气隙 G 与磁芯截面积 S 需满足公式关系，否则磁芯开口处的边缘磁通不可忽略，最终会降低气隙内的磁感应强度。即：

$$G/S < 5\%$$

实际要求 < 2%，此时可完全忽略边缘磁通影响，认为磁环截面积与气隙有效截面积相等。但考虑实际产品重量、体积等要求，磁芯截面积不可能做太大，只能在有限的结构下设计最合理的开口气隙 G 及截面积 S。另外，磁芯的截面积 S 也会影响磁芯的最终饱和点，截面积 S 越小，磁芯越容易饱和。

(4) 磁芯建模及仿真案例

以下为 500A 磁芯仿真示例：

针对输入 500A 设计磁芯结构, 受测试环境限制, 假设设计的磁芯主要结构尺寸如下：开口气隙为 3mm，截面积为 30mm²，内外径之差为 5mm，厚度为 6mm。具体 3D 建模如图 4 所示，其中黄色部分为穿心电流导体，蓝色为磁芯结构。

图 5 为穿心电流导体 100A 时仿真出的磁芯磁力线结果，图 6 为穿心电流导体 500A 是仿真出的磁芯磁力线结果。

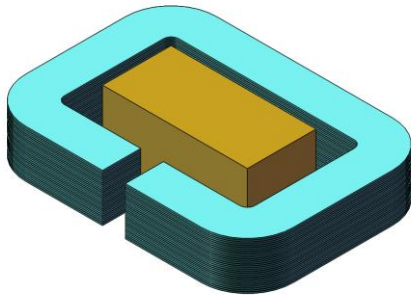


图 4：磁芯 3D 建模模型

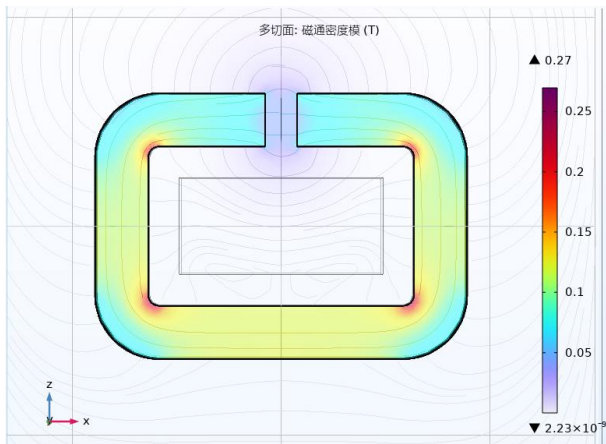


图 5：磁芯磁力线仿真分析(100A)

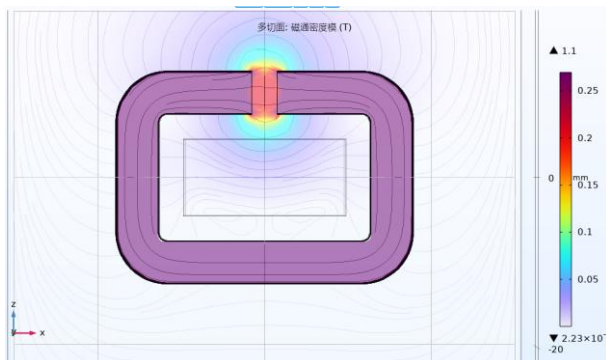


图 6：磁芯磁力线仿真分析（500A）

针对该磁芯的改进建议：由于最强磁感应主要集中在内侧及开口对面磁路上，为实现更高线性度设计，建议内径设计需原理电流导体且截面积尽量设计宽，包括：磁芯开口对面及相邻两边磁路的截面积宽度。

以上示例仅作为设计参考，其他量程设计者可参考建模自行仿真。

2. 工程方案评估磁芯选型

Matrixsens 可提供以下四种工程测试评估所用的磁芯样品

序号	型号	材质	尺寸	最大电流/A
1	A 型	硅钢	见图 7	500
2	B 型	硅钢	见图 8	1000
3	C 型	纳米晶	见图 9	400
4	D 型	硅钢	见图 10	500

注：超出最大电流会出现饱和现象

(1) 下面是 500A 硅钢环形磁芯的尺寸参数介绍

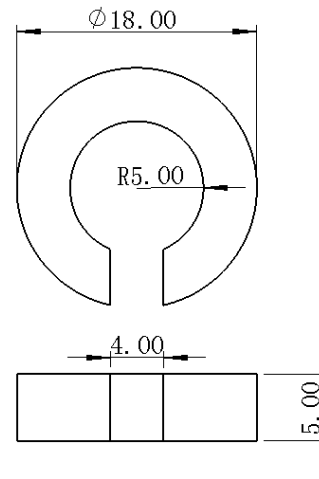


图 7：A 型硅钢环形磁芯（mm）

(2) 下面是 1000A 硅钢环形磁芯的尺寸参数介绍

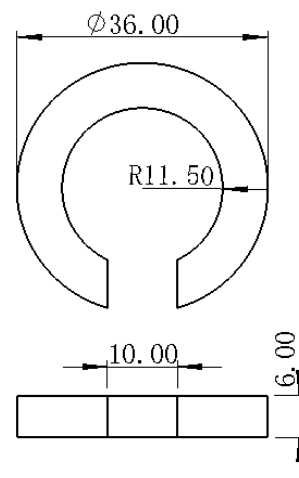


图 8：B 型硅钢环形磁芯（mm）

(3) 下面是 400A 纳米晶矩形磁芯的尺寸参数介绍

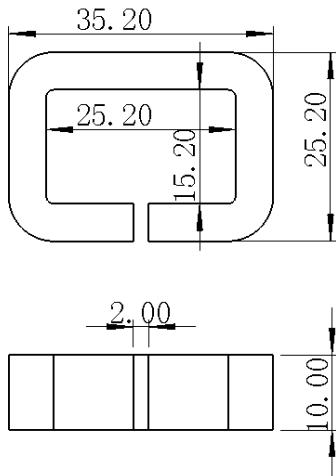


图 9: C 型纳米晶矩形磁芯 (mm)

(4) 下面是 500A 硅钢矩形磁芯的尺寸参数介绍

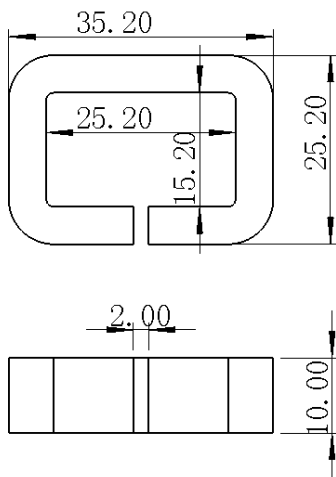


图 10: D 型硅钢矩形磁芯 (mm)

芯片和磁芯的装配需要注意以下几点:

(1) 霍尔感应中心处于磁芯截面的正中心, 可使霍尔的传感性能较优 (如图 11 图 12 所示);

(2) 芯片需和磁芯截面保持水平 (如图 13), 如不保持水平会导致被感应磁芯信号强度下降进而导致传感器性能衰减, 且会感应到被测磁芯之外的干扰信号, 导致传感器抗干扰特性下降;

(3) 磁芯为导体, 使用时需要注意磁芯与芯片引脚、磁芯与电路板间的绝缘。

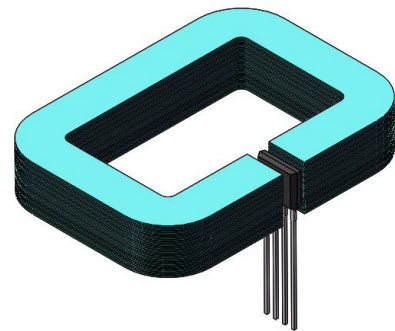


图 11: 位置示意图

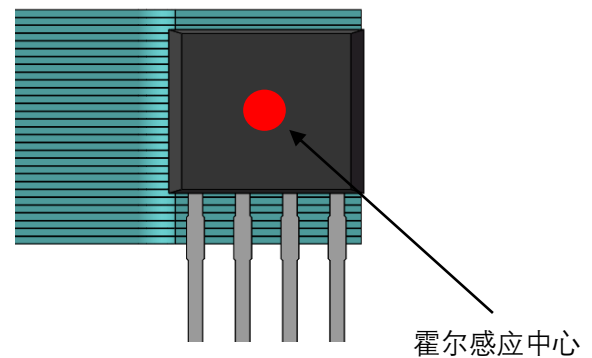


图 12: 剖面处霍尔传感核心位置示意图

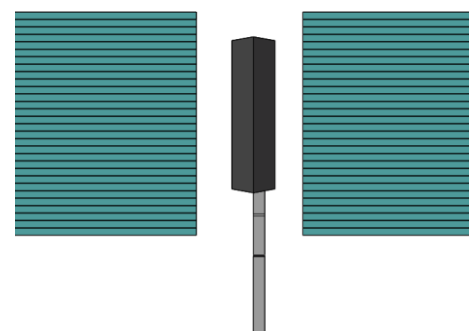


图 13: 芯片与截面水平示意图

五. 配套磁芯使用的注意事项

由于两种磁芯都属于铁基材料暴露在空气中容易氧化生锈, 铁锈具有导电性在使用过程中 (特别是在振动环境中) 会有脱落风险, 可能导致电路板短路, 因此需要在使用前对磁芯做相应的防锈处理。防锈工艺请根据实际应用环境和年限选择。

纳米晶磁芯由于其特殊的工艺制造, 带材经过高温退火后会呈现一个脆性状态, 易脱落; 在使用过程中 (特别是在振动环境中) 会有脱落风险, 可能导致电路板短路, 因此在使用前对纳米晶磁芯做好相应的处理措施。

重要声明和免责声明

本文件中所述的产品应用信息及其他类似内容，可能会被更新内容所替代，Matrixsens 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。

本应用手册可供专业技术人员采用 Matrixsens 产品进行选型应用。您将对以下行为独自承担全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 Matrixsens 产品；(2) 设计、验证并测试您的应用；(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。本应用手册如有变更，恕不另行通知。Matrixsens 对您使用本应用手册的授权仅限于开发资源所涉及 Matrixsens 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示本应用手册，也不提供其它 Matrixsens 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用本应用手册而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，Matrixsens 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 Matrixsens 及其代表造成的损失。