

高精度闭环霍尔流传感器研制

熊伟^{1,2}, 王首浩^{1,2}, 徐佳佳^{1,2}, 陈鹏^{1,2}, 马亚军^{1,2},
王言徐^{1,2}, 王伟^{1,2}, 张艺卓^{1,2}

(1. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076;
2. 控制执行机构技术创新中心, 北京 100076)

摘要: 针对我国航天伺服霍尔电流传感器精度低、线性度差、温漂大、响应慢及磁路易饱和等问题, 文章提出一种航天伺服系统的高精度闭环霍尔电流传感器设计方案; 采用磁路用开环“回”字形聚磁环与1J85坡莫合金叠片结构设计, 次级线圈采用扁平漆包线精密绕制和特殊的热处理工艺技术; 经过伺服系统带载试验表明, ± 130 A量程内线性度达到0.14%、误差 $\pm 0.09\%$ FS、温漂小于50 ppm/°C、动态响应3 μ s各项性能指标满足航天伺服系统测量需求。

关键词: 电流传感器; 线性度; 聚磁环; 次级线圈; 伺服系统

Development of High-Precision Closed-Loop Hall Current Sensor

XIONG Wei^{1,2}, WANG Shouhao^{1,2}, XU Jiajia^{1,2}, CHEN Peng^{1,2}, MA Yajun^{1,2},
WANG Yanxu^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, ZHANG Yizhuo^{1,2}

(1. Beijing Institute of Precise Mechanical and Electronic Control Equipment, Beijing 100076, China;
2. Innovation Center for Control Actuators, Beijing 100076, China)

Abstract: Hall current sensors in China's aerospace servo systems have the characteristics of low precision, poor linearity, large temperature drift, slow response, and easy magnetic saturation of the magnetic circuit. Therefore, a high-precision closed-loop Hall current sensor scheme in aerospace servo systems is proposed. The magnetic circuit adopts an open-loop “double-rectangle” shaped magnetic ring and a 1J85 permalloy lamination structure. The secondary coil is precisely wound with flat enameled wires and conducts a special heat treatment process technology. Servo system load tests show that within the measurement range of ± 130 A, the system reaches a linearity of 0.14%, an error of $\pm 0.09\%$ FS, a temperature drift of less than 50 ppm/°C, and a dynamic response of 3 μ s. All performance indicators meet the measurement requirements of aerospace servo systems.

Keywords: current sensor; linearity; magnetic ring; secondary coil; servo system

0 引言

目前, 全球高精度电流传感器领域, 欧美企业居领先地位, 部分欧洲企业可产精准测40 000 A电流的传感器, 部分美国企业同样是该领域的领先力量, 在行业内具备重要竞争力。军工、变配电、电源系统等行业, 众多国内企业的相关电流传感器产品应用广泛。不过, 与西方发达国家相较而言, 我国电流传感器的发展仍存在一定差距。当前, 航天技术领域中应用电流传感器种类日益多样, 这不仅为行业发展带来了新的机遇, 随着电流传感技术的不断进步, 相关应用对性能指标提出了

更高要求。面向航天领域的高精度闭环霍尔电流传感器的研发, 已成为一项迫切且关键的任务。研制具备完全自主知识产权的闭环式霍尔电流传感器, 不仅能够满足复杂工况下的测量需求^[1-5], 还可实现对各类被测电流的兼容检测。该传感器通过电磁隔离机制, 将被测信号转换为电压或电流输出, 具备高测量精度、快速动态响应以及低温度漂移等优良特性, 可显著提升系统在极端环境下的稳定性和可靠性, 且工作功耗低。基于电磁感应式闭环于霍尔电流传感器工作寿命长、高可靠性、高安全性等特点, 开发成功后可应用于高频电源伺服系统检测、电源系统电流检测、发射系统电源检测、功率管

收稿日期:2024-08-08; 修回日期:2024-10-09。

作者简介:熊伟(1982-), 男, 硕士, 高级工程师。

通讯作者:徐佳佳(1990-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式:熊伟, 王首浩, 徐佳佳, 等. 高精度闭环霍尔流传感器研制[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(1): 277-284.

的过流检测、高压电源系统电压监测与保护或替代现有航天伺服上配套的电流传感器^[6]。

1 系统结构及原理

闭环霍尔电流传感器主要由磁路、电路与测量三大系统构成。结合结构示意图可见，其测量外部被测电流的过程如下：当被测电流通过导体时，其产生的磁感线由磁路结构中的聚磁环进行集中与增强。位于磁路气隙中的霍尔元件能够感知这一被强化的磁场，并基于霍尔效应输出相应的微弱电动势信号。该信号随后进入后续处理电路，经过放大、积分及功率驱动等环节，最终生成一个精确的补偿电流。该补偿电流流经绕制在聚磁环上的反馈线圈，产生一个方向与原磁场相反的反馈磁场，从而形成负反馈回路。此反馈机制持续调节，直至反馈磁场在磁环内部完全抵消由被测电流所产生的原始磁场，使磁路中的净磁通趋近于零。当系统达到这一动态平衡状态时，补偿电流不再变化，其大小与被测电流呈精确比例关系。正是基于磁通零平衡原理，闭环霍尔电流传感器能够在不干扰外部被测电流原有回路的前提下，完成对外部电流的间接精准测量^[11]。

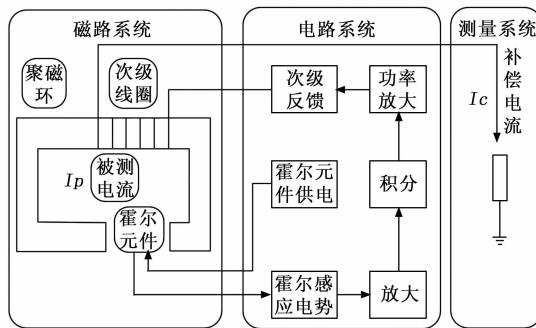


图 1 闭环电流传感器器总体设计方案图

当外部被测电流出现波动时,当磁路原有的动态平衡状态受到扰动时,气隙区域的零磁通条件被破坏,导致霍尔元件所在位置出现净磁场,从而激发出相应的霍尔电压,该电压信号经后续电路处理后,会驱动次级线圈形成新的补偿磁场,对失衡的磁路环境进行调整,最终使系统重新回归零磁通的平衡状态^[12-14]。这一“平衡被打破—信号触发—补偿调节—平衡重建”的循环过程,即为闭环霍尔电流传感器的动态平衡机制,其具体作用路径可概括为:外部电流变化导致磁路零磁通条件失效,触发霍尔元件输出电压信号,经电路处理后由次级线圈生成补偿磁场,修正磁路失衡状态,最终实现零磁通动态平衡的重新建立。整个过程可实时响应被测电流的波动,为电流信号的精准采集提供保障:

$$I_p N_p = I_c N_c \quad (1)$$

式中, I_p 为被测电流, N_p 为原边线圈的匝数, I_c 为次级线圈上的补偿电流, N_c 为次级线圈的匝数。

经上述分析,本文拟设计一款基于霍尔效应的闭环电流传感器,技术指标需达到线性度0.3%,测量误差为±0.2% FS,信噪比达到50 dB,温漂<80 ppm/°C,动态响应时间缩短至10 μ s。

2 系统硬件设计

在闭环霍尔电流传感器的系统硬件设计中，包含了3个关键且相互关联的组成部分。其一为霍尔元件的选型，这一过程需要从灵敏度、精度、稳定性以及与整体系统的兼容性等多维度进行综合评估与筛选，从而选出最适配的霍尔元件；其二是磁路系统的设计，此设计关系到磁场的有效聚集、均匀分布以及高效传输，对传感器准确感知磁场变化起着至关重要的作用；其三是电路系统的设计，其主要包括信号放大电路、滤波电路、反馈电路等，负责对信号进行全方位处理，以保障传感器能够输出稳定、准确的测量结果。

2.1 霍尔元件的选择

霍尔效应器件作为 Closed-loop Hall Current Sensor (CHCS) 的核心传感单元^[15]，其选型与特性参数直接影响系统测量精度上限，而参数与后端电路的适配设计则是实现精度落地的关键环节。本设计采用的 MW921 型霍尔元件基于锑化铟半导体材料制造，根据结构特征可分为垂直型与圆柱型两种分类：前者适用于表面平行磁场检测，后者对载流导体周边环状磁场具有更优的感应特性。该器件的核心机理在于实现磁场强度与电学信号之间的线性转换，其物理基础为载流半导体在洛伦兹力作用下的电势差效应^[16-18]。目前霍尔元件已突破传统锗基材料的局限，发展出硅基化合物、砷化镓 (GaAs) 及砷化铟 (InAs) 等多种半导体解决方案。

2.1.1 基于输出电压与阻抗参数的信号处理电路匹配设计

MW921 霍尔输出电压 $122\sim204$ mV、输入/输出阻抗 $240\sim550$ Ω ，且实际气隙磁场对应输出常低至几十微伏，还存在阻抗离散性。故信号处理输入级用高输入阻抗差分放大架构，选输入偏置电流 < 1 nA 运放，同相输入使阻抗超 10^9 Ω ，并联 1 $k\Omega \pm 0.1\%$ 高精度匹配电阻缓冲。分级增益调节一级固定增益将信号抬至 $2.44\sim4.08$ V 适配 ADC；二级可编程， -40°C 时 A2 提至 5 放大信号至 6.1 V（需钳位）， 120°C 时 A2 降至 1 防饱和。

2.1.2 基于温度漂移系数的补偿电路设计

MW921 温度漂移系数 $-1.8\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区，无补偿时输出电压漂移达 180 mV ，超 $\pm 0.2\% \text{ FS}$ 误差要求，需软硬补偿。

硬件补偿：供电回路加带隙基准（温漂 $<20\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ），经 $10\text{ k}\Omega$ 电位器分压后接入差分放大同相端，抵

消 60% 以上温漂；霍尔元件旁 B 值 3 950 K 的 NTC 热敏电阻（-55℃ 100 kΩ、125℃ 1 kΩ），动态调分压比，使硬件温漂抑制率达 85%。算法补偿：基于 -55℃、25℃、125℃ 三点实测数据建分段模型，用 DS18B20（精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）采温，按温区调用修正系数 K（-55℃ 1.09、25℃ 1.00、125℃ 0.91），微控制器通过 $U_{\text{compensated}} = U_{\text{measured}} \times K$ 修正残余温漂。

经综合评估，本方案选用具备优异温度稳定性的 MW921 器件，其封装形式为单列直插式（SIP-4L），具备双模式供电特性（电压/电流驱动）。关键电气参数包括：霍尔输出 $122\sim204\text{ mV}$ （典型值），输入/输出阻抗 $240\sim550\text{ }\Omega$ ，电压失调补偿范围 $\pm 7\text{ mV}$ ，温度漂移系数 $-1.8\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。特别需要说明的是，在电压驱动模式下，器件管脚需分别配置控制输入端（VCC/GND）及差分信号输出端（VOUT₊/VOUT₋）。为确保敏感表面与磁力线呈正交空间关系，该元件通过精确装配于磁芯气隙中心区域。这种优化布局可使霍尔元件充分捕获最大磁通量变化，从而获得稳定的霍尔电压输出^[19-21]：

$$U_H = K_H \times I \times B = R_H \times I \times B/d \quad (2)$$

其中: K_H 为霍尔灵敏度系数 (单位/mV/(mT * mA)); I 表征工作电流; R_H 反映半导体材料的霍尔系数特性; d 对应导体薄层厚度; B 表示施加的磁感应强度。通过式 (2) 可知, 在给定磁路气隙几何参数的条件下 (即 d 为定值), 霍尔电势差与磁感应强度呈现线性对应关系。工程设计中, 一旦气隙长度确定, 即可依据该公式 (2) 计算出霍尔电压, 这对传感器灵敏度校准具有重要指导意义^[22]。

2.2 闭环霍尔电流传感器磁路设计

闭环霍尔电流传感器的构成包含3个关键部分，其中磁路系统承担着核心功能——对外部被测电流形成的磁场进行有效汇聚，之后将汇聚后的磁场信号传递给，磁路所采集的磁场信号质量，是决定霍尔元件及后端电路处理效能的关键因素。磁路的聚磁效率越高，气隙中磁通量的集中程度越高，输出的磁信号幅值越显著，为后续信号处理提供了更优的输入条件。同时信号中混入的噪声与失真程度也会相应降低，这使得后端电路在信号处理过程中的压力得以减轻。

另外,从结构布局来看,磁路部分因需满足高磁导率和低磁阻要求,常采用大尺寸铁芯材料,导致其在传感器整体中占比超过50%,成为体积主导部分。

其尺寸大小对传感器的整体小型化设计有着重要影响。基于此，通过对磁芯材料的选型、磁路结构的构型等方面开展设计优化工作，能够有效缩减传感器的整体体积，为传感器的小型化发展提供有力支撑。

2.2.1 磁路材料选择

质。主要有三类，分别是软磁材料、硬磁材料和矩磁材料。以硬磁材料为例，它属于永磁体范畴，在电机以及电磁式电表等设备中较为常见。具有矩形磁滞回线特性的矩磁材料，因其磁化过程中能量损耗较低，常被应用于存储类器件的研制，并广泛作为磁放大器的核心磁性元件；而软磁材料则在磁化过程中表现出明显的磁滞行为。

在闭环霍尔电流传感器的工作机制中，磁路内的霍尔元件需始终保持在零磁通状态，系统运行于动态平衡模式。为确保这一状态的稳定，磁路必须避免磁饱和的发生，一旦磁芯进入饱和区域，将直接导致传感器输出的非线性失真，影响测量精度。因此，在磁路设计阶段，必须充分关注材料 B-H 曲线的线性响应区间，并优选具备高饱和磁感应强度及优异磁场集中能力的磁芯材质。

磁芯材料的饱和磁感应强度决定了传感器可测电流的最大范围；较高的磁导率有助于增强磁路对微弱磁场的响应能力，提升整体灵敏度；矫顽力则反映了材料在去磁过程中的难易程度。针对电流传感器磁芯的设计需求，理想的材料应具备高饱和磁密、高磁导率、低矫顽力以及较低的热膨胀系数^[23]。

±130 A 量程电流传感器中, 分别选取 1J85 坡莫合金、普通硅钢片、铁氧体三种磁芯材料制作相同结构的聚磁环, 进行核心性能对比实验。实验环境模拟航天伺服系统典型温区 ($-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$), 测试不同材料在额定电流 130 A 工况下的关键指标, 结果如表 1 所示。从数据可知, 1J85 坡莫合金虽饱和磁密略低于硅钢片, 但磁导率远超另外两种材料, 能高效汇聚微弱磁场, 且矫顽力极低, 可避免磁滞损耗影响测量精度, 温漂更是远优于硅钢片和铁氧体, 完全适配航天领域对温度稳定性的严苛要求, 验证了其作为磁芯材料的合理性。材料损耗仿真测试: 利用 ANSYS Maxwell 软件对 1J85 坡莫合金聚磁环进行涡流损耗仿真。设定电流频率为 1 kHz (航天伺服系统常见工作频率), 电流幅值从 0 A 逐步增至 130 A, 仿真结果显示, 在额定电流 130 A 时, 聚磁环的涡流损耗仅为 2.3 mW。而相同工况下, 普通硅钢片聚磁环的涡流损耗达 15.7 mW, 铁氧体为 8.9 mW。此外, 在高温 125°C 环境下, 1J85 坡莫合金的涡流损耗增幅仅为 5%, 远低于硅钢片的 25% 和铁氧体的 18%, 进一步证明其在损耗控制和温度稳定性上的显著优势。

本设计最终选定 1J85 型坡莫合金作为聚磁环的制造材料，并对该材料进行了多轮振动与冲击环境试验，用以评估其结构刚度是否满足实际工况下的可靠性要求。

表 1 1J85 坡莫合金参数性能表

参数	1J85	硅钢片	铁氧体
密度(g/cm ³)	8.75	7.65~7.85	4.80~5.20
最大相对磁导率(Mh/m)	125~375	1.5~3.0	2~8
饱和磁密/T	0.75	1.5	0.5
矫顽力(A/m)	0.025~0.06	2~5	0.1~0.3

2.2.2 闭环霍尔电流传感器磁路结构设计

在现代电流传感技术中,聚磁环的几何构型已发展出多种实现形式,典型结构涵盖单体磁芯式、叠片组合式(包括回字形、方形等)以及连续绕制带状结构。各类结构在性能表现与适用场景上各具特点:单体式磁芯因体积紧凑、输出电平较低,多见于小型化、低功耗的测量装置,但其高频响应能力受限,难以满足宽带信号检测需求;叠片式设计凭借工艺成熟、易于批量制造等优势,在民用领域应用广泛,如 LEM、霍尼韦尔等厂商的主流产品普遍采用此类结构,其频率响应处于中等水平,兼顾成本与性能;而绕带式磁芯则在高频工作条件下表现出更优的动态特性,同时具备较低的磁芯损耗,适合高精度、高带宽的应用环境。针对具体传感器类型,磁芯的结构参数需进行匹配性设计。本文所研制的闭环霍尔电流传感器采用“回字型”整体架构,因此其配套聚磁环亦需采用相同拓扑结构以确保磁路一致性。为实现对被测导体周围磁场的有效采集,必须在磁芯上设置一个物理气隙,并将霍尔元件精准安置于该间隙内,通过实时监测其输出电压来反映磁感应强度的变化。该测量原理基于安培环路定律,电流与磁场之间的数学关系可由如下公式描述:

$$NI_p = B \frac{l_1}{\mu_1 \mu_2} + B \frac{l_2}{\mu_2} \quad (3)$$

式中, I_p 为从聚磁环通孔位置通过的外部电流。

N 为外部电流匝数, B 为磁感应强度, l_1 为聚磁环有效长度, l_2 为气隙开口距离, μ_1 为聚磁环材料相对磁导率, μ_2 为空气磁导率。

考虑到传感器“回字型”结构的里外边距,以及根据传感器聚磁环单片外径尺寸设计为 25 mm×28 mm×1.6 mm。为了获取最优的磁聚集效果,聚磁环的外框尺寸结构如图 2 所示。

另外,聚磁环虽因高磁导率、低电阻率的特点适配磁路需求,但在实际测流过程中,易受电磁感应影响。

交变磁场作用下产生的涡流效应将引入额外能量损失,并对传感系统的测量精度形成干扰。为此,本设计选用叠片型聚磁环结构作为磁路主体,通过将四片超薄坡莫合金以贴片叠压方式集成,构建分层阻断路径,有效限制涡流的流通区域。每片合金的厚度均被严格控制为 0.4 mm。这种分层堆叠的结构能延长涡流的流通路

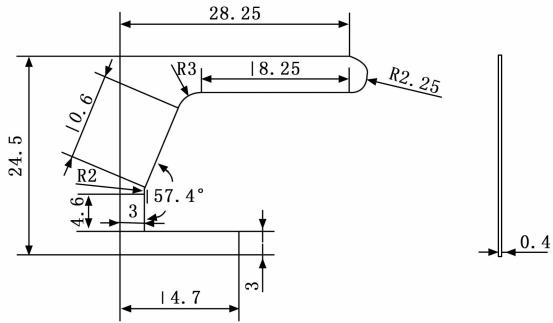


图 2 聚磁环结构图

径、增大回路电阻,进而减少涡流损耗,为传感器维持稳定的测量性能提供支持。

2.2.3 次级线圈设计

在闭环霍尔电流传感器的结构中,次级线圈常以彼此绝缘的漆包线为原料,在聚磁环表面完成均匀缠绕制作。从连接方式来看,传感器内部的次级线圈通常直接对接内置负载或补偿电路。需特别注意的是,漆包线的选型品质对电流传感器长期运行的稳定性起着关键作用——其线芯以铜为基础材质,还会掺入镍、镍铜合金等成分优化性能,外部则包裹着一层厚度均匀的聚氨酯清漆涂层此类结构有助于改善漆包线在实际应用中的工作特性。绕线过程中,漆包线须沿聚磁环表面实现紧密贴合的连续排布,同时对施加的绕制张力进行精确调控^[24],以避免松动或损伤绝缘层。导线外部的聚氨酯基清漆绝缘层将作为关键组成部分同时承担线芯绝缘保护与物理防护的双重功能。一旦漆膜出现破损,极易引发次级线圈整体损坏,最终导致闭环电流传感器失效。为抵御应力冲击及其他干扰,实际生产中会采用精密自动绕线机:该设备可实时精准控制漆包线的绕制间距与张力,从根本上避免绕线过程中漆膜受损;同时选用横截面为扁平状的漆包线(规格为 0.85 mm×1.6 mm),确保其能突破形状限制,热处理环节中,高温退火后的漆包线须避免与环境空气直接接触,以防表面氧化层生成,从而有效维持次级绕组在服役周期内的电气完整性与运行一致性。张力过低时,漆包线层间存在间隙,线圈填充率不足 80%,导致聚磁环表面磁场分布不均,补偿电流与被测电流的线性度偏差增大。

面向 ±130 A 量程的闭环霍尔电流传感器设计目标,综合评估系统对 0.5% 测量精度的需求、现有工艺所能支持的最高匝数比(1:1000)以及绕线设备的实际能力边界,经系统性分析后最终确定次级线圈采用 1000 匝的绕制方案。为确保反馈电流的精确匹配与磁平衡控制的稳定性,绕组实际匝数偏差被严格限制在 0.000 2 以内,即相对误差不超过万分之二,实现高分辨率下的精准磁补偿。

2.3 闭环霍尔电流传感器电路设计

闭环霍尔电流传感器的电路架构由六大功能单元构成：电磁转换、磁电转换、信号放大、功率放大、取样输出以及跟随输出。这些模块协同运作，共同实现对外部被测电流的感知、信号调理、精确转换、动态控制与最终输出的全流程处理。

从功能链路的角度分析,电磁转换与采样输出依赖于磁路中聚磁环与补偿线圈的联动配合;磁电转换过程则主要由霍尔元件独立承担,完成磁场强度向电压信号的转化;而信号放大与功率放大这两项对系统响应精度与驱动能力至关重要的功能,则主要通过外围电路模块予以实现和优化。

霍尔元件在铁芯气隙位置捕捉到的磁电转换信号属于微伏级弱信号，需设计高增益运算放大器构建信号调理模块。该放大系统采用多级放大架构，由差分输入级、有源负载中间级、甲乙类输出级及恒流偏置网络构成复合拓扑结构不仅开环增益拥有极高放大倍数，还集成深度负反馈网络，以此实现精准的线性度补偿。

从电路拓扑设计维度分析, 输入级采用双极型差分对管结构, 通过优化共模抑制比的设计思路, 能够有效降低温度漂移系数; 中间级配备动态负载调节电路, 利用电流镜技术实现电压增益的扩展; 输出级选用推挽式AB类互补对称结构, 结合超前相位补偿网络, 可对总谐波失真参数进行有效控制; 偏置网络则引入带隙基准电压源, 为各级电路建立稳定的静态工作点, 最终实现温度漂移补偿功能。

根据图 3 所示的电路架构，闭环霍尔电流传感器的核心组件包括霍尔元件 U2 及其配套限流电阻 R1 和 R2，构成霍尔元件的工作电路；而运算放大器 U1 与三极管 Q1、Q2 则共同组成了信号放大及功率驱动电路。霍尔元件的一个常见问题是失调电压，该电压通常在毫伏量级，主要由封装过程中输出电极不共面和制造工艺

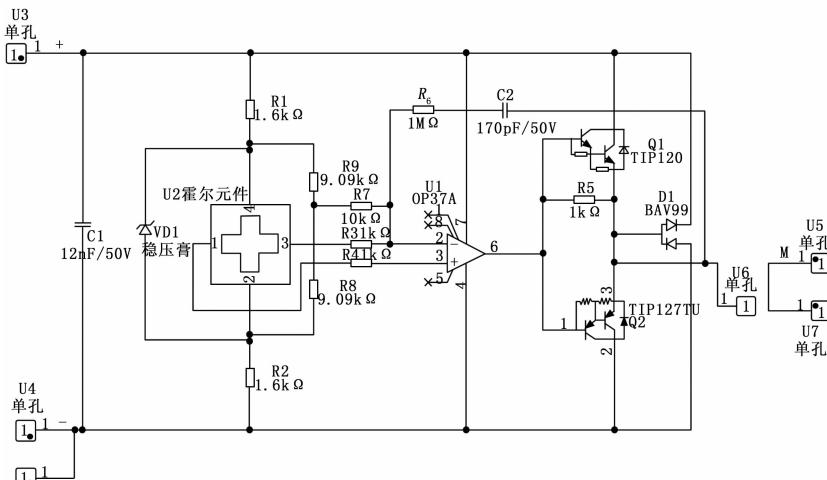


图 3 闭环电流传感器电路原理图

中的误差引起，另外材料电导率对外界条件变化的响应也会导致失调电压。

针对上述问题，电路设计中引入了类似于惠斯通电桥的补偿机制，在霍尔元件的输出端接入了高精度、低温漂移的电阻 R_3 和 R_4 （均为 $1\text{ k}\Omega$ ，远超霍尔元件自身阻抗），用于补偿失调电压。同时，在传感器组装阶段，通过微调电阻 R_9 来进一步校正，使得传感器在零输入时的输出绝对值控制在 0.2 mA 以内，并确保其在整个工作温度范围（ $-55\text{~}125\text{ }^\circ\text{C}$ ）内的稳定性。

闭环霍尔电流传感器依托磁平衡原理完成电流检测，其核心运作机制是通过动态补偿维持磁路平衡：当被测导体电流产生的磁场作用于铁芯时，系统会调节次级线圈的补偿电流来抵消原边磁场，使气隙处达到零磁通状态。具体工作流程如下。

1) 磁场转换与检测: 被测电流在铁芯中形成闭合磁路, 经磁路优化设计后, 气隙处的磁感应强度被高灵敏度霍尔元件捕获。霍尔元件将磁信号转换为电信号, 输送至信号调理电路。

2) 闭环补偿机制: 固定绕制的次级线圈在反馈控制下产生反向补偿磁场。当系统处于非平衡状态时, 放大后的霍尔电压会驱动补偿电流逐步上升, 形成负反馈调节过程, 此阶段补偿电流的增长速率由电路时间常数决定。

3) 动态平衡特性: 当满足式(2)的磁平衡条件时,理论上应达到稳态。但受线圈电感储能影响,补偿电流会出现过冲现象,导致磁平衡被打破。此时霍尔元件再次检测到残余磁场,触发补偿电流调整,形成周期性振荡的闭环调节过程。

4) 电流测量方法: 在补偿回路中串联 100Ω 精密采样电阻, 通过测量其端电压 ($V=IR$) 可实时获取补偿电流值, 该值与一次电流呈严格线性关系。这种非接触式测量方式有效保障了系统的电气隔离特性。

综上, 该闭环控制系统通过持续的自适应调节, 实现了对被测电流的精确测量。

2.4 系统结构设计

闭环霍尔电流传感器外形包络如图 4 所示,主要包括壳体、磁芯、骨架、电路板、四方铜针组成。电流传感器壳体采用了铝合金材料,骨架采用尼龙 66 材料。电流传感器的外形尺寸是 $37 \times 33 \times 16$ mm,空间体积小,质量轻。

闭环霍尔电流传感器的电气接口主要有3个插针VCC+、VCC-、OUT，母线电流方向如图中的箭头所指电流方向所示。电流传感器的机械接口是采用的结构如图5所示。

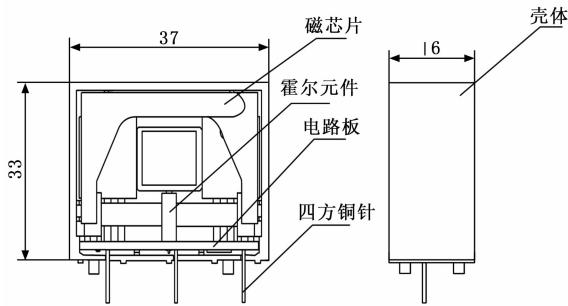


图 4 闭环霍尔电流传感器外形结构图

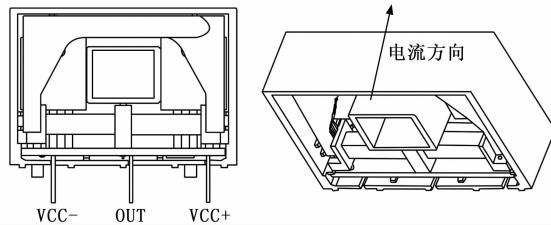


图 5 闭环霍尔电流传感器电气结构图

3 实验结果与分析

3.1 电性能特性

闭环霍尔电流传感器利用磁平衡机制, 显著减小了霍尔元件特性对传感器性能的影响。然而, 元件本身的离散性仍会影响零点输出(失调电压)、线性度、测量精度及工作温度范围。为实现次级线圈对被测电流磁场的快速精准补偿, 实际选型中应优先采用高灵敏度霍尔元件。以下将对其主要技术指标进行测试。

分别在-40、25、120℃三个温度点下对电流传感器进行了采样测试, 数据见表 2, 测试数据满足系统要求。

表 2 不同温度点的测试数据

采样点温度	-40℃	25℃	120℃
-130 A	-130.536	-129.139	-130.007
-65 A	-65.791	-64.899	-64.809
0 A	-0.461	0.023	0.158
65 A	64.675	64.499	64.718
130 A	129.806	129.168	130.352

3.1.1 示值校准

在传感器的全量程范围内, 以 5 A 为间隔设定一个测试点, 测试从 0 A 开始。按照预先规定的校准点, 平稳地增加负荷, 每到达一个校准点, 待负荷稳定后, 读取并记录传感器的输出值, 直至达到测量范围的上限, 此过程定义为正行程。

当负荷达到上限值后, 将此时读取的输出值作为反行程的初始值。接着, 同样按照规定的校准点, 平稳地减少负荷, 在每一个校准点处, 待负荷稳定后, 读取并

记录传感器的输出值, 直至负荷减小到 0 A, 此过程定义为反行程。

3.1.2 线性度计算

拟采用最小二乘法, 依据传感器的校准数据, 能够确定出传感器的线性度。其特性方程一般可表示为:

$$z = f + cx \quad (4)$$

式中, f 、 c 分别为工作直线的截距与斜率, 依据校准数据, 能够按照下述公式可以计算得出:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n u_i^2 \sum_{i=1}^n v_i - \sum_{i=1}^n u_i \sum_{i=1}^n u_i v_i}{n \sum_{i=1}^n u_i^2 - (\sum_{i=1}^n u_i)^2} \quad (5)$$

$$c = \frac{n \sum_{i=1}^n u_i v_i - \sum_{i=1}^n u_i \sum_{i=1}^n v_i}{n \sum_{i=1}^n u_i^2 - (\sum_{i=1}^n v_i)^2} \quad (6)$$

式中, u_i 为第 i 个校准点的输入平均值, v_i 为第 i 个校准点的输出平均值, n 为测量范围内所取校准点数。

线性度可通过下述公式进行计算:

$$\rho = \pm \frac{\Delta \varphi_{\max}}{F_s} \quad (7)$$

式中, $\Delta \varphi_{\max}$ 为校准曲线与拟合直线二者之间呈现的最大偏差数值, F_s 为传感器额定输出平均值。

结论: 在-130 A 和 130 A 范围内每 5 A 的步长, 进行正反方向 3 次往返循环测试, 测试数据统计计算分析知: 电流传感器的在-130 A 和 130 A 全行程范围内的线性度是 0.14%, 测量误差为 $\pm 0.09\% \text{ FS}$, 信噪比达到 72 dB, 温漂 $< 50 \text{ ppm}/\text{C}$, 动态响应时间缩短至 3 μs , 达到了国内外同类产品的性能指标。

3.2 系统带载试验

搭建由伺服控制驱动器、电缆网、作动器、钢板模拟负载台和总成测试仪组成的伺服系统试验台, 伺服系统先后搭载所自研电流传感器和规格为 DCCS-130A-12-214 130 A 双通道电流传感器进行位置特性试验、暂态特性试验和频率特性试验。

验证试验 1: CCS 监控看静态输出电流, 经观察验证电流传感器静态输出范围在-0.1~0.1 A。

验证试验 2: 作动器空载进行位置、暂态、频率特性试验, 作动器对此进行初步空载测试, 验证电流传感器, 经观察测试仪位置指令、反馈, I_u 、 I_v 相电流, 转速曲线正常。

对比验证试验 3: 分别对比规格为 DCCS-130A-12-214 电流传感器和所自研电流传感器带载对比试验: 作动器带载(钢板)进行位置(31°)、暂态(5°、24°)、频率(1°)特性试验。对比验证通道说明如下。

CH1: 原来控制器通道;

CH3: 现验证电流传感器通道。

表3 电流传感器的线性度测试数据

技术性能指标测试数据										
闭环霍尔电流传感器(130 A)										
序号	行程	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
1	正	-120.045	-105.087	-90.11	-75.098	-60.131	-45.106	-30.11	-15.107	0.023
	反	-120.103	-105.142	-90.168	-75.098	-60.189	-45.199	-30.097	-15.139	0.024
2	正	-120.008	-105.103	-90.087	-75.109	-60.104	-45.164	-30.058	-15.1	0.009
	反	-120.095	-105.064	-90.107	-75.097	-60.002	-45.103	-30.103	-15.097	0.089
3	正	-120.109	-105.113	-90.013	-75.01	-60.102	-45.116	-30.108	-15.109	0.009
	反	-120.069	-105.108	-90.113	-75.11	-60.098	-45.069	-30.115	-15.099	0.034
平均值		120.071 5	105.102 8	90.099 66	75.087	60.104 33	45.126 16	30.098 5	15.108 5	-0.031
理论值		120	105	90	75	60	45	30	15	0
差值		0.071 5	0.102 83	0.099 666	0.087	0.104 333	0.126 166	0.098 5	0.108 5	0.031 3
线性度		0.14								

试验结果如图6~9所示,分别是位置(31°)试验图、暂态(5°)试验图、暂态(24°)试验图、频率(1°)试验图。

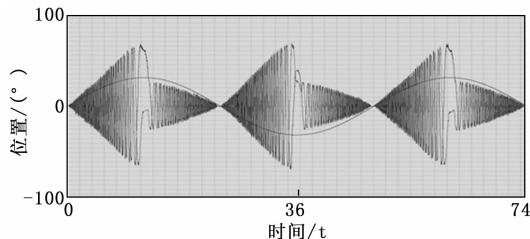


图6 位置(31°)试验图

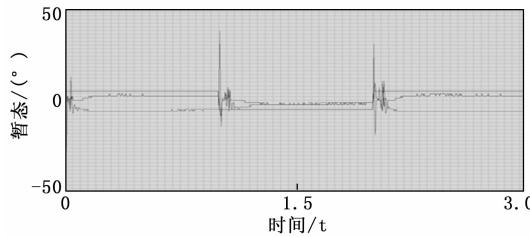


图7 暂态(5°)试验图

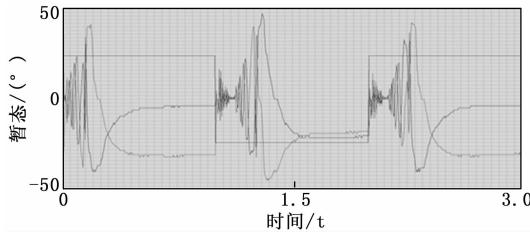


图8 暂态(24°)试验图

结论:试验结果表明可以“稳”、“准”、“快”地跟随总成测试仪发出的位置指令,满足伺服系统要求。所自研电流传感器可以准确、快速地检测出永磁同步电机的相电流,其电气性能达到对比验证130 A双通道电流传感器,满足伺服系统要求。

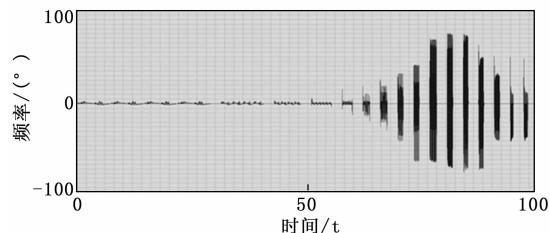


图9 频率(1°)试验图

4 结束语

高精度闭环霍尔电流传感器是基于霍尔效应的传感器,通过新型的磁路技术设计和绕线工艺技术设计,实现了线性好、精度高、频率带宽、可靠性高、抗干扰能力强等优点,试验验证了设计方案的有效性。能够满足伺服系统的可靠性和环境适应性要求,对伺服测量系统的可靠性和安全性具有重要意义,从而具有重大的社会、经济效益和推广价值,可广泛的应用在伺服电机控制、工业控制、UPS电源等领。

未来进一步提高电流传感器精度的同时,开展不同规格的产品,丰富产品种类,构建产品型谱。

参考文献:

- [1] RIPKA P. Electric current sensors: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21 (11): 1-23.
- [2] LENZ J, EDELSTEIN S. Magnetic sensors and their applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6 (3): 631-649.
- [3] 邢文奇,李彦如,李梦真.罗氏线圈的电流检测技术分析[J].集成电路应用,2021,38 (9): 192-193.
- [4] 李荡,王兰若,焦飞,等.差分式TMR微弱电流传感器设计及应用研究 [J].电力信息与通信技术,2022,20 (11): 91-98.
- [5] 张建军.霍尔电流传感器设计关键技术研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

- [6] 谢志远, 顾育先. 基于 STM32 的开环霍尔电流传感器的温度补偿研究 [J]. 光电子技术, 2020, 40 (1): 63 - 69.
- [7] PRIMDAHL F, JENSEN P A. Compact spherical coil for fluxgate magnetometer vector feedback [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1982, 15 (2): 221 - 221.
- [8] 许灵洁, 沈建良, 郭 鹏, 等. 基于隶属云和动态时间规整的电能计量误差估计方法 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (5): 78 - 87.
- [9] 闫 梁, 万本例, 胡 炎, 等. 基于双轴 TMR 电磁传感器的裂纹检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42 (9): 106 - 114.
- [10] 周娴姊, 高 阳, 刘建军, 等. 电流传感器的自动调零电路设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2020 (14): 125 - 129.
- [11] 王少华, 悅 颖, 叶 茜, 等. Fe 基非晶合金增强 1060 铝基多层复合材料的组织与性能 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (4): 75 - 78.
- [12] 赵占奎, 邓 娜, 翁 朝, 等. 高性能软磁材料的研究进展 [J]. 长春工业大学学报 (自然科学版), 2012, 33 (5): 521 - 528.
- [13] 周 磊, 金自力, 张羊换, 等. 铁钴基软磁材料合金化的研究进展 [J]. 金属功能材料, 2006 (6): 37 - 41.
- [14] 慧希东, 吕 旷, 斯佳佳, 等. 高饱和磁化强度铁基非晶纳米晶软磁合金发展概况. 工程科学学报, 2018, 40 (上接第 276 页)
- [14] WANG Y, NIU Y, CHEN J, et al. Q-Learning based adaptive frequency hopping strategy under probabilistic jamming [C] //In Proceedings of the 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2019: 1 - 7.
- [15] FENG X, NIU Y, LIU Q, et al. Decision making for communication Anti-Jamming tasks with Knowledge-Graph-Based Q-Learning [J]. Electronics, 2024, 13 (23): 4757.
- [16] LI Z, LU Y, LI X, et al. UAV networks against multiple maneuvering smart jamming with Knowledge-Based reinforcement learning [J]. IEEE Internet Things J, 2021, 8 (15), 12289 - 12310.
- [17] ZHANG Z, WU Q, ZHANG B, et al. Intelligent Anti-Jamming relay communication system based on reinforcement learning [C] //In Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Communication Engineering and Technology (ICCET), 2019: 52 - 56.
- [18] LIU X, XU Y, JIA L, et al. Anti-Jamming communications using spectrum waterfall: a deep reinforcement learning approach [J]. IEEE Commun. Lett, 2018, 22 (5): 998 - 1001.
- [10]: 1158 - 1167.
- [15] 秦祖荫. 霍尔电流传感器的性能及其使用 [J]. 电力电子技术, 1994 (4): 63 - 65.
- [16] JIAO Y, LI H, GONG H. A frequency characteristics modelling method for current sensors based on the electromagnetic induction principle [C] //2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) IEEE, 2020: 1 - 6.
- [17] LU C, ZHOU H, LI L, et al. Split-core magnetoelectric current sensor and wireless current measurement application [J]. Measurement, 2022, 188: 110527.
- [18] 国智博, 陈 锋, 王彦昊, 等. 基于动态无功补偿技术的磁平衡式电流互感器设计 [J]. 电工技术学报, 2022, 37: 217 - 224.
- [19] 华舜高科. 磁通门传感器—HSF-300 带通系列 [Z]. 华舜高科, 2020.
- [20] 南京茶花有限公司. CS050LX 系列霍尔电流传感器 [Z]. 南京: 南京茶花有限公司, 2018.
- [21] 周 俊, 陈 浩. 闭环霍尔传感器设计与优化 [J]. 传感器世界, 2020, 26 (6): 31 - 37.
- [22] 阳桂蓉. 开环霍尔电流传感器磁芯设计 [J]. 自动化与仪表, 2017 (2): 74 - 76.
- [23] 董向成, 周 玲, 朱实强. 开环式 GMR 传感器电流测量实验研究 [J]. 物理实验, 2018, 38 (5): 13 - 16.
- [24] 韩 梦. 新型不带磁芯开环霍尔电流传感器的设计 [J]. 计量与测试技术, 2018, 45 (7): 17 - 19.
- [19] LI W, CHEN J, LIU X, et al. Intelligent dynamic spectrum Anti-Jamming communications: a deep reinforcement learning perspective [J]. IEEE Wireless Commun, 2022, 29 (5), 60 - 67.
- [20] JI Q, ZHANG H, QI X, et al. Deep reinforcement learning based frequency hopping strategy for wideband Anti-Jamming wireless communication [J]. IEEE Trans. Veh. Technol, 2024, 73 (3): 3568 - 3579.
- [21] CHANG X, LI Y, ZHAO Y, et al. An improved Anti-Jamming method based on deep reinforcement learning and feature engineering [J]. IEEE Access, 2022, 10: 69992 - 70000.
- [22] CUI K, YANG L, GUAN T, et al. Efficient interference detection for satellite communications based on Non-Uniform adaptive segmentation [J]. Electronics, 2025, 14 (9): 1792.
- [23] LI L, WANG P, ZHAN D, et al. Jamming detection and suppression technique for OTFS systems in an AWGN channel [J]. Electronics, 2025, 14 (7): 1286.
- [24] 刘宇宁, 王赛宇, 潘申富, 等. 一种改进的跳频抗干扰定时同步算法 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (2): 256 - 261.