

离轴磁编码器在 eQEP 模块下的测量方法研究

孙振钦, 曲建华, 张臻臻, 权晓, 李洪滨, 谭鹏

(北京航空航天大学 宁波创新研究院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 为了提高目前应用于姿态控制执行机构中的无刷直流电机对于位置以及速度闭环的测量精度, 提出了基于增量式离轴磁编码器(AS5304A)与内部集成增强型正交编码器脉冲(eQEP)模块的 TMS570 芯片为基础的累加脉冲 M/T 法。通过深入研究和实验分析, 在整个运行转速可测量范围内测量精度能够保持在 1% 左右, 可实现高精度的转速测量, 相比传统测速方案有明显的精度提升。

关键词: 无刷直流电机; 增强型正交编码器脉冲模块; 增量式离轴磁编码器; M/T 法

中图分类号: TM306 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24341

Research on Measurement Method of Off-axis Magnetic Encoder Under eQEP Module

SUN Zhenqin, QU Jianhua, ZHANG Zhenzhen, QUAN Xiao, LI Hongbin, TAN Peng

(Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315832, Zhejiang, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of the position and speed closed-loop of the brushless DC motor, which is currently used in the attitude control actuator, a new cumulative pulse M/T method was proposed, based on incremental off-axis magnetic encoder (AS5304A) and TMS570 chip internal integrated enhanced quadrature encoder pulse (eQEP) module. By deep dive researching and experimental analysis, the measurement accuracy of the entire operating speed measurable range can be maintained around 1%, and the high-precision speed measurement can be achieved as well. Compared with the traditional speed measurement scheme, the accuracy is significantly improved.

Key words: brushless DC motor; enhanced quadrature encoder pulse (eQEP) module; incremental off-axis magnetic encoder; M/T method

无刷直流电机广泛应用在航空航天、自动化、工农业生产等领域^[1]。目前应用于姿态控制执行机构的无刷直流电机一般采用光电编码器或霍尔器件作为位置速度传感器。霍尔测量器件存在测速精度低的缺点, 其原因在于电动机旋转一周仅能产生 3 倍于极对数的测速脉冲数, 因此在需要频繁过零调速并强调低速平稳性的飞轮中应用较少^[2-3]。采用光电编码器作为飞轮的位置传感器可以得到更多的脉冲数, 但存在结构复杂、体积大、成本高、可靠性差的问题^[2, 4]。

本研究为了配合如图 1 所示的无刷直流电机, 进行位置速度传感器的研究, 在保证电机整体高度和体积的情况下, 合理利用仅有的 2.8 mm 空隙进行设计。由此提出了基于 AS5304A 增量式离轴磁编码器设计。其次配合基于内置增强型正交编码器脉冲(enhanced quadrature encoder pulse, eQEP) 模块的 TMS570LS1224 微控制器进

行测速算法开发。基于两者结合进行低成本、小体积、易安装、高可靠性、高精度、快响应的测量方案研究。

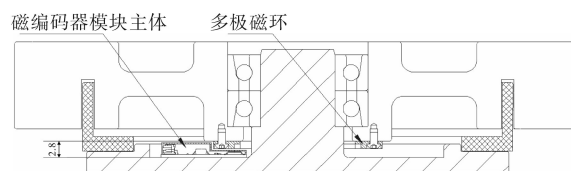


图1 磁环和编码器安装示意图

Fig.1 Installation diagram of magnetic ring and encoder

1 增量式离轴磁编码器介绍

1.1 选择增量式离轴磁编码器的原因

1.1.1 磁编码器对比光电编码器的优势

如图 2 所示, 光电编码器是由光源、码盘、检测光栅、光电检测器件和转换电路 5 部分组成^[4], 而磁编码器只需要检测磁环和检测芯片 2 部分就能组成^[5]。

作者简介: 孙振钦(1993—), 男, 本科, 工程师, Email: sunzhenqin@buaa.edu.cn

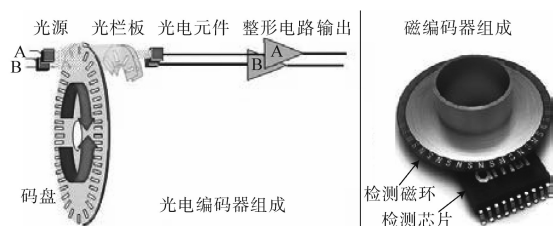


图2 光电编码器和磁编码器结构

Fig.2 Structure of photoelectric encoder and magnetic encoder

磁编码器与光电编码器还有其他的不同之处在于对灰尘、污渍、液体和油脂等污染物以及震动和振动不敏感。同时磁编码器芯片与磁环间的间隙不需要像光学编码器那样清洁和通透,只要磁环和芯片之间不存在任何含铁材质,就能够检测到电磁脉冲信号^[5-7]。

根据以上两点优势,采用磁编码器可以简化安装设计的难度,从而降低成本,同时还提高了可靠性。

1.1.2 离轴式对比同轴式的优势

磁编码器分为离轴式和同轴式。同轴磁编码器在安装时需要磁铁的南北磁极中点、芯片中心和电机轴端中心保持在同一直线上,不然就会降低同轴编码器的准确性。离轴式磁编码器采用多磁对极磁环,芯片安装位置可以偏离旋转轴中心进行安装,只要在实际安装过程中确保编码器相对于磁盘的径向位置以及编码器与磁体之间的间隙距离,就能保证输出信号的准确性^[8]。

1.2 AS5304A 增量式离轴磁编码器工作原理

AS5304A 是艾迈斯半导体公司开发的应用于线性和离轴运动检测的集成霍尔元件的芯片,提供正交增量输出和模拟输出(analog output, AO)^[9]。

1.2.1 AS5304A 正交增量输出

AS5304A 安装在离轴的多极磁化环下可以测量旋转运动,提供正交增量输出 A/B 和 Index 输出,每极周期输出 40 个正交增量脉冲(160 步)和 1 个 Index 脉冲,如图 3 所示^[9]。

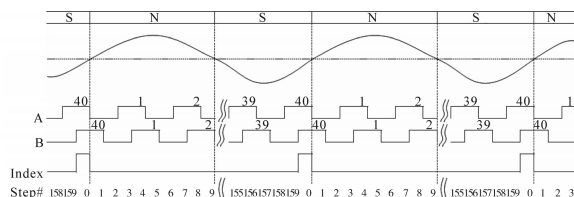


图3 正交增量 A/B 输出和 Index 输出

Fig.3 Quadrature A/B and Index output

1.2.2 模拟输出

模拟输出(AO)提供了一个模拟输出电压,该

电压基于霍尔传感器信号在控制环中的自动增益控制(automatic gain control, AGC)技术^[9],可用于监测磁场强度,磁场强度越高,AO 输出越低,反之则越高,从而确定多级磁环与芯片之间的间隙距离,在安装时要尽量保证 AO 输出在 1.2~3 V 范围内,如图 4 所示。

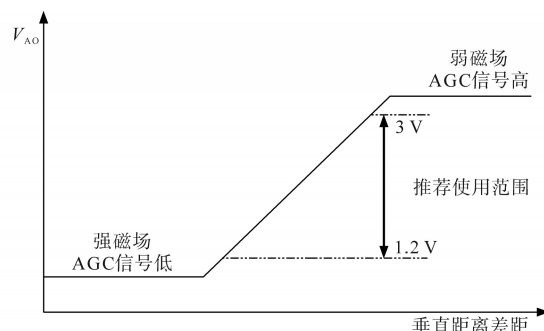


图4 AO 与 AGC、磁场强度、磁体与 IC 之间的间隙

Fig.4 AO and AGC, magnetic field strength, magnet-to-IC gap

同时该芯片对多极磁环的极对长度要求为 4 mm(2 mm S 极/2 mm N 极),磁场强度应在 5~60 mT 范围内。

2 增量式离轴磁编码器设计

2.1 磁编码器主体电路设计

AS5304A 的高集成度使得外围电路的设计相对简单^[9],另外在编码器输出端添加 AM26C31 将单端信号转换为差分信号输出,提高整体的输出抗干扰能力,设计实物电路板安装如图 5 所示。

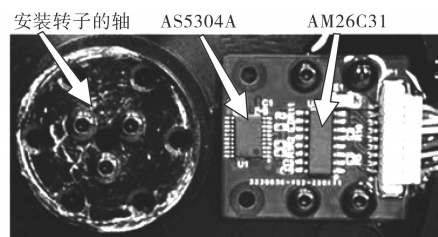


图5 实物电路板安装

Fig.5 Installation of physical circuit board

2.2 磁编码器多极磁环设计

根据不同电机的尺寸以及转速要求,除了要满足磁环极对长度和磁场强度外,还要考虑磁环的充磁方式、极对数的选择。磁编码器的安装方式取决于充磁方向;安装尺寸、分辨率和测量转速大小都取决于磁环上的极对数。

2.2.1 充磁方向

应用于离轴磁编码器的磁环有两种充磁方式,分别为端面充磁和外径充磁。端面充磁的应用是将编码器安装于配合轴向旋转电机的磁环

端面下方,外径充磁则是将编码器安装与配合径向旋转电机的磁环外径下方。图6所示为不同充磁方式的应用方法^[9]。

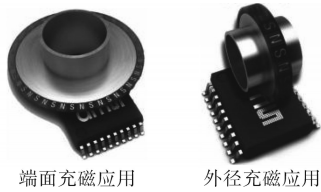


图6 不同充磁方式的应用方法

Fig.6 Application methods of different magnetization methods

2.2.2 编码器安装尺寸

编码器安装尺寸主要由磁环的直径决定,磁环直径则随磁环上极对数的增加呈线性增加。公式如下^[9]:

$$d_{NS} = L_{NS} \times n_p \div \pi \quad (1)$$

式中: d_{NS} 为磁环直径; L_{NS} 为磁极对长度,固定为4 mm; n_p 为磁极对数。

以32极对磁环(实物如图7所示)举例,计算得磁环中心直径约为40.76 mm。

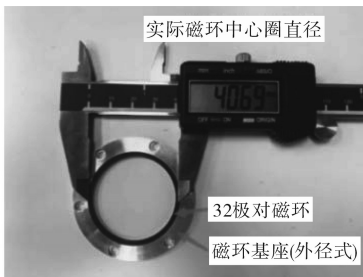


图7 32极对带基座磁环实物

Fig.7 32 multi-pole ring magnet

2.2.3 编码器分辨率

编码器分辨率随磁环的极对数增加而线性增加。一个极对的分辨率为160步,磁编码器的总分辨率公式如下^[9]:

$$Resolution = Factor \times n_p \quad (2)$$

式中: $Resolution$ 为磁环直径; $Factor$ 为内插因子固定数值为单极对的分辨率,160步。

以32极对磁环举例(实物如图7所示),计算得编码器分辨率为5 120步/r,0.070 3(°)/步。

2.2.4 编码器最高测量转速

AS5304A采用快速插值技术(fast interpolation technique),允许输入频率为5 kHz。这意味着,它可以以5 000极对/s或300 000 r/min的顺序处理磁场变化。由于磁环由多个极对组成,所以上面的值必须除以极对的个数才能得到最大的转速,计算公式如下^[9]:

$$MaxRS = 300\,000 \div n_p \quad (3)$$

式中: $MaxRS$ 为最高测量转速。

以32极对磁环举例(实物如图7所示),计算得编码器最高测量转速为9 375 r/min。

3 主控芯片及eQEP模块

3.1 主控芯片 TMS570LS1224 介绍

TMS570LS1224芯片是用于安全系统的高性能汽车级微控制器。其安全架构集成了ARM Cortex-R4F浮点锁步双中央处理器(central processing unit, CPU),可提供高达180 MHz的系统时钟。同时芯片包含2个可独立工作的eQEP模块,使用VCLK4系统时钟通道最高提供80 MHz时钟频率。

3.2 eQEP模块介绍

主要逻辑组成单元:正交编码单元(quadrature decoder unit, QDU)用于捕捉正交脉冲;位置计数和控制单元(position counter and control unit, PCCU)用于位置检测;正交边沿捕获单元(quadrature edge-capture unit, QCAP)记录设定脉冲次数触发的使用时间,适合低速测量(T法);定时器基准单元(unit time base, UTIME)记录设定周期内触发脉冲的次数,适合高速测量(M法);看门狗检测单元(watchdog timer, QWDOG)用于检测停顿^[10-11]。

每个eQEP模块有4路输入信号:2路用于接收正交增量型号A和B(quadrature encoder pulse A/B, QEPA/QEPB),1路用于接收Index信号或标记起始位置的位置索引脉冲信号(index or zero marker, QEPI),以及可以用于初始化或锁存位置计数器选择输入信号(strobe input, QEPS)。

3.3 eQEP模块正交计数模式工作原理

当eQEP单元设置工作模式为正交计数模式时,通过检测QEPA和QEPB信号的边沿从而为位置计数器产生计数脉冲,因此eQEP逻辑产生的时钟频率是输入时钟频率的4倍。图8所示为正交时钟(quadrature-clock, QCLK)与QEPA和QEPB的关系^[10-11]。

同时正交编码单元通过确定QEPA和QEPB两个脉冲的先后顺序,可以判断旋转方向(eQEP quadrature-direction, QDIR)以及位置计数器(eQEP position counter register, QPOSCNT)的加減。顺时针定义为正转,QEPA比QEPB相位超前90°,此时QDIR为高电平,QPOSCNT增加,逆时针则反之,如图8所示。

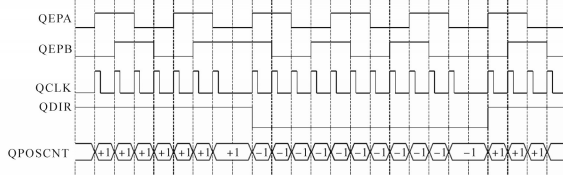


图8 eQEP模块正交时钟和解码

Fig.8 eQEP quadrature-clock and direction decoding

4 测速算法

使用编码器的测速算法原理是利用了定时器和计数器配合编码器输出的脉冲型号来测量电机的转速、位置和方向。

转速测量方法有M法,T法,M/T法3种,分别介绍如下:

1)M法:如图9所示,通过定时器设定一个规定时间 T_c ,然后通过记录规定时间 T_c 内编码器输出的脉冲信号 M_1 来计算转速,适用于测试高速运动^[10-14]。

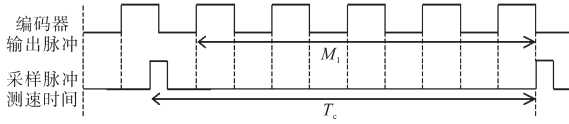


图9 M法测速原理

Fig.9 Principle of M method velocity measurement

$$n = \frac{60 \times M_1}{N \times T_c} \quad (4)$$

式中: n 为转速; N 为磁编码器每转输出的脉冲。

2)T法:如图10所示,通过设置一个高频时钟脉冲,在脉冲允许的时间范围内记录编码器相邻脉冲触发所使用的高频时钟脉冲个数 M_2 来计算转速,适用于测试低速运动^[10-14]。

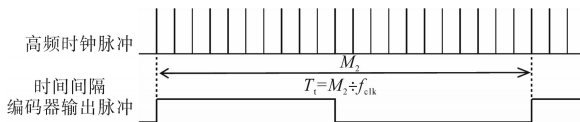


图10 T法测速原理

Fig.10 Principle of T method velocity measurement

$$n = \frac{60 \times f_{clk}}{N \times M_2} \quad (5)$$

式中: f_{clk} 为高频时钟频率。

3)M/T法:兼顾高速与低速,选择M法和T法结合使用,称为M/T测速法。它结合了M法和T法的优点,在中高速段近似为M法,在低速段近似为T法^[10-14]。

如图11所示,一般M/T法测速的原理是在通过定时器设定一个规定时间 T_c ,在 T_c 时间内同时记录编码器输出的正交脉冲个数 M_1 和另一个定时器提供的高频脉冲个数 M_2 。用 M_2 计算出的时

间替代规定时间 T_c 进行转速的计算。

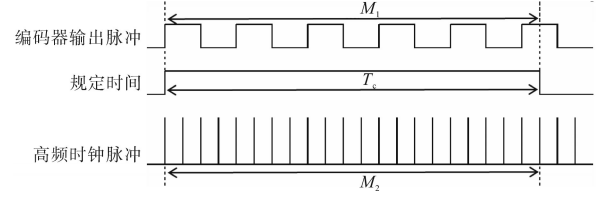


图11 M/T法测速原理

Fig.11 Principle of M/T method velocity measurement

$$n = \frac{60 \times f_{clk} \times M_1}{N \times M_2} \quad (6)$$

5 基于eQEP累加脉冲M/T法

一般基于eQEP的M/T法能够提供的高频时钟脉冲是有限的,捕获时钟(eQEP capture timer register, QCTMR)以系统时钟分频后的时基作基准运行,捕获时钟能提供的最大脉冲数只有65 535个,所以提出了累加脉冲M/T法提高高频脉冲数,从而提升测速精度。

5.1 eQEP基础设置说明

设置eQEP在锁存方式为单位定时器超时模式(ON_UNIT_TIMEOUT_EVENT, UTOUT)下工作。此工作模式下:可以设置一个规定时间 T_c ,当单位定时器计数超过 T_c 时(也就是UTOUT触发时),会将QPOSCNT, QCTMR和捕获周期值(capture period register, QCPRD)锁定到锁存位置计数器(eQEP position counter latch register, QPOSLAT)、锁存捕获定时器(eQEP capture timer latch register, QCTMRLAT)和锁存捕获周期(eQEP capture period latch register, QCPRDLAT)寄存器中。同时复位模式配置为“位置计数器达到最大值”时复位。

5.2 累加脉冲M/T法中 M_1 与 M_2 获取

图12为基于eQEP累加脉冲M/T法的时序图。

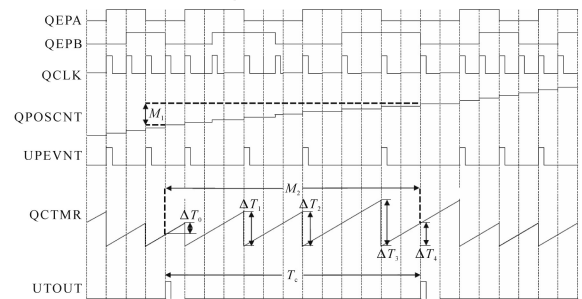


图12 基于eQEP累加脉冲M/T法的时序图

Fig.12 Timing diagram based on eQEP cumulative pulse M/T method

以图12所示的时序为例解释算法, M_1 是在 T_c 时间计时开始和结束时分别读取一次eQEP的QPOSLAT进行差值计算; M_2 是通过单位位置事

件触发(unit position event flag, UPEVNT)记录 T_c 时间的锁存在 QCPRD(此寄存器保存最后一个连续的 eQEP 位置事件之间的期间计数值)中的值进行累加,其中第一次要去掉 T_c 前的高频脉冲只保留 ΔT_0 ,最后一次只保留 T_c 内的高频脉冲置 $\Delta T_4^{[13-14]}$ 。 M_1 和 M_2 表达式为

$$M_1 = QPOSLAT_0 - QPOSLAT_1 \quad (7)$$

$$M_2 = \Delta T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 \\ = (QCPRD_0 - QCTMRLAT_0) + QCPRD_1 + \\ QCPRD_2 + QCPRD_3 + QCTMRLAT_1 \quad (8)$$

式中: $QPOSLAT_0, QPOSLAT_1$ 分别为 T_c 时间计时开始和结束时的位置计数器值; $QCPRD_0 \sim QCPRD_3$ 为图 12 所示的时序此次在 T_c 内触发了 4 次 UPEVNT 事件的捕获周期值; $QCTMRLAT_0, QCTMRLAT_1$ 分别为 T_c 时间计时开始和结束时捕获定时器值。

5.3 累加脉冲 M/T 法程序运行流程

流程图如图 13 所示,在完成 eQEP 和参数初始化后就可以开始等待第一次单位定时器(UTOUT)超时,当超时发生后读取锁存在 QCTMRLAT 中触发当时的捕获定时器值记录为 $QCTMRLAT_0$,同时读取当前位置计数器值 $QPOSLAT$,记录为 $QPOSLAT_0$ 。之后在规定的 T_c 时间内记录每次 UPEVNT 事件下锁存的 QCPRD 记录为 $QCPRD_n$ 。在出现 UTOUT 超时后,记录当前 QCTMRLAT 中的值记录为 $QPOSLAT_1$,并记录 QCTMRLAT 中触发当时的捕获定时器值记录为 $QCTMRLAT_1$ 。此时就可以根据获取到的 $QPOSLAT_{0-1}, QCTMRLAT_{0-1}$ 和 $QCPRD_{0-n}$ 3 组数组计算出 M_1 和 M_2 的值,然后根据 M/T 法公式就能完成转速计算。

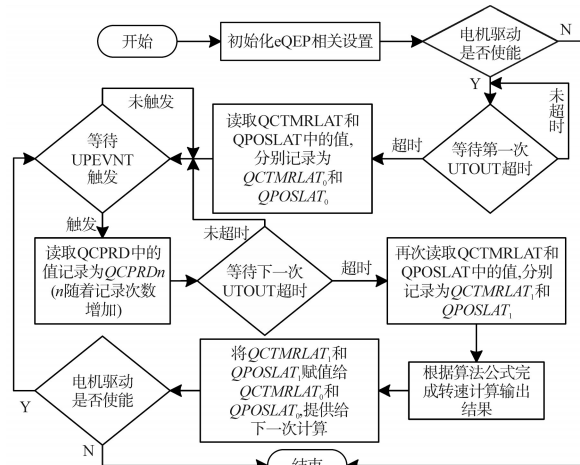


图 13 程序运行流程图

Fig.13 Flow chart of program running

5.4 测试实验

基于 eQEP 的基础设置上,将规定时间 T_c 设置

为 2 ms;UPEVNT 单位位置事件设置为 2 次正交脉冲触发一次;QCTMR 的时钟频率单不分频为 80 MHz,UPEVNT 事件的最大触发时间约 0.819 ms。

通过上述设置 M_2 可记录的最大高频脉冲数为 160 000,同时本次实验使用的是 32 对极磁环, M_1 可以获取的位置计数器最大值设为 5 120。此设置理论能够测试最小转速为 28.6 r/min,最大转速为 9 375 r/min。

完成上述设置后,根据本研究提出的累加脉冲 M/T 法,使用转速计福禄克 F931 和自研无刷直流电机搭建测试实验平台,并在平台上进行试验验证,如图 14 所示。

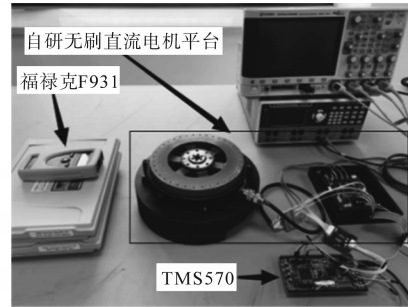


图 14 测试实验平台

Fig.14 Experimental platform

在测试实验平台上控制电机在不同速度下进行测试实验,得到如表 1 的实验数据。

表 1 测试实验数据

Tab.1 Experimental data

转速计测量 均值/(r·min ⁻¹)	累加 M/T 法			
	测速均值/ (r·min ⁻¹)	相对误差/ %	测速范围/ (r·min ⁻¹)	范围误差/ %
543.1	543.5	0.07	536.2~548.8	1.27
1 050	1 051.6	0.15	1 043~1 059	0.82
2 064	2 066.5	0.12	2 055~2 076	0.55
4 000	4 012.4	0.31	3 996~4 024	0.41
7 018	7 077.14	0.83	7 063~7 094	0.24

图 15 为转速计测试 1 050 r/min 时累加脉冲 M/T 法输出的转速动态误差图。

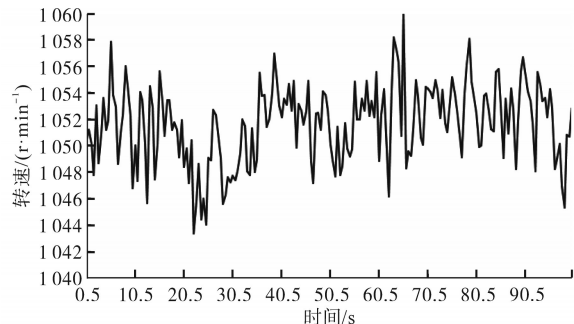


图 15 1 050 r/min 时转速动态误差图

Fig.15 Dynamic error diagram of rotational speed at 1 050 r/min

从上述数据中显示,此累加M/T方法相对误差会随着转速升高而升高,但是测量转速的误差范围是在一直降低的,在整个运行转速可测量范围内测量精度能够保持在1%左右,可实现高精度的转速测量。

6 结论

本研究主要通过对离轴磁编码器以及eQEP增强型正交编码单元两者的深度研究,实现了测量无刷直流电机转速的方法,同时提出了一种新的测速算法:eQEP累加脉冲M/T法。通过实验证明了此方案的可行性,相比于文献[2]和文献[3]中提到的测速方案,精度有了明显的提高。其次基于此离轴磁编码器的设计方案不仅安装体积小(如图1和图5所示),同时也将磁编码器成本控制在了200元以内,非常适合应用于姿态控制执行机构的无刷直流电机中进行转速、位置以及方向测量。

参考文献

- [1] 杨兴旺,胡黄水,卿金晖. 无刷直流电机PID控制器[J]. 长春工业大学学报,2020,41(3):289-292.
YANG Xingwang, HU Huangshui, QING Jinhui. PID controller for brushless DC motor[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2020, 41(3): 289-292.
- [2] 胥汇臻,金文芳,吴珍. 多霍尔器件提高飞轮转速测量精度的研究[J]. 航空精密制造技术,2017,53(5):9-11,18.
XU Huili, JIN Wenfang, WU Zhen. Research of increasing measurement precision of flywheel speed based on hall position sensors[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(5): 9-11, 18.
- [3] 刘虎,杨振鹏,武登云. 基于位移信号的磁悬浮飞轮转速估计[J]. 光学精密工程,2020,28(5):1116-1123.
LIU Hu, YANG Zhenpeng, WU Dengyun. Estimation of rotor speed using displacement signals in magnetic suspended flywheel[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(5): 1116-1123.
- [4] 张建辉,陈震林,张帆. 绝对式光电编码器的编码理论研究进展[J]. 振动. 测试与诊断,2021,41(1):1-12,197.
ZHANG Jianhui, CHEN Zhenlin, ZHANG Fan. Advances in coding theory of absolute optical encoders[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 1-12, 197.
- [5] 袁野. 绝对式磁编码器设计及其在伺服系统的应用[J]. 传感技术学报,2019,32(4):625-630.
YUAN Ye. Design of an absolute magnetic encoder and its applications in servo systems[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(4): 625-630.
- [6] 张大麟,金朝鲜. 全闭环控制系统在YHK250摇篮式工作台中的应用[J]. 内燃机与配件,2021(17):94-95.
ZHANG Dalin, JIN Chaoxian. Application of full closed loop control system in YHK250 cradle workbench[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(17): 94-95.
- [7] 梁芳萍,曹广忠,赵磊,等. 磁编码器技术现状及发展研究[J]. 自动化仪表,2021,42(8):1-6,12.
LIANG Fangping, CAO Guangzhong, ZHAO Lei, et al. Current status and development of magnetic encoder technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(8): 1-6, 12.
- [8] 铁姆肯(中国)投资有限公司. 离轴设计为磁编码器开拓全新应用领域[J]. 金属材料与冶金工程,2015,43(4):56-57.
Timken®. Off-axis design extends the applications of magnet encoders[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2015, 43(4): 56-57.
- [9] 艾迈斯半导体. AS5304/AS5306数据手册:奥地利,v3-00[EB/OL]. (2022-01-24) [2022-04-28]. https://ams.com/documents/20143/36005/AS5304_06_DS000187_3-00.pdf.
AMS. AS5304/AS5306 datasheet: Austria, v3-00[EB/OL]. (2022-01-24) [2022-04-28]. https://ams.com/documents/20143/36005/AS5304_06_DS000187_3-00.pdf.
- [10] 李勇,潘松峰. 基于DSP的M/T法测速研究[J]. 工业控制计算机,2018,31(5):145-146.
LI Yong, PAN Songfeng. Research on M/T method based on DSP[J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(5): 145-146.
- [11] 张涛,杨振强,王晓旭. 应用eQEP及编码器测量电机位置与速度的方法[J]. 电气传动,2011,41(4):48-51.
ZHANG Tao, YANG Zhenqiang, WANG Xiaoxu. Method of measuring motor position and speed with eQEP unit and encoder[J]. Electric Drive, 2011, 41(4): 48-51.
- [12] 郭丹,王大明,李寒. 基于磁编码器无刷直流电机转速及位置的检测[J]. 计算机与数字工程,2015,43(3):508-510,532.
GUO Dan, WANG Daming, LI Han. Detection of brushless DC motor speed and location based on magnetic encoder[J]. Computer & Digital Engineering, 2015, 43(3): 508-510, 532.
- [13] 郭力峰,伍小杰,姜建国,等. 增量式编码器的脉宽误差分析及新型补偿算法[J]. 电气传动,2013,43(3):77-80.
GUO Lifeng, WU Xiaojie, JIANG Jianguo, et al. Increment encoder pulse width errors analysis and new compensation algorithm[J]. Electric Drive, 2013, 43(3): 77-80.
- [14] 孙丛君,张喜茂. 基于TMS320F2812的直接转矩数字控制系统[J]. 电气传动,2019,49(3):26-31.
SUN Congjun, ZHANG Ximao. Direct torque digital control system based on TMS320F2812[J]. Electric Drive, 2019, 49(3): 26-31.

收稿日期:2022-04-28

修改稿日期:2022-06-17