

基于大型光电设备应用的永磁同步电机性能测试分析

刘雪梅 吴庆林 李洪文 张斌 刘洋 王春禹
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要:近年来,随着大型光电设备的应用需求不断增加,其稳定可靠的驱动方法逐渐成为研究热点。直流有刷电机因为具有非线性周期转矩波动和大电流引起的电磁干扰等固有缺点,已经无法满足设备体量不断增大的需求。永磁同步电机作为一种技术成熟的电机,具有运行稳定,输出力矩大,可靠性高等特点,逐渐成为大型光电设备驱动电机的一种优选方案。评估大型光电设备中永磁同步电机的性能,以确保其在高精度光电系统中的性能和可靠性。通过设置模拟实际工作环境,采用标准化测试流程对永磁同步电机进行测试,重点关注其速度阶跃指标和平稳性的测试。测试结果表明,永磁同步电机在速度阶跃过程中超调量低于15%,稳定时间优于0.4 s;低速运行时的速度波动均能达到设备使用要求。可见,永磁同步电机在大型光电设备应用中表现出高效的性能和良好的可靠性,可作为大型光电设备驱动单元的优选方案。

关键词:永磁同步电机;电机控制;大型光电设备

中图分类号: TM341;TP13;TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120.3

Performance test and analysis of permanent magnet synchronous motor based on large photoelectric equipment

Liu Xuemei Wu Qinglin Li Hongwen Zhang Bin Liu Yang Wang Chunyu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In recent years, with the increasing demand for large optoelectronic devices, stable and reliable driving methods have gradually become a research hotspot. DC brushed motors, due to their inherent drawbacks such as nonlinear periodic torque fluctuations and electromagnetic interference caused by high currents, are no longer able to meet the increasing demand for equipment volume. As a mature motor technology, permanent magnet synchronous motor has the characteristics of stable operation, high output torque, and high reliability, and has gradually become a preferred solution for driving motors in large optoelectronic equipment. The purpose of this paper is to evaluate the performance of PMSM in large optoelectronic devices to ensure their performance and reliability in high-precision optoelectronic systems. By setting up to simulate the actual working environment, the PMSM is tested using a standardized test process, focusing on the test of its speed step and smoothness. The test results show that the overshoot of the PMSM is less than 15% and the stability time is better than 0.4 s in the process of speed step, and the speed fluctuation in low-speed operation can meet the requirements of equipment. It can be seen that the PMSM shows efficient performance and good reliability in the application of large optoelectronic equipment, and can be used as the preferred solution for the drive unit of large optoelectronic equipment.

Keywords: PMSM; motor control; large optoelectronic equipment

0 引言

近年来,随着大型光电设备在天文观测、军事国防、环境监测和工业自动化领域的广泛应用,需求量不断增加,相关领域的研究逐渐成为热点。主要研究方向包括如下

4个方面:1)提升设备的性能与精度;2)增强设备的适应性与可靠性;3)拓展设备的应用领域;4)降低能耗与成本。

有刷直流电机因为具有低速运行精度高的特点,一直广泛应用于国内外的大型光电设备中^[1]。随着设备体量

的逐渐增大,采用直流有刷电机直接驱动的优点逐渐突显,直流有刷电机使用机械电刷换向,存在周期性的非线性转矩扰动,同时,换向器引起的电火花容易对其他电子设备产生电磁干扰,导致设备的跟踪性能大大降低^[2]。电机需驱动的负载逐渐增大,驱动电流势必进一步提高,大电流引发的热量问题成为无法克服的难题。直流有刷电机由于其自身固有的缺陷,已经不再适合继续应用于新一代大型光电设备的驱动^[3]。

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)以其高效率、高功率密度和优异的控制性能,成为了研究的重点。相关研究表明,采用永磁同步电机的直接驱动方式是较为合理的^[4-6]。然而目前的主要研究成果主要集中在永磁同步电机的控制算法上^[7-9],且多数算法研究以理论分析和仿真验证为主^[10-11],对永磁同步电机的实际性能测试鲜有涉猎。

为验证永磁同步电机在大型光电设备上运行的性能指标,尤其是等速运行时的速度波动情况。本文通过设计相关的测试试验对我们关心的永磁同步电机性能指标尤其是低速性能进行了详细的测试,试验结果表明该永磁同步电机可以满足其在大型光电设备中的应用需求。

1 永磁同步电机简介

作为永磁电机的一个分支,永磁同步电机的转速在稳定运行时与电源频率保持恒定的关系,这一固有特性使得它可以直接用于开环的变频调速系统,尤其适用于由同一变频电源供电的多台电机同步传动系统中,可实现无刷运行,而且具有较高的效率和功率因数可以减小价格昂贵的配套变频电源的容量。永磁同步电机的无刷运行可以提高电机的稳定性,延长电机的使用寿命,避免有刷电机带来的碳刷磨损和大电流易产生电火花等一系列问题。

1.1 永磁同步电机原理^[12]

永磁同步电机的工作原理可以简单概括为由同步转速的定子内部产生的旋转磁场与转子永磁体产生的恒定磁场相互作用,旋转磁场带动永磁体旋转,产生电磁力,使转子开始转动,可通过控制器来控制流入定子绕组的电流,从而控制电机的旋转速度^[13-15]。需要满足如下特点。

1) 旋转磁场,三相对称交流电通过定子绕组产生旋转运动的定子旋转磁场。

2) 恒定磁场,转子永磁体在气隙空间产生的恒定磁场。

3) 基于以上两点,两种磁场相互作用,产生驱动力矩,使转子由静止开始加速转动。

1.2 永磁同步电机的控制^[12]

想要控制永磁同步电机,首先要了解它的工作原理,通过交流电源输送三项电流,定子绕组与转子永磁体相互作用,产生电磁力,通过对电流的精确控制从而控制电机的力矩和速度^[11-17]。

控制电机可以通过如下3种控制方式:速度控制,控制电机旋转快慢的程度;位置控制,控制电机旋转角度的大小;力矩控制,控制电机旋转力度的大小。

无论选择哪种控制方式,力矩控制作为最核心的方式是必不可缺的。

电机的力矩控制过程如下:通过特定的控制算法来控制开关管的通断组合,达到给电机定子线圈施加设定电压的目的,该电压抵消掉电机的反电势后产生电流,从而产生对应的力矩与外部负载平衡,使得电机平稳旋转。电机的力矩控制目前有两种主要的方法,磁场定向控制(field oriented control, FOC)和直接转矩控制(direct torque control, DTC)。

1) FOC^[3-4, 10-11]

定子磁势可以分解为相互垂直的 d 轴磁势和 q 轴磁势, d 轴磁势与转子磁势平行,无法产生切向转动力矩,但是会影响转子永磁体所产生的磁场;而 q 轴与转子磁势方向相差 90° ,可以产生切向转动力矩。FOC的控制的基本思路就是将三相静止坐标系下的变量转换到旋转的 $d-q$ 坐标系下,通过控制算法的运算来控制改变 d 轴和 q 轴的电压从而控制 d 轴和 q 轴电流。但最终输出给电机的三相电压只能是静止坐标系下的,因此在控制算法中需要再次把 $d-q$ 轴的电压转换成三相电压给驱动器的开关管。需要完成一个物理模型→数学模型(控制算法)→物理模型的变换。

2) DTC

DTC是20世纪80年代中期提出,其基本思路为不需要将定子侧的静止坐标系折算到转子的旋转坐标系下,跳过了矢量控制中电流解耦的思路,不再需要PI调节模块、反Clark-Park变换和空间矢量脉宽模块。只需通过检测母线电压和定子电流,便能够直接计算出电机的磁链与转矩,利用两个滞环比较器直接实现对定子磁链和转矩的控制。定子绕组本身就是一个传感器,可以直接测量感应出来的电压,电压即为磁场的微分,电压积分后就能得到磁通,可以判断磁场的位置和方向,因此该方法被称为直接转矩控制。

2 电机测试试验系统

2.1 试验系统组成

为完成对电机各项指标的详细评测,需要搭建一个科学合理的试验平台。该试验平台主要包括被测对象(电机及控制器)、驱动负载(转台)和位置传感器(编码器)。电机测试系统原理如图1所示。

试验使用的电机为美国Parker公司生产的型号为400STK2M1C的永磁同步电机;驱动控制器同为Parker公司生产的型号为C3S300V4F12I11T40M10的电机控制器;转台位置传感器为雷尼绍公司的圆光栅增量式编码器,其角分辨率为 0.079arcsec ($3600\text{arcsec}=1^\circ$)。图2所示为测试转台实物,图3所示为电机和控制器实物。

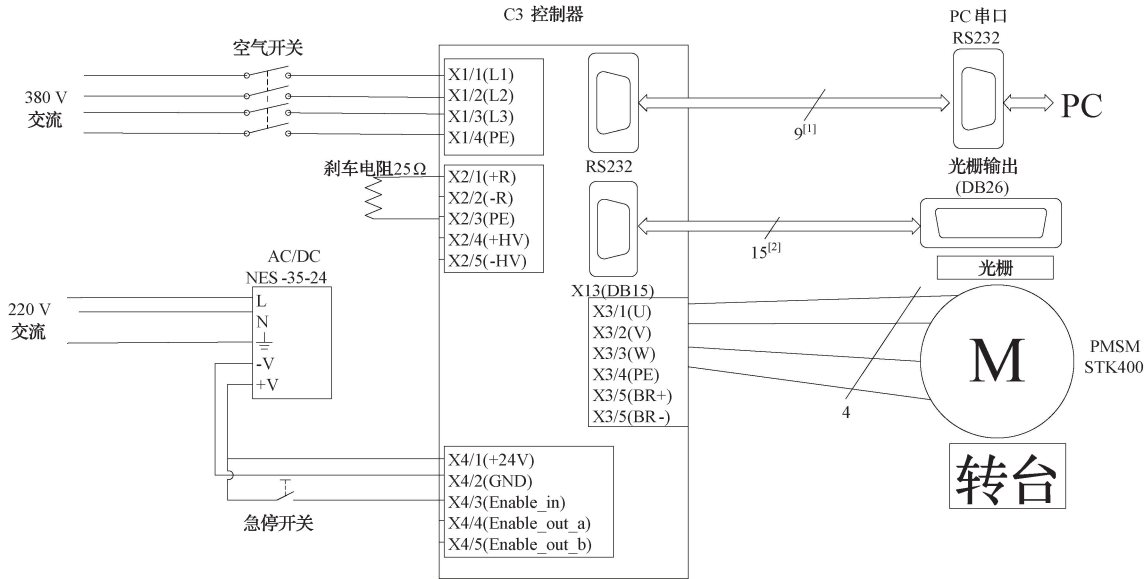


图 1 电机测试系统原理

Fig.1 Schematic diagram of motor test system

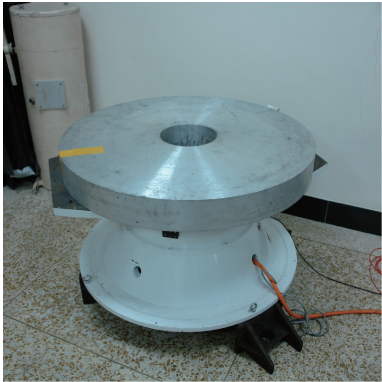


图 2 电机测试转台

Fig.2 Turntable for motor test

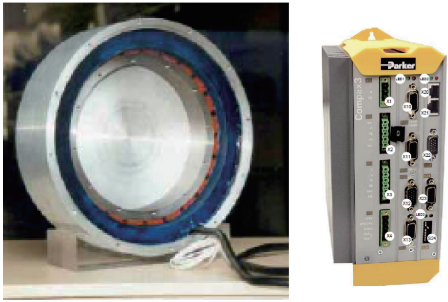


图 3 电机与控制器实物

Fig.3 Physical picture of motor and controller

2.2 测试方案

本文试验主要通过如下 3 方面对电机的性能进行测试。

1)速度阶跃响应

在电机静止状态下给定一个初始速度,通过电机的运行情况来测定电机的动态相应特性。

2)等速波动

让电机匀速运行来测定电机在不同速度下的速度波动情况。

3)正弦引导^[18]

给定电机一个正弦引导信号来测定其跟踪误差。

通过以上 3 个方面的测试综合来综合评价电机的性能。

2.3 控制器设置

为了让电机按照预定的方式运行需要利用电机控制器对电机加以控制^[19-20]。C3S 控制器的配置方式如图 4 所示。

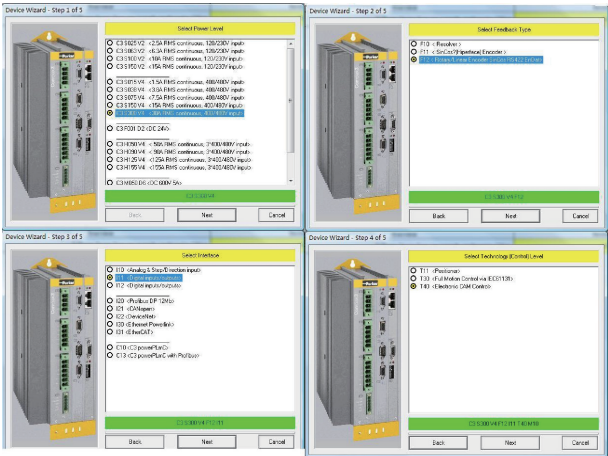


图 4 C3S 控制器配置

Fig.4 C3S controller configuration diagram

3 测试结果

3.1 速度阶跃响应

如图5所示,设定一个变速运动过程为 $0.005^{\circ}/\text{s} \rightarrow 0.05^{\circ}/\text{s} \rightarrow 0.1^{\circ}/\text{s} \rightarrow 0.5^{\circ}/\text{s} \rightarrow 0.005^{\circ}/\text{s} \rightarrow -0.05^{\circ}/\text{s} \rightarrow -0.1^{\circ}/\text{s} \rightarrow -0.5^{\circ}/\text{s}$ 。

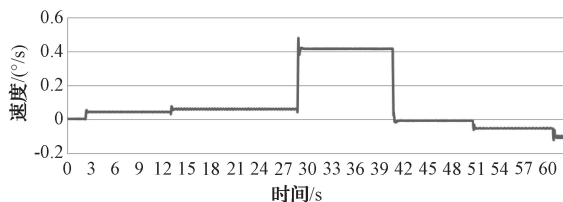


图5 速度阶跃过程

Fig. 5 Diagram of the velocity step process

通过数据分析计算可得阶跃过程超调量均小于15%,稳态时间在0.3~0.4 s,稳态误差均小于3%。

3.2 等速波动

在给定不同的速度的情况下分别测定速度的波动情况,以了解电机运行的平稳性,尤其是在低速的情况下,详细数据如表1所示。

表1 永磁同步电机试验平台速度波动

Table 1 Speed fluctuation table of PMSM test platform

设定速度 /($^{\circ}/\text{s}$)	平均速度 /($^{\circ}/\text{s}$)	速度波动 标准差/($^{\circ}/\text{s}$)	波动误差/%
0.01	0.010 0	1.778 8	4.94
0.02	0.020 0	1.920 7	2.67
0.1	0.100 1	3.507 2	0.97
0.2	0.200 3	3.125 7	0.43
1	1.000 9	15.917 6	0.44
2	2.002	3.900 4	0.05

从表1可以看出,该试验平台的速度波动表现较为理想。在几个典型速度下都达到了应用需求的标准, $1^{\circ}/\text{s}$ 的波动误差小于1%, $0.1^{\circ}/\text{s}$ 的波动误差小于2%, $0.01^{\circ}/\text{s}$ 的波动误差小于5%。

3.3 正弦引导

给定正弦引导的位置和速度信号,并根据编码器反馈测定位置跟踪误差如图6所示。

由图6可知,该试验平台的正弦跟踪误差小,跟踪精度高,跟踪误差的均方根值(RMS)值小于0.88arcsec。能够实现设备的平稳跟踪。

3.4 试验结果分析

永磁同步电机在具有转矩特性好、转速范围大、动态响应快、机械效率高、使用寿命长等优势的同时,实测性能指标如定位精度、阶跃响应、速度波动和正弦引导的跟踪

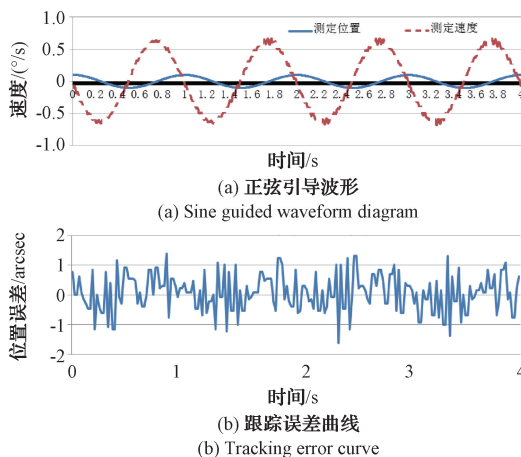


图6 正弦引导波形与跟踪误差曲线

Fig. 6 Sine guided waveform and tracking error curve

误差也比较令人满意,可以满足在大型、超大型设备上的应用需求。

通过一段时间的使用和摸索可以看出,Parker控制器的功能完善,软硬件设计比较成熟,内置控制算法实用先进,外置接口丰富,具有很好的二次开发性。在熟练掌握控制器使用方法的基础上利用其提供的开发平台做好二次开发完全可以满足使用要求。

通过对平台等速数据的傅里叶频谱分析可得到部分结论:在速度较大的情况下($1^{\circ}/\text{s}$ 以上),速度波动的傅里叶分解中低频分量权重较大,而权重最大的频率恰好与电机换相频率相吻合。因此,可以推断在转速较高的情况下导致速度波动的主要因素为电机换相。在低速情况下,由于转速慢,换相的周期比较长,电机在换相点处过渡平稳,电机换相不再是速度波动的主因。此时,速度波动的傅里叶分解中权重较大的频率恰好与光栅编码器反馈信号的频率有关,且理论计算结果与分析数据相吻合。因此,可以认为在低速情况下光栅反馈信号的周期性误差是导致速度波动的主要因素。可见,引起速度波动的主要因素为电机换相和光栅信号反馈,在使用Parker控制器的情况下电机换相干扰虽不易消除,但换相干扰在低速情况下基本可以忽略,对低速影响较大的反馈信号误差引起的周期波动可以通过提高信号质量和进一步消除电磁干扰来加以抑制,如对光栅信号传输线采用双屏蔽策略等。

使用永磁同步电机驱动的大型光电设备在低速运行的情况下,如 $0.1^{\circ}/\text{s}$ 匀速旋转速度波动可小于1%, $0.01^{\circ}/\text{s}$ 匀速旋转速度波动可小于5%,在正弦引导下跟踪误差的RMS值小于0.88arcsec。

通过以上测试结果可知,永磁同步电机的性能指标,尤其是低速性能可以满足大型光电设备的运行需求,是作为大型光电设备的驱动单元的一种理想选择。

4 结论

本文通过对永磁同步电机控制原理的分析和性能的

试验测试,将其作为直流有刷电机的替代品是一种合理的选择,它的可靠性、稳定性以及突出的低速性能为设备运行提供了必要的保障。为进一步提高设备的性能,可以对永磁同步电机的控制算法开展进一步的研究,尤其是低速情况下非线性摩擦力矩带来的速度扰动将是一个非常值得深入研究的方向。

参 考 文 献

- [1] 李昂,袁佳俊,赵峰,等. 永磁同步电机改进滑模观测器矢量控制[J]. 电子测量技术, 2023, 46(6):37-43.
LI ANG, YUAN J J, ZHAO F, et al. Improved sliding mode observer vector control for permanent magnet synchronous motors [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(6):37-43.
- [2] 任丽媛,张旭秀. 基于滑模自抗扰的永磁同步电机电流环控制方法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(9): 14-18.
REN L Y Y, ZHANG X X. Research on current loop control of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode auto-disturbance rejection[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(9): 14-18.
- [3] 张利国,厉风,李宇剑,等. 基于电池功率的永磁同步电机预测电流控制[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1):126-131.
ZHANG L G, LI F, LI Y J, et al. Predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on battery power [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 126-131.
- [4] 王向恩,黄平林. 永磁同步电机 FOC 控制下相电流直流分量影响与抑制策略研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2):61-68.
WANG X EN, HUANG P L. Research on the influence and suppression strategy of phase current DC component under permanent magnet synchronous motor FOC control [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(2):61-68.
- [5] 孙丹峰,申友涛,邵若薇,等. 基于 FPGA 的永磁同步电机控制系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(4):40-43.
SUN D F, SHEN Y T, SHAO R W, et al. Design and implementation of the permanent magnet synchronous motor control system based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(4):40-43.
- [6] 李瑞棋,黎英. 永磁同步电机转子初始位置检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 194-200.
LI R Q, LI Y. Initial rotor position estimation method for PMSM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4): 194-200.
- [7] 尹诗荀,郑志安,朱俊杰. 基于延迟补偿的永磁同步电机并行自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 275-285.
YI SH X, ZHENG ZH AN, ZHU J J. Time delay compensation-based parallel active disturbance rejection control for permanent magnet synchronous motors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 275-285.
- [8] 王要强,冯玉涛,马小勇,等. 永磁同步电机转子位置复合检测及起动运行策略[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8):230-238.
WANG Y Q, FENG Y T, MA X Y, et al. Rotor position composite detection and start operation strategy of permanent magnet synchronous motor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8):230-238.
- [9] 张臻,周扬忠. 永磁同步电机位置伺服系统改进变结构自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 263-271.
ZHANG ZH, ZHOU Y ZH. An improved variable structure active disturbance rejection control for the permanent magnet synchronous motor position servo system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 263-271.
- [10] 杜思航. 基于 FOC 算法的永磁同步电机控制器设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2022.
DU S H. Design of permanent magnet synchronous motor controller based on FOC algorithm [D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [11] 刘伟. 永磁同步电机 FOC 算法研究及控制器设计[D]. 石家庄:河北科技大学, 2021.
LIU W. Research on FOC algorithm and controller design of permanent magnet synchronous motor[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2021.
- [12] 张海阔. 基于 FOC 的永磁同步电机控制器设计与验证[D]. 南京:东南大学, 2022.
ZHANG H K. Design and verification of permanent magnet synchronous motor controller based on FOC[D]. Nanjing: Southeastern University, 2022.
- [13] 刘计龙,肖飞,沈洋,等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16):76-88.
LIU J L, XIAO F, SHEN Y, et al. A review of the research on sensorless control technology of permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16):76-88.

- 32(16):76-88.
- [14] 刘伟. 永磁同步电机 FOC 算法研究及控制器设计[D]. 石家庄:河北科技大学, 2020.
LIU W. Research on FOC algorithm and controller design of permanent magnet synchronous motor[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2020.
- [15] 陶彩霞,赵凯旋,牛青. 考虑滑模抖振的永磁同步电机模糊超螺旋滑模观测器[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(23):11-18.
TAO C X, ZHAO K X, NIU Q. Fuzzy super-spiral sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor considering sliding mode bucket vibration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23):11-18.
- [16] 曹雷. 永磁同步电机无速度传感器矢量控制系统设计[D]. 长沙:湖南大学, 2021.
CAO L. Permanent magnet synchronous motor without speed sensor vector control system design[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [17] 王虎,应忠德,陈明亮. 基于电压反馈的 PMSM 电流采样误差消除方法[J]. 控制工程, 2021, 28(7): 1321-1327.
WANG H, YING ZH D, CHEN M L. PMSM current sampling error elimination method based on voltage feedback [J]. Control Engineering, 2021, 28(7): 1321-1327.
- [18] 杨景阳,刘路扬,吕兵. 基于正弦波点击率的非线性误差测试方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 155-158.
YANG J Y, LIU L Y, LV B. Nonlinear error testing method based on sine wave click rate technology[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(8): 155-158.
- [19] 刘洋,张斌,吴庆林,等. 基于 DSP 的永磁同步电动机控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1):88-92.
LIU Y, ZHANG B, WU Q L, et al. Design of PMSM control system based on DSP [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(1):88-92.
- [20] 韩彦东,汪旭东,许孝卓,等. 基于遗传算法的永磁同步直线电机 PID 控制研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5):115-119.
HAN Y D, WANG X D, XU X ZH, et al. PID control of permanent magnet linear synchronous motor based on genetic algorithms [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(5):115-119.

作者简介

刘雪梅,工程师,主要研究方向为电子学系统集成与测试等。

E-mail:1104080782@qq.com

吴庆林(通信作者),副研究员,主要研究方向为电机控制、伺服控制、数据通信等。

E-mail:wuql@ciomp.ac.cn

李洪文,研究员,博士生导师,主要研究方向为地基高分辨率成像光电望远镜电控系统总体设计及电机控制方面。

E-mail:lihongwen1970@yahoo.com

张斌,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为望远镜伺服系统、主动光学控制系统等方面。

E-mail:13844908289@163.com

刘洋,助理研究员,主要研究方向为光电望远镜伺服控制方面。

E-mail:liuyang@ciomp.ac.cn

王春禹,工程师,主要研究方向为电子学系统集成与测试。

E-mail:19969547448@qq.com