中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

# 无刷直流力矩电机驱动控制设计和验证

李禹希 邓永停 赵金宇 张刘

# Design and verification of brushless DC motor drive control

LI Yu-xi, DENG Yong-ting, ZHAO Jin-yu, ZHANG Liu

引用本文:
李禹希, 邓永停, 赵金宇, 张刘. 无刷直流力矩电机驱动控制设计和验证[J]. 中国光学, 2022, 15(4): 806-811. doi: 10.37188/CO.2022-0112
LI Yu-xi, DENG Yong-ting, ZHAO Jin-yu, ZHANG Liu. Design and verification of brushless DC motor drive control[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 806-811. doi: 10.37188/CO.2022-0112

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022-0112

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

步进电机驱动的直线变倍成像系统研究

Continuous zooming imaging system driven by stepping motors

中国光学. 2018, 11(5): 779 https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0779

无拖曳控制技术研究及在我国空间引力波探测中的应用

Drag-free control and its application in China's space gravitational wave detection

中国光学. 2019, 12(3): 503 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0503

无拖曳航天任务检验质量的设计和比较

Design and trade-off study of proof masses for future spatial drag-free missions

中国光学. 2019, 12(3): 463 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0463

基于正解过程的Risley棱镜光束指向控制精度分析

Analysis of beam steering control precision for Risley prisms based on forward solution

中国光学. 2017, 10(4): 507 https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0507

用于引力波关键技术验证的近地低成本商业卫星设计

Near-earth low-cost commercial satellite design for key technologies verification of the gravitational waves detection mission

中国光学. 2019, 12(3): 477 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0477

基于伪微分和加速度反馈的航空光电稳定平台控制方法

Control scheme of aerial photoelectrical stabilized platform based on pseudo-derivative and acceleration feedback

中国光学. 2017, 10(4): 491 https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0491

文章编号 2095-1531(2022)04-0806-06

# 无刷直流力矩电机驱动控制设计和验证

李禹希[1], 邓永停[2], 赵金宇[2*], 张 刘[1*]
（1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033）

**摘要:** 本文在无刷直流力矩电机的性能测试基础上, 优化设计了基于 C8051F120 和 CPLD 单片机的驱动控制电路, 通过采用 PWM_ON 的转矩脉动最小控制模式, 实现了无刷直流电机的转速闭环和位置闭环控制。实验结果表明: 所设计的无刷直流电机控制系统具有响应快速、定点精度高等特点。当电机以 1°/s 低速转动时, 速度波动小于 7%, 大角度调转位置闭合定点精度小于 1 个码值, 实现了无刷电机的宽调速范围和高精度控制, 验证了设计的无刷直流电机驱动和算法的有效性。

**关 键 词:** 无刷直流电机; 闭合控制; 精度
**中图分类号:** TN29; **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2022-0112

# Design and verification of brushless DC motor drive control

LI Yu-xi[1], DENG Yong-ting[2], ZHAO Jin-yu[2*], ZHANG Liu[1*]
（1. *College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun* 130012, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*）
* *Corresponding author, E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn; zhangliu@jlu.edu.cn*

**Abstract**: In this paper, the drive control circuit using C8051F120 and CPLD single chip microcomputer is optimized and designed based on the performance test of brushless DC motor. By using the minimum torque ripple control method of PWM_ON, both the speed and position closed-loop control of brushless DC motor are realized. The experimental results show that the designed control system has the characteristics of fast response and high station accuracy. The speed fluctuation is less than 7% at low speed of 1°/s, and the accuracy of large angle position step is less than 1 code. The proposed method has realized wide speed range and high precision control of brushless motor and the effectiveness of the drive and algorithm is verified.
**Key words**: brushless DC motor; closed-loop control; accuracy

**收稿日期:** 2022-06-01; **修订日期:** 2022-06-17
**基金项目:** 国家自然科学基金项目（No. 62073150, No. 62001185）; 国家级大学生创新创业训练计划项目（No. 202110183268）
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62073150, No. 62001185); National Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates（No. 202110183268）

## 1　引　言

无刷直流力矩电机具有起动和调速性好, 控制精度高和堵转转矩大等特点, 近年来, 在大型转台精密驱动控制方面应用越来越广泛[1]。转台驱动方式包括直接驱动、齿轮驱动和摩擦驱动等[2], 相比后两种, 直接驱动方式具有刚度高、非线性环节少的优点。转台的驱动控制精度受到无刷直流力矩电机性能的直接影响, 电机的性能测试、驱动方案设计和指标测试是实现高精度转台精密控制的核心工作[3-8]。本文通过测试直流无刷电机反电动势波形, 确定直接驱动控制的伺服方式, 并通过搭建试验系统, 测试了直流无刷力矩电机的控制效果。

## 2　直流无刷电机性能测试

首先开展电机反电动势波形的测量, 方法是把 3 个阻值相等的电阻星型连接, 如图 1 所示。

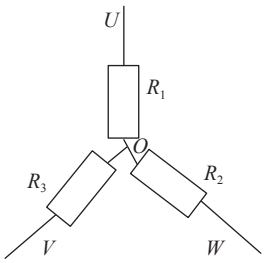



图 1　电阻连接方法

Fig. 1　Resistance connection method

将电机的 $U$、$V$、$W$ 三相绕组分别与图 1 所示的 $U$、$V$、$W$ 标记处连接, 手动连续匀速转动电机, 利用三通道示波器观察图 1 所示 $U$、$V$、$W$ 的电压波形, 即电机三相绕组的反电动势波形, 如图 2 所示。

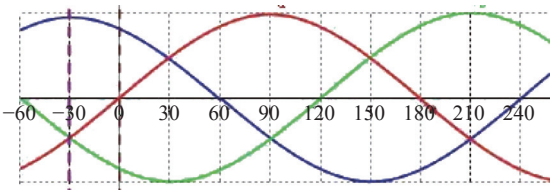



图 2　电机三相绕组相反电动势波形

Fig. 2　Inverse electromotive force waveform of motor three-phase winding

利用霍尔元件进行电机三相绕组的电子换向, 具体方式如下。

相位差为 120 电角度的霍尔传感器的输出信号如图 3 所示。

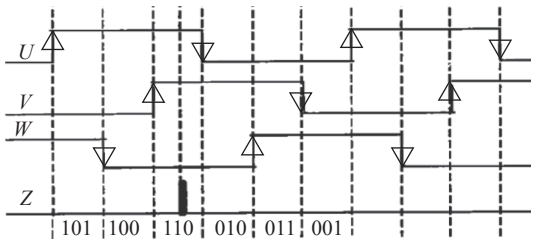



图 3　相位差为 120 电角度的霍尔传感器的输出信号

Fig. 3　Output signal of Hall sensor with phase difference of 120 electric angles

霍尔元件旋转一个电角度周期的 3 个输出 $U$、$V$、$W$ 的 6 个状态组合为: 101、100、110、010、011、001。

对无刷直流电机或者永磁同步电机进行控制的过程反映在电源转换的过程实际就是 AC→DC→AC 的过程, AC→DC 的过程是将单项或者三相交流电经过整流、滤波转换为电机的直流母线电压 DC, DC→AC 的过程是利用三相全桥驱动电路将直流母线电压转换为电机的三相绕组交流电, 从而实现对电机电流的控制。三相全桥驱动电路如图 4 所示。

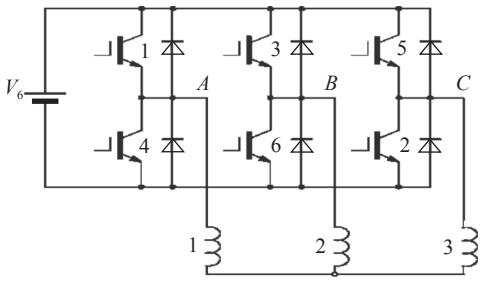



图 4　直流无刷电机的三相全桥驱动电路

Fig. 4　Three phase full bridge drive circuit for brushless DC motor

全桥驱动电路的驱动方式有两两导通和三三导通, 相比于两两导通, 三三导通产生的转矩分量互有抵消, 同时从控制的角度考虑, 在每次换向时由 3 个 IGBT 同时导通, 这就需要在上、下桥臂之间设置 PWM 死区, 死区设置必然影响转矩的波动, 所以从总转矩和控制复杂度的角度考虑, 利用两两导通的方法进行控制较好。

无刷电机的正反转是通过控制三相绕组的电

流导通顺序来进行控制的，导通顺序与霍尔传感器的输出组合的关系如表 1 所示。

**表 1 电机正反转控制时序表**

**Tab. 1 Reversing control time-scale of motor**

| 霍尔信号组合(UVW) | 正转 | | 反转 | |
|---|---|---|---|---|
| | 绕组 | IGBT | 绕组 | IGBT |
| 101 | B→A | 3,4 | A→B | 1,6 |
| 100 | B→C | 3,2 | C→B | 5,6 |
| 110 | A→C | 1.2 | C→A | 5,4 |
| 010 | A→B | 1,6 | B→A | 3,4 |
| 011 | C→B | 5,6 | B→C | 3,2 |
| 001 | C→A | 5,4 | A→C | 1,2 |

由无刷电机的反电动势波形和输出性能可知，无刷直流电机可以认为是永磁同步电机，其控制方案采用无刷直流电机的方波控制方式，该控制方式简单可靠。

## 3 无刷直流电机控制设计

### 3.1 无刷直流电机 PWM 控制方式的选择

三相绕组两两导通方式的 PWM 控制方式有 5 种方法：PWM_ON、ON_PWM、H_PWM-L_ON、L_PWM-H_ON、H_PWM-L_PWM。

(1) PWM_ON 方式是：在每个 IGBT 的 120°导通角内，前 60°进行 PWM 控制，后 60°保持常开。

(2) ON_PWM 方式是：在每个 IGBT 的 120°导通角内，前 60°保持常开，后 60°进行 PWM 控制。

(3) H_PWM-L_ON 方式是：在 120°导通角内，上桥臂 IGBT 进行 PWM 控制，下桥臂 IGBT 保持常开。

(4) L_PWM-H_ON 方式是：在 120°导通角内，下桥臂 IGBT 进行 PWM 控制，上桥臂 IGBT 保持常开。

(5) H_PWM-L_PWM 方式是：在 120°导通角内，上、下桥臂 IGBT 进行 PWM 控制。

从换向过程的转矩脉动角度来看：PWM_ON 方式的转矩脉动最小，ON_PWM 方式次之，H_PWM-L_PWM 方式的转矩脉动最小。

### 3.2 速度控制策略设计

在实际控制中，由于受电机电流和逆变器驱动电压的限制，当速度阶跃给定值较大时，控制器会出现由于积分饱和而导致的积分饱和现象。为了解决积分饱和现象引起的系统超调量大和调节时间长的问题，采用如图 5 所示的具有抗积分饱和策略的速度 PI 控制器。该控制策略将饱和非线性环节的输入与输出量的差值组成反馈支路来减小积分器的输入，以抑制积分饱和现象。

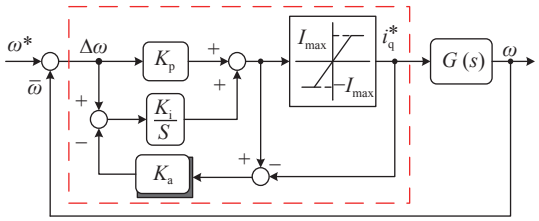



图 5 基于抗积分饱和策略的速度 PI 控制器

Fig. 5 Speed PI controller based on anti-windup strategy

通过辨识获得的控制模型，可以计算出望远镜的转动惯量，在已知闭环速度带宽和相角裕度设计指标的条件下，速度控制器的表达式为：

$$\begin{cases} K_p = J_{Tel}\omega_{sc}\sin\varphi_m \\ K_i = J_{Tel}\omega_{sc}^2\cos\varphi_m \end{cases}, \tag{1}$$

其中，$J_{Tel}$为望远镜的转动惯量，$\omega_{sc}$为速度回路的闭环带宽，$\varphi_m$为速度回路的相角裕度。

### 3.3 位置控制策略设计

位置控制器采用 PID 控制器，表达式为：

$$G_{cp}(s) = k_r\left(k_p + \frac{k_i}{s} + s\right). \tag{2}$$

控制器的参数由系统控制性能指标决定，对于采用直接驱动方式的望远镜，其频率特性在低频段接近纯刚体模型，因此位置控制器的参数设计如下：

$$\begin{cases} k_i = -\beta\omega_c^2/\left(\lg m\times\sqrt{1+\beta^2}\right) \\ k_p = \beta(k_i-\omega_c^2)/\omega_c \\ k_r = \lg m\times J_{Tel}\times k_i/k_p \end{cases}, \tag{3}$$

$$\begin{cases} \beta = \tan(90+PM) \\ \lg m = 10^{LGM/20} \\ \omega_c = 2\pi f_c \end{cases}, \tag{4}$$

其中，$f_c$(Hz)为开环剪切频率，$PM$(deg)为相角裕度，$LGM$(dB)为幅值裕度。相角裕度是指对于稳

定的系统, 如果系统的开环频率特性再滞后 $PM$ 度, 则系统将处于临界稳定状态; 幅值裕度是指对于稳定的系统, 如果系统的开环频率特性的幅值再降低$LGM$分贝, 则系统将处于临界稳定状态; 由式 (3) 可以看出, 比例系数$k_r$由系统的转动惯量$J_{Tel}$决定, 因此, 控制器的比例系数较大。为了提高系统的抗扰动能力, 可以增大开环频率特性的剪切频率$f_c$, 同时降低系统的相位裕度 $PM$ 和幅值裕度$LGM$。位置控制器的带宽设计目标是使$f_c$尽量靠近锁转频率, 通常为锁转频率的 30%~40% 。

### 3.4　试验平台和程序设计

控制器实验硬件: 单片机 C8051F120+CPLD-EPM570T100C5N, 实验平台如图 6 所示。

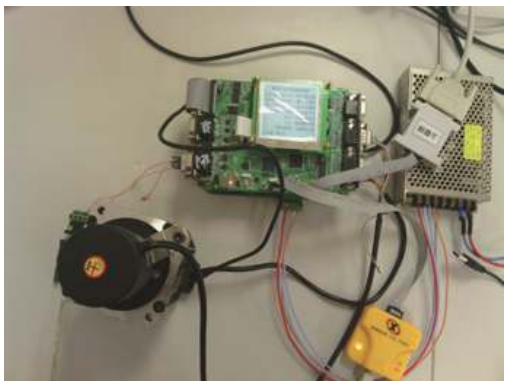


图 6　电机控制系统硬件平台

Fig. 6　Hardware platform of control system

试验系统采用的电机不带增量式编码器, 需要自己安装编码器, 试验采用的编码器是 4096 线, 四倍频后可达到 16384 线分辨率。为保证 $Z$ 脉冲与电机电角度 0 点对齐, 采用的办法是: 首先给电机一定的控制电压使电机旋转起来, 利用单片机的 I/O 口的捕捉功能捕到 $Z$ 脉冲的上升沿, 并以此为零点开始计数和定位。

单片机完成 $Z$ 脉冲的捕捉即寻零点, 通过 TL16C752 与上位机进行数据通信、编码器计数脉冲的读取、位置环和速度环的控制器计算、液晶实时数据的显示等。CPLD 完成电机的电子换向、A、B 码的计数、PWM 波形的产生和协同单片机进行通信。为了实现电机控制数据的接收和实时数据曲线的显示, 利用 Labview 设计了伺服控制数据通信接收程序, 通过串口进行与控制器的通信, 控制界面如图 7 所示。

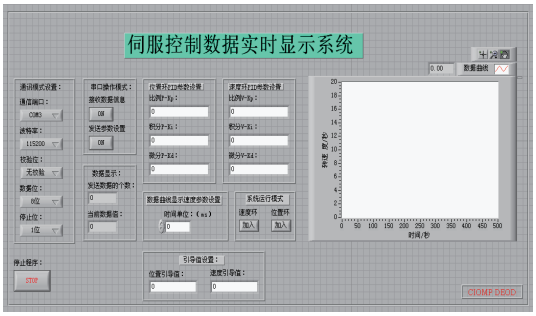



图 7　伺服控制数据显示界面

Fig. 7　Data display interface of servo control system

## 4　实验测试

### 4.1　电机速度开环测试

系统的采样周期为 2 ms, 编码器每个码值分辨率为 0.022°。图 8 为结果。电机转速码值设定为 5, 此时由于受电机转矩波动的影响, 电机的旋转不平滑, 转速波动为上限 3 个码, 下限 3 个码。上升时间小于 0.4 s。

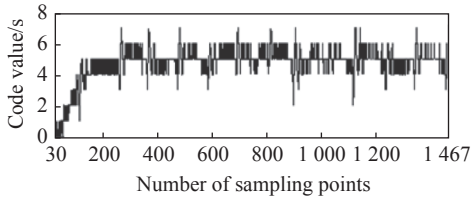



图 8　转速码值设定为 5 时的转速响应曲线(控制器参数 $k_p$=60.0, $k_i$=2.0)

Fig. 8　Rotate speed response curve when the rotate speed code value is set to 5 (control parametes $k_p$=60.0, $k_i$=2.0, PositionSet=5)

图 9 结果分析: 电机转速码值设定为 50, 此时由于电机转矩波动的影响较小, 电机的旋转相

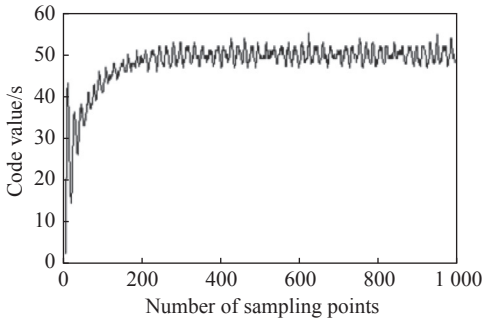



图 9　转速码值设定为 50 时的转速响应曲线(控制器参数 $k_p$=60.0, $k_i$=2.0)

Fig. 9　Rotate speed response curve when the rotate speed code value is set to 50 (control parameters $k_p$=60.0, $k_i$=2.0, PositionSet=50)

对平滑，转速波动为上限 5 个码，下限 5 个码，统计速度波动 RMS 值小于 7%，上升时间 0.4 s。

同理，设定速度每隔 2 s 增加 10 个码，得到如图 10 所示的速度阶跃响应曲线。

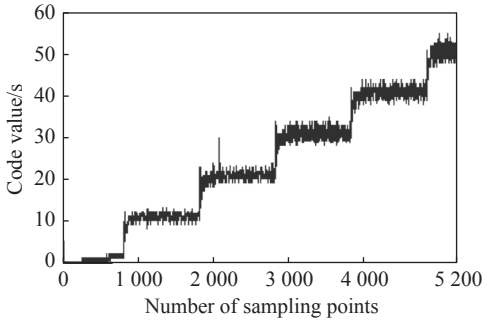



图 10 速度阶跃响应曲线（控制器参数 $k_p$=60.0, $k_i$=2.0）

Fig. 10 Curve of the speed step response (control parametes $k_p$=60.0, $k_i$=2.0)

### 4.2 位置定点闭合实验

采用参数整定仿真，参数设置为：$k_p$=0.01, $k_i$=0.02, PositionSet = 100 码时，位置阶跃曲线如图 11 所示。

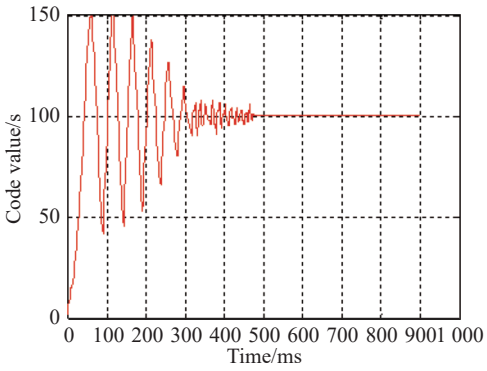



图 11 位置阶跃曲线（$k_p$=0.01, $k_i$=0.02, PositionSet = 100）

Fig. 11 Curve of the position step response ($k_p$=0.01, $k_i$=0.02, PositionSet=100)

如图 11 所示，当电机经过稳态值时，电机会进行电子换向，出现较大的波动，并且电机定位精度的重复性较差。优化调整整定参数，当位置环参数设置为：$k_p$=0.015, $k_i$=0.015, PositionSet=1 000 码时，位置阶跃曲线如图 12 所示，定点精度小于 1 个码值，稳定响应时间小于 1 s。

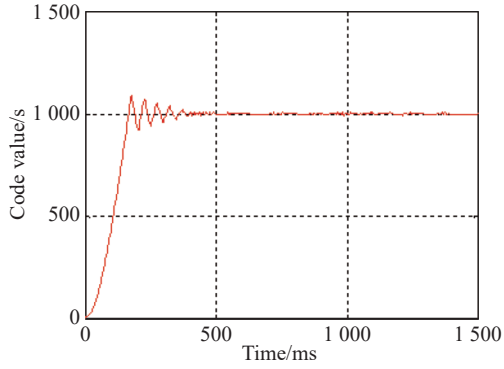



图 12 位置阶跃曲线（$k_p$=0.015, $k_i$=0.015, PositionSet=1 000）

Fig. 12 Curve of position step response ($k_p$=0.015, $k_i$=0.015, PositionSet=1 000)

## 5 结 论

本文通过对电机的电气特性、正反转时序设计、伺服控制设计、参数整定试验等各环节，完整验证了无刷直流电机的控制过程，实现了无刷直流电机的转速闭环和位置闭环控制。所设计的无刷直流电机控制系统具有响应快速，定点精度高等特点。当电机以 1°/s 的低速转动时，速度波动小于 7%，大角度调转位置闭合定点精度小于 1 个码值，实现了无刷电机的宽调速范围和高精度控制，验证了设计的无刷直流电机驱动和算法的有效性。

**参考文献：**

[1] 王国民. 天文光学望远镜轴系驱动方式发展概述[J]. 天文学进展, 2007, 25(4): 364-374.
WANG G M. Review of drive style for astronomical optical telescope[J]. *Progress in Astronomy*, 2007, 25(4): 364-374. (in Chinese)

[2] 王宏佳, 杨明, 牛里, 等. 永磁交流伺服系统速度控制器优化设计方法[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(2): 25-31.
WANG H J, YANG M, NIU L, *et al*.. Optimal speed controller design method for permanent magnet AC servo system[J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(2): 25-31. (in Chinese)

[3] 李洪文, 邓永停, 王建立. 永磁同步电机速度控制器的全数字化集成[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(4): 1105-1113.
LI H W, DENG Y T, WANG J L. Digital integration of PMSM speed controller based on FPGA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1105-1113. (in Chinese)

[4] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 结构滤波器在望远镜主轴控制系统中的应用[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(4): 900-909.

DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al*.. Application of structural filter to principal axis system of telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 900-909. (in Chinese)

[5] PHAM N T, VAN NGUYEN N. Novel carrier based PWM techniques reduce common mode voltage for six phase induction motor drives[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, 10(5): 287-299.

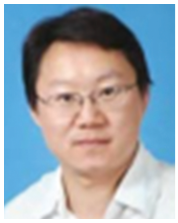
[6] SHI J, LI SH H. Analysis and compensation control of dead-time effect on space vector PWM[J]. *Journal of Power Electronics*, 2015, 15(2): 431-442.

[7] 周美兰, 高肇明, 吴晓刚, 等. 五种PWM方式对直流无刷电机系统换相转矩脉动的影响[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 15-21.
ZHOU M L, GAO ZH M, WU X G, *et al*.. Influence of five kinds of PWM on commutation torque ripples in BLDCM control system[J]. *Electric Machines and Control*, 2013, 17(7): 15-21. (in Chinese)

[8] 陈坤, 周兴, 文武. 基于改进数字PWM逆变器控制器设计[J]. 船电技术, 2018, 38(3): 42-46.
CHEN K, ZHOU X, WEN W. Design of inverter controller based on improved digital PWM[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2018, 38(3): 42-46. (in Chinese)

**作者简介：**

李禹希(2002—), 女, 吉林长春人, 主要从事航天光学遥感、伺服控制系统等研究工作。E-mail: liyx6519@mails.jlu.edu.cn



赵金宇(1976—), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事数字图像信号处理软硬件技术, 图像跟踪与目标识别, 图像恢复等方面的研究。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn

张　刘(1978—), 男, 安徽蚌埠人, 吉林大学唐敖庆领军教授, 博士生导师。2007 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要从事新型航天光学遥感器设计、仿真及应用技术, 星载一体优化控制技术等研究工作。E-mail: zhangliu@jlu.edu.cn