

# 基于反熔丝 FPGA 的纯开环星载 步进电机驱动器设计

蒋范明<sup>1,2</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 姚惟琳<sup>1</sup>

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109;

2. 上海市空间飞行器机构重点实验室, 上海 201109)

**摘要:** 为了提高运动机构的稳定度, 步进电机驱动控制通常采用电流细分的方法, 从而将一个步距角分解成若干小步。实现步进电机电流细分驱动通常的方法是将电流闭环引入到驱动控制电路中, 由此增加电流采样、比较等软硬件功能模块的同时也增加了单机的复杂度, 削弱了步进电机本质上开环驱动的优势。为了提高宇航型号步进电机驱动控制器单机的可靠度, 提出了一种基于反熔丝 FPGA 的纯开环驱动方案, 通过预置占空比的方式, 在不引入电流闭环的前提下实现步进电机电流细分。通过样机调试, 验证了设计的有效性, 为后续工程研制提供参考。

**关键词:** 宇航; 步进电机; 开环驱动; 反熔丝 FPGA

**中图分类号:** TM 383.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)09-0054-06

## Design of Open Loop Space Stepper Motor Driver Based on Antifuse FPGA

JIANG Fanming<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, YAO Weilin<sup>1</sup>

(1. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Spacecraft Mechanism, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In order to improve the stability of the movement mechanism, stepper motor driver usually uses current subdivision method, by which a step angle is divided into several small steps. In order to realize the current subdivision drive of the stepper motor, the usual method is use the current loop control system, thereby increasing the current sampling, comparison and other hardware and software modules. The increase in complexity leads to the decrease of the reliability of drive products. In order to improve the reliability of aerospace stepper motor drive control system, a pure open-loop drive design based on antifuse FPGA was proposed. By means of the preset duty cycle, the current subdivision of the stepping motor was realized without introducing the current loop. The validity of the design was verified by the prototype test, which could provide reference for the follow-up aerospace project.

**Key words:** aerospace; stepper motor; open loop drive; antifuse FPGA

## 0 引言

宇航运动机构多采用步进电机作为力矩执行单元, 以利用其开环控制、无累计误差、断电自锁等优点。为了提高运动机构的稳定度, 步进电机驱动控制通常采用电流细分的方法, 每次只改变电机绕组中额定电流的一部分, 以形成多个稳定

的中间电流值状态, 从而将一个步距角分解成若干小步。为了实现步进电机电流细分驱动, 通常的做法是将电流闭环引入到驱动控制电路设计中, 由此增加了电流采样、比较等软硬件功能模块, 导致增加单机复杂度, 削弱了步进电机本质上开环控制的优势。为了提高宇航型号步进电机驱动控制单机的可靠度, 提出了一种基于反熔丝现

作者简介: 蒋范明(1983—), 工学博士, 工程师, 研究方向为空间运动机构驱动控制电子学设计。

场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的纯开环驱动控制设计方案,通过预置驱动波形占空比的方式,在不引入电流闭环的前提下实现步进电机电流细分,有利于提高单机可靠度,可为后续工程研制提供参考。

## 1 步进电机电流细分

为了提高基于步进电机的运动机构运动过程平稳度,通常采用细分技术对步进电机的相电流进行细分。细分原理:与简单的单拍或双拍工作方式不同,步进电机的细分驱动方式在不改变电机结构设计的前提下,通过特定的驱动方式,每次只改变电机绕组中额定电流的一部分,以形成多个稳定的中间电流值状态,实现将一个步距角分解成若干小步的功能<sup>[1]</sup>。图1为采用了矢量恒幅均匀旋转8细分法的两相步进电机电流波形图。此方法的原理是在两相步进电机的绕组上各通以相位角差为 $\pi/2$ 、幅值相等的正弦电流,使电流矢量(即产生的磁场矢量)在空间做圆周旋转运动<sup>[2]</sup>。

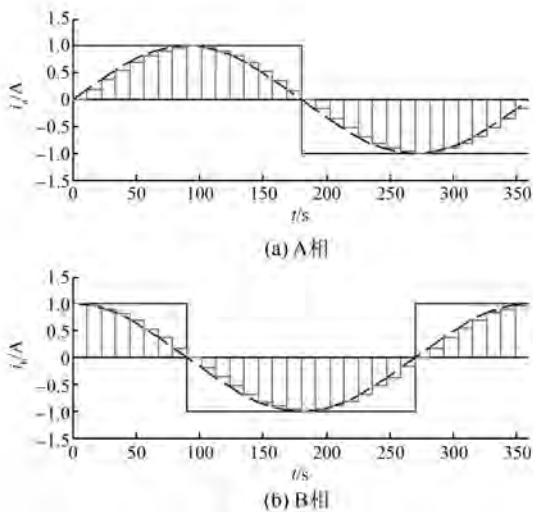


图1 两相步进电机8细分电流示意图

图2为两相混合式步进电机的电位角示意图。 $I$ 为细分后A相和B相之间的中间态电流矢量,根据细分数 $m$ 的不同,电位角 $\theta$ 可以量化成不同角度。

$$\begin{cases} I_A = I_{\max} \sin \theta \\ I_B = I_{\max} \cos \theta \end{cases}$$

其中: 电位角 $\theta = k \frac{90^\circ}{m} (k = 0, 1, 2, \dots, m)$ 。

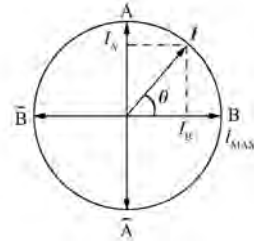


图2 电流矢量示意图

## 2 反熔丝 FPGA 纯开环细分驱动方案

实现步进电机细分驱动的方法很多。如哈尔滨工业大学李秀红<sup>[3]</sup>提出了一种电流闭环的细分方法:采用高精度的霍尔电流传感器对绕组电流进行采样,输入到搭建的基于PID校正的控制系统中,实现电流正弦细分;如中国科学院上海技术物理研究所的尹达<sup>[4]</sup>提出了一种PWM斩波方式的细分方法:将D/A输出的指令电流值加在脉宽调制电路的输入端并转换成相应脉冲宽度的矩形波,通过控制功放管通断时间(调制频率为20 kHz)继而改变输出到步进电机绕组上的平均电流。上述方案,虽然达到了细分步进电机驱动电流的目的,但引入了电流检测、闭环控制等功能模块,一定程度上增加了电机驱动产品的复杂度。

为了提高宇航驱动产品的可靠性,设计一种纯开环驱动电流细分方法。细分方式通过预先固化在反熔丝FPGA内部的驱动电路桥臂PWM信号占空比来实现,通过FPGA的I/O口直连到H桥驱动电路的桥臂,电路形式简单可靠。相比对绕组电流进行采样后闭环控制的方式,减少了采样、比较单元电路,提高了驱动产品可靠性。硬件架构如图3所示,整个系统由总线芯片及接口电路、FPGA电路、晶振及复位电路、传感器接口电路、驱动电路等部分组成。

步进电机开环细分驱动原理:针对步进电机绕组的H桥驱动电路,为了以开环的方式实现电流细分,形成如图1所示的多个稳定的中间电流值状态,需要通过H桥PWM驱动信号来对绕组电流进行设置,即通过调节开起时间 $t_{ON}$ 来使电机相绕组电流达到预定的细分值,如图4所示。其中, $t_{ON}$ 为电机绕组回路开起时间, $t_{OFF}$ 为电机绕组关断续流时间。PWM信号的占空比与电流细分

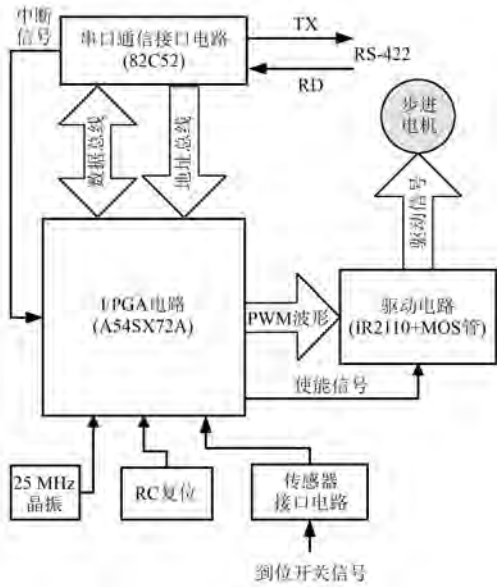


图3 反熔丝FPGA控制器架构

值一一对应,并预置在FPGA内部代码中,而非通过实时的电流闭环来实现。

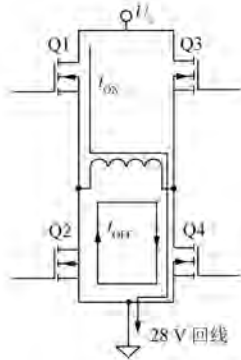


图4 单相电机绕组驱动电流路径

开环电流细分方式中,电机绕组电流值与PWM占空比成一定的正比关系,但由于电机绕组呈感性负载特性,电机绕组电流值与PWM占空比又呈现较强的非线性关系,可以用式(1)来表示。

$$t_{ON} = t_{max} \cdot \sin \theta + \Delta T_k \quad (1)$$

其中:  $\theta = k \frac{90^\circ}{m}$  ( $k = 0, 1, 2 \dots m$ )

式中:  $t_{max}$ ——电机单相绕组所需电流峰值对应的最大占空比;

$\theta$ ——电位角;

$m$ ——细分数;

$\Delta t_k$ ——某一细分值下占空比修正值。

图5为等效单绕组驱动电路仿真模型。稳压源V3开起时,电机绕组L1电流随之逐渐增大;稳压源V3关断时,电机绕组L1通过二极管D2形成续流回路。

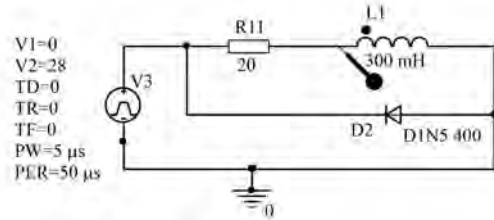


图5 单绕组驱动电路仿真模型

在PWM调制周期为50 μs的前提下,通过设定占空比  $t_{PWM}$  分别为5、10、25、50 μs,可以得到对应单相绕组电流的仿真波形如图6~图9所示。

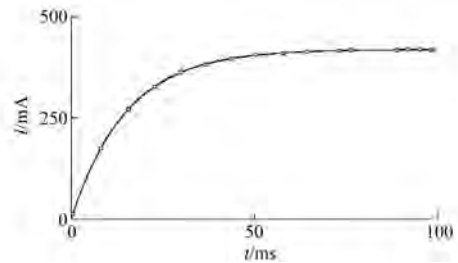


图6  $t_{PWM} = 5 \mu s$  时单相绕组电流波形

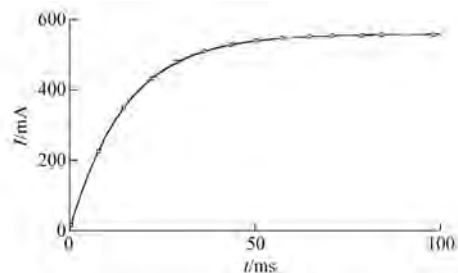


图7  $t_{PWM} = 10 \mu s$  时单相绕组电流波形

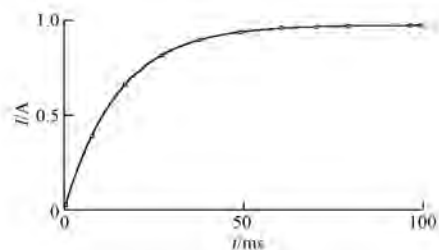


图8  $t_{PWM} = 25 \mu s$  时单相绕组电流波形

根据图6~图9的仿真结果:开环电流细分方式中,电机绕组稳态电流值与PWM占空比成一定

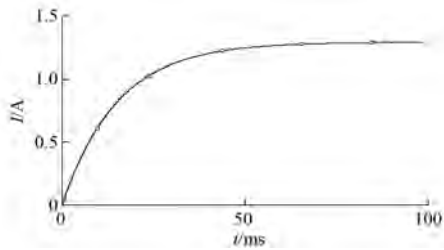


图9  $t_{PWM} = 50 \mu s$  时单相绕组电流波形

的正比关系,但又呈现较强的非线性。为了进一步提高步进电机细分后的速度稳定度,需要根据电机参数、母线电压、桥臂 MOS 管死区时间等因素对 FPGA 内部细分表的占空比对应值进行修正。

空间环境抗辐射方面,为了保证星载步进电机驱动线路的环境适应性能力,特别是防止宇宙

辐射导致的单粒子翻转问题,驱动器的主处理器芯片采用反熔丝 FPGA(常用型号 A54SX72A),相比单片机(80C32E)、DSP 等处理芯片,进一步提高了宇航驱动产品的可靠性。

### 3 系统设计

#### 3.1 硬件设计

根据图 3 的控制器架构,整个系统由总线芯片及接口电路、FPGA 电路、晶振及复位电路、传感器接口电路、驱动电路等部分组成。

其中,驱动电路设计如图 10、图 11 所示。采用 IR2110 配合外围 N-MOS 管搭建的 H 桥组成。IR2110 是 IR 公司生产的一款双通道、栅极驱动、高压高速功率器件的单片集成伺服控制芯片,采

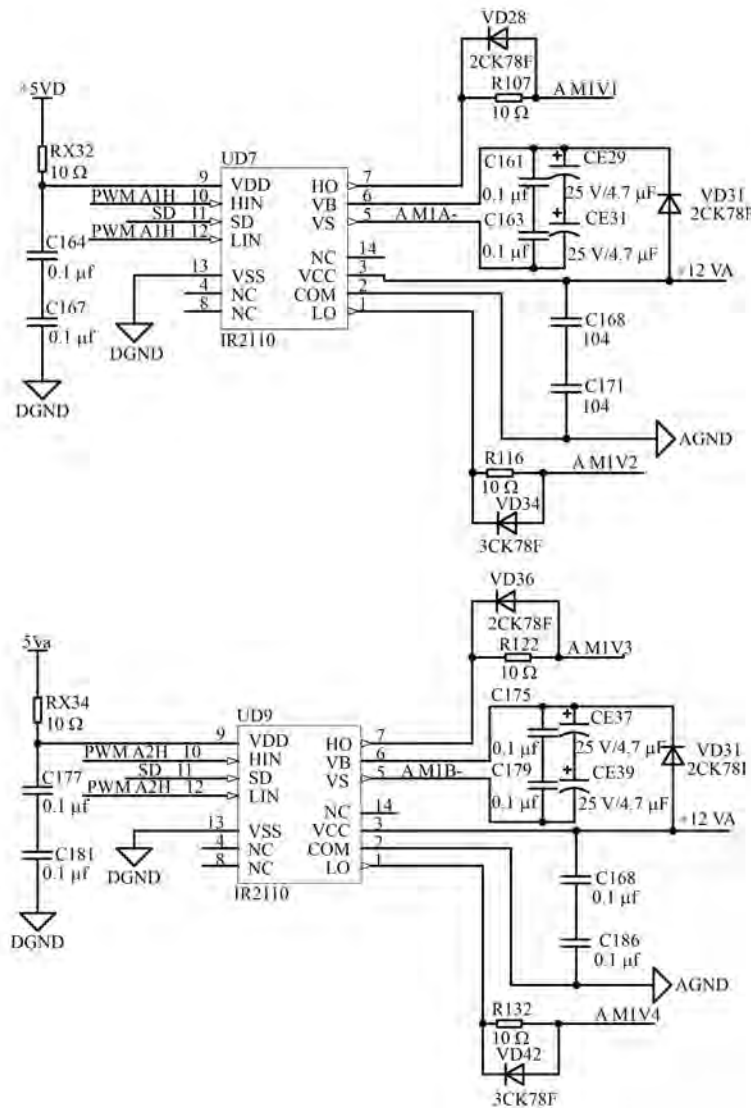


图 10 IR2110 及外围电路

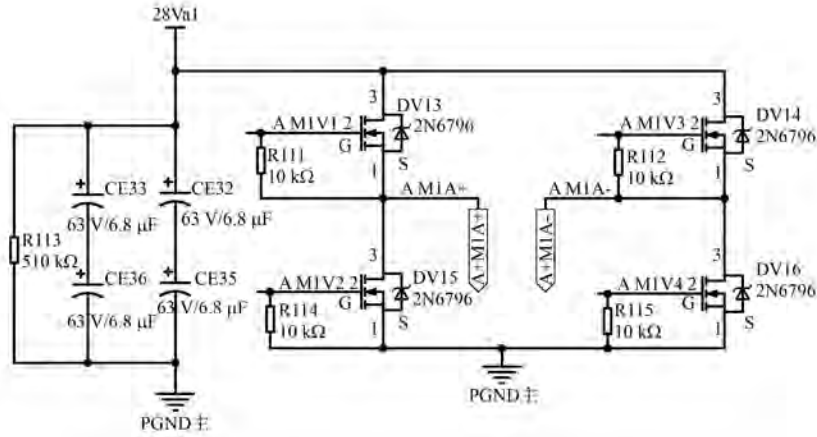


图 11 H 桥驱动电路

用了先进的自举电路和电平转换技术,大大简化了逻辑电路对功率器件的控制要求。由于上管驱动采用外部自举电容上电,使得驱动电源数目大大少于其他 IC 芯片,在电机驱动、电源变换等功率驱动领域中获得了广泛的应用<sup>[5]</sup>。

### 3.2 软件设计

以宇航型号中常用的两相混合式步进电机为例,其转动过程中通电方式为  $AB-\bar{A}\bar{B}-\bar{A}B-\bar{A}\bar{B}$  (定义为正转),表 1 为步进电机转动过程中通电形式。

表 1 两相混合式步进电机通电形式

脉冲电流形式	相	极性控制	脉冲电流波形
AB- $\bar{A}\bar{B}$ - $\bar{A}B$ - $\bar{A}\bar{B}$	A		
	B		
AB- $\bar{A}B$ - $\bar{A}\bar{B}$ - $\bar{A}B$	A		
	B		

注:表中 A 指 A 绕组电流为正向,  $\bar{A}$  指 A 绕组电流为反向; B 指 B 绕组电流为正向,  $\bar{B}$  指 B 绕组电流为反向。

根据步进电机转动过程的通电形式,电机相电流采用双极式控制斩波方式: Q1~Q4 为全 H 桥两端上下桥臂导通控制信号, Q1 与 Q2 采用互补的输入控制方式, Q3 与 Q4 采用互补的输入控制方式,如图 12 所示。以 A 绕组为例,正向电流(A)桥臂控制时序如图 13 所示,电流细分值通过 Q1、Q2 的

占空比来实现;反向电流( $\bar{A}$ )桥臂控制时序如图 14 所示,电流细分值通过 Q3、Q4 的占空比来实现。其中  $\Delta t$  为死区时间,一般设置为  $1\sim 2\ \mu\text{s}$ 。

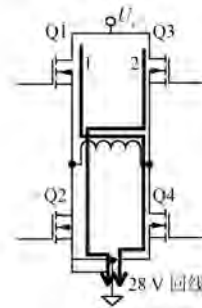


图 12 步进电机双极式 H 桥臂信号

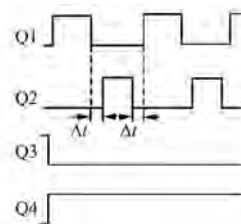


图 13 正向电流斩波波形图

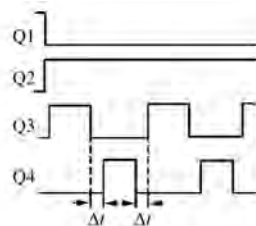


图 14 反向电流斩波波形图

根据上述电机驱动控制方式,实现两相混合

式步进电机驱动功能的 FPGA 软件数据流图如图 15 所示,共包含更新电机驱动参数、产生细分驱动时钟、输出正弦波细分值和输出 PWM 斩波信号 4 个功能模块。

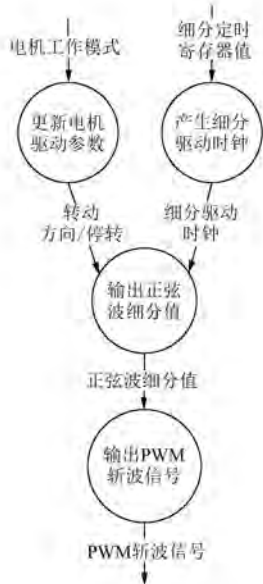


图 15 驱动电机功能数据流图

产生细分驱动时钟、输出正弦波细分值和输出 PWM 斩波信号功能模块描述分别如表 2~表 4 所示。

表 2 产生细分驱动时钟功能

功能名称	产生细分驱动时钟
激励事件	时钟驱动、复位驱动
输入数据	细分定时寄存器值
处理	(1) 当 IN(复位信号)有效时,输出 OUT(细分驱动时钟信号)为低电平;(2) 当 IN(复位信号)无效时,根据细分定时寄存器的值输出相应的 OUT(细分驱动时钟信号)
输出	细分驱动时钟信号

## 4 结 语

实验室中,研制了一套基于反熔丝 FPGA 的纯开环驱动器电路。工程样机产品实物如图 16 所示。通过调试,有效地实现了对步进电机进行细分驱动控制,电流实测波形如图 17 所示。机构运动过程中速度稳定度高,验证了方案的合理可行性,可以为后续相关宇航型号产品的研制提供参考。

表 3 输出正弦波细分值功能

功能名称	输出正弦波细分值
激励事件	细分驱动时钟、复位驱动
输入数据	(1) 电机转动方向; (2) 停转信号; (3) 细分驱动时钟信号
处理	(3) 当 IN(复位信号)有效时,OUT(细分值)为 0; (4) 当 IN(复位信号)无效时,在 IN(细分驱动时钟信号)的上沿,根据 IN(电机转动方向)、IN(停转信号)输出对应的 OUT(细分值)
输出	细分值

表 4 输出 PWM 斩波信号功能

功能名称	输出 PWM 斩波信号
激励事件	时钟驱动、复位驱动
输入数据	(1) 细分值 (2) 电机转动方向
处理	(5) 当 IN(复位信号)有效时,OUT(PWM 斩波信号)输出为低电平,刹车信号为高电平; (6) 当 IN(复位信号)无效时,根据 IN(细分值)和 IN(电机转动方向),输出相应的 OUT(PWM 斩波信号)
输出	(1) PWM 斩波信号 (2) 刹车信号



图 16 FPGA 纯开环步进电机驱动样机

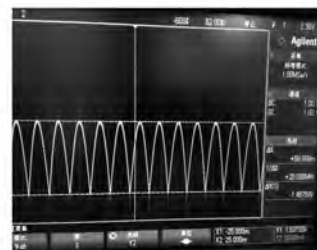


图 17 实测电流细分波形

(下转第 66 页)

- [ 4 ] 董蕾.基于比例复数积分控制的单相逆变器并网研究[J].电气自动化,2012,34(2): 31-34.
- [ 5 ] 张兴,汪杨俊,余畅舟,等.采用 PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(30): 5287-5295.
- [ 6 ] 李浩然,杨旭红,薛阳,等.基于模糊 PI 参数自整定和重复控制的三相逆变器并网研究[J].电机与控制应用,2015,42(2): 31-36.
- [ 7 ] 曹鑫晖.分布式发电并网建模与控制策略研究[D].上海:复旦大学,2013.
- [ 8 ] 郭小强,邬伟扬,赵清林,等.三相并网逆变器比例复数积分电流控制技术[J].中国电机工程学报,2009,29(15): 8-14.
- [ 9 ] 冯奕,颜建虎.基于比例复数积分的风力发电并网逆变器控制方法[J].农业工程学报,2016,32(13): 177-182.
- [ 10 ] 郭小强.光伏并网逆变器通用比例复数积分控制策略[J].中国电机工程学报,2015,35(13): 3393-3399.
- [ 11 ] 杨秀云.PWM 逆变器重复控制策略的研究[D].杭州:浙江工业大学,2009.
- [ 12 ] 李俊林.单相逆变器重复控制和双环控制技术研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
- [ 13 ] 张娜.基于重复控制理论的光伏并网逆变器输出控制的研究[D].天津:天津大学,2010.
- [ 14 ] 汪东林.基于重复控制算法的正弦波逆变电源设计[D].合肥:合肥工业大学,2003.
- [ 15 ] 杨苹,郑远辉,许志荣,等.基于准比例谐振积分与重复控制的光伏并网逆变器研究[J].可再生能源,2015,33(7): 993-998.
- [ 16 ] 陈凯,张杰.重复控制逆变器并网电流控制技术研究[J].中国测试,2015,41(3): 91-95.
- [ 17 ] 王淑惠,鞠文耀,贾中路.基于复合控制的单相并网逆变器研究[J].电力电子技术,2011,45(2): 8-9.
- [ 18 ] 滕国飞,肖国春,张志波,等.采用重复控制的 LCL 型并网逆变器单闭环电流控制[J].中国电机工程学报,2013,33(24): 13-21.
- [ 19 ] 梁利民,粟时平,朱镜儒.基于三相光伏并网系统的比例谐振重复控制研究[J].电力科学与工程,2014(6): 66-72.
- [ 20 ] 贲冰.基于重复控制的逆变器复合控制技术研究[D].秦皇岛:燕山大学,2007.

收稿日期: 2016 -09 -20

(上接第 15 页)

- [ 10 ] KIM S, YONGIN S K, KIM Y, et al. A novel rotor configuration and experimental verification of interior PM synchronous motor for high-speed applications [J].IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 843-846.
- [ 11 ] EDE J D, ZHU Z Q, HOWE D. Rotor resonances of high-speed permanent-magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1542-1548.
- [ 12 ] 沈建新,李鹏,郝鹤,等.高速永磁无刷电机电磁损耗的研究概况[J].中国电机工程学报,2013,33(3): 62-74.
- [ 13 ] 吴震宇,曲荣海,李健,等.表贴式高速永磁电机多场耦合转子设计[J].电机与控制学报,2016,20(2): 98-103.
- [ 14 ] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.1.12MW 高速永磁电机多物理场综合设计[J].电工技术学报,2015,30(12): 171-180.
- [ 15 ] 王凤翔.高速电机的设计特点及相关技术研究[J].沈阳工业大学学报,2006,28(3): 258-264.
- [ 16 ] 田野,孙岩桦,丁成伟,等.不同支撑和转子装配方式的高速电机临界转速分析[J].振动与冲击,2013,32(8): 24-31.
- [ 17 ] 黄国治,傅丰礼.Y2 系列三相异步电机技术手册[M].北京:机械工业出版社,2004.

收稿日期: 2017 -03 -06

(上接第 59 页)

### 【参考文献】

- [ 1 ] 梅晓榕,兰朴森,柏桂珍.自动控制元件及线路[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1993.
- [ 2 ] 蒋范明,韩昌佩.空间应用的两相混合式步进电动机细分电路设计[J].微特电机,2012,40(2): 74-75.
- [ 3 ] 李秀红.高细分新型步进电机驱动系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [ 4 ] 尹达一,冯鑫,郑列华.微特电机在卫星水色扫描仪中的应用[J].微特电机,2008,36(8): 10-11.
- [ 5 ] 郝建强,张建.IR2110 在电机驱动中的应用[J].微电机,2008,41(6): 51-52.

收稿日期: 2016 -09 -19