

文章编号 1004-924X(2014)04-0979-09

## 光电编码器动态检测转台的空间 矢量力矩合成驱动系统

于海<sup>1,2</sup>, 万秋华<sup>1\*</sup>, 杜颖财<sup>1</sup>, 王树洁<sup>1</sup>, 卢新然<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高光电编码器动态检测技术的稳速精度, 设计了基于永磁无刷直流电机的转台驱动系统。分析了动态检测转台工作时速度波动对编码器角度误差的影响; 结合空间矢量法建立无刷电机三相绕组的力矩合成模型, 使合成力矩在空间内任意位置幅值相同; 最后加入 PI 控制器, 并利用 DSP+CPLD 设计了驱动电路, 以保证电机匀速转动, 并可模拟编码器在实际应用中的各种转动方式。实验结果表明: 设计的编码器动态检测转台驱动系统在高、低速转动时都能保持恒定的转矩输出, 系统稳速精度高, 稳态误差小于  $\pm 1 (^{\circ})/s$ 。另外, 转台驱动系统转动稳定, 有效降低了速度波动对编码器误差检测的影响, 满足光电编码器动态检测的要求。

**关键词:** 光电编码器; 动态检测转台; 无刷直流电机; PI 控制; 空间矢量合成

**中图分类号:** TN762; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.0979

## Drive system of dynamic detection equipment for photoelectric encoders using space-vector torque combination

YU Hai<sup>1,2</sup>, WAN Qiu-hua<sup>1\*</sup>, DU Ying-cai<sup>1</sup>, WANG Shu-jie<sup>1</sup>, LU Xin-ran<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn

**Abstract:** To increase the measurement precision of dynamic detection for an optical encoder in the steady speed, a turntable drive system with a brushless DC motor was designed. The influence of the speed fluctuation of dynamic detection equipment on the angle errors of the encoder was analyzed. A model of winding torque composition with space-vector was set up to make the torque's value to be a constant. Finally, the PI controller was added to this system, and the drive circuit was designed with a DSP+CPLD. The experiment shows that the drive system of dynamic detection equipment for the encoder can maintain the output torque stable in all the speeds. The steady speed precision of the system is better, and the steady error is less than  $\pm 1 (^{\circ})/s$ . The stable drive system effectively reduces

收稿日期: 2013-12-11; 修订日期: 2014-01-15.

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目 (No. 070Y32R070)

the effect of speed fluctuation on the detection error and satisfies the dynamic detection requirement of photoelectric encoders.

**Key words:** photoelectric encoder; dynamic detection equipment; brushless DC motor; PI controller; space-vector combination

## 1 引言

随着科技的进步和航空航天技术的飞速发展,光电测控设备的跟踪、定位精度对角速度及角加速度的敏感度逐渐增加,不仅要求光电编码器实时提供角度信息,还要求在角速度、角加速度的作用下保证精度。在光电编码器的研制生产过程中,需要对编码器的精度进行控制。由于目前国内还没有较好的动态误差精度检测设备,大多只能通过检测静态误差来估计动态误差<sup>[1-6]</sup>。为此,研制光电编码器动态检测设备十分必要。

无刷直流电机运行效率高、无励磁损耗、调速性能好等,同时具有结构简单、运行可靠、方便维护等优点<sup>[7-11]</sup>。目前对无刷直流电机的控制方法主要有反电势法、磁链法和电感法。随着现代控制理论的发展,又有人提出了状态观测器法、Kalman 滤波法和神经网络法等。其中,反电势法是目前较为成熟,也是应用较广泛的方法。但在使用反电势法时,无刷直流电机的转矩并不恒定,并且随着对无刷直流电机的调速控制,转动力矩也发生变化,在低速转动下力矩较小,对于大负载转动低速控制效果不好。

目前,一些发达国家开展了编码器动态检测装置的研究,如俄罗斯、日本、德国等国家,大多选用无刷直流电机作为检测装置的驱动,其误差精度可达  $0.1''$ <sup>[12-13]</sup>。国内中科院长春光机所、哈尔滨工业大学、西安交通大学、成都光电所等研究单位都对光电编码器检测装置进行了研究。他们有的利用步进电机或有刷直流电机带动被检编码器;有的用手转动转台进行检测<sup>[14-17]</sup>。不过,采用步进电机时,转动具有步距,不能对任意角度位置的误差进行检测。采用有刷直流电机时,不能实现低转速大转矩。而采用手转动由于转速不匀,往往会照成检测结果不准确。

本文分析了转速波动对编码器角度误差的影响,采用无刷直流电机设计了编码器动态检测转台的驱动系统,并利用 DSP+CPLD 设计了硬件

电路。使电机能够匀速转动,并可以模拟编码器在实际应用中的各种转动方式,实现了光电编码器动态检测转台的精确控制。

## 2 稳速精度对编码器动态误差的影响

在编码器动态特性检测中,需要对各个速度状态下编码器的误差进行检测。当稳速状态下速度具有波动时,会影响当前转速的编码器误差检测的准确性,因而不能够真实地反映编码器的动态特性。稳速精度对光电编码器动态误差的影响主要有细分延时误差和频响误差的影响。此外还有轴系误差和检测设备误差的影响,这两种误差受速度波动的影响较小,这里不进行讨论。

### 2.1 稳速精度对细分延时误差的影响

光电编码器按照细分方法主要分为硬件细分和软件细分;硬件细分采用移相电阻链对莫尔条纹信号进行细分。这种方法不存在数据处理延迟,角度信息转换为数字信号几乎是实时的。软件细分是利用高速 A/D 转换器将莫尔条纹信号的幅值转化为数字信号,通过在微处理器中进行计算、查表等工作实现对编码器莫尔条纹信号的细分。设 A/D 转换器的转换时间为  $t_{A/D}$ ,微处理器的数据计算时间为  $t_m$ ,忽略放大器稳定等延时。那么每一次角度数据的转换时间为:

$$t = t_{A/D} + t_m. \quad (1)$$

设编码器当前角速度为  $v$ ,由于编码器数据处理时间的存在,将使每次数据的输出产生误差:

$$\theta_1 = t \cdot v. \quad (2)$$

编码器稳速转动时,由于稳速误差的存在,产生  $\pm \Delta v$  的速度波动,造成检测时误差的变化为:

$$\Delta \theta_1 = \pm t \cdot \Delta v. \quad (3)$$

### 2.2 稳速精度对频响误差的影响

由于光电编码器中存在光电接收管和放大器元件,它们易使莫尔条纹信号在速度发生改变时幅值和相位发生变化,而莫尔条纹信号的变化直接影响到后续对信号的细分处理,造成频响误差。

光电编码器的频响误差随速度增大而变

大<sup>[18]</sup>,近似指数函数形式,如式(4)所示:

$$\theta_2 = Ae^{kv}, \quad (4)$$

式中:A是频响误差的幅度系数,k是增益衰减系数,v为编码器当前转速。当稳速误差为 $\pm \Delta v$ 时,使当前转速变为 $v \pm \Delta v$ ,造成动态检测时产生误差为:

$$\Delta \theta_2 = A[e^{kv} - e^{k(v \pm \Delta v)}]. \quad (5)$$

由式(3)和式(5)可以看出,误差 $\Delta \theta_1$ 的大小只受稳速精度影响,而误差 $\Delta \theta_2$ 除受稳速精度的影响外,还随转速v的变化而变化。因此在设计编码器动态检测转台驱动系统时,既要求低转速下转动力矩大而平稳,又要求在高转速下尽量增加稳速精度。

### 3 PI控制的空间矢量力矩合成原理

#### 3.1 力矩稳定原理

无刷直流电机的绕组采用星形连接方式,A、B、C分别为三相绕组的3个引出端,当电流由绕组A端流出,B、C端流入时,如图1所示:

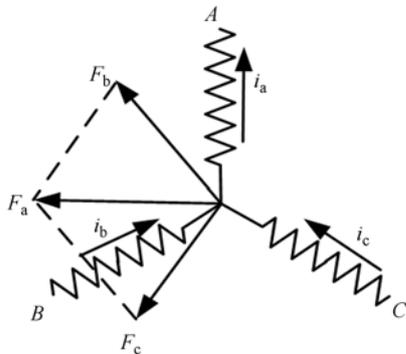


图1 无刷直流电机绕组连接图

Fig. 1 Connection of brushless DC motor winding

设电流由引出端流入为“正”,流出为“负”,那么:

$$-i_a = i_b + i_c, \quad (6)$$

根据左手定则,A相绕组所产生的力为:

$$\mathbf{F}_a = K_T i_a e^{j\pi}, \quad (7)$$

式中: $K_T$ 为电机转矩系数。

同理,B、C绕组的力为:

$$\mathbf{F}_b = K_T i_b e^{2\pi j/3}, \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_c = K_T i_c e^{4\pi j/3}. \quad (9)$$

可见三相绕组力矩在空间上相差 $2\pi/3$ 。将式(7)、(8)、(9)相加,并将式(6)带入得:

$$\mathbf{F}_4 = \frac{3K_T i_a}{2} e^{j\pi}. \quad (10)$$

三相绕组都通电时,共有8种可能。按照同样的方法分析其力矩,结果如表1所示:

表1 力矩合成表

Tab. 1 Torque combination

A	B	C	$ \mathbf{F}_a $	$ \mathbf{F}_b $	$ \mathbf{F}_c $	合成大小	方向
正	负	负	$K_T i_a$	$K_T i_a/2$	$K_T i_a/2$	$3K_T i_a/2$	0
正	正	负	$K_T i_a$	$K_T i_a$	$2K_T i_a$	$3K_T i_a$	$\pi/3$
负	正	负	$K_T i_a$	$2K_T i_a$	$K_T i_a$	$3K_T i_a$	$2\pi/3$
负	正	正	$K_T i_a$	$K_T i_a/2$	$K_T i_a/2$	$3K_T i_a/2$	$\pi$
负	负	正	$K_T i_a$	$K_T i_a$	$2K_T i_a$	$3K_T i_a$	$4\pi/3$
正	负	正	$K_T i_a$	$K_T i_a$	$2K_T i_a$	$3K_T i_a$	$5\pi/3$
负	负	负	0	0	0	0	—
正	正	正	0	0	0	0	—

表1中,在绕组A、B、C为“正、负、负”和“负、正、正”时, $i_a = 2i_b$ , $i_b$ 与其他时刻的 $i_a$ 大小相等,所以表1前6行中所有合成力矩的大小相等。所有合成力矩的空间分布如图2所示。

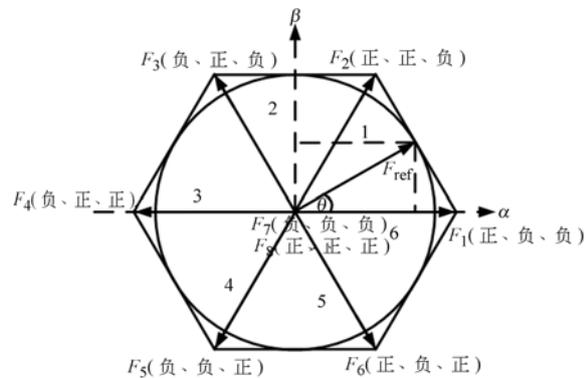


图2 空间力矩分布图

Fig. 2 Distribution of space-vector torque

图中 $\mathbf{F}_1 \sim \mathbf{F}_8$ 分别对应表1中的8个合成力矩,其中 $\mathbf{F}_7$ 和 $\mathbf{F}_8$ 由于幅值为0,处于零点位置。 $\mathbf{F}_1 \sim \mathbf{F}_6$ 6个力矩在空间上将平面分成了6个扇区,每个扇区内的力矩都可以由该扇区相邻的两个力矩进行合成,图中 $\mathbf{F}_{ref}$ 可以表示为:

$$\mathbf{F}_{ref} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2. \quad (11)$$

合理控制 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 的大小可以得到幅值相同的 $\mathbf{F}_{ref}$ ,如图2中实线圆所示,达到电机电矩的平稳。

按照图 2 所示,将 1 扇区中  $F_{ref}$  映射到图 2 中  $\alpha$  与  $\beta$  轴上时可以得到:

$$\begin{cases} \alpha = |F_{ref}| \cos \theta = |F_1| + |F_2| \cos \frac{\pi}{3} \\ \beta = |F_{ref}| \sin \theta = |F_2| \sin \frac{\pi}{3} \end{cases}, \quad (12)$$

由式(12)推导可得:

$$\begin{cases} |F_1| = |F_{ref}| (\cos \theta - \sin \theta / \sqrt{3}) \\ |F_2| = 2 |F_{ref}| \sin \theta / \sqrt{3} \end{cases}, \quad (13)$$

式中:  $\theta$  代表力矩旋转的角度值,它与电机绕组旋转角度相同。同理可以推导出其他扇区内的力矩合成式。

综合式(10)、(12)和(13)可以看出,只要合理地给定  $\alpha$  与  $\beta$  值的大小,通过计算便可以得到相应的  $F_1$  与  $F_2$  力矩的大小。然后根据式(10),合理控制电机三相绕组中电流的方向和大小,即可使力矩平衡。

### 3.2 PI 控制器原理

$\theta$  的变化率  $d\theta/dt$  与电机旋转的速度  $\Omega$  成正比。所以电机转速  $\Omega$  可以表示为:

$$\Omega = \frac{d\theta}{K_r dt} = \frac{\omega}{K_r}, \quad (14)$$

式中:  $k_r$  是电机绕组对数,  $\Omega$  是绕组角度变化速度。由于式(14)中没有积分环节,所以选用 PI 控制器对其进行调节,其数学模型如下:

$$u(k) = K_p z(k) + K_i \sum_{j=0}^k z(j), \quad (15)$$

其中:  $K_p$  是比例系数;  $K_i$  是积分系数;  $z(k)$  是第  $k$  次采样时刻输入的偏差值。

在设定参数时,将式(15)的传递函数化简为:

$$G_{PI}(s) = K_p (1 + \frac{1}{T_i s}), \quad (16)$$

其中:  $T_i$  是系统积分时间。加入 PI 控制器后系统结构如图 3 所示:

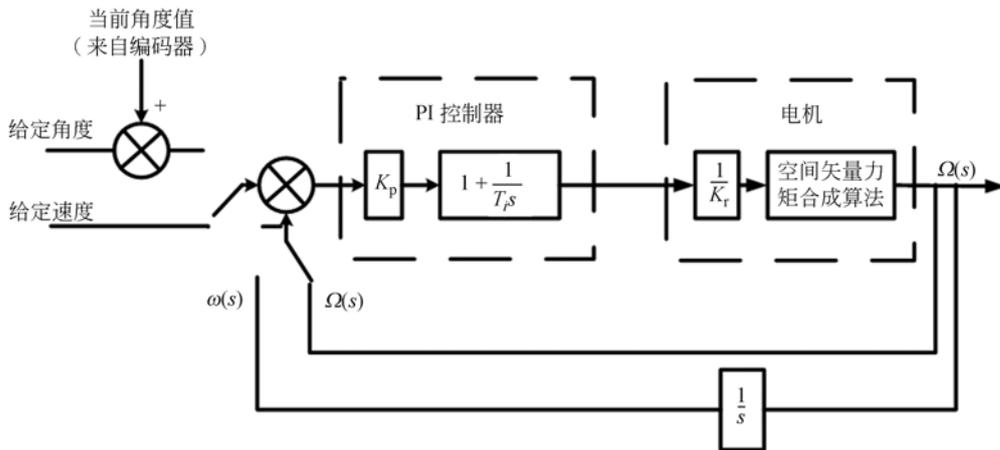


图 3 PI 控制系统模型

Fig. 3 Model of PI control system

当系统输入量是角度值时,表示利用无刷直流电机进行角度定位。输入量是速度值时,表示利用无刷直流电机速度进行控制,形成角度闭环和速度闭环。

## 4 驱动系统实现

驱动系统硬件电路采用 DSP + CPLD,其原理如图 4 所示:

DSP 芯片完成力矩合成算法,并输出控制信号,经过 CPLD 的处理产生 6 路功率管开关控制信号。控制信号控制三相全控桥中 6 个功率管的

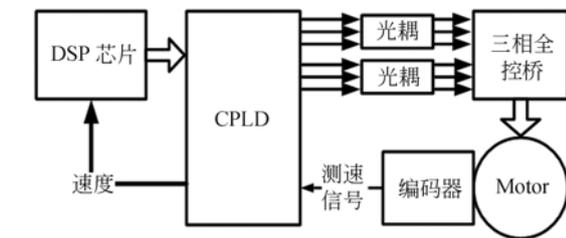


图 4 硬件电路原理图

Fig. 4 Hardware circuit schematic

开关状态。利用与电机同轴转动的光电编码器对电机进行测速。速度信号经过 CPLD 的处理,输入到 DSP 中作为速度反馈。

三相全控桥方式的电路原理如图 5 所示:

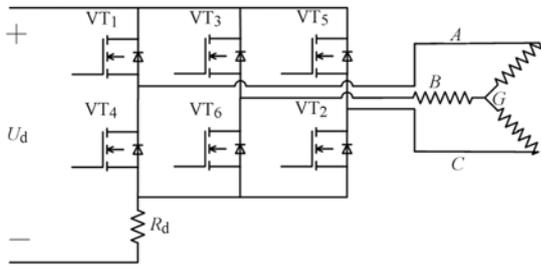


图 5 三相全控桥方式控制原理图

Fig. 5 Connection of brushless motor winding

图 5 中, A、B、C 分别是无刷直流电机三相绕组的引出端。通过控制  $VH_1 \sim VH_6$  6 个功率管的开关状态, 可以使无刷电机的每相绕组接入不同的电压。设在同一时刻, 功率管开时为状态 ‘1’, 关断时为状态 ‘0’, 控制同一相绕组的上下桥臂功率管不能同时开启或关断。表 1 中的 8 个状态可以表示为:

表 2 功率管开关组合

Tab. 2 Switch group

$VH_1$	$VH_4$	$VH_3$	$VH_6$	$VH_5$	$VH_2$	A	B	C
1	0	1	0	1	0	正	正	正
1	0	1	0	0	1	正	正	负
1	0	0	1	1	0	正	负	正
1	0	0	1	0	1	正	负	负
0	1	1	0	1	0	负	正	正
0	1	1	0	0	1	负	正	负
0	1	0	1	1	0	负	负	正
0	1	0	1	0	1	负	负	负

由表 2 可以看出, 同一时刻只能得到一种力矩。  $F_{ref}$  为合成力矩, 需要在时间上分配扇区中相邻两个力矩的作用时间, 形成 SVPWM。设载波频率为  $f_s$ , 那么周期为  $T_s = 1/f_s$ , 力矩  $F_1$  和  $F_2$  的作用时间分别为  $t_1$  与  $t_2$ 。

式(13)可以变为:

$$\begin{cases} \frac{t_1}{T_s} |F_1| = |F_{ref}| (\cos \theta - \sin \theta / \sqrt{3}) \\ \frac{t_2}{T_s} |F_2| = (2 T_s |F_{ref}| \sin \theta) / \sqrt{3} \end{cases}, \quad (17)$$

$|F_1|$  与  $|F_2|$  的值可由式(10)推导计算出来且相等, 可以得到:

$$\begin{cases} t_1 = m (\cos \theta - \sin \theta / \sqrt{3}) \\ t_2 = (2 m \sin \theta) / \sqrt{3} \end{cases}, \quad (18)$$

式中:  $m = T_s |F_{ref}| / |F|$ 。同时, 为了使每一个 SVPWM 周期都以零力矩开始或结束, 所以引入力矩  $F_7$  和  $F_8$  的作用时间:

$$\begin{cases} t_7 = (T_s - t_1 - t_2) / 2 \\ t_8 = (T_s - t_1 - t_2) / 2 \end{cases} \quad (19)$$

对于扇区 1 对电机三相绕组的切换控制如图 6 所示:

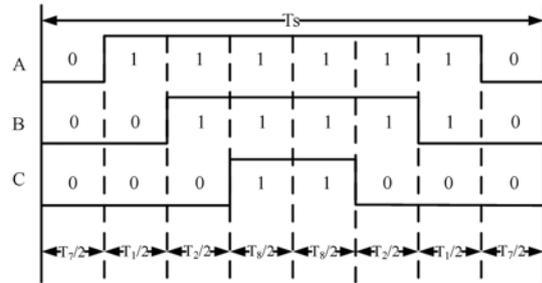


图 6 扇区 1 内绕组通电切换顺序

Fig. 6 Winding switch order in section one

对于其他扇区的切换控制, 可以用扇区 1 的切换方法实现。

## 5 实验结果及分析

### 5.1 系统特性测试

采用某电机公司生产的无位置传感器无刷直流电机进行实验, 其额定功率为 60 W, 输入电压 24 V, 额定扭矩为 2 N·m, 绕组对数为 50。经过测量, 所设计的光电编码器动态特性检测装置转动力矩为 0.9 N·m。

利用 Simulink 软件设计驱动系统的模型。模型设定的力矩值  $F_{ref} = 2 \text{ N} \cdot \text{m}$ , PID 控制器输入的数据经过正弦变化得到  $\alpha$  和  $\beta$  轴的坐标值; 经过 Subsystem1 的计算得到三相绕组的力矩大小  $F_1 \sim F_3$  和当前合成力矩所在扇区; 经过 Subsystem2 的计算得到三相绕组通断电时间, 并由 Subsystem3 的转换得到控制功率管的开关信号; 对功率管 (Bridge) 进行开关控制, 使电机转动。其模型框图如下:

实验速度在  $10 \sim 90 (^{\circ})/s$ 。设定电机负载为 0.9 N·m, 对驱动系统进行仿真, 如图 8 所示:

图 8(a) 是  $90 (^{\circ})/s$  时电机的转速仿真图, 图 8(b) 是转速由  $10 (^{\circ})/s$  变化到  $90 (^{\circ})/s$  时电机的速度响应曲线。  $90 (^{\circ})/s$  时电机稳定时速度波动为  $89.5 \sim 90.5 (^{\circ})/s$ , 稳速误差在  $\pm 0.5 (^{\circ})/s$  以

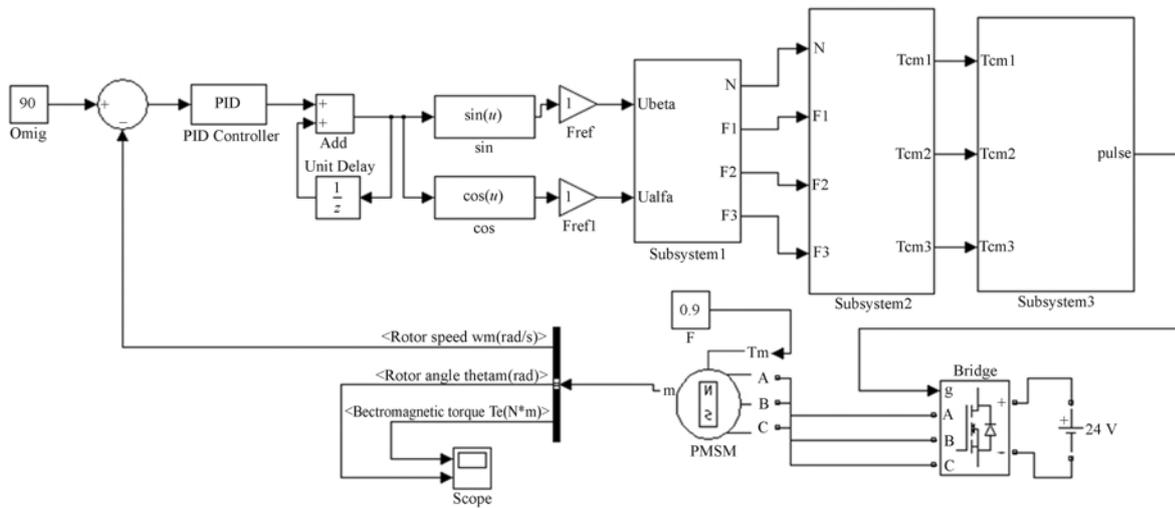
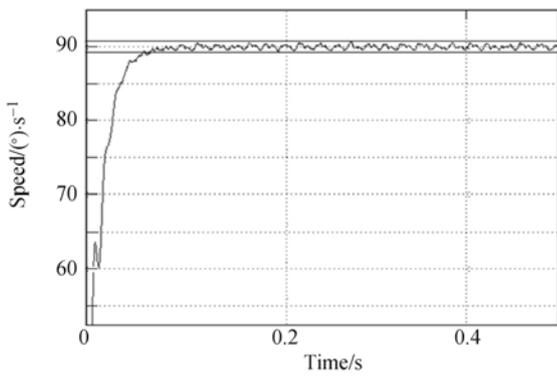
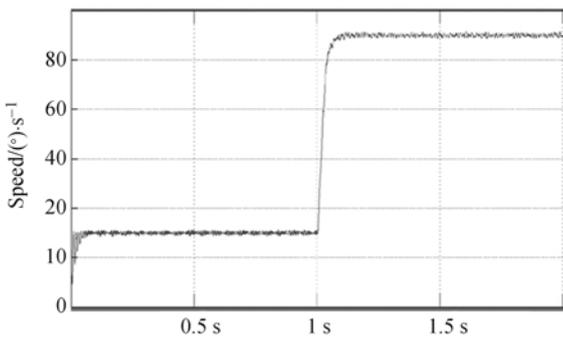


图 7 Simulink 模型框图  
Fig. 7 Model of Simulink



(a) 转速为 90(°)/s  
(a) At speed of 90(°)/s



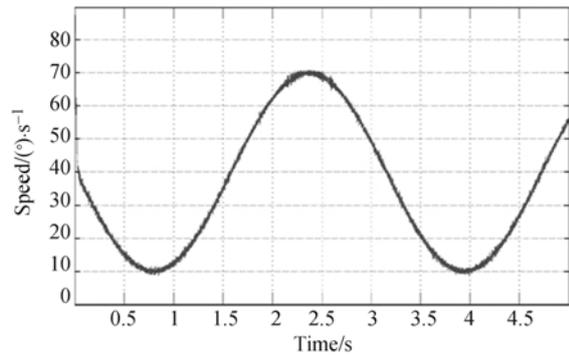
(b) 转速为 10(°)/s  
(b) At speed of 10(°)/s

图 8 simulink 实验结果  
Fig. 8 Results of simulation

内。图 8(b)中,转速为 10(°)/s 时,速度波动为 9.6~10.5(°)/s,电机速度波动在 ±1(°)/s 以内。

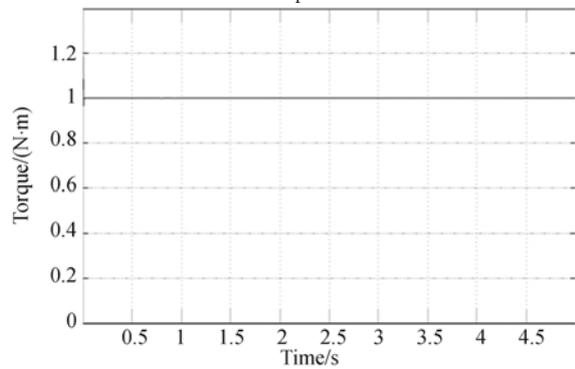
输入期望转速在 1 s 时变化为 90(°)/s,电机转速很快达到 90(°)/s,并稳定。

使期望转速在 10~70(°)/s 之间呈正弦波变化,仿真结果如图 9 所示。



(a) 转速

(a) Speed



(b) 转动转矩

(b) Moment

图 9 正弦变化仿真结果

Fig. 9 Simulation results of sine

图 9(a)为电机正弦变化的仿真结果,图 9(b)为电机转速正弦变化的转动力矩。从图 9(b)可以看出,无论转速变化为何值,电机转动力矩都保持恒定为  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

### 5.2 稳速精度测试

为了测量电机转动时速度稳定性,在无刷直流电机上加装 21 位绝对式高精度光电编码器。高精度光电编码器精度优于  $2''$ 。利用 FPGA 在

单位时间间隔内分别采集两次编码器角度数据并做差。然后利用 USB 数据总线将做差后的数据传输到计算机中,利用 VC++ 编写数据接收软件。将做差后的数据换算成标准单位数据,以时间为横坐标,速度为纵坐标在软件中绘制速度曲线坐标图。

实验时,分别对  $10、30、50、70$  和  $90(^{\circ})/\text{s}$  进行速度采集,软件显示的速度曲线截图如图 10 所示:

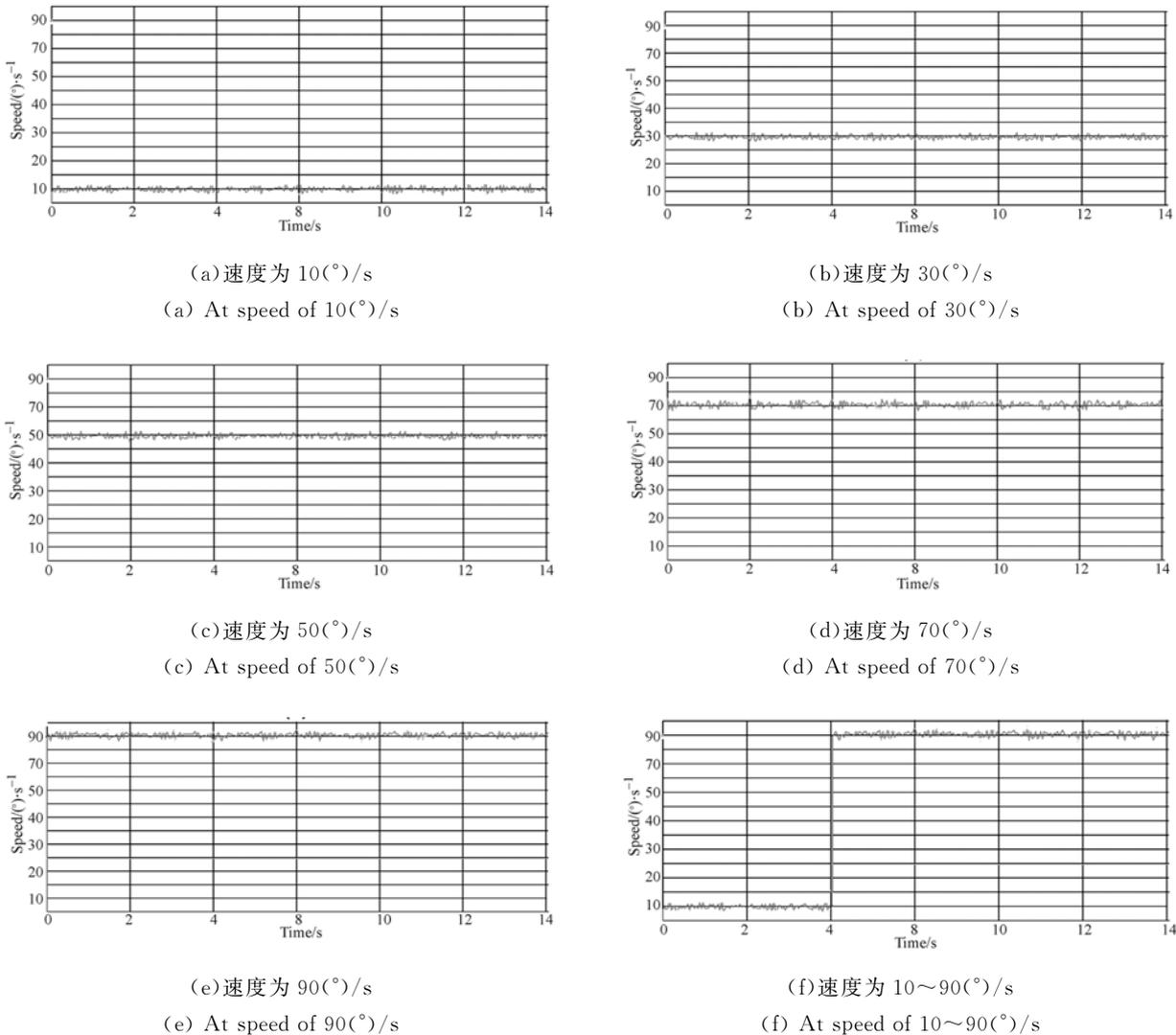


图 10 速度检测实验  
Fig. 10 Speed detection test

图 10 中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别为速度为  $10、30、50、70$  和  $90(^{\circ})/\text{s}$  时利用编码器对电机转速进行测量时的曲线图,图 10(f)为初始速度为  $10(^{\circ})/\text{s}$  在  $4 \text{ s}$  时使速度变化为  $90(^{\circ})/\text{s}$  时的速度曲线图。图中可见在各个速度下,速度波动都很

小;速度变化时响应很快能够达到稳定。

在速度稳定时,每隔  $0.2 \text{ s}$  对速度值进行一次采样,共进行 10 次采样。在速度分别为  $10、30、50、70$  和  $90(^{\circ})/\text{s}$  时采样数据如表 3 所示。

表 3 中,各个速度下速度波动都在  $\pm 1(^{\circ})/\text{s}$

以内,表明稳速系统能够达到 $\pm 1(^{\circ})/s$ 的稳速精度。

目前常用的 15 位小型绝对式光电编码器,其

表 3 速度采样结果

Tab. 3 Results of sample (( $^{\circ}$ )/s)

采样点	10( $^{\circ}$ )/s	30( $^{\circ}$ )/s	50( $^{\circ}$ )/s	70( $^{\circ}$ )/s	90( $^{\circ}$ )/s
1	10.5	29.5	50.1	69.2	90.1
2	10.2	29.1	50.6	69.1	89.5
3	9.8	29.6	50.7	69.8	89.1
4	9.5	30.2	50.1	70.4	89.2
5	9.6	30.5	49.6	70.8	89.8
6	10.3	30.7	49.1	70.6	90.3
7	10.7	30.2	49.5	70.1	90.5
8	10.5	29.8	49.2	69.4	90.8
9	10.1	29.4	49.8	69.1	90.2
10	9.6	30.1	50.6	69.5	89.6

外径为 50 mm,静态误差精度为 $30''$ ,细分信号电压幅值为 $A=4.8\text{ V}$ ,增益衰减系数 $k=0.02\text{ 1}/(^{\circ})/s$ ,细分延时为 $t=100\text{ }\mu\text{s}$ 。将稳速误差 $\Delta v=\pm 1(^{\circ})/s$ ,代入式(3)和式(5),得到:

$$\Delta\theta_1 = \pm 0.000\ 1 \times 1 \times 60 \times 60 = 0.36'',$$

$$\Delta\theta_2 = A \times [e^{kv} - e^{k(v\pm 1)}] = \pm 0.02\ A e^{kv}.$$

可以看出稳速误差对编码器的动态误差影响很小。

## 参考文献:

- [1] EVITON D B, KIRK J, LOBSINGER I. Ultra-high resolution Cartesian absolute optical encoder [J]. SPIE, 2003, 5190: 111-121.
- [2] 万秋华, 孙莹, 王树洁, 等. 双读数系统的航天级绝对式光电编码器设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 52-57.  
WANG Q H, SUN Y, WANG SH J. Design for space borne absolute photoelectric encoder of dual numerical system [J]. Opt. Precision Eng., 2009, 17(1): 52-57. (in Chinese)
- [3] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.  
WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(2): 379-386.

综上所述:光电编码器动态检测转台的空间矢量力矩合成驱动系统能够胜任小型光电编码器的动态特性检测工作。

## 6 结 论

在编码器动态检测中,由于驱动电机需要同时带动被测编码器和基准编码器转动,再加上连接工装的负载,使转动所需力矩较大。传统直流电机在大扭矩稳速控制上具有种种的缺点,在实际应用中极大的增加了设计难度和成本。采用空间矢量力矩合成法,并加入 PI 控制器,利用 Simulink 软件建立力矩合成模型,并将 Simulink 软件生成的程序下载到采用 DSP 芯片制作的电路板中,实现了对无位置传感器无刷直流电机的稳定转矩控制。

空间矢量力矩合成法控制无刷直流电机,可以在负载较大时的稳定转动。系统跟随速度快,稳速精度高,稳态误差小于 $\pm 1(^{\circ})/s$ ;其转矩稳定性高于传统无刷电机控制方法,并且能够保持不同转速下的力矩恒定。在实际应用中,由于驱动系统稳速精度的提高,有效降低了速度波动对编码器误差检测的影响,满足光电编码器动态特性检测的要求。

- [4] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2079-2084.  
AI CH G, CHU M, SUN H X, et al.. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(11): 2079-2084. (in Chinese)
- [5] 吴宏圣, 曾琪峰, 乔栋, 等. 提高光栅莫尔条纹信号质量的滤波方法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1944-1949.  
WU H SH, ZENG Q F, QIAO D, et al.. Filtering method of improving quality of grating moiré fringe [J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19(8): 1944-1949. (in Chinese)
- [6] 王显军. 基于 SOC 单片机的高集成度光电编码器电路设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1082-1087.  
WANG X J. Circuit design for high integrated photoelectric encoder base on SOC single chip [J].

- Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1082-1087. (in Chinese)
- [7] 陆华才,徐月同,杨伟氏,等. 无位置传感器表面式永磁同步直线电机初始位置估计新方法[J]. *中国电机控制学报*, 2008, 28(15):109-113.
- LU H C, XU Y T, YANG W M, *et al.*. A novel estimation method of sensorless initial rotor position for surface-mounted PMLSM [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(15):109-113. (in Chinese)
- [8] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京:科学出版社, 2009:1-12.
- XIA CH L. *The Control System of BLDC Motor* [M]. Beijing: Science Press, 2009:1-12. (in Chinese)
- [9] 王晓远,田亮,冯华. 无刷直流电机直接转矩模糊控制研究[J]. *中国电机控制学报*, 2006, 26(15):134-138.
- WANG X Y, TIAN L, FENG H. Study of the fuzzy control on direct torque control for BLDCM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(15):134-138. (in Chinese)
- [10] SHI T N, LU N, ZHANG Q. Brushless DC motor sliding mode control with kalman filter [J]. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, 4:1-6.
- [11] TIAN Y, SHI T N, XIA C L. Position sensorless control using adaptive wavelet neural network for PM BLDCM[J]. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, 2848-2852.
- [12] FILATOR Y V, AGAPOV M Y, BOURNACHEV M N. Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders, optical measurement system for industrial inspection III [C]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5144:381-390.
- [13] TSUKASA W, HIROVUKI F. Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]. *Proceedings of SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements*, 2001, 4401:267-274.
- [14] 邓方,陈杰,陈文顿,等. 高精度的光电编码器检测方法及其装置[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(11):977-980.
- DENG F, CHEN J, CHEN W J, *et al.*. A high precision test method and apparatus for photoelectric encoder [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(11):977-980. (in Chinese)
- [15] 佟丽翠,李晨阳,赵柱,等. 编码器自动检测过程的虚拟仪器化设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2010, 2:31-33.
- TONG L C, LI CH Y, ZHAO ZH, *et al.*. Virtual instrument design of encoder automatically detection process [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010, 2:31-33. (in Chinese)
- [16] 赵柱,续志军,王显军. 基于运动控制技术的编码器自动检测系统[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(2):134-138.
- ZHAO ZH, XU ZH J, WANG X J. An automatic detection system of encoder error based on motion control technology [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2):134-138. (in Chinese)
- [17] 杨进堂,杨庆辉. 莫尔条纹动态细分误差的测量[J]. *计量技术*, 1998, 7:14-16.
- YANG J T, YANG Q H. The detection of dynamic interpolation error of Moiré fringe [J]. *Measure Technique*, 1998, 7:14-16.
- [18] 康华光,陈大钦. 电子技术基础模拟部分(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
- KANG H G, CHEN D Q. *Electronic Technology Base (fourth edition)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. (in Chinese)

## 作者简介:



于海(1987—),男,吉林敦化人,博士研究生,2009年于东北电力大学获得学士学位,主要从事光电位移精密测量及光电编码器的检测等方面的研究。  
E-mail: yuhai5158@163.com

## 导师简介:



万秋华(1962—),女,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电位移精密测量技术及高精度光电轴角编码器等方面的研究。  
E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn