

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.11.021

检流计式振镜电机反电动势系数测量研究*

周雨时,陈光胜*

(上海理工大学 机械工程学院,上海 200093)

摘要:针对检流计式振镜电机反电动势系数测量中信号难以获得的问题,提出了使振镜电机转子在其限定角度内产生速度波动,通过位置传感器输出的位置反馈电压信号,间接得到转子角速度的方法。在国产振镜电机上进行了实验,使用示波器采集了具有短期稳定角速度的位置反馈信号,以及对应角速度下定子线圈中反电动势信号;对信号进行处理后得到了转子角速度和反电动势有效值,最终计算得到了反电动势系数。研究表明:在不同角速度下,得到的反电势系数值稳定,最终结果取 $k_e = 0.0078 \text{ V}/(\text{rad/s})$;实验验证了测量方法的可行性。

关键词:振镜电机;位置传感器;反电动势有效值;反电动势系数

中图分类号:TM351

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)11-1231-04

Measurement of back-EMF coefficient of galvanometer scanner

ZHOU Yu-shi, CHEN Guang-sheng

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem that the signal in the measurement of the back-EMF coefficient of galvanometer scanner is difficult to be obtained, a method was proposed that make the galvanometer rotor produce velocity fluctuation in its limited angle and through the position feedback voltage signal output by the position detector to obtain the rotor angular velocity indirectly. Experiments were carried out on domestic galvanometer scanner, oscilloscopes were used to collect position feedback signals with short-term stable angular velocity and back-EMF signals in stator coils. The signal was processed to obtain the value of rotor angular velocity and the back EMF effective value. Finally, the back-EMF coefficients was calculated. The results show that the obtained back-EMF coefficient is stable at different angular velocities, and the final result is $k_e = 0.0078 \text{ V}/(\text{rad/s})$. The feasibility of the measurement method is verified by experiments.

Key words: galvanometer scanner; position detector; RMS value of the back-EMF; back-EMF coefficient

0 引 言

检流式振镜电机是一种特殊的摆动电机,其原理与检流计类似,属于检流电机。这种电机的转子轴与反射镜连接,用于对光束进行指定角度内的偏转,广泛应用于激光加工、舞台灯光、医学成像等领域^[1-6]。但在共聚焦显微镜^[4-5]、光学相干断层扫描^[6]等高端领域中的应用,对振镜电机的响应速度、控制精度、稳定性提出了更高的要求。

目前的振镜电机采用动磁式结构,定子为一对线圈绕组,永磁转子使用稀土材料制成,具有较高的能量密度、磁稳定性、刚度和较小的转动惯量,满足高速控制的要求。为了实现振镜电机的高速高精度控制,研究者们建立了振镜电机的传递函数模型,再进行控制结构和控制算法的设计。研究者人员一般会采用国外厂商如 Cambridge Technology, SCANLAB 的振镜电机作为研究对象,在电机模型中直接使用了厂商提供的电机参数,但是并未对这些参数进行检测验证^[7-11]。

收稿日期:2019-03-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1104602)

作者简介:周雨时(1992-),男,湖北洪湖人,硕士研究生,主要从事扫描振镜高速高精度控制方面的研究。E-mail:1303148722@qq.com

通信联系人:陈光胜,男,副教授,硕士生导师。E-mail:595948686@qq.com

众多的电机参数中反电动势系数也是一个非常重要的指标,构成了振镜电机内部的“自然反馈”。传统的反电动势测量方法往往是针对于旋转电机,将待测电机与驱动器断开,用另一台电机拖动待测电机进行匀速旋转,示波器测量电机任意两相的线电压波形,取线电压幅值计算得到反电动势系数^[12-13];或是让永磁同步电机以单相模式旋转,再测量其三相端点的电压,经过合成得到反电动势系数^[14]。

虽然振镜电机属于直流电压控制,但与普通旋转式直流力矩电机的区别是:(1)定子绕组只有一对线圈;(2)转子极限旋转角度处有机械限位,无法实现整周的旋转运动;(3)将镜片转动惯量等效到转子上后,将不会驱动实际的负载;(4)需要高速来回小角度摆动,速度方向变化频繁。以上特点决定了旋转电机的反电动势测量方法不适用于振镜电机。

为此,本文将针对国产振镜电机的反电动势系数进行测量,让转子产生速度波动,由位置检测器的输出信号得到角速度,示波器获取反电动势信号的方法来得到反电动势系数。

1 振镜电机结构及其反电动势系数

本文所研究的永磁式振镜电机结构示意图如图 1 所示。

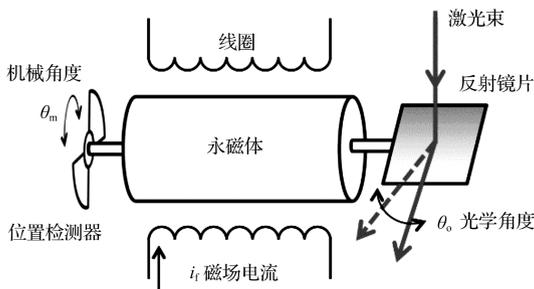


图 1 动磁式振镜电机结构示意图

振镜电机转子轴为稀土永磁体,与镜片连接;定子为一对线圈绕组。当电压施加与线圈两端,线圈中产生的电流会形成磁场,与永磁转子的磁场相互作用,使转子带动镜片偏转,最终实现激光束在镜片上反射角的变化。转子的正常偏转范围在 ±20°以内,在大于极限偏转角位置处有限位销限位,故不能进行整周的旋转运动。

通常振镜电机在使用过程中要求其转子进行高速的摆动运动,速度方向变化频繁。转子的运动会在定子线圈中产生与线圈输入电压方向相反的反电动势,且反电动势与速度成比例关系,比例系数即为反电动势系数。

振镜电机的电路简化示意图如图 2 所示。

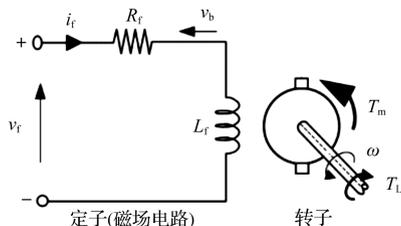


图 2 动磁式振镜电机等效电路

V_i —定子输入电压; V_b —反电动势; L_f —磁场绕组电感; R_f —磁场绕组电阻; i_f —磁场绕组电流; T_m —电磁转矩; T_L —负载转矩; ω —转子角速度

将电机线圈输入端从驱动器断开,转子以匀速 $w_{(i)}$ 转动时,用示波器可采集得到线圈两端的电压信号,即为反电动势信号 $V_{b(i)}$,并且有:

$$V_{b-RMS(i)} = k_e w_{(i)} \tag{1}$$

$$|V_{b-RMS(i)}| = \sqrt{\frac{V_{b1}^2 + V_{b2}^2 + \dots + V_{bN}^2}{N}} \tag{2}$$

式中: $V_{b-RMS(i)}$ —反电动势信号的有效值,其正、负号根据信号的整体符号来判断; k_e —反电动势系数, $V/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$; i —标识号。

测量振镜电机反电动势的关键在于如何使转子匀速运动,并得到对应速度下的反电动势有效值。

2 振镜位置传感器与转子角速度

为了实现高速高精度的控制目标,振镜电机一般采用电流、速度、位置三环控制。其中,速度环和位置环的闭环控制依赖于对电机转子的位置信号反馈。在电机内部集成位置检测器,检测转子的角度位置信息,并输出位置反馈电压信号。

本文中振镜电机采用的是光电式位置传感器,属于模拟式位置传感器,其示意图如图 3 所示。

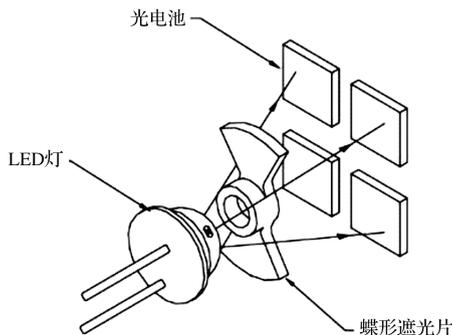


图 3 光电式位置检测器示意图

图 3 中,蝶形遮光片与转子轴尾端固定连接,其位置处于 LED 灯与阵列耦合的光电池之间。当蝶形片随转子发生偏转时,LED 灯照射在每一块光电池的面积会改变,光电池会输出与受光面积成比例的电流信号。光电池输出的微弱电流经过滤波、差动放大、增益放大

等信号处理电路后,得到位置反馈电压信号。

整体而言,位置反馈信号的大小与转子角度成线性关系,其关系式为:

$$V_p = k_p \theta \quad (3)$$

式中: θ —转子的实际角度; V_p —位置反馈电压; k_p —位置传感器的电压 - 角度系数。

电压 - 角度系数 k_p 存在设计值 $k_{p-design}$ 与实际值 k_{p-real} 的区别。在进行初始设计时,振镜控制系统的工作偏转角度范围为 $\pm A^\circ$,输入指令电压范围为 $\pm EV$,则有:

$$k_{p-design} = \frac{E}{A \cdot \frac{\pi}{180}} \quad (4)$$

实际值 k_{p-real} 会因为信号处理电路的影响或电路调试的影响与 $k_{p-design}$ 间存在一定偏差。本文中的 k_p 值为通过实验得到的实际值。

转子角速度为角度位置对时间的微分,即:

$$w = \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

由式(3)可得:

$$w = \frac{d\left(\frac{V_p}{k_{p-real}}\right)}{dt} \quad (6)$$

本文可通过获取位置传感器输出的位置反馈信号来获得转子的转速。同时,当转子匀速转动时, V_p/k_{p-real} 的值在时域内应该是一条直线,也即位置反馈电压 V_p 为直线上升段或直线下降段。

但是在采集得到的位置反馈电压信中,会存在噪声信号,通过式(6)得到的角速度非常不稳定,因此笔者选取所测位置反馈电压 V_p 处于直线时的信号段,通过线性拟合得到 V_p/k_{p-real} 的斜率,斜率值即为转子的角速度 w 。这样既简化了计算,又避免了测量信号中因带有噪声而不便于进行微分计算的情况。

3 反电动势系数测量实验

本文采用某国产振镜电机进行实验,并且已通过实验测得位置传感器的电压 - 角度系数 $k_p = 25.783 \text{ V/rad}$ 。

反电动势系数测量实验中的信号采集原理,如图 4 所示。

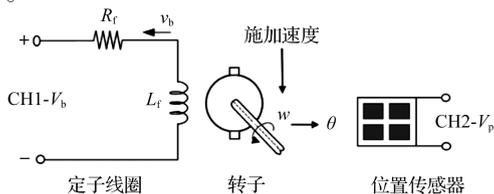


图 4 信号采集原理

信号获取的具体步骤如下:

- (1) 将电机线圈连线与驱动器断开,位置传感器保持连接,驱动器保持上电;
- (2) 用手拨动振镜镜片,使转子产生速度波动;
- (3) 示波器 CH1 通道采集电机线圈两端因转子速度变化而产生的电压信号 V_b ,CH2 通道采集位置传感器输出的位置反馈电压信号 V_p ;
- (4) 观测示波器显示的信号,只要 V_b 信号存在直线上升或下降段时,保存数据信息。

根据试验采集得到的信号,由式(3)将位置反馈电压信号 V_p 转化为角度信号 θ ,得到反电动势 - 转子角度曲线,如图 5 所示。

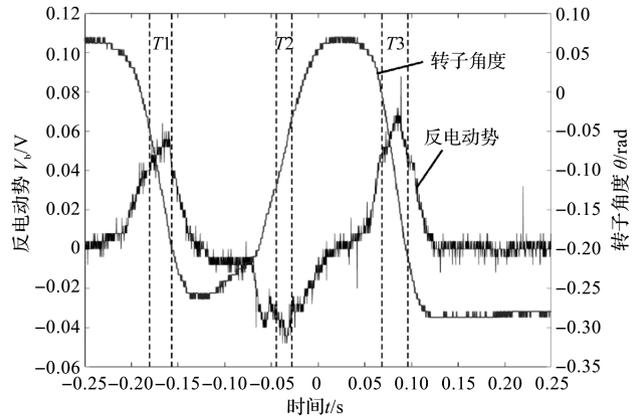


图 5 反电动势 - 转子角度信号曲线

图 5 中,将其中转子角度曲线近似于直线段的信号划分出来,以其中 T1 段信号为例进行分析。由式(2)得到信号段内反电动势有效值 $V_{b-RMS(i)} = 0.0474 \text{ V}$ 。

转子角度曲线在该区间内近似于一条直线段,信号及其线性拟合如图 6 所示。

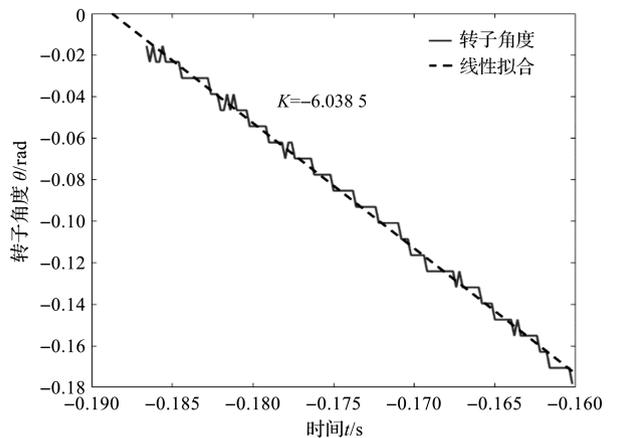


图 6 T1 时间段转子角度信号

线性拟合得到斜率 $K = -6.0385$,转子的角速度与线性拟合直线的斜率相等,即 $w_{(i)} = K = -6.0385 \text{ rad/s}$ 。由式(1)可得到反电动势系数 $k_e = -0.00785$ (负号

表示反电动势的大小与正常情况下线圈输入电压相反)。一般将系数取正值,在控制模型中将反电动势作

为电机自有特性的负反馈。多次实验后得到的数据如表 1 所示。

表 1 实验数据

数据段	反电动势有效值 V_{b-RMS}/V	转子转速 $W/(rad \cdot s^{-1})$	V_{b-RMS}/w	反电动势系数 $k_e/(V \cdot (rad \cdot s^{-1})^{-1})$
T1	0.047 4	-6.038 5	-0.007 849 6	0.007 85
T2	-0.039 4	5.265	-0.007 483 4	0.007 48
T3	0.058 4	-7.564 5	-0.007 720 3	0.007 72
T4	-0.045 2	5.794	-0.007 801 2	0.007 80
T5	0.026 6	-3.380 7	-0.007 868 2	0.007 87
T6	0.050 2	-6.423	-0.007 815 7	0.007 82
T7	-0.030 8	3.977 1	-0.007 744 3	0.007 74
T8	0.051 3	-6.607 6	-0.007 763 8	0.007 76
T9	0.098 5	-12.515	-0.007 870 6	0.007 87
T10	-0.054 1	6.935 8	-0.007 800 1	0.007 80
T11	-0.061 8	8.095 1	-0.007 634 2	0.007 63
T12	-0.033 8	4.382 1	-0.007 713 2	0.007 71
T13	0.109 6	-14.078	-0.007 785 2	0.007 79

由表 1 可知:反电动势系数结果稳定,验证了该实验方法可行性,实验结果取 $k_e = 0.007 8 V/(rad/s)$ 。

4 结束语

由于传统旋转电机反电动势系数的测试方法无法在振镜电机上实现,且以往未有通过实验方法来获得振镜电机反电动势系数,本文通过使振镜电机转子产生速度波动,通过示波器间接检测得到了转子短期内具有稳定角速度的信号,以及对应线圈的反电动势信号,计算得到了振镜电机的反电动势系数。

多次实验的结果稳定,验证了本文中所采用实验方法的可行性。

参考文献 (References):

[1] AYLWARD R P. Advanced galvanometer-based optical scanner design[J]. **Sensor Review**, 2003,23(3):216-222.

[2] 彭雪峰. 二维振镜式扫描系统及其在 SLS 中的应用[D]. 武汉:华中科技大学材料科学与工程学院,2005.

[3] DUMA V F, ROLLAND J P. Advancements on galvanometer scanners for high-end applications[C]. Design and Quality for Biomedical Technologies VII, San Francisco:SPIE BiOS,2014.

[4] YOO H W, ITO S, SCHITTER G. High speed laser scanning microscopy by iterative learning control of a galvanometer scanner [J]. **Control Engineering Practice**, 2016 (50):12-21.

[5] PAWLEY J B. Handbook of biological confocal microscopy[M]. 3th ed. New York: Springer Science Business Media,2006.

[6] DUMA V F, LEE K, MEEMON P, et al. Experimental investigations of the scanning functions of galvanometer-based scanners with applications in OCT [J]. **Applied Optics**, 2011,50(29):5735-5749.

[7] 叶 乔. 高速振镜理论研究及实践[D]. 武汉:华中科技大学光学与电子信息学院,2004.

[8] 井 峰. 数字式振镜控制系统的研究[D]. 西安:中国科学院研究生院西安光学精密机械研究所,2012.

[9] ALLOTTA B, GIORGETTI F, NINCHERI M, et al. Modeling and control of a galvanometer for the application to a laser engraving system[C]. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence:IEEE, 2016.

[10] MNERIE C A, PREITL S, DUMA V F. Performance enhancement of galvanometer scanners using extended control structures[C]. IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence & Informatics, Timisoara: IEEE, 2013.

[11] FENG J, ZHI J. Digital implementation of a galvanometric optical scanner based on DSP and FPGA[C]. 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, Jilin:IEEE,2011.

[12] 陈 荣,邓智泉,刘日宝,等. 基于磁场定向控制的永磁同步电机参数测量[J]. 河海大学学报,2004,36(26):684-688.

[13] 宋 科,刘卫国,骆光照,等. 基于 dspace 永磁同步电机参数测量系统的研究与开发[J]. 计算机测量与控制, 2009,17(1):39-52.

[14] 陈 宏,薛晓明. 永磁同步电机反电动势系数测量方法的研究[J]. 电测与仪表,2013,50(8):40-43.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

周雨时,陈光胜. 检流计式振镜电机反电动势系数测量研究[J]. 机电工程,2019,36(11):1231-1234.

ZHOU Yu-shi, CHEN Guang-sheng. Measurement of back-EMF coefficient of galvanometer scanner[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(11):1231-1234.