

文章编号: 1001-9014(2006)03-0229-04

## 摆镜扫描的重复控制系统

童子磊

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**为解决摆镜扫描速度振荡的问题,采用永磁同步电机作为扫描驱动电机,建立了控制系统的传递函数模型.同时,根据摆镜扫描运动具有周期性的特点,提出了一种改进结构的重复控制器对扫描电机的转速进行控制.该控制器引入两个放大环节对系统增益进行调节,从而改善了系统的跟踪性能.实验结果显示,该控制系统能够有效地提高摆镜扫描的速度稳定性,抑制扫描电机在换向时的振荡现象.

**关键词:**摆镜;永磁同步电机;重复控制器;速度稳定性

**中图分类号:**TP731;TP273 **文献标识码:**A

## REPETITIVE CONTROL SYSTEM OF SCAN FOR OSCILLATING MIRROR

TONG Zi-ZLei

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In order to solve the problem the velocity oscillation of oscillating mirror, permanent magnet synchronous motor (PMSM) was used as a drive motor. System transfer function was established. Taking into account that the scan movement is periodical, a modified repetitive controller was proposed to control the angular velocity of scan motor. This controller used two amplifiers to adjust the system gain. As a result, the tracking accuracy was improved. Experiments show that the controller system can efficiently improve the velocity stability of oscillating mirror, and damp the oscillation of scan motor when the scan direction is changed.

**Key words:** oscillating mirror; PMSM; repetitive controller; velocity stability

### 引言

在光机扫描成像系统中,摆镜扫描是经常采用的一种扫描方式.与其它扫描方式相比,摆镜扫描的一个重要优点是扫描效率可以做得较高,这样有利于提高系统的信噪比和辐射灵敏度<sup>[1]</sup>.为了获得较好的图象质量,系统要求扫描镜的转速误差控制在很小的范围内.例如全球臭氧监测实验仪器 GOME 的角速度误差为  $1\text{ mrad/sec}$ <sup>[2]</sup>,EOS-TERRA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 角速度误差为  $\pm 2.1\text{ mrad/sec}$ <sup>[3]</sup>,ADEOS-II 卫星上的扫描装置的方位轴转速误差为  $\pm 0.015^\circ/\text{sec}$ .这些都对扫描镜的运动控制提出了很高要求.

摆镜扫描的速度稳定性问题相对连续旋转扫描来说更为突出.因为摆镜扫描是周期性的往复运动,始终处于加速-匀速-减速的状态.由于电机在启动

和制动这个过渡阶段不是匀速的,因此这段时间不能作为有效扫描时间.为了提高扫描效率,必须尽量缩短启动和制动时间,相应地在加速度突变的时刻产生振荡现象,速度波动增加,造成图象相应的部分模糊不清.

本文介绍了一套以永磁同步电机作为扫描驱动电机的控制系统.由于摆镜的扫描运动规律是事先设定的,而且具有周期性的特点,系统采用了一种改进结构的重复控制器对扫描电机的转速进行控制.实验结果证明,该系统能有效提高摆镜扫描的速度稳定性,抑制扫描电机在换向时的振荡现象.

### 1 控制系统原理

摆镜扫描控制系统的结构框图如图 1 所示.摆镜和驱动电机直接连接.驱动电机为三相永磁同步电机,采用矢量控制方法和 d 轴电流为 0 的控制策

收稿日期:2005-10-28,修回日期:2006-02-22

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目基金资助(055115020)

作者简介:童子磊(1972-),男,新疆石河子人,中国科学院上海技术物理研究所博士,主要从事成像光谱扫描技术的研究.

Received date: 2005-10-28, revised date: 2006-02-22

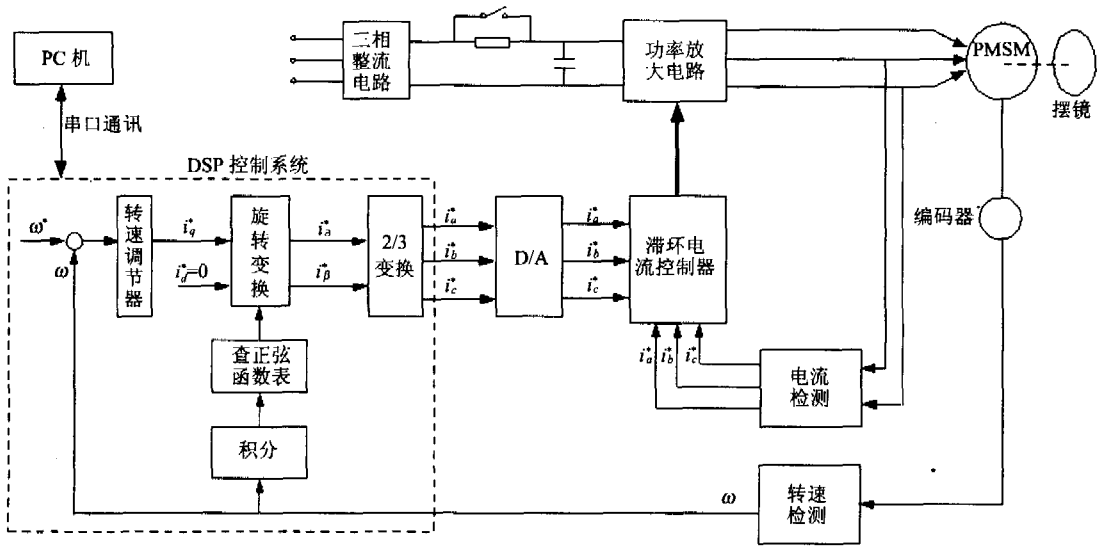


图1 摆镜扫描控制系统  
Fig.1 Oscillating mirror scan control system

略. 控制系统具有电流反馈、速度反馈双环结构. 主电路采用电流跟踪滞环控制的功率放大电路, 速度反馈通过对光电编码器发出的脉冲信号进行测量得到, 电流反馈采用霍尔电流传感器. 速度调节器的输出  $i_q^*$  和  $i_d^*$  作为 d 轴和 q 轴电流给定信号, 该信号经旋转变换和 2/3 变换得到三相电流给定值, 作为电流环的给定. 三相指定电流和三相反馈电流经电流滞环比较器, 产生 PWM 信号, 控制功率放大电路驱动电机运行. PC 机通过串口和 DSP 芯片 TMS320F240 通信, 向 DSP 发出运动指令, 同时接收运动参数, 完成给定轨迹曲线、响应曲线和误差曲线的显示. TMS320F240 作为直接数字控制, 完成控制算法和运动参数的检测.

## 2 控制系统的数学模型

在电机转子磁场定向坐标系中, 永磁同步电机的数学模型为<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} U_q = R_s i_q + p \Psi_q + \omega_r \Psi_d & (1) \\ T = n \cdot i_q \cdot \Psi_f & (2) \\ T = T_L + Jp\omega + c\omega & (3) \end{cases}$$

其中,  $U_q$  为 q 轴绕组电压,  $i_q$  为 q 轴绕组电流,  $\Psi_d$  和  $\Psi_q$  分别为 d 轴和 q 轴磁链,  $R_s$  为定子相电阻,  $\omega_r$  为转子电角速度,  $\omega$  为转子机械角速度,  $T$  为电磁转矩,  $T_L$  为干扰力矩,  $\Psi_f$  为永磁体基波励磁磁链链过定子绕组的磁链,  $J$  为转子和摆镜的总转动惯量,  $n$  为磁极对数,  $p$  为微分算子,  $c$  为粘滞摩擦系数.

控制系统的主通道有两个变换器和一个逆变

器. 这些环节存在一定的延时, 但相对于电机响应而言它们的频率响应是非常快的, 所以系统的动态响应主要由电机的动态性能决定, 其它环节可由比例环节近似代替. 由于采用了电流跟踪滞环控制, 电动机实际电流紧紧跟踪指令电流的变化. 此时可以认为实际电流和指令电流的关系为

$$i_q^* = \beta \cdot i_q \quad (4)$$

其中  $\beta$  为电流反馈系数. 如果进一步忽略  $T_L$ , 则由式(1)~(4), 永磁同步电机和逆变器的数学模型可以简化为:

$$\begin{cases} i_q = \frac{1}{\beta} i_q^* & (5) \\ T = n \cdot i_q \cdot \Psi_f & (6) \\ T = Jp\omega + c\omega & (7) \end{cases}$$

根据式(5)、(6)、(7), 得出控制系统传递函数模型如图2所示.

图中, 电机和逆变器的传递函数为

$$G(s) = \frac{A}{s+B}, \text{ 其中, } A = \frac{n\Psi_f}{\beta J}, B = \frac{c}{J}.$$

## 3 重复控制器的设计

### 3.1 重复控制原理

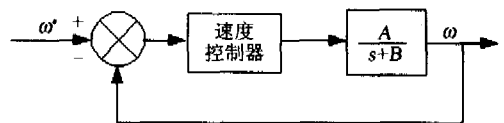


图2 控制系统的传递函数  
Fig.2 The transfer function of control system

重复控制由日本学者 Inoue 等首先提出,是一种基于内模原理的新型控制策略.内模原理指出,如果在一个稳定的闭环系统中包含一个参考信号发生器,则被控输出能够无稳态误差地跟踪参考信号.基于以上思想,重复控制通过在闭环系统内设置一个与外部信号同周期的内部模型,实现对外部周期参考信号的渐近跟踪.基本重复控制器如图 3 所示.其中,  $T$  为输入信号的周期.  $G(s)$  为稳定的控制装置.对于单输入单输出系统,上述基本控制器稳定条件是<sup>[5]</sup>

- (1)  $\frac{G(s)}{1+G(s)}$  是渐进稳定的,
- (2)  $\left| \frac{1}{1+G(s)} \right| < 1$ .

3.2 改进的重复控制器

对于实际的控制系统,在所有频率范围内满足式(4)的稳定条件是比较困难的,所以在应用中对它进行了一些改进.由于系统的被控部分具有较低的频率特性,所以在重复控制通道中引入一个低通滤波器  $Q(s)$ ,用于减小高频段重复控制器的增益,抑制干扰,改善并保证闭环系统的稳定性.考虑到加入低通滤波器后周期参考信号中的高次谐波也被滤除,降低了系统的跟踪性能,故又在重复控制器中加入一个比例系数为  $K_1$  前馈项,改善系统的快速性.同时,在延时环节之后设置一个放大环节  $K_2$ ,对重复控制通道的增益进行调整,相应地调节了跟踪速度和跟踪精度.改进后的重复控制系统如图 4 所示.

由图 4 可以求得系统误差传递函数为:

$$\frac{e(s)}{r(s)} = \frac{1}{1+K_1G(s)} \cdot \frac{1-Q(s)e^{-sT}}{1-Q(s)e^{-sT}[1-G_C(s)]}$$

其中  $G_C(s) = \frac{K_2G(s)}{1+K_1G(s)}$ .

假设  $Q(s)$  是稳定的,则由小增益定理可知系统稳定性条件为:

- (1)  $G_C(s)$  是渐进稳定的
- (2)  $\|Q(s)\|_\infty \cdot \|1-G_C(s)\|_\infty < 1$  . (8)

$Q(s)$  的传递函数具有如下形式:  $\frac{1}{1+TS}, T > 0$ ;

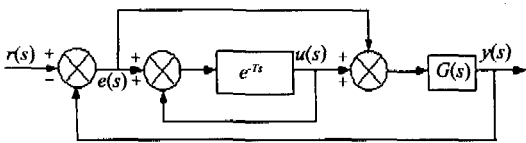


图 3 基本重复控制器  
Fig.3 Basic repetitive controller

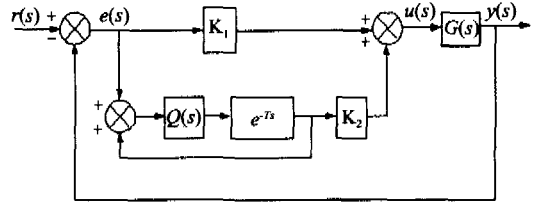


图 4 改进的重复控制器  
Fig.4 Modified repetitive controller

其中,  $T$  为时间常数.实际应用中  $Q(s)$  也常取为一个略小于 1 的常数.由系统误差传递函数和式(8)可知,若  $Q(s)$  取 1,虽然系统稳态误差为 0,但对  $G_C(s)$  的幅值和相位都有很高要求;若  $Q(s)$  略小于 1,稳态误差不大,但系统的稳定性要求放宽了.本系统中取  $Q(s)$  为 0.95.

由式(8)可知,要使系统保持稳定,  $K_1, K_2$  的取值应满足:

$$\left| \frac{1+K_1G(j\omega)}{1+(K_1-K_2)G(j\omega)} \right| < |Q(j\omega)| \quad (9)$$

可以先令  $K_2 = 1$ ,按式(9)确定  $K_1$  的最大值,然后通过调试确定  $K_1, K_2$  的具体取值.由于  $K_1, K_2$  过大将使系统不稳定,因此调试时先取  $K_1, K_2$  为较小值,然后按照先增大  $K_1$ ,再增大  $K_2$  的顺序调节,直至满意为止.

4 实验结果及结论

实验用电机的额定电流为 5.2A,额定转矩为 8.12N.m,电机转子转动惯量  $J_1 = 20 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ,摆镜转动惯量为  $J_2 = 32 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ .速度检测元件为 17 位增量式光电编码器.采用前面介绍的控制系統,用脉冲响应法测得

$$G(s) = \frac{30.81}{s+2.94}$$

摆镜扫描的频率为 5Hz,扫描角度为  $\pm 19^\circ$ .启动、制动和停止时间都为 10ms,匀速扫描时间为 70ms,匀速扫描速度为  $475^\circ/\text{s}$ .重复控制器取  $Q = 0.95$ .由式(9)可知,  $K_1, K_2$  的取值应满足:

$$\left| \frac{1+(K_1-K_2)G(j\omega)}{1+K_1G(j\omega)} \right| < \frac{20}{19}$$

实际取  $K_1 = 40, K_2 = 50$ .输出响应如图 5 所示.

从图中可以看出,重复控制的前 3 个周期,在换向点和加速度突变点处有明显的振荡尖峰.随着周期次数的增加,速度逐渐趋于平稳,表现出良好的跟踪性能.

实验中还对改进的重复控制器和常规 PI 控制

器的控制效果进行了对比. PI 控制器的比例系数为 60, 积分时间常数为 5. 两种控制器的控制误差分别如图 6 和图 7 所示.

从图 6、7 可以看出, PI 控制器在加速度突变和换向点处的速度振荡峰值为  $20^{\circ}/s$ . 重复控制器在此处的初始振荡峰值比 PI 大, 为  $40^{\circ}/s$ , 但经过 3 个周期后, 误差已经减小为 PI 控制器的  $1/4$ . 在匀速运行时, 重复控制器的速度波动为  $30''/s$ , 也小于 PI 控制器的  $65''/s$ .

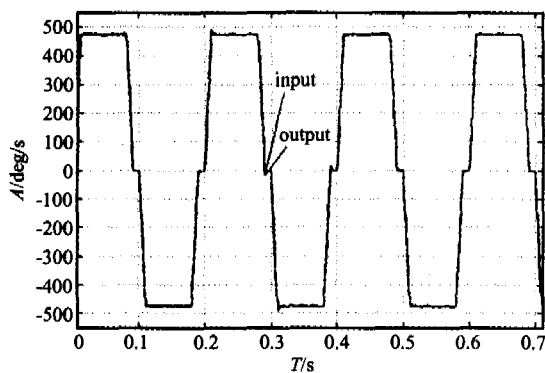


图 5 输入角速度信号 A 和输出响应  
Fig. 5 Input angular velocity signal and output response

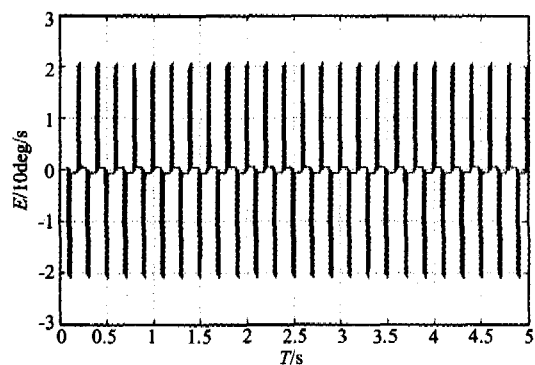


图 6 PI 控制器的角速度误差 E  
Fig. 6 The angular velocity error of PI

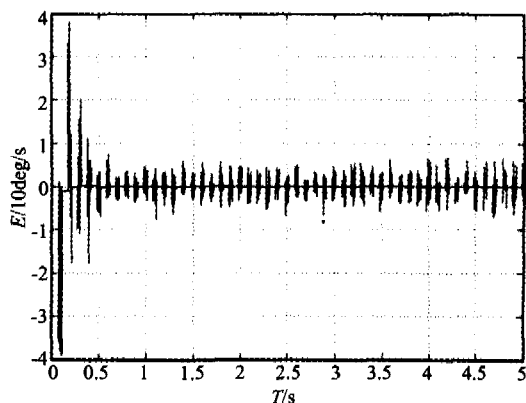


图 7 重复控制器控制的角速度误差 E  
Fig. 7 The angular velocity error of repetitive controller

实验结果表明, 采用改进重复控制器的系统能明显地提高速度平稳性, 减小振荡. 而且其结构简单, 便于实现, 很适用于在具有周期特性的扫描运动的控制中.

## REFERENCES

- [1] SUN De-Xin, WANG Jian-Yu. Scan track of system using  $45^{\circ}$  mirror and its effect on the correction of image rotation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙德新, 王建宇.  $45^{\circ}$  度镜扫描轨迹的分析及其对像旋校正的影响. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(1): 19—22.
- [2] Miller D C. Aviris scan drive design and performance [J]. *Spie*, 1988, 834: 55—62.
- [3] Callies J, Corpaccioli E, Eisinger M, et al. Ozone monitoring by GOME-2 on the Metop satellites Proc. The 2000 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' conference [C]. Bologna: EUMETSAT, 2000. 201—208.
- [4] Fu Xi. *Permanent motor and its driving system* [M]. Bei Jing: China Machine Press (符曦. *高磁场永磁式电动机及其驱动系统*. 北京: 机械工业出版社), 1997.
- [5] Shinji Hara, Yutaka Yamamoto, Tohru Omata, et al. Reptitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals [J]. *IEEE Transactions On Automatic control*, 1988, 33(7): 659—668.