

小型化振镜扫描器电路设计

李 鹏, 范璐璐

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:分析了振镜扫描器的基本组成,建立了振镜扫描器伺服系统的理论模型,最后根据上述理论,设计了小型化振镜扫描器伺服驱动电路。

关键词:TM383.4;振镜扫描;反馈校正

中图分类号:TM383.4 **文献标识码:**B

Miniature design of galvanometer scanner circuit

LI Peng, FAN Lu-lu

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, first of all, we analyze galvanometer scanner construction. second, we set up the model of galvanometer scanner servo theory, the end, we design the galvanometer scanner servo circuit.

Key words: PID; galvanometer scanning; feedback compensation

1 引 言

振镜是一种高精度、高重复性的光学扫描器。因此,振镜电路是高精度伺服控制闭环系统。传统的振镜扫描系统电路复杂、功耗高、体积大,无法满足现代小型化电路的设计要求。本文在分析了振镜扫描器伺服系统的理论基础上,设计了一款小型化、低功耗、宽温度工作的振镜扫描器电路。

2 振镜扫描器组成原理

振镜扫描系统由扫描反射镜、位置传感器、扫描电机及伺服电路几部分组成。其整体性能指标包括转角范围、小信号响应时间、重复性、线性度和温漂等,实践中对振镜的性能要求就是精度高、速度快、偏角大、体积小、可靠性好^[1]。

扫描反射镜由光学衬底和反射薄膜构成,标刻系统中光线的波长、光束直径和功率不同,扫描镜片的材料和尺寸也需随之改变。

位置传感器是一种能把特定的被测量信息按一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。位置传感器分为电容式和光电式两种。由于光电式传感器具有比电容式传感器更宽的工作温度范围,因

此本文采用光电式传感器。

扫描电机是一种摆动式电动机,它必须与驱动控制电路相连接后才能摆动。就结构而言,扫描电机可分为动圈式、动铁式和动磁式三种。动磁式相比前两种方式的优点是动磁式结构的电磁转矩较大,并较方便地受定子励磁来控制,因此本文采用动磁式结构的扫描电机。

伺服电路是一个典型的位置随动控制系统,扫描器振镜电路包括两部分:一是使振镜偏转的驱动电路,二是控制驱动电路驱动精度的伺服控制电路。

3 振镜伺服系统理论模型

对一个给定的系统,首先要建立数学模型,然后进行系统性能分析,如果发现系统的输出响应不理想,不能满足预定的设计要求,就必须采用一定的控制方式来提高整个系统的工作性能。振镜伺服系统的研究对象是扫描电机,伺服系统的设计目标就是控制扫描电机达到要求的动态和稳态性能。

作者简介:李 鹏(1983-),男,硕士,主要从事红外图像处理技术的研究。E-mail:gary237@sina.com

收稿日期:2009-05-20;修订日期:2009-07-15

3.1 扫描电机数学模型

振镜的转动力矩计算公式为:

$$T = BLNID - 2\pi 10^{-7} CLN^2 I^2 \frac{D}{g} \quad (1)$$

式中, T 是转矩, 单位是牛·米 ($N \cdot m$); B 是永久磁铁在空气隙中产生的磁感应强度, 单位是特斯拉 (T); L 是转子的长度, 单位是米 (m); D 是转子的直径, 单位是米 (m); g 是空气隙的间距, 单位是米 (m); N 是线圈的匝数; I 是线圈的电流, 单位是安培 (A); C 是转子最大转角与 α 角的比^[2]。

由于扫描电机的非线性项要远小于线性项, 因此可将式(1)简化为:

$$T = BLNID \quad (2)$$

式中, $BLNID$ 对于确定的扫描电机是一个定值, 故可令 $K_T = BLNID$, 称为电机转矩系数, 则式(2)可进一步简化为:

$$T = K_T I \quad (3)$$

故可得出以下结论: 电机转动力矩与流经电机线圈的电流成正比。扫描电机工作时的转矩平衡方程为:

$$T = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} + g\theta \quad (4)$$

式中, T 是电机线圈电流产生的电磁转矩; J 是电机转子和轴上反射镜片相对于电机转轴的转动惯量之和, 单位为 $g \cdot cm^2$; θ 是电机转子偏转角度, 则 $\frac{d\theta}{dt}$ 是转子角速度, $\frac{d^2 \theta}{dt^2}$ 是转子的角加速度; f 是电机内部和电机负载折合到电机轴上的黏性摩擦系数; g 是扭力棒弹性常数, 动铁式振镜的 g 为零。

电机的电枢平衡方程为:

$$E_i = RI + L \frac{dI}{dt} + E_b \quad (5)$$

$$E_b = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, R 是电枢电阻; L 是电枢电感; K_b 是电动机反电动势系数。当电枢绕组两端加上控制电压 E_i 后, 产生电枢电流 I , 随即获得电磁转动力矩 T , 驱动电枢克服阻力矩, 带动负载旋转, 同时在电枢两端产生反电动势 E_b ^[3]。

将式(4)、式(5)、式(6)联立, 消去中间变量, 可得 θ 与 E_i 之间的关系式:

$$JL \frac{d^3 \theta}{dt^3} + (JR + FL) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (FR + GL + K_T K_b) \frac{d\theta}{dt} + gR\theta = K_T E_i \quad (7)$$

将式(7)进行拉氏变换, 整理后得到:

$$G = \frac{\theta(S)}{E_i(S)} = \frac{K_T/R}{(LS+R)(JS^2+fS+g)+K_T K_b S} \quad (8)$$

式(8)就是振镜扫描电机的传递函数, 它是一个三阶系统。

由式(8)可知, 传递函数的方框图如图1所示。

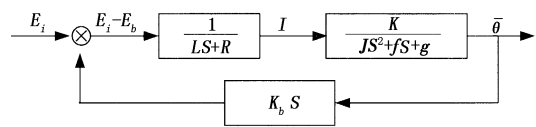


图1 传递函数

其中, θ 表示振镜偏角; E_i 表示振镜线圈的输入电压; K 为在磁通量为 Φ 时, 振镜线圈的力矩与线圈中电流 I 的比值; L 为线圈的电感; R 为线圈的电阻; S 为复数, 是拉普拉斯变换平面; J 为线圈的转动惯量; f 为阻尼常数; g 为扭力棒弹性常数; K_b 为反电动势常数。

3.2 系统性能分析

系统性能分析可以分为定性分析和定量分析两个部分, 定量分析是用系统数学模型, 求解系统处于不同的设定输入、不同的初始条件和各种可能的系统参数下的系统输出的动态响应。系统的定性分析是利用一些简单的理论判据和方法, 对已知系统的稳定性等主要性能进行定性分析。

由上节分析可知扫描电机的数学模型为:

$$G = \frac{\theta(S)}{E_i(S)} = \frac{K_T/R}{(LS+R)(JS^2+fS+g)+K_T K_b S} = K \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\varepsilon\omega_n S + \omega_n^2} \quad (9)$$

上式的特征方程为:

$$S^2 + 2\varepsilon\omega_n S + \omega_n^2 = 0 \quad (10)$$

其两个根为:

$$S_{1,2} = -\varepsilon\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\varepsilon^2 - 1}$$

其中, ε 为系统阻尼比; ω_n 为系统自然频率。系统的时间响应取决于 ε 和 ω_n 。

由线性系统的稳定性定义可知, 当且仅当系统的特征根全部 $S_{1,2}$ 具有负实部时, 线性控制系统是稳定的; 当有一个或一个以上正实部根时, 系统是不稳定的; 当特征根中具有一个或一个以上零实部根, 此时系统处于临界稳定情况, 仍是不稳定的。

在振镜伺服系统设计中, 由电容传感器检测扫描电机的角位置信号反馈到给定信号的输入端, 与给定信号进行比较产生偏差信号, 经过放大器后驱动电机运动, 这构成了本伺服系统的基本闭环回

路——位置环。该环路可以在保证系统稳定的条件下实现系统无静差,解决了控制系统的稳态性能问题。

3.3 系统控制

当一个给定的系统,建立了数学模型并进行了稳态性能分析后,如果发现系统的输出响应不理想,不能满足预定的设计要求,就必须对系统进行改造,也就是要采用一定的控制方式来提高整个系统的工作性能。

控制方式包括开环控制、闭环控制和复合控制三种。本文采用位置和电流双闭环反馈控制方式设计振镜伺服系统。把位置调节器的输出当作电流调节器的输入,再用电流调节器的输出去控制扫描电机的转动。从闭环结构上看,电流调节环在里面,叫做内环;位置调节环在外边,叫做外环。这样就形成了位置、电流双闭环随动系统^[4]。

确定了伺服系统的回路结构后,接下来要对系统的稳态误差进行分析,一般来说,控制系统的开环传递函数都可以用以下公式来表示:

$$W(S) = \frac{K(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)}{S^\gamma(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)} \quad (11)$$

其中,分母中的 S^γ 项表示系统含有 γ 个积分环节,根据 $\gamma = 0, 1, 2, \dots$ 等不同数值,分别称为 0 型、I 型、II 型、……系统。

在阶跃输入下 I 型和 II 型系统在稳态时是无差的,即没有跟随阶跃输入的误差,而 II 型系统在稳态

时是无差的;在加速度输入下, I 型系统的稳态误差是 ∞ ,故 II 型系统是比较理想的结构。

闭环系统的校正方式很多,在本文设计时,电流环调节器采用的是 PD 控制器,以保证对电机线圈中电流变化的快速响应,消除电流扰动。角位置环调节器采用 PID 控制器。

PID 控制器运动方程为:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \tau \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

相应的传递函数为:

$$G_c(S) = \frac{K_p}{T_i} \cdot \frac{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)}{s} \quad (13)$$

当利用 PID 控制器进行串联校正时,除可使系统的型别提高到 II 级外,还将提供两个负实零点。从而在提高系统动态性能方面,具有更大的优越性^[5]。

4 振镜扫描器伺服电路设计

本伺服系统应用位置环串联校正提高振镜扫描器的稳态性能;利用转速微分反馈校正来改造控制系统结构,有助于抑制振荡,减小超调,提高系统的快速性;同时为了保证振镜扫描系统的扫描精度和响应速度,保持扫描电机中线圈电流的稳定,减少电流超调,采用由电流反馈环和角位置反馈环组成的双闭环结构;实现扫描电机快速、准确、稳定地跟随输入位置信号转动。

伺服控制系统结构图如图 2 所示。

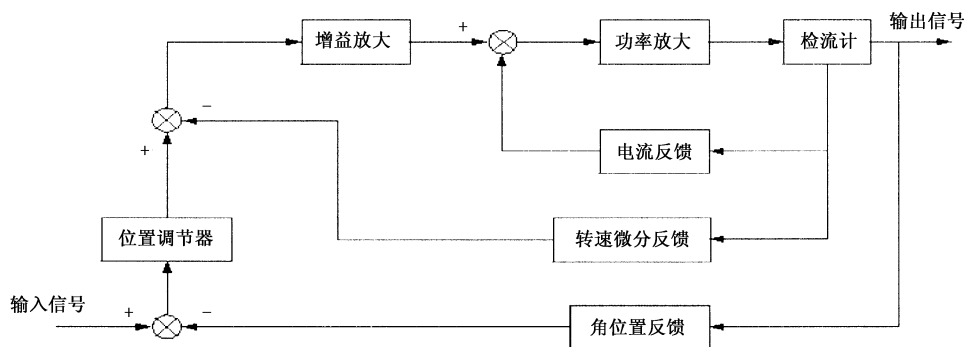


图 2 伺服控制系统结构图

4.1 伺服电路组成

振镜伺服电路包括集成在扫描电机中的电源电路、输入信号调节电路、角度传感器及其检测电路、AGC 电路、校正电路、输出电路以及完成系统保护的辅助电路等。

电源电路可允许的供电电压范围为 $\pm 15 \text{ V} \sim \pm 28 \text{ V}$,标准输入电压为 $\pm 17 \text{ V}$,电路中利用 LDO 转换电路所需要的 $\pm 15 \text{ V}$ 和 $\pm 10 \text{ V}$ 。一般情况下,

电压越高(接近 $\pm 28 \text{ V}$),大角度移动响应时间就越短,性能就越好。

输入信号调节电路的主要作用是防止由于阶跃瞬间的输入信号与反馈信号的差值过大,导致输出级功率放大器的电流过大,超过功率放大器所能提供的最大电流。

角位置信号检测与处理电路的解调模块采用二极管检波电路和滤波电路来得到高频信号的幅值。

在二极管检波后,再通过一个低通滤波器滤掉信号中残余的高频部分,这样就完成了对高频调幅信号的解调,再通过差分放大后,即可得到光电式传感器反馈的振镜扫描器角度信号。

AGC(automatic gain control)电路的高频信号源由附在振镜扫描器内的一个小型振荡器产生的。AGC振荡器提供电源 V_s 。改变AGC电路的输出电压,可以调节角度反馈信号电压与偏转角度之比(刻度因子)。

校正电路采用的是比例、积分、微分电路并联组成的PID控制器。通过改变比例、积分、微分电路中电位器的分压系数可以将伺服系统调节到临界阻尼状态。

输出电路是为扫描电机线圈提供足够大的电流来产生需要的转矩。在设计中采用了电流反馈回路将电机线圈电流反馈到功率放大芯片的输入端,改善了放大器的非线性,大大提高了扫描器工作时的稳定性和重复性。

辅助电路包括对振镜电机线圈温度、电路板供电状况、扫描电机偏角范围等进行全面监控,从最大程度上保证振镜扫描器的安全稳定运行。

4.2 小型化电路设计

1) 优化电路

由于本电路设计所要求的转角为 $\pm 3^\circ$,转角较小,因此降低输入电压为 $\pm 15\text{ V}$,对系统移动的响应时间影响不大,而且降低输入电压,取消了LDO转换,可以提高电源的利用效率,减小电路的体积。

2) 采用小型化器件

电路中使用的元器件包括电阻、电容、可调电位器、芯片、接插件等,本电路将电阻、电容的尺寸降为0603封装,可调电位器和芯片采用表贴器件,接插件换为连接阻抗更低、体积更小的器件。从而减小了整个电路的总体积。

3) 提高工作温度范围

选取的器件由工业级换为军工级,提高电路的工作温度。由于本电路中有PID控制电路,系统工作于临界阻尼状态,微积分电路中的电容值稍有变化,就可能导致电路产生自激,而在高低温情况下,普通陶瓷电容的容差可能会达到20%,因此采用温度系数更好的CBB电容,保证了电路工作的稳定性。

原电路的工作温度范围为 $-20^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$,经

过上述改进后,工作温度范围扩展为 $-40^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 。

4) 多层板设计

在小型化的电路板设计中,最重要的考虑就是电源的分配网络。电源分配网络必须为电路板上各部分电路提供一个低噪声的电源,包括 V_{cc} 和GND。电源设计的目标就是尽可能地减少电源分配网络的阻抗。电源分配网络的形式可分为总线式(Power Buses)和电源层式(Power Planes),通常电源层式比总线式有更好阻抗特性。

原电路采用双面板设计,采用的是总线式的电源分配网络,不仅导致器件布局面积过大,而且电路地线复杂,导致噪声过大。

本电路采用四层板设计,采用电源层式电源分配网络,可以很好地降低地线阻抗、在电路板上为逻辑信号提供了一个尽可能短的地线回路,减小了共模干扰、显著减小电路噪声、提高系统的可靠性。将器件正反贴在电路板上,将电路的电源电路、反馈控制电路、驱动电路分开合理布局,进一步抑制信号噪声,缩小电路板尺寸,原电路板尺寸为 $100\text{ mm} \times 63\text{ mm}$,经改进后,尺寸变为 $55\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 。

4.3 调试及结果比较

1) 调试

伺服系统性能测试分为小信号测试与大信号测试两部分。小信号测试主要检测控制系统对输入信号的响应速度和响应精确性;大信号测试主要检测扫描器安全工作时的最大转角和与之对应的响应速度。在测试中采用方波信号作为输入信号。

2) 结果比较

在输入一个频率为 $20 \sim 30\text{ Hz}$ 、电压为 0.500 V_{pp} 的方波信号情况下,由图3和图4可以看到,输出方波信号的上升沿与下降沿无明显超调,系统处于临界阻尼状态,小型化电路可以满足设计要求。

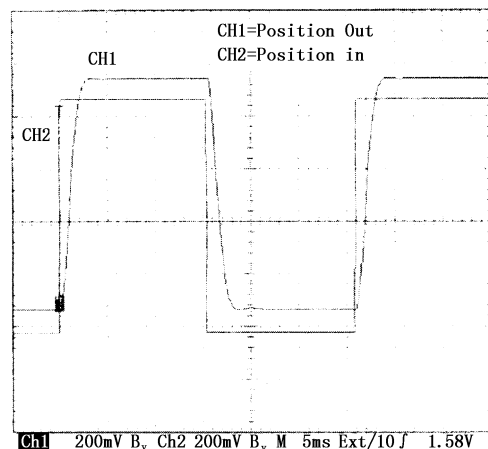


图3 原电路板调试结果

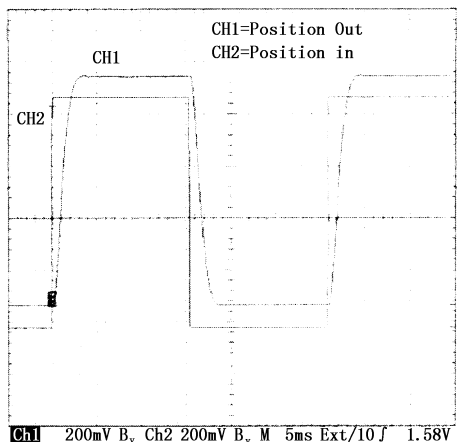


图4 小型化电路板调试结果

在保证振镜电路性能的情况下,本文实现了小型化的扫描电路。图5为传统的振镜扫描电路板,尺寸大小为100 mm × 63 mm。图6为小型化振镜扫描电路板,尺寸大小为55 mm × 45 mm,面积仅为原电路的39%。

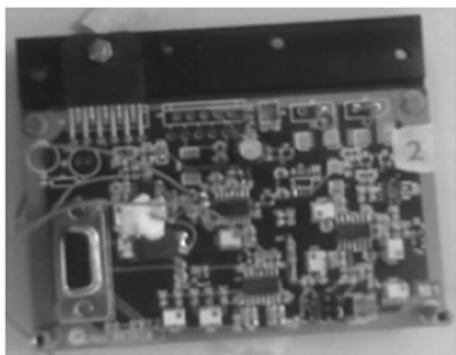


图5 振镜扫描电路板

原电路的工作温度范围为-20℃ ~ 85℃,经过电路改进后,工作温度范围扩展为-40℃ ~ 85℃。

在优化电路设计后,功耗比原电路降低12%。

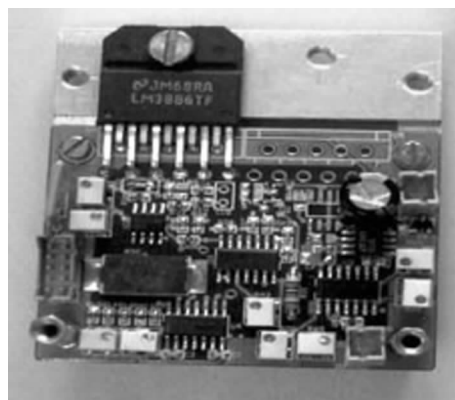


图6 小型化振镜扫描电路板

5 结论

振镜扫描器是集光机电技术于一体的高性能扫描部件,本文在深入分析了振镜扫描器伺服系统的理论基础上,改进了原来的电路,在保证电路性能的前提下,扩展了电路的工作温度范围,降低了功耗、同时实现了小型化设计。

参考文献:

- [1] 许亚平,陶霞虹. 振镜电路的设计考虑[J]. 应用激光, 1999,19(1):39-40.
- [2] 王先起,廖胜,沈忙作,等. 一种采用扫描振镜的背景实时扣除方法[J]. 光电工程,2005,32(5):9-12.
- [3] 杨莉荣,袁芳. 激光扫描器扫描成像问题分析[J]. 中国科技信息,2008,21(2):12-14.
- [4] 张晓波,迟泽英,陈文建. 光纤共焦扫描显微图像渐晕校正的研究[J]. 光电子技术,2004,24(2):121-124.
- [5] 叶乔,汪盛烈,赵学民. 高速扫描振镜伺服电路设计[J]. 中国激光:增刊,2004,31(2):351-354.