

· 结构与工艺 ·

## 基于全数字模型辨识的高精度跟踪系统设计

蔡美华, 贾琦

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:**目前工程上对光电跟踪系统的控制器设计多数采用基于被控对象数学模型的控制策略。模型的辨识是否准确, 如何开展控制器设计成为系统的难点。利用DSP控制器对光电跟踪系统进行全数字方式的传递函数测试, 在线处理测试数据, 同时DSP控制器通过接收系统期望的特性参数, 自动计算出校正参数, 完成控制器框架设计。根据跟踪目标特性, 结合跟踪误差特点及工程经验库, 提出准速度/加速度补偿算法, 优化控制器, 该方法已成功应用于某光电跟踪系统。基于模型辨识设计的高精度控制器设计方法简单、实用、无附加成本, 提高了系统跟踪精度, 具有较好的使用效果。

**关键词:**全数字化模型辨识; 光电跟踪系统; DSP控制器; 准速度/加速度补偿; 跟踪精度

中图分类号: TN820.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-04-0073-04

## Design of High Accuracy Tracking System Based on Full Digital Model Identification

CAI Mei-hua, JIA Qi

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** In engineering application, the control strategy based on the controlled object mathematical model is adopted to design the controller of electro-optical tracking systems. If the model identification is accurate and how to develop controller design are become system difficulty. A data signal processor (DSP) controller is used to perform full digital transfer function test to the electro-optical tracking system, process test data on-line to get the strategy mathematical model. The desired system parameters are received by DSP controller to calculate the corrected parameters automatically and finish the design of the controller framework. According to features of the tracking target, combined with the characteristics of tracking errors and engineering experiences, the quasi-speed and accelerated speed compensation algorithms are proposed to optimize the controller, which is has already been used in a certain electro-optical tracking system successfully. The design method of high accuracy controller based on model identification design has the characteristics of simple, practical and without additional cost, which improves system tracking accuracy and has better operation effect.

**Key words:** fully digital model identification; electro-optical tracking system; DSP controller; quasi-speed/accelerated speed compensation; tracking accuracy

对于光电跟踪伺服系统来说, 基于经典控制理论的对数频率综合法是最主要和成熟的控制方法<sup>[1]</sup>, 跟踪精度与响应速度是跟踪技术的关键, 影响跟踪精度的误差源主要是动态滞后误差, 它与误差系数的关系, 实质上是与传递函数或频率特性的关

系, 因此对系统进行准确的模型辨识, 选择合理可行的控制器, 对提高控制精度和稳定性有着重要的意义。工程上一般使用阶跃响应的方法测试。该测试方法简单, 但是只能测得系统机械时间常数和电气时间常数, 传统测量系统传递函数的方法是使

收稿日期: 2016-08-03

作者简介: 蔡美华(1985-), 女, 湖南益阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为光电跟踪系统设计与伺服控制; 贾琦(1988-), 男, 辽宁铁岭人, 硕士, 工程师, 研究方向为光电跟踪系统设计与伺服控制。

用频率分析仪,系统频率特性完整,增加了测试成本<sup>[2]</sup>。提出一种基于全数字化模型辨识的高精度跟踪系统设计方法,不累加辅助设备,无需 Matlab 等辅助软件,在线完成模型辨识及控制器设计,快速可靠,且满足快速大惯量跟踪系统的精度需求。

## 1 设计原理

对于一个跟踪系统的技术要求往往是多方面的,但其中系统的稳态和动态品质指标均与其开环对数频率特性有关,考虑到实际系统的机械谐振频率、电机功率限制、噪声频谱等限制条件,实际系统的设计,必须围绕带宽来进行,这正是技术人员开展设计的依据。文中根据精度要求得到开环增益,通过采用 DSP 控制器直接扫频获得系统实际的开环剪切频率和相角裕度,与根据工程经验估算的期望的开环剪切频率和相角裕度数值进行比较,得到校正的超前滞后函数的参数值,最后对设计好的系统进行带宽和跟踪效果验证,确定是否满足期望的设计要求。同时提出准速度/加速度补偿算法,优化控制器,提高了系统跟踪精度,具有较好的使用效果。

## 2 设计过程

研究对象为某大惯量光电跟踪系统,主要包括二维转台、红外探测处理单元及供电电源等,二维转台由转台框架、测角光栅、电机、以 DSP 控制器为核心的控制电路及驱动电路等组成,主体设备构成如图 1 所示。

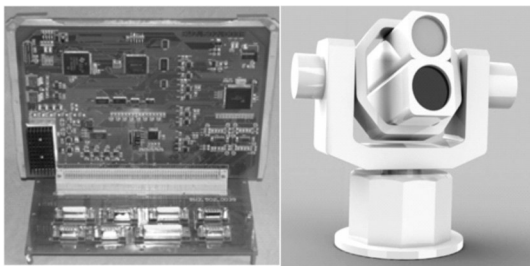


图1 主体设备构成图

系统采用了计算机控制下的脉冲调宽(PWM)-直流力矩电机直接驱动系统框架的伺服体制。由高精度光栅码盘和相应的数字变换装置构成数

字式角位置伺服回路。DSP 控制器是控制的核心,可快速计算系统的控制规律,由 D/A 输出控制电机,实现系统的实时控制,保证系统的性能。数字控制系统原理结构形式如图 2 所示。

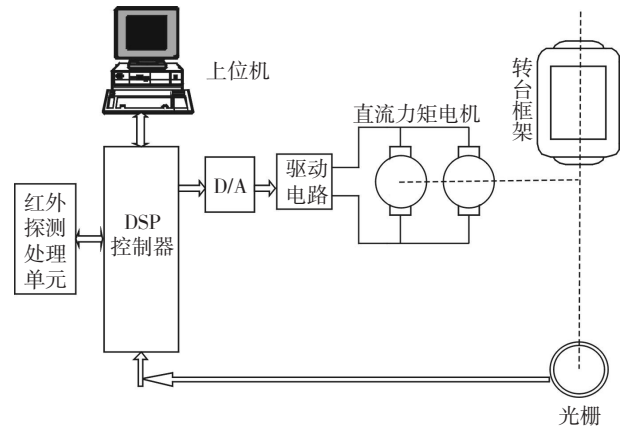


图2 控制系统原理结构图

该光电跟踪系统主要设计要求:最大速度为  $10^\circ/\text{s}$ ,最大加速度为  $5^\circ/\text{s}^2$ ,跟踪精度优于  $25''$ 。采用双闭环方式进行数字控制,控制框图如图 3 所示。

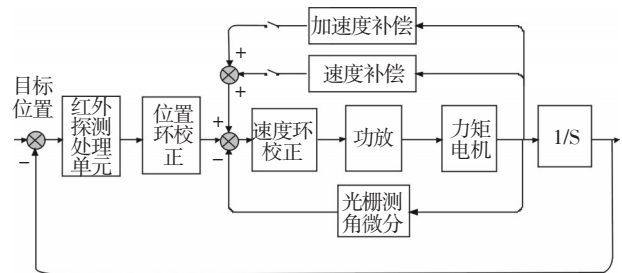


图3 系统控制框图

针对如上设计要求利用如下公式可以计算出跟踪系统的输入信号  $A \sin \omega t$  以及在此信号频率  $\omega$  处系统的开环放大倍数  $K$ 。其中,  $A = \frac{v^2}{a} = 20^\circ$ ;  $\omega = \frac{a}{v} = 0.5 \text{ rad/s}$ ;  $K = \frac{A}{e} = 2880$ ,  $e$  为跟踪精度。

根据经验,系统位置环剪切频率需要设计到 30~50 倍,考虑到红外处理单元存在的一到两帧的延迟时间,系统将位置环剪切频率设计为  $\omega_{c1} = 3 \text{ Hz}$ 。内环带宽为外环带宽的 5~10 倍,所以速度环剪切频率设计  $\omega_{c2} = 20 \text{ Hz}$ 。

### (1) 进行速度环的设计

文中系统速度环采用光栅测角信号数字微分进行速度反馈。在设计时需要测得速度环被控对象在期望剪切频率处的幅频特性。对 D/A 输出频率

为 20 Hz 的正弦信号,测得  $T_s$  内光栅离散输出信号,对光栅信号做如下处理得到幅值比  $\bar{A}$  和相角差  $\Delta\varphi$ ,有下式

$$\bar{A} = \frac{\sqrt{(2T_s \sum_{k=1}^N x(k) \sin 2k\pi\omega_{c2} \cdot T_s)^2 + (2T_s \sum_{k=1}^N x(k) \cos 2k\pi\omega_{c2} \cdot T_s)^2}}{T}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2T_s \sum_{k=1}^N x(k) \sin 2k\pi\omega_{c2} \cdot T_s}{2T_s \sum_{k=1}^N x(k) \cos 2k\pi\omega_{c2} \cdot T_s} \quad (1)$$

式中,  $T_s$  为系统采样频率。

由于机电伺服系统速度环被控对象中没有积分环节,一般不需要考虑稳定性问题。加入纯比例环节  $1/\bar{A}$  使选取的剪切频率处的幅值比为 1。加入适当的迟后环节提高速度环低频增益,从而提高系统刚度以及对干扰的抑制能力。

(2) 进行位置环的设计

对于光电跟踪系统来说,红外探测处理单元的脱靶量信息为位置反馈量,红外探测处理单元的图像处理复杂,存在一到两帧的时间延迟,在设计时需要着重考虑。由于红外探测处理单元的视场有限,即测量角度值有限,扫频比较复杂,所以采用光栅传感器进行仿真处理来作为位置环设计的依据。首先降低光栅传感器输出信号的利用率,即降低采样频率;然后根据实际情况人为加入延迟环节。需要测得位置环被控对象速度闭环在期望剪切频率处的幅频特性。首先利用超前环节将此剪切频率点处的相角裕度提到  $45^\circ \sim 60^\circ$ ; 然后加入纯比例环节使选取的剪切频率处的幅值比为 1; 最后加入适当的迟后环节提高速度环低频增益,从而达到指标要求。纯比例环节、超前环节和迟后环节的作用如图 4 所示。

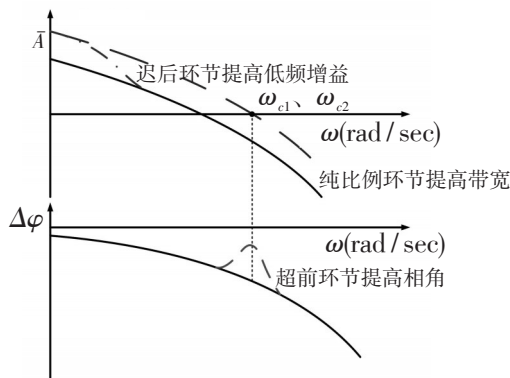


图 4 纯比例环节、超前环节和迟后环节的作用

(3) 控制器优化设计

提出一种准速度/加速度补偿算法来进行控制器优化设计,达到减小在跟踪目标为高速目标特征下的速度/加速度滞后误差,抑制静摩擦扰动对系统的影响,提高系统跟踪精度的目的。准速度/加速度补偿是在速度/加速度补偿算法的基础上进行优化,利用具备一定跟踪精度的转台速度和加速度即可近似为跟踪目标的运动特性并经过处理后反馈到主通道进行补偿的原理,通过判断跟踪精度来决定是否增加补偿算法的方式完成控制器的设计工作。同时通过变参控制的不完全补偿方式来进行加速度补偿,提高跟踪精度的同时,保证了系统的稳定性。

通过多次设计和重复验证后,得到该系统的控制图如图 5 所示。

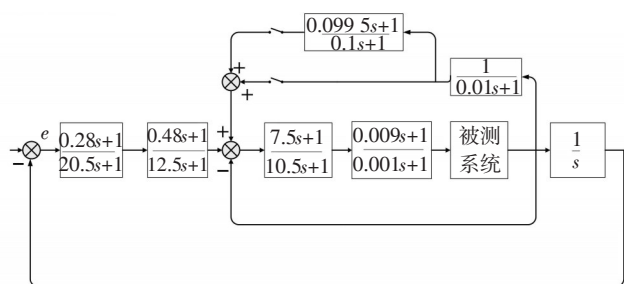


图 5 系统控制图

3 验证结果

在满足最大速度  $10^\circ/s$ , 最大加速度  $5^\circ/s^2$  的要求下,利用光学靶标模拟目标运动进行跟踪精度验证,测试过程如图 6 所示。

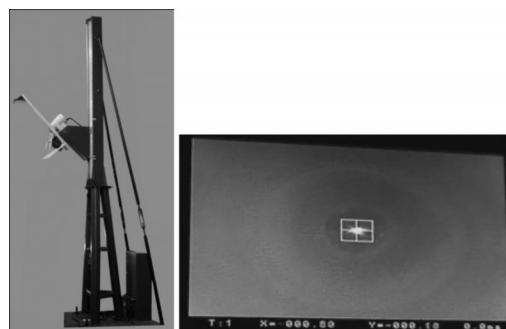


图 6 跟踪精度测试过程

通过软件实时采集测试结果数据并绘制相应

曲线如图7、图8所示。其中均方根显示区域:

均方根 Y: 图像显示周期内的方位脱靶量数据的均方根值, 单位为 $(0.001^\circ)$ ;

均方根 Z: 图像显示周期内的俯仰脱靶量数据的均方根值, 单位为 $(0.001^\circ)$ 。

图像显示区域:

绿线: 方位误差曲线 $(0.001^\circ)$ ;

紫线: 俯仰误差曲线 $(0.001^\circ)$ ;

红线: 速度曲线 $(^\circ/s)$ ;

其中, 横轴为采样点,  $0.1s/\text{采样点}$ 。

图6为未进行控制器优化的设计结果, 计算得到跟踪精度均方根值为:  $\sqrt{4.982^2 + 2.752^2} \times 3.6 (") = 20.5 (")$ 。图7为增加了准速度/加速度补充的设计结果。

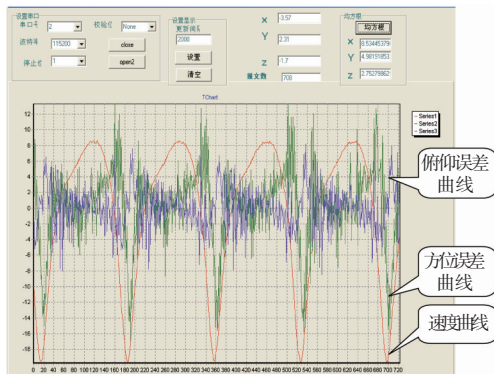


图7 未优化控制器的设计结果

计算得到跟踪精度均方根值为:  $\sqrt{3.218^2 + 1.787^2} \times 3.6 (") = 13.25 (")$ 。图8为优化控制器的设计结果。

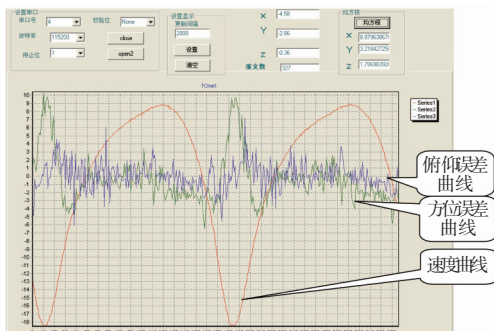


图8 优化控制器的设计结果

对比跟踪精度均方根值可看出, 经过优化后的控制系统精度明显提高, 同时对速度和加速度误差进行了一定程度上的补偿。

## 4 结 论

基于模型辨识设计的高精度控制器设计方法简单、实用、无附加成本, 充分发挥了数字系统的优点, 并具有很强的推广性。试验结果表明, 该方法降低了光电跟踪系统调试难度, 提高了调试效率, 并达到了高精度跟踪精度。同时通过采用优化的控制器设计, 改进补偿算法, 保证系统稳定性的同时, 提高了跟踪精度, 在工程上具有广泛的应用价值。

## 参考文献

- [1] 陈洪立. 伺服系统开环传递函数增益的精确测量[J]. 研究与设计, 2008, 31(9): 47-49, 71.
- [2] 王帅. 光电跟踪伺服系统的频率特性测试与模型辨识[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 78-84.
- [3] 胡浩军, 马佳光, 王强, 等. 快速控制反射镜系统中的传递函数辨识[J]. 光电工程, 2005, 32(7): 1-3.
- [4] 吴俊清. 相位差的数字化测量研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 99-104.
- [5] 李庆申. 基于TMS320F2812的运动控制系统应用[J]. 电子测量技术, 2007, 30(9): 87-89.
- [6] 秦继荣. 现代直流伺服控制技术及其系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 王毅, 魏忠和. 补偿伺服系统速度误差和加速度误差的方法[J]. 光学精密机械, 1973: 13-17.
- [8] 李文军. 复合轴光电跟踪系统控制策略的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [9] 杨辉, 吴钦章, 范永坤, 等. 高精度位置随动系统的误差源分析[J]. 光电工程, 2008, 35(8): 5-9.
- [10] 郭光荣, 薛斌. 速度/加速度误差补偿对光电跟踪系统稳定性影响分析[J]. 自动测量与控制, 2007, 26(4): 70-73.