

文章编号: 1003-501X(2011)08-0047-07

光电快速跟踪系统计算机控制策略

李 淼^{1,2}, 高慧斌¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了进一步提高光电快速跟踪系统的性能, 需要根据系统控制精度的指标对被控对象提出要求, 以指导机械加工, 即作为被控对象的电机和反射镜的传递函数的结构已知但参数未知。针对此光电快速跟踪系统的水平方向高精度快速跟踪测量, 本文建立了系统模型, 提出了触发引导, 目标的快速捕获, 复合控制三个控制步骤和策略, 通过二分法整定了系统参数并确定了对机械结构的参数要求和负载的谐振频率要求, 以满足系统的最大跟踪误差。实验结果表明: 本文控制策略可使最大跟踪误差小于 0.086° , 调节时间小于 0.04 s , 满足了快速跟踪测量系统快速性、高精度的要求, 有效地保证了控制的可实现性。

关键词: 控制模型; 控制策略; 二分法; 复合控制; 数字化

中图分类号: TP273.2

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.08.008

Computer Control Strategy for O-E High Speed Tracking System

LI Miao^{1,2}, GAO Hui-bin¹

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: To improve the tracking performance of the O-E high speed tracking system, it is necessary to put forward the requirement of mechanical properties of the controlled plant according to system's control accuracy index, which can be used to do mechanical working to make sure that the design can be realized. Specifically, that is to say the structure of the motor and reflection mirror's transfer function is known, but the parameters keep unknown. Aiming at the request of horizontal high speed and accuracy measurement of the O-E high speed tracking system, first, the system's mathematic model has been established. Second, some strategies such as trigger guiding, two closed loop control as well as compound control have been presented and applied into the system. With bisection method, the parameters of the motor and reflect mirror have been adjusted. Third, the requirement of the mechanic structure parameter as well as the load resonance frequency have been confirmed to make sure the system can meet the tracking accuracy. Experimental results indicate that the maximum tracking error can be limited to less than 0.086° and the regulator time can be 0.04 s which manifests that the design can satisfy the system requirements of swiftness and high accuracy, and the design also ensures the realization of the control.

Key words: control model; control strategy; bisection method; compound control; digitalization

0 引 言

光电跟踪测量设备是用于运动目标跟踪测量的重要设备, 主要用来跟踪目标运动, 获取运动轨迹数据,

收稿日期: 2011-03-31; 收到修改稿日期: 2011-06-07

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2008AA 0047)

作者简介: 李淼(1983-), 女(汉族), 吉林长春人。博士研究生, 主要研究工作是精密跟踪与伺服控制。E-mail: limiao1983331@yahoo.com.cn.

观察目标的运动状态,完成实时的观测及跟踪任务^[1-3]。这类设备都要求系统具有较高的跟踪精度,较小的跟踪误差,快速的捕获能力,以及良好的实时性。目前的光电经纬仪就是这类设备的一种,已经能够达到上述要求,较好地完成任务^[4]。但是,这种设备大多体积庞大,重量较重,随着对跟踪设备小型化,轻量化,专业化要求的提出,研究设计既满足跟踪精度需求,又具有机动性的小型快速跟踪设备已经受到广泛重视。

近年,自动控制技术在国内外发展很快,已广泛应用于跟踪测量、航空遥感测量、空间姿态控制等诸多领域^[5-7]。本文针对快速跟踪系统跟踪测量快速机动目标时目标速度快,布站距离近,反射镜运动速度、加速度大,跟踪精度高的特殊情况,在建立的数学模型基础上,认真分析其运动规律,制订了切实可行的控制策略(包括触发引导,目标的快速捕获,复合控制),确定了系统参数,有效地保证了跟踪精度,解决了快速反射镜控制机理和控制方法,实现了对快速目标的高精度跟踪。

1 系统的构成及工作原理

1.1 快速跟踪系统的构成

图1为快速跟踪系统的工作原理图。它主要由目标速度测量子系统,高速摄像机子系统、可旋转反射镜子系统、伺服控制子系统、以及控制计算机系统等组成。

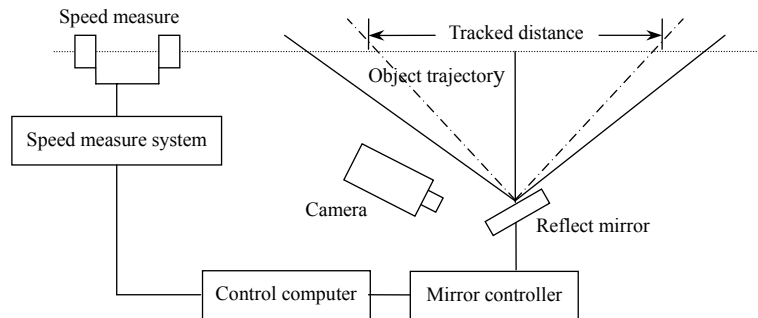


图1 快速跟踪系统原理图

Fig.1 Block diagram of fast tracking system

1.2 快速跟踪系统的工作原理

该系统的基本工作原理为:高速摄像机前方放置一面可旋转的反射镜,由伺服控制系统控制反射镜,当快速目标经过速度测定区域时,由目标速度测量系统测得目标的速度,并触发控制计算机启动反射镜控制系统开始工作,旋转镜面,控制反射镜在目标通过特定视场时跟踪上目标,通过镜面反射的光学原理^[8],将目标的像成像于高速摄像机镜头,高速摄像机记录下目标每一时刻的位置,形成连续的目标运动影像,以供观测和事后分析测量。

2 快速跟踪系统控制策略

2.1 目标与反射镜的数学模型建立

由工作原理可以看出,反射镜控制部分在整个系统中起着关键作用,决定着最终的跟踪效果。为了保证跟踪效果,完成跟踪任务,首先需要研究目标与反射镜转角的相对运动关系,建立起它们的数学模型。由图1的原理示意图可知,建立目标运动与反射镜转角的数学模型如下:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left[\frac{v(t)t}{H}\right] \quad (1)$$

$$\omega = \dot{\theta} = \frac{1}{2} \cos^2\left[\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{v(t)t}{H}\right)\right] \frac{1}{H} [\dot{v}(t)t + v(t)] \quad (2)$$

其中: θ 为反射镜的旋转角位置, ω 为反射镜的旋转角速度, $v(t)$ 为目标运动的速度, H 为反射镜距离目标轨迹中心的距离。目标的速度 $v(t)$ 是由速度测量系统测得的,反射镜距离目标的中心距离 H 是已知的,

反射镜旋转的角位置 θ 是控制系统的被控量, 控制的目标就是使反射镜的位置偏差量 $\Delta\theta$ 最小。这样, 对目标的跟踪问题就转化成为控制反射镜按 θ 角位置旋转的随动控制问题。实际目标做匀速直线运动, 速度为 2 000 m/s, 根据布站要求, 中心距离为 50 m, 目标的初始位置与中心线夹角 -45.84° , 规定中心线处为零位, 顺时针为正。经计算分析可以得到, 反射镜在运动到中心线位置时的速度最大, 瞬时速度可达 20 rad/s。由反射镜的初始位置角度和中心距离可以算出, 跟踪的轨道长度仅为 102.96 m, 由此可以算出目标通过反射镜反射视场的时间仅为 0.051 5 s, 要求反射镜在这个时间内完成捕获, 跟踪上目标。对目标的最大跟踪误差要求控制在 0.5° 以内。这就需要在目标进入跟踪轨道前, 反射镜已经运动起来, 目标一进入跟踪轨道, 反射镜就开始保精度稳定跟踪目标。

2.2 控制策略

通过上述分析可知, 由于目标运动速度快, 布站距离近, 因而要求反射镜运动速度, 加速度很大, 并且调节时间还要短, 跟踪误差尽量小, 因此, 需要采用高效的控制策略来完成整个任务。

为了满足上述的控制需求, 采用以下三个控制策略:

2.2.1 触发引导

由工作原理和对数学模型的分析可知, 反射镜的启动需要一个触发信号, 而反射镜的旋转需要一个引导信号, 这个引导信号就是由目标速度测量系统得到目标速度, 以此计算出反射镜旋转角位置 θ 。而反射镜启动的触发信号是由目标速度测量系统检测到目标速度后, 触发主控计算机, 由主控计算机给反射镜伺服系统发出启动信号, 并启动反射镜, 旋转镜面, 跟踪目标, 保证目标与反射镜的起始时间同步, 运动速度相匹配, 保证稳定跟踪。

2.2.2 目标的快速捕获

由对目标运动的分析可知, 系统的轨道长度短, 因此要控制反射镜在短时间内达到一定速度, 跟踪上目标, 使目标进入摄像机视场特定范围。这就要求控制过程的调节时间要短, 满足快速性要求; 并且超调量要小, 保证目标不逃出摄像机视场。因此, 采用双模控制的方案, 在目标没进入测量轨道之前采用比例校正, 保证系统高带宽, 快速捕获目标, 在进入测量轨道后, 采用双闭环控制, 保证稳定跟踪。

对于速度回路, 采用频率特性设计法, 速度回路是 0 型系统, 采用双惯性形式, 速度调节器

$$G_{vc}(s) = \frac{K_{vc}(T_{vc4}s + 1)(T_{vc3}s + 1)}{(T_{vc1}s + 1)(T_{vc2}s + 1)} \quad (3)$$

位置回路采用滞后超前的校正形式:

$$G_{pc}(s) = K_{pc} \frac{(T_{pc2}s + 1)}{(T_{pc1}s + 1)} \quad (4)$$

其中: T_{vc1} , T_{vc2} , T_{vc3} , T_{vc4} 是速度回路校正参数; T_{pc1} , T_{pc2} 是位置回路的校正参数。

传统的控制器设计方法是已知被控对象的特性来进行设计^[9-10]。然而在本文中, 电机与反射镜的传递函数是未知的, 即被控对象的特性未知。需要根据控制精度对被控对象提出要求, 加以限制, 指导机械加工, 因此被控对象的特性也需要设计。根据最大跟踪误差在 0.5° 以内的指标要求, 假定被控对象特性为典型二阶系统, 传递函数为

$$G_p(s) = \frac{K_p}{(T_{p1}s + 1)(T_{p2}s + 1)} \quad (5)$$

采用二分法编制程序, 对控制器参数 K_{vc} , T_{vc1} , T_{vc2} , T_{vc3} , T_{vc4} , K_{pc} , T_{pc1} , T_{pc2} 以及被控对象参数 K_p , T_{p1} , T_{p2} 进行联合整定与优化^[11], 整定合适的参数, 保证系统的高带宽, 使双闭环后的系统具有良好的快速性, 稳态特性。

2.2.3 复合控制

由 2.1 节的分析可知, 反射镜在运动过程中的瞬时速度, 加速度很大, 布站距离又很近, 要在这种情况下使系统在短时间内完成高精度的捕获跟踪, 双闭环控制的跟踪能力有限, 因此, 必须采用更加高效实

用的控制策略。复合控制作为一种高效易行的控制方式,能够提高系统型别,减小系统的无差度,显著提高系统的跟踪精度。并且,通过前馈,加入了目标的速度信息,可以很好地适应目标的运动变化,对速度,加速度变化规律复杂的目标,跟踪效果较好。因此,本文采用复合控制的策略进行控制。

复合控制的原理图如图2所示,在无前馈时,系统的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)/s}{1 + G_1(s)G_2(s)/s} \quad (6)$$

加前馈后的闭环传递函数为

$$\Phi_d(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{[G_1(s) + G_f(s)]G_2(s)/s}{1 + G_1(s)G_2(s)/s} \quad (7)$$

其中: $G_1(s) = G_{pc}(s)$, $G_2(s) = G_{vc}(s)G_p(s)$, $G_f(s)$ 是前馈传递函数。

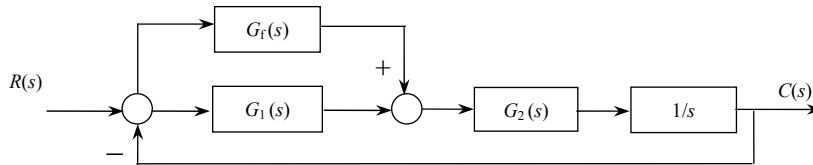


图2 复合控制原理图

Fig.2 Block diagram of compound control

3 结果与分析

经过联合整定,得到被控对象参数为 $K_p = 0.49$, $T_{p1} = 0.05$, $T_{p2} = 0.0025$ 。

速度调节器的参数为 $K_{vc} = 2000$, $T_{vc1} = 0.32$, $T_{vc2} = 0.0001$, $T_{vc3} = 0.02$, $T_{vc4} = 0.0025$ 。

位置调节器的参数为 $K_{pc} = 200$, $T_{pc1} = 0.005$, $T_{pc2} = 0.01$ 。

电机加反射镜的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{0.49}{(0.05s + 1)(0.0025s + 1)} \quad (8)$$

速度调节器的传递函数为

$$G_{vc}(s) = \frac{2000(0.02s + 1)(0.0025s + 1)}{(0.32s + 1)(0.0001s + 1)} \quad (9)$$

位置调节器的传递函数为

$$G_{pc} = \frac{200(0.01s + 1)}{0.005s + 1} \quad (10)$$

系统的阶跃响应指标与频域响应指标如表1,表2所示。

表1 单闭环与双闭环控制的阶跃响应指标

Table 1 Result of step response index based on two closed PID controllers

	One closed loop	Two closed loop
$\sigma/\%$	0.0946	1.8874e-12
t_p/s	0.05	0.75
t_r/s	0.04	0.0403
t_s/s	0.04	0.04
Ess/rad	0.1019	1.8652e-12

表2 双闭环控制的频域响应指标

Table 2 Result of frequency response index based on two closed PID controllers

	One closed loop	Two closed loop
$\gamma/(\circ)$	81.7977	86.9319
$\omega_c/(\text{rad/s})$	1216.9	358.86

由表1,表2和图3可知,系统具有良好的稳定性,快速性,并且超调量小。由速度环开环剪切频率可知,被控对象的机械谐振频率必须大于1216.9 rad/sec,即200 Hz,工程上通常选取其3到5倍以上,以保证被控对象的机械谐振频率远离系统的剪切频率,避免发生谐振,保证控制的效果。

根据目标与反射镜旋转角度的数学模型, 在 MATLAB Simulink^[12]中建立反射镜运动模块如图 4 所示, 得到反射镜运动的位置和速度如图 5, 图 6 所示。采用双闭环控制算法, 得到系统的跟踪误差如图 7, 图 8 所示。

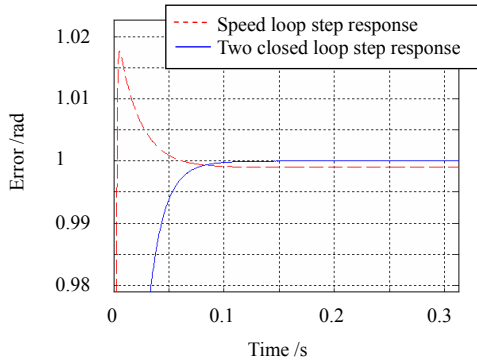


图 3 系统的阶跃响应图

Fig.3 Step response of the whole system

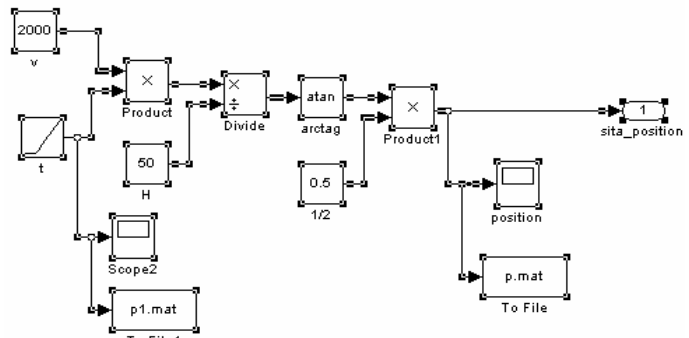


图 4 反射镜运动模块

Fig.4 Mirror moving model

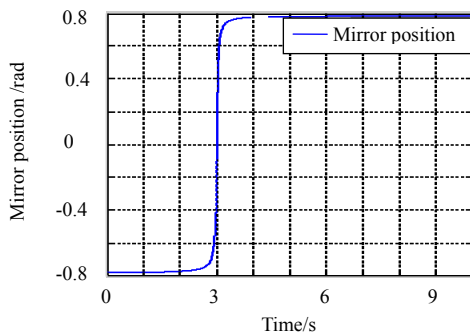


图 5 反射镜位置图

Fig.5 Position response of the mirror

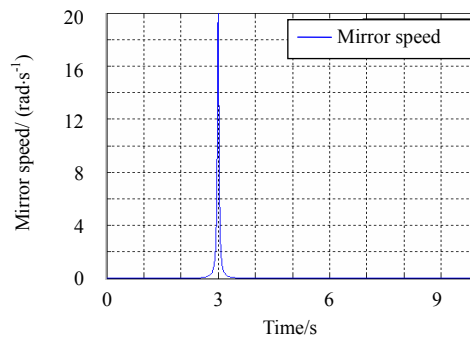


图 6 反射镜速度图

Fig.6 Speed response of the mirror

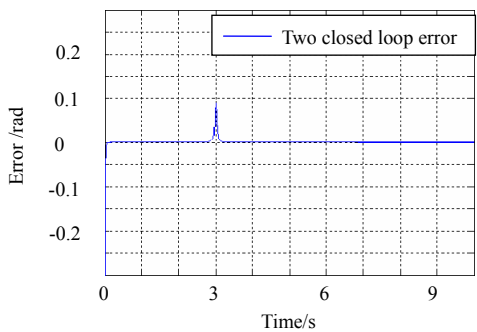


图 7 系统双闭环误差图

Fig.7 Error figure based on two closed loop method

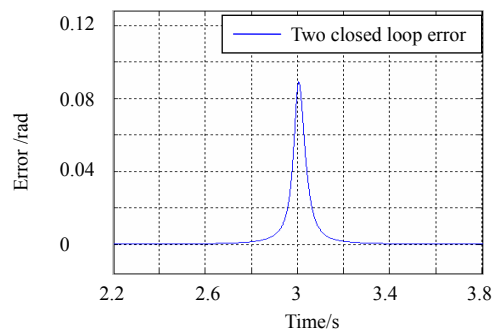


图 8 系统双闭环误差局部图

Fig.8 Specific error figure based on two closed loop method

由图 7, 图 8 可知, 系统的最大跟踪误差为 0.1 rad, 即 5.73°, 不满足低于 0.5° 的指标要求。采用复合控制的方法, 将速度信号作为前馈加入系统。前馈传递函数 $G_f(s) = s$, 前馈系数 $K_f = 0.95$, 得到图 9, 图 10。可以看出, 通过速度前馈, 系统最大跟踪误差降至 0.0015 rad, 即 0.086°。由于实际中还会有来自机械干扰, 传感器响应时间延迟, 滞后等因素带来的误差, 根据工程经验, 位置和速度测量可用 20 位编码器, 分辨率 1.23"; 电机选用力矩电机, 根据负载状况选择合适的力矩, 满足速度、加速度要求; 微处理器可选用 16 位 DSP, 也可用工业控制计算机, 这些误差大约在 0.2° 左右, 因而系统最终误差能够保证在 0.3° 左右, 满足 0.5° 以内的指标要求。

采用双线性变换将系统离散化^[12], 采样频率分别采用 100 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1 000 Hz 编制程序进

行对比实验，控制方式仍采用复合控制，得到的离散化后系统的跟踪误差如图 11、图 12、图 13、图 14 所示。

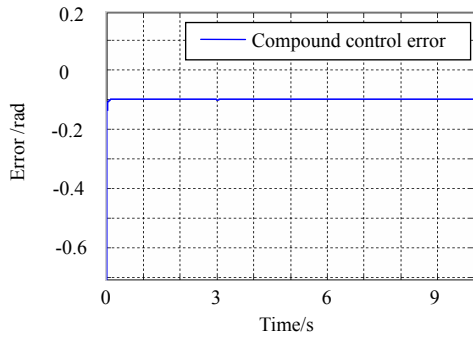


图 9 系统复合控制误差图

Fig.9 Error figure based on speed feed forward method

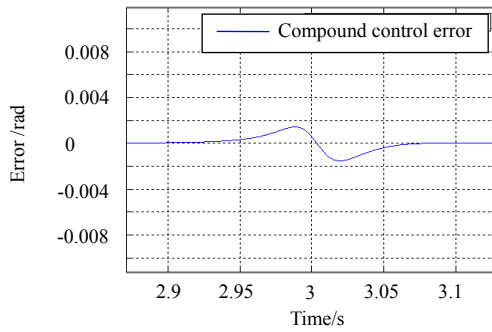


图 10 系统复合控制误差局部图

Fig.10 Specific error figure based on speed feed forward method

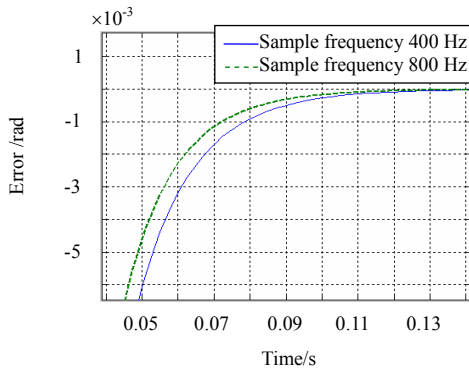


图 11 采样频率 400 Hz 与 800 Hz 进行对比图起始段

Fig.11 The sample time comparison between 400 Hz and 800 Hz

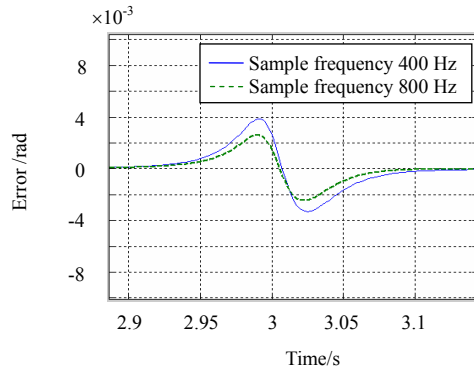


图 12 采样频率 400 Hz 与 800 Hz 进行对比图过零处

Fig.12 The sample time comparison

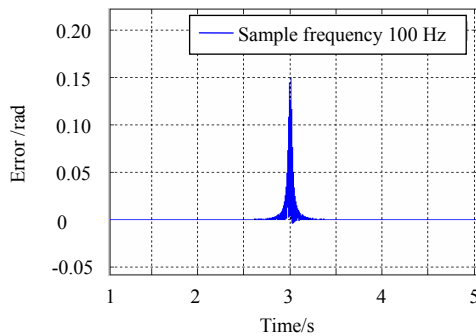


图 13 采样频率 100 Hz 过零处

Fig.13 The sample time 100 Hz

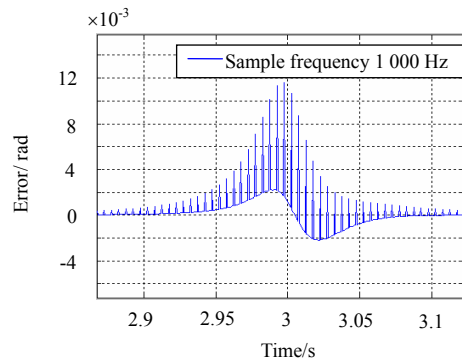


图 14 采样频率 1 000 Hz 过零处

Fig.14 The sample time 1 000 Hz

从图 11，图 12 可知，400 Hz 和 800 Hz 的效果较好，通过数字化，精度损失了 0.000 7 rad，即 0.04°。然而这对整个系统的稳定性和最终跟踪精度影响不大，因为系统具有 86.9°的相位裕度，可以保证系统的稳定。由图 13，图 14 可知当采样频率取 100 Hz 和 1 000 Hz 时，跟踪误差出现了毛刺，不合适。通过仿真试验得出，采样频率应大于 400 Hz，以保证良好的控制效果。

4 结 论

本文针对水平方向的单轴高精度快速反射镜跟踪测量问题，分析了运动机理，建立了数学模型，制定了相应的控制策略与控制方法，完成了控制参数的整定，分析了离散化采样频率对系统的影响。同时，根据控制精度要求对机械加工提出了具体指标要求，有效地保证了系统的可实现性。设计结果的仿真分析表

明: 系统最大跟踪误差 0.086° , 调节时间 0.04 s , 由于实际中还会有来自机械、干扰、传感器处理速度等因素带来的误差, 由工程经验可知, 这些误差大约在 0.2° 左右, 因而实际的跟踪误差可以保证在 0.3° 左右。能够保证系统满足跟踪误差在 0.5° 以内, 满足指标要求。同时, 电机加负载的谐振频率需大于 200 Hz , 采样频率应大于 400 Hz , 以有效地避免出现谐振, 达到控制精度要求。本文进行的快速跟踪系统计算机控制策略研究, 将对快速跟踪系统设计和实现起到重要的指导和借鉴作用, 同时, 还可以为其它的计算机控制问题提供参考。

参考文献:

- [1] 王建立, 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, **11**(1): 78-84.
WANG Jian-li, WANG Shuai. Frequency Characteristic Test and Model Identification for O-E Tracking Servo System [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2009, **11**(1): 78-84.
- [2] XING W, LIANG Y B. The Design and Control of Fine Tracking Loop of ATP System for Free Space Laser Communication [C]//2nd IEEE International Conference on Information Engineering and Computer Science-Proceedings, Wuhan, China, December 25-26, 2010: 5570-5574.
- [3] YAN M T, SHIU Y J. Theory and Application of A Combined Feedback-Feed forward Control and Disturbance Observer in Linear Motor Drive Wire-EDM Machines [J]. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** (S0890-6955), 2008, **48**(3): 388-401.
- [4] 王建立, 陈涛. 提高光电经纬仪跟踪快速运动目标能力的一种方法[J]. 光电工程, 2002, **29**(1): 34-37.
WANG Jian-li, CHEN Tao. A Method Improving the Tracking Ability of a Photoelectric Theodolite against the Fast Moving Target [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2002, **29**(1): 34-37.
- [5] 汪大宝, 刘上乾. 高速高机动多速率交互多模快速跟踪算法[J]. 光电工程, 2009, **36**(5): 22-27.
WANG Da-bao, LIU Shang-qian. Realization A Fast Tracking Method for High Speed and High Maneuvering Targets Based on Multi-rate IMM Algorithm [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(5): 22-27.
- [6] 吴琼雁, 王强. 音圈电机驱动的快速控制反射镜高带宽控制[J]. 光电工程, 2004, **31**(8): 15-18.
WU Qiong-yan, WANG Qiang. Wide Bandwidth Control of Fast-Steering Mirror Driven by Voice Coil Motor [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, **31**(8): 15-18.
- [7] 邱晓波, 窦丽华. 光电跟踪系统自抗扰伺服控制器设计[J]. 光学 精密工程, 2010, **18**(1): 220-226.
QIU Xiao-bo, DOU Li-hua. Design of Active Disturbance Rejection Controller for Electro-Optical Tracking Servo System [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2010, **18**(1): 220-226.
- [8] 周虹, 宁禹. 双压电片变形反射镜样镜的设计与研制[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1437-1442.
ZHOU Hong, NING Yu. Design and Fabrication of Prototype for Bimorph Deformable Mirror [J]. **Acta Optica Sinica**, 2009, **29**(6): 1437-1442.
- [9] 邹继斌, 陈霞. 反作用力矩测试装置力矩伺服控制系统设计[J]. 电机与控制学报, 2009, **13**(A01): 173-177.
ZOU Ji-bin, CHEN Xia. Torque Servo System Design of Reaction Torque Measurement Device [J]. **Electric Machines and Control**, 2009, **13**(A01): 173-177.
- [10] 杨波, 王寿荣. 硅微陀螺仪闭环校正控制系统设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2010, **8**(4): 369-373.
YANG Bo, WANG Shou-rong. Design of Closed-Loop Control System of Silicon Micro-machined Gyroscope [J]. **Nano Technology and Precision Engineering**, 2010, **8**(4): 369-373.
- [11] 沈平, 段小刚. 一种解析的模糊 PI 自整定方法[J]. 控制工程, 2010, **17**(2): 179-181.
SHEN Ping, DUAN Xiao-gang. An Analytical Auto-Tuning Method for Fuzzy PI Control [J]. **Control Engineering of China**, 2010, **17**(2): 179-181.
- [12] DEAN K F, JOE H C. **Feedback Control Problems using MATLAB and the Control System Toolbox** [M]. Washington DC, USA: Brooks/Cole Publishing Company, 2001: 69-123.