

名义模型干扰观测器在精跟踪中的应用

曾庆武¹, 艾勇¹, 陈晶¹, 顾建²

(1. 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430079; 2. 中国航天科工集团 第九总体设计部, 武汉 430079)

摘要: 音圈电机在空间光通信的精跟踪系统中是经常用到的执行机构, 通过分析音圈电机的控制结构, 确定了其最优的控制结构为自身位置开环控制结构, 并提出了一种基于名义模型干扰观测器的精跟踪控制方法。通过对 1mrad 光斑扰动的跟踪实验, 证明这种控制方法的跟踪误差标准差在中频段比比例-积分-微分(PID)算法降低了 30%。

关键词: 精跟踪; 音圈电机; 控制结构; 名义模型; 干扰观测器

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)03-0043-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.012

Application of nominal model disturbance observer in fine tracking

ZENG Qingwu¹, AI Yong¹, CHEN Jing¹, GU Jian²

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. The 9th Designing of China Aerospace Science Industry Crop, Wuhan 430079, China)

Abstract: Voice coil motor is the commonly used actuator in fine tracking system of optical space communication, this paper confirms that the optimal control structure of voice coil motor actuator is the selfish opened position loop control structure by analyzing the control structure, and proposes a fine tracking control method based on the nominal model disturbance observer. Though the tracking experiment of 1mrad light disturbance, the standard tracking deviation of this control method is verified to be lowered down 30% in middle-frequency compared to proportional-integral-differential(PID) algorithm.

Key words: fine tracking; voice coil motor; control structure; nominal model; disturbance observer

0 引言

海量传输数据对高带宽的需求和无线电频谱资源的短缺,使得空间光通信这一具有速率高、保密性好和体积功耗小等优点的可互补新型无线通信系统倍受关注,并在卫星、飞机和舰船等平台上多次成功实验^[1,2]。空间光通信的关键技术之一就是激光的瞄准、捕获和跟踪技术,其中精跟踪系统主要负责进一步抑制粗跟踪系统的残余误差,其特点是带宽高、精度要求高。国内学者采用抑制光斑扰动的方法提出了滑模控制、模型参考自适应控制和超前滞后补偿控制等方法^[3-5],对抑制过程中干扰产生的原因也进行了具体分析^[6]。本文确定了精跟踪音圈电机执行机构的最优控制结构为位置开环结构,并在此结构上设计干扰观测

器(Disturbance Observer, DOB)观测精跟踪系统输出端的综合干扰,采用名义模型进行近似。

1 音圈电机的控制结构

1.1 音圈电机的工作原理

音圈电机是基于安培力原理,根据运动形式的不同分为直线式和旋转式两种。在音圈电机内部,永磁磁铁的磁场强度基本保持不变,当给定通电线圈不同的电流强度时,动子线圈在磁场中受洛伦兹力作用而运动,在直线式中洛伦兹力变现为推力,旋转式中是转矩。而在一般精跟踪所用的音圈电机中,一般采用 4 个直线式移动音圈电机构成两个轴上的推挽作用,实现快速反射镜的偏转控制,相应的特征量由直线运动转换为旋转运动中的相关量^[7]。

收稿日期: 2017-10-09。

作者简介: 曾庆武(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为无线光通信方面。

曾庆武, 艾勇, 陈晶, 等: 名义模型干扰观测器在精跟踪中的应用

1.2 基于音圈电机自身位置闭环的精跟踪

采用位置闭环模式时, 音圈电机利用自身的电机位置反馈传感器在电机内部构成一个位置闭环, 以输入的唯一电压对应唯一的转动角度。本文将音圈电机应用于精跟踪光电跟踪系统, 控制结构为 3 闭环 (外环光电跟踪位置环、电机位置环和电机电流环)。其中, 外环光电跟踪位置环为高帧频相机采样反馈回环, 数学模型等效为比例环节与采样-保持环节的串联, 响应相机光斑相对标定中心的位置偏差量; 电机位置控制器一般采用比例-微分 (PD) 控制, 控制律为 $K_{pm} + sK_{dm}$, 以快速响应光电位置环给定的位置指令; 内部电流环响应电机位置环给定的电流指令, 电流环控制器的输出作为功率放大器的输入级, 电流环带宽可以做到非常高, 将其近似设定为 1。简化的基于音圈电机位置闭环的精跟踪控制模型如图 1 所示, $N_f(s)$ 为光斑扰动, K_{2f} 为单位弧度与光斑检测机构角分辨率之比, τ 为相机每帧图像的保持时间, K_{1f} 为音圈电机的转矩常数与音圈电机偏转子的总转动惯量之比, $G_1(s)$ 为相机反馈位置信号的比例-积分-微分 (PID) 控制律。本文中的 s 为复频率。

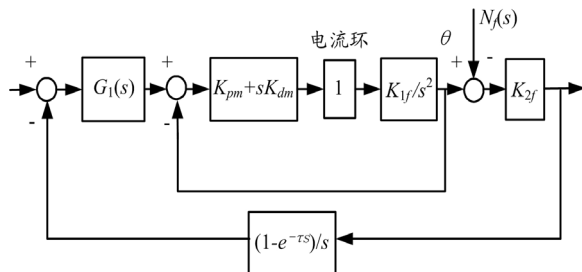


图 1 简化的基于电机位置闭环控制模型

1.3 基于音圈电机自身位置开环的精跟踪

采用电机自身位置开环模式时, 电机自身的位置反馈被断开, 电流环在工作许可范围内可以看作是线性的电流(转矩)转换单元, 以唯一的电压对应确定且唯一的电流, 快速响应外部输入的电压矢量, 其控制结构为双闭环^[8] (光电跟踪位置环和电机电流环)。外环为光电跟踪位置闭环, 内环为电机电流环, 等效为 1。电流环依据相机的负反馈来直接控制线圈电流, 获得最大的转动加速度, 以减少动态调节时间。简化的基于电机位置开环的精跟踪控制模型如图 2 所示。

1.4 音圈电机控制结构的选择

在基于音圈电机位置闭环的精跟踪里, 光电跟踪位置环不能通过电压直接控制电机的电流转矩, 要先输入给电机的位置闭环进行处理, 以输入的唯一电压对应唯一的转动角度。转动角度补偿光斑位置负反馈

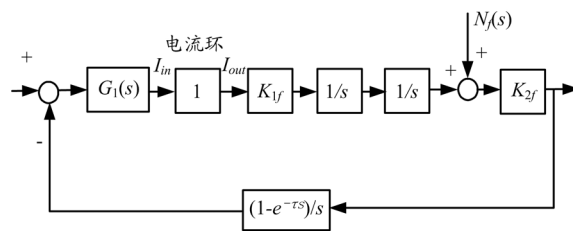


图 2 简化的基于电机位置开环控制模型

探测到一定的像素偏差时, 这个控制方法抽象地来看就是 PID 控制律中的积分控制, $G_1(s)$ 可看作是 K_i/s 。而在基于电机位置开环的精跟踪里, 相机的光电位置环直接由电流环控制器处理, 电机电流环的输出作为功率放大器的输入级, 能够使得偏转镜获得直接的电流驱动加速度控制, 符合精跟踪高动态的要求。本文通过模拟计算来说明, 取下述典型值: $K_{1f}=0.024/(3.1 \times 10^{-6})$, $K_{2f}=1/(18.3 \times 10^{-6})$, $\tau=3.33 \times 10^{-3}$ 秒, 约束系统的开环截止频率为 100Hz, 开环相位裕度大于 45° , 开环幅值裕度大于 10dB。通过简单计算可得: 在电机自身位置闭环的结构下, 约束电机位置环的开环截止频率为 400Hz, 满足稳态约束条件的 $G_1(s)=0.0105/s$, $K_{pm}=605.5$, $K_{dm}=0.231$; 在电机自身位置开环结构下, 满足稳态约束条件的 $G_1(s)=6.6 \times 10^{-4} + 1.05 \times 10^{-6} \cdot s$ 。再由上述得出的值可计算出两种控制结构的截止频率(-3dB 点)分别为 101Hz 和 147Hz。由此可知, 基于电机位置开环的控制结构带宽明显高于基于电机位置闭环的跟踪结构, 本文选择电机位置开环结构。

2 基于名义模型 DOB 的精跟踪控制器

DOB 的基本思想是将外部力矩干扰及模型参数变化造成的实际对象与名义模型输出的差异, 全部等效到控制输入端, 即观测出等效干扰^[9]。在控制量中引入等量的补偿, 实现对干扰的完全抑制, 其基本思想如图 3 所示。

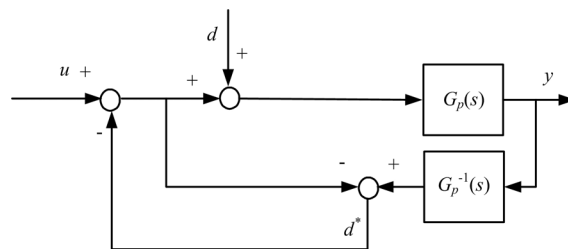


图 3 DOB 的基本思想

图 3 中 $G_p(s)$ 为系统的模型, d 为系统受到的外部力矩干扰和内部模型参数变化等造成的等效干扰综合量, d^* 为等效干扰的估计量, d^* 表示如下:

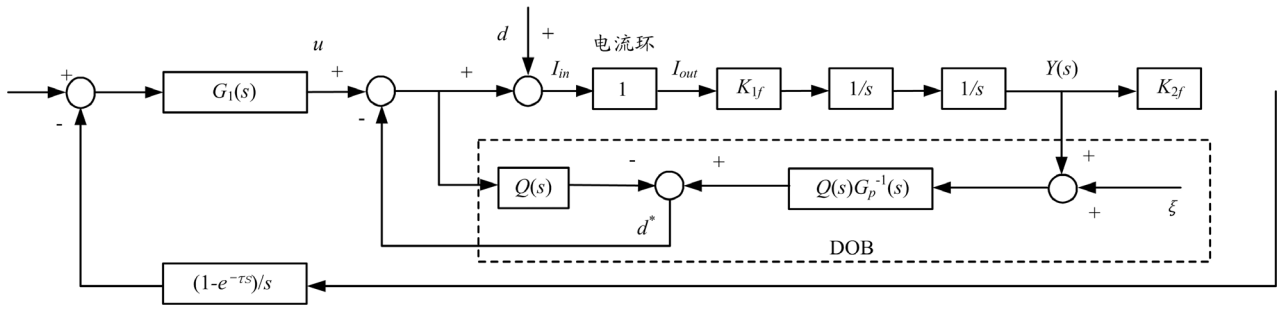


图4 带有DOB的精跟踪控制框图

$$d^* = (u+d)G_p(s)G_p^{-1}(s) - u = d \quad (1)$$

对于实际的物理系统,观测器的实现存在 $G_p(s)$ 的相对阶不为0,其逆物理上不可实现, $G_p(s)$ 的精确数学模型无法得到测量噪声的影响等问题。本文采用串入低通滤波器 $Q(s)$,用名义模型 $G_n(s)$ 的逆 $G_n^{-1}(s)$ 来代替 $G_p^{-1}(s)$,将其应用到基于电机位置开环的精跟踪控制结构上。本文用名义模型代替精跟踪执行机构的精确模型,通过控制输入量和精跟踪音圈电机驱动器引出的位置测量的差异,估计外部力矩干扰、经过D/A输出卡的量化误差量和模型误差造成的综合干扰,将干扰的补偿量加入到PID算法控制量中。DOB的控制模型如图4所示,虚框部分为DOB。

图4中, u 为精跟踪执行机构的电流环前的电压控制量, d 为外部力矩干扰、D/A输出卡的量化误差量和名义模型的误差综合起来的干扰, $Y(s)$ 为精跟踪执行机构的角速度输出,用名义模型 $G_n(s)$ 的逆 $G_n^{-1}(s)$ 来代替 $G_p^{-1}(s)$, ξ 为A/D采集卡本身测量的噪声。

对于带有DOB的精跟踪,其内环的干扰传递函数为:

$$G_{dy}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)[1-Q(s)]}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} \quad (2)$$

内环的测量噪声传递函数为:

$$G_{\xi y}(s) = \frac{G_p(s)Q(s)}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} \quad (3)$$

在低频和不同频域表现时有下式成立:

$$\begin{cases} Q(s)=1, G_{dy}(s)=0, G_{\xi y}(s)=1 \\ Q(s)=0, G_{dy}(s)=G_p(s), G_{\xi y}(s)=0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可见,基于名义模型的DOB可以实现对低频干扰和测量噪声的有效滤除^[10]。如在理想条件下, d^* 能够完全估计 d , 干扰将被完全解耦,系统输

出不受到干扰的影响。低通滤波器的阶数必须大于或等于名义模型的相对阶数, $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 才有可能实现。为方便设计,取 $Q(s)$ 的阶数为1,设计低通滤波器 $Q(s)$ 的带宽为2000Hz。取名义模型 $G_n(s)$ 的相对阶数为1,开环系统通过扫频法得出截止频率在70Hz左右,经过Matlab工具箱对开环系统进行辨识后,考虑取低通滤波器和名义模型的公式如下:

$$\begin{cases} Q(s) = 1/(\tau s + 1), \tau = 2000 \times 2\pi \\ G_n(s) = \frac{-1.3 \times 10^4 s + 3.1 \times 10^7}{s^2 + 2160s + 1.4 \times 10^6} \end{cases} \quad (5)$$

综合实际分析表明:①只有当干扰引起输出发生偏移之后才能被检测出来,也就意味着在干扰比较小时,效果不会很明显;②由于A/D采集卡和相机的数字采样存在一定的量化误差,且精跟踪执行机构的角速度反馈电压信号本身会有噪声和毛刺,影响估计的准确度,降低实验效果。

3 实验验证

为了验证基于名义模型DOB的精跟踪控制器有实际提升效果,本文建立精跟踪测试平台如图5所示。

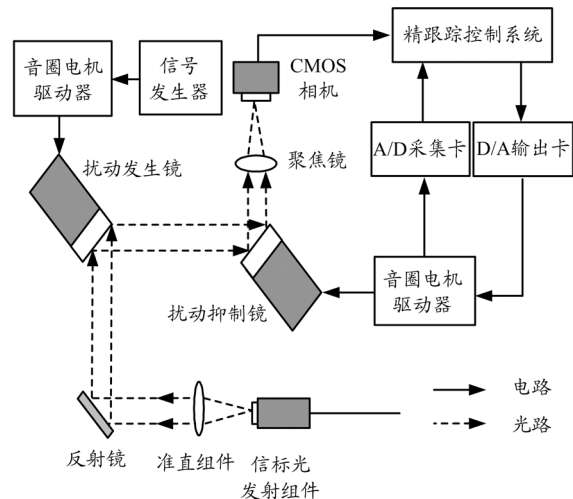


图5 精跟踪验证系统组成框图

曾庆武,艾勇,陈晶,等:名义模型干扰观测器在精跟踪中的应用

示。扰动发生部分由信标 808nm 激光器、扰动发生镜和信号发生器构成。扰动发生镜为 Newport 公司的 FSM-300 音圈电机振镜,线性对应偏转范围 $\pm 26.2\text{mrad}$ 。扰动抑制部分主要由高帧频 CMOS 相机、基于 PC 机的精跟踪控制系统、扰动抑制镜及其驱动器、A/D 采集卡和 D/A 输出卡组成。其中,CMOS 相机采用 IDS 公司的 USB3.0 系列相机,像元大小为 $4.8\mu\text{m}$,开窗大小为 152×152 像素,帧频为 2000 帧/秒,经过光学系统标定后每像素对应扰动的偏转角度为 $9.8\mu\text{rad}$;扰动抑制镜也采用 FSM-300 音圈电机偏转镜;A/D 采集卡使用 NI 公司的 12 位 USB 6008;D/A 输出卡使用阿尔泰科技的 16 位 PCI 8250,输出量程为 0~10V。

精跟踪实验原理如下:信号发生器产生不同频率固定幅值的正弦波作为扰动源(作为音圈电机驱动器的输入控制电压),使信号光产生 1mrad 不同频率的光斑正弦扰动。CMOS 相机监测光斑相对相机标定中心的偏移量,结合 PID 算法给出控制量到 D/A 输出卡,作为扰动抑制镜的音圈电机驱动器的输入,去抑制扰动发生镜产生的光斑扰动;而采用基于名义模型的 DOB 时,CMOS 相机监测光斑相对相机标定中心的偏移量的同时,启用 A/D 采集卡从音圈电机驱动器上采集扰动抑制镜的角度位置反馈,结合控制量去估计外部力矩干扰、D/A 卡的量化误差量和名义模型的误差综合起来的干扰,加入到原本的 PID 算法中后给出新的控制量给 D/A 输出卡。

本文采用基本 PID 位置控制器和 PID 位置控制器加入了 DOB 后的抑制光斑扰动,效果如表 1 所示,以跟踪最大误差、标准差和对标准差扰动抑制比的提升程度为评估标准。

表 1 PID 控制器和 PID+DOB 控制器的跟踪误差标准对比

$f(\text{Hz})$	PID(μrad)		PID+DOB(μrad)		标准差 抑制比提升(%)
	最大误差	标准差	最大误差	标准差	
1	8.82	2.81	7.84	2.68	4.8
5	11.76	4.40	8.82	2.95	33
10	17.64	7.48	12.74	4.84	35
20	24.5	14.27	21.56	9.14	35.94
40	49	29.91	41.16	18.17	39.25
80	107.8	68.15	98	55.07	19.2

从以上实验可以看出:

①在低频段,如 1Hz 这个频率点加入 DOB 的效果

并不明显,扰动抑制比提升仅为 4.8%,原因是低频时 PID 位置控制器效果已经很好,综合干扰对控制系统的影响较小,抑制比难以有很大提升;其次在低频时,内环对 A/D 采集卡的测量噪声比较敏感,需要采取更好的措施减小 A/D 采集卡测量中的低频噪声。

②在中频段(5~40Hz),加入 DOB 使得精跟踪系统的跟踪最大误差、标准差的减少以及扰动抑制比的提升比较明显。

③在稍高的频段如 80Hz 处,相比较于传统的 PID 控制算法,跟踪最大误差和标准差的提升相比中频段都明显减少,标准差的扰动抑制比提升为 19.2%,此处效果降低是因为其精跟踪系统受到系统综合带宽的限制。

4 结束语

本文确立了音圈电机自身位置开环控制结构为精跟踪的最优控制结构,在此基础上应用了基于名义模型 DOB 的精跟踪控制器,从音圈电机位置传感器和电压控制输入量中观测外部力矩干扰、D/A 输出卡的量化误差量和名义模型的误差综合起来的干扰。实验结果表明,应用了此方法的精跟踪系统性能优于传统的基于 PID 控制算法的精跟踪系统,在 1mrad 的光斑扰动时,中频段的扰动抑制比提高了 30%以上,但在低频段和较高频段还有待改善。

参考文献:

- [1] 刘宏展,孙建锋,刘立人.空间激光通信技术发展趋势分析[J].光通信技术,2010,34(8):39-42.
- [2] 孙志斌,黄振,叶蔚然,等.深空、自由空间、非可视散射和 underwater 激光光子通信[J].红外与激光工程,2012,41(9):2424-2431.
- [3] 胡贞,姜会林,佟首峰.滑模控制对激光通信 ATP 系统跟踪性能改善[J].北京理工大学学报,2012,32(5):522-525.
- [4] 张亮,王建宇,贾建军,等.基于 CMOS 的量子通信精跟踪系统设计及检验[J].中国激光,2011,38(2):181-185.
- [5] 佟首峰,姜会林,刘云清,等.自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪伺服带宽优化设计[J].光电工程,2007(9):16-20.
- [6] 苏艳蕊.量子光通信望远镜跟踪控制技术研究[D].北京:中国科学院研究生院(光电技术研究所),2016.
- [7] 李勇,任留阳,张登平,等.旋转式音圈电机电磁阻尼的解析分析与仿真[J].微电机,2016,49(6):24-27.
- [8] 顾健,艾勇,陈晶,等.扰动观测器在空间光通信 PAT 系统中的应用[J].红外与激光工程,2016,45(1):229-235.
- [9] 王雪冰,吴忠.基于干扰观测器的挠性卫星姿态滑模变结构控制[J].空间控制技术与应用,2017,43(2):36-42.
- [10] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].第 4 版.北京:电子工业出版社,2016.