

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.01.020

光电跟踪伺服系统的动态非线性控制方法

马东玺¹, 范大鹏¹, 周欢喜²

(1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;
2. 衡阳北方光电信息技术有限公司, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 为提高伺服系统的跟踪精度和响应速度, 提出一种非线性 PID 控制方法。对比了光电跟踪系统捕获与跟踪响应的特征, 给出快速稳定的非线性控制方法, 并以某光电跟踪系统为例进行实验与分析。结果表明, 该方法能实现从捕获到跟踪过程的平滑、快速过渡, 保证稳定跟踪中的精度, 已得到成功应用。

关键词: 光电跟踪; 捕获跟踪; 非线性控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Dynamic Nonlinear Servo Control for Electro-Optical Tracking System

Ma Dongxi¹, Fan Dapeng¹, Zhou Huanxi²

(1. School of Mechatronics Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Hengyang North Photoelectricity Information Technology Co., Ltd., Hengyang 421001, China)

Abstract: To improve the accuracy and response performance of servo system, put forward a nonlinear PID control scheme. After comparing the performance of acquiring and tracking response, the design method of the controller which fast response and stable is described. Then the method is verified and analyzed in an electro-optical tracking system. The result shows that nonlinear PID control scheme not only increases the speed of closed-loop response, but also improves the settling performance while switching acquisition to tracking modes, and successfully used in the application.

Keywords: electric optical tracking; acquiring and tracking; nonlinear control

0 引言

光电跟踪系统在跟踪目标时, 需具有捕获模式和跟踪模式。捕获模式是指目标进入视场内时, 跟踪器快速识别给出偏差, 伺服系统迅速减小偏差, 进入跟踪的过程。这一过程中, 初始偏差较大, 随着控制器的作用, 偏差快速减小。跟踪模式则是指使光电设备的光轴始终追随目标视线的过程, 跟踪时, 在控制器的作用下偏差保持在较小的范围以内。随着被跟踪目标机动性能的不断提, 对光电跟踪系统的性能也提出了更高的要求。

目前改善瞬态响应的方法有 2DOF 控制^[1]、初值补偿^[2-3]等。2DOF 控制用前馈控制器对超调进行整形。初值补偿时, 在模式切换后积分项开始起作用, 且对初始状态如速度等进行非零补偿。笔者应用非线性 PID 控制方法^[4], 捕获到跟踪中偏差不断减小, 因此, 可以用偏差作为控制器滑动变化的因变量, 实现捕获到跟踪的快速平稳过渡。由于积分项始终连续参与计算发挥作用, 所以不必进行初值补偿, 不会出现抖动^[5]。

1 光电跟踪系统捕获与跟踪响应特性

捕获与跟踪时对系统特性要求有较大的差异。

在捕获模式下, 偏差量较大, 需要快速响应, 故系统带宽要宽, 且此时偏差量较大, 不需要很大的反馈增益。而跟踪模式下, 则要减小反馈带宽, 以减小传感器噪声的影响, 但需要大的低频反馈增益以减少抖动, 满足跟踪精度, 如图 1、图 2。故应用单独的线性控制器时, 在控制器设计中只能做某种折中, 不可能很好地同时适应捕获和跟踪的要求。而直接从捕获控制器切换到跟踪控制器则可能使系统出现较大的超调, 导致目标“丢失”, 需要对切换时的控制器输出或状态初值进行补偿 (IVC)。

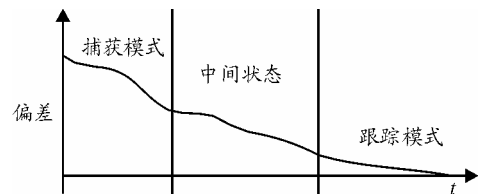


图 1 捕获、跟踪时的误差变化

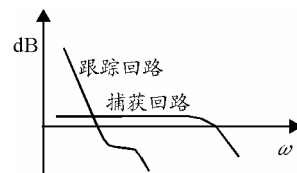


图 2 捕获回路与跟踪回路的响应特性

收稿日期: 2010-08-30; 修回日期: 2010-10-27

基金项目: 国家自然科学基金“光电稳瞄机构精密装配过程动力学性能评价与测量方法研究”(5087257)

作者简介: 马东玺 (1980-), 男, 河北人, 博士生, 从事光电稳瞄跟踪系统研究。

2 快速稳定的非线性控制方法

PID 控制器方便调试, 易于应用, 在伺服系统中应用广泛。在线性 PID 控制器中, 比例控制参数决定了系统的动态性能, 比例控制参数越大响应速度越快, 衰减振荡次数越多, 但不能消除稳态误差; 积分控制参数有助于消除系统的稳态误差, 提高系统的精度, 但太大则会使系统不稳定。微分控制则可以改善动态特性, 减少超调量, 缩短调节时间, 允许加大比例控制。

$$U = K_p \cdot e + K_D \cdot \dot{e} + K_I \cdot \int edt \quad (1)$$

对于光电跟踪系统, 在捕获时, 系统需要较大的带宽, 即动态性能要好, 因此要有较大的比例控制参数 K_p , 以使系统动作灵敏, 响应速度加快。此时, 偏差较大, 积分控制作用可较小。在跟踪时, 系统要提高稳态精度, 且不需要大带宽, 比例控制参数 K_p 可稍小, 而积分控制参数 K_i 要加大。

响应快与精度高是相互矛盾的, 在设计中须权衡折中, 过程复杂。单独的 PID 控制器难以满足光电跟踪系统快速响应、精确跟踪的要求。应用非线性变增益的方式可有效改善性能, 满足系统需求。

非线性 PID 控制器表示如下:

$$U = K_p \cdot f_p(e) \cdot e + K_D \cdot \dot{e} + K_I \cdot f_i(e) \cdot \int edt$$

其中, 微分项不变, 比例项增益系数以线性调整; 积分增益系数以高斯函数调整。

$$f_p(e) = k_p + k_1 |e| \quad (2)$$

$$f_i(e) = k_i \cdot \exp(-k_2 |e|) \quad (3)$$

式中, k_1 、 k_2 为可调参数, 可改变积分变化的形状, 选择取决于式 (1) 中的积分增益 K_p 、 K_I 。

随偏差变化的比例参数和积分参数的变化趋势如图 3。

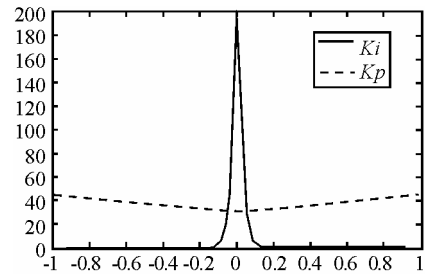


图 3 比例控制参数与积分控制参数变化图

偏差较大时, $f_i(e)$ 很小, 积分项几乎不起作用, 控制主要由 PD 控制项完成, 实现快速响应。随着偏差的减小, $f_i(e)$ 按指数规律增加, 积分项逐渐增强, 以改善稳态性能。即闭环性能由动态的随偏差连续变化的 PID 控制器决定。选择合适的 k_2 和 k_1 , 可以得到 PD 控制器的动态响应特性和 PID 控制器的稳态性能。

式 (3) 中参数 k_2 决定了高斯函数的形状, 以及 NPID 控制器是否能很好地工作。可由下式确定

$$k_2 = \ln k_1 / (\Delta r) \quad (4)$$

式中, Δ 为阶跃响应时超调量 (百分比), 通常在 10%~15%。 r 为阶跃信号幅值 ($^\circ$)。式 (3) 可保证在超调量最大时, 积分增益与式 (1) K_i 相同。

3 实验与分析

以某光电跟踪系统为例, 采用直流力矩电机驱动, 旋转变压器测角位置, 同时可给出直流速度信号, 如图 4。以方位轴为例, 应用 dSPACE 1103 对其速度开环扫频得到图 5 所示伯特图。对其拟合辨识^[6], 得到速度开环传递函数如下:

$$\frac{1154s^2 + 1895s + 1.355e8s + 6.24e05}{3.865e-6s^5 + 0.001236s^4 + 1.439s^3 + 271.5s^2 + 9.459e04}$$

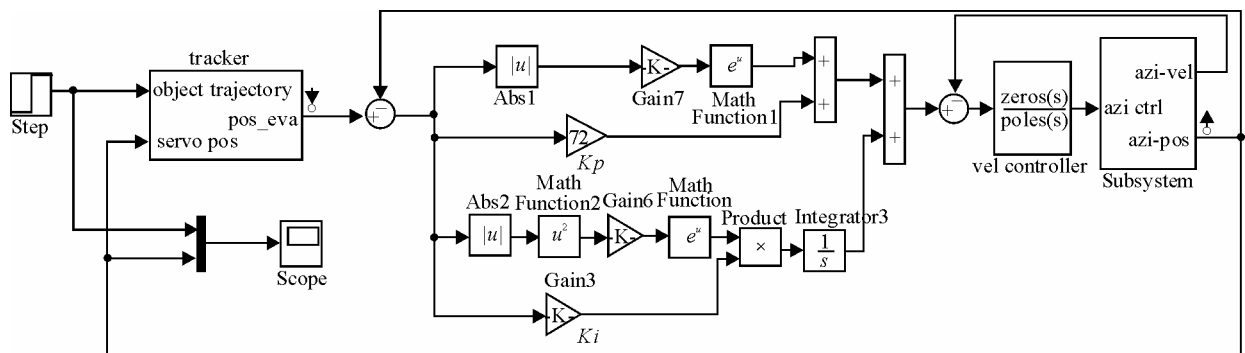


图 4 某光电跟踪系统方位轴控制系统仿真框图

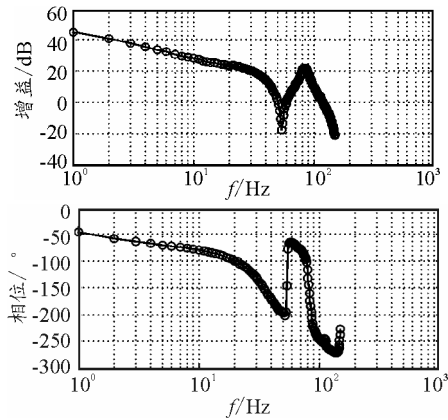


图 5 方位速度开环波特图

设计速度回路超前滞后补偿器^[7], 滞后校正的作用是加大低频段的增益, 保证稳态精度要求, 超前校正的作用是增大系统的相位裕度, 使中频段占据足够宽的频带, 以保证动态精度要求和系统的稳定性。高频段的特性决定系统过渡过程的起始形状。补偿后, 位置开环波特图如图 6。

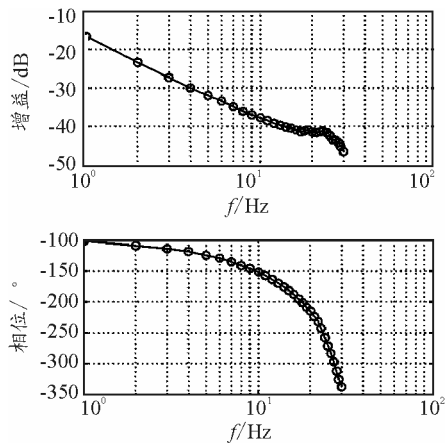


图 6 方位位置开环波特图

$$G_v(s) = \frac{28.146\ 983\ 8(s+6.674\ 717)(s+3.385\ 972\ 67)}{s(s+439.590\ 809)(s+0.246\ 860\ 69)}$$

应用上述非线性控制器, $k_p=30$, $k_i=10$; 即

$$f_p(e) = 30 + 10|e| ; \quad k_i = 200 , \quad k_2 = -40 ;$$

$$f_i(e) = 200 \cdot \exp(-40|e|) \circ$$

即

$$U = (30 + 10|e|) \cdot e + 0.1 \cdot \dot{e} + 200 \cdot \exp(-40|e|) \int e dt$$

相平面分析技术可以精确地显示随时间变化的系统状态轨迹。两维的相平面轨迹可用 Matlab 程序绘制。如图 7。

初始偏差以及偏差速率为点 P1(0.2,0), 表示初始时阶跃值为 0.2°。随着时间增加, 轨迹以顺时针变化, 到达最大负偏差点, 也就是超调。PID

控制中, 超调约为 17.5%, 同时有 5% 的负超调。而 NPID 控制则超调为 1.5%, 且无负超调。因此, NPID 控制可迅速从捕获模式进入跟踪模式, 大大减少了调整时间。

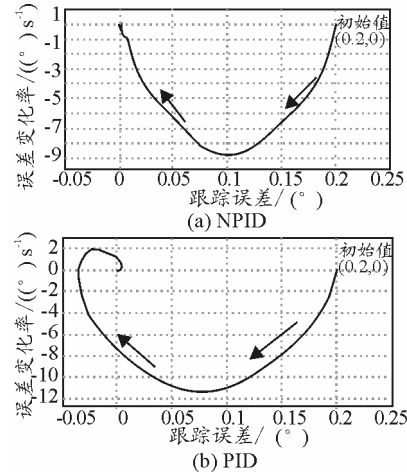


图 7 相平面轨迹图

4 结论

在线性控制体系下, 快速跟踪和高稳态精度通常是相互矛盾的, 在设计时需仔细权衡。若采用线性控制器切换的方式, 则需对切换时的抖动进行补偿。非线性控制器已应用于某光电跟踪系统中, 不仅大大增强了搜索捕获的可靠性, 而且与脱靶量预测结合, 系统的精度得到了显著提高。

参考文献:

- [1] Jinggang, Z., W. Jianguo, and Z. Zhicheng, A Novel Two-Degree-of-Freedom PID Controller for Integrator and Dead Time Process[C].The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian: IEEE, 2006: 6388-6391.
- [2] Okuyama, A. and M. Kobayashi. Controller-switching Strategy for HDD Servo Systems with Measurement Errors and Constraints on State and Control Variables[J]. IEEJ Transactions on Electrical and electronic Engineering. 2009, 4(5):633-639.
- [3] Yun feng, L., et al., Optimization of initial value compensation for settle control in hard disk drives[J]., IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(2): 797-801.
- [4] Ying, L., G. Guoxiao, and W. Youyi, A nonlinear control scheme for fast settling in hard disk drives[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004. 40(4): 2086-2088.
- [5] 胡浩军. 运动平台捕获、跟踪与瞄准系统视轴稳定技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2006.
- [6] 宋彦, 高慧斌, 郭同健, 等. 经纬仪控制模态切换时的动态分析和脱靶量跃变抑制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2158-2163.
- [7] 张智永, 范大鹏, 范世珣. 光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 681-688.