

文章编号: 1001-0920(2013)07-1117-04

光电跟踪系统视轴稳定的鲁棒内模控制器设计

夏运霞^{1,2}, 包启亮¹, 李锦英^{1,2}

(1. 中国科学院 a. 光电技术研究所, b. 光束控制重点实验室, 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对运动平台上光电跟踪系统既要抑制平台扰动对视轴稳定的影响, 又必须对建模误差具有很强的鲁棒性的特点, 设计了稳定平台改进鲁棒性的内模控制器. 通过在内模控制基础上添加一局部反馈回路构成鲁棒内模控制, 并详细分析了鲁棒内模控制对系统建模误差和外界扰动的鲁棒性. 仿真和实验结果显示, 与采用 PI 控制相比, 鲁棒内模控制在很宽频段范围内提高了系统对扰动的抑制能力, 28 Hz 以内都有 10 dB 以上的提高.

关键词: 运动平台; 光电跟踪系统; 视轴稳定; 鲁棒内模控制; 鲁棒性; 扰动

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Design of robustness internal model controller for line of sight of photoelectric tracking system

XIA Yun-xia^{1,2}, BAO Qi-liang¹, LI Jin-ying^{1,2}

(1a. Institute of Optics and Electronics, 1b. Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China. Correspondent: XIA Yun-xia, E-mail: xyxhaha@163.com)

Abstract: To meet the requirements of strong anti-disturbance and anti-model error and fast response to track moving targets for the photoelectric tracking system on the moving bed, a robust internal model controller(RIMC) is designed. The structure of RIMC is designed by adding a local feedback loop based on IMC which is used to estimate the disturb and model error. The robustness of RIMC to the model error and disturb are analyzed in detail. Compared with PI controller, simulation and experimental results show that the disturbance rejection performance is improved more than 10 dB within 28 Hz in a broad bandwith by adopting RIMC.

Key words: moving bed; photoelectric tracking system; line of sight; robust internal model controller(RIMC); robustness; disturbance

0 引言

随着光电跟踪系统在机载、车载等运动平台上的应用, 系统出现了新的特点. 相对于地基平台光电跟踪系统, 运动平台上光电跟踪系统会受到平台运动、抖动的影响, 因此必须设计视轴稳定回路保证视轴稳定. 运动平台上光电跟踪系统的视轴稳定控制存在以下两大难点: 1) 应具有很强的隔离载体扰动能力; 2) 应对模型误差具有很强的鲁棒性^[1].

针对惯性稳定平台中传统单速度环存在的扰动抑制能力不足的问题, 文献 [2] 采用添加测速机构成双速度闭环控制, 以提高平台对低频段扰动的抑制能力; 文献 [3] 采用在闭环控制系统中引入基于速度信

号的扰动观测器来提高系统的扰动抑制能力, 但此方法对扰动的提高有限, 而且不能克服对象的不确定性.

内模控制是一种先进的控制方法^[4-6], 但传统内模控制在扰动抑制和建模误差鲁棒性方面尚达不到要求. 为此, 本文以单轴惯性稳定平台为被控对象, 提出采用改进鲁棒性的内模控制(RIMC), 它是在内模控制的基础上添加一鲁棒稳定回路, 用于估计扰动和建模误差并对其进行补偿; 然后对鲁棒内模控制的设计方法和鲁棒性能进行详细分析; 最后在某一维光电稳定平台上进行实验验证, 并与采用 PI 控制方法的结果进行对比.

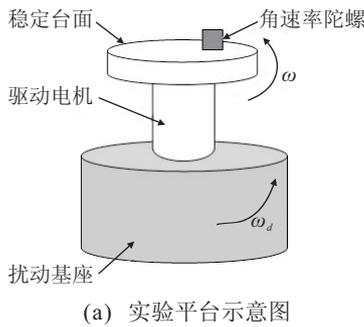
收稿日期: 2012-02-15; 修回日期: 2012-05-08.

基金项目: 国防预研项目(863-802).

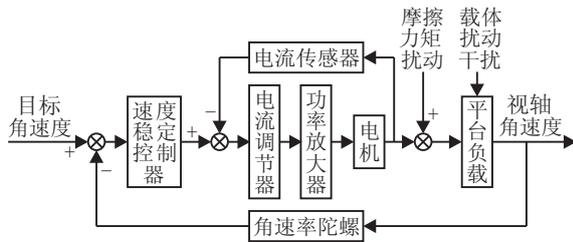
作者简介: 夏运霞(1986-), 女, 博士生, 从事视轴稳定和伺服跟踪控制的研究; 包启亮(1968-), 男, 研究员, 从事跟踪控制系统及机载视轴稳定系统的设计等研究.

1 实验系统介绍

实验系统如图 1 所示. 实验系统由两台单轴转台构成, 位于下面的是扰动台, 位于上面的是稳定平台. 扰动台用于提供扰动角速度, 模拟运动载体对稳定平台的影响. 扰动台和稳定平台分别由各自的力矩电机直接驱动. 系统采用串级控制结构, 包括电流内环和速度稳定外环. 电流环的作用是提高电机的刚度, 将反馈电机改造成一理想力矩源. 速度稳定环采用整体稳定方式, 将陀螺安装在稳定平台上, 当有外部扰动传递到稳定平台使平台发生晃动时, 陀螺的空间测速反馈将扰动信息反馈至控制器, 经过控制器计算出控制量送至力矩电机, 力矩电机驱动稳定平台运动, 以使安装于平台上的仪器视轴在惯性空间保持稳定.



(a) 实验平台示意图



(b) 光电跟踪惯性稳定平台控制系统框架

图 1 实验系统

2 控制器设计

2.1 内模控制器设计

作为一种先进的控制方法, 内模控制具有设计简单、参数整定直观明了、鲁棒性强、控制性能好等优点^[7]. 图 2 为内模控制结构, 其中: $G_p(s)$ 是一个包含了所有有害影响(如摩擦干扰、机械平台抖动等)的广义对象; $G_m(s)$ 为对象的动态模型, 它不受外界环境的影响; 控制器 $G_{imc}(s)$ 逼近于对象模型的逆, 它将对象与模型之间的误差转化为附加的控制信号, 用于迫使对象遵循模型来工作; 局部反馈量 df 反映了过程模型的不确定性和扰动的影响.

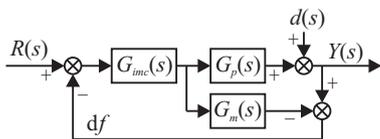


图 2 IMC 控制结构

由图 2 可得出内模控制闭环传递函数为

$$Y(s) = \frac{G_{imc}(s)G_p(s)}{1 + G_{imc}(s)[G_p(s) - G_m(s)]}R(s) + \frac{1 - G_{imc}(s)G_m(s)}{1 + G_{imc}(s)[G_p(s) - G_m(s)]}d(s). \quad (1)$$

内模控制系统闭环鲁棒稳定性条件^[7]为

$$\frac{|G_p(j\omega) - G_m(j\omega)|}{|G_m(j\omega)|} = |H(j\omega)| \leq L_m, \quad (2)$$

其中 L_m 为误差上界.

内模控制器 G_{imc} 采用两步法设计, 即

$$G_{imc}(s) = G_{m-}(s) \times G_f(s), \quad (3)$$

$$G_f(s) = \frac{1}{(1 + \varepsilon s)^n}. \quad (4)$$

其中: $G_m(s) = G_{m+}(s)G_{m-}(s)$, $G_{m+}(s)$ 包含了所有时滞和右半平面零点, 且 $G_{m+}(0) = 1$, $G_{m-}(s)$ 是具有最小相位特征的传递函数, 即 $G_{m-}(s)$ 稳定且不包含预测项; $G_f(s)$ 是在最小相位上增加的滤波器, 以确保系统的鲁棒性和物理可实现; n 为对象模型 $G_m(s)$ 分子分母阶次差. $G_f(s)$ 取为一阶低通滤波器并不是最优的, 但却是最简单的.

在 IMC 控制器中, 只有一个可调整的且具有直接意义的参数 ε , 它决定了系统的响应速度. 此外, ε 近似地与闭环带宽成正比. ε 取值越小, 带宽越宽, 响应速度快, 稳定精度高, 但鲁棒性差; ε 取值越大, 系统鲁棒性越强, 但快速性和精度都降低. 因此, 常规内模控制在具体实施时, ε 只能在动态性能与鲁棒性之间折中处理. 但是, 对于惯性稳定平台而言, 不仅需要快速精确地将视轴稳定在惯性空间, 还要求系统鲁棒性强. 为此, 对内模控制进行改进, 设计了鲁棒内模控制, 在不损害跟随能力的情况下提高对扰动的抑制能力以及对建模误差的鲁棒性.

2.2 鲁棒内模控制器设计

改进鲁棒性的内模控制如图 3 所示, 其中控制器 $G_{c2}(s)$ 用来消除模型误差和干扰的影响, 以提高系统对模型误差和干扰的鲁棒性.

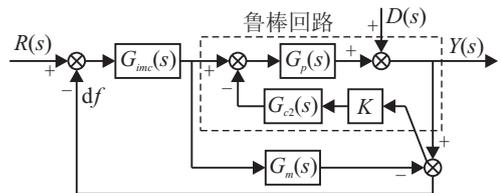


图 3 改进鲁棒性的 IMC 控制结构

输入到输出的传递函数为

$$T_R(s) = \frac{G_{imc}(s)G_p(s)[1 + G_m(s)KG_{c2}(s)]}{1 + G_{imc}(s)[G_p(s) - G_m(s)] + G_p(s)KG_{c2}(s)}. \quad (5)$$

干扰到输出的传递函数为

$$T_D(s) = \frac{1 - G_m(s)G_{imc}(s)}{1 + G_{imc}(s)[G_p(s) - G_m(s)] + G_p(s)KG_{c2}(s)}. \quad (6)$$

将鲁棒内模控制等效为传统内模控制时, 其被控对象 $G_p(s)$ 改造成如下等效被控对象:

$$G_{cp}(s) = \frac{G_p(s)[1 + KG_{c2}(s)G_m(s)]}{1 + KG_{c2}(s)G_p(s)}. \quad (7)$$

2.2.1 控制器 $G_{c2}(s)$ 设计

从上述分析可以看出: 添加控制器 $G_{c2}(s)$ 的目的一方面是补偿含有不确定性的被控对象 $G_p(s)$, 让它趋近于所设计的模型 $G_m(s)$, 从而提高系统对模型误差的鲁棒性; 另一方面是相当于在常规内模控制的基础上添加了扰动观测器, 以提高系统对扰动的抑制能力. 当建模准确时, 鲁棒内模控制输入到输出的传递函数与常规内模控制相同, 故 $G_{c2}(s)$ 的设计与内模控制器 $G_{imc}(s)$ 的设计没有关系, 在保证控制器 $G_{c2}(s)$ 和等效被控对象 $G_{cp}(s)$ 稳定的前提下, 可以独立设计 $G_{c2}(s)$ 和 $G_{imc}(s)$.

2.2.2 分析 RIMC 的鲁棒性能

1) 对建模误差的鲁棒性分析.

假设真实被控对象为

$$G_p(s) = G_m(s) + \Delta G_p(s), \quad (8)$$

其中 $\Delta G_p(s) = G_p(s) - G_m(s)$ 为建模误差. 将式(8)代入(7), 可得到等效被控对象为

$$G_{cp}(s) = G_m(s) + \frac{\Delta G_p(s)}{1 + KG_{c2}(s)G_p(s)}. \quad (9)$$

比较式(8)和(9)可以看出, 建模误差变成原来的 $1/(1 + KG_{c2}(s)G_p(s))$. 当将 $KG_{c2}(s)$ 设计得足够大时, 可以得出 $G_{cp}(s) = G_m(s)$, 这就大大提高了系统对建模误差的鲁棒性. 仿真结果如图4所示, 图中实线代表所建立的对象模型, 虚线代表真实的对象, 点线代表经改造后的等效被控对象.

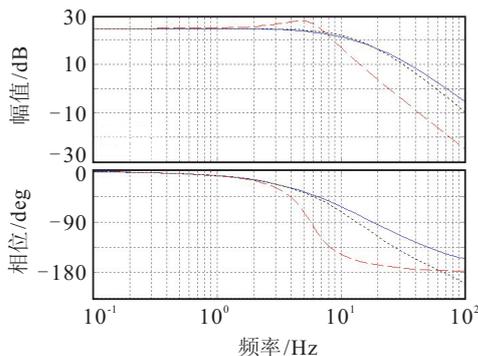


图4 RIMC 对建模误差的鲁棒性

2) 对外界扰动的鲁棒性分析.

常规内模控制对干扰的传递函数为

$$Y(s) = \frac{1 - G_{imc}(s)G_m(s)}{1 + G_c(s)[G_p(s) - G_m(s)]} D(s). \quad (10)$$

当模型精确时, 有

$$Y_1^D(s) = [1 - G_{imc}(s)G_m(s)]. \quad (11)$$

鲁棒内模控制对干扰的传递函数为

$$Y_2^D(s) = \frac{[1 - G_m(s)G_{imc}(s)]}{1 + KG_{c2}(s)G_p(s)}. \quad (12)$$

从式(11)和(12)可以看出, 鲁棒内模控制对干扰的抑制误差是常规内模的 $1/(1 + KG_{c2}(s)G_p(s))$.

3 实验及结果

对图1所示的实验系统采用动态信号分析仪测得其开环频率特性如图5所示, 其中实线代表实测数据, 虚线代表拟合得到的对象. 经辨识得到速度开环时对象的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{17.5}{7.842 \cdot 10^{-5} s^2 + 0.02143s + 1} \times \frac{1 - e^{-0.001s}}{0.001s}. \quad (13)$$

其中: ω 为速度, u 为控制器输出.

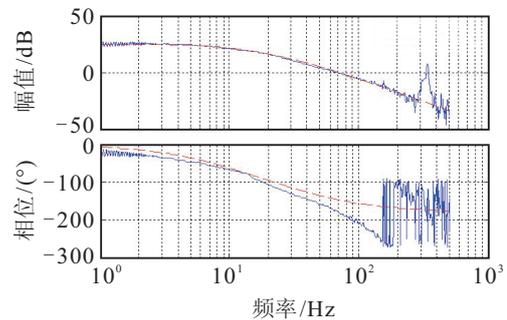


图5 实测被控对象频率特性和拟合被控对象频率特性

将PI控制方法中的PI控制器设计为

$$C_{PI}(s) = 5.1154 \times \frac{1 + 0.038s}{s}. \quad (14)$$

控制器 $G_{imc}(s)$ 和 $G_{c2}(s)$ 分别按2.1节和2.2节介绍的方法设计. 实验过程中将扰动台闭环, 以提供稳定的扰动力矩, 稳定平台电流环闭环. 实验中以4V电压驱动扰动台, 角速度输入为0, 用频率特性分析仪分别测量PI控制和鲁棒内模控制闭环时从扰动台输入电压到陀螺反馈电压1~100Hz的频率特性, 得到系统对基座的扰动抑制比特性. PI控制和鲁棒内模控制扰动抑制比特性对比如图6所示, 其时域对单频正弦抑制性能如图7所示.

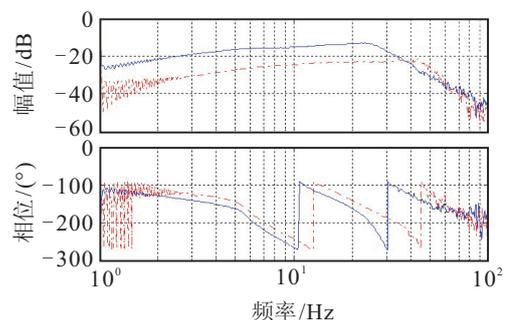


图6 PI控制和RIMC方法对扰动角速度抑制频率特性

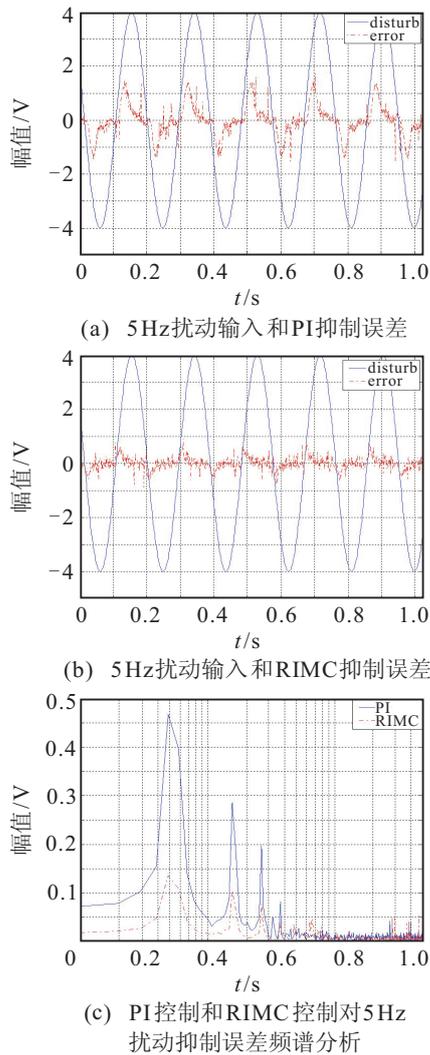


图7 PI控制和RIMC控制对5 Hz扰动的抑制特性对比

从图6可以看出,与PI控制相比,采用鲁棒内模控制时,在很宽频段范围内对扰动的抑制能力提高了10 dB以上.图7分别给出了PI控制和鲁棒内模控制在5 Hz单频角速度扰动下实测的扰动电压和陀螺电压,并对比了两种控制方法对扰动抑制误差的功率谱.可以看出,鲁棒内模控制对扰动的抑制能力明显高于PI控制.

4 结论

本文针对运动平台伺服系统的特点,为解决建模误差和载体扰动对系统性能的影响,设计了鲁棒内模控制.它是在内模控制的基础上添加一局部反馈回路,用于观测外界扰动和建模误差并对其进行补偿.在某一维

转台上进行的实验结果表明,与采用PI控制相比,采用RIMC方法在一定宽带范围内提高了系统对外界扰动的抑制能力,在28 Hz以内都有10 dB以上的提高,为光电跟踪系统提供了一种新的控制方法.

参考文献(References)

- [1] 庞新良. 机载光电稳定平台数字控制关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程系, 2007.
(Pang X L. A study on key technology of digital control of airborne electro-optical stabilization platform system[D]. Changsha: Department of Mechatronic Engineering, National University of Defense Technology, 2007.)
- [2] 姬伟, 李奇, 杨蒲. 陀螺惯性平台视轴稳定双速度环串级控制的研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1): 114-119.
(Ji W, Li Q, Yang P. Study on dual rate-loopcascade control for LOS stabilization of gyro inertia platform[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2007, 28(1): 114-119.)
- [3] 李嘉全, 丁策, 孔德杰, 等. 基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 998-1004.
(Li J Q, Ding C, Kong D J, et al. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 998-1004.)
- [4] 赵曜. 内模控制系统鲁棒跟踪控制器的参数化及优化[J]. 控制与决策, 2009, 24(5): 734-737.
(Zhao Y. Parameterization and optimization of robust tracking controllers for internal model control systems[J]. Control and Decision, 2009, 24(5): 734-737.)
- [5] 赵曜. 论两种改进内模控制系统的等价性[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1170-1173.
(Zhao Y. Equivalence of two modified IMC systems[J]. Control and Decision, 2007, 22(10): 1170-1173.)
- [6] 周涌, 陈庆伟, 胡维礼. 内模控制研究的新发展[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 475-48.
(Zhou Y, Chen Q W, Hu W L. New developments of research on internal model control[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(3): 475-482.)
- [7] Coleman Brosilow, Babu Joseph. Techniques of model-based control[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR Publishers, 2002: 1-3.