

文章编号 1004-924X(2009)02-0327-06

# 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统

李洪文

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**针对目前大型望远镜伺服系统调试参数较多的现状,基于内模 PID 控制方法对大型望远镜伺服系统进行了研究。介绍了内模控制设计思路,讨论了速度回路内模控制算法。分析和仿真结果证明了该算法在高精度应用场合的可实现性和较强的鲁棒性,简化了调试过程。根据一个具体项目验证了该算法的实用性,应用结果表明,该方法调试简单,一个控制环路只需要调整一、两个参数即能满足要求;高速运行时无超调,低速平稳运行达到 15,具有一定的实用性和推广价值。

**关键词:**内模控制;PID;大型望远镜;伺服控制

中图分类号:TH751;TP273.5 文献标识码:A

## Servo system of large telescope based on internal model PID control method

LI Hong-wen

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** On the basis of internal model PID control method, this paper researches further the servo system of a large telescope for reducing its adjusting parameters in servo control loop. The design ideals of internal model control are introduced and the algorithm of internal model control is discussed. Analysis and simulation results verify that the algorithm simplifies the debug process; and it is feasibility and robustability for high precision application fields. The practicability of this algorithm is verified in an actual project. The application shows that this system runs stably and accurately, and has a few adjusting parameters in servo control system. Also, there is no overshoot while the speed is high and the lowest speed can reach 15 in stable operation. The technology and methods adopted in the system are practical and worthy to be used.

**Key words:** large telescope; internal model control; PID; servo control

收稿日期:2008-05-29;修订日期:2008-07-10.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目

## 1 引言

内模控制 (Internal Model Control, IMC) 是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新颖控制策略, 1982 年由 Garcia 提出, 之后 Morari 等给出了线性 IMC 设计的完整过程。其设计思路是将对象模型与实际对象相并联, 控制器逼近模型的动态逆, 对单变量系统而言, 内模控制器取为模型最小相位部分的逆, 并通过附加低通滤波器以增强系统的鲁棒性。当模型和被控对象模型精确匹配时, 控制系统的输入等于输出, 这正是设计控制系统所追求的目标。内模控制能够清楚地表明调节参数和闭环响应及鲁棒性的关系, 内模控制器的动态特性取决于内部模型与被控对象的匹配情况。由于其具有设计简单、控制性能好和易于在线分析等优越性, 内模控制不仅是一种实用的先进控制算法, 为研究预测控制等基于模型的控制策略提供了重要理论基础, 而且是提高常规控制系统设计水平的有力工具。在工业过程中, 与经典 PID 控制相比, 内模控制仅有一个整定参数, 参数调整与系统动态品质和鲁棒性的关系比较明确, 故采用内模控制原理可以提高 PID 控制器的设计水平。

## 2 内模控制设计思路

内模控制结构如图 1 所示, 其中  $G_p(s)$  为控制对象,  $\tilde{G}_p(s)$  为内部模型,  $G_{IMC}(s)$  为内模控制器,  $x$ 、 $u$ 、 $y$  分别为给定输入、控制量、对象输出,  $d$  为外界干扰。内模控制系统具有下述 3 个基本性质: (1) 当模型精确时, 对象和控制器同时稳定就意味着闭环系统稳定。(2) 当闭环系统稳定时, 若控制器取为模型逆, 则不论有无外界干扰  $d$ , 均可实现理想控制  $y = x$ 。(3) 当闭环系统稳定时, 只要控制器和模型的稳态增益乘积为 1, 则系统对于阶跃输入及阶跃干扰均不存在输出静差。这条性质不仅适用于线性内模控制, 也能够推广到非线性内模控制。可见内模控制是一种基于模型逆的控制方法。

内模控制的设计关键是建立被控对象的模型和模型逆, 并尽可能精确, 匹配程度尽量高。传统数学模型可逆性容易判断, 模型可逆时能解析获

得模型的逆, 能够深入分析闭环系统的稳定性和鲁棒性。如果模型准确, 有  $G_p(s) = \tilde{G}_p(s)$ , 同时内模控制器选择  $G_{IMC}(s) = G_p^{-1}(s)$ , 且模型的逆存在且可以实现, 系统的输出就等于输入, 不受任何干扰信号影响。

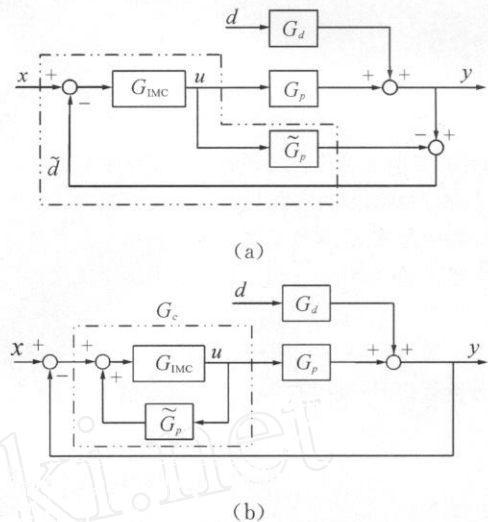


图 1 内模控制原理框图

Fig. 1 Block diagram of IMC control

图 1(a) 可以等效为图 1(b) 的形式, 有

$$G_c(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s) \tilde{G}_p(s)}, \quad (1)$$

$$G_{IMC}(s) = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s) \tilde{G}_p(s)}, \quad (2)$$

$$Y(s) = \frac{G_p(s) G_c(s)}{1 + G_p(s) G_c(s)} X(s) + \frac{1}{1 + G_p(s) G_c(s)} G_d(s) D(s). \quad (3)$$

望远镜伺服控制对象为直流力矩电机, 且为大惯量系统, 阻尼系数都  $> 1$ , 通常情况下是稳定的。传统的设计方法是望远镜伺服系统简化为线性系统进行设计, 输出速度和控制电压之间常用两个惯性环节表示, 位置输出是在速度的基础上增加一个积分环节, 采用的频域方法设计都能满足稳定性和指标要求。当然, 理想的控制器特性是在模型的逆存在和控制器可以实现的前提下进行的, 但是, 对象一般存在惯性环节和滞后环节, 以及积分环节等, 那么  $G_p^{-1}(s)$  中将出现超前或纯超前环节, 故难以实现。针对线性传递函数, 解决办法是将内部模型  $\tilde{G}_p(s)$  分解为最小相位系统  $\tilde{G}_{p-}(s)$  和非最小相位系统  $\tilde{G}_{p+}(s)$  两部分, 用最小相位系统部分参与设计内模控制器, 然后设计

滤波器来保证系统的稳定性和鲁棒性。即按照如下方式进行设计步骤:分解内部模型为:

$$\tilde{G}_p(s) = \tilde{G}_{p-}(s) \tilde{G}_{p+}(s) \quad (4)$$

内模控制器设计为:

$$G_{IMC}(s) = \tilde{G}_{p-}^{-1}(s) F(s) \quad (5)$$

$$F(s) = \frac{1}{(s+1)^n}$$

$F(s)$  为低通滤波器,选择它是为了使内模控制器有理,且可实现;是滤波器参数,是需要依据实际要求设计的,可见控制器的设计只需要设计一个参数就能满足稳定性和鲁棒性要求,较设计 PID 控制器要简单。的取值范围受对象与模型不匹配程度的限制。

### 3 速度回路内模控制算法

考虑对象模型为

$$G_p(s) = \frac{K}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (6)$$

这是一般情况下望远镜的输出速度和输入电压之间的传递函数,具有典型性,不同的望远镜之间只是参数的不同而已。 $T_m$  是机械时间常数, $T_e$  是电气时间常数, $K$  是增益。取低通滤波器为

$F(s) = \frac{1}{(s+1)^2}$ , 则通过上面的分析可得到内模控制器:

$$G_{IMC}(s) = \frac{(T_m s + 1)(T_e s + 1)}{K(s+1)^2} \quad (7)$$

当模型严格匹配时,依据上式有系统的闭环传递函数即为所设计的低通滤波器为

$$G_{close}(s) = F(s) \quad (8)$$

对干扰的传递函数为

$$G_d(s) = 1 - F(s) = \frac{s(s+2)}{(s+1)^2} \quad (9)$$

可见,系统的动态性能是由 决定的,参数越小,系统的动态性能越好,越大,鲁棒性能越好,而且,只需调整一个参数就能兼顾两方面的要求,比 PID 控制器的参数整定方便许多。

当参数失配时,得到上述的方法可以维持稳定的条件。证明方法如下:

由式(3)可知系统的闭环特征方程为:

$$T(s) = 1 + G_{IMC}(s) [G_p(s) - \tilde{G}_p(s)] = 0 \quad (10)$$

首先考虑模型失配时,参数变化引起的失配,

模型变化量为:

$$G_p(s) = G_p(s) - \tilde{G}_p(s) = \frac{\frac{\partial G_p(s)}{\partial K} K + \frac{\partial G_p(s)}{\partial T_m} T_m + \frac{\partial G_p(s)}{\partial T_e} T_e - \frac{K}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \left( -\frac{K}{K} - \frac{T_m s}{T_m s + 1} - \frac{T_e s}{T_e s + 1} \right)}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (11)$$

式(10)写为:

$$T(s) = 1 + \frac{(T_m s + 1)(T_e s + 1)}{K(s+1)^2} \left[ \frac{K}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \times \left( -\frac{K}{K} - \frac{T_m s}{T_m s + 1} - \frac{T_e s}{T_e s + 1} \right) \right] = 0 \quad (12)$$

整理后得:

$$T_m T_e^2 s^4 + [2 T_m T_e + (T_m + T_e)^2] s^3 + \left[ \left(1 + \frac{K}{K}\right) T_m T_e + 2(T_m + T_e) + \frac{K}{K} \right] s^2 - T_m T_e - T_e T_m s + 1 + \frac{K}{K} = 0 \quad (13)$$

可用劳思稳定判据判断系统稳定的条件。

大型光电望远镜属于大惯量系统,机械时间常数远大于电气时间常数,故可忽略电气时间常数的影响,对象的速度传递函数可简化为:

$$G_p(s) = \frac{K}{T_m s + 1} \quad (14)$$

因此可以选择内模控制器为:

$$G_{IMC}(s) = G_p^{-1}(s) \frac{1}{s+1} = \frac{T_m s + 1}{K(s+1)} \quad (15)$$

等效为反馈控制器:

$$G_C(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s) G_p(s)} = \frac{T_m}{K} + \frac{1}{K s} \quad (16)$$

可见这是常规的 PI 控制,但是这是有条件的,即当内模控制器  $G_{IMC}(s)$  不饱和的状态下才成立。当模型匹配时,存在内模控制系统闭环为一惯性环节,只是它的时间可以依据需要进行调节,值小有利于动态性能,值越大则越有利于增强鲁棒性。对于内模控制器输出不饱和而言,其等效于反馈控制器 PI,因而,系统对阶跃输入和阶跃扰动的稳态误差为 0,其抗干扰能力与常规 PI 完全一致。

考虑到模型失配时可以证明,针对上述的控制对象结构,系统是稳定的。

$$G_p(s) = G_p(s) - \tilde{G}_p(s) = \frac{\partial G_p(s)}{\partial K} K + \frac{\partial G_p(s)}{\partial T_m} T_m = \frac{K}{(T_m s + 1)} \left( -\frac{K}{K} - \frac{T_m s}{T_m s + 1} \right), \quad (17)$$

系统特征方程为：

$$T(s) = 1 + \frac{(T_m s + 1)}{K(s + 1)} \left[ \frac{K}{(T_m s + 1)} \left( -\frac{K}{K} - \frac{T_m s}{T_m s + 1} \right) \right] = 0, \quad (18)$$

整理后有：

$$T_m s^2 + \left[ 1 + \left( 1 + \frac{K}{K} \right) T_m - T_m \right] s + 1 = 0. \quad (19)$$

根据劳思稳定判据, 可得稳定条件：

$$1 + \left( 1 + \frac{K}{K} \right) T_m - T_m > 0. \quad (20)$$

### 4 内模控制的 Anti-Windup 研究

在实际工作中, PWM 输出的最大宽度也即电机的最大电压是有限的, 电机输出的速度也是有限的, 而且望远镜工作模式也需要进行切换, 如手动、定点、引导等不同模式之间的切换, 给定值或误差在大范围内变化, 而控制器中具有积分环节和比例环节等, 会使控制器输出饱和。因此, 实际控制电机的输入有时就和控制器的输出不等, 由此引起系统闭环响应变差, 这种现象称为 Windup 现象。图 2 中的控制器输出实际上都有一个非线性环节, 饱和特性的数学描述可用式 (21) 表示。

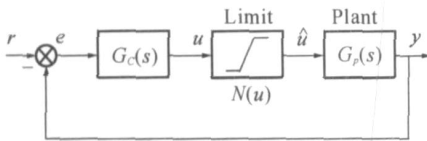


图 2 具有非线性特性  $N(u)$  的控制系统

Fig. 2 Control system with nonlinear  $N(u)$  characteristic

图 2 中,  $G_c(s)$  为线性控制器,  $u$  为线性控制器输出,  $\hat{u}$  为对象输入,  $N(u)$  为非线性特性, 典型为饱和特性。

$$\hat{u} = N(u) = \text{sat}(u) = \begin{cases} \max(u) & u > \max(u) \\ u & \min(u) \leq u \leq \max(u) \\ \min(u) & u < \min(u) \end{cases}, \quad (21)$$

其中,  $\max(u)$  和  $\min(u)$  为常数。由于存在饱和特性, 对象输入  $\hat{u}$  和控制器输出  $u$  不一定是一致的, 满足式 (21)。在望远镜伺服控制算法中对控制器的输出进行了限幅处理, 如到电机的 PWM 信号的调宽数字量就限为  $\pm 8000$  码, 这是 PWM 的实际调节范围确定的, 对应的是限制了电机的最大输入电压。对此, 利用内模控制原理进行控制器设计, 然后分解出其中的积分环节, 采用图 3 所示算法结构, 可方便解决 Windup 问题。用于调节的参数有两个, 一个是决定系统动态性能和鲁棒性能的参数, 一个是 Anti-Windup 设计参数, 调试方便, 易于工程实现。控制系统工作原理框图见 3, 其中的  $G_c(s)$  为等效的内模控制原理的控制器, 见式 (1), 内模控制器可分解为常规的 PID 控制器形式, 这样能更好利用内模控制的参数调节简单的优点, 同时又具有 PID 控制的特点,  $G_p(s)$  为被控制对象,  $K_c$  为 Anti-Windup 设计系数。

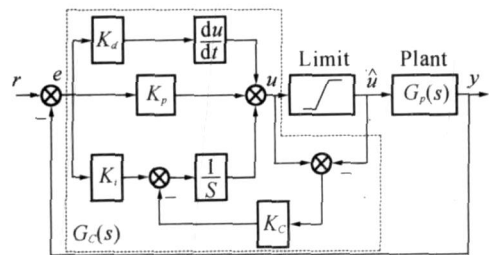


图 3 具有 Anti-Windup 的内模控制原理框图

Fig. 3 Block diagram of IMC control with Anti-Windup

考虑设望远镜的速度环被控对象为  $G_p(s) = \frac{K}{(T_m s + 1)(T_c s + 1)}$ , 对速度环路进行设计的内模

控制器  $G_{IMC}(s) = \frac{(T_m s + 1)(T_c s + 1)}{K(s + 1)^2}$ , 等效的常

规控制器模式可采用式 (1) 进行转换, 假设

$$G_c(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s)\tilde{G}_p(s)} = \frac{(T_m s + 1)(T_c s + 1)}{K s(s + 2)} = \frac{T_m T_c}{s^2} + \frac{1}{2Ks} + \frac{1}{2K} \times \frac{T_m + T_c - \frac{2T_m T_c}{2}}{\frac{1}{2}s + 1}, \quad (22)$$

式 (22) 中第一项为比例项, 第二项为积分项, 在大偏差或大的给定值时会出现控制器输出饱和, 影

响系统动态性能,第三项为误差信号的惯性环节,但在大多数情况下为负值,这就可看出与常规的 PID 控制算法的区别,以及为何内模控制较 PID 较易退出饱和状态,也即内模控制具有抗积分饱和能力。从图 4 可看出,在大的给定时,内模控制器也会饱和,输出超调严重,采用图 3 所示的控制方法后,容易调节  $K_c$  大小即可控制超调的发生,取得较好效果。其中被控对象参数为  $T_m = 0.3772$ ,  $T_e = 0.0094$ ,  $K = 0.5702$ ,取  $\lambda = 0.005$  时,得到等效的控制器为:

$$G_c(s) = 248.7327 + \frac{175.377}{s} - \frac{181.37}{0.0025s + 1} \quad (23)$$

选取  $K_c = 2.650808$ ,得到图 4 的仿真结果,这是基于内模控制原理的一种 Anti-Windup 设计方法,调节参数有  $\lambda$  和  $K_c$ ,具有内模控制原理的优点和 PID 控制的特点,算法简单。

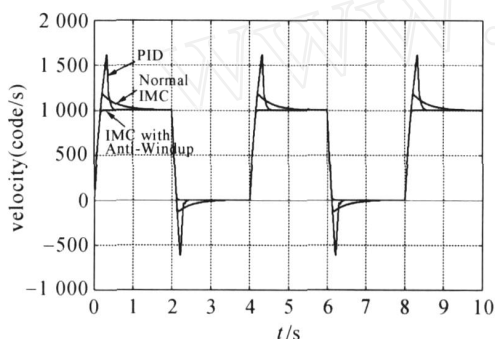


图 4 基于内模控制的 Anti-Windup 设计比较结果  
Fig. 4 Results of IMC control with Anti-Windup

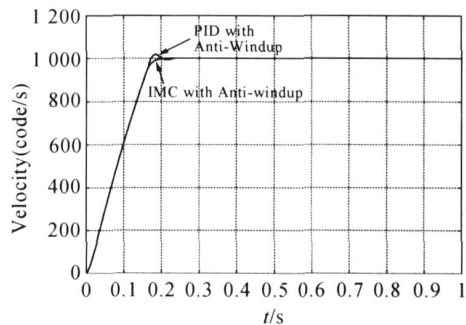


图 5 基于内模控制的 Anti-Windup 设计和 PID - Anti-Windup 设计比较结果  
Fig. 5 Results of IMC control with Anti-Windup and PID-Anti-Wind

从图 4 中可看出,采用 Anti-Windup 设计的内模能减少超调,甚至没有超调发生。当常规 PID 控制器也采用 Anti-Windup 设计时,得到的阶跃响应曲线见图 5, Anti-Windup 设计能够大大减少超调,在望远镜伺服系统里对大偏差或大给定时能提高系统的跟踪性能。

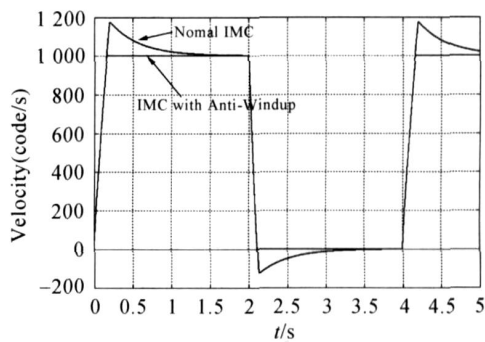


图 6 基于内模控制的 Anti-Windup 设计结果  
Fig. 6 Results of IMC control with Anti-Windup

如果将速度对象简化为式 (14),得到式 (16) 的控制器,相当于 PI 控制,但只有一个调节参数,被控对象参数  $T_m = 0.3772$ ,  $K = 0.5702$ ,取  $\lambda = 0.005$ ,  $K_c = 2.62715$  得到图 6 的仿真结果。

可见,采用内模控制后的调节参数少了,一个参数调节即可解决 Windup 现象,取得明显效果。

### 5 实验

目前该调试方法用在具体项目中得到了很

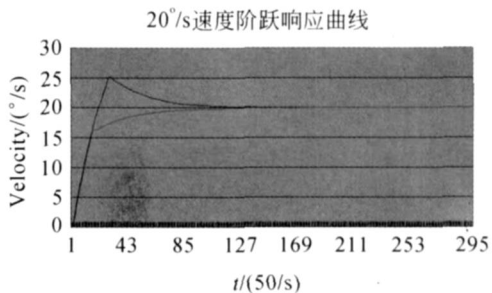


图 7 实际测试曲线:无 Anti-Windup 控制(有超调)和有 Anti - Windup 控制(无超调)  
Fig. 7 Testing curves: without Anti-Windup control (with overshoot) and with Anti-windup control (without overshoot)

好的实际效果,大阶跃响应时的响应曲线见图 7~8,与仿真效果一致。一般在搜索工作模式,或在高速调转时需要比较高的速度,图 7 为在 20°/s 的等速响应曲线,验证了控制器饱和时 Anti-Windup 的实际效果,图 8 为 5°/s 时响应曲线,验证了控制器未饱和时的控制效果。

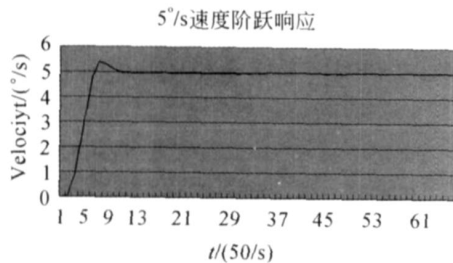


图 8 5°/s 的阶跃响应  
Fig. 8 Step response of 5°/s

#### 参考文献:

- [1] 秦继荣,沈安俊. 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.  
QINGJ R, SHEN A J. *Modern DC Servo Control Technology and System Design* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 蔡小玲,汪小帆,王执铨. 内模控制与 PI 控制[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(增): 47-51.  
CAI X L, WANG X F, WANG ZH Q. Internal control and PI control [J]. *Journal of Nanjing Institute of Engineering*. 2002, 26(Supp.): 47-51. (in Chinese)
- [3] 张井岗,曾建潮,孙志毅. 直流电动机调速系统的内模控制[J]. 电机与控制学报, 1998, 12(2): 126-128.  
ZHANGJ G, ZENGJ CH, SUN ZH Y. The IMC of DC motor speed system [J]. *Journal of Motor and Control*. 1998, 12(2): 126-128. (in Chinese)
- [4] MIKE B. Servo simulation and modeling for the Gemini 8-M telescopes[J]. *SPIE*, 2479: 218-232.
- [5] 赵曜. 内模控制发展综述[J]. 信息与控制, 2000, 29

作者简介:



李洪文(1970 - ),男,四川乐至人,博士,副研究员,现主要从事伺服系统及自动化方面的研究。E-mail: li-hongwen1970@yahoo.com

## 6 结 论

通过对内模控制方法研究,仿真和实验结果证明了基于内模控制原理的 PID 控制方法的可行性和有效性。利用该方法简化了调试过程,应用结果表明,该方法调试简单,一个控制环路只需要调整一个参数就能满足要求动态特性和鲁棒性要求,在控制器饱和的情况下具有一定的 Anti-Windup 作用。针对饱和现象设计了 Anti-Windup 调节参数,可以解决控制大超调的问题,高速运行时无超调,低速平稳运行达到 15,具有一定的实用性和推广价值。

(6):526-530.

- ZHAO Y. Development summary of the internal control [J]. *Information and Control*, 2000, 29 (6):526-530. (in Chinese)
- [6] WANG X S, PENG G Z, YANG X. Internal model controller with diagonal recurrent neural network for pneumatic robot servo system[C]. *Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, July 16-20, 2003:1064-1069.
- [7] 李洪文. 某型号大型光电经纬仪高精度伺服系统研究[D]. 长春:吉林大学,2007.  
LI H W. *Study on high precision servo control system of a large electro-optical theodolite* [D]. Changchun: Graduate University of Jinlin University, 2007. (in Chinese)
- [8] 张智永,范大鹏,范世殉. 光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 681-688.  
ZHANG ZH Y, FAN D P, FAN SH X. Servo system design for E-O stabilization and tracking devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 681-688.