

文章编号 1004-924X(2008)02-0265-05

# 采用复合控制提高机载光电平台的数引跟踪精度

孙丽娜, 宋悦铭, 戴 明

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 简述了机载光电平台的工作原理与功能, 介绍了平台速度环和跟踪位置回路的经典控制方法。从提高系统的跟踪精度出发, 提出了复合控制在机载光电平台数引跟踪中的应用。介绍了前馈控制的原理和局限性以及在光电平台数引跟踪回路中的具体设计方法, 并给出了实验结果。结果表明, 与没有进行复合控制相比较, 对机载光电平台实施前馈复合控制能够在不改变系统闭环稳定特性的前提下, 将系统的数引跟踪精度提高 10%。

**关键词:** 机载光电平台; 复合控制; 前馈控制; 数字引导

**中图分类号:** V476.5 **文献标识码:** A

## Improving digital-leading tracking precision for photoelectric platform by complex control

SUN Li-na, SONG Yue-ming, DAI Ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The working principle and function of a photoelectric platform were introduced, and the classical control methods of the velocity loop and the position loop were also described. In order to improve the tracking precision of the system, a complex control in the digital-leading system of the photoelectric platform was put forward. The principle and limitation of the feed-forward control was introduced, and the design method of the feed-forward control in the system was particularly described. The experimental results show that the digital-leading tracking precision of the system is improved by 10% in the feed-forward control without changing the closed-loop stability of the system.

**Key words:** photoelectric platform; complex control; feed-forward control; digital-leading

### 1 引 言

机载光电平台, 体积小, 重量轻, 功能齐全, 易于操作, 能够实现对平台下方及其附近目标的观察与测量, 可以通过数引功能或上位机的控制信

息, 实现光电平台对目标的有效跟踪与定位。

机载光电平台由照准架、陀螺、电机、角度传感器和光学传感器组成, 装载的光学传感器一般由可见光、红外和激光测距机组成, 通过上位机操纵纵杆控制平台搜索目标, 发现感兴趣目标时, 通过上位机指令实现对目标的稳定跟踪、测量与定位,

收稿日期: 2007-06-07; 修订日期: 2007-10-31.

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (No. 1040603)

功能性比较强。近年来,在机载光电平台中引入数引功能,方便了光电平台对指定目标的稳定跟踪,得到了广泛应用。

## 2 前馈控制原理

在经典控制理论中,串联校正和反馈校正都属于闭环反馈控制,它们通过对偏差进行处理构成局部闭环,改善系统的性能,从而得到广泛的应用。前馈控制则是另外一种比较特殊的控制方式,由于其传递函数直接作用于系统的输入,对系统的输入具有预见性,因此能够在不影响系统稳定性的前提下,提高系统的响应速度和动态误差精度。在控制系统中,同时使用前馈控制和反馈控制的方法称为复合控制。

复合控制系统的特点是在不影响原来反馈系统绝对稳定条件下通过前馈控制提高系统对指令控制的跟踪精度。它实际是一种开环+闭环控制,就是不等输出量发生变化并形成偏差后才产生纠正偏离的控制作用,而是在控制作用施加到系统的同时就产生作用,不受系统延时的影响,比反馈控制迅速,同时这个系统还能满足反馈控制方法所设计的带宽。

图 1 为前馈控制原理图。

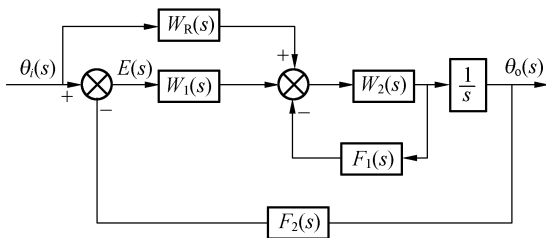


图 1 前馈控制原理

Fig. 1 Principle of feedforward control

图中  $W_R(s)$  称为前馈控制器;

$E(s)$  为误差信号;

$\theta_o(s)$  为系统输出;

$F_1(s)$  为速度环反馈传递函数;

$\frac{1}{s}$  为速度环到位置环的积分环节;

$F_2(s)$  为位置环反馈传递函数;

$W_1(s)$  为位置环校正函数;

$W_2(s)$  为速度环校正函数。

系统跟踪  $\theta_i(s)$  的误差表示为:

$$\theta_e(s) = \frac{E(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1 - W_R(s)G(s)}{1 + W_1(s)G(s)}, \quad (1)$$

式中,  $G(s)$  是  $W_2(s)$ 、 $F_1(s)$  和  $\frac{1}{s}$  的传递函数。

可见,当  $W_R(s)G(s) = 1$  的情况下,系统的误差为零,那么就可以实现  $\theta_e = 0$  的无误差跟踪。上述条件即为误差全补偿条件。不过实现完全补偿是很困难的,这是由于  $G(s)$  的不完全确定性所致,因此一般只能做部分补偿。

在光电平台系统中,跟踪性能指标的提升是最令人关注的,采用这种复合补偿方式能够最大限度地提高系统的数引跟踪精度。

## 3 复合控制在机载平台中的实现

### 3.1 光电平台跟踪回路的速度校正设计

在光电跟踪系统中,设计速度回路校正装置的目的是要提高系统抵抗扰动转矩的能力,使校正后的系统有较好的动态和稳态性能。校正回路的开环增益决定了稳定精度,因此在满足条件的情况下,提高系统的开环增益有利于提高系统的稳定精度,达到系统所需的速度范围。

在经典控制理论中,速率稳定回路常采用的校正形式为滞后超前校正,滞后校正的作用是增大低频段的增益,保证稳定精度要求;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段,以保证动态精度要求和系统的稳定性。式(2)为机载平台中速度稳定回路校正环节。

$$W_2(s) = \frac{k_v(\tau_1 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)^2} = \frac{5\,000 \times \left(\frac{1}{17.8}s + 1\right)^2}{\left(\frac{1}{0.48}s + 1\right)^2}. \quad (2)$$

速率陀螺主要用于测量敏感平台相对于惯性空间的角速率,作为速度回路的反馈,它的性能对系统有很大影响。本系统根据需要采用了美国 BEI 公司生产的单自由度压电速率陀螺,两个陀螺分别测量平台方位和俯仰相对惯性空间的角速率作为反馈控制,保持视轴稳定,实现稳定跟踪。

### 3.2 光电平台跟踪回路设计

根据系统的最大角速度、角加速度和速率回路的良好设计,按照理论是很容易实现系统的跟踪精度的。跟踪误差  $\theta_{MAX}$  可以表示为:

$$\theta_{MAX} = \frac{\dot{\theta}(t)}{k_v} + \frac{\ddot{\theta}(t)}{k_a} + \frac{\ddot{\theta}(t)}{k_j} + \dots$$

式中,  $\dot{\theta}(t)$ ,  $\ddot{\theta}(t)$ ,  $\dddot{\theta}(t)$  分别表示输入信号包含的一阶导数、二阶导数、三阶导数, 相当于角速度、角加速度、角加速度变化率;  $k_a$  表示系统的加速度品质因数;  $k_v$  表示系统的速度品质因数;  $k_i$  表示系统的加速度变化率品质因数。

$$k_v = \frac{\theta_p'}{e_p},$$

$$k_a = \frac{\theta_p''}{e_p}.$$

一般认为, 设计跟踪回路的速度品质因数  $k_v$ 、加速度品质因数  $k_a$  满足式(3), 即可认为设计满足精度跟踪要求。

$$\sqrt{\left(\frac{\dot{\theta}}{k_v}\right)^2 + \left(\frac{\ddot{\theta}}{k_a}\right)^2} \leq \epsilon_{\max}. \quad (3)$$

在保持系统开环截频的条件下, 可以有多种校正参数选择。在跟踪回路设计中, 速率稳定回路相当于惯性环节, 通过计算满足精度要求下的  $k_a$ 、 $k_v$  值, 确定系统的开环截频, 校正函数的增益, 决定系统的校正参数。

考虑到系统的稳定性, 跟踪回路通常校正成 I 型系统, 为了提高系统的稳定跟踪精度, 需要增大开环增益, 因此在此系统中采用滞后校正环节,

$$W_1(s) = \frac{k_p(T_4s+1)}{(T_3s+1)} = \frac{157 \times \left(\frac{1}{4.0}s+1\right)}{\frac{1}{0.48}s+1}$$

$$= \frac{29.25s+157}{2s+1}.$$

在数引跟踪过程中, 首先平台接收上位机给出的目标位置信息, 然后快速响应达到指定位置对目标进行稳定跟踪。

### 3.3 前馈函数的确定

由前馈控制的原理可知, 当伺服系统引入前馈控制后, 选用适当的前馈函数, 可以实现无误差跟踪, 系统的动态误差可表示为:

$$E(t) = C_0\theta_i(t) + C_1 \frac{d\theta_i(t)}{dt} + C_2 \frac{d^2\theta_i(t)}{dt^2} + \dots + C_n \frac{d^n\theta_i(t)}{dt^n}$$

式中,  $C_0, C_1, \dots, C_n$  是误差系数,  $\theta_e(s)$  为系统误差传递函数。

$$C_0 = \lim_{s \rightarrow 0} [\theta_e(s)];$$

$$C_1 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} [\theta_e(s) - C_0];$$

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^2} [\theta_e(s) - C_0 - C_1s];$$

$$C_3 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^3} [\theta_e(s) - C_0 - C_1s - C_2s^2];$$

⋮

$$C_n = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^n} \left[ \theta_e(s) - \sum_{k=0}^{n-1} C_k s^k \right].$$

由于系统的误差传递函数  $\theta_e(s)$  在坐标原点无极点, 因此可展开成级数形式如式(4)所示,

$$\theta_e(s) = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ns^n}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}, \quad (4)$$

将其代入系统误差的关系式, 得到:

$$C_0 = \lim_{s \rightarrow 0} [\theta_e(s)] = \frac{b_0}{a_0};$$

$$C_1 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} [\theta_e(s) - C_0] = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \left( \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots - C_0a_0 - C_0a_1s - C_0a_2s^2 - \dots}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n} \right)$$

$$= \frac{1}{a_0} (b_1 - C_0a_1);$$

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^2} [\theta_e(s) - C_0 - C_1s] =$$

$$\frac{1}{a_0} (b_2 - C_0a_2 - C_1a_1);$$

$$C_3 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^3} [\theta_e(s) - C_0 - C_1s - C_2s^2] =$$

$$\frac{1}{a_0} (b_3 - C_0a_3 - C_1a_2 - C_2a_1);$$

⋮

$$C_n = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^n} \left[ \theta_e(s) - \sum_{k=0}^{n-1} C_k s^k \right] =$$

$$\frac{1}{a_0} \left( b_n - \sum_{k=0}^{n-1} C_k a_{n-k} \right).$$

当全部误差系数为零时, 实现零误差跟踪, 按照不变性条件, 前馈函数应取导数, 即前馈函数具有高阶微分的特性, 这在工程上是办不到的, 而且高阶微分对干扰十分敏感, 会给整个系统带来附加误差。因此在实际工作中, 并非全部误差系数都等于零, 而是根据对系统误差的要求确定所设计的前馈补偿环节的基本参数。在本系统中选取信号的一阶导数作为前馈补偿信号, 即  $W_R(s) = \lambda_1 s$ 。

在系统中  $G(s)$  为:

$$G(s) = \frac{63.12s^2 + 2247s + 20000}{0.9235s^4 + 68.35s^3 + 2252s^2 + 10001s},$$

将  $W_R(s)$  代入误差传递函数, 得  $\lambda_1 = 1.01$ , 误差

系数  $C_1=0$ , 系统具有一阶无差度。将前馈控制器加入系统后, 给系统输入斜坡函数, 系统的输出如图 3 所示。图 2 是没加顺馈补偿时的斜坡输入产生的输出响应, 通过图 2 和图 3 的比较可以看出, 在引入前馈控制后, 系统的动态误差等于零; 而在引入前馈控制之前, 系统动态误差一直保留。

图 4 是某系统采用前馈后数引跟踪目标的图像, 方框表示跟踪目标, 采用前馈后, 系统数引跟踪目标精度高, 与无前馈相比较, 精度有明显提高, 与理论分析完全相符。

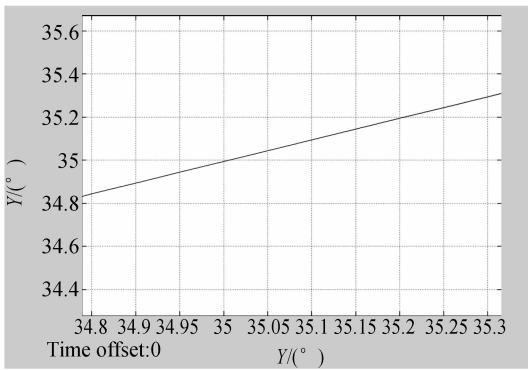


图 2 无前馈时, 斜坡输入系统的输出

Fig. 2 System output without feedforward under ramp input

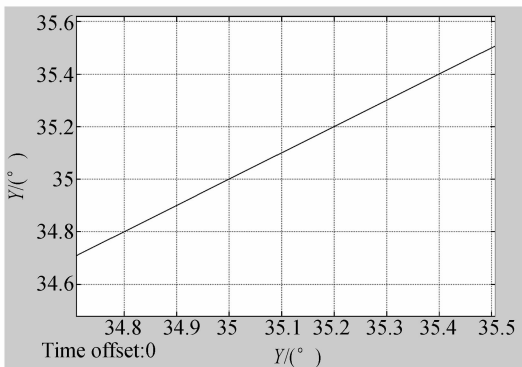


图 3 加前馈时, 斜坡输入系统的输出

Fig. 3 System output with feedforward under ramp input



图 4 加前馈时, 系统的数引跟踪图象

Fig. 4 Image of digital-leading system with feedforward

## 4 结 论

由实验结果可见, 在横坐标 35 这一点上, 未加前馈的系统纵坐标没有和 35 点重合, 而加上前馈以后的系统纵坐标却恰好在 35 这一点上, 仿真效果更加理想。因此加入前馈校正后, 减少了系统的跟踪误差, 提高了系统的跟踪精度。在给系统阶跃函数的情况下, 系统的过渡过程不受影响, 不影响系统闭环的稳定性, 复合控制改变了系统的无差度阶次提高了跟踪精度, 是复合控制能够提高精度的实质。通过在实际某型号中的应用, 前馈控制在数引跟踪目标中得到了满意的结果。

由于实现复合控制需要已知目标的输入, 且  $G(s)$  必须是确定的, 或可观的, 因而目前此项技术只能在数引跟踪中实现, 对于电视跟踪系统如想引入前馈控制, 则必须引入学习前馈控制方法。

## 参考文献:

- [1] PORAT B. A frequency domain approach to multiframe detection and estimation of dim targets[J]. *IEEE Trans. PAMI-12*(4), 1990:398-401.
- [2] REED I S. Optical moving-target indication algorithm for optical image sequences[J]. *IEEE T-AES-26*(3), 1990:

434-440.

- [3] FUSIELLO A, TRUCCO E, TOMMASINI T, *et al.*. Improving feature tracking with robust statistics pattern[J]. *Analysis & Applications*, 1999, 2: 312-320.
- [4] MAHENX J, CRUIKSHANK J. Video-rate image stabilization system[J]. *SPIE*, 1998, 3414: 232-238.
- [5] 赵红颖, 熊经武. 获取动态图像位移矢量的灰度投影算法的应用[J]. *光电工程*, 2001, 28(6): 51-54.  
ZHAO H Y, XIONG J W. Application of gray projection algorithm to acquiring displacement vectors of a dynamic image[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(6): 51-54. (in Chinese)
- [6] 易大义. 计算方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 29-66.  
YI D Y. *Calculation Method*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002: 29-66. (in Chinese)
- [7] MURATTEKALP A. 数字视频处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998: 88-104.  
MURATTEKALP A. *Digital Video Processing*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998: 88-104. (in Chinese)

作者简介: 孙丽娜(1973—), 女, 吉林长春人, 副研究员, 从事计算机软件设计与开发工作, 研究方向为数字图像处理与计算机仿真。E-mail: sunlina0431@sina.com

戴 明(1964—), 男, 湖北人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为光电平台稳定技术和图像稳定技术。

## ● 下期预告

# 微小型燃料电池测试系统气体流量控制

刘 冲<sup>1,2</sup>, 吴成百<sup>1</sup>, 张文涛<sup>1</sup>, 梁军生<sup>1</sup>, 王立鼎<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学 精密与特种加工技术教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023)

根据微小型直接甲醇燃料电池(DMFC)的测试需求, 使用工控机、多功能数据采集卡、比例流量阀、数字流量计等组件, 搭建了燃料电池气体流量控制子系统。使用 LabVIEW 软件编写了上位机控制程序, 应用改进的自适应 PID 控制算法, 实现气体流量的精确、稳定控制和对实验数据的实时处理。研究了流体伺服系统的组成和设计方法, 构建了气体流量伺服控制系统。根据压控恒流源的工作原理, 设计并制作了比例流量阀驱动器。针对驱动器的硬件特性, 改进了自适应 PID 控制算法, 并在 LabVIEW 环境下实现了该算法。使用改进后的 PID 控制算法并结合 PID 参数的调节, 使气体流量伺服控制系统的稳态精度达到了 $\pm 0.1$  L/min。系统流量阶跃输入分别为 0~5 L/min、0~10 L/min、0~20 L/min、0~50 L/min 时, 上升时间分别为 0.9、4.9、5.2、6.6 s, 超调量均 $\leq 0.23$  L/min, 满足了设计要求。