

文章编号 1004-924X(2009)02-0341-09

机载定向红外对抗激光指示系统控制设计

郭 劲¹, 苗用新^{1,2}, 林洪沂^{1,2}, 陈兆兵^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为提高机载激光指示设备三轴工作系统的控制精度,对其进行了建模仿真分析。根据拉格朗日定理推导出指示设备三轴耦合框架非线性动力学模型,对各框架回转轴之间速度耦合及动力学耦合进行分析,并理论推导出其解析关系。根据执行元件力矩电机的电学和力学方程,建立了被控制对象开环传递函数矩阵,并进一步设计串联解耦控制器来实现系统解耦控制。分析表明,解耦后,在系统中串联添加校正环节,可以使系统在稳定工作的同时达到快速响应的要求。阶跃响应速度最快时间为:方位框达 0.45 s,俯仰框达 0.50 s,横滚框为 0.85 s。最后,通过计算机仿真验证理论模型的正确性,为今后研究和设计高精度机载激光指示设备的控制器以及选取和优化控制参数提供了理论参考和模型基础。

关键词:激光指示设备;三轴系统;建模;耦合

中图分类号: TP391.9;V448.133 **文献标识码:** A

Controlling design of airborne DIRCM laser pointing system

GUO Jin¹, MIAO Yong-xin^{1,2}, LIN Hong-yi^{1,2}, CHEN Zhao-bing^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to improve the control precision of the three-axis operating system used in airborne laser pointer, a simulating model is established for system analysis. A three-axis, coupling and non-linear dynamic model is built based on Lagrange theorem, and by analyzing the velocity coupling and the dynamics coupling relationships among the axis of frames, their analytical relationships in theory are deduced. Then, according to electric and mechanic equations of the actuator-torque motor, the open-loop transfer function matrix of the control variable is established, and a cascade compensator is designed to decouple the control system. Analysis results show that the system can satisfy the quick-response requirement at working in stabilization after decoupling and adding correction function in series. The step response time are 0.45 s for the orientation frame, 0.50 s for the pitching frame, and 0.85 s for the across frame. Finally, the electro-mechanical model is verified through computer simulation, which sets a foundation and provides theoretical references for further research and design of

收稿日期:2008-04-23;修订日期:2008-07-10.

基金项目:国家“十一五”项目

the control system of high-precision airborne laser pointer.

Key words : laser pointer ;three-axis system ; modelling ; coupling

1 引言

定向红外对抗 (DIRCM) 对抗方式近年来取得了较为快速的发展。该技术的应用是建立在高性能机电设备及其控制的基础之上的。精确制导技术的迅速发展对火力控制系统提出了更高的要求,尤其是工作在机载平台上的火控系统,迫切需进一步提高其定位精度来实现满意的打击效果。

2 控制平台介绍

如图 1 所示,火控系统在工作状态下共有 3 个自由度:方位、俯仰、横滚(绕基座平面法向转动)。最内框为方位框,与反射镜片固连,同时,方位框通过方位轴与俯仰框相连,方位框可以绕方位轴相对于俯仰框转动。俯仰框通过俯仰轴与横滚框相连,可以绕俯仰轴相对于横滚轴转动。最

外面的框架是横滚框,通过横滚轴与基座相连,并可以绕横滚轴相对于基座转动,基座与飞机固连。方位力矩、俯仰力矩和横滚力矩由力矩电机通过 3 个转轴作用于 3 个框架上。如图 2 设计中方位轴的位置不同于传统三轴平台,通过改变方位框的位置,使俯仰框在更灵活的方位内转动,使平台俯仰角 $> 270^\circ$,而传统三轴结构俯仰角大都 $< 90^\circ$ 。

3 建立模型

建立模型要尽可能地考虑到所有的相关因素,如载机的运动,框架的转动惯量等,所以本文建立的模型方程是精确的,也是复杂的。之后,可以在精确模型的基础上,对其进行简化以方便控制器的设计和仿真。

3.1 建立坐标系

框架由方位框、俯仰框和横滚框组成,其结构的复杂性导致了运动的复杂性。坐标系的建立就是为了更为方便、清楚的研究各个框架的运动,以及各个运动之间的耦合关系,从而建立框架运动坐标系(如图 3):

o 系: $O-X_o Y_o Z_o$ 与方位框固连的运动坐标系, Z_o 与 Z_p 重合, o 系可绕 Z_o 轴相对于 p 系转动,转过角度为 α ,角速度为 $\dot{\alpha}$, X_o 轴为光学元件视轴;

p 系: $O-X_p Y_p Z_p$ 为 p 系原点沿 Y_p 方向平移距离 d 得到的坐标系;

p 系: $O-X_p Y_p Z_p$ 与俯仰框固连的运动坐标系, Y_p 与 Y_a 重合, p 系可绕 Y_p 轴相对于 a 系转动,转过角度为 β ,角速度为 $\dot{\beta}$;

a 系: $O-X_a Y_a Z_a$ 与俯仰框固连的运动坐标系, X_a 与 X_g 重合, z 系可绕 X_a 轴相对于 g 系转动,转过角度为 γ ,角速度为 $\dot{\gamma}$;

g 系: $O-X_g Y_g Z_g$ 与基座固连的运动坐标系,基座固连在飞机上,随飞机运动。基座相对于惯

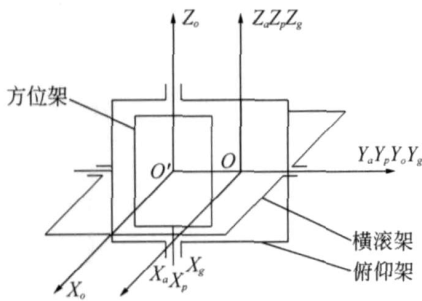
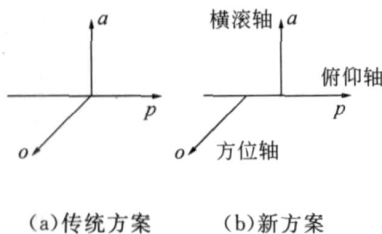


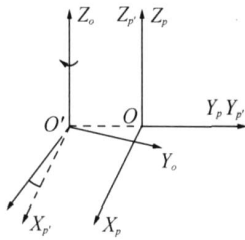
图 1 火控系统平台
Fig. 1 Frame of the laser firing platform



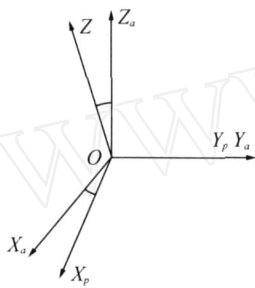
(a)传统方案 (b)新方案
(a)Traditional scheme (b)New scheme

图 2 传统方案与新方案比较
Fig. 2 Comparison of traditional scheme with new scheme

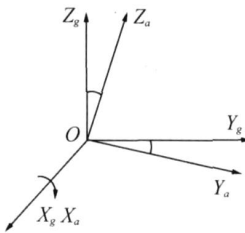
性系 n 的角速度在 X_g 轴、 Y_g 轴和 Z_g 轴上的投影分别为: 、 、 ;
 n 系为惯性系。



(a)



(b)



(c)

图 3 各坐标系之间的运动关系

Fig. 3 Motion relationships among coordinates

3.2 三轴框架的动力耦合

如图 1 所示,外框架运动时会直接带动与之相连的内框架做相同的运动。当俯仰框做俯仰运动时会带动方位框一起做俯仰运动;同理当横滚框运动时又会带动俯仰框做相同运动。这样,整个框架系统就把最外框的横滚运动,中间框的俯仰运动都耦合到方位框,使其具有方位、俯仰和横滚这 3 个方向的自由度,从而实现定位目标的功能。同时,基座的运动也将被耦合到这个系统中。

3.2.1 框架角速度计算

由于框架间存在耦合关系,在计算框架角速度的时候,采用 3×3 阶矩阵进行变化。如图 2,通过框架间的相对运动关系得到各系之间的转换矩阵 C_{ij} (由 i 系到 j 系的变换矩阵)。

图 3 中,(a)为 o 系统 Z_o 轴相对于 p 系的转动,转过角度为 ;(b)为 p 系统 Y_p 轴相对于 a 系转动,转过角度为 ;(c)为 a 系统 X_a 轴相对于 g 系转动,转过角度为 。

$$C_{po} = \begin{bmatrix} \cos & \sin & 0 \\ -\sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C_{pa} = \begin{bmatrix} \cos & 0 & -\sin \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin & 0 & \cos \end{bmatrix},$$

$$C_{ga} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & \sin \\ 0 & -\sin & \cos \end{bmatrix}。$$

为了便于计算各框架坐标系之间角速度投影,用 ${}_{ijk}$ 表示 i 系相对于 j 系的角速度在 k 系上的投影:

$${}_{opo} = (0 \ 0 \ 0)^T;$$

$${}_{pap} = (0 \ 0 \ 0)^T;$$

$${}_{aga} = (0 \ 0 \ 0)^T;$$

$${}_{gng} = (\quad \quad \quad)^T;$$

从框架的几何关系可以得出: ${}_{opo} = {}_{opp}$,

$${}_{pap} = {}_{ppa}, \quad {}_{aga} = {}_{agg}。$$

3.2.2 框架模型的简化

为简化计算,将横滚框与原基座视为新基座来构建框架的数学模型,横滚框相对于惯性系的角速度为: ${}_{ana} = C_{ga} \quad {}_{gng} + {}_{aga} = (\quad , \quad , \quad)^T$ 其中, \quad , \quad , \quad 分别表示横滚框相对于惯性系的角速度在轴 X_a, Y_a, Z_a 上的投影,视其为新基座的角速度参数。

俯仰框相对于惯性系的角速度为:

$${}_{mnp} = C_{ap} C_{ga} \quad {}_{gng} + C_{ap} \quad {}_{aga} + \quad {}_{pap} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos & - & \sin \\ & + & \\ \sin & + & \cos \end{pmatrix}, \quad (1)$$

方位框相对于惯性系的角速度为：

$$\omega_{no} = C_{po} C_{ap} C_{ga} \omega_{ng} + C_{po} C_{ap} \omega_{ga} + C_{po} \omega_{pap} + \omega_{poo} = \begin{pmatrix} \sin \alpha + \cos \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha + \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha + \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \cdot (2)$$

3.3 建立框架动力学方程

3.3.1 建立方位框动力学方程

根据动量定理可得，方位框绕定点 o 的动量矩为：

$$\frac{dH_o}{dt} = \left\{ m_{io} r_{io} \times [\omega_{no} \times (\omega_{no} \times r_{io})] + m_{io} r_{io} \times (\omega_{no} \times r_{io}) \right\},$$

其中， $r_{io} = r_{io} + d_o$ 。

作用在方位框上的转动轴力矩总和为 $\frac{dH_o}{dt}$ 在 o 系 Z 轴上的分量，即：

$$M_1 = \left(\frac{dH_o}{dt} \right)_z. \quad (3)$$

3.3.2 建立俯仰框动力学方程

由动量矩定理得俯仰框对定点 o 的动量矩为：

$$\frac{dH_p}{dt} = \left\{ m_{ip} r_{ip} \times [\omega_{pnp} \times (\omega_{pnp} \times r_{ip})] + m_{ip} r_{ip} \times (\omega_{pnp} \times r_{ip}) \right\}.$$

作用在俯仰框转动轴的力矩总和等于 $\frac{dH_p}{dt}$ 投

影到 p 系沿 y 轴的分量与 $\frac{dH_p}{dt}$ 在 p 系上沿 y 轴的分量的和，即

$$M_2 = \left[C_{op} \left(\frac{dH_p}{dt} \right) \right]_y + \left(\frac{dH_p}{dt} \right)_y. \quad (4)$$

作用在横滚框转动轴的力矩总和等于 $\frac{dH_g}{dt}$ 和

$\frac{dH_o}{dt}$ 投影到 g 系沿 x 轴的分量与 $\frac{dH_g}{dt}$ 在 g 系上沿 y 轴的分量的和，即

$$M_3 = \left\{ C_{og} \left\{ C_{pu} \left[C_{op} \left(\frac{dH_p}{dt} \right) \right] + \left(\frac{dH_p}{dt} \right) \right\} + \left(\frac{dH_g}{dt} \right) \right\}_x. \quad (5)$$

3.4 动力学方程简化

由上一节中的式(1)~式(5)可以计算出框架的精确动力学模型，但方程过于复杂，不便于跟踪控制器的设计和仿真，所以这里进一步对其简化。设方位框上反射镜片和俯仰框在自身固连系下对横滚轴、俯仰轴和方位轴的转动惯量分别为： $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ ，并且，模型满足：(a)方位框绕自身轴的转角 $\leq 5^\circ$ ；(b)基座的方位角速度和俯仰角速度满足 $\leq 5^\circ/s$ 。因此，可以近似取 $\sin \alpha = \alpha, \sin 2\alpha = 2\alpha, \cos \alpha = 1, \cos 2\alpha = 1$ 。基座的方位角速度和俯仰角速度满足 $\leq 5^\circ/s$ ，为较小量，由此可得 $\sin \alpha \approx \alpha, \sin 2\alpha \approx 2\alpha$ ，同样为较小量，忽略含有高阶较小量的项而化简得：

$$M_1 = C_1 \omega_{no}^2 + (B_1 - A_1) \omega_{no}^2 + (A_1 - B_1) \omega_{no}^2 \cos^2 \alpha + (B_1 - A_1 + C_1) \omega_{no} \cos \alpha + C_1 \omega_{no} \sin \alpha + C_1 \omega_{no} \cos \alpha - (A_1 - B_1) \omega_{no} \cos \alpha - C_1 \omega_{no} \sin \alpha + (A_1 - B_1) \omega_{no} \sin \alpha, \quad (6)$$

$$M_2 = (B_1 + B_2) \omega_{pnp}^2 + 2(A_1 - B_1) \omega_{pnp} \omega_{no} + (A_1 - B_1 - C_1) \omega_{no} \cos \alpha + 0.5(A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \omega_{no}^2 \sin 2\alpha + (B_1 + B_2) \omega_{pnp} + (A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \omega_{no} \cos 2\alpha. \quad (7)$$

通过同样的方式可以得到作用在横滚框的转动轴上的力矩总和为：

$$M_3 = (A_1 + A_2 \cos^2 \alpha + C_2 \sin^2 \alpha + A_3 \cos^2 \alpha + B_3 \cos^2 \alpha) \omega_{gno}^2 + (A_3 - B_3) \omega_{gno} \cos \alpha + C_3 \omega_{gno} \sin \alpha + (C_2 - A_2 - A_3 - B_3 + C_3) \omega_{gno} \sin 2\alpha + 2(A_3 - B_3) \omega_{gno} \cos^2 \alpha + 2(B_3 - A_3) \omega_{gno} \sin \alpha + [C_3 + A_3 - B_3] \omega_{gno}. \quad (8)$$

3.4 驱动电机及负载的机电系统数学模型的建立

转台关节处驱动电机采用电枢控制直流永磁力矩电机，一般忽略电枢电感，则其电压平衡方程为：

$$u_a(t) = R_a i_a(t) + E_a, \quad (9)$$

式中： u_a 为电枢电压(V)； i_a 为电枢电流(A)； R_a 为电枢电阻(Ω)； E_a 为反电动势(V)。

而机电耦合关系为：

$$\begin{cases} M_a(t) = C_a i_a(t) \\ E_a = C_e \omega_a(t) \end{cases}, \quad (10)$$

式中： M_a 为电机给出力矩(N·m)； C_a 为电流-力矩比例常数(N/A)； C_e 为电机反电动势比例常数(V/(rad·s⁻¹))； ω_a 为电机轴输出角速度(rad/s)。

由式(6)-(10)联立并线性化可得电机转轴力矩平衡方程为：

$$u_1(t) = \frac{R_{a1}}{C_{a1}} \{ [C_1 \sin \quad , 0, C_1] \left[\begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right] + [\{ (A_1 - B_1) \cos^2 - A_1 \cos + (A_1 - B_1) \cos \} , \{ (B_1 + C_1) \cos + (B_1 - A_1) + (A_1 - B_1 - C_1) \sin \} , \frac{C_{a1} C_{c1}}{R_{a1}}] \left[\begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right] + C_1 \cos \} , \quad (11)$$

$$u_2(t) = \frac{R_{a2}}{C_{a2}} \{ [0, (B_1 + B_2), 0] \left[\begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \frac{1}{2} (A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \sin 2 + \\ (A_1 - B_1 - C_1) \cos + \quad , 2(A_1 - B_1) + \frac{C_{a2} C_{c2}}{R_{a2}} , 0 \\ (A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \cos 2 \} \right] \left[\begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right] + (B_1 + B_2) \} . \quad (12)$$

$$u_3(t) = \frac{R_{a3}}{C_{a3}} \{ [A_1 + A_2 \cos^2 + C_2 \sin^2 + A_3 \cos^2 , (A_3 - B_3) \cos + C_3 \sin , 0] \left[\begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \{ ^2 B_3 \cos^2 + \\ (C_2 - A_2 - A_3 - ^2 B_3 + C_3) \sin 2 \quad \{ (B_3 - A_3) \sin \\ + 2 \quad (B_3 - A_3) \cos^2 + \frac{C_{a3} C_{c3}}{R_{a3}} \} \quad + (C_3 + A_3 - B_3) \cos \} \quad 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right] \} . \quad (13)$$

3.5 驱动电机及负载的机电系统解耦控制

下面采用输出反馈加补偿器的方法来为系统设计串联补偿器以进行解耦(串联解耦)^[6]。经过拉氏变换,可将式(11)-(13)整理成 $U(s) = G_p(s)U(s)$ 的形式。式(14)中, $G_p(s)$ 为被控对象 $U(s)$ 的传递函数矩阵, $U(s) = [u_3(s), u_2(s), u_1(s)]^T$;

$(s) = [(s), (s), (s)]^T$ 。设计一个串联补偿器 $G_c(s)$ 与 $G_p(s)$ 串联后组成单位反馈回路,使得系统传递函数矩阵变换成一个对角矩阵。此时,系统等效于 3 个独立的控制系统,这就是串联解耦方法。

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{R_{a1}}{C_{a1}} & \frac{R_{a1}}{C_{a1}} & \frac{R_{a1}}{C_{a1}} \\ \frac{(A_1 + A_2 + A_3) s^2 + \frac{C_{a3} C_{c3}}{R_{a3}} s}{(A_1 + A_2 - C_1 - C_2) s} & \frac{R_{a2}}{C_{a2}} & \frac{R_{a2}}{C_{a2}} \\ 0 & \frac{R_{a2}}{C_{a2}} & \frac{R_{a2}}{C_{a2}} \\ 0 & \frac{(B_1 + B_2) s^2 + \frac{C_{a2} C_{c2}}{R_{a2}} s}{(B_1 + C_1) s} & \frac{R_{a3}}{C_{a3}} \\ & 0 & \frac{R_{a3}}{C_{a3}} \\ & & \frac{C_1 s^2 + \frac{C_{a1} C_{c1}}{R_{a1}} s}{(A_1 - B_1) s} \end{bmatrix} , \quad (14)$$

在驱动电机及负载的机电系统中,系统开环传递函数矩阵 $G_0(s)$ 和闭环传递函数矩阵 $G(s)$ 之间满足: $G(s) = [I + G_0(s)]^{-1} G_0(s)$, 式中 I 为单位矩阵。若已知 $G_0(s)$ 可以求得系统开环传递函

数矩阵 $G(s)$ 。又有 $G_0(s) = G_p(s) G_c(s)$, 其中 $G_c(s)$ 为串联补偿器, 假设有一个 $G_c(s)$ 使得开环传递函数矩阵为:

$$G_0(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{(A_1 + A_2 + A_3)s^2 + \frac{C_{a3} C_{e3}}{R_{a3}} s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(B_1 + B_2)s^2 + \frac{C_{a2} C_{e2}}{R_{a2}} s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_1 s^2 + \frac{C_{a1} C_{e1}}{R_{a1}} s} \end{bmatrix} \quad (15)$$

此时, 串联补偿器为:

$$G_c(s) = \begin{bmatrix} \frac{C_{a1}}{R_{a1}} [(A_1 + A_2 + A_3)s^2 + \frac{C_{a3} C_{e3}}{R_{a3}} s] & \frac{C_{a1}}{R_{a1}} [(B_1 + B_2)s^2 + \frac{C_{a2} C_{e2}}{R_{a2}} s] & \frac{C_{a1}}{R_{a1}} [C_1 s^2 + \frac{C_{a1} C_{e1}}{R_{a1}} s] \\ (A_1 + A_2 + A_3)s^2 + \frac{C_{a3} C_{e3}}{R_{a3}} s - 1 & (B_1 + B_2)s^2 + \frac{C_{a2} C_{e2}}{R_{a2}} s - 1 & C_1 s^2 + \frac{C_{a1} C_{e1}}{R_{a1}} s - 1 \\ 0 & \frac{C_{a2}}{R_{a2}} [(B_1 + B_2)s^2 + \frac{C_{a2} C_{e2}}{R_{a2}} s] & \frac{C_{a2}}{R_{a2}} [C_1 s^2 + \frac{C_{a1} C_{e1}}{R_{a1}} s] \\ 0 & (B_1 + B_2)s^2 + \frac{C_{a2} C_{e2}}{R_{a2}} s - 1 & (B_1 + C_1) (C_1 s^2 + \frac{C_{a1} C_{e1}}{R_{a1}} s - 1) \\ 0 & 0 & \frac{C_{a3}}{R_{a3}} [C_1 s^2 + \frac{C_{a1} C_{e1}}{R_{a1}} s] \\ & & C_1 s^2 + \frac{C_{a1} C_{e1}}{R_{a1}} s - 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

通过串联补偿器可以实现对系统的解耦, 但此时控制系统响应并不能满足要求。因此, 对系统进一步校正, 在每个支路分别串接一个 $ks + 1$ 的控制环节 (式中 k 为待定参数) 来校正控制系统, 提高火控系统性能。

3.4 计算机仿真

综合上面的理论基础, 对框架的解耦控制系统进行仿真设计。具体参数的选取如表 1 所示:

表 1 机电系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of electromechanical system

A_1	B_1	C_1	A_2	B_2	C_2
2.86	2.13	2.65	4.12	4.02	1.24
A_3	B_3	C_3	C_{a1}	C_{a2}	C_{a3}
12.65	8.45	8.23	8.49	16.58	20.36
C_{e1}	C_{e2}	C_{e3}	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}
9.23	18.21	21.46	2.6	3.2	4.9

表中各参数单位均采用国际标准单位。将选定参数代入式 (14), (16), 结合图 4 所示变换, 在

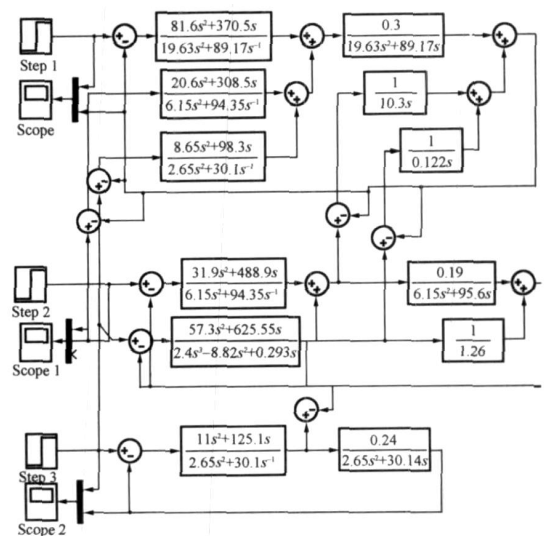
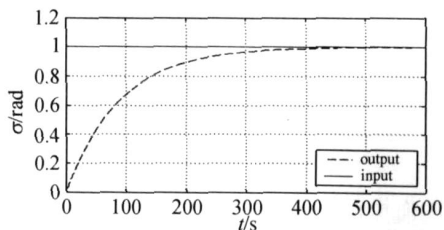
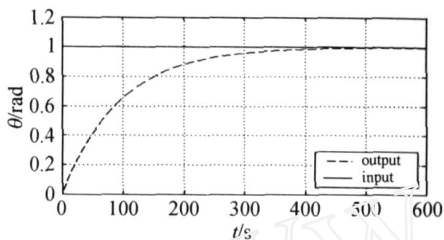


图 4 系统控制模型

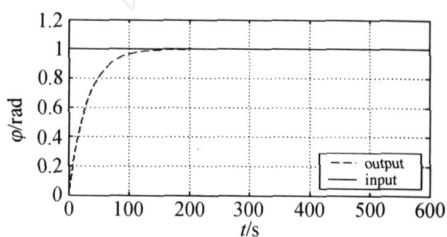
Fig. 4 Model of control system



(a) 等效基座阶跃响应
(a) Step response of equilibrium base



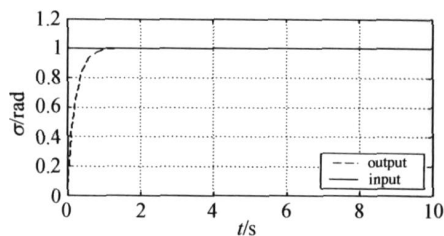
(b) 俯仰框阶跃响应
(b) Step response of pitching frame



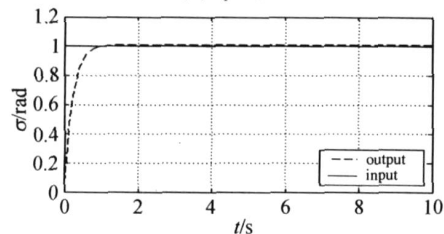
(c) 方位框阶跃响应
(c) Step response of orientation frame

图 5 解耦控制系统阶跃闭环响应

Fig. 5 Step responses of decoupling control system



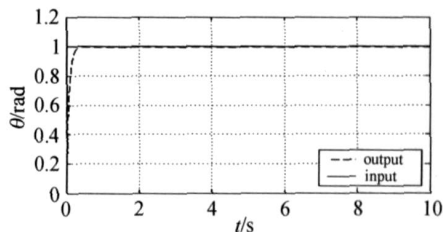
(a) $k_1 = 89$



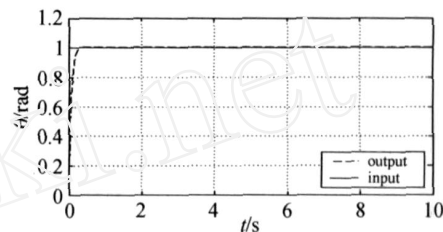
(b) $k_1 = 90$

图 6 横滚框控制系统校正后阶跃响应

Fig. 6 Step responses of across frame controlling system after correction



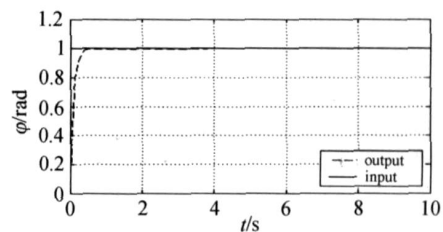
(a) $k_2 = 94$



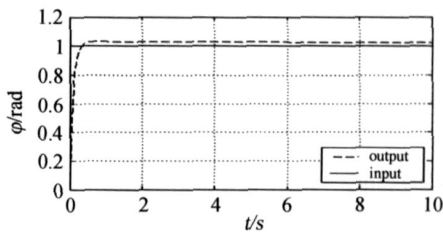
(b) $k_2 = 95$

图 7 俯仰框控制系统校正后阶跃响应

Fig. 7 Step responses of pitching frame controlling system after correction



(a) $k_3 = 30$



(b) $k_3 = 31$

图 8 方位框控制系统校正后的阶跃响应

Fig. 8 Step responses of orientation frame controlling system after correction

Simulink 下构建系统控制模型如图 4 所示。

采用阶跃输入对解耦控制系统进行仿真,试验结果如图 5 所示。

可以看到,各个框架控制系统到达稳定状态

的时间远远超出了系统的要求。下面,对校正后的解耦控制系统进行仿真,其结果如图 6,图 7,图 8 所示。

从仿真结果可以看出,结合电子器件的参数合理选择参数 k ,就能获得足够的精度来完善火控系统的性能。而一般三轴跟瞄系统,各框架系统阶跃响应时间大多在 1 s 以上。

4 结 论

针对一种新型的三轴结构的控制系统进行

了仿真设计,得到其解耦控制模型。采用先解耦后校正的控制方法对系统控制模型进行设计。通过先假设开环传递函数矩阵,再求解解耦控制器来实现系统解耦从而使校正环节满足 $k_s + 1$ 的形式,进而可以仅调节参数 k 便能控制整个系统的控制精度,并在理想状态下,系统的阶跃响应时间满足:阶跃响应速度最快时间为方位框 0.45 s,俯仰框 0.50 s,横滚框为 0.85 s,从而提高了系统控制精度。

参考文献:

- [1] 王建立,吉桐伯,高昕,等. 加速度滞后补偿提高光电跟踪系统跟踪精度的方法[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(6): 681-685.
WANG J L, JI T B, GAO X, et al. Study of Improving the Optoelectronic System Capability to Track Moving Targets by Using Acceleration Delay Compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 681-685. (in Chinese)
- [2] 李慧,沈湘衡. 光电经纬仪的机电动力学建模与耦合[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1577-1582.
LI H, SHEN X H. Electromechanical dynamic modeling and coupling for optoelectronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1577-1582. (in Chinese)
- [3] 王家骥,金光,颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(2): 105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracing and measuring device[J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)
- [4] 范大鹏,张智永,范世[←],等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 673-680.
FAN D P, ZHANG ZH Y, FAN SH X, et al. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 673-680. (in Chinese)
- [5] 高昕,王建立,吉桐伯,等. 光电跟踪器传递函数参数的测试及其相位补偿[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(增): 42-45.
GAO X, WANG J L, JI T B, et al. Affection of TV tracker to TV tracking system and the compensation methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 42-45. (in Chinese)
- [6] 张智永,范大鹏,范世[←]. 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.
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(4): 681-688. (in Chinese)
- [7] 张丽敏,郭劲. 快速反射镜双 X-Y 轴控制的仿真研究[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(增): 142-147.
ZHANG L M, GUO J. Simulative research on dual X-Y axis control of fast steering mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 142-147. (in Chinese)
- [8] 李文军,陈涛. 光电跟踪系统噪声分析及其抑制[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(2): 254-260.
LI W J, CHEN T. Analysis and restraining of random noise of Optoelectronic tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 254-260. (in Chinese)
- [9] 李岷,马军,周兴义. 机载光电稳定平台检测技术的研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(5): 847-852.
LI M, MA J, ZHOU X Y. Study of measurement technique on airborne photoelectric stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 847-852. (in Chinese)
- [10] 田延岭,张大卫,闫兵. 二自由度微定位平台的研制[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 94-99.
TIAN Y L, ZHANG D W, YAN B. Development of a 2-DOF micropositioning table[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 94-99. (in Chinese)
- [11] HIKERT J M, JONAS M. A unique three-axis gimbal mechanism [J]. *SPIE*, 2008, 6971:

69710 E.

[12] JONAS M. Method and system for adjusting a po-

sition of an object: U. S. ,7241103 [P]. 2007-07-10.

作者简介:



郭 劲(1964 -),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗技术的研究。E-mail: guojin_1964 @126.com

林洪沂(1982 -),男,山东聊城人,博士研究生,主要从事激光设备的研究。E-mail: linyi0714 @163.com

陈兆兵(1981 -),男,山东日照人,博士研究生,主要从事激光告警设备的研究。E-mail: chenzhaobing @mail.com



苗用新(1982 -),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事机载光电设备的研究。E-mail: myx1982 @126.com

下期预告

基于局部和全局结构保持的流形学习算法

黄 鸿¹,李见为^{1,2},冯海亮¹

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030;

2. 重庆工学院 教授流动站,重庆 400050)

提出了一种新的局部与全局结构保持嵌入(Local and Global Preserving Embedding, LGPE)算法。LGPE方法通过假定目标空间的整体映射函数,然后结合数据的全局几何结构的分布信息进行数据重构,最后通过最小化准则函数来得到嵌入于高维空间的低维子流形。LGPE方法在保持数据局部结构的同时保留全局结构信息,在信噪比为 10 dB 的稀疏 Swiss-roll ($N = 400$) 和 COIL-20 多姿态数据集取得了较好的维数约简效果,且在 AT&T 人脸图像库中相对其他局部流形学习方法,在嵌入特征向量维数 $d < 40$ 时,识别率提高了约 15%。在人工与真实数据库上的实验结果表明,本文方法对噪声和稀疏数据具有较好的鲁棒性。