

文章编号: 1003-501X(2004)Sup-0008-04

星载空间目标光电跟踪角速度伺服系统设计

徐小琴, 孙华燕

(装备指挥技术学院测量控制系, 北京 101416)

摘要: 设计了星载空间目标光电跟踪角速度伺服系统, 它包括补偿校正环节、驱动功放环节、以光学望远镜和跟踪架为被控制对象的机械操作环节以及视轴稳定回路。选择直流力矩电机作为跟踪架驱动元件, 以提高系统的跟踪精度。利用 Matlab 进行系统特性仿真的结果表明, 设计的系统相角裕度为 69° , 幅值裕度为 35.8dB, 截止频率为 10rad/s, 调节时间为 0.7s, 具有良好的跟踪性能, 达到了预期的要求。

关键词: 光电跟踪系统; 伺服系统; 角速度; 目标跟踪

中图分类号: TP273; V556

文献标识码: A

Design of a spaceborne angular velocity servo system for electro-optical tracking of space targets

XU Xiao-qin, SUN Hua-yan

(Department of Tracking and Control, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: A spaceborne angular velocity servo system for electro-optical tracking of space targets is designed, which consists of a compensator, a driver and a power amplifier, a mechanical assembly to control optical telescope and tracking gimbal and the LOS stabilization loop. A DC moment motor is used as the gimbal driving element to improve the tracking accuracy of the system. The property of system is simulated with Matlab and it shows that the system has phase margin for 69° , gain margin for 35.8dB, cut-off frequency for 10rad/s and regulating time for 0.7s. The system has good tracking performance and meets with our expected requirements.

Key words: Electro-optical tracking systems; Servo systems; Angular velocity; Target tracking

引言

星载空间目标光电跟踪系统由于其特殊的卫星平台工作环境, 对跟踪精度、响应速度、跟踪平稳性以及最低跟踪速度都有着相当高的要求。总的跟踪系统主要包括角速度稳定伺服回路及位置跟踪伺服回路, 其中角速度伺服回路作为内回路起稳定跟踪角速度及保证跟踪精度的作用, 包括补偿校正环节、驱动功放环节和以光学望远镜、跟踪架为被控制对象的机械操作环节。此外, 为降低星载扰动影响, 系统还必须具有视轴稳定回路, 这里采用扰性动力调谐陀螺仪作为视轴稳定回路的角振动传感器。星载空间目标光

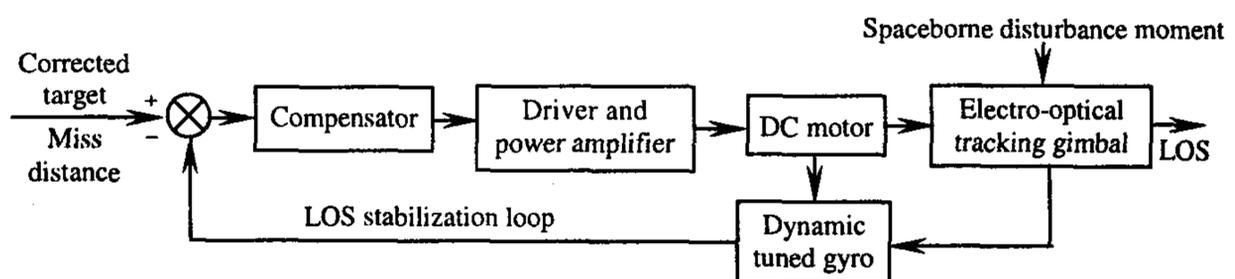


图 1 跟踪系统角速度伺服回路基本组成方框图

Fig.1 The basic form block diagram of tracking system angular velocity servo-loop

收稿日期: 2004-09-21; 收到修改稿日期: 2004-10-21

作者简介: 徐小琴(1980-), 女(汉族), 四川德阳人, 硕士生, 主要从事光电信息处理研究工作。E-mail: xxqtrybest@163.com

电跟踪角速度伺服系统的基本组成如图1所示。

1 星载光电跟踪角速度伺服系统的初步分析

1.1 系统光电跟踪架驱动元件的选择

星载光电跟踪角速度伺服系统应具有很高的跟踪精度及稳定性能。作为光电跟踪架驱动元件，选用直流力矩电机，采用电机与负载轴同轴直接驱动的结构，以保证系统具有较高的耦合刚度和高机械谐振频率，能获得大的伺服带宽和高的伺服刚度，以及更高的位置精度和分辨率。这种结构还具有很高的力矩——惯量比，加上直流力矩电机的电流上升速度快，使得其具有很好的加速能力及快速响应能力。直流力矩电机体积小、重量轻、低速性能好，这些特点非常适合快速跟踪高速运行的空间目标，也是以卫星为平台的特殊工作环境所需要的。在设计中我们选择 J160LYX060G 力矩电机，其测试数据如表 1。

表 1 J160LYX060G 力矩电机性能测试数据表

Table 1 The performance testing data table of J160LYX060G motor

Performance specification	Peak value locked-rotor			Continuous locked-rotor			Maximum no-load rev $\Omega_0/(r/min)$	Armature resistance R_t/Ω	Armature inductance L_t/mH	Moment of inertia $g \cdot cm \cdot s^2$
	Unit	V_p	M_p/Nm	I_p/A	V	A				
Testing data	60	28	8.15	24	3.26	11	130	7	12	210

设负载惯量矩 $J_T = 1.2kg \cdot m \cdot s^2$ ，由表 1 可求出力矩电机相关参数。其中，反电势常数 $K_B = V_p/\Omega_0 = 4.4V \cdot rad^{-1} \cdot s$ ，力矩常数 $K_T = M_p/I_p = 3.44Nm \cdot A^{-1} = 0.35kg \cdot m \cdot A^{-1}$ ，电气时间常数 $T_e = L_t/R_t = 0.0017s$ ，机械时间常数 $T_m = (J_T \cdot R_T) / (K_B \cdot K_T) = 5.45s$ ，故带负载的电机传递函数为

$$G_d(s) = \Omega_g(s) / U_g(s) = K_B^{-1} [1 + T_m(s)]^{-1} [1 + T_e(s)]^{-1} = 0.227 [(1 + 5.45s)(1 + 0.0017s)]^{-1} \quad (1)$$

1.2 角速度稳定伺服系统相关性能指标的分析

系统性能指标主要包括稳定裕度、动态指标及频域指标。

对于反应系统稳定程度的相角裕度 γ ，要求校正后的范围为 $(45^\circ, 75^\circ)$ 。若过低于此范围，则系统的动态性能较差，对参数变化的适应能力较弱；而过高于此范围，意味着对整个系统及其组成部件要求较高，会造成实现上的困难。要实现满意的相角裕度，开环对数幅频特性在中频区的斜率应为 $-20dB/dec$ ，并在中频区占据一定的频带，以保证在系统参数变化时相角裕度变化不大。同时，要设计高稳定性的系统，也要求幅值裕度 h 大于 $10dB$ 。

对于动态指标，这里主要考虑过渡过程调节时间 t_s ，一般要求 t_s 在 $1s$ 以内。

对于频域指标，文中主要考虑能较好反应系统频率特性的截止频率 ω_c ， ω_c 不应选得过高。

根据以上指标分析及实际星载跟踪系统要求，提出的角速度伺服系统的性能指标为

- 1) 相角裕度 $\gamma \geq 40^\circ$;
- 2) 幅值裕度 h 不低于 $10dB$;
- 3) 过渡过程调节时间 $t_s \leq 1s$;
- 4) 截止频率 $\omega_c < 40rad/s$ 。

2 角速度伺服系统的总体设计

星载空间目标光电跟踪系统为了克服跟踪传感器视轴晃动，必须采用视轴稳定技术。角速度伺服系统实质上是一种视轴稳定系统，其传递函数如图 2 所示。

角速度稳定回路在整个

工作过程中，可看作是相对扰动力矩输入的力矩平衡系统，对星载平台的晃动或其他动态干扰引起的跟踪望远镜视轴晃动起补偿作用，以保持视轴在惯性空间的相对平衡及稳定。

设计中选择 5206 型扰性动力调谐陀螺仪，其陀螺信号器灵敏度 K_g 为 $248V/rad$ ，时间常数 T_G 为 $40s$ 。光电跟踪传感器及其光学系统安装在三轴陀螺稳定平台上，并在此基础上实现空间目标的跟踪。

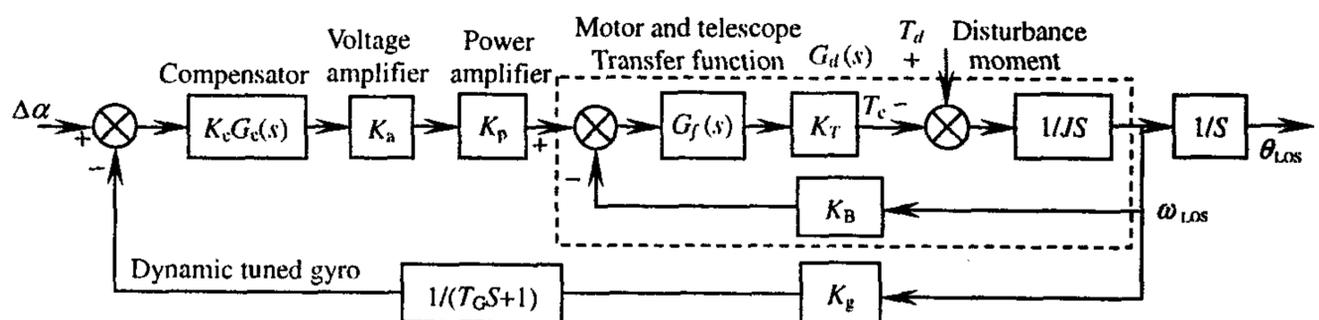


图 2 角速度伺服稳定系统的传递函数方框图

Fig.2 Transfer function block diagram of angular velocity servo stability system

图中虚线框内表示力矩电机及望远镜传递函数，表为传递函数 $G_d(s)$ ； T_d 表示星载扰动力矩； K_a 为电压放大器增益， K_b 为功率级增益，一般情况下，两者都可在一定范围内选择，这里设 K_a 为 7， K_b 为 10。未加校正补偿的系统开环传递函数 $G_g(s)$ 为

$$G_g(s) = K_a K_p G_d(s) K_g (T_G s + 1)^{-1} = 3939 [(1 + 5.45s)(1 + 0.0017s)(1 + 40s)]^{-1} \quad (2)$$

$G_g(s)$ 的 Bode 图如图 3，记为 $L'(\omega)$ ，由图可知，系统的截止频率 ω_c 为 4.2rad/s，相角裕度 γ 为 2° ，幅值裕度 h 为 18dB， ω_c 及 γ 不满足所要求的指标范围。采用经典的频率法校正，比较待校正系统幅频特性及设计要求，需使相角裕度 γ 由 2° 提高至 $45^\circ < \gamma < 75^\circ$ ，截止频率 ω_c 由 4.2rad/s 提高至几十 rad/s，中频区斜率为 -20dB/dec，同时占据一定的频率范围。由于串联超前校正可提高系统截止频率和相角裕度，并使闭环带宽增大，响应速度加快，故选择串联超前校正网络。

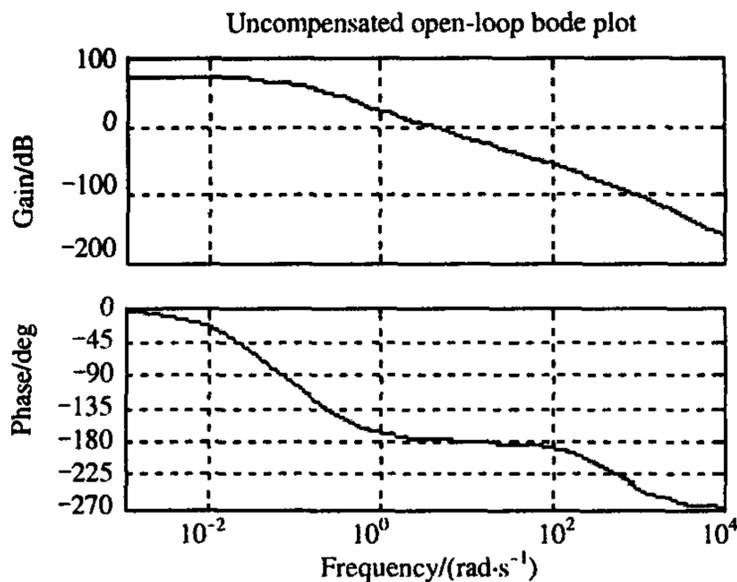


图 3 未校正角速度伺服系统开环 Bode 图

Fig.3 Open-loop bode plot of uncorrected angular velocity servo system

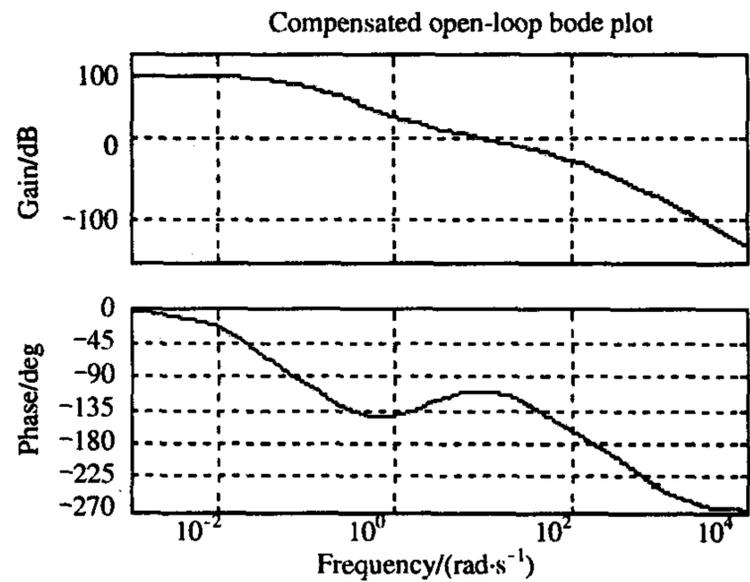


图 4 校正后角速度伺服系统开环 Bode 图

Fig.4 Open-loop bode plot of corrected angular velocity servo system

设校正网络为 $K_c G_c(s) = (1 + aTs)/(1 + Ts)$ ，其中 a 、 T 为超前网络参数，记超前校正网络对数幅频特性曲线为 $L_c(\omega)$ 。由星载空间目标跟踪要求，设稳态误差 $\theta_e = 2''$ (角秒)，最大跟踪速度 $\Omega_{\max} = 0.92^\circ/s$ ，则所要求的开环增益为

$$K_v = \sqrt{2} \Omega_{\max} / \theta_e \quad (3)$$

代入已知参数，可得出 $K_v = 2342$ ，故需取角速度稳定跟踪伺服系统开环增益 $K_0 > K_v$ 。由(2)式知，系统开环增益 $K_0 = 3939$ ，满足设计要求。

根据截止频率 ω_c 的要求及曲线 $L'(\omega)$ ，计算超前网络参数 a 及 T 。这里关键是选择最大超前角频率 ω_m 等于所要求的 ω_c ，保证系统的响应速度并充分利用网络相角超前特性。 $\omega_m = \omega_c$ 成立的条件是

$$-L'(\omega_c) = L_c(\omega_m) = 10 \lg a \quad (4)$$

由图 3 知， $L'(\omega) = L'(10) = -14.5 = 10 \lg a$ ，则可得 $a = 28.2$ ，已知要求 $\omega_m = 10 \text{ rad/s}$ ，再由式 $T = 1/(\omega_m \sqrt{a})$ ，可得 $T = 0.019$ 。由上得出校正网络传递函数 $K_c G_c(s) = (1 + 0.54s)/(1 + 0.019s)$ ，则校正后系统开环传递函数为

$$G_j(s) = K_a K_p G_d(s) K_g (T_G s + 1)^{-1} K_c G_c(s) = (2127s + 3939) (0.007s^4 + 4.506s^3 + 218.4s^2 + 45.46s + 1)^{-1} \quad (5)$$

绘制出校正后开环传递函数的 Bode 图如图 4，可知，系统相角裕度 γ 由 2° 提高至 69° ，截止频率 ω_c 由 4.2rad/s 提高至 10rad/s，幅值裕度 h 为 35.8dB，中频区斜率为 -20dB/dec，同时占据 $(1/aT, 1/T) = (1.9, 52.5)$ 约为 50rad/s 的频率范围。由此可见，校正后开环系统各项性能指标能较好地满足要求。

校正后的跟踪角速度伺服系统闭环回路传递函数为

$$G_b(s) = \frac{K_a K_p G_d(s) K_c G_c(s) (T_G s + 1)}{1 + K_a K_p G_d(s) K_c G_c(s) K_g} = \frac{343.1s^2 + 643.9s + 15.88}{0.007s^4 + 4.506s^3 + 218.4s^2 + 2172s + 3940} \quad (6)$$

绘制出 $G_b(s)$ 的 Bode 图如图 5，以及校正后系统的阶跃响应曲线如图 6，可知系统过渡过程的调节时间 $t_s = 0.7s$ ，动态性能指标满足设计要求。

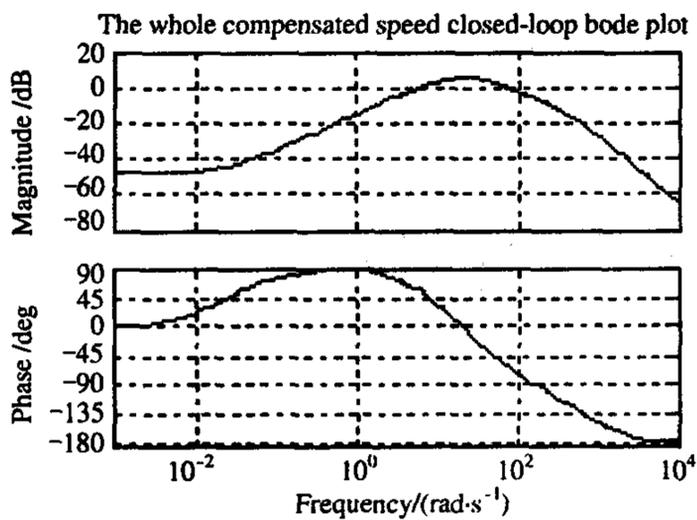


图5 校正后角速度伺服系统闭环 Bode 图

Fig.5 Closed-loop bode plot of corrected angular velocity servo system

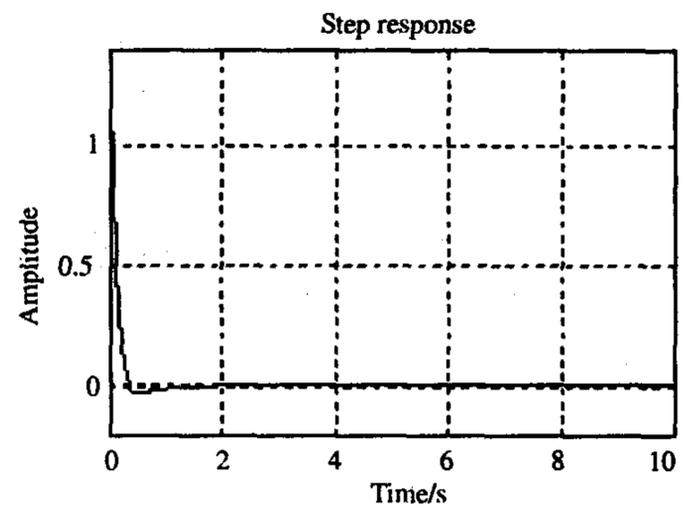


图6 校正后角速度伺服系统阶跃响应曲线

Fig.6 Step response curve of corrected angular velocity servo system

3 结论

星载空间目标光电跟踪角速度伺服系统对克服卫星力矩扰动起着至关重要的作用。本文介绍了对系统的设计和计算过程。利用Matlab对系统幅频特性及动态性能的仿真试验结果表明,系统能够较好地满足预设的指标,具有良好的稳定跟踪性能。

参考文献:

- [1] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
HU Shou-song. **Principle of autocontrol**[M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1994.
- [2] 张秉华, 张守辉. 光电成像跟踪系统[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2003.
ZHANG Bing-hua, ZHANG Shou-hui. **Electro-optical imaging tracking system**[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2003.
- [3] 任 董. 军事航天技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
REN Xuan. **Military spaceflight technique**[M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1999.
- [4] 徐小琴, 孙华燕. 基于 MATLAB 的星载空间目标跟踪控制系统仿真研究[A]. 陈宗海. 2004 学术论文集(第六卷)系统仿真技术及其应用[C]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004. 536-540.
XU Xiao-qin, SUN Hua-yan. Simulation study on control system of spaceborne space target tracking based on MATLAB [A]. CHEN Zong-hai. 2004 collection of academic disquisitions (Vol. 6) system simulation technology&application [C]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2004. 536-540.
- [5] 张志涌. 精通 MATLAB 6.5 版[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
ZHANG Zhi-yong. **Master MATLAB 6.5 edition**[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002.
- [6] DONALD R, DONALD B, RICHARD P, et al. Stabilized high accuracy optical tracking system [J]. **Proceedings of SPIE**, 2001, 4365: 10-18.