

基于 PQ 法的惯性/光机复合指向控制方法

鄢南兴, 林 喆, 谭 爽

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 为了进一步提升机动平台的遥感侦查能力, 在惯性稳定平台的基础上, 结合光电探测信息通路中的快速反射镜, 构成惯性/光机复合指向系统, 借助快返镜的快速运动补偿惯性稳定回路的伺服误差, 可有效提高探测光轴的稳定精度与指向跟踪的机动性能。将惯性稳定回路与快反镜控制回路转化为平行的双入单出系统, 针对两者作用频带与作动范围的差异, 提出一种惯性/光机复合指向控制方法, 解决系统中惯性稳定机架指向与快反镜指向叠加的稳定性匹配和频带分解问题, 从而提升光轴的稳定精度和机动性能。仿真结果表明: 加入了快反镜的惯性稳定平台的误差有显著减小, 其跟踪误差量从 0.018° 减小到 0.005° 以内, 验证了控制器设计的有效性。

关键词: 惯性稳定平台; 快速反射镜; DISO 系统; 复合控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0331001

Inertial/optomechanical combined pointing control technique based on PQ method

Yan Nanxing, Lin Zhe, Tan Shuang

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: The remote sensing investigation ability of a mobile platform is promoted by setting a fast steering mirror which to reduce the servo error of inertially stabilized loop in the access of optical detection, then the platform's pointing precision, track velocity and stabilized accuracy of line-of-sight will be improved effectively. A inertially stabilized gimbal and fast steering mirror were transformed into a parallel Dual-Input Single-Output (DISO) system. Based on the difference of actuator range and frequency between inertially stabilized gimbal and fast steering mirror, a combined control method was presented, which was used to assure the auxiliary pointing stability, and then the pointing precision and track velocity can be improved through this method. A simulation experiment was carried out to verify the effectiveness of the method which reduce the servo error of inertially stabilized platform from 0.018° to under 0.005° by putting in a fast steering mirror.

Key words: inertially stabilized platform; fast steering mirror; DISO system; combined control

收稿日期: 2015-07-11; 修订日期: 2015-08-13

作者简介: 鄢南兴(1988-), 男, 硕士生, 主要从事精密仪器控制工程方面的研究。Email: yandouhk@163.com

导师简介: 林喆(1977-), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 博士, 主要从事精密仪器控制方面的研究。Email: zhe_lin_hit@yahoo.com.cn

0 引言

应用惯性稳定平台的视轴稳定和指向跟踪功能,实现对机动目标的高精度跟踪成像,是机动平台遥感侦查的一种主要应用形式^[1-2]。然而,随着光轴稳定精度和指向机动性能要求的不断提升,传统惯性稳定平台受到机架动力学性能的约束在稳定精度和机动性能难以有效提升。为此,在惯性稳定平台的基础上,通过在光学探测通路加入快反镜,借助于快速反射镜在响应速度上的优势,弥补传统视轴惯性稳定方法在稳定精度上的不足,从而达到大幅提升系统指向稳定性的目的^[3]。在此类惯性/光机的复合指向系统中,惯性稳定平台作为宏动单元,负责隔离机动载体的低频大角度姿态变化,并实现对目标探测指向的初步控制;快反镜则作为微动单元,在高频小角度范围实现高精度指向机动,完成精确的指向稳定和跟踪控制功能^[4-8]。

在惯性/光机的复合指向系统中,光轴的指向由惯性稳定平台与快反镜作用叠加复合形成。由于两者的动态性能与作用范围存在较大差异,不理想的复合控制方法将会导致两者输出相互抵消,不但无法达到提升稳定精度和机动性的目的,还会导致叠加后综合输出不稳定。针对此类复合控制问题,X. H. Huang 和 R. Horowitz^[9-10]等人从宏动、微动系统之间的耦合关系出发,将宏-微系统整体作为被控对象通过 H_2/H_∞ 方法给出了复合控制器的设计方法。鲍文亮^[11]针对两轴四框架结构的光电稳定平台,考虑内环架惯性稳定系统和外环架伺服系统之间的耦合特性,提出了将内、外环架系统视为整体的多变量控制结构,通过 μ 综合法设计多变量控制器使系统的稳定精度和快速性有所提升。然而,此类综合设计方法得到的控制器设计结果往往较为复杂,且控制阶数较高,在工程实现上存在较大的难度^[12]。

解决此类复合控制的另一种思路为主从设计法^[13-15],该类方法控制宏动系统跟随微动系统运动,实现指向运动中的大范围低频分量。由于该类方法忽略了宏动系统和微动系统输出间的相互影响,所以无法有效地挖掘系统的控制潜力。

文中针对惯性/光机复合指向控制系统的设计问题,首先对系统的模型进行描述,并将其转化为并

行激励的双输出/单输出(Double-Input/Single-Output, DISO)形式。结合 PQ 设计法思路^[16],基于惯性稳定机架与快反镜作用频带的分布,给出了复合指向控制器的设计方法。并通过仿真验证了该方法的有效性。

1 惯性/光机复合指向控制系统模型

惯性/光机复合指向控制系统是在传统惯性稳定平台的基础上,在光电探测载荷的光信息通路中,加入了快速反射镜,充分应用快速反射镜惯量小响应速度快的优点,通过快反镜的快速运动补偿惯性稳定控制回路的伺服误差,提升了系统对机动目标的成像跟踪性能,从而使得系统兼具大角度范围、宽频带的高精度光轴指向稳定性能,其系统组成图如图 1 所示。在旋转机架上承载光学系统,速率陀螺固联在机架上,用于敏感惯性运动速率,机架电机产生电磁力矩驱动旋转机架运动。通过复合控制器运算生成惯性稳定回路的指令和快反镜的驱动电压,实现惯性稳定平台的稳定指向功能和快反镜的小角度的光束指向调整。

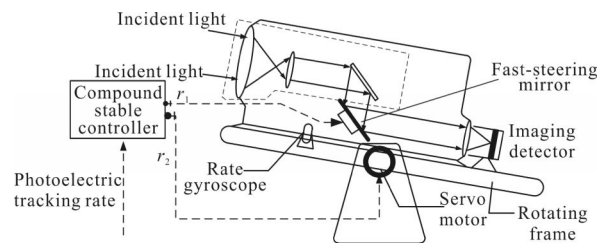


图 1 惯性/光机复合指向系统组成图

Fig.1 Inertial/Optomechanical combined pointing control system

系统的控制结构原理图如图 2 所示。

其中,复合控制器接收调整指令,并将其转化为惯性稳定控制回路的指令 r_2 和快反镜驱动指令 r_1 。惯性稳定回路接收 r_2 后,与速率陀螺敏感的实时惯性运动角速率 ω_g 作差,计算出电机驱动量 V_m ,驱动机架电机产生控制力矩 T_m ,驱动旋转机架依据惯性/光机复合指向跟踪运动速率给定信号完成惯性稳定与指向跟踪功能。快速反射镜接收驱动指令,在 r_1 驱动下改变其角度使反射光束发生偏转,从而实现小角度的光束指向调整。

考虑到快反镜的从输入指令到产生的偏转角度间的传递函数可用 $J_1(s)$ 代表,则从快反镜驱动信号

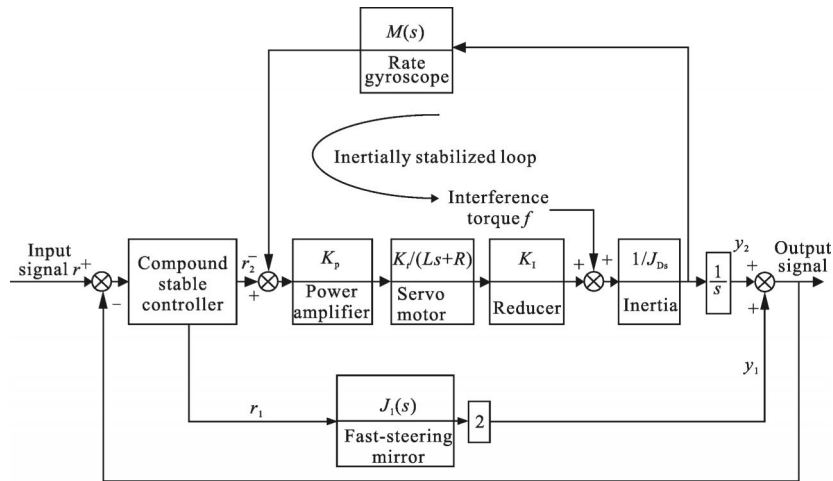


图 2 惯性/光机复合指向控制结构原理图

Fig.2 Structural schematic diagram of inertial/optomechanical combined pointing control system

r_2 到所产生的光路偏转 y_1 的传递函数可表示为 $y_1 = 2 \times J_1(s) \times r_1$ 。惯性稳定回路中功放、减速器、惯量分别可用比例系数 K_p 、 K_I 、 $1/J_D s$ 表示, 机架电机的传递函数为 $H(s) = K_I / (Ls + R)$, 陀螺特性表示为 $M(s)$, 则整个惯性稳定回路的输入输出关系可用其闭环传递函数

$$J_2(s) = \frac{K_p K_I \frac{1}{J_D s} H(s)}{1 + K_p K_I \frac{1}{J_D s} H(s) M(s)}$$

来代表, 从惯性稳定回路

产生的驱动量到 y_2 的传递函数可表示为 $y_2 = \frac{1}{s} \times J_2(s) \times r_2$ 。

系统的控制结构图可以简化为图 3。

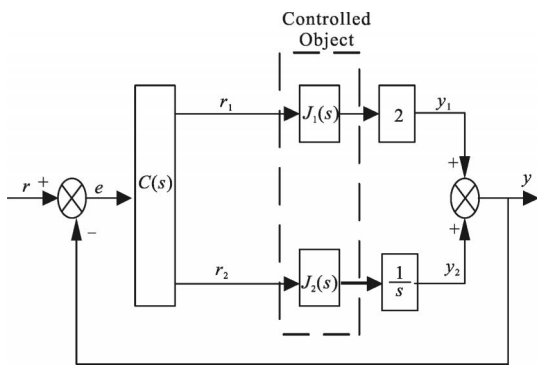


图 3 简化后的系统结构图

Fig.3 Structural schematic diagram of simplified system

至此, 惯性/光机复合指向控制系统转化为一类并行的 DISO 系统, 需设计一个 SIDO 惯性/光机复合指向稳定控制器来实现 y_2 响应低频大角度信号, y_1 响应高频小角度信号。最终叠加输出精确的位置信号。

2 结合 PQ 法惯性/光机复合指向系统设计

应用 PQ 设计法设计并行的 DISO 系统, 将并行的控制器和被控对象的传递函数之比作为设计对象, 通过设计两个 SISO 系统的控制器来调整系统的幅值和相角特性, 使得两个系统协调运作, 解决复合控制系统的频带分解和稳定性匹配的问题^[16]。

考虑到惯性/光机复合指向系统惯性指向跟踪回路和快反镜回路的响应频带不同, 设计复合控制器由三个子控制器组成, 其中 C_2, C_1 决定了惯性稳定回路和快反镜的作用频带, C_0 用于校正指向外回路的整体控制性能, 取

$$G_1(s) = 2 \times J_1(s) \tag{1}$$

$$G_2(s) = J_2(s) \times \frac{1}{s} = \frac{K_p K_I \frac{1}{J_D s} H(s)}{1 + K_p K_I \frac{1}{J_D s} H(s) M(s)} \times \frac{1}{s} \tag{2}$$

惯性/光机系统结构图进一步转化为图 4 所示。

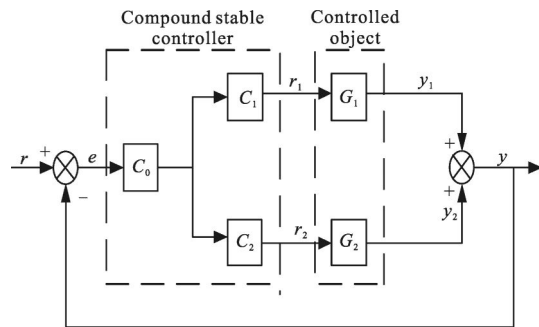


图 4 系统控制结构图

Fig.4 System control structural schematic diagram

取比值传递函数

$$P=G_2(s)/G_1(s) \quad (3)$$

设计一虚拟控制器

$$Q=C_2(s)/C_1(s) \quad (4)$$

则如果 $PQ > 1$, $|C_2(s) \times G_2(s)| > |C_1(s) \times G_1(s)|$, 则惯性指向支路的响应大于快反镜支路, 反之, 则表明快反镜支路的响应大于惯性指向支路。当 $|PQ|=1$ 时, 表明在该频率下, 两支路响应幅值相等。同理, 如果 $\angle PQ(\omega) = 0^\circ$ 时, 则两支路同相位, 响应为叠加关系, 当 $\angle PQ(\omega) = -180^\circ$ 时, 两支路相位相反, 输出互相抵消。因此, Q 的设计应保证在 $|PQ|=1$ 时, $\angle PQ$ 偏离 -180° 并具有足够的裕度以确保两者有效叠加, 其物理意义与 PQ 单位反馈系统的相位裕度相同。因此, 建立 PQ 辅助反馈系统确定 Q 的设计, 如图 5 所示。其开环剪切频率 ω_c 即为两支路的作用频带的分界频率, 其相位裕度即为确保两支路输出不发生控制抵消的相位裕量。

以剪切频率为 ω_c , 相角裕度 $> 60^\circ$ 的原则应用频率响应法设计得到 $Q(s)$ 。选取 $C_1(s) = K$, 则根据公式 (4), 取

$$C_2(s) = Q(s) \times C_1(s) \quad (5)$$

将公式 (5) 代入到系统中, 取

$$G_{SSO}(s) = G_1(s) \times C_1(s) + G_2(s) \times C_2(s) \quad (6)$$

则图 4 可转化为图 6 所示。

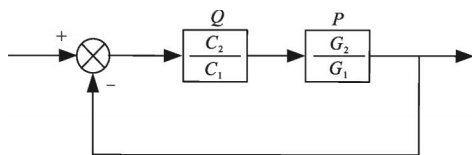


图 5 辅助 PQ 反馈系统

Fig. 5 PQ feedback system

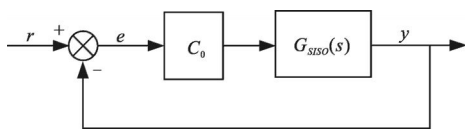


图 6 转化后的控制结构图

Fig. 6 Control structural schematic diagram of simplified system

G_{SSO} 为新的被控对象, 根据系统对跟踪回路的性能要求, 可进一步通过频率响应法设计 C_0 。

基于上述设计可知

$$y = y_1 + y_2 = C_0 \times G_1(s) \times C_1(s) \times e + C_0 \times G_2(s) \times C_2(s) \times e \quad (7)$$

$$y_2/y_1 = (C_0 \times G_2(s) \times C_2(s) \times e) / (C_0 \times G_1(s) \times C_1(s) \times e) = PQ$$

当 $\omega < \omega_c$ 时, $|y_2/y_1| > 1$ 惯性稳定回路主导响应。

当 $\omega = \omega_c$ 时, $|y_2| = |y_1|$, 两者输出相等, 且 $\angle |y_2/y_1| > -180^\circ$ 两者输出不相互抵消。当 $\omega > \omega_c$ 时, $|y_2/y_1| < 1$, 快反镜支路占据主导响应, 有效实现了在 ω_c 处的频带分解。

3 仿真试验

考虑某惯性/光机复合指向平台需对高度为 4 km, 飞行速度为 600 m/s 做等高直线飞行的目标进行跟踪成像, 指向作用范围为 4~32 km。要求该系统在基座存在 2 Hz/1° 的扰动下, 对该目标的指向跟踪误差保持在 $\pm 0.005^\circ$ 范围以内, 跟踪带宽应高于 18 rad/s。

该平台快反镜驱动控制系统应用压电作动器驱动, 其作动范围为 $\pm 0.02^\circ$, 其驱动电压到指向角度的传递函数特性如下:

$$J_1(s) = 5 \times 10^{-4} / (s/3000 + 1) \quad (8)$$

惯性稳定机架的旋转角度可达到 $\pm 90^\circ$, 其传递函数特性经辨识可拟合为:

$$J_2(s) = 1 / (5 \times 10^{-3} s + 1) \quad (9)$$

根据公式 (1)、(2)、(3) 整理得到比值传递函数为:

$$P(s) = (s/3000 + 1) / (5 \times 10^{-3} s + 1) \times s \times 10^{-3} \quad (10)$$

经分析可知, 跟踪指令在 10 rad/s 频率以上的作用分量小于快反镜的作用范围。因此, 可将 10 rad/s 作为惯性稳定支路和快反镜支路的频率分界点。如图 7 所示, 针对 P , 可设计比例控制器 $Q=0.01$, 即可确保 PQ 辅助系统的 $\omega_c=10$ rad/s, 相角裕度 $=87.3^\circ$ 。由公式 (4)、(5), 选取 $C_1=1, C_2=0.01$, 复合后的被控对象传递函数可根据公式 (6) 得到:

$$G_{SSO}(s) = (1 \times 10^{-3}) / (s/3000 + 1) + 0.01 / [(5 \times 10^{-3} s + 1) s] \quad (11)$$

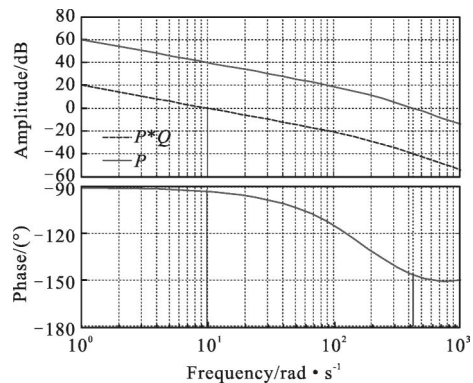


图 7 $P, P \times Q$ 的波特图

Fig. 7 Bode of P and $P \times Q$

考虑成像跟踪回路的控制带宽应高于 20 rad/s, 选取外回路的剪切频率为 20 rad/s, 以 G_{SSO} 为对象, 应用频率响应法得

$$C_0(s) = \frac{0.1163s^3 + 12.07s^2 + 417.7s + 4818}{0.0006472s^3 + 0.02245s^2 + 0.2595s + 1} \quad (12)$$

其系统波特图如图 8 所示。

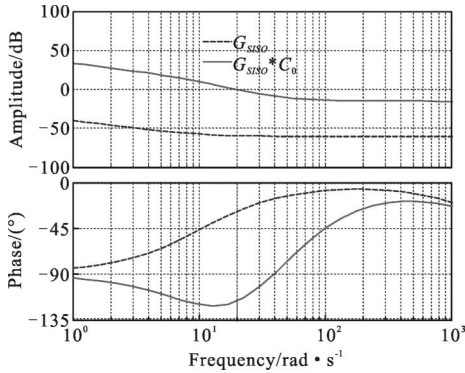


图 8 G_{SISO} , $G_{SISO} * C_0$ 的波特图

Fig.8 Bode of G_{SISO} and $G_{SISO} * C_0$

惯性稳定支路、快反镜支路和两者复合后的传递函数特性如图 9 所示。

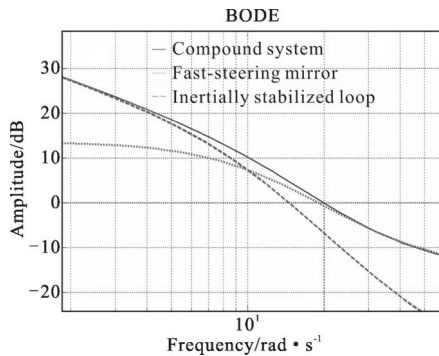


图 9 复合回路、惯性稳定支路、快反镜支路的传递函数特性

Fig.9 Open-loop transfer function characteristic of compound control loop, fast-steering mirror loop and inertially stabilized loop

其中惯性稳定支路的开环传递函数为 $C_0(s) \times G_2(s) \times C_2(s)$, 快反镜支路的传递函数为 $C_0(s) \times G_1(s) \times C_1(s)$ 。比较惯性稳定、快反镜和两者复合后的传递函数特性可以看出, 在设计 PQ 辅助反馈系统的剪切频率 $\omega_c = 10 \text{ rad/s}$ 为惯性稳定支路和快反镜支路的频率分界点, 低于 10 rad/s 的频段惯性稳定支路曲线和复合回路曲线幅值接近, 此频段惯性稳定支路主导响应, 在 10 rad/s 处, 惯性稳定支路曲线和快反镜支路曲线相交, 两支路的输出相当, 高于 10 rad/s 的频段快反镜曲线和复合回路曲线逐渐重合, 快反镜支路主导

响应, 两者叠加得到最后的复合回路曲线。可知, 以 10 rad/s 为频率分界点有效界定了两个支路的作用频带。

考虑该复合稳定平台在基座存在 $2 \text{ Hz}/(^{\circ})$ 的扰动的情况下, 惯性稳定支路、快反镜支路的输出和跟踪误差曲线如图 10、图 11 所示。

可以看出, 加入了快反镜的惯性稳定平台的误差显著减小, 跟踪误差量从 0.018° 减小到 0.005° 以内, 因为快反镜的作动范围在 $\pm 0.02^{\circ}$, 由此证明快反镜实现了对高频小角度跟踪误差的有效补偿。此外, 加入快反镜后的系统跟踪误差始终小于惯性稳定支路的误差表明, 两支路的输出没有相互抵消, 平台的指向跟踪精度进一步提升。

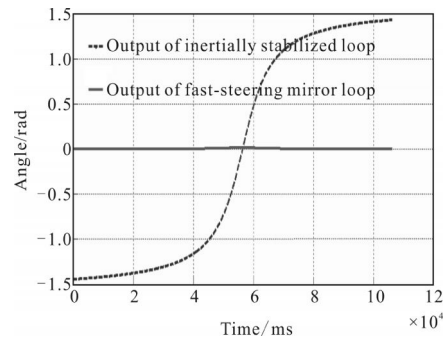


图 10 惯性稳定支路、快反镜支路输出曲线图

Fig.10 Output of fast-steering mirror loop and inertially stabilized loop

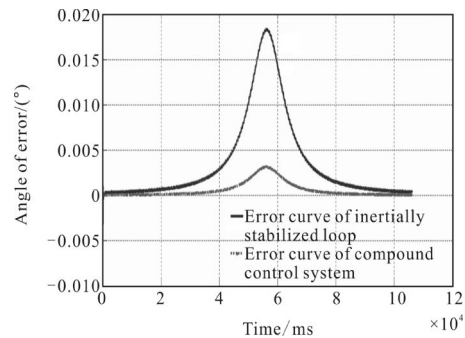


图 11 惯性稳定支路跟踪误差和加入快反镜的复合输出跟踪误差对比图

Fig.11 Error curve of compound control system with fast steering mirror and inertially stabilized loop

4 结束语

文中针对惯性/光机复合指向控制系统, 提出结合 PQ 辅助系统的控制器设计方法, 该方法可基于惯性稳定支路与快反镜支路的频率分界点进行设

计,从而使两者有效复合,应用惯性稳定支路完成低频大角度跟踪,并隔离基座扰动,通过快反镜实现高频小角度的补偿。仿真结果表明,该方法可有效解决控制系统设计中的频带分解和稳定性问题使得惯性指向支路和快反镜支路协同有效工作,提升了平台的性能与机动性。

参考文献:

- [1] Masten M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2008, 28(1): 47-64.
- [2] Hikert J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles[J]. *IEEE Control System Magazine*, 2008, 28(1): 26-46.
- [3] Ma Jianguang, Tang Tao. Review of compound axis servo mechanism tracking control technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 218-227. (in Chinese)
马佳光, 唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 218-227.
- [4] He Lin, He Haiyan, Fu Zhihong, et al. Image-based high-precision and real-time optical image stabilization system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 2012, 33(6): 61-66. (in Chinese)
何林, 何海燕, 付智红, 等. 基于图像的高精度实时光学稳像控制系统[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(6): 61-66.
- [5] Thanmas W. Digital laser ranging and tracking using a compound axis servomechanism[J]. *Applied Optics*, 1966, 5(4): 497-505.
- [6] Li Wenjun. Study on control strategy of o-e tracking systems with compound axis[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
李文军. 复合轴光电跟踪系统控制策略研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2006.
- [7] Wang Weibing, Wang Tingfeng, Guo Jin. Analysis for optoelectrical acquisition tracking and pointing control technology on satellite[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(6): 879-888. (in Chinese)
王卫兵, 王挺峰, 郭劲. 星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析[J]. *中国光学*, 2014, 7(6): 879-888.
- [8] Yang Weifan, Xu Shuyan, Cao Xiaotao, et al. Design of scanning control system for space optical remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 397-405. (in Chinese)
杨维帆, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 空间光学遥感器扫描控制系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 397-405.
- [9] Huang X H, Horowitz R, Li Y F. A comparative study of MEMS microactuators for use in a dual-stage servo with an instrumented suspension[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 11(5): 524-532.
- [10] Huang X H, Horowitz R. Robust controller design of a dual-stage disk drive servo system with an instrumented suspension [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(8): 2406-2413.
- [11] Bao Wenliang. Inertial stabilization control of airborne electro-optical platforms[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
鲍文亮. 航空光电平台的惯性稳定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [12] Maciejowski J M. Multivariable Feedback Design [M]. MA: Addison-Wesley, 1989.
- [13] Chatziliadis P, Kamarianakis Z, Golemati S, et al. Robotic control in hand-assisted laparoscopic nephrectomy in humans-a pilot study [C]//Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2004: 2742-2745.
- [14] Sang H, Wang S, Li J, et al. Control design and implementation of a novel master-slave surgery robot system, Micro Hand A[J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2011, 7(3): 334-347.
- [15] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Design of telescope servo system based on DSP and FPGA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 908-914. (in Chinese)
邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于 DSP 和 FPGA 的望远镜伺服控制系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 908-914.
- [16] Schroeck J Steven, Messner C William. On compensator design for linear time-invariant dual-input single-output system [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 6(1): 50-57.