

doi: 10.3788/gzxb20174601.0112005

# 光电经纬仪机电一体化耦合特性

张晶,郝伟,杨晓许,井峰,黄伟,邱鹏,曹蓓

(中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

**摘 要:**区别于传统刚体控制模型,将结构动态设计方法与控制理论相结合,构建了光电经纬仪的柔性机电耦合控制模型,分析了该模型的结构基频、阻尼比等机械因素与控制带宽的耦合关系,并提出了光电经纬仪动态量化设计准则.实验表明:光电经纬仪结构谐振频率 $\omega_n$ 应尽可能地远大于系统谐振频率 $\omega_r$ ,至少满足 $\omega_n \geq 3\omega_r$ .该方法有效可行,可解决高精度大型经纬仪机电谐振问题,为设计快速响应、高跟踪精度的光电经纬仪提供了工程依据.

**关键词:**光电经纬仪;结构基频;阻尼比;增益;伺服带宽;动态设计

中图分类号:TH761.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)01-0112005-7

## Electromechanical Coupling Characteristics of Optical-electric Theodolite

ZHANG Jing, HAO Wei, YANG Xiao-xu, JING Feng, HUANG Wei, QIU Peng, CAO Bei

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences (CAS), Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Combing the structure dynamic design method with the control theory, the flexible electromechanical coupling control model was built which is difference from the traditional rigid control model. The relationship between the structural fundamental frequency and servo bandwidth was analyzed, then the dynamic quantitative design principles were put-forward, The experiment results show that, the theodolite structure frequency should be far away from the resonant frequency of the system, and meet  $\omega_n \geq 3\omega_r$  at least, which is effective and feasible, has solved the high precision large theodolite electromechanical resonance problem, and provide the basis of engineering for designing fast response and high tracking precision of photoelectric theodolite.

**Key words:** Electro-optical theodolite; Basic structural frequency; Damping ratio; Gain; Servo bandwidth; Dynamic analysis

**OCIS Codes:** 120.0120; 120.7280; 120.4640

## 0 引言

为满足飞行器的高精度、高速度的飞行要求,光电经纬仪不仅需具有“一机多用”的功能,而且要具备高精度、高灵敏(快响应)以及高稳定性<sup>[1-3]</sup>.因此,对光电经纬仪伺服系统响应速度、带宽提出了更高要求.但是,随着经纬仪的大型化、功能多样化导致了跟踪架头部体积、质量增大,系统整机刚度减小;且随着被测量目标机动性的增强,对经纬仪系统的动态性能要求越来越高,使得对伺服带宽的要求不断提高<sup>[4]</sup>;传统的静强度、静刚度设计方法,很难解决结构系统与伺服系统的谐振,使得机电系统的谐振耦合问题越发突出<sup>[5-7]</sup>.

设计光电经纬仪时,在考虑结构因素与控制系统的耦合作用、精确设计系统指标、提高光电经纬仪动态特性的同时,如何提高经济效益已经成为设计者关注的焦点之一. Wang 等证明了采用机电一体化建模比分别建模更容易获得最优值<sup>[8]</sup>, Xu 等对桁架机电一体化设计进行了研究<sup>[9]</sup>. 朱文灯等研究了机械与控制并行优化设计<sup>[10]</sup>,李峰等提出了结构谐振一体化设计思想,王海红等对齿轮传动非线性因素与控制系统进行了耦合研

基金项目:国家自然科学基金(No. 61505248)资助

第一作者:张晶(1986—),男,工程师,硕士,主要研究方向为机电一体化及系统动态设计方法. Email:zj03016202@163.com

通讯作者:曹蓓(1980—),女,副研究员,博士,主要研究方向为机电一体化设计及动目标跟踪测量. Email:candy@opt.ac.cn

收稿日期:2016-07-13;录用日期:2016-09-27

究<sup>[11]</sup>,石斌等提出了基于虚功方程的结构控制一体化设计模型<sup>[12]</sup>.但是对于大型跟踪架机械因素(基频、阻尼等)与控制带宽之间的耦合关系研究甚少.

因此,区别于传统控制、机械独立静态设计分析,本文构建了基于交叉学科的光电经纬仪刚柔机电耦合控制模型,该模型包含控制参数和结构动力学参数,在此基础上,对大型光电经纬仪进行了机械与控制的融合设计,采用理论建模、仿真分析、实验验证的方法,提出了  $\omega_n \geq 3\omega_r$  的量化设计准则,解决了大型光电经纬仪机电谐振问题.

## 1 光电经纬仪的机电一体化模型

### 1.1 光电经纬仪的动力学模型

机械谐振频率对经纬仪整机动态性能起着重要作用,它影响整机频率响应、系统快速性、稳定性及精度.将经纬仪简化为二阶电机—弹簧—质量模型<sup>[13]</sup>,如图1,则得出系统的动力学方程为

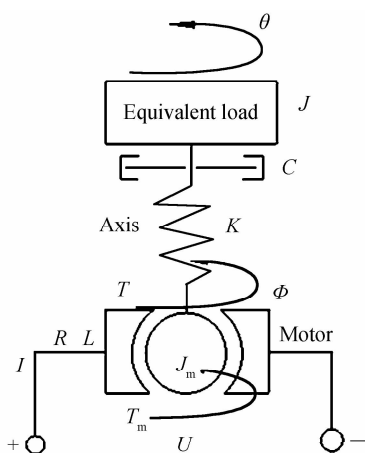


图1 反射镜轻量化方案

Fig.1 Lightweight schemes of reflective mirror

$$\begin{cases} J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = C\dot{\phi} + K\phi \\ J\ddot{\theta} + T + C(\dot{\theta} - \dot{\phi}) = 0 \\ T = K(\theta - \phi) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $J$  为转台等效惯量, $K$  为轴系等效扭转刚度, $C$  为轴系等效阻尼系数, $\theta$  为转台输出转角, $\phi$  为电机输出转角, $T$  为轴端输出力矩.

### 1.2 光电经纬仪的机电模型

传统机电系统模型直接将负载惯量等效折合到电机输出轴上,忽略了结构系统的柔性、间隙及机电系统的耦合问题<sup>[14]</sup>,当负载惯量增大、伺服动态性能要求提高时,这种简化的数学模型已经不能真实地反映实际机电系统特性<sup>[15]</sup>.基于光电经纬仪的动力学模型,联合力矩电机的机电特性<sup>[16]</sup>、动力学原理可得

$$\begin{cases} U = K_a \dot{\phi} + IR + L\dot{I} \\ T_m = K_m I \\ T_m = J_m \ddot{\phi} + T \end{cases} \quad (2)$$

式中, $J_m$  为电机转子惯量, $K_a$  为电机反电动势系数, $K_m$  为电机转矩系数, $L$  和  $R$  分别为电机电枢回路的电感和电阻, $U$  和  $I$  分别为电机电枢电压和电流, $T$  为轴端输出力矩.

式(1)与(2)描述了经纬仪机电系统的电动学特性,得出了光电经纬仪的机电一体化模型.

## 2 光电经纬仪整机幅频特性分析

由式(1)可得,光电经纬仪的输入输出角传递函数为

$$H(s) = \frac{\theta(s)}{\Phi(s)} = \frac{(CS+K)}{(JS^2+CS+K)} \quad (3)$$

令  $S=j\omega$ ,  $\omega_n = \sqrt{K/J}$ ,  $\xi = C/C_c$ ,  $r = \omega/\omega_n$ ,可得出其幅频特性函数为

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{1+(2\xi r)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2+(2\xi r)^2}} \quad (4)$$

式中,  $A(\omega)$  为不同输入频率下, 整机输出转角与驱动电机输入转角之比,  $\omega$  为电机输入激励频率,  $\omega_n$  为结构系统谐振频率, 表达式  $\omega_n = \sqrt{K/J}$ ,  $\xi$  为阻尼比且  $\xi = C/C_c$ ,  $C_c$  为临界阻尼  $C_c = 2J\omega_n$ .

以转角比  $A$  为目标函数, 频率比  $r$ 、阻尼比  $\xi$  为变量, 绘出曲面变化图, 如图 2.

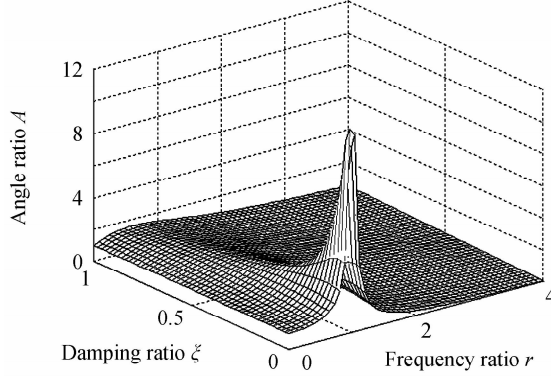


图 2 光电经纬仪幅频阻尼变化曲面

Fig. 2 Amplitude frequency and damping changed curve for theodolite

由图 2 可以得出: 1) 随着系统阻尼比  $\xi$  增加, 结构系统的响应带宽增加; 2) 随着频率比  $r$  减小, 结构系统的响应带宽增加; 3) 在外界输入频率一定时, 即增加结构系统谐振频率  $\omega_n$ , 可提高系统响应带宽.

### 3 光电经纬仪机电耦合传递函数

由光电经纬仪机电一体化模型式(1)、(2)可以得出, 考虑机电耦合效应的系统框图如图 3.

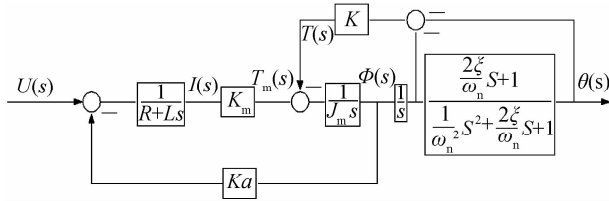


图 3 经纬仪机电一体化系统框图

Fig. 3 The system chart for the mechatronic model of theodolite

进行化简后可得光电经纬仪机电耦合效应系统传递函数为

$$\left\{ \begin{array}{l} G(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} \\ \theta(s) = \frac{2\xi}{\omega_n} K_m S + K_m \\ U(s) = f_1(s) + f_2(s) + f_3(s) \\ f_1(s) = \frac{J_m L}{\omega_n^2} S^5 + \left( \frac{J_m R}{\omega_n^2} + \frac{2\xi J_m L}{\omega_n} \right) S^4 \\ f_2(s) = \left( \frac{K_a K_m}{\omega_n^2} + \frac{2\xi J_m R}{\omega_n} + 2LJ_m \right) S^3 \\ f_3(s) = \left( \frac{2\xi K_a K_m}{\omega_n} + 2J_m R \right) S^2 + K_a K_m s \end{array} \right. \quad (5)$$

式(5)在实际应用中可以进行近似降阶处理, 其对光电经纬仪低频伺服系统性能几乎没有影响.

## 4 光电经纬仪机电耦合特性研究

### 4.1 结构基频对伺服带宽影响分析

应用 simulink 建立闭环比例、积分、微分(Proportion Integral Derivative, PID)控制对机电系统进行性

能仿真分析:保持增益  $P=400$ 、结构阻尼比  $\xi=0.1$  不变,考虑实际中经纬仪系统结构的基频范围,以结构系统谐振频率  $\omega_n$  为变量,依次取 100 Hz、75 Hz、50 Hz、38 Hz、25 Hz,仿真得系统的幅频相频特性曲线,如图 4.

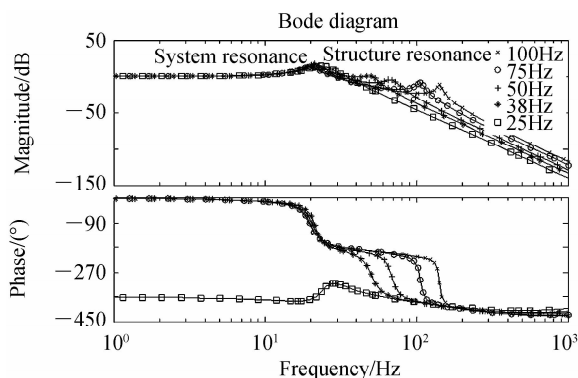


图 4 频域特性随结构谐振频率的变化

Fig. 4 Frequency-domain characteristics with change of tructure frequency

由图 4 可以看出,随着结构系统谐振频率减小,结构谐振峰值向后移动,逐渐靠近系统谐振频率峰值,系统谐振频率峰值则基本保持在 20Hz 不变,但当  $\omega_n \leq 50$  Hz 时,系统谐振频率  $\omega_r$  由 21Hz 变为 24Hz,发生较为明显的变化.当  $\omega_n = 25$  Hz 时,系统的谐振特性主要表现为结构系统谐振特性,此时机电耦合谐振,并且相频发生反转.

因此实际设计中,应当让结构系统谐振频率尽可能地远大于机电系统谐振频率,以保持机电系统具有足够的带宽,避免发生机电耦合谐振问题.从图中可得,当  $\omega_n \geq 3\omega_r$  时可以忽略敏感方向上结构系统谐振频率对系统谐振频率及带宽的影响.

#### 4.2 系统增益对伺服带宽影响分析

保持结构阻尼比  $\xi$  为 0.1、基频  $\omega_n = 100$  Hz 不变,增加闭环系统控制增益  $P = 400, 800, 1200, 1600, 2200$ ,其幅频相频特性曲线如图 5.

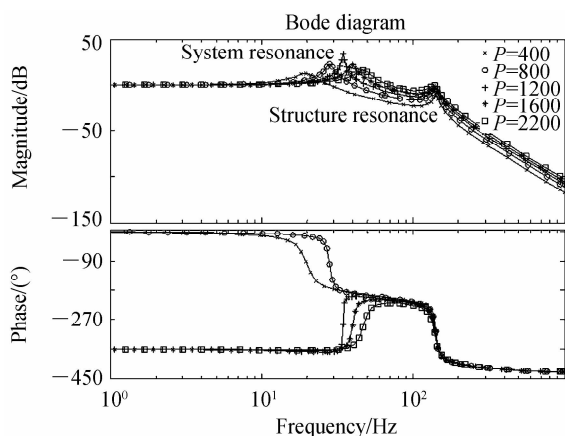


图 5 频域特性随闭环增益的变化

Fig. 5 Frequency-domain characteristics with change of closed-loop gain

从图 5 可以得出,随着增益增加,系统带宽增大,系统谐振频率向前推进,逐渐靠近结构系统谐振频率,结构谐振频率峰值则基本保持不变.系统谐振频率最终被结构谐振频率所限制,因此结构谐振频率最终限制了系统带宽的最大值.

#### 4.3 结构阻尼比对伺服带宽影响分析

保持结构系统谐振频率  $\omega_n$  为 100 Hz、闭环系统控制增益  $P = 400$  不变,以结构阻尼比为变量,依次取 0.1、0.3、0.8、1,仿真得系统的幅频相频特性曲线,如图 6.

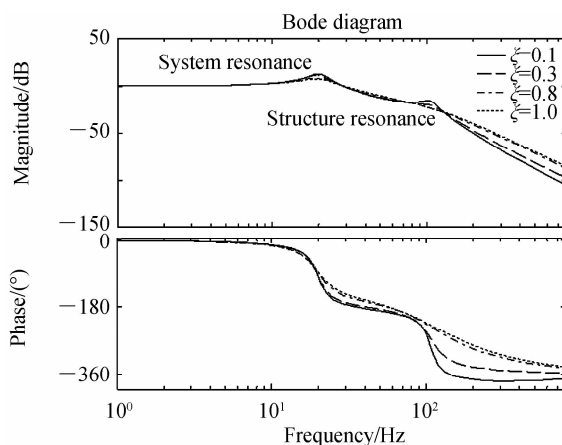


图6 频域特性随结构阻尼比的变化

Fig. 6 Frequency-domain characteristics with change of damping ratio

由图6可以得出,随着结构阻尼比的增加,可以显著抑制结构谐振峰值,同时提高了高频区间的幅值衰减性能,当达到临界阻尼比时,结构谐振峰值已经完全消失。在实际应用中,由于结构阻尼比一般较小,因此结构谐振峰值对系统带宽的影响不能单一通过增加结构阻尼比解决,所以尽可能增加系统阻尼特性的同时,提高结构谐振频率。

综合考虑系统稳定误差、阻尼比、增益调节范围等问题,光电经纬仪结构谐振频率应尽可能地远大于系统谐振频率,至少满足  $\omega_n \geq 3\omega_r$  的要求。

## 5 $\omega_n \geq 3\omega_r$ 时的系统降阶特性分析

考虑机电耦合效应时,光电经纬仪系统传递函数为5阶函数,如式(5),考虑到在实际中,  $J_m$  和  $L$  相对较小,当结构谐振频率满足  $\omega_n \geq 3\omega_r$  时,保持  $\omega_n$  为100 Hz、阻尼比  $\xi=0.1$ 、 $P=400$  不变,对系统传递函数依次进行降阶分析,其幅频、相频特性如图7(图7中  $U/s_5 \theta/s_1$  表示  $U(s)$  为5阶,  $\theta(s)$  为1阶,其余类推)。

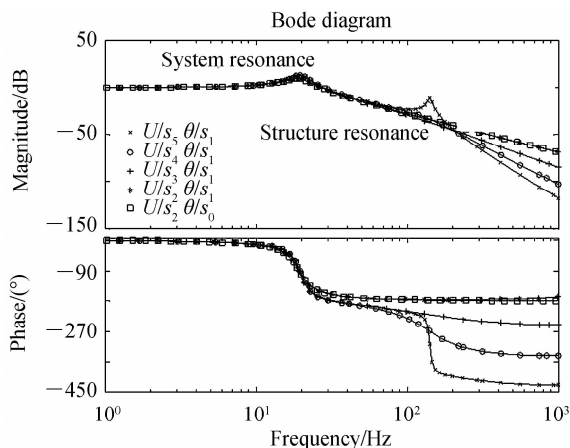


图7 传函降阶的幅频相频特性曲线

Fig. 7 Frequency-domain characteristics curves of reducing-order transfer function

当系统传递函数下降一阶时,结构谐振峰值消失,随着传递函数继续降阶时,在高频段( $>100$  Hz)幅频与相频特性发生较为明显的变化,在光电经纬仪的有效带宽(低频段 $<50$  Hz)内几乎没有影响。此时光电经纬仪系统可以等效为理想二阶刚体系统,即控制人员常用的电机+刚体负载模型。当结构谐振频率不满足  $\omega_n \geq 3\omega_r$  时,必须考虑结构柔性带来的机电耦合特性。

## 6 实验分析

搭建了如图8的实验装置,主要由模拟负载、伺服电机、支撑架、伺服闭环系统、及柔性联轴器组成。其中柔性联轴器及模拟负载可以进行更换,以模拟不同的结构谐振频率。

应用实验装置,分析了结构谐振频率远大于系统谐振频率( $\omega_n > 3\omega_r$ )及其较为接近系统谐振频率( $\omega_n < 3\omega_r$ )的两种情况,提取了两组典型的幅频实验曲线,即  $J_1 = 0.01 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $K_1 = 985 \text{ Nm/rad}$ 、 $J_2 = 0.01 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $K_2 = 58 \text{ Nm/rad}$ 、理论基频分别为  $\omega_{n1} = 50 \text{ Hz}$ 、 $\omega_{n2} = 12 \text{ Hz}$ ,其数值模拟旋转基频分别为  $\omega_{n1} = 46.6 \text{ Hz}$ 、 $\omega_{n2} = 9.9 \text{ Hz}$ ,如图 9,典型幅频实验与仿真曲线如图 10、11.

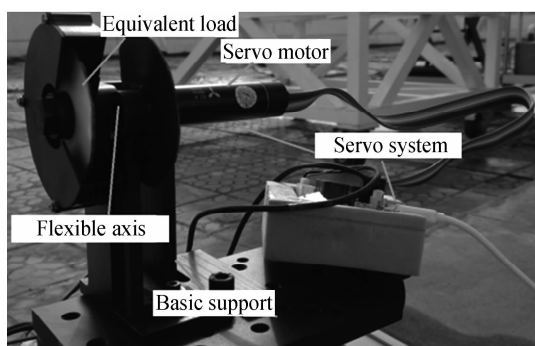


图 8 柔性实验装置

Fig. 8 Flexible experimental equipment

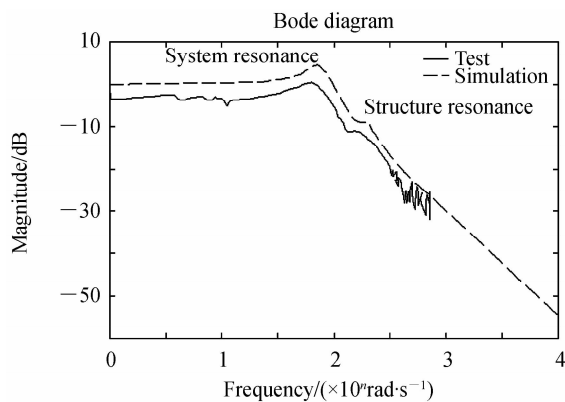


图 10  $\omega_n > 3\omega_r$  幅频实验曲线

Fig. 10  $\omega_n > 3\omega_r$  amplitude-frequency curve in experiment

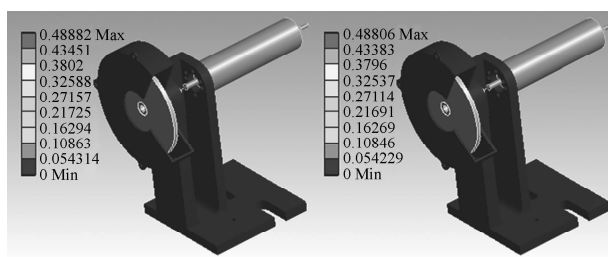


图 9 柔性转台基频数值分析

Fig. 9 Numerical simulation for structure frequency of flexible theodolite

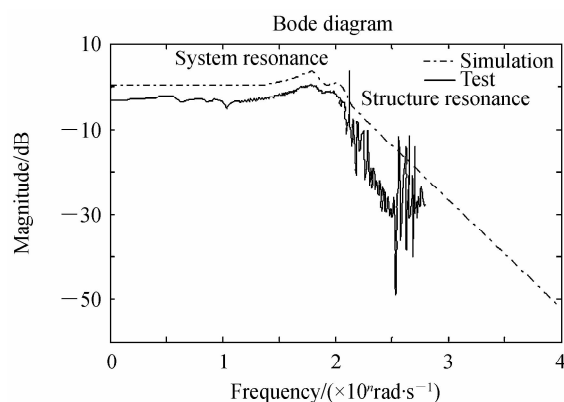


图 11  $\omega_n < 3\omega_r$  幅频实验曲线

Fig. 11  $\omega_n < 3\omega_r$  amplitude-frequency curve in experiment

由实验曲线可知,当结构谐振频率远离系统谐振频率时,只在高频段存在高阶谐振效应,对于光电经纬仪而言,伺服系统的有效带宽内幅频特性正常,系统具有较好的动态性能.当结构谐振频率接近系统谐振频率时,出现了机电系统的耦合谐振效应,幅频特性出现了较高的毛刺噪声,系统的动态特性受到了影响.

因此光电经纬仪结构谐振频率应尽可能地大于系统谐振频率,至少满足  $\omega_n \geq 3\omega_r$ .

## 7 结论

本文建立了光电经纬仪机电一体化耦合模型,在分析结构基频、阻尼比等结构因素与控制带宽的耦合关系基础上,提出了光电经纬仪结构动态量化设计准则,光电经纬仪结构谐振频率应尽可能地远大于系统谐振频率,至少满足  $\omega_n \geq 3\omega_r$ ,该研究为设计快速响应、高跟踪精度的大型光电经纬仪提供了理论依据,该方法已应用于某型号光电转台的系统结构设计中,解决了伺服系统带宽与结构基频的谐振问题.

### 参考文献

- [1] SUN Fang-fang, HE Ya-fei, QIAN Yue, et al. Investigation on the means improving the resonance frequency of electro-optical theodolite[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2010, **09**: 102-105.  
孙芳方,何亚飞,钱锐,等. 光电经纬仪跟踪架谐振频率分析[J]. 现代制造工程, 2010, **09**: 102-105.
- [2] SAN Xiao-gang, QIAO Yan-feng, YU Shuai-bei, et al. Optimization design and simulation analysis for the key components of 1m aperture photoelectric theodolite[C]. 7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes, 2014: 92800K.
- [3] XIONG Chun-bao, LIU Zhen-hua, PAN Yan-ling. High-accuracy coordinates measurement by electronic theodolites[C]. *Advanced Laser Technologies*, 2005: 63442W.

- [4] MARCOS R, GARCIA T, TEODORA V, *et al.* Mechanical design and analysis, control architecture, dynamic model and performance simulation[C]. SPIE, 2008, **7012**: 70120X.
- [5] XU Feng, GUO Yong, YU Wei, *et al.* Simulation and analysis on electromechanical dynamics of optical-electric theodolite [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 2076-2079.  
许峰, 郭勇, 余炜, 等. 光电经纬仪机电耦合动力学模型仿真及分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(10): 2076-2079.
- [6] 王闻宇. 伺服系统柔性连接负载控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 1-118.
- [7] CAI Li-hua, GAO Hui-bin, ZHANG Shu-mei, *et al.* Research on method of eliminating accurately mechanical resonance frequency of the theodolite by complex falling filter[J]. *Measurement & Control Technology*, 2009, **28**(2): 58-61.  
蔡立华, 高慧斌, 张淑梅等. 应用复杂陷波器精确消除经纬仪机械谐振方法的研究[J]. 测控技术, 2009, **28**(2): 58-61.
- [8] WANG S, TAI K. Topology optimization of piezoelectric sensors/actuators for torsional vibration control of composite plates [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, **15**: 253-269.
- [9] XU B, JIANG J. Integrated optimization of structure and control for piezoelectric intelligent trusses with uncertain placement of actuators and sensors[J]. *Computational Mechanics*, 2004, **33**(5): 406-412.
- [10] ZHU Deng-lin, WANG An-lin, SHAO Meng, *et al.* Concurrent design of structure and control of arm-manipulator based on performance requirements[J]. *Mechanical science and technology*, 2005, **24**(6): 639-641.  
朱灯林, 王安麟, 邵萌. 基于性能配置的机械手结构/控制并行设计[J]. 机械科学与技术, 2005, **24**(6): 639-641.
- [11] 王海红. 雷达伺服系统的结构/控制一体化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 1-62.
- [12] 石斌. 高速高精度机电系统的结构/控制一体化设计模型的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 1-67.
- [13] 张建民. 机电一体化系统设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- [14] LIAO Hong-bo, FAN Shi-xun, HEI Mo, *et al.* Modeling and parameter identification for electro-optical stabilized platform servo system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 477-484.  
廖洪波, 范世珣, 黑墨, 等. 光电稳定平台伺服系统动力学建模与参数辨识[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(2): 477-484.
- [15] 季晶晶. 大惯量负载伺服系统动力学建模与控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 1-112.
- [16] 董岩. 基于神经网络的机载三轴稳定平台控制系统算法应用研究[D]. 长春: 中科院长春光机所, 2011: 1-110.