

TMT 宽视场光谱仪准直镜系统的相似动力学分析与试验研究

彭元镜^{1,2,3}, 许明明^{1,2*}, 陈忆^{1,2}, 胡中文^{1,2}, 季杭馨^{1,2}, 王磊^{1,2}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²南京天文光学技术研究所中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 大型光机仪器难以在短期内实现加工,为了验证仪器设计的正确性,利用相似模型试验替代原型研究。基于相似定理,推导了三十米望远镜(TMT)宽视场光谱仪准直镜系统原型和缩尺模型之间的相似关系;建立了准直镜系统原型的有限元模型及 1:3 缩尺模型的有限元模型,对二者进行了模态分析和面形分析,并对缩尺模型实物进行了相似模型试验和分析。研究结果表明,在 1:3 的缩尺比例下,准直镜系统缩尺模型与原型的振型相似性符合理论分析结果;在工作环境下,缩尺模型的表面波前误差的均方根值为 0.065λ (λ 为波长)。模型试验结果证明准直镜系统的缩尺模型满足光学系统的工作要求。利用缩尺模型能够预测原型动态响应及面形变化,为后续项目的正式研究提供技术积累。

关键词 测量;三十米望远镜;宽视场光谱仪;准直镜系统;相似动力学分析;相似模型试验

中图分类号 TH751;TH743

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1412005

Dynamics Analysis of Similarity and Experimental Study of Collimator System for TMT Wide Field Spectrometer

Peng Yuanjing^{1,2,3}, Xu Mingming^{1,2*}, Chen Yi^{1,2}, Hu Zhongwen^{1,2}, Ji Hangxin^{1,2},
Wang Lei^{1,2}

¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

²CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Large optomechanical instruments are difficult to process in short time. In order to verify the correctness of instrument design, the similarity model test was used to replace the prototype research. Based on the similarity theorem, the similarity relationship between the prototype and the scaled model of the collimator system in the Thirty Meter Telescope (TMT) wide field spectrometer was first derived. The finite element models of the prototype and the 1:3 scaled model were then established, and the modal analysis and the surface analysis were conducted based on these two models. The similarity model test and the analysis for the scaled model object were finally performed. At the scale of 1:3, the vibration mode similarities of these two models conform to the theoretical analysis results. The root mean square value of surface wavefront errors for the scaled model is 0.065λ (λ

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-10-30; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(U1831108, 11603054)、江苏省基金项目(BK20191507)

通信作者: *mingxu@niaot.ac.cn

is wavelength) in the working environment. The model test results prove that the scaled model of the collimator system can satisfy the requirements of an optical system, which can predict the dynamic responses and surface deformation changes of prototype. The study can provide technical accumulation for the formal research of subsequent projects.

Key words measurement; thirty meter telescope; wide field spectrometer; collimator system; dynamics analysis of similarity; similarity model test

OCIS codes 120.6200; 110.6770; 120.4630; 120.1680

1 引言

宽视场光谱仪是三十米望远镜(TMT)重要的终端仪器,可以对暗弱天体进行快速成像和光谱检测^[1]。准直镜系统是宽视场光谱仪的重要组成部分,可准直光路,在提高光谱仪精度和提升极大望远镜观测能力上具有重要作用。宽视场光谱仪准直镜系统尺寸较大,结构复杂,精度要求较高,基于系统本体进行试验会产生加工制造周期长、试验成本高等问题。因此,基于相似理论对准直镜系统进行缩尺模型的合理设计,通过缩尺模型试验对原型动力学特性及响应进行有效的物理模拟,再现原型典型特征,并利用模型试验结果反推原型的动力学参数和特性,这些工作具有重要的意义^[2]。

缩尺模型模拟原型的相似理论主要是基于相似第二定理,相似第二定理又称 Π 定理,表述为“问题中若有 N 个变量(包括 $N-1$ 个自变量和 1 个因变量),而基本量的数目是 k ,那么一定形成 $N-k$ 个无量纲变量(包括 $N-k-1$ 个无量纲自变量和 1 个无量纲因变量),它们之间形成确定的函数关系”^[3]。该定理可以指导相似模型的设计,把模型试验推广到原型中去。

近年来,相似理论在大型装备的结构分析中得到了越来越多的应用。金玉龙等^[4]设计了集装箱码头岸边起重机的 1:50 缩尺模型,通过锤击模态试验和地震振动台试验获取了缩尺模型的动态特性和响应,并以此预测出原型结构的相关特性。周颖等^[5]对轨道-路基进行了 1/4 相似模型设计,并对不同激振频率工况下的模型体系进行了试验研究。王永岩等^[6]通过对大型直线振动筛及其相似试验模型筛进行试验模态分析,证实了缩小比例相似模型试验的有效性,验证了相似模型数据与原型试验数据的一致性。

在通常情况下,相似理论与模型试验的研究主要集中于土建、航空航天以及大型负载结构等领域,关于宽视场光谱仪准直镜系统一类的高精度光机仪器的相似性研究相对较少。因此,本文提出了针对

TMT 宽视场光谱仪准直镜系统的相似设计方法,以相似理论为分析基础,对准直镜系统进行了缩尺模型设计并建模。通过仿真分析和试验检测的方法,对缩尺模型进行了研究,得到了相应的分析结果。基于此结果,根据相似理论,推测了原型工作性能,证明了缩比模型替代原型试验的有效性,为原型研制提供了理论指导。

2 准直镜系统的缩尺模型设计

2.1 几何缩比的确定

准直镜为大型离轴抛物面矩形反射镜,主要由镜体、支撑杆、连接座、柔性铰链等元件组成,各元件分别采用微晶玻璃、钛合金、殷钢、60Si2Mn 等材料,系统总质量为 229.21 kg。准直镜镜体背面布满轻量化孔,系统的主体支撑结构为六根圆柱支撑杆。反射镜会受到支撑位置处的应力作用,从而反射镜面形和整个光学系统的成像质量会受到影响^[7]。因此,为了减小系统应力,减小支撑方式对镜面变形的影响,支撑杆两端分别设置了柔性铰链,通过其自身弹性变形来吸收系统应变。

在准直镜系统的设计前期,通过相关算法优化,得到了图 1 所示的准直镜系统的最优结构及相关重要尺寸。可以看出,系统中的小尺寸结构主要分布在柔性铰链和轻量化孔处,柔性铰链变形部分的宽度为 4.86 mm,两个轻量化孔之间的壁厚为 7.4 mm。

缩尺模型要求对系统进行全尺寸缩小,考虑到柔性铰链和轻量化孔壁厚这类小尺寸结构过多,且过大的缩尺比例不但会对准直镜的加工提出较高要求,还容易使柔性铰链处产生应力集中,影响支撑系统的结构安全,因此结合现有工艺制造水平及系统薄弱环节的尺寸,将缩尺比例控制为 1/3~1/2 是比较合适的。由于试验场地有限,1/3 缩尺模型更能适应试验室空间,方便支架、测量仪器、驱动装置等的架设和安装。此外,根据有限元模型结果可知,1/3 缩尺模型的质量为 8.49 kg,1/2 缩尺模型的质量为 28.65 kg。因此,相对于 1/2 缩尺模型,1/3 缩尺模型能够大幅度减小系统质量,减少材料的使

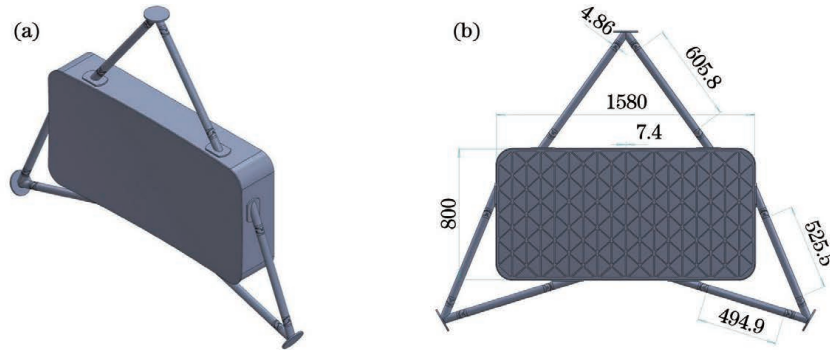


图 1 准直镜系统的结构及主要尺寸。(a)结构;(b)主要尺寸

Fig. 1 Structure and main dimensions of collimator system. (a) Structure; (b) main dimensions

用,从而最大程度地节约经济成本。综上,在现有条件下选用 1:3 的缩尺比例对准直镜模型进行全尺寸缩小是比较合适的。

2.2 准直镜系统的相似关系分析

对于结构动力学模型的试验,模型与原型需要保持以下几个方面相似:1)空间条件相似,即原型与模型的空间相对位置和几何尺寸相似;2)物理条件相似,即原型与模型的力学特性及由激励引起的响应保持相似;3)边界条件相似,即结构表面承受激励、载荷的顺序相似,原型与模型的约束条件相同;4)运动条件相似,即结构的运动状态及产生运动的条件相似^[8]。因此,基于以上几个条件,利用相似第二定理,在准直镜系统原型与模型之间建立对应的函数关系。

准直镜工作条件下产生的变形与应力等受到镜体几何形状、镜体材料属性、镜体所受载荷以及对镜体的位移约束的影响。为了探究准直镜系统缩尺模型与原型间的相似关系,需定义原型与缩尺模型之间相关物理量的比值。

定义原型与缩尺模型几何尺度之间的缩比为 $\lambda_l = \frac{l_p}{l_m}$,其中下标 p 代表原型,下标 m 代表缩尺模型,全文同。

由于准直镜系统在给定边界条件下具有特定的固有频率,因此建立准直镜固有频率的关系式^[9]:

$$f = q(l, E, \nu, \rho), \quad (1)$$

式中: f 为系统的固有频率; l 为准直镜的线性特征尺寸; E 为镜体材料的杨氏模量; ν 为镜体材料的泊松比; ρ 为材料的密度。

取 l, E, ρ 为基本单位,得到(1)式的无量纲表达式:

$$\frac{fl}{\sqrt{E/\rho}} = q(\nu), \quad (2)$$

则模型与原型固有频率之间的关系为

$$\frac{f_p l_p / (E_p \rho_p)^{0.5}}{f_m l_m / (E_m \rho_m)^{0.5}} = \frac{q(\nu_p)}{q(\nu_m)}. \quad (3)$$

原型与模型各对应部分采用相同的材料,所以材料属性相同,即 $E_p = E_m, \rho_p = \rho_m, \nu_p = \nu_m$,则可以简化(3)式,得出准直镜系统原型与缩尺模型的固有频率之比为

$$\lambda_f = \frac{f_p}{f_m} = \frac{l_m}{l_p} = \frac{1}{\lambda_l}. \quad (4)$$

由此可见,准直镜原型与缩尺模型的固有频率之比与几何尺度之比互为倒数。

准直镜系统工作时所受的外力较小,对系统性能影响最大的是自身重力,因此建立准直镜系统的重力表达式:

$$G = y(l, g, \rho), \quad (5)$$

式中: G 为准直镜系统所受的重力; g 为重力加速度。

取 l, g 为基本单位,得到无量纲表达式为

$$\frac{G}{l^3 g} = y(\rho), \quad (6)$$

则原型与模型系统重力之间的关系为

$$\frac{G_p / (l_p^3 g_p)}{G_m / (l_m^3 g_m)} = \frac{y(\rho_p)}{y(\rho_m)}. \quad (7)$$

原型与模型的材料属性相同,所处地域的重力加速度相差较小,近似有 $g_p = g_m$,则有

$$\lambda_G = \frac{G_p}{G_m} = \frac{l_p^3}{l_m^3} = \lambda_l^3. \quad (8)$$

重力引起的准直镜镜面的变形为

$$d = \frac{Gl}{EA}, \quad (9)$$

式中: d 为镜面变形; A 为镜体截面面积。

量纲分析后得到

$$d = \frac{\rho g l^2}{E}, \quad (10)$$

$$\lambda_d = \frac{d_p}{d_m} = \frac{\rho_p g_p l_p^2 / E_p}{\rho_m g_m l_m^2 / E_m} = \lambda_l^2 \quad (11)$$

准直镜系统模型各物理量的相似比列表 1 所示。

表 1 准直镜系统物理参数的相似比

Table 1 Similarity ratio among physical parameters of collimator system

Physical parameter	Scale factor	Value
l	λ_l	3
ρ	λ_ρ	1
E	λ_E	1
ν	λ_ν	1
f	λ_f	1/3
G	λ_G	27
d	λ_d	9

3 准直镜系统的有限模型建立

本节基于准直镜系统设计目标,建立了准直镜系统的有限元模型,并根据几何相似比建立了其 1/3 缩尺模型的有限元模型。在有限元模型建立时,将系统中连接各元件的螺钉、销钉等进行一定程度的简化。准直镜系统底座固定在支架上,此处布置电路,小尺寸结构较多。建立模型时,省略底座线路孔,仅保留其固定作用,将其简化为图 1 所示的圆盘形系统底座,达到提高计算效率的目的。

对于准直镜系统而言,满足动力学相似的基本原则为,工作环境下缩尺模型与系统原型的振型保持较高的相似度。在有限元分析过程中,使准直镜系统有限元原型和缩尺模型有限元模型的边界条件保持一致,对二者进行模态分析,得出各自的固有频率和振型并进行对比。表 2 为准直镜系统原型有限元

表 2 准直镜系统原型有限元模型与缩尺模型有限元模型的前六阶频率

Table 2 First to sixth order frequencies for finite element models of prototype and scaled model of collimator system

Order	Frequency /Hz		Error /%
	Finite element model of prototype	Finite element model of scaled model	
1	15.406	47.736	3.28
2	24.398	74.927	2.37
3	32.657	101.07	3.16
4	168.41	506.34	0.22
5	184.68	556.6	0.46
6	233.26	705.21	0.79

元模型与缩尺模型有限元模型的前六阶频率。

由表 2 可以看出,准直镜系统基于相似关系进行缩尺后,相似缩尺模型和原型的固有频率基本满足相似比为 3 : 1 的关系,与理论推导结果符合。在对两个有限元模型进行频率分析时,由于两个模型的尺寸不同,有限元网格形态无法保持完全一致。因此,有限元分析得出的频率与理论数值计算的结果存在一定误差。本次分析结果的误差都控制在 5% 以内,系统原型和缩尺模型之间的相似关系与理论分析结果基本保持一致,证明了基于相似关系的转换,缩尺模型能够有效地预测原型的动力学响应特性且结果具有较高的准确度。

图 2 对比了准直镜系统有限元原型和有限元缩尺模型的前三阶振型云图。可以看出,两模型的振型较为相似,这验证了相似理论的正确性,同时证明缩尺模型具有良好的模拟效果。

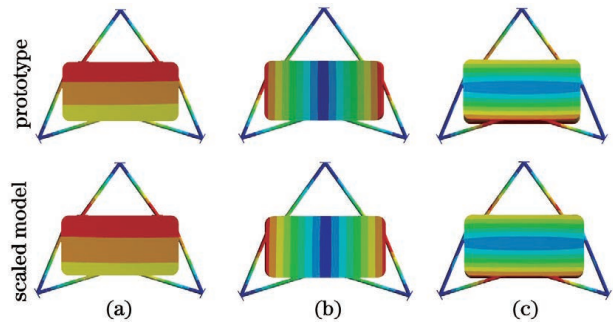


图 2 准直镜系统原型有限元模型和缩尺模型有限元模型的前三阶振型对比图。(a)一阶振型;(b)二阶振型;(c)三阶振型

Fig. 2 Comparison among first to third order vibration modes for finite element models of prototype and scaled model of collimator system. (a) First order vibration mode; (b) second order vibration mode; (c) third order vibration mode

将准直镜姿态调整为长边垂直于地面并对其面形进行有限元分析,图 3 为拟合后的面形云图。拟合得到二者镜面均方根(RMS)值与理论值的误差为 6.21%,峰谷(PV)值与理论值的误差为 1.90%,误差较小。误差产生的主要原因是拟合需要提取镜面坐标点的形变数据,由于两模型的有限元网格划分不完全一致,因此生成的镜面数据点不能完全一一对应。但比较面形可以看出,二者面形分布的高度相似,高变形区域主要集中于镜体与连接座相接处附近,且镜体中部也有一面形较大区域。

由以上有限元分析结果可以看出,准直镜系统原型与缩尺模型的固有频率关系符合相似理论关

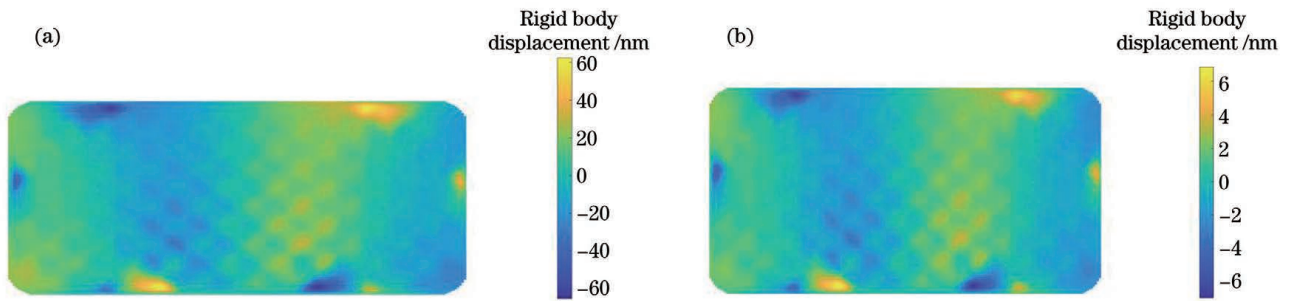


图 3 准直镜系统的镜面变形图。(a)原型;(b)缩尺模型

Fig. 3 Surface deformation of collimator system. (a) Prototype; (b) scaled model

系且误差较小。两模型的前三阶振型相似,证明了经过相似设计的缩尺模型能够较为准确地模拟原型的特征和响应。原型和缩尺模型的镜面变形分析结果可以证明,在相同的边界条件下,利用缩尺模型能够较为准确地模拟原型的面形。

4 模型试验

准直镜系统缩尺模型的镜面变形检测情况如图 4 所示。准直镜系统在实际工作时固定于大型光机仪器之上,并随其绕一定点作缓慢圆周运动。因此,试验前需根据相似缩小比例,加工出准直镜系统的缩尺模型及其支撑装置,按照实际工作环境对系统进行安装并布置电路、驱动装置等。试验时,将准直镜系统的姿态调整为长边与地面垂直,调试检测仪器 PhaseCam4020 干涉仪,使其对准镜体中部,进行镜面变形的检测。

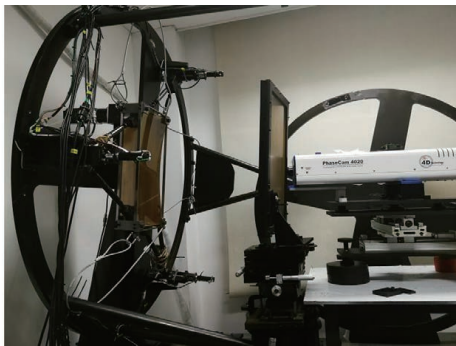


图 4 准直镜系统缩尺模型试验

Fig. 4 Scaled model test of collimator system

图 5(a)是准直镜加工镀膜后的面形检测结果。由于准直镜为离轴抛物面镜,准直镜加工镀膜后要求镜面 PV 值小于 $\lambda/6$ (λ 为波长)。根据实测结果可知,加工后准直镜面形 PV 值为 0.164λ ,波面误差均方根值为 0.024λ ,基本满足加工设计要求。图 5(b)是图 4 工况下缩尺模型的镜面检测结果。根据实测结果可知,工况下准直镜面形 PV 值为 0.51λ ,波面误差均方根值为 0.065λ ,斯特尔比为

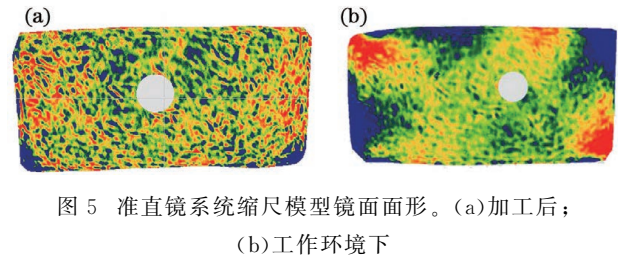


图 5 准直镜系统缩尺模型镜面面形。(a)加工后;
(b)工作环境下

Fig. 5 Mirror surface deformation for scaled model of collimator system. (a) After processing; (b) in working environment

0.817。根据 Marechal 准则可知,当斯特尔比大于 0.8,波面误差均方根值小于 $\lambda/14$ 时,光学系统可被认定为准完善系统^[10]。

根据试验测试结果可知,准直镜系统满足准完善系统成像条件,但缩尺模型试验检测到的镜面变形相比于理论结果较大。这是因为大口径反射镜组件的反射面形受反射镜加工、反射镜夹持以及重力倾斜等因素影响^[11]。本次试验的主要误差总结如下。

1) 镜面加工误差。在实际加工中,受到加工条件的限制,如机床误差、磨具损耗和磨粒尺寸等,加工面形精度无法达到理想面形要求。

2) 检测系统误差。由于镜面检测标准系统存在本体误差,检测系统对准直镜进行面形检测时存在偏差。

3) 测试环境误差。测试时环境温度、气流扰动、各种形式的振动、环境湿度和压强等条件的不可控性影响测试精度^[12]。

4) 系统装配误差。支撑装配时引入的面形误差取决于零件的加工精度和装配工艺^[13]。

5) 准直镜缩尺模型支撑材料和准直镜镜面材料不同,导致环境温度发生变化时各部件热膨胀性能不一致,不同材料接触面产生应力和形变,对镜面面形产生影响。

6) 加工零件长时间放置后会产生应力释放,准

直镜缩尺模型产生形变,进而对准直镜面形检测产生影响。

总体来看,系统处于预设姿态时,整体面形满足理想光学系统成像条件。根据面形大小分布可知,镜面变形较大处主要集中于准直镜镜体边缘靠近连接座处,这一点与理论分析结果一致。采用杆件作为支撑系统主体时,支撑点处产生的应力相对较大,对光学元件面形变化的影响也较大。根据面形检测结果可知,准直镜缩尺模型是满足光学系统工作条件的。

5 结 论

根据准直镜系统实际的结构尺寸,确定了适合模型的几何缩尺比例。根据相似理论,推导出原型和缩尺模型动力学特征、响应及各物理量之间的相似关系。建立了准直镜系统有限元模型和 1/3 有限元缩尺模型,并对二者进行了分析对比,发现准直镜系统 1/3 缩尺模型能够准确地预测出原型的动力学响应及特征,且误差较小;缩尺模型的面形分布和原型具有高度的相似性,镜体与连接座相接处附近的镜面变形最大,面形分析拟合结果在误差范围内符合相似关系。对准直镜系统的实物缩尺模型进行了面形检测,试验结果显示,工况下准直镜面形 PV 值为 0.51λ ,波面误差均方根值为 0.065λ ,模型满足光学系统工作要求,证明了 1/3 缩尺模型结构设计的合理性,为后续试验研究的开展打下了良好的基础。

参 考 文 献

- [1] Ji H X, Zhu Y T, Hu Z W. Optical system design of high throughput multi-channel spectrograph for very large telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0330003.
季杭馨,朱永田,胡中文.极大望远镜高效率多通道光谱仪的光学系统设计[J].光学学报,2019,39(3):0330003.
- [2] Luo Z, Zhu Y P, Han Q K, et al. Review and prospect for dynamic similitude theory and its applications in the structure vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(23): 114-134.
罗忠,朱云鹏,韩清凯,等.动力学相似理论及在结构振动分析中的应用研究评述与展望[J].机械工程学报,2016,52(23):114-134.
- [3] Li X H, Cao W W, Tang M. The application of similarity theory in the finite element analysis of complex and large components[J]. Machine Design & Research, 2013, 29(5): 18-20, 25.
李新华,曹伟魏,唐敏.相似理论在大型复杂构件有限元分析中的应用[J].机械设计与研究,2013,29(5):18-20,25.
- [4] Jin Y L, Wu T X. Dynamic similarity analysis and experimental verification on a quayside container crane[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(10): 1609-1615.
金玉龙,吴天行.集装箱码头岸桥结构的动力相似分析与试验验证[J].上海交通大学学报,2012,46(10):1609-1615.
- [5] Zhou Y, Chen J. Uniform dynamic similitude method and experimental study for the track-subgrade system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(6): 815-823, 841.
周颖,陈瑾.轨道-路基体系一致动力相似设计与动力试验[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(6):815-823,841.
- [6] Wang Y Y, Zhang Z R. Similar experimental study of test model and prototype of vibrating screen [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 101-105.
王永岩,张则荣.振动筛试验模型和原型相似试验研究[J].机械工程学报,2011,47(5):101-105.
- [7] Li Z D, Liu H Y, Wei J H, et al. Research on stress of large aperture mirror supporting structures by search algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1412003.
李正达,刘贺宇,卫金鸿,等.基于搜索算法的大口径反射镜支撑结构应力研究[J].光学学报,2020,40(14):1412003.
- [8] Chen Z, Chen G P. Research of dynamics response based on similarity theory and model test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(6): 995-1000, 1164.
陈喆,陈国平.相似理论和模型试验的结构动响应分析运用[J].振动·测试与诊断,2014,34(6):995-1000,1164.
- [9] Tan Q M. Similarity analysis [M]. Beijing: Peking University Press, 2019.
谈庆明.相似分析[M].北京:北京大学出版社,2019.
- [10] Hu Q Q. Telescope technology and astrometry [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2014.
胡企千.望远镜技术与天文测天[M].南京:东南大学出版社,2014.
- [11] Chen H P, Xiong Z, Cao T F, et al. Research on surface measure device for process of large aperture mirror assembly [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0212002.
陈海平,熊召,曹庭分,等.大口径反射镜组件面形检测系统及方法研究[J].光学学报,2016,36(2):

0212002.

- [12] Chen H, Shi Z G, Sui Y X, et al. Thermal deformation analysis of optical surfaces caused by environmental temperature during interferometric testing [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31 (1): 0112007.

陈华, 史振广, 隋永新, 等. 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(1):

0112007.

- [13] Wang K J, Dong J H, Xuan M, et al. Compound support structure for large aperture mirror of space remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(7): 1719-1730.

王克军, 董吉洪, 宣明, 等. 空间遥感器大口径反射镜的复合支撑结构 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1719-1730.