

文章编号 1004-924X(2011)11-2664-07

神光 III 主机装置编组站稳定性设计

王美聪, 陈刚, 黄湛, 陈晓娟, 吴文凯, 王军, 朱明智*
(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:为使神光 III 主机装置的打靶精度达到 $30\ \mu\text{m}$, 本文以稳定性指标为前提设计了该装置的靶场编组站, 并对编组站刚架和传输反射镜组件进行了优化。采用钢筋混凝土结构支撑编组站刚架, 在编组站刚架主框架内增加斜撑, 以减小并合理分布编组站刚架的质量载荷, 同时对局部的横梁增加人字形斜撑。设计了反射镜架且使其基频远高于编组站刚架基频以抑制编组站反射镜在随机宽频振动激励下的角度漂移。对靶场结构有限元(FEA)模型的力学分析表明, 编组站中 87% 的传输反射镜的角度漂移低于 $0.48\ \mu\text{rad}$, 根据靶场系统中各元件漂移对光路定位误差的影响公式进行分析, 结果显示编组站反射镜角度漂移可以满足靶场各单条光路定位误差不超过 $12.9\ \mu\text{m}$ 的稳定性指标, 证明所设计的神光 III 主机装置编组站可以满足相应的稳定性要求。

关键词:神光 III 主机装置; 编组站; 稳定性; 角度漂移

中图分类号: TL632.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2664

Stability design of switchyard in SG III facility

WANG Mei-cong, CHEN Gang, HUANG Zhan, CHEN Xiao-juan, WU Wen-kai,
WANG Jun, ZHU Ming-zhi*

(*Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhuzm@caep.ac.cn*

Abstract: To assure the pointing accuracy in a shooting target to be better than $30\ \mu\text{m}$ for the Shen Guang III (SG III) facility, the switchyard of target area for the facility was designed and the rigid frame and transport mirrors in the switchyard were optimized to improve their stability. In design, the reinforced concrete was used to support the switchyard, and the tilted supports were added in the steel frame of switchyard to decrease and distribute the mass load reasonably. Furthermore, the herring-bone supports were firmed to local horizontal beams. The transport mirror supports were also designed, in which their foundational frequencies were much higher than that of the swichyard. By above ways, the angle shifts of transmission mirrors in random broadband vibration can be suppressed successfully. The mechanical analysis of range structure by Finite Element Analysis(FEA) indicates that 87% of transport mirrors show their angle shifts less than $0.48\ \mu\text{rad}$. According to the relation between the rotation drifts of the optics components and the positioning errors of optical path, it can

收稿日期: 2011-01-10; 修订日期: 2011-03-11.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA804217)

be seen that the rotation drifts of the transmission mirrors could meet the stability requirements for the positioning error of each single optical path not more than $12.9 \mu\text{m}$.

Key words: SGIII facility; switchyard; stability; rotation drift

1 引言

神光Ⅲ主机装置是国内目前正在建的规模最大的惯性约束聚变装置,是一台世界级的高功率激光驱动器。神光Ⅲ主机装置的激光光束数量是神光Ⅲ原型装置的 6 倍,采用 48 束激光打靶。随着装置能量的提高,装置的结构规模和复杂程度也大大增加^[1]。

神光Ⅲ主机装置要求的打靶精度为:48 束激光的质心点在靶平面或其等效平面上的位置均方根偏差不超过 $30 \mu\text{m}$ ^[2]。影响打靶精度的主要因素有两个方面:一是光束的准直精度,即光路准直调整步长的精度;二是光传输系统在完成准直调整后至打靶前的漂移,即光传输系统的稳定性。惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)装置相关研究表明,光束准直精度引起的误差约占整个打靶误差的 8%,而光传输系统的漂移误差约占整个打靶误差的 92%^[3-6]。在靶场各路激光中,影响光束最终打靶误差的主要因素有:传输反射镜角度漂移、终端透镜平动漂移以及靶平动漂移。神光Ⅲ主机装置编组站采用 120 个传输反射镜分别对 48 束激光进行引导传输,这些传输反射镜的角度漂移影响到整个装置的打靶精度^[7-8]。靶场编组站的结构设计主要由传输反射镜的稳定性指标控制。

本文设计了神光Ⅲ主机装置靶场编组站,并对编组站刚架和反射镜组件设计进行了一系列优化,建立了靶场结构有限元模型,分析了编组站传输反射镜在随机宽频振动激励下的动力学响应,获得了各传输反射镜角度漂移和靶场各单条光路的定位误差。

2 神光Ⅲ主机装置编组站结构简介

神光Ⅲ主机装置靶场主要由物理试验区和编组站组成,如图 1 所示,编组站对从主放大级系统输出的 6 个 4×2 阵列排布的激光光束组进行编

组,使之进入物理试验区后能够按照特定的角度注入靶室进行打靶。

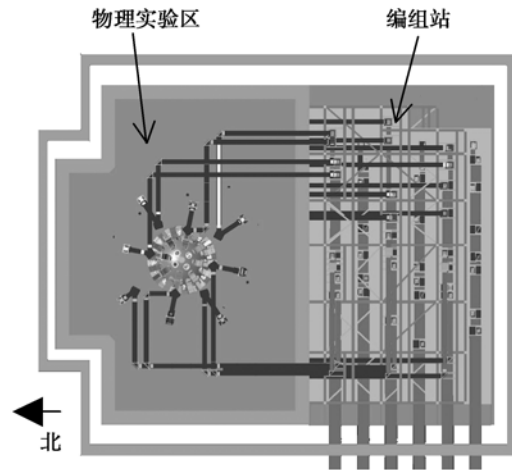


图 1 神光Ⅲ主机装置靶场概貌

Fig. 1 Schematic diagram of target area of SGIII facility

神光Ⅲ主机装置编组站主要由刚架及其支撑的传输反射镜组件和光束管道等组成,如图 2 所示。

编组站刚架是具有 9 层支撑平台的钢结构桁架,重量约 1 000 t,外形尺寸约为 $19.4 \text{ m} \times 32 \text{ m} \times 24.7 \text{ m}$ 。刚架主体结构通过 7 排共 31 根矩形截面钢材立柱直接支撑在隔振地基上,为增强刚架整体在南北方向的刚度,刚架北面和靶区混凝土建筑墙固接。

传输反射镜架支撑在刚架上,镜架和传输反射镜之间采用运动学支承定位,运动学支承定位具有高重复定位精度,可以实现传输反射镜的在线快速更换。在图 2 中,编组站刚架支撑 48 个分束反射镜组件、48 个 I 型反射镜组件和 24 个 II 型反射镜组件。分束反射镜将单束激光从 4×2 阵列排布的激光束组中分离出来并引导至各种高度;I 型反射镜将分离出来的光束引导至 II 型反射镜;II 型反射镜对光束进行水平面内的引导。通过这 3 类反射镜对光束进行引导和传输,完成对 48 束激光的编组。

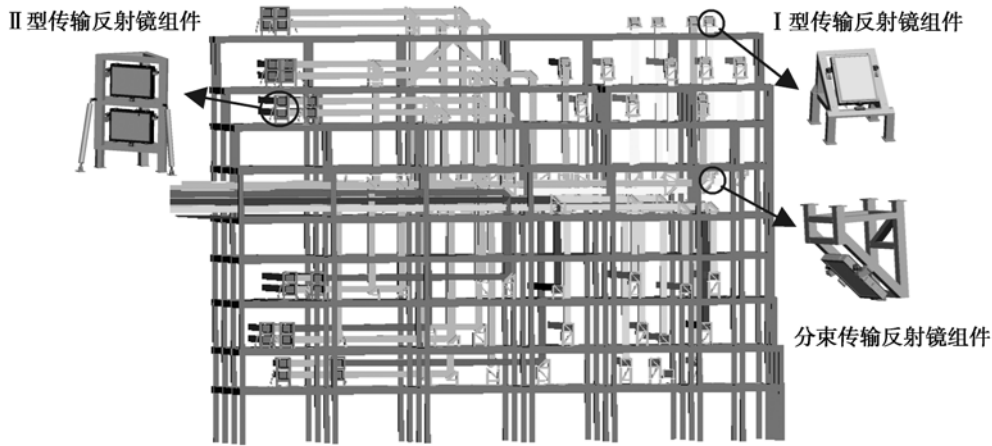


图 2 编组站结构和传输反射镜组件

Fig. 2 Switchyard and transport mirrors of SGIII facility

3 编组站的稳定性设计及优化

3.1 稳定性设计原则

编组站传输反射镜角度漂移误差主要是由编组站刚架和镜架在各种外载荷激励下的响应引起的。在 ICF 装置的靶场中,外载荷激励包括环境振动、噪声、风压波动、温度梯度等。根据神光 III 主机装置的稳定性指标分配,对编组站进行稳定性分析时,重点分析了由宽频环境振动激励引起的反射镜角度漂移,在靶场地基上施加加速度随机激励,其功率谱密度在 X、Y、Z 3 个方向上的分量均为 $10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ (1~200 Hz)。在考虑靶场地基柔性的情况下,对编组站传输反射镜的稳定性要求为:单个镜片的角度漂移不超过 $0.48 \mu\text{rad}$ 或靶场单条光路总的定位误差不超过 $12.9 \mu\text{m}$ ^[9-10]。

编组站的传输反射镜支撑系统由隔振地基、靶区钢筋混凝土建筑、编组站刚架、传输反射镜架、传输反射镜构成。该支撑系统的基频振动决定整个系统的动态响应,包括设计所关注的光学元件的响应。

在传输反射镜支撑系统中,每一级支撑结构都是多自由度的,为了分析这些结构在环境振动条件下的特性,结构可以表示为一个基频和原结构相同的单自由度系统。该单自由度结构在幅值恒定的环境振动激励下的均方响应可由公式(1)计算^[11]:

$$E[y^2] = (\pi/2) \times S_0 / (\xi \times \omega_n^3) = (W_0/8) / [\xi \times (2 \times \pi \times f_n)^3], \quad (1)$$

式中 S_0 为环境振动激励的幅值, ξ 为结构的模态阻尼, ω_n 为结构频率(1/s), W_0 为环境振动输入的振动幅值(g^2/Hz), f_n 为结构频率(Hz)。

公式(1)表明当基频增加时,结构的均方响应与结构频率的 3 次方成反比,因此提高其支撑结构的基频可以有效地抑制反射镜的动力学响应。若将每一级支撑结构表示为一单自由度系统,支撑系统在全频域的响应可以由一系列弹簧的串联系统来表示^[3]:

$$K_{\text{eq}} = 1 / [(1/k_1) + (1/k_2) + \dots + (1/k_n)]. \quad (2)$$

式(2)中 k_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为单自由度支撑结构的刚度,从公式(2)可以看出,刚度最小的弹簧或最柔软的弹簧将对整个系统的刚度 K_{eq} 起决定性作用;而当某一级支撑结构 k_i 远远大于系统刚度 K_{eq} 时,此结构对整个系统的影响则可以忽略。众所周知,结构的频率由结构质量和刚度共同决定,在质量不变时,刚度越大频率越大;而当刚度保持不变时,减小质量则可以增大频率。

基于以上分析,为使编组站传输反射镜满足稳定性要求,在隔振地基和靶区混凝土建筑结构已确定的条件下,作为刚度较弱的编组站刚架,应减小和合理分配刚架的质量载荷,以提高编组站传输反射镜支撑系统的基频;合理设计传输反射镜架,使其基频远高于编组站刚架基频,减小传输反射镜架对镜片角度漂移的影响。

3.2 稳定性设计及优化

编组站传输反射镜的支撑位置最高约 25 m。为给传输反射镜提供微米级的稳定支撑,编组站

的结构设计主要由稳定性指标控制。

为了分析传输反射镜的稳定性,利用 ANSYS 软件建立了隔振地基、编组站刚架、传输反射镜架、传输反射镜、靶区钢筋混凝土建筑、真空靶室等靶场组件的一体化有限元模型。其中隔振地基和靶区钢混楼板均采用 SHELL 63 单元,钢混立柱、编组站刚架、镜架均采用 BEAM 188 梁单元,真空靶室按壳考虑。编组站钢架和靶区钢混结构按固定连接处理。

最初设计方案的动力学分析结果表明:靶场总体结构的基频为 6.1 Hz,为编组站的東西方向的晃动,所有传输反射镜在东西方向的角度漂移较大。另外,位于编组站南面的传输反射镜的角度漂移大于北面的传输反射镜,这主要是因为编组站刚架在北面有靶区钢筋混凝土建筑墙作支撑,而在南面没有支撑。所有的传输反射镜的角度漂移均超出了所分配的稳定性指标。

为了增大编组站东西向的刚度,在不与光路干涉的前提下,在刚架主框架东西向的 4 个竖向面内增加了斜撑,将原来的四边形结构变成较为稳定的三角形结构如图 3 所示。对改进后的结构进行力学分析,结构的基频振动变为靶区钢筋混凝土建筑带动的整个结构南北方向的晃动,编组站除第 4 层外其余层的传输反射镜角度漂移得到了明显的抑制,但第 4 层反射镜角度漂移仍然较大。

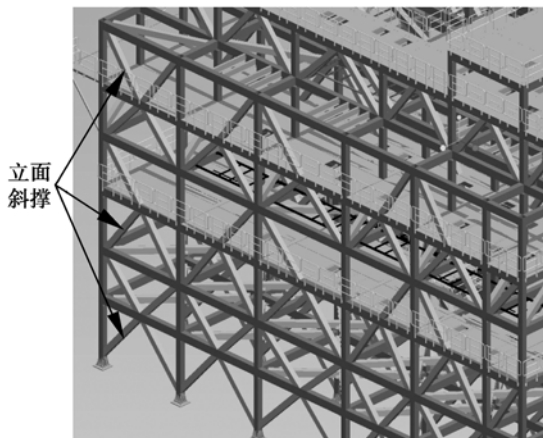


图 3 编组站刚架立面斜撑

Fig. 3 Tilted supports in steel frame of switching-yard

由于光路排布和镜架安装方式等原因,支撑

在编组站第 4 层的传输反射镜组件为 48 个,而支撑在其余层的传输反射镜组件平均为 12 个,导致分布在编组站第 4 层平台的质量载荷较大。为了减小第 4 层传输反射镜的角度漂移,将位置较高的传输反射镜改为倒挂结构,倒装在第 4 层上方的辅助操作层的下方,一方面分散了集中在编组站第 4 层的质量载荷,另一方面也将部分反射镜架与刚架主结构的距离减小了约 1 m,如图 4 所示。力学分析结果表明,集中载荷的分散使得位于第 4 层和辅助操作层的传输反射镜角度漂移减小了 0.1~0.25 μrad 。

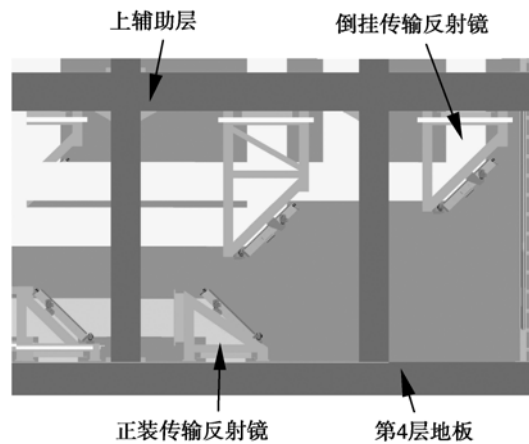


图 4 编组站第 4 层传输反射镜

Fig. 4 Transmission mirror supports in the fourth floor of switching yard

在由于光路排布导致的编组站传输反射镜局部比较密集的地方,支撑这些镜架的横梁及工字钢的摆动较大,导致传输反射镜角度漂移较大。因此,在上下 2 层对这些局部的横梁增加人字形

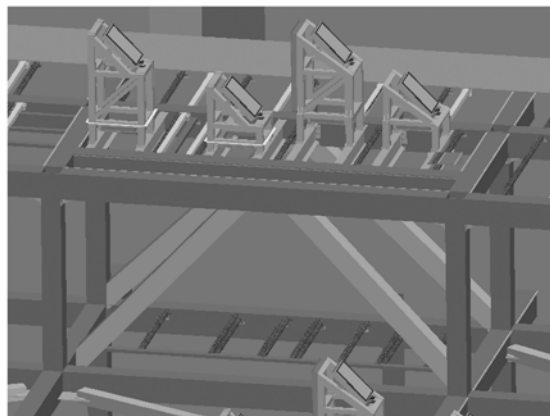


图 5 人字形斜撑

Fig. 5 Herringbone supports

斜撑来增加其抗弯刚度,如图 5 所示,力学分析结果表明,传输反射镜的角度漂移减小量为 $0.12 \sim 0.3 \mu\text{rad}$ 不等。

在传输反射镜组件样件研制的基础上,在神光 III 主机装置的设计中将镜框材料由钢改为铝,运动学支承球头和挂块的材料仍分别选用 GCr15 和 9Cr18,在不降低传输反射镜与镜架的联接刚度的同时,减小了镜架的质量载荷,对于本身刚度较弱的 I 型反射镜组件,对镜架中非承重梁截面进行细化,改变镜架的质量分布如图 2 所示;对于 II 型反射镜组件,由于光路排布和空间约束,2 个传输反射镜支撑在同一镜架上,由于结构在反射镜法线方向上的刚度较弱,在镜架竖梁上增加了斜拉。通过以上的优化,传输反射镜组件的基频增加了 $3 \sim 10 \text{ Hz}$ 。

3.3 稳定性设计结果

编组站经过以上优化后,动力学分析表明靶场总体结构的基频振动由编组站在东西方向的晃动变为靶区钢筋混凝土建筑带动编组站的南北方向的晃动,如图 6 所示,编组站基频有明显的提高,达到 8.09 Hz ,传输反射镜组件的基频在 $25 \sim 30 \text{ Hz}$,远远超过了编组站的基频,传输反射镜角度漂移较最初方案降低了 $0.3 \sim 0.6 \mu\text{rad}$ 。编组站中 105 块传输反射镜的角度漂移满足 $0.48 \mu\text{rad}$ 的稳定性指标要求,占总数量的 87% ,其余 15 块传输反射镜的角度漂移略高于所分配的指标。

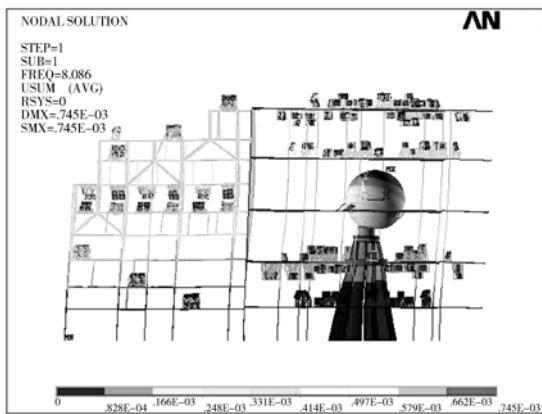


图 6 靶场第 1 阶固有振型

Fig. 6 The first inherent mode of target area

靶场单条光路定位误差 $\sigma_{T, \text{drift}}$ 计算公式(3)为靶场系统中各元件漂移对光路定位误差的影响公式^[9],式中 Δ_{Tar} 为靶平动漂移, Δ_{FL} 为聚焦透镜平动漂移, n 为光路中的传输反射镜数量, $\Delta\theta_{\text{TM}}$ 为各反射镜角度漂移, f_{Tar} 为聚焦透镜的焦距。

$$\sigma_{T, \text{drift}}^2 = \Delta_{\text{Tar}}^2 + \Delta_{\text{FL}}^2 + n(2\Delta\theta_{\text{TM}})^2 f_{\text{Tar}}^2. \quad (3)$$

利用公式(3)分析得到靶场光传输系统单条光路的定位误差 $< 12.9 \mu\text{m}$ 。

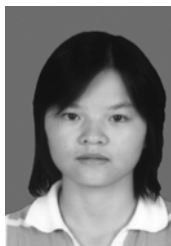
4 结 论

本文以稳定性指标为前提,设计了神光 III 主机装置靶场编组站,并对编组站刚架和反射镜组件进行了一系列改进措施,动力学分析结果表明传输反射镜角度漂移可以满足稳定性要求。编组站稳定性设计的特点表现在:(1)提高编组站整体刚度以及镜架安装处的局部支撑刚度,减小或合理分配传输反射镜及镜架,可以较好地抑制传输反射镜的角度漂移。(2)当传输反射镜组件的基频远高于靶场总体结构基频时,传输反射镜的响应主要由支撑镜架的工字钢的响应和镜架高度决定,而与镜架本身的结构关系不大,进一步提高镜架的基频,对抑制传输反射镜的角度漂移效果不明显。(3)力学分析结果表明,镜架高度较低的传输反射镜以及在整个编组站中处于较低位置的传输反射镜的角度漂移均较小。后续光路调整中,应尽量降低传输反射镜在编组站中的安装高度,并降低镜架自身高度,同时应避免镜架过于集中。(4)钢结构的阻尼约为 0.5% ,远低于钢筋混凝土结构的阻尼 2% 。神光 III 主机装置中仅有 1 面钢筋混凝土建筑墙对编组站进行了支撑,为满足稳定性要求,对编组站刚架的自身刚度要求较高,编组站刚架的设计有一定的难度。建议在 ICF 靶场支撑系统设计中,考虑增加钢筋混凝土建筑对编组站刚架的支撑,通过高阻尼钢筋混凝土建筑提供的稳固支撑来提高编组站的整体刚度。

参考文献:

- [1] 彭翰生, 张小民, 范滇元, 等. 高功率固体激光装置的发展与工程科学问题[J]. 中国工程科学, 2001, 3(3): 1-8.
PENG H SH, ZHANG X M, FAN D Y, *et al.*. Status of high-power solid-state lasers and engineering science[J]. *Engineering Science*, 2001, 3(3): 1-8. (in Chinese)
- [2] 师智全, 彭翰生, 粟敬钦. ICF 驱动器定位误差估计[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 275-278.
SHI ZH Q, PENG H S, SU J Q. Beam positioning error budget in ICF driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2): 275-278. (in Chinese)
- [3] TIETBOHL G L, SOMMER S C. Stability design considerations for mirror support systems in ICF lasers[R]. *Livermore; Lawrence Livermore National Laboratory*, 1996.
- [4] FOLEY R J. Design of the target area for the national ignition facility[R]. *Livermore; Lawrence Livermore National Laboratory*, 1998.
- [5] TRUMER D J. Stability of optical elements in the NIF target area building[R]. *Livermore; Lawrence Livermore National Laboratory*, 1998.
- [6] SOMMER S C, BLISS E S. Beam positioning[R]. *California; Lawrence Livermore National Laboratory*, 1998.
- [7] 傅学农, 陈晓娟, 吴文凯, 等. 大口径反射镜组件设计及稳定性研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 179-183.
FU X N, CHEN X J, WU W K, *et al.*. Design of large aperture mirror support and its stability[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 179-183. (in Chinese)
- [8] 乔战峰, 赵东峰, 戴亚平, 等. “神光-II”第九路终端光学系统稳定性分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 419-422.
QIAO ZH F, ZHAO D F, DAI Y P, *et al.*. Stability analysis of final optical system of additional beam in “Shenguang-II laser facility”[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(3): 419-422. (in Chinese)
- [9] 徐元利, 吴文凯, 陈学前, 等. ICF 装置靶场结构总体稳定性设计[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1485-1488.
XU Y L, WU W K, CHEN X Q, *et al.*. Structural systemic stability design of inertial confinement fusion facility target area[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1485-1488. (in Chinese)
- [10] 陈学前, 冯加权, 徐元利. 基于有限元分析的大型固体激光器稳定性指标重分配[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 1073-1076.
CHEN X Q, FENG J Q, XU Y L. Stability reallocation of large solid state laser based on finite element analysis[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(5): 1073-1076. (in Chinese)
- [11] CRANDALL S H, MARK W D. *Random Vibration in Mechanical Systems*[M]. New York: Academic Press, 1963.

作者简介:



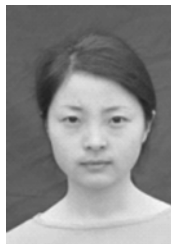
王美聪(1979—),女,湖南娄底人,工程师,2003年于西安交通大学获得学士学位,2006年于清华大学获得硕士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构的设计与研究。E-mail: wangmc@caep.ac.cn



黄 湛(1972—),男,重庆涪陵人,工程师,1993年于成都科技大学获得学士学位,2002年于四川大学获得硕士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构的设计与研究。E-mail: huangz@caep.ac.cn



陈 刚(1968—),男,四川梓潼人,高级工程师,1990年于四川绵阳工学院获得学士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构的设计与研究。E-mail: chg684@sina.com



陈晓娟(1974—),女,陕西咸阳人,高级工程师,1997年于西安理工大学获得学士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构的设计与研究。E-mail: chenxj@caep.ac.cn



吴文凯(1969—),男,湖北武汉人,研究员,1991年于衡阳工学院获得学士学位,主要从事 ICF 装置精密光机和离心机结构的设计与研究。E-mail: wu-wk@caep. ac. cn



王 军(1975—),男,河南驻马店人,副研究员,1994年、2001年分别于重庆大学获得学士及硕士学位,主要从事复杂结构力学分析的研究。E-mail: wangj@caep. ac. cn

通讯作者:



朱明智(1973—),男,四川崇州人,副研究员,1996年于北京理工大学获得学士学位,1999年于西南交通大学获得硕士学位,2006年于西安交通大学获得博士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构设计与研究。E-mail: zhuzmz@caep. ac. cn

● 下期预告

凸面光栅成像光谱仪的光谱定标

齐向东¹, 撒芃芃¹, 潘明忠¹, 崔继承^{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)

凸面光栅成像光谱仪具有畸变小、数值孔径大、结构简单等优点,近年来得到了越来越广泛的应用。光谱定标是确定凸面光栅成像光谱仪光谱特性的重要手段,同时也是其成功研制和深入应用的重要保证。单色准直光定标法是一种精细光谱定标方法,该方法使用高精度单色仪作为定标光源,通过波长扫描法实现各通道中心波长和光谱分辨率的同时标定,弥补了传统标准谱线法光谱定标的不足。为了对自主研发的凸面光栅成像光谱仪进行光谱定标,本文基于单色准直光定标法设计了一套光谱定标系统,光谱定标的结果表明:该定标系统具有较高的定标精度,能够满足实际的定标要求,凸面光栅成像光谱仪的主要光谱特性参数均优于设计指标。