

大口径光栅拼接架动力响应控制分析

张军伟^{1,2} 王 逍¹ 林东晖¹ 周 海¹ 陈良明¹ 张小民¹ 景峰¹

(¹ 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)
² 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要 光栅拼接是解决光栅口径限制的有效途径,而结构稳定性成为光栅拼接研究中面临的主要难题。目前使用的光栅拼接架稳定性不能完全满足实验需要,为明确影响光栅拼接稳定性的主要因素,采用多通道振动测试仪对环境振动进行了测试,结果表明供热通风与空气调节(HVAC)振动是影响光栅拼接架稳定性的主要因素;采用实测功率谱作为激励,对光栅拼接架进行了优化分析,分析结果表明增加结构阻尼可以降低拼接架动态响应;根据有限元分析结果,采用高阻尼材料对拼接架运动结合面的连接状态进行了改进,实验表明改进后的光栅拼接架动态响应大幅减小,同时稳定时间得到延长。

关键词 光栅拼接;稳定性;动力响应;环境振动

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0112010

Dynamic Response Control and Analysis of Large Aperture Tiled Grating Mount

Zhang Junwei^{1,2} Wang Xiao¹ Lin Donghui¹ Zhou Hai¹

Chen Liangming¹ Zhang Xiaomin¹ Jing Feng¹

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
² College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Tiled grating is an important approach to solve the problem of grating aperture limit, however, which will meet the problem of structural stability of tiled grating. According to the requirement of operation, the tiled grating mount was used, but the stability of tiled grating mount cannot satisfy the requirement fully. In order to determine the main factors which affect the stability of the grating mount, a multi-channel vibration test equipment is used to measure the ambient vibration around grating. The test indicates that vibration of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) are the main factors that affect the stability of grating mount. The power spectral density of test (PSD) is used to optimize the dynamic response of the grating mount and the results indicate that increase of structure damp ratio can decrease the dynamic response of grating mount. According to the finite element analysis, the joint damp of grating amount's combination planes is increased by applying high damp material. The experiment indicates that increase of structure damp ratio not only reduces the dynamic response greatly but also prolongs the stability time.

Key words tiled grating; stability; dynamic response; ambient vibration

OCIS codes 120.4820; 120.48820; 120.7280

1 引 言

近年来由于啁啾脉冲放大(CPA)技术的应用,使得获得更高能量、更高强度的超短脉冲成为可能^[1],这给很多领域的研究工作提供了有力的工具:如光与物质相互作用、惯性约束聚变中的快点火实验研究等。在普通 CPA 系统中,产生的超短激光脉

冲的能量受限于压缩池中光栅的损伤阈值和口径,米量级的大口径光栅不仅制造工艺复杂而且成本高昂。光栅拼接是解决光栅口径限制的有效途径,国内外对光栅拼接的相关问题进行了大量的研究^[2~6],目前日本 Firex-I^[7]、美国 OMEGAEP 通过光栅拼接获得了大口径的光栅^[8],而国内对光栅

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-07-12

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 张军伟(1981—),男,博士,主要从事机电系统分析方面的研究。E-mail: zjw425@163.com

拼接的研究主要集中在拼接理论和拼接误差的影响分析^[9~11]。目前设计的光栅拼接架没有充分考虑到环境因素的影响,光栅拼接架的动态响应没有得到有效控制,本文通过对光栅拼接架应用环境的研究,根据环境激励特性对光栅拼接架的局部结构进行了改进,使光栅拼接架的动态响应得到了改善。

2 光栅拼接架结构介绍

光栅拼接是两块及两块以上的光栅拼接到一起作为一块光栅使用,图 1 为光栅拼接示意图。光栅拼接对子光栅的位置精度要求非常高,在 5 个方向(图 1 的 Y 向平移误差除外)上要求子光栅之间的位置误差在纳米量级,采用精密装配技术达不到子光栅的位置精度要求。因此,光栅拼接架必须设计相应的调整机构完成子光栅的位置调整以达到使用要求。纳米级的调整精度对单自由度系统而言相对比较简单,多自由度系统由于需要设计成多层结构,对误差会有一定的叠加放大作用,对光栅拼接误差以及稳定性要求很难保证。图 2 为已设计完成的光栅拼接架。大口径光栅是成组使用,组和组之间的位置精度同样需要保证,光栅拼接架整体需要调整(3 个方向转动,一维平移),因此光栅拼接架的设计采用了 9 自由度调整方案。

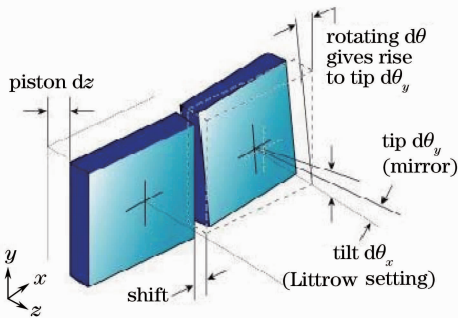


图 1 光栅拼接示意图

Fig. 1 Schematic drawing of tiled grating

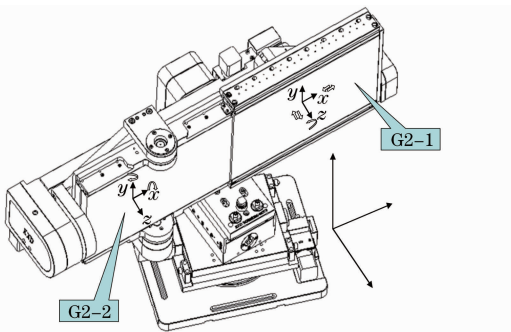


图 2 光栅拼接架

Fig. 2 Tiled grating mount

然而在使用中发现,光栅拼接架的稳定性不能完全满足使用要求,为检测光栅架稳定性情况,采用 CCD 对光束经过光栅之后的聚焦光斑进行监测,通过焦斑在 CCD 上的位移变化反推光束的指向变化。图 3 为采用 CCD 分别对 G2-1、G2-2 光栅对光束指向影响的监测结果。图 3 中测试结果显示光栅的角度偏差已达到 $\pm 6 \mu\text{rad}$,远大于 $\pm 1 \mu\text{rad}$ 的使用要求,并且两块光栅对光束指向稳定性的影响有较大差异。

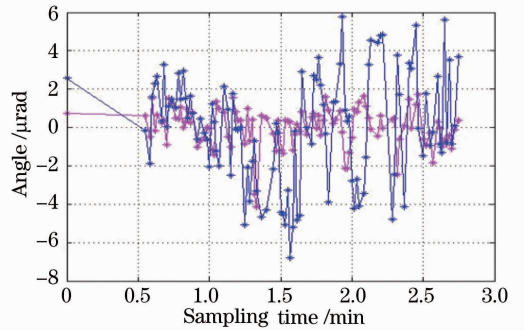


图 3 光栅对光束指向影响的测试结果

Fig. 3 Test result of grating effect on beam pointing

为明确影响光栅拼接稳定性的影响因素以及造成两子光栅稳定性差异较大的原因,改进光栅拼接架存在的问题,先采用有限元分析软件对影响光栅拼接架稳定性的因素进行分析。

3 拼接架有限元分析

3.1 拼接架有限元模型

光栅拼接架模型复杂,零件较多,其多自由度运动的特点决定了模型中有很多接触约束,如果完全按照模型的运动情况进行计算,将严重影响计算效率,为此对模型进行了简化。简化原则如下:1)降低模型的刚度;2)忽略模型中传动环节的间隙影响。在 ANSYS 建立的三维模型及有限元模型分别如图 4 所示。

为提高模型的计算精度,采用带中节点的 20 节

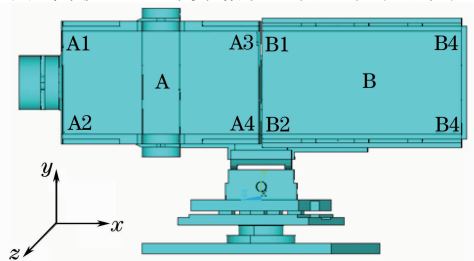


图 4 拼接架三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of grating mount

点 SOLID95 单元对模型划分网格。划分网格之后的有限元模型如图 5 所示。模型中支撑结构为 45 钢,光栅材料为 K9 玻璃,这两种材料的材料参数如表 1 所示。模型在底部支撑座 4 角点进行全约束。

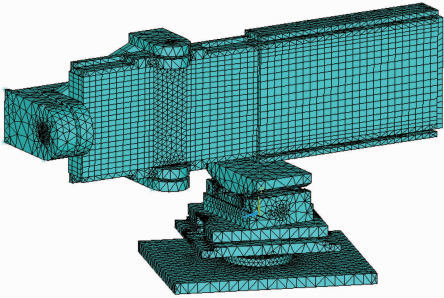


图 5 拼接架有限元模型

Fig. 5 Finite-element model of grating mount

表 1 材料参数

Table 1 Material parameter

Material	Elastic modulus / 10 ¹⁰ pa	Poisson ratio	Density / (kg/m ³)
45steel	20	0.3	7850
K9	8.13	0.17	2510

3.2 模态分析

对光栅拼接架周围环境的振动测试表明,对拼

接架有影响的主要激励源激励频率在 50 Hz 以下,对拼接架模态分析时只提取前 10 阶模态,扩展 10 阶模态进行谱分析。表 2 为前 10 阶模态频率。

表 2 模态频率

Table 2 Frequency of modality

Modality	Frequency	Modality	Frequency
1	20.074	6	62.861
2	23.530	7	66.779
3	34.862	8	76.652
4	36.018	9	100.76
5	37.347	10	135.35

低阶模态对光栅拼接架的振动响应起主要作用,限于篇幅,仅给出光栅拼接架的前 4 阶模态振型图,如图 6 所示。

从模态振型图可以看出,A,B(图 4)光栅运动明显的不一致,A 光栅的变形明显比 B 光栅大,这说明 A,B 两光栅的支撑刚性有较大差异。尽管光栅拼接架采用了“T”形结构布置,但由于子光栅自由度调整方式存在差异,在环境激励下的响应也会不同,这对于子光栅运动一致性的要求是不利的,这也是造成图 3 中两光束指向差异较大的原因。

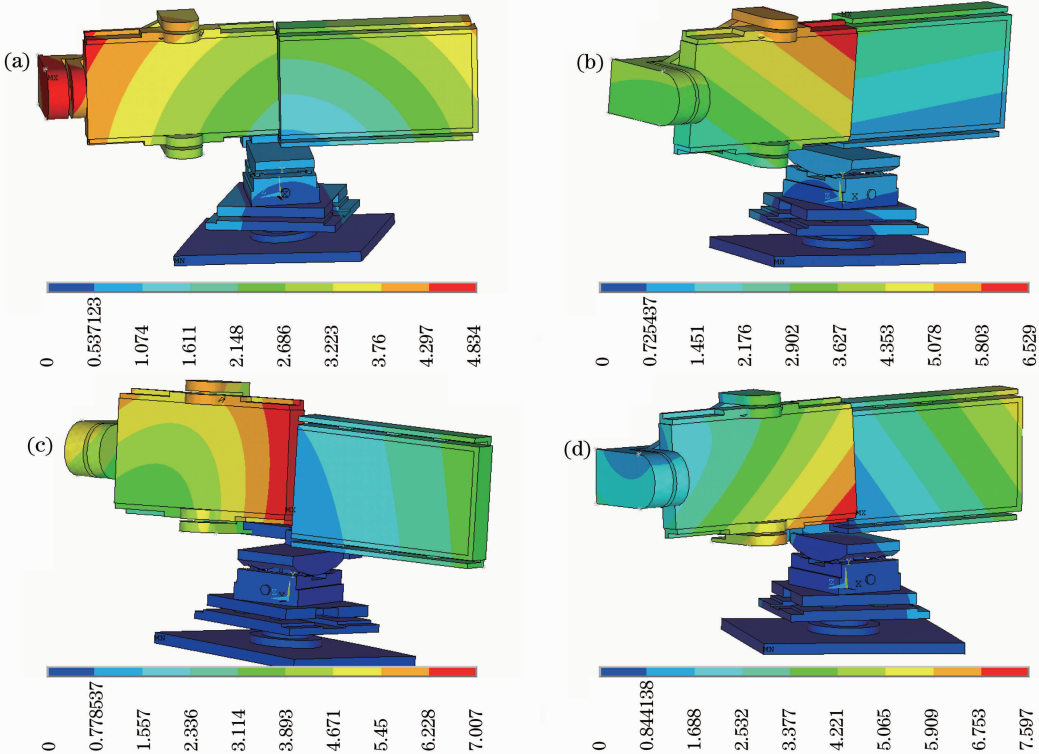


图 6 光栅拼接架前 4 阶模态振型图。(a) 1 阶振型,(b) 2 阶振型,(c) 3 阶振型,(d) 4 阶振型

Fig. 6 The front four order modality of grating mount. (a) the 1st modality, (b) the 2nd modality, (c) the 3rd modality, (d) the 4th modality

3.3 光栅拼接架动力响应分析

为体现光栅拼接架的真实环境状况,采用多通道振动测试仪对光栅拼接架安装基座的振动情况进行了测试,图7为光栅拼接架安装基座三个方向的

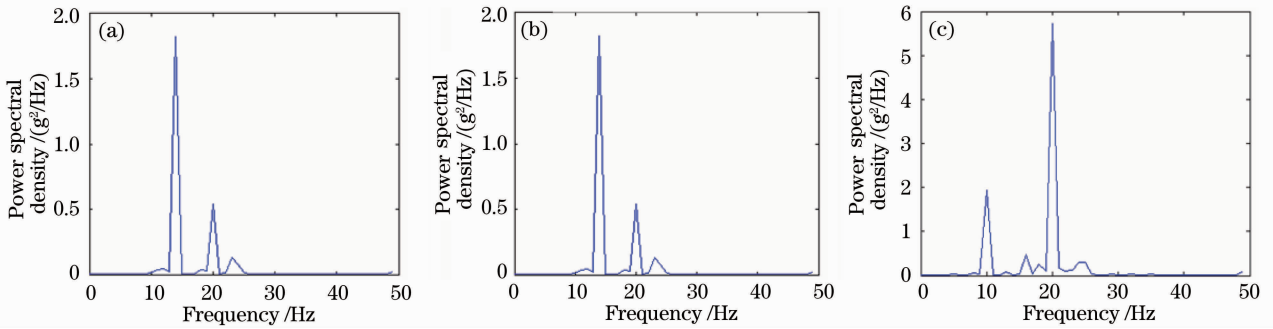


图7 测试得到的功率谱密度。(a) X向, (b) Y向, (c) Z向

Fig. 7 Power spectral density measured. (a) X direction, (b) Y direction, (c) Z direction

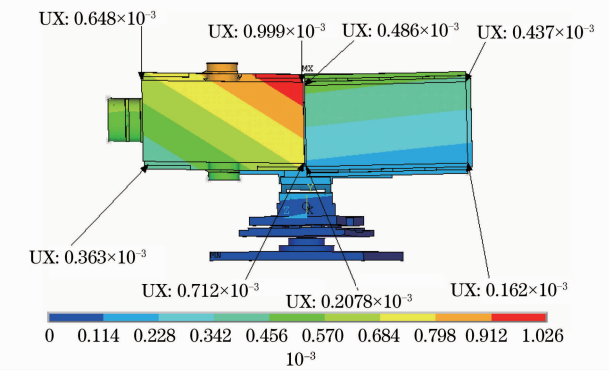


图8 动力响应分析结果

Fig. 8 Analysis result dynamic response

理想情况的光栅面响应是在环境振动激励下光栅面的动力响应为几十纳米,然而从动力分析结果来看,A光栅的最大位移达到了 $1.06\ \mu\text{m}$,X向最大位移达到了 $0.999\ \mu\text{m}$,远大于光栅拼接使用要求。另外一种情况,如果光栅的响应较大,两光栅能始终保持一致的运动状态同样能达到光栅拼接的效果,从动力响应分析结果可以看出,A光栅和B光栅在相同的激励载荷作用下响应是不同的,A光栅比B光栅响应大的多,尤其是在X向的响应,并且A光栅的响应不均匀,呈现“翘角”的现象。表3为图4中关键节点的动态响应,该结果为 1σ 位移响应。

表3 关键节点动态响应

Table 3 Dynamic response of key nodes

Node	Response / 10^{-3} mm	Node	Response / 10^{-3} mm
A1	0.648	B1	0.486
A2	0.363	B2	0.207
A3	0.712	B3	0.162
A4	0.999	B4	0.437

图3中测试结果为角漂,为方便分析结果与测

功率谱密度曲线。

采用ANSYS谱分析模块把光栅拼接架所测得的加速度功率谱密度作为激励,对光栅拼接架进行动力响应分析,图8为动力响应分析结果。

试结果进行对比,把光栅的动态响应转换成角漂,计算公式为

$$\alpha_{ij} = \frac{S_i - S_j}{L_{ij}}, \quad (1)$$

式中 α_{ij} 为节点 i, j 之间的转角; S_i 为节点 i 的位移; S_j 为节点 j 的位移; L_{ij} 为节点 i, j 之间的距离。

采用(1)式计算得到,光栅A绕X轴旋转角度为 $1.36\ \mu\text{rad}$,绕Y轴旋转角度为 $0.84\ \mu\text{rad}$ 。该值为 1σ 分析结果,最大值按 4σ 进行计算,光栅A绕X轴旋转角度为 $5.44\ \mu\text{rad}$,绕Y轴旋转角度为 $3.36\ \mu\text{rad}$ 。图4中光栅A绕X向最大转角在 $6\ \mu\text{rad}$ 、绕Y向最大转角在 $4\ \mu\text{rad}$ 左右。测试结果比计算结果稍大,考虑到光栅在实际测试时影响因素更多,计算分析结果是可靠的。

3.4 光栅动态响应控制

从图4中可以看出,两块子光栅通过连接机构与光栅支撑架相连,连接机构是整个光栅架的薄弱环节,这种情况下单块子光栅可以简化为单自由度系统,其在随机振动激励下的响应可以用解析式表示为^[12]

$$\varphi_y^2 = \frac{S_0}{4\xi(2\pi f_n)^3}, \quad (2)$$

式中 S_0 是随机振动功率谱密度; ξ 为系统阻尼比; f_n 为系统固有频率; φ_y 为单自由度系统在随机振动激励下的响应。

从(2)式中可以看出,减小系统在随机激励下的响应有三个措施:1)减小环境振动激励功率谱,采用隔振措施;2)增大系统固有频率;3)增大系统阻尼比。宽频的环境隔振成本较高,而特定的系统固有频率是一定的,因此增大系统阻尼比是比较经济、可

行的措施。采用有限元分析软件,改变图4中拼接架的阻尼比,得到了光栅拼接最大值响应曲线,如图9所示。

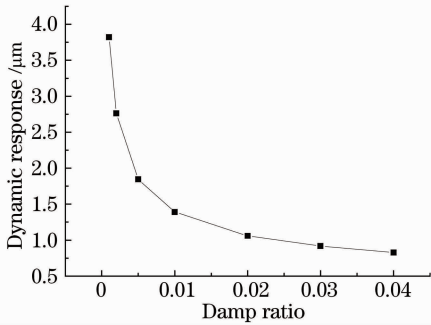


图9 光栅拼接架响应最大值与阻尼比关系曲线

Fig. 9 Relation between the damp ratio and the greatest dynamic response of grating mount

分析结果表明,增大系统阻尼可以有效降低系统的动态响应,由于钢结构材料阻尼较小,在不改变支撑结构本身材料的情况下,改善连接处阻尼是比较有效的方法。为改变光栅拼接架连接处阻尼,在光栅拼接架运动连接处粘结高阻尼材料,改善连接部位的性能,从而提高光栅拼接架系统阻尼比。图10对光栅拼接架改进之后的光束漂移变化曲线。

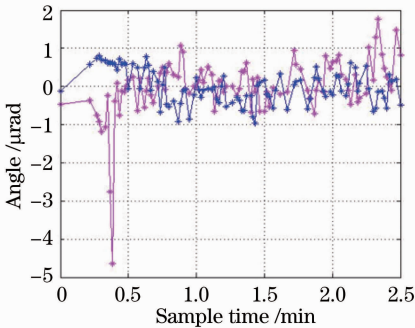


图10 增大光栅拼接架阻尼比之后光束指向变化测试结果

Fig. 10 Test result of beam pointing variation after increasing the damp ratio of grating mount

经过实验测试,采用增加阻尼的方法对光栅拼接架的稳定性进行了控制,图10为增加阻尼前后光栅拼接架稳定性响应的变化,从图中可以看出除一个测点之外,角漂能控制在 $1 \mu\text{rad}$ 左右,基本能满足光栅拼接的使用要求。

4 结 论

稳定性是光栅拼接中遇到的主要难题,理论分析表明改善光栅动态响应的措施为:1)减小环境振动激励功率谱;2)增大系统固有频率;3)增大系统阻

尼比。考虑到光栅拼接架已加工完成的特殊情况,本文主要采用增大系统阻尼比的方法对光栅的动态响应进行分析研究。分析结果来看,增大系统阻尼比时光栅的动态响应迅速减小,但作用效果在降低。进一步分析后采用一定的措施增大光栅拼接架的阻尼比,从测试结果表明,光栅的动态响应得到了明显控制,角漂能控制在 $1 \mu\text{rad}$ 左右。

参 考 文 献

- 1 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160~162
- 2 Li Chaoming, Wu Jianhong, Chen Xinrong *et al.*. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1943~1946
李朝明, 吴建宏, 陈新荣 等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1943~1946
- 3 Marco Hornung, Ragnar Bödefeld, Mathias Siebold *et al.*. Alignment of a tiled-grating compressor in a high-power chirped-pulse amplification laser system [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(33): 7432~7435
- 4 A. Cotel, M. Castaing, P. Pichon *et al.*. Phased-array grating compression for high-energy chirped pulse amplification lasers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2742~2752
- 5 M. C. Rushford, W. A. Molander, J. D. Nissen *et al.*. Diffraction grating eigenvector for translational and rotational motion [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 155~157
- 6 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Effect of tiling gratings errors on laser beam spatial distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 161~165
马雪梅, 戴亚平, 朱健强. 拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 161~165
- 7 Ezali Yutaka, Tabata Masaki, Kihara Masahiko *et al.*. Development of a segmented grating mount system for FIREX-1 [J]. *J. Phys. : Conf.*, 2008, **112**(3): 032027
- 8 J. Qiao, A. Kalb, T. Nguyen *et al.*. Demonstration of laser-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt laser, chirped-pulse amplification systems [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(15): 1684~1686
- 9 Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Design of an arrayed grating compressor based on far-field [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 5227~5232
左言磊, 魏晓峰, 朱启华 等. 基于远场的拼接光栅压缩池的设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 5227~5232
- 10 Xiao Wang, Qihua Zhu, Yanlei Zuo *et al.*. Matched wavelength and incident angle for the diagnostic beam to achieve coherent grating tiling [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 241~243
- 11 Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Theoretical and experimental study of grating tiling [J]. *Acta Physics Sinica*, 2007, **56**(9): 5233~5236
左言磊, 魏晓峰, 朱启华 等. 1700线/mm镀金光栅的拼接理论和实验研究 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(9): 5233~5236
- 12 Zhang Junwei, Zhou Yi, Xie Na *et al.*. Design and analysis of large-scale mirror frame based on structure stability index [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 105~109
张军伟, 周 忆, 谢 娜 等. 编组站镜架设计参数反演及有限元分析 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 105~109