

激光器安装板结构稳定性分析

杨彬^{1,2} 赵琦¹ 周军^{2,3} 陈延如¹ 肖湖福² 于广礼² 丁建永² 宋维尔²

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

²南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038

³中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 在激光器的设计及使用过程中,观察到激光器安装板的结构对激光器输出功率的稳定性能起到关键作用。在对安装板施加一定螺钉预紧力时,安装板的变形一般会导致激光器输出功率的大小出现不同程度的变化。为了减小安装板变形对激光器输出功率稳定性的影响,设计了3种安装板结构,采用有限元方法分别模拟了施加一定螺钉预紧力时的变形情况,并实验测量了几种情况下的输出功率。模拟和实验结果均表明,相比未作处理或螺孔侧面开孔的安装板结构,采用开侧槽安装板的激光器的功率受螺钉预紧力的影响较小,是一种更为稳定可靠的激光器安装板结构。

关键词 激光器; 稳定性; 有限元分析; 安装板

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.091410

Stability Analysis of Laser Mounting Plate

Yang Bin^{1,2} Zhao Qi¹ Zhou Jun^{2,3} Chen Yanru¹ Xiao Hufu² Yu Guangli²
Ding Jianyong² Song Weier²

¹*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

²*Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China*

³*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract In the process of laser design and use, the observed structure of the laser mounting plate can play a key role in stability of the laser output power. When applying a certain screw preload to the mounting plate, deformation of the mounting plate would generally result in the laser output power with varying degrees of change. In order to reduce the impact of the mounting plate deformation to laser output power stability, three mounting plates with different structures are designed to simulate the deformation of applying a certain screw preload by using the finite element analysis, respectively, and the corresponding output power is measured in several cases through experiments. The results of simulation and experiment show that, compared to the structure of untreated mounting plate and perforated mounting plate, the output power of the laser with side slotted mounting plate structure is relatively stable in the case of applying a certain screw preload. Therefore, the side slotted structure is a more stable and reliable laser mounting plate structure.

Key words lasers; stability; finite element analysis; mounting plate

OCIS codes 140.3410; 140.3425; 140.4780

1 引言

激光作为一种新光源,因其具有高亮度、方向性好以及单色性好等特点,在各行各业中得到了广泛应用。随着人们对激光输出质量要求的提高,进而在许多领域中对激光器输出功率稳定性的要求也越来越高。影响激光器输出功率稳定性的因素有很多^[1-8],如环境(温度、湿度、振动等)、腔型设计、安装板设计等。关于安装板设计方面的文献很少,但是安装板的设计对于激光器在工程应用中的稳定性能够起到决定性作

收稿日期: 2015-05-07; 收到修改稿日期: 2015-05-19; 网络出版日期: 2015-08-25

作者简介: 杨彬(1991—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器等方面的研究。E-mail: ybin319@163.com

导师简介: 赵琦(1961—),男,教授,硕士生导师,主要从事光学工程等方面的研究。

E-mail: zslzhaoqi@163.com(通信联系人)

用。当用螺钉对安装板施加一定扭矩时,会使得安装板产生一定的变形,以致严重影响到激光器的输出功率大小。一般情况下,输出功率都呈下降趋势。为了减小安装板变形对激光器输出功率的影响,一般的处理办法是将安装板设计得很厚,这样的设计使得器件重量增加的同时也增加了成本,并给激光器的使用带来了诸多不便。对安装板进行一定的机加工处理(如开侧槽、螺孔侧面开孔),可抵消或转移安装板上的部分形变,从而减小安装板的应力变形对激光器输出功率稳定性的影响。为此,设计了开侧槽和螺孔侧面开孔两种转移应力影响的安装板结构,采用有限元分析(FEA)对两种结构以及未作处理的安装板结构进行受力模拟分析和比较,期望寻找到稳定性最高的安装板结构,并搭建实验系统测量了上述3种情况下螺钉预紧力对激光器输出功率的影响,获得了与数值模拟一致的实验结果。

2 有限元分析

采用有限元分析可以得到谐振腔的形变^[9-12],有助于谐振腔稳定性的分析与优化。为了研究安装板的不同结构对谐振腔光路稳定性的影响,设计了如图1所示的U型腔光路。激光器抽运源采用半导体激光器(LD)由反射镜耦合至Nd:YAG晶体中对其抽运,腔镜M固定于安装板上,通过调节双光楔组(OW)的旋转角实现光路小角度的偏转从而得到输出激光并调整至功率最大的状态。

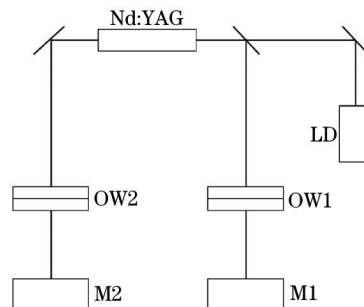


图1 光路原理图

Fig.1 Schematic of optical path

2.1 模拟分析理论

对安装板的受力分析基于结构的线性静态分析(LSA)^[12],位移 U 由下式解出

$$KU = F, \quad (1)$$

式中 K 是刚度矩阵,为常量矩阵,由材料参数决定; F 是加在模型上的不考虑随时间变化的力,且不包含惯性影响(如质量、阻尼)。如果考虑惯性力,忽略阻尼的影响,则(1)式变为

$$KU = F - M\dot{U}, \quad (2)$$

式中 M 为结构质量矩阵, \dot{U} 为节点加速度矢量。

对安装板进行结构静力学分析时作出如下假设:

1) 连续性假设。即假设安装板内部任意一点的力学性质都是连续的,如密度、应力、位移和应变等,且变形后物体上的质点与变形前物体上的质点存在一一对应关系。这意味着安装板在变形时材料既不相互离开,也不相互挤入。

2) 均匀性假设。即认为安装板是由均匀材料构成,其各部分的物理性质均相同。

3) 各向同性假设。假定安装板内部任意一点在各个方向上都具有相同的物理性质。

4) 弹性假设。在一定的温度下,应力和应变之间存在一一对应关系,且不超过屈服应力点。

5) 小变形假设。假定安装板在外力作用下所产生的变形远小于其自身的几何尺寸。

6) 缓慢加载和卸载过程。

2.2 建模过程

安装板模型设计如图2所示,底板尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,安装面厚 5 mm ,侧边厚 12 mm 。为了方便模拟边界条件的施加,设计了尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 、边框宽度 18 mm 的上盖板,在上盖板和底板之间根据实际情况采用 $230\text{ mm} \times 2.65\text{ mm}$ 的O型圈进行固定。图3为安装板加工后分别为开侧槽和开孔两种结构安装板的局部剖视图,展示了具体的加工处理方案。其中,开侧槽结构安装板在距安装板底面 5 mm

处加工 2 mm 宽的槽,槽深为 3 mm;开孔结构安装板则在距安装板底面 14 mm 处加工 4 mm 宽的孔,孔深为 4 mm,安装板周向均匀分布 16 个孔。

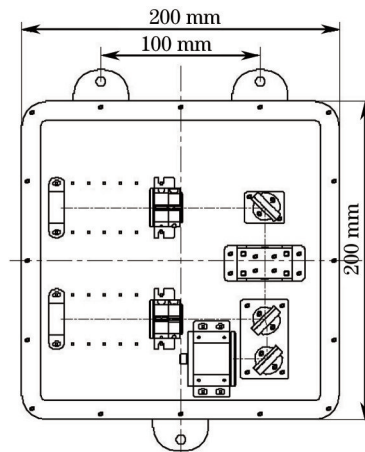


图2 安装板模型设计图

Fig.2 Mounting plate model design

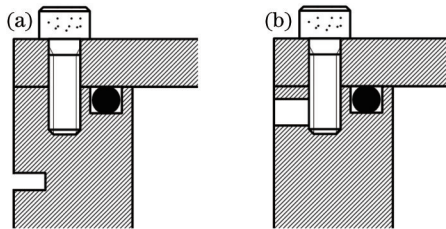


图3 (a) 开侧槽和(b) 开孔安装板的局部放大图

Fig.3 Partial enlarged views of (a) side slotted and (b) perforated mounting plate

模型的材料、晶体及镜片设置为玻璃,晶体座设置为紫铜,其余的安装件均设置为 2A12 铝合金。为简单起见,所有接触均设置为绑定接触。由于腔镜以及反射镜对激光器输出功率最为敏感,因此分别将两个腔镜反射镜面的中心以及两个反射镜反射镜面的中心设置为节点,提取出这 4 个节点的变形数据,能够基本反映出激光器的输出功率变化。

2.3 初始条件、边界条件和约束

初始条件为室温,对 3 个安装脚进行固定约束。不同结构安装板对激光器输出功率稳定性的影响主要反映在 O 型圈对沟槽的压力以及在加上盖板的过程中拧紧螺钉时对安装板所施加的拉力,因此边界条件为 O 型圈对沟槽的压力和周向螺钉所施加的扭矩,假设其均匀分布在沟槽面上。经查表^[3],M3 螺钉的保证扭矩约为 $0.999 \text{ N}\cdot\text{m}$,考虑到本实验模型板厚设计较薄,设置 M3 螺钉的最大扭矩为 $0.784 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。此时,根据受力平衡,经过简单的力学分析计算出 O 型圈对沟槽的压力约为 2924.8 N。

2.4 模拟计算结果及分析

对不同结构安装板在外力作用下的变形进行分析,分析过程中发现若只考虑重力影响时自身变形约在 10^{-4} mm 数量级,而不考虑重力影响加载上述边界条件下时变形的最小数量级约为 10^{-2} mm ,因此可忽略重

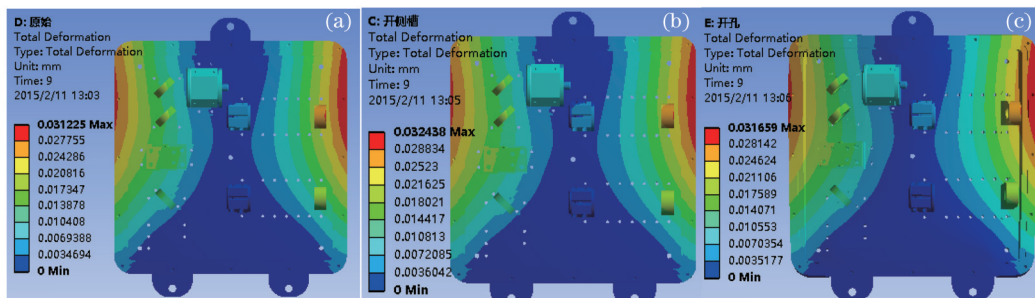


图4 变形云图。(a) 未处理安装板;(b) 开侧槽安装板;(c) 开孔安装板

Fig.4 Picture of deformation. (a) Untreated mounting plate; (b) side slotted mounting plate; (c) perforated mounting plate

力的影响。图4为3种安装板在被螺钉施加最大扭矩下的变形云图。

由图4可知,3种结构安装板的最大形变均出现在单侧安装脚两边,开侧槽和开孔的安装板最大形变量均略大于未处理安装板,说明安装板经机加工处理后变形分布也发生了相应改变,将原处于安装板中心处的变形转移至安装板四周对谐振腔影响不大的边缘处。

为了验证上述想法,对比了定义过的4个节点和安装板边缘处节点的变形情况。现选取靠近抽运头一侧腔镜上定义的节点和靠近安装板边缘处任意一节点的变形数据作变形差-时间曲线图,如图5(a)和(b)所示。图5中,横坐标为模拟时间,扭矩随着时间逐渐增大;纵坐标为开侧槽安装板变形量与未处理安装板变形量之差(D_{SU})以及开孔安装板变形量与未处理安装板变形量之差(D_{PU})的两组数据。其中,变形量定义为节点在安装板受力变形前后的空间位移大小。

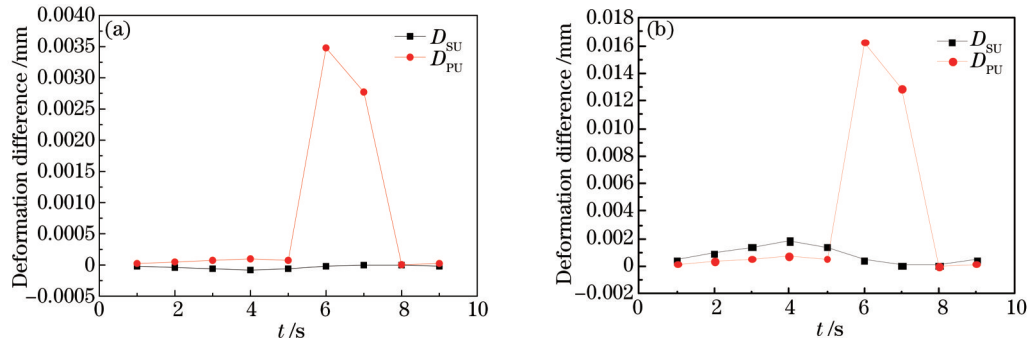


图5 不同位置处的变形差-时间曲线。(a) 腔镜上的节点; (b) 边缘处的节点

Fig.5 Curves of deformation difference at different locations as a function of time. (a) Node on cavity lens; (b) node at edge

从图5(a)中可以看出, $D_{SU}<0$, $D_{PU}>0$,说明在靠近抽运头一侧的腔镜处,开侧槽安装板的变形量要小于未处理安装板的变形量,开孔安装板的变形量大于未处理安装板的变形量;同理,从图5(b)中可以看出, $D_{SU}>0$, $D_{PU}>0$,说明在安装板的边缘处,开侧槽以及开孔安装板的变形量均大于未处理安装板的变形量。通过对比其他3个定义的节点和边缘处任意节点的变形量,均得出了相同的结论。因此,可以看出开侧槽结构安装板能够在一定程度上把安装板中心处的变形转移至安装板边缘处,而开孔结构安装板则对变形分布改善不大。

此外,为了分析安装板上定义的节点变形与对螺钉施加扭矩过程中的对应关系,对定义好的4个节点进行了数据分析,发现其分布规律相似,选取靠近抽运头一侧反射镜上定义的节点作变形量-时间曲线图,如图6所示。其中,对螺钉所施加的扭矩随时间逐渐增大,折线 u 对应未处理安装板,折线 s 对应开侧槽安装板,折线 p 则对应开孔安装板。由图6可知,3块安装板的变形趋势大致相同,随着扭矩的增大,变形量均呈现先增大后减小最后再增大的趋势。

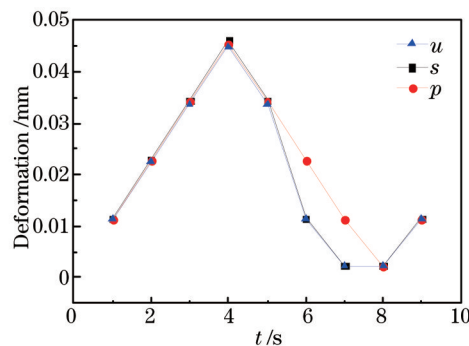


图6 节点处的变形-时间曲线

Fig.6 Curves of deformation at a node as a function of time

3 实验及数据分析

本实验U型谐振腔搭建腔长为28 cm,谐振腔型采用平平腔,抽运源选用nLight公司生产的型号为NL-PPS50的半导体激光器。激光晶体为Nd:YAG键合晶体,结构为中间长10 mm的Nd:YAG,掺杂钕离子原子数分数为1%,两端分别为5 mm长的未掺杂YAG晶体,晶体直径为4 mm,输出腔镜透射率为 $T=5\%$ 。在

谐振腔搭建完成且将输出功率尽量调高后,给安装板依次装上O型圈和上盖板,通过对力矩扳手设置不同的扭矩值对安装板逐步施力,测量记录所施加的扭矩与输出功率间的关系,再依次测量记录其他不同结构安装板在对应扭矩下输出功率的变化情况,最后利用数学分析软件Origin对数据进行处理分析。

图7所示为在3块安装板上分别搭建谐振腔测得的输出功率 P 随螺钉预紧力 M 的变化曲线图,图7(a)、(b)和(c)分别表示未处理、开侧槽和开孔安装板对应的曲线图,多条折线对应多组测得的数据。横坐标为螺钉预紧力,纵坐标则对应激光器的输出功率。从图7可以看出,在不断增加扭矩的过程中,3种结构的输出功率都会先减小后出现反弹现象呈现一个峰值,随后输出功率又持续降低直至谐振腔无法出光。该现象与上述定义节点的变形量所呈现的趋势相一致,可以解释为由于O型圈的作用,沟槽对安装板的压力与螺钉对安装板的拉力在施力过程中存在一个平衡点,导致了图中存在峰值的情况。在实验过程中,数据记录的关键在于施加螺钉预紧力后,安装板会有一个释放应力的过程,这就使得每增加一次扭矩后,需要等几分钟待输出功率稳定后再记录数据,否则测得的功率不够准确严谨。由于实验周期较长的缘故以及实验过程中的未知因素,导致了3块安装板在初始功率上存在差异。因此,作为对比实验,仅从图中对输出功率的变化趋势进行对比。

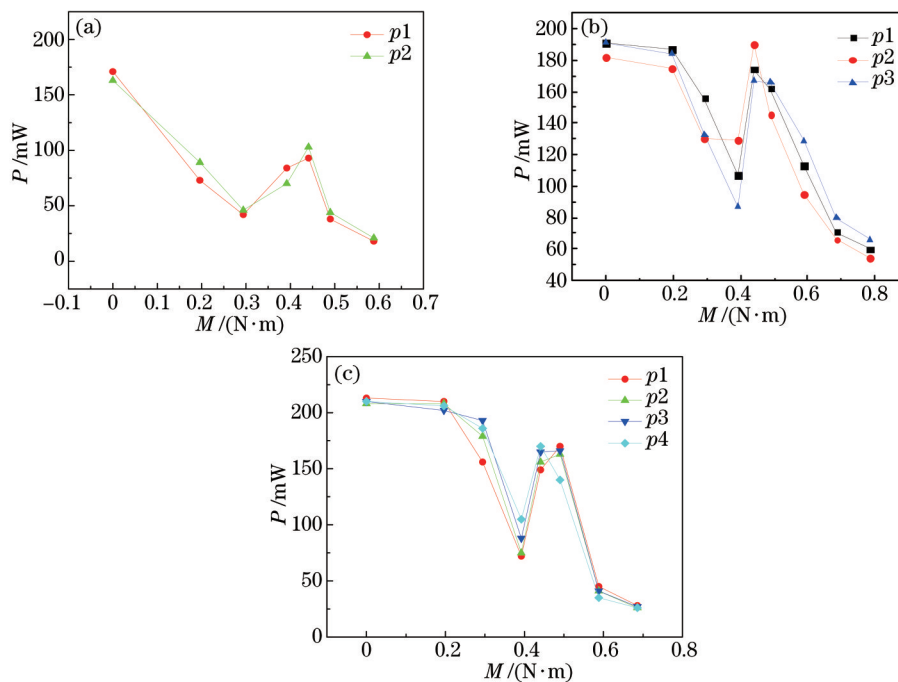


图7 输出功率-螺钉预紧力曲线。(a) 未处理安装板;(b) 开侧槽安装板;(c) 开孔安装板

Fig.7 Curves of output power as a function of screw preload. (a) Untreated mounting plate; (b) side slotted mounting plate; (c) perforated mounting plate

对上述3块不同结构安装板对应采集到的数据分别取平均,得到图8所示曲线图,坐标含义与图7一致。图8中,折线 u 对应未处理安装板,折线 s 对应开侧槽安装板,折线 p 则对应开孔安装板。

从图8中对比可看出,开侧槽安装板对应测得峰值处的功率大小和初始输出功率大小相差很小,且该结

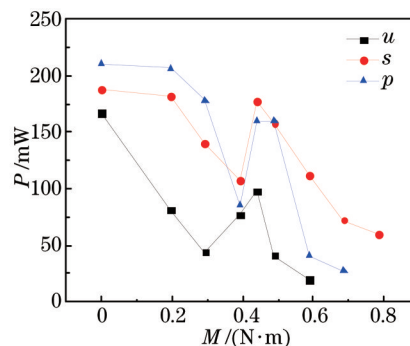


图8 不同结构安装板的输出功率-螺钉预紧力曲线

Fig.8 Curves of output power of different structural mounting plates as a function of screw preload

构安装板对应功率的整体变化幅度也是最小的,说明该结构安装板激光器的输出功率受螺钉预紧力的影响较小。因此,通过实验也得到开侧槽的安装板结构是最优的,验证了有限元分析模拟的结果。

4 结 论

通过有限元分析模拟了3块不同结构安装板在一定螺钉预紧力下的变形情况,并对数据处理分析后得到开侧槽安装板的内部变形量最小的推论。通过实验测得的数据分析出了稳定性最高的安装板结构,其结果与有限元分析的结果相一致,对模拟结果进行了很好的验证。因此,开侧槽结构可在今后的安装板设计中作为参考,以达到提高激光器输出功率稳定性以及减轻激光器重量的目的。

参 考 文 献

- 1 Ma Huilian, Bao Huiqiang, Wang Shijun, *et al.*. Temperature characteristic of ring resonator in polarization maintaining silica optical waveguide[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2009, 20(8): 1029–1032.
马慧莲, 鲍慧强, 王世军, 等. 保偏SiO₂光波导环形谐振腔温度特性研究[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(8): 1029–1032.
- 2 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Lian Tianhong, *et al.*. Intensity distribution properties of output light in total reflection prisms laser gyro with cavity stresses[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102003.
刘健宁, 蒋军彪, 连天虹, 等. 谐振腔应力对全反射棱镜式激光陀螺输出光强分布特性影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1102003.
- 3 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong, *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO₄ slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 497–501.
邵 杰, 李小莉, 冯宇彤, 等. 激光二极管端面抽运Nd:YVO₄板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 497–501.
- 4 Qian Xiangzhong. Temperature properties of slab photonic crystal liquid crystal micro-cavity[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2011, 28(3): 303–307.
钱祥忠. 平板型光子晶体液晶微谐振腔的温度特性[J]. *量子电子学报*, 2011, 28(3): 303–307.
- 5 M Jin, J Yan-Yi, F Su, *et al.*. Vibration insensitive optical ring cavity[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(6): 2334–2339.
- 6 Guo Haifeng, Lü Shasha, Liu Fang, *et al.*. Analysis of the vibration sensitivity of Fabry-Perot cavities[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1202004.
郭海凤, 吕莎莎, 刘 芳, 等. 法布里珀罗腔振动敏感度的分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1202004.
- 7 Liu Kangkang, Liu Hongli, Zhao Ruchen, *et al.*. Enhancement of tunability and stability of a continuous wave deep ultraviolet laser by feed-forward control method[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1202004.
刘亢亢, 刘洪力, 赵儒臣, 等. 用前馈控制方法提高连续紫外激光器的调谐性和稳定性[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1202004.
- 8 Yang Xiaoping, Wang Chunxiang, Feng Jinxia, *et al.*. 9 W all-solid-state continuous wave single-frequency 1.34 μm Nd:YVO₄[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602019.
杨小平, 王春香, 冯晋霞, 等. 9 W全固态连续单频1.34 μm Nd:YVO₄激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602019.
- 9 J Millo, D Magalhaes, C Mandache, *et al.*. Ultra-stable lasers based on vibration insensitive cavities[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(5): 53829.
- 10 Yang Tao, Li Wenbo, Zang Erjun, *et al.*. Decreased vibrational susceptibility of Fabry-Perot cavities via designs of geometry and structural support[J]. *Chinese Phys*, 2007, 16(5): 1374–1384.
- 11 T Nazarova, F Riehle, U Sterr, *et al.*. Vibration-insensitive reference cavity for an ultra-narrow-linewidth laser[J]. *Applied Physics B*, 2006, 83(4): 531–536.
- 12 L Chen, J Hall, J Ye, *et al.*. Vibration-induced elastic deformation of Fabry-Perot cavities[J]. *Phys Rev A*, 2006, 74(5): 053801.
- 13 Wen Bangchun. *Machine Design Handbook*[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 5–29.
闻邦椿. *机械设计手册*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 5–29.

栏目编辑: 宋梅梅