

# 机载激光测照器发射光轴不稳定性仿真分析

耿园园,徐光烁,谢桂娟,吕华昌,赵开瑞,褚凡忠  
(华北光电技术研究所,北京 100015)

**摘要:**针对某型无人机机载激光测照器,分析了导致激光发射光轴产生偏离的原因,然后使用 CAE 软件 ANSYS Workbench 分别对受安装力、热和振动等因素影响下的结构形变进行仿真,通过谐振腔光路和扩束光学相关公式计算得到激光发射光轴的最大综合偏转角,从而确定出激光测照器的发射光轴不稳定性,以验证设计是否满足相应可靠性指标要求。

**关键词:**激光测照器;光轴;不稳定性;仿真

中图分类号:TN249;E933.43 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.05.016

## Simulation analysis of the instability of the emission axis of the airborne laser finder / illuminator

GENG Yuan-yuan, XU Guang-shuo, XIE Gui-juan, LV Hua-chang, ZHAO Kai-rui, CHU Fan-zhong  
(North China Research Institute of Electro - Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Aiming at a certain type of UVA airborne laser finder/illuminator, this paper analyzes the reasons for the deviation of the laser emission axis, and then uses the CAE software ANSYS Workbench to simulate the structural deformation under the influence of structural forces, heat and vibration. Analyze and calculate the maximum comprehensive deflection angle of the laser emission axis through the calculation of the resonant cavity optical path and the beam expanding optics formula, so as to determine the instability of the emission axis of the laser finder/illuminator to verify whether the design meets the corresponding reliability index requirements.

**Keywords:** laser finder/illuminator; optical axis; instability; simulate

### 1 引言

激光测照器现阶段已在各类军用中高空无人机机载光电平台中得到广泛应用。利用它不但能实现对远距离目标的准确测距定位,还能为激光半主动制导导弹提供照射指引。激光测照器的发射光轴不稳定性是衡量自身能力和可靠性的一项重要指标。激光指向不稳定会严重影响测距和照射精度,当光轴偏离角度过大时,将最终导致测距失准以及被引

导的导弹脱靶<sup>[1]</sup>。然而随着对无人机载荷的日益轻量化要求,激光测照器也在尽可能地压缩体积和减轻重量,这又对其稳定性和可靠性带来挑战。

在机载较为严酷的使用环境中,激光测照器受安装力、热和振动冲击等因素影响会使敏感的谐振腔及扩束光学系统产生微小的机械形变,这些微小形变会引起激光光路变化,导致发射光轴产生偏转。为了满足使用要求,激光的最大偏转角度即发射光

轴不稳定性必须被限定在可允许的范围内。然而在实际中,对于此项指标的静态测试难度大且成本高,综合动态测试更是难以实现,通常只能随系统进行试验验证,无法得到准确的定量数据。而利用 CAE 软件对激光测照器的结构和光路进行模拟分析将是解决此问题的一种有效途径<sup>[2-4]</sup>。本文就将以某小型化 LD 泵浦固体型机载激光测照器为例,通过仿真方法,分析和计算发射光轴的动态不稳定性,以对整机的可靠性进行评估。

## 2 激光测照器的结构和相关参数

### 2.1 激光测照器结构

该激光测照器采用了双平面镜直线腔型和一体化的结构设计,主体部分主要由激光谐振腔(包括 LD 泵浦模块,输出镜和全反镜等组件),散热组件,扩束光学系统,接收光学系统,支承结构,以及附属电路等组成,如图 1 所示。

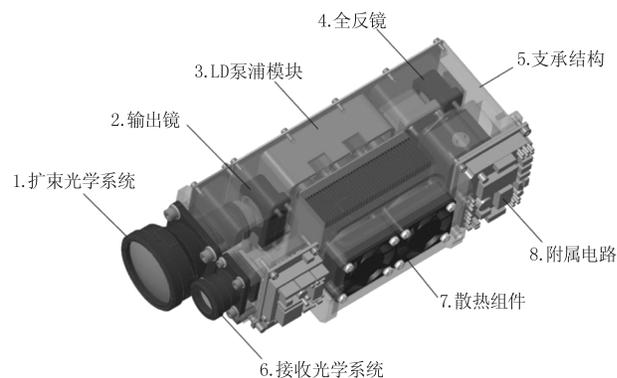


图 1 激光测照器结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the laser finder/illuminator

采用了一体化的设计省去了激光器作为独立单元的支承和连接部分,可以有效缩减整机体积和重量,以满足机载光电吊舱的小型化和轻量化要求<sup>[5-6]</sup>。

### 2.2 相关参数

激光测照器的主要参数如表 1 所示;激光测照器的使用环境要求如表 2 所示;激光测照器中所使用的主要零件材料如表 3 所示。

表 1 激光测照器主要参数

Tab. 1 Main parameters of the laser finder/illuminator

Item	parameters
Wavelength/nm	1064
Maximum range/km	≥10
Laser beam divergence/mrad	≤0.3
Instability of emission axis/mrad	≤0.08
Total weight/kg	≤2.0
Total length/mm	220

表 2 激光测照器的使用环境要求

Tab. 2 Environment requirements of the laser finder/illuminator

Item	Environment requirements
工作温度	-40 °C ~ +60 °C
振动条件	宽带随机谱叠加窄带尖峰,加速度 PSD 谱如后文中图 6 所示
冲击条件	半正弦波,最大峰值加速度 20 g,持续时间 11 ms

表 3 激光测照器零件材料属性

Tab. 3 Material properties of the laser finder/illuminator parts

Properties	Materials				
	Duralium(2A12)	Superduralium(7075)	Optical glass(K9)	Microcry-stallinemica	Copper(T2)
Density/(kg · m <sup>-3</sup> )	2.78 × 10 <sup>3</sup>	2.79 × 10 <sup>3</sup>	2.51 × 10 <sup>3</sup>	2.6 × 10 <sup>3</sup>	8.3 × 10 <sup>3</sup>
Young's Modulus/Pa	6.8 × 10 <sup>10</sup>	7.1 × 10 <sup>10</sup>	8.2 × 10 <sup>10</sup>	8.34 × 10 <sup>10</sup>	12.0 × 10 <sup>10</sup>
Coefficient of Thermal Expansion/°C	2.14 × 10 <sup>5</sup>	2.38 × 10 <sup>5</sup>	7.1 × 10 <sup>6</sup>	6.5 × 10 <sup>6</sup>	1.8 × 10 <sup>5</sup>
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.17	0.17	0.34

## 3 仿真分析与计算

### 3.1 安装力作用下的结构静力分析

激光测照器在工作时会受自身重力、振动和冲击等多种载荷作用,为了保证安装稳定,三个固定点(图 2 中 A、B、C)的安装螺钉必须有足够预紧力,以保证激光测照器底部凸台与吊舱安装基面之间不会出现分离和切向滑动。由于受面形精度影响,即使

三点固定也可能在接触平面之间存在微小间隙,在激光测照器受螺钉预紧力作用时,光路结构会产生一定弹性机械形变,在经过长时间的时效作用后,平面间隙会持续变化,从而导致激光光轴产生偏离。

通常安装面之间的间隙可能出现在固定点 A、B、C 的任意位置。根据三点在激光测照器上的位置分布特点,假定间隙在 A 点时,在螺钉拉力作用

下激光测照器将主要产生长度方向的弯曲变形,发射光轴亦会产生俯仰角度变化。而在  $B$  点和  $C$  点中的某一点出现间隙时激光发射光轴主要产生的是平移和绕光轴转动,对光轴的指向性影响不大。因此,受安装力形变可主要选取针对  $A$  点出现最大平面间隙的情况进行分析。

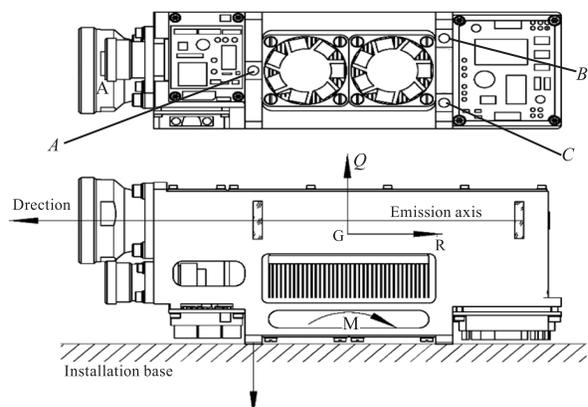


图 2 安装受力图

Fig. 2 Installation force diagram

按照一般要求,激光测照器的安装基准面与激光发射光轴的不平行度  $\alpha \leq 0.5$  mrad,当激光测照器与吊舱装配并调好的情况下,凸台面  $A$  与安装面可能存在的最大平面间隙  $\delta_{\max}$  为:

$$\delta_{\max} = \alpha_{\max} \cdot w = 0.5 \times 10^{-3} \times 8 = 0.004 \text{ mm} \quad (1)$$

式中,  $w$  为  $A$  点处的凸台面宽度,尺寸为 8 mm。由于螺钉处在凸台面中心,当最大间隙为 0.004 mm 时,螺钉中心处接触面法向最大可移动量为  $0.004/2 = 0.002$  mm。

根据螺钉预紧力公式计算  $A$  点螺钉的预紧力  $F'$  为:

$$F' = \frac{1}{Z} \left[ \frac{K_f R}{f} + (1 - C) Q \right] \quad (2)$$

其中,  $Z$  为螺钉数量,此处值为 3;  $f$  为结合面间摩擦系数,查表取值为 0.17;  $K_f$  为摩擦力不稳定的可靠系数,查表取值 1.2;  $R$  为横向载荷,考虑最大载荷的情况,即激光测照器在受到最大冲击  $a = 20$  g 时,  $R = m \cdot a = 2.0 \times 9.8 \times 20 = 392$  N,  $m$  为整机重量 2.0 kg;  $Q$  为纵向载荷,同  $R$ ,  $Q = m \cdot a = 2 \times 9.8 \times 20 = 392$  N;  $C$  为螺钉相对刚度,可直接查表取值为 0.3;

因此:

$$\begin{aligned} F' &= \frac{1}{3} \left[ \frac{1.2 \times 392}{0.17} + (1 - 0.3) \times 392 \right] \\ &= 1013.8 \text{ N} \end{aligned}$$

出于安全性的考虑,取螺钉预紧力为 1200 N。

在 ANSYS Work bench 中对激光测照器进行静力分析(Static Structural),设置  $B$ 、 $C$  两点凸台固定约束,  $A$  点螺孔中心处施加沿  $Z$  轴方向 1200 N 的拉力,并设置  $A$  点凸台允许最大位移量为 0.002 mm,仿真得到总体形变图如图 3 所示。

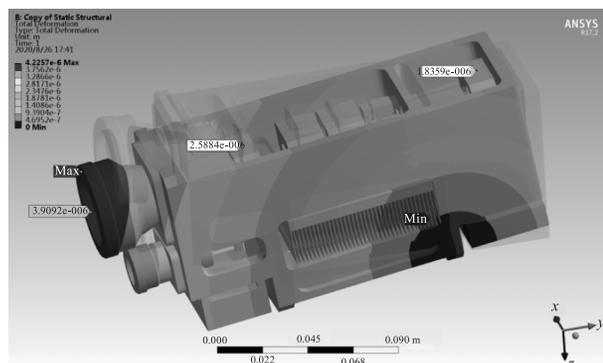


图 3 安装力作用下的总体形变

Fig. 3 Total deformation under installation force

从分析云图中看出,激光发射光轴主要沿  $Z$  轴方向发生整体刚性俯仰转动,而激光内部光路和两个腔镜夹角几乎未发生相对变动<sup>[7]</sup>。靠近扩束镜头前端面处位移最大,为  $3.9092 \times 10^{-6}$  m,根据分析结果数据和几何关系计算得到该激光测照器在受安装力作用下的发射光轴最大偏转角度  $\phi_f$  为:

$$\phi_f = 0.018 \text{ mrad}$$

### 3.2 热-结构耦合分析

激光测照器的 LD 泵浦模块使用了 TEC 进行精确控温,只通过散热片与外部环境进行热交换,LD 热沉与支承结构的所有连接部位都采用了隔热处理,使 LD 及热沉温度保持在工作温度 +30 °C。除 LD 泵浦模块和散热片外,其余零部件的温度跟随外部环境变化。激光测照器的使用环境温度范围为 -40 ~ +60 °C。低温与常温的温差大于高温与常温的温差,因此在低温 -40 °C 工作时,激光测照器较高温时的热形变更大。由于整机处在密闭吊舱内,舱内温变相对均匀缓慢,而壳体、镜筒和镜座等结构件都使用了导热率较高的铝材料,因此零件内部温度可认为均匀变化而无须考虑瞬态温度梯度。

将 -40 °C 时的各零部件温度作为输入边界条件对激光测照器进行稳态热-结构耦合分析<sup>[8]</sup> (steady-state thermal-static structural) 得到总体热形变图如图 4 所示。

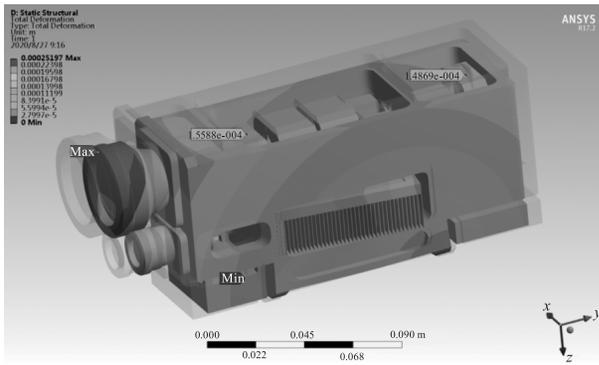


图4 总体热形变图

Fig. 4 Total thermal deformation diagram

此时激光测照器发射光路几何中心在 X、Y、Z 三轴方向上的位移分量如图 5 所示。

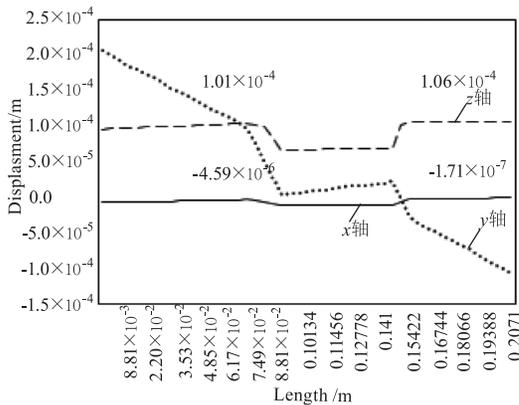


图5 热形变位移分量

Fig. 5 Thermal deformation displacement components

由分析结果看出,激光测照器在 -40 °C 的环境温度下工作时,整体表现为冷缩态。在三轴方向上分别表现为:Y 轴方向的形变位移最大,Z 轴次之,而 X 方向最小。由于 Y 向形变主要表现为光路沿光轴方向的拉长或缩短,并不会对光轴指向产生影响,因此可不予考虑,而 X 轴方向和 Z 轴方向的形变都会引起激光光轴指向的变化。

根据谐振腔光轴转向率以及扩束光学放大倍率与光轴的变化关系,激光光轴的偏转角度  $\phi$  可表示为:

$$\phi = \phi_r + \phi_o = \phi_r + \varepsilon \cdot \theta \cdot \Gamma^{-1} \quad (3)$$

式中,  $\phi_r$  为整机刚性偏转角度;  $\phi_o$  为内部光路变化引起的光轴偏转角度;  $\varepsilon$  为光轴转向率,在平行平面腔中取近似值为 1/2;  $\theta$  为由形变引起的腔镜法向夹角;  $\Gamma$  为扩束镜头倍率,此值为 5.5。

从图 5 看出  $\phi_r$  和  $\phi_o$  在轴线同侧且角度很小,接近直线变化。为了便于计算可假设右侧全反镜中心位置为相对零位,其位移为  $S_0$ , 输出镜中心位置

位移为  $S_1$ , 此时公式(3)可近似为:

$$\phi \approx \frac{S_1 - S_0}{L_0} + \frac{S_1 - S_0}{2 L_0 \Gamma} = \frac{(2\Gamma + 1)}{2 L_0 \Gamma} (S_1 - S_0) \quad (4)$$

式中,  $L_0$  为腔镜之间距离。由分析数据和几何关系通过公式(4)可得到 X 向和 Z 向的光轴偏转角度  $\phi_{tx}$ ,  $\phi_{tz}$  分别为:

$$\begin{cases} \phi_{tx} = 0.039 \text{ mrad} \\ \phi_{tz} = 0.045 \text{ mrad} \end{cases}$$

根据正交关系计算该激光测照器在 -40 °C 工作时由热形变引起的最终合成光轴偏转角度  $\phi_t$  为:

$$\phi_t = \sqrt{\phi_{tx}^2 + \phi_{tz}^2} = 0.059 \text{ mrad} \quad (5)$$

### 3.3 随机振动分析

激光测照器在受振动和冲击作用时,激光谐振腔会产生瞬态机械形变<sup>[9-10]</sup>。由于冲击的时间极短,如果不发生结构失效,这种形变通常也可瞬间恢复,一般不会对光轴稳定性产生影响。而振动的累积时间则比较长,其影响不可忽略。根据所处无人机的振动环境,激光测照器振动条件是由宽带随机谱上叠加窄带尖峰组成,其加速度的 PSD 谱如图 6 所示,其中  $F1 = 113 \text{ Hz}$ ,  $F2 = 2F1$ ,  $F3 = 3F1$ ,  $F4 = 4F1$ 。四个窄带尖峰 ( $F1 \sim F4$ ) 的振动带宽为围绕各自频率的  $\pm 5\% f_i$ 。L1 对应的功率谱值为  $0.1 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。

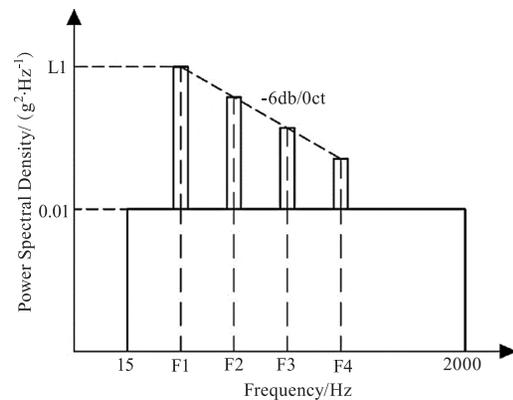


图6 振动加速度 PSD 谱

Fig. 6 Vibration acceleration PSD spectrum

由于 PSD 谱不是确定性谱而是基于概率的统计规律,只能使用随机振动而不能用瞬态动力学分析代替。利用 ANSYS Workbench 的随机振动(Random Vibration)功能对激光测照器进行振动响应分析,并将加速度 PSD 谱以表数据形式作为随机振动的激励载荷分别在激光测照器的 X、Y、Z 方向进行加载,分析求解得到激光测照器在三轴方向  $3\sigma$  (统

计概率为 99.73%)范围内的形变如图 7 所示。

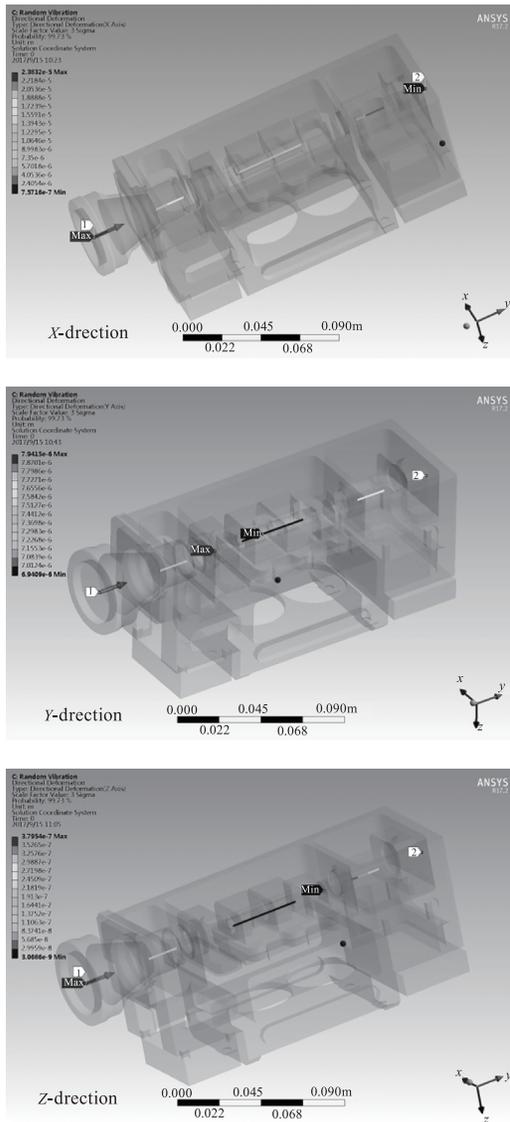


图7 振动形变图

Fig. 7 Vibration deformation diagram

其中,激光发射光路几何中心在各方向上的形变位移分量如图 8 所示。

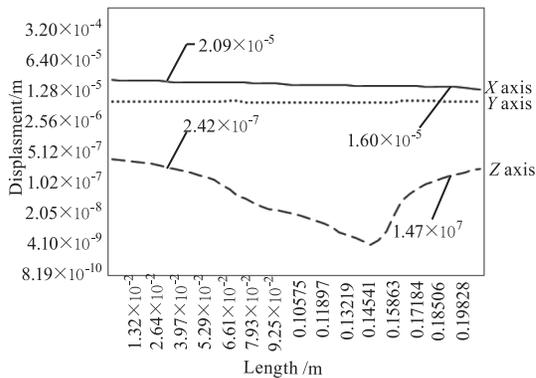


图8 振动形变位移分量

Fig. 8 Vibration deformation displacement components

从分析结果看,激光光路几何中心沿 X 轴方向形变较大,而沿 Z 轴方向相对很小可忽略不计,Y 方向的形变同样对激光光轴不产生影响,因此只分析计算 X 方向的光轴变化情况。

依照前文公式(4),计算得到由随机振动引起的激光光轴偏转角度  $\phi_v$  值为:

$$\phi_v = 0.043 \text{ mrad}$$

### 3.4 综合不稳定性

由于以上得到的三种因素影响下的激光发射光轴偏转角度处在不同方向,并且相互独立,同时出现的概率亦微乎其微,为了反映激光测照器的发射光轴综合不稳定性,取其均方根作为有效值,此时激光测照器发射光轴的综合不稳定性  $\omega$  为:

$$\omega = \sqrt{\phi_f^2 + \phi_i^2 + \phi_v^2} = 0.075 \text{ mrad} \quad (6)$$

## 4 结论

通过以上的仿真分析和计算得到激光测照器在工作时的动态发射光轴不稳定性为 0.075 mrad,此值为最不理想情况下的极限值,且小于指标中的 0.08 mrad,因此满足可靠性要求。

此外从分析计算过程和仿真结果可以看出,激光测照器由安装力带来的光轴不稳定性主要和安装接触面尺寸以及激光发射光轴与基准面的调节平行精度相关,减小接触面尺寸并提高光轴与基准面的平行度可以减小激光光轴的不稳定性;而由振动引起的激光光轴不稳定则主要表现在刚性最弱且悬臂较长的 x 方向上,加强 x 方向刚度并减小悬臂尺寸也可以相应减小激光发射光轴的不稳定性。

## 参考文献:

[1] Liu Jiayan, Wang Ping, Gan Zhihong, et al. Laser irradiation precision analysis of photoelectric platform for high speed unmanned aerial vehicle with scouting and hitting [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(10): 1449 - 1455. (in Chinese)  
 刘家燕,王平,甘至宏,等. 察打一体高速无人机光电平台激光照射精度分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1449 - 1455.

[2] Quan Wei, Li Guanghui, Chen xi, et al. Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1080 - 1086. (in Chinese)

- 全伟,李光慧,陈熙,等.一体化半导体激光器的 ANSYS 热仿真及结构设计[J].光学精密工程,2016,24(5):1080-1086.
- [3] Song Hongtao, Bing Hongzan. Application of thermal simulation in the structural design of electronic system[J]. Applied Science and Technology, 2001, 28(8):4-6. (in Chinese)  
宋洪涛, 宾鸿赞. 热仿真技术在电子设备结构设计中的作用[J]. Applied Science and Technology, 2001, 28(8):4-6.
- [4] Hua Qing, Yin Jinghua, Jiao Guoqin, et al. Thermal analysis and optimization of power VDMOS transistor based on analysis[J]. Chinese Journal of Electro Device, 2009, 32(2):354-356. (in Chinese)  
华庆, 殷景华, 焦国芹, 等. 基于 ANSYS 的功率 VDMOS 器件的热分析及优化设计[J]. 电子器件, 2009, 32(2):354-356.
- [5] Liu Yaping, Peng Xujin, Zhao Gang, et al. Structure design and analysis of cooling parts of compact lasers [J]. Laser Technology, 2017, 41(6):886-889. (in Chinese)  
刘亚萍, 彭绪金, 赵刚, 等. 小型激光器冷却部件的结构设计与分析[J]. 激光技术, 2017, 41(6):886-889.
- [6] Yin Yuan, Zheng Rong. Design of the light electro-optical stabilized platform [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(4):4749. (in Chinese)  
尹远, 郑荣. 轻型光电稳定平台结构设计[J]. 机械设计与制造, 2011(4):4749.
- [7] Zhu Haitao, Feng Guoying, Yin Ming, et al. Output characteristics of misaligned resonator for large-aperture thin disk laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12):3307-3311. (in Chinese)  
朱海涛, 冯国英, 阴明, 等. 大口径薄片激光器失调输出特性[J]. 强激光与粒子束. 2011, 23(12):3307-3311.
- [8] Wu Shoujun, Ren Guoquan, Li Dongwei, et al. Simulation analysis about temperature difference thermal strain of sights based on ANSYS[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016, 40(3):303-308. (in Chinese)  
吴守军, 任国全, 李冬伟, 等. 基于 ANSYS 的瞄准镜温差热应变仿真分析[J]. 南京理工大学学报, 2016, 40(3):303-308.
- [9] Sun Changfeng, Zhang Xingde, Li Ronggang, et al. Anti-vibration structure optimization of the optical window [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(3):307-310. (in Chinese)  
孙昌锋, 张兴德, 李荣刚, 等. 光学窗口的抗振结构优化分析. 激光与红外[J]. 2015, 45(3):307-310.
- [10] Tan Qiyang, Gao Yunguo, Wang Xiaoqing. Design and analysis of inner supporting structure of two-axis laser emission system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, 6:29-30. (in Chinese)  
谭启檐, 高云国, 王小庆. 二轴转台激光发射芯部结构设计与分析[J]. 机械设计与制造, 2010, 6:29-30.