文章编号：0258-7025(2004)Supplement-0399-04

光学平台基础振动对激光束瞄准稳定性的影响

陈贵敏， 贾建援， 范国滨
(西安电子科技大学机电工程学院，陕西 西安 710071)

摘要 在恶劣机械振动环境条件下，如何使光束稳定成为制约光学系统性能提高的技术难题。借助矩阵光学、机械振动学和有限元方法统一处理，建立了光学系统光束稳定性的基础振动响应分析模型，并以某二维光学系统为例，给出了详细的数值仿真方法，并提出了保障瞄准稳定性的若干振动控制措施。增大平台模态阻尼比是减小光束指向漂移有效的振动控制措施，但工程实施能力有限。计算结果表明，对于平台的基础振动，采用柔性支撑隔振可使光束漂移量显著减小；但由于柔性支撑难以抑制平台上的激振源引起的振动，在多种振动存在的环境中，光束稳定控制技术将成为进一步提高光学系统性能的关键技术。

关键词 几何光学；基础振动；瞄准稳定性；激光传输；光机电一体化
中图分类号 O435; O327 **文献标识码** A

Platform Foundation Vibration Effects upon Pointing Stability of Laser Beam

CHEN Gui-min, JIA Jian-yuan, FAN Guo-bin
(*School of Electro-Mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*)

Abstract In adverse circumstances such as mechanical vibration environment, it becomes a difficult technique problem to stabilize light-beam, which restricts the improvement of performance of optical systems. An analytical model of response of optical system's light-beam misalignment on platform ground vibration was established based on matrix optics, vibration theory and finite element method. And a numerical simulation analysis of an optical system was given in detail. The results showed that to increase the damping coefficient of the platform structure could effectively stabilize light-beam. Using flexible sustained platform can decrease the relative misalignment, but the misalignment caused by the exciting vibration on the platform would increase. Therefore, in adverse circumstances, the light-beam stability control is the key technique to improve the performance of optical system.

Key words geometrical optics; ground vibration; pointing stability; laser beam propagation; opto-mechatronics

工作在恶劣机械振动环境条件下的激光空间通信和激光功率远程输运光学系统，要求将激光功率通过长距离传输后仍能集中于目标上，如何稳定光束使其不受振动影响成为一个亟待解决的问题。借助矩阵光学、机械振动学和有限元方法，本文对这一技术难题进行了分析和讨论。

1 光学平台结构的振动响应

光路系统置于光学平台结构之上，结构处于线弹性小变形振动状态，在物理坐标系下的有限元离散化动力学方程为

$$[M]=\{\ddot{X}\}+[C]\{\dot{X}\}+[K]\{X\}=\{P(t)\} \qquad (1)$$

其中，常系数矩阵$[M]$，$[C]$和$[K]$分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵，n 维解向量$\{X\}$，$\{\ddot{X}\}$和$\{\dot{X}\}$分别为结构的节点位移、速度和加速度向量，$\{P(t)\}$为结构承受的激振力向量。应当特别强调指出，$\{X\}$是以光路系统的理想光轴为参考系的绝对位移向量，在满足基础运动的边界条件下，考虑到基础传递阻尼力远小于弹性力，有

$$\{P(t)\}=[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}+\{Q(t)\approx[K]\{U\}+\{Q(t)\}$$

式中$\{Q(t)\}$为结点的振源载荷向量，$\{U\}$为平台结构随基础运动的结点位移向量。向量$\{U\}$的分量均跟随基础振动 u 运动，可表达为$\{U\}=\{U_0\}u$，故上式可转化为

$$\{P(t)\}=[K]\{U_0\}u+\{Q(t)\}=\{P_0\}u+\{Q(t)\} \qquad (2)$$

1.1 广义特征值问题

对小阻尼系统，方程(1)的齐次解问题为

$$[M]\{\ddot{X}\}+[K]\{X\}=\{0\} \qquad (3)$$

令$[\Lambda]=\mathrm{diag}(\omega_i^2)$，$\{X\}=\{\varphi\}\exp(\mathrm{j}\omega t)$，转化为广义特征方程$[K]\{\varphi\}=\omega^2[M]\{\varphi\}$，可求得正则化特征向量和特征值的矩阵表达式。截取 r 阶主振型构成的特征向量矩阵为

基金项目：国家高技术 863 计划(2002AA862011)资助课题。

作者简介：陈贵敏(1978-)，男，西安电子科技大学博士研究生，主要从事光机电一体化的研究。E-mail:efoxxx@sina.com

$$[\psi]=[\{\varphi_1\}\{\varphi_2\}\cdots\{\varphi_r\}]$$

由 r 阶固有频率构成的特征值矩阵为对角线矩阵$[\Lambda]=\mathrm{diag}(\omega_i^2)$，认为小阻尼系统满足解耦条件，则存在正则化关系

$$\begin{cases}[\psi]^{\mathrm{T}}[M][\psi]=[I]\\ [\psi]^{\mathrm{T}}[K][\psi]=[\Lambda]\\ [\psi]^{\mathrm{T}}[C][\psi]=[\Omega]\end{cases} \tag{4}$$

其中，$[I]$为 r 阶单位矩阵，$[\Lambda]$为对角矩阵，对角矩阵$[\Omega]=\mathrm{diag}(2\xi_i\omega_i)$，$\xi_i$ 称为 i 阶模态的阻尼比。

1.2 周期性基础激振的动力响应

周期性基础振动引起的平台结构的振动实际上属于简谐激振力引起的强迫振动。由(2)式知，当无激振力$\{Q(t)\}$时，周期性激励力向量$\{P(t)\}=\{P_0\}\exp(\mathrm{j}\omega t)$作用于平台支撑腿处，按模态叠加法用模态坐标表达的物理坐标下的位移为

$$\{X\}=[\psi]\{q\}=\sum_{k=1}^{r}\{\varphi_k\}q_k \tag{5}$$

将(5)式代入(1)式，并左乘以$[\psi]^{\mathrm{T}}$，考虑正则化解耦关系式(4)，得到

$$\{\ddot{q}\}+[\Omega]\{\dot{q}\}+[\Lambda]\{q\}=[\psi]^{\mathrm{T}}\{P(t)\} \tag{6}$$

方程(6)的模态坐标解为

$$q_k=\frac{\{\varphi_P^k\}^{\mathrm{T}}\{P_0\}\sin(\omega t-\theta_k)}{\omega_k^2\sqrt{(1-\lambda_k^2)^2+(2\xi_k\lambda_k)^2}} \tag{7}$$

其中 $\lambda_k=\dfrac{\omega}{\omega_k}$，$\theta_k=\arctan\dfrac{2\xi_k\lambda_k}{1-\lambda_k^2}$。

将(7)式代入(5)式，得到位移向量$\{X\}$的第 i 个分量为

$$x_i=\sum_{k=1}^{r}\varphi_i^k\frac{\{\varphi_P^k\}^{\mathrm{T}}\{P_0\}\sin(\omega t-\theta_k)}{\omega_k^2\sqrt{(1-\lambda_k^2)^2+(2\xi_k\lambda_k)^2}} \tag{8}$$

其中 φ_k^i为 k 阶模态$\{\varphi_k\}$的第 i 个分量，φ_P^k为 k 阶模态激振力作用点的正则振型。

对于周期性激振，可将$\{P(t)\}$展开为傅里叶级数，按叠加原理将各谐波响应求和得到$\{X\}$。

2 光学系统的振动失调

2.1 通过失调光路系统的光束指向失调

在振动环境下，置于光学平台之上的传输光路产生时变非共轴现象，称为光学系统的振动失调。对线弹性小变形振动，光束传输仍满足近轴光学的条件。以理想光轴为基准，透过光学元件的轴对称光束方向传输关系[1]为

$$\begin{Bmatrix}r_{i+1}\\ \theta_{i+1}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}a_i & b_i\\ c_i & d_i\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}r_i\\ \theta_i\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}\alpha_i & \beta_i\\ \gamma_i & \vartheta_i\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_{ri}\\ \varepsilon_{\theta i}\end{Bmatrix}$$

简记为：

$$y_{i+1}=T_iy_i+Q_ix_i \tag{9}$$

其中 y_i 和 y_{i+1} 分别为 i 参考面的输入光矢量和 $i+1$ 参考面的输出光矢量，x_i 为光学元件的振动位移矢量。T_i 和 Q_i 分别为光学元件的传输变换矩阵和失调扰动矩阵，其矩阵元素取决于光学元件的几何形状尺寸、媒质材料和光波参数。

对于相邻参考面间为均匀介质的光传输环节，如象均匀大气传输介质，其失调扰动矩阵恒为零。为便于以各光学元件的位移下标 j 沿光束传输方向顺序编号，将每一段均匀介质与其后相邻的光学元件作为单个“广义光学元件”，广义光学元件编号 j 与参考面编号 i 如图 1 所示。

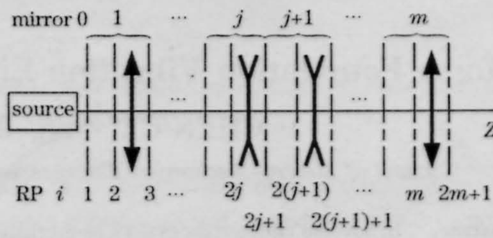

图 1 广义元件编号 j 与面编号 i 的对应关系

Fig.1 Numbering diagram

令第 j 个广义光学元件传输环节的传输、失调矩阵分别为 M_j，N_j，即

$$y_{j+1}=M_jy_j+N_jx_j \tag{10}$$

证明 M_j 为对应光学元件的传输矩阵乘以对应均匀介质传输矩阵，N_j 为对应光学元件的失调扰动矩阵[1]。对于光源以及 m 个光学元件构成的光路系统，输入 y_{in} 与输出 y_{out} 的失调光束传输关系为

$$y_{\mathrm{out}}=\left(\prod_{i=1}^{m}\right)(y_{\mathrm{in}}+x_0)+\sum_{j=1}^{m-1}\left[\left(\prod_{i=j+1}^{m}M_i\right)N_jx_j\right]+N_mx_m \tag{11}$$

其中 y_{in} 为理想输入光束矢量，x_0 为光源的振动位移矢量。将上式简记为

$$y_{\mathrm{out}}=My_{\mathrm{in}}+N\{X\} \tag{12}$$

其中的位移扰动项 $N\{x\}$称为光束指向失调量。定义 $\tilde{N}_m=N_m$，$\tilde{N}_m$ 为$\left(\prod_{i=1}^{m}M_i\right)$，令$\tilde{N}_j=\left(\prod_{i=j+1}^{m}M_i\right)N_j$(其中 $j=1,\cdots,m-1$)，其中符号$\prod$表示矩阵左连乘。指向失调量为

$$N\{X\}=\sum_{j=0}^{m}\tilde{N}_j\,x_j \tag{13}$$

2.2 刚体位移扰动下的光束指向偏移

对于光学平台结构整体随基础发生刚体位移的情况，即平台上光学系统无相对失调，但是其共同轴线并不与设计光轴相重合。这种失调，实际上类似于单个光学元件的失调，所不同的是，该光学系统的传

输变换矩阵和失调扰动矩阵，分别等于顺序穿过的各元件的传输变换矩阵和失调扰动矩阵反序的乘积，而失调参数即为平台的刚体扰动位移，所以，刚体位移扰动下的光束失调表现为理想光轴的刚性偏移。

2.3 失调叠加积分

失调叠加积分定义为

$$\eta_m=\frac{1}{I}\int_{-\infty}^{\infty}U(x)[U(x-\delta_0)\exp(-\mathrm{i}k\varepsilon_0x)]\mathrm{d}x$$

式中 $I=\int_{-\infty}^{\infty}|U(x)|^2\mathrm{d}x$，$\delta_0$ 和 ε_0 分别为束腰处实际光束相对于理想光束的横向和角向偏移，$U(x)$ 和 $U(x-\delta_0)\exp(-\mathrm{i}k\varepsilon_0x)$ 分别为理想光束和实际测量光束的场分布。$k=2\pi/\lambda$，λ 为光束的波长。

可用失调因子 $|\eta_m|^2$ 来度量失调程度，当光束完全准直、准心(无失调)时，$|\eta_m|^2$ 取得极大值 1，随着失调程度的增加，$|\eta_m|^2$ 越来越接近极小值 0。$|\eta_m|^2$ 越大，意味着光束对失调越不灵敏，因而瞄准稳定性越好。

对于厄米-高斯光束，在失调不严重的情况下，可使用其失调因子的近似表达式[2]

$$|\eta_m|^2\approx1-(2n+1)\nu \tag{14}$$

其中，$\nu=(\delta_0/w_0)^2+(k\varepsilon_0w_0/2)^2$，$w_0$ 为光束的束腰宽度。

3 仿真计算实例

某平台长度为 9000 mm，将图 2 所示伽利略望远镜系统置于其上。望远镜的两个广义光学元件的传输矩阵和失调矩阵分别为

$$M_1=\begin{bmatrix}1.00982 & 1013.77\\0.005 & 6.00982\end{bmatrix},\ N_1=\begin{bmatrix}0.0098 & 2.0526\\0.0050 & -0.0098\end{bmatrix},$$

$$M_2=\begin{bmatrix}0.9967 & 1798.701\\0.0005 & 0.100982\end{bmatrix},\ N_2=\begin{bmatrix}0.0033 & 6.8421\\0.0005 & 0.0033\end{bmatrix},$$

光源输出的光束矢量 $y_{in}=\{0;0\}$。

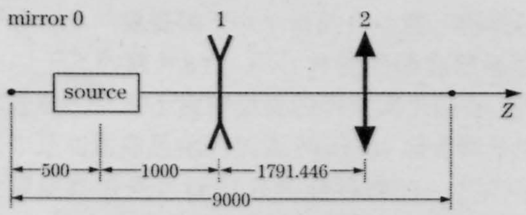

图 2 光学系统的布局

Fig.2 Layout of the optical system

对于不同的支撑腿刚度，基础振动传递到平台上的振动强度也不尽相同。平台阻尼比 ξ_K 取 0.02，平台支撑腿处作用有简谐激振力 $200\sin(\omega t)$ 牛顿，ω 从 1~800 rad/s 进行扫频，即可取得出射光束失调

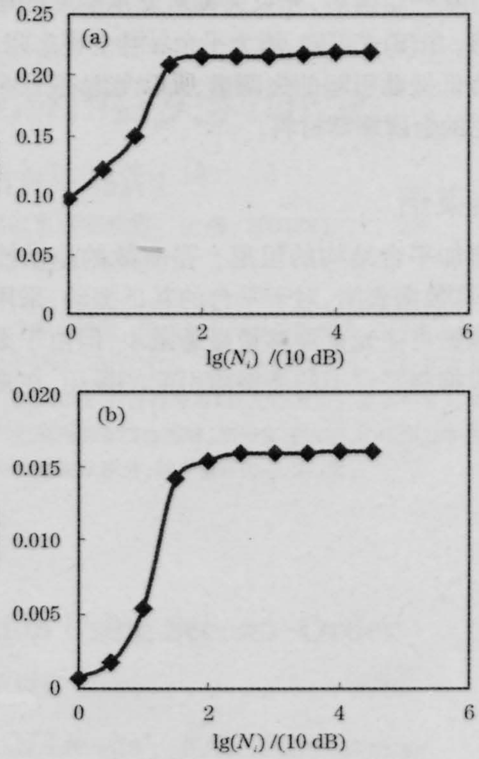

图 3 不同基础刚度条件下的光束失调量

Fig.3 Misalignment of (a) transverse and (b) angle under different ground sustained stiffness condition

的横向分量 δ 和角向分量 ε 的幅值。取基准刚度 $K_0=5\times10^2$ N/mm，依次改变平台支承刚度 $K_i=K_0\lg(N_i)$，其中 $N_i=K_i/K_0$，可描出 δ 和 ε 对应的幅值曲线，分别如图 3 (a)，(b)所示。

波长 λ=1.315 μm，束腰宽度 w_0=2 mm，n=3，而 δ_0 和 ε_0 可由 δ 和 ε 通过 *ABCD* 传输矩阵运算得到不同基础刚度条件下失调因子 $|\eta_m|^2$ 的曲线(图 4)。

图 3 和图 4 表明，随着平台支承刚度减小，基础振动引起的光束失调量逐渐减小，因而系列平台产品常采用低刚度空气弹簧隔离基础振动；当支承刚

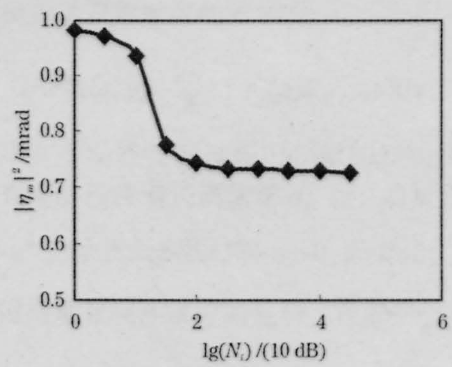

图 4 不同基础刚度条件下的 $|\eta_m|^2$

Fig.4 $|\eta_m|^2$ under different ground sustained stiffness condition

度超过某一定值后，光束失调对支承刚度的增加并不敏感。由(8)式可知，增大平台结构的模态阻尼，可有效降低振动引起的失调量，所以光学平台多采用大阻尼的金属蜂窝材料。

5 结束语

增加平台结构的阻尼，是有效的振动控制措施；计算数据表明，对于平台的基础振动，采用柔性支撑隔振可使光束漂移量显著减小，但由于柔性支撑难以抑制平台上的激振源引起的振动，在多种振动同时存在的环境中，光束稳定控制技术将成为进一步提高光学系统性能的关键技术。

参考文献

1 Lu Yaxiong, Lü Baida. Matrix Optics[M]. Dalian University of Technology Press, 1989. 84~88
卢亚雄，吕百达. 矩阵光学[M]. 大连：大连理工大学出版社. 1989. 84~88

2 Luo Shirong, Lü Baida. Pointing stability of Hermite-cosh-Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 693~696
罗时荣，吕百达. 厄米-双曲余弦-高斯光束的瞄准稳定性[J].光学学报，2002，**22**(6):693~696