

第一作者: 孙 晖, 男, 1983 年出生, 2008 年 6 月于中国科学院上海应用物理研究所获得硕士学位, 研究方向为光学检测
收稿日期: 2008-03-10, 修回日期: 2008-05-15

为分析待测表面 SUT 与五角棱镜间相对振动引起的 LTP 测量误差, 建立坐标系 $x-y-z$, 如图 2(a), 基准光束的方向向量 A_i 、出射光束方向向量 A_o 、测

点 P 的法向矢量 N_{SUT} 等均在这一坐标系内定义。

假设在某时刻五角棱镜扫描至测点 P , 我们考察此时被 SUT 反射回来的测量光束的方向向量 A_o 。

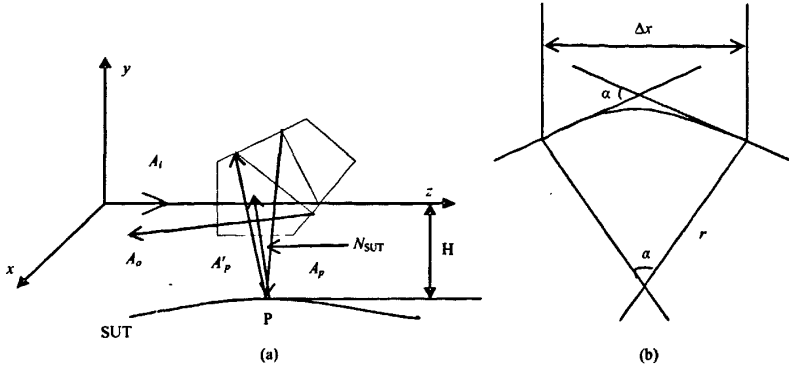


图2 分析模型示意图
Fig.2 Analyzing models

记五角棱镜出射光束的方向向量为 A_p , 测点反射光束方向向量为 A'_p , 则

$$A_p = S_p^{-1} \cdot R \cdot S_p \cdot A_i \quad (1)$$

式中, S_p 为五角棱镜该空间状态的坐标转换矩阵^[12], R 为五角棱镜的作用矩阵^[12,13],

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

根据向量形式的反射定律, 得到测点反射回来的探测光束方向向量

$$A'_p = A_p - 2 \cdot N_{SUT} (A_p \cdot N_{SUT}) \quad (2)$$

为求反射光束经五角棱镜折转后出射光束的方向向量 A_o , 先求得五角棱镜在入射光轴与 y 轴重合时的作用矩阵

$$R' = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

从而

$$A_o = S_p^{-1} \cdot R' \cdot S_p \cdot A'_p \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3), 化简后有,

$$A_o = A_i - 2c \cdot T \quad (4)$$

其中定义了传递矢量 $T = S_p^{-1} \cdot R' \cdot S_p \cdot N_{SUT}$, 传递系数 $c = (S_p^{-1} \cdot R \cdot S_p \cdot A_i) \cdot N_{SUT}$

为考察样品台振动对返回光束的方向向量的影

响, 设初始测点轮廓法线与 y 轴平行, 即

$$N_{SUT} = [0, 1, 0]^T$$

且假定五角棱镜相对于标定坐标系无偏转, 此时坐标转换矩阵为单位阵, 即 $S_p = I$ 。

设样品台相对五角棱镜发生振动。若仅在 x 方向上发生振动, 存在振动位移 Δx , 则测点 P 的位置也发生了变化, P 处的法向即 N_{SUT} 也发生了偏移, 假定法向偏移了一个微小角度 α , N_{SUT} 的值改变为

$$N_{SUT} = [\sin \alpha, \cos \alpha, 0]^T$$

此时系统的传递矢量和系数分别为

$$T = [-\cos \alpha, \sin \alpha, 0]^T, \quad c = -A_{ix} \cos \alpha + A_{iy} \sin \alpha$$

代入式(4), 得

$$A_o = \begin{pmatrix} (1 + 2\cos^2 \alpha)A_{ix} - 2A_{iy} \sin \alpha \cos \alpha \\ (1 + 2\sin^2 \alpha)A_{iy} - 2A_{ix} \sin \alpha \cos \alpha \\ A_{iz} \end{pmatrix}$$

对一维线轮廓测量, 我们仅关心返回的测量光束在 $x-y$ 坐标面内的角度变化 θ_x ,

$$\tan \theta_x = \frac{(1 + 2\sin^2 \alpha)A_{iy} - 2A_{ix} \sin \alpha \cos \alpha}{(1 + 2\cos^2 \alpha)A_{ix} - 2A_{iy} \sin \alpha \cos \alpha}$$

取基准光束方向与 x 轴平行, 即

$$A_i = [1, 0, 0]^T$$

于是有

$$\tan \theta_x = -\frac{2\sin \alpha \cos \alpha}{1 + 2\cos^2 \alpha}$$

如图 2(b)所示, $\alpha \approx \Delta x/r$, r 为子午面曲率半径, 对于通常用 LTP 进行面形检测的用于同步辐射的光学镜, 该值可达数百米到数千米不等^[14]。假定 Δx 为微米级, 则可估算得返回测量光束在 x - y 面内的一维角位移约为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ rad, 与 LTP 的测量精度 $0.1 \mu\text{rad}$ 相比可忽略不计, 若 $\Delta x = 10^2 \mu\text{m}$, 则 $\theta_x = 10^{-1} \mu\text{rad}$, 会对测量精度产生影响。实测结果表明, 一般的测量环境下, Δx 仅为 μm 级, 可认为对 LTP 测量精度不产生影响。

若仅在 z 方向上发生振动, 存在振动位移 Δz , 假定法向偏移了一个微小角度 γ , 同理可得到返回测量光束在 y - z 坐标面内角度变化 θ_y 与 γ 的关系,

$$\tan \theta_z = \frac{A_y}{(1 - 2\sin^2 \gamma)A_z + 2A_x \sin \gamma \cos \gamma}$$

代入 $A_i = [1, 0, 0]^T$ 得 $\tan \theta_z = 0$, 即 z 方向上的振动不影响出射光束的方向, 对测量精度不产生影响。

若仅在 y 方向上存在振动, 即测点在 y 方向上发生了偏移, 相当于增加了被测样品在该点的轮廓高度误差, 该误差值即振动位移 Δy , 将直接反映在样品轮廓高度的测量曲线上。

除样品台振动外, 直线导轨的运动误差也会导致测量误差, 但我们以前的工作已证实该误差在 LTP 测量精度的允许范围内^[9]。

综上所述, 振动对 LTP 测量精度的影响主要在于样品台垂直方向上的振动导致的样品轮廓高度的误差, 该误差与样品台在垂直方向上的振动位移相等。

2 防振措施及分析

样品台的振动, 主要是由于各类自然振源(如风、地面脉动等)和人工振源(如建筑物、交通运输、制造及安装设备等)通过地面将振动传递到 LTP 工作平台的结果。下文考察样品台对地面振动的响应, 将 LTP 及其支撑系统看作受弹簧和阻尼支撑的质量体 m , 建立模型如图 3(仅考虑垂直方向的振动)^[15]。

取 x 、 y 轴原点分别为地面和样品台的平衡位置, 设地面传递给质量体 m 的振动为 $x = X \sin \omega t$ 。设某时刻 t , 样品台处于位移 y 和速度 $\dot{y}$, 地面有位移 x 和速度 $\dot{x}$, 则样品台相对于地面有相对位移 $(y-x)$ 和相对速度 $(\dot{y}-\dot{x})$, 弹簧力和阻尼力分别为 $-k(y-x)$ 和 $-c(\dot{y}-\dot{x})$, 列振动方程如下

$$m\ddot{y} + k(y-x) + c(\dot{y}-\dot{x}) = 0$$

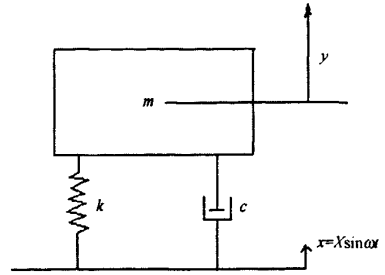


图 3 LTP 样品台振动响应模型

Fig.3 Model for vibration response of optical table

将 $x = X \sin \omega t$ 代入上面的方程, 求得该方程的解如下

$$y = Y \sin(\omega t - \varphi)$$

其中, 振幅 Y 和相角 φ 分别为

$$Y = X \sqrt{\frac{k^2 + (c\omega)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = X \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

$$\tan \varphi = \frac{m c \omega^3}{k(k - m\omega^2) + (c\omega)^2} = \frac{2\zeta\lambda^3}{1 - \lambda^2 + (2\zeta\lambda)^2}$$

其中

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \lambda = \frac{\omega}{\omega_n}, \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

无量纲比值 Y/X 称为传递率, 以 ζ 为参数, 传递率 Y/X 对 ω/ω_n 的曲线如图 4 所示, 当 $\omega < \omega_n$ 时, ω 增大, 振幅 Y 增大; $\omega > \omega_n$ 时则相反, ω 增大, 振幅 Y 减小。因此, 通过低固有频率隔振平台的使用, 可以消除中高频振动对 LTP 的影响。

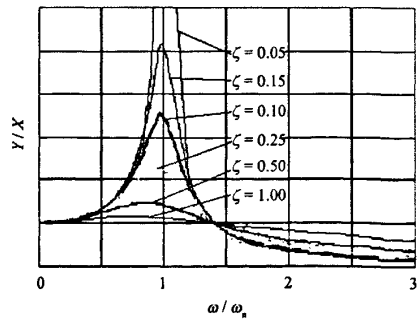


图 4 传递率曲线

Fig.4 Transmissibility curve

3 实验及结果

本实验的主要目的是验证理论分析的结论, 并考察振动对 LTP 静态稳定性的实际影响。为考察样品台垂直振动位移对 LTP 静态稳定性的影响, 须在

LTP 工作时测量样品台的振动位移，通过比较得出振动与 LTP 静态稳定性的关系。同时需考察，在一般情况下，水平方向的振动对 LTP 静态稳定性有否影响。在一般测量环境下，振动水平较低且随机性强，为全面考察振动对 LTP 静态稳定性的影响，须在实验中引入频率与强度可控的振动源。

实验所用的振动发生源为：JZ-20 型激振器(北京激振仪器厂),DH1301 扫频信号发生器和 DH5872 功率放大器(江苏东华测试技术有限公司)，通过与激振器连接的顶杆向 LTP 的隔振平台施加各方向上的激振力，调节激振力频率与强度，即可在 LTP 的样品台上获得满足实验需要的振动量。用 Handysam 型振动测量仪(日本明立精机)测量振动数据。

实验在没有气浮的普通隔振平台上进行。首先

考察水平方向的振动对 LTP 静态稳定性是否产生影响。分别在两个水平方向上向 LTP 隔振平台施加激振力，测量 LTP 静态稳定性以及 LTP 样品台在相应方向上的振动量，通过多组不加振动源和加振动源的对比实验，结合 LTP 静态稳定性与振动频率、强度的测量数据分析振动量对 LTP 静态稳定性的影响。LTP 的隔振平台可以消除大部分中高频振动的影响，只需要考察较低频率的振动是否对 LTP 静态稳定性产生影响。实验中，激振力频率为 0~50 Hz，强度固定，分别测量加振动源和不加振动源时的 LTP 静态稳定性，频率由低到高依次增加(1~10 Hz 每次增加 1 Hz，10~50 Hz 每次增加 5 Hz)，同时测量样品台上各方向上的振动特别是对应频率上相应方向的振动位移，图 5 为实验示意图。

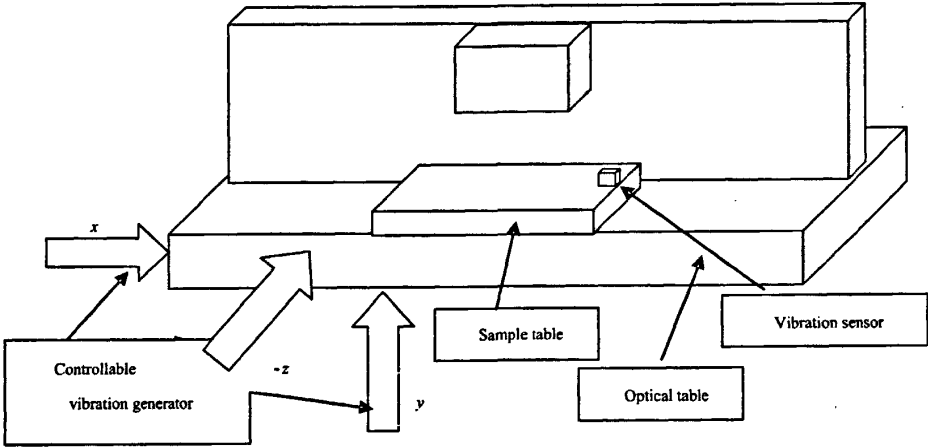


图 5 实验示意图
Fig.5 Diagram for the experiment

对两个水平方向分别加振动源测得的振动位移与 LTP 静态稳定性数据(图 6、7)表明，当样品台在水平方向上的振动位移较大时，对 LTP 静态稳定性并无明显影响，与理论分析相符。

因此，在考察振动对 LTP 静态稳定性影响时，

只需要考察垂直方向振动对 LTP 静态稳定性的影响。实验结果如图 8 所示。当振动频率在 10 Hz 以下时，样品台的垂直振动位移较大，但对 LTP 静态稳定性的影响很小，振动频率在 10 Hz 以上时，振动位移降低，但对 LTP 静态稳定性有明显影响。

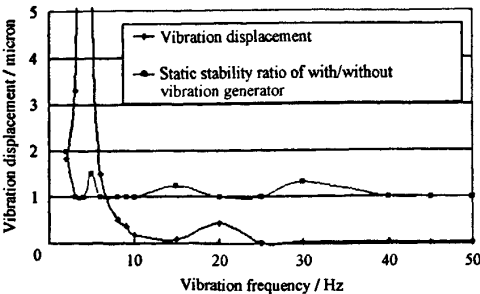


图 6 水平方向 x-LTP 稳定性对比
Fig.6 Static stability ratio-axis x

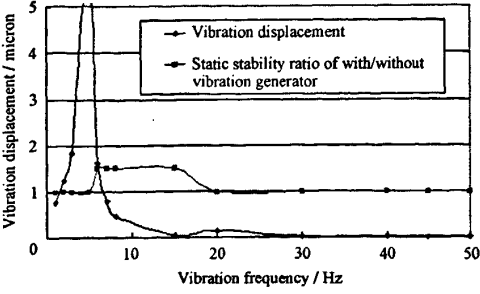


图 7 水平方向 z-LTP 稳定性对比
Fig.7 Static stability ratio-axis z

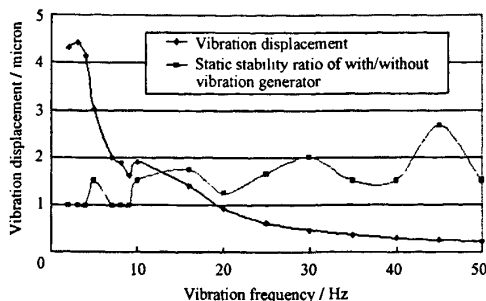


图 8 垂直方向 y-LTP 稳定性对比
Fig.8 Static stability ratio-axis y

4 结论

研究了振动对新型 LTP 的影响,并通过实验考察了振动对 LTP 静态稳定性的实际影响。结果表明,在比普通测量环境振动水平高 1~2 个数量级的实验测量环境下,水平方向振动和 10 Hz 以下垂直方向振动不影响新型 LTP 的静态稳定性,10~50 Hz 的垂直方向振动对新型 LTP 有较明显的影响,但考虑到一般测量环境下振动水平会低 1~2 个数量级或更多,且这一频段的振动可以被普通隔振平台很好的隔离,对 LTP 静态稳定性不会产生影响。因此,在一般测量环境下,环境振动对新型 LTP 的测量稳定性无显著影响,这一结果证明了 SSRF 自行设计制作的新型 LTP 对振动的不敏感性,验证了 SSRF 的设计方案在这一领域处于世界领先地位。本文的研究有助于更深入了解振动对新型 LTP 的影响,为研究振动对其他类型 LTP 或其他光学检测仪器的影响提供了理论参考。

参考文献

- 1 Takacs P Z, Qian S N. Surface profiling interferometer, U.S., 4884697. 1989-12-05
- 2 Von Bieren. Proc SPIE, 1982, **343**: 101-108
- 3 Takacs P Z, Qian S N, Colbert J. Proc SPIE, 1987, **749**: 59-64
- 4 Qian S N, Jark Werner, Takacs P Z. Rev Sci Instr, 1995, **66**(3): 2562-2569
- 5 Qian S N, Sostero G, Takacs P Z. Opt Eng, 2000, **39**(1): 304-310
- 6 Steve Irick. Proc SPIE, 1999, **3782**: 275-282
- 7 Gleeson A. Proc SPIE, 2007, 6704:67040F1-9
- 8 肖体乔, 夏绍建, 余笑寒. 长程面型仪. 中国, 02110541.3. 2003-07-30
- 9 XIAO Tiqiao, XIA Shaojian, YU Xiaohan. Long Trace Profiler: China, 02110541.3. 2003-07-30
- 10 Zeng D, Xiao T, Du G, *et al.* Rev Sci Instrum, 2006, **77**: 093305.1-093305.5
- 11 何祖斌, 许乔, 柴立群, 等. 光学技术, 2007, **32**(3): 416-419
- 12 HE Zubin, XU Qiao, CHAI Liqun, *et al.* Optical Technique, 2007, **32**(3):416-419
- 13 Tumber R, Marks D L, Brady D J. Appl Opt, 2008, **47**: B32-B43
- 14 汤自义, 须耀辉, 王志坚. 反射棱镜. 北京: 国防工业出版社, 1981. 57-80
- 15 TANG Ziyi, XU Yaohui, WANG Zhijian. Reflecting prism. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 1981: 57-80
- 16 魏光辉. 矩阵光学. 北京: 兵器工业出版社, 1995. 248-253
- 17 WEI Guanghui. Matrix Optics. Beijing: Publishing House of Ordnance Industry, 1995: 248-253
- 18 Takacs P Z, Feng S K, Church E L, *et al.* Proc SPIE, 1989, **966**: 354-364
- 19 庄表中, 黄志强. 振动分析基础. 北京: 科学出版社, 1985. 90-93
- 20 ZHUANG Biaozhong, HUANG Zhiqiang. Elements of vibration analysis. Beijing: Science Press, 1985:90-93

Static stability of a long trace profiler against vibrations

SUN Hui LUO Hongxin XIAO Tiqiao XU Hongjie

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The effects of vibration on static stability of a long trace profiler (LTP) was studied in this paper. A model on optical principle of a new LTP was established, and the LTP's response to environmental vibration was analyzed. It was found that only vertical vibration causes errors of LTP measurement. By using a vibration generator with controllable frequency and intensity, vibration effects on the LTP static stability were checked through contrast experiments. The results indicate that only vertical vibration frequency in a certain range can affect the LTP static stability. This is consistent with the theoretical analysis.

Key words Long trace profiler (LTP), Vibration, Static stability

CLC O434.12