

# 激光干涉测长系统中导轨—床身系统的二维动刚度实验研究

刘继发 陆林海 程维明 陈明仪

(上海科学技术大学, 上海 201800)

**摘要** 实践表明, 激光干涉测长系统中的导轨—床身系统的动刚度对其测量精度有重大影响, 但由于缺乏可靠、高精度的测量方法而往往未能在设计中, 或使用中, 予以避免或补偿。本文提出了一种采用双路激光干涉仪测试方法, 成功地测量了三层结构的导轨—床身系统的二维动刚度。文中介绍了它的原理及装置, 并对最终的测量结果进行了讨论。

**关键词:** 动态刚度; 激光干涉仪; 导轨—床身系统

## 1 引言

激光干涉测长系统已广泛用于多种精密位移测量、控制和定位, 其标称精度为  $(0.1 \sim 0.5) \mu\text{m}$  量级。基于激光干涉仪的高分辨率 ( $0.01 \mu\text{m}$  量级) 和高的频率稳定性 ( $1 \times 10^{-7}$  量级), 这样的精度在理论上是可以达到的。然而必须考虑到整个干涉测量 (定位) 系统的多种误差因素的影响, 其中导轨—床身的动刚度的影响是不容忽略的<sup>[1]</sup>。尤其当系统在工作中具有大质量的运动, 更是不能掉以轻心。

图1所示三层结构的导轨—床身系统, 是国内外最常用的一种典型结构。通常认为其基座符合运动学原理, 具有最佳的动刚度。但实践表明, 这种结构在实用中并不是理想的, 其影响究竟有多大, 尚未有深入的研究。本文提出用二套激光干涉仪检测工作台运动时, 这种导轨—床身系统中基座 (平台) 的动刚度。文中介绍了测量原理、方法及测量结果, 并对该结构性能作了分析讨论。

## 2 测量原理

如图1所示。因为干涉仪的分光镜, 即测量的基点是安置在平台上的, 在工作台 (重量约  $140\text{kg}$  量级) 运动时, 基座不能产生任何变形。它沿  $x$  方向的移动 (由变形产生的在  $x$  方

收稿日期: 1992年11月5日; 收到修改稿日期: 1993年1月17日

注: 本工作是在上海市文教局重点学科, 专项经费支持下进行中, 在工作中曾得到吴永芳、沈建忠等老师的帮助

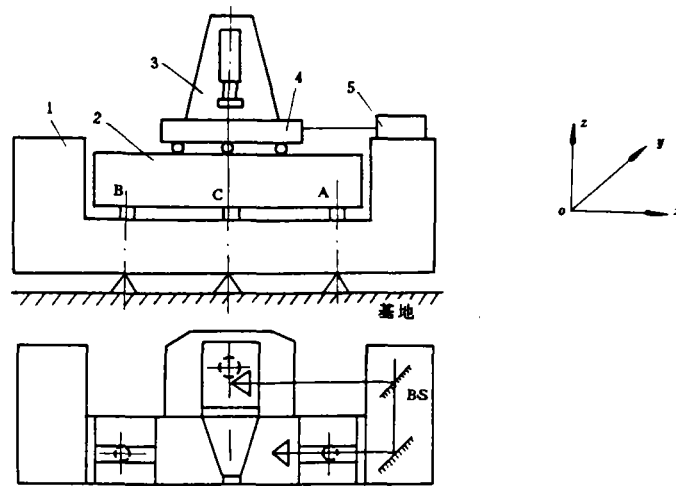


图1 三层结构精密导轨—床身系统示意图

1—基座；2—床身；3—立柱；4—工作台；5—干涉平台

向的分量)意味着测量原点的漂移,直接影响系统的测量精度。因此研究导轨—床身系统的动刚度,对提高激光干涉测长系统、定位系统的精度具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。由图1知,基座经由三点支承而完全消除了六个运动自由度,并且,当工作台运动,基座产生变形,引起平台有三种可能的变形,即绕 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 轴的扭曲。若仅从减少对干涉系统测量精度影响的角度出发,除绕 $x$ 轴的扭曲变形因不可能在 $x$ 方向产生平移分量外,其余的变形是不可忽视的。因此欲测量工作台运动导致的平台变形必须测出平台对应于平行 $xoy$ 面和 $xoz$ 面的变形运动。

虽然,测量动刚度的方法不少,如电阻应变片法、全息多重曝光术等<sup>[2][3]</sup>,但用于这类高精度大型结构均难以满足,因此采用二套干涉测长系统平行放置(图2及图3)。

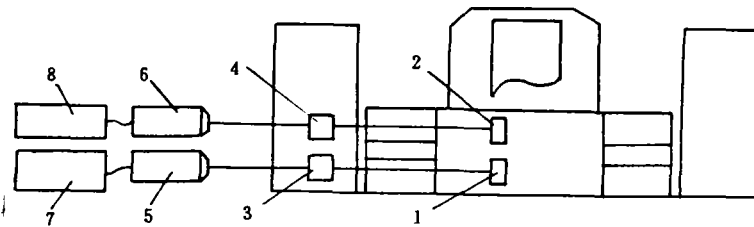


图2 二路干涉仪置于平行于工作台平面内(相距120mm)

1、2—可动棱镜；3、4—偏振分光镜与固定棱镜组件；5、6—双频激光器A与B；7、8—显示器A与B

图2的配置用于测量平台当工作台运动时在平行 $xoy$ 面内对 $z$ 轴的扭曲变形。二路干涉仪分光镜(连同参考镜)均安置在平台上,相距120mm,二靶镜紧固在工作台上。工作台运动,二路干涉仪测得的位移差值为 $\delta$ ,若 $\delta \neq 0$ ,则表明平台在平行 $xoy$ 面内有绕 $z$ 轴的弯曲变形(此时假定导轨直线性很好,其影响可忽略)。二路干涉仪记录了它在不同的 $y$ 座标上沿 $x$ 方向上产生的不同的位移分量。

为测出工作台运动时平行 $xoy$ 面内的弯曲变形,可将二路干涉仪铅垂地安置于平台上如图3所示,二者相距90mm。同理若 $\delta \neq 0$ 则表明平台有绕 $y$ 轴的弯曲变形。二干涉仪记录了由此变形产生的在不同高度处 $x$ 方向上的不同位移分量。

由此可见,利用本方法可以测量对干涉系统的位移测量精度产生直接影响的导轨—床身系统的二维动刚度特性。

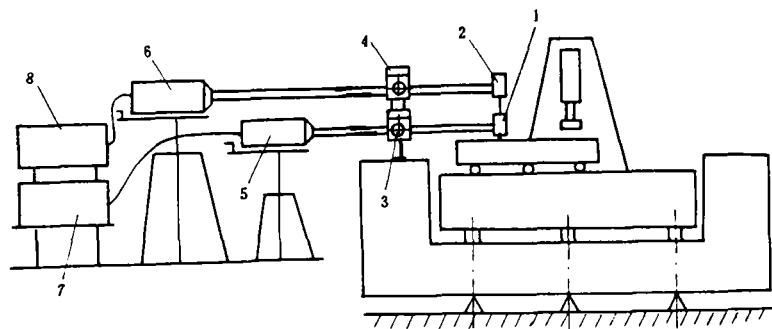


图3 二路干涉仪置于垂直于工作台平面内（相距90mm）

1、2—可动棱镜；3、4—偏振分光镜与固定棱镜组件；5、6—双频激光器A与B；7、8—显示器A与B

### 3 测量装置及结果

测试对象为图1所示三层结构的导轨—床身系统，工作台重约140kg，最大工作行程1100mm，导轨为平—V精密滚柱导轨，全长内直线性优于1 $\mu$ m。本试验采用二台双频激光干涉仪，一台是美国的HP-5528A，一台是成都工具研究所的TF-5。其布置见图2和图3，分辨率均置于0.1 $\mu$ m，工作台每移动50mm采样一次。测量结果见图4和图5。图中曲线均为三次测量结果的平均值，横坐标为工作台的行程，单位为mm，纵坐标为二干涉仪的读数差 $\delta$ ，单位为 $\mu$ m。

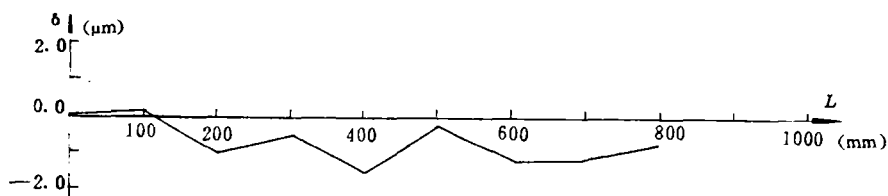


图4 二路干涉仪置于平行于工作台(xoy)平面内测量结果

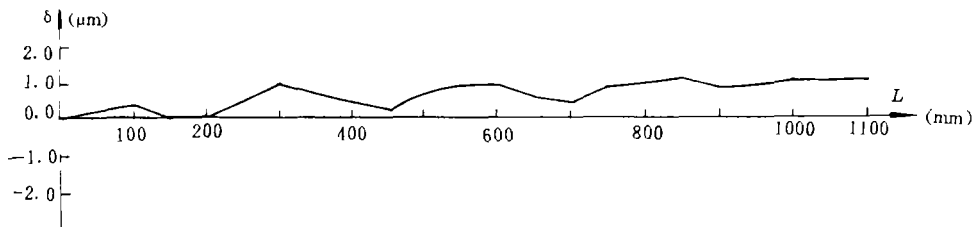


图5 二路干涉仪置于垂直于工作台(xoz)平面内测量结果

若认为平台本身有足够的刚度，基座变形仅使其产生绕x、y轴的摆动变形则其最大摆角

$$\alpha_{z\max} = \frac{\delta_{x/y}}{120} = \frac{1.7 \times 10^{-3}}{120} = 2.82''$$

$$\alpha_{y\max} = \frac{\delta_{x/z}}{90} = \frac{1.2 \times 10^{-3}}{90} = 2.67''$$

比较二曲线可知，平台的摆动变形具有某种周期性的起伏。原因何在？为此又按图 6 布置直接测量了当工作台运动时，安装在基座两端的平台之间沿  $x$  向的相对移动。

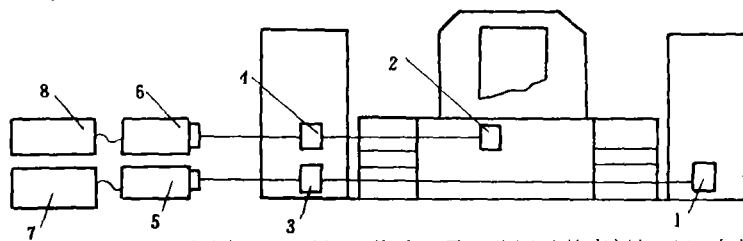


图 6 一路干涉仪记录工作台移动、另一路记录基座间相对位移布置图

1—置于平台上的棱镜；2—可动棱镜；3、4—偏振分光镜与固定棱镜组件；  
5、6—双频激光器 A 与 B；7、8—显示器 A 与 B

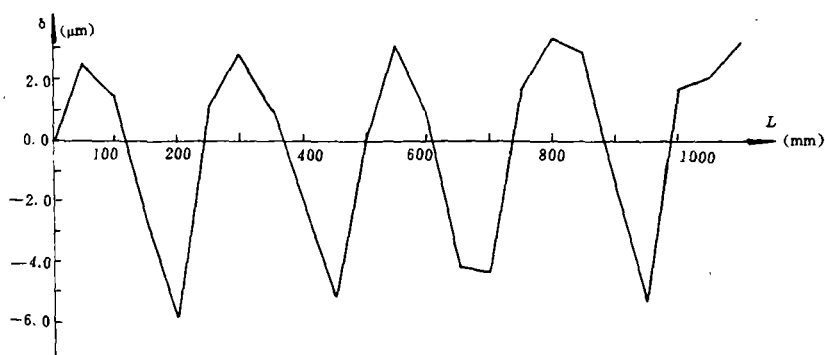


图 7 基座二平台间相对位移曲线

由图 7 的曲线知，两平台间的相对移动本身具有明显的周期性且与图 4、5 曲线的周期相吻合。这表明，工作台的运动使基座产生周期的三维的扭曲变形，由此造成了干涉仪的测量的基点的周期性的漂移。

## 4 结 论

1. 这种三层结构形式的导轨—床身系统中，基座的实际动刚度性能远不如理论分析的那样符合运动学的原理，而是较差（平台间相对位移量可达  $7\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$ ）。欲使实际动刚度性能达到理想状态，那么必须在设计、制造和装配中严格地使基座上二组三个支承点的连线、 $AA'$ 、 $BB'$  和  $CC'$  均垂直于支承面（见图 8）。否则工作台运动引起的质量转移必导致附加扭矩的变化，而引起基座本身的变形。

2. 在许多采用三层结构的干涉测长（定位）系统中，均把参考镜置于立柱上（见图 1），并由此认为可由此而消除基座变形的影响。本试验的结果表明，这种布置不能消除平台在  $xoy$  面内摆动所产生的影响，当然它能消除平面仅在  $xoy$  面内有绕  $y$  轴的摆动变形时产生的  $x$  分量的影响。此时干涉系统中的分光镜漂移引起的光程变化对测量臂和参考臂是等程的。

3. 本试验完全可用单频激光干涉仪代替。

总之，本研究提出的用于测量激光测长（定位）系统导轨—床身系统二维动刚度的方法简单、可靠、精度高、能直接估算其对测量精度的影响，且可适用于各种结构形式导轨—床身系统。

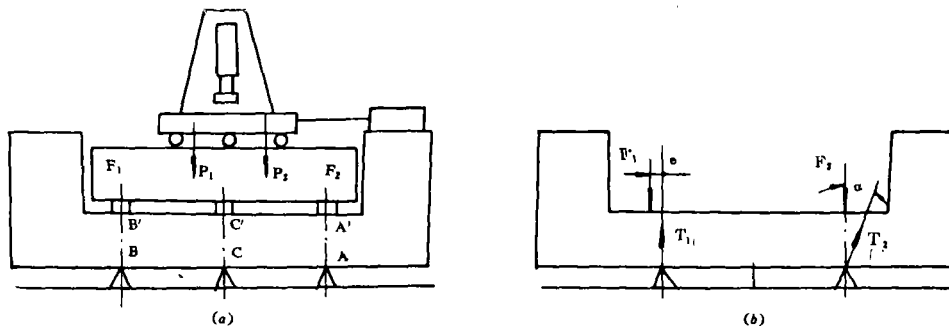


图8 三层结构导轨—床身系统受力分析

### 参 考 文 献

- [1] 陈明仪, 干涉测长系统设计中的若干问题, 光学仪器, 第四卷第一期, (1983), 13
- [2] N. Abramson, Sandwich hologram interferometry 4: Holographic studies of two milling machine, Appl. Opt., Vol. 16, No. 9, 2521 (1977)
- [3] H. Bjelkhagen, Sandwich holography for compensation of rigid body motion and reposition of large objects, Proc. SPIE, Vol. 215, 85 (1980)

## Experimental Study on the Dynamic Stiffness Feature of a Slideway—Bed of an Interferometric Length Measurement System

Liu Jifa, Lu Linhai, Cheng Weiming and Chen Mingyi

(Shanghai University of Science & Technology)

### Abstract

As well known, the dynamic stiffness of the slideway—bed of a laser interferometric length measurement system will effect on its measurement accuracy severely. However so far, it is not easy to estimate the degree of its effects in advance, or to give certain compensation just due to the lack of some proper methods to test. In this paper, we introduced a simple but very effective method of using two laser interferometers by which we tested the 2-D dynamic stiffness of the three-layer type of slideway-bed of a laser interferometric length measurement system. The principle of that method and the experimental arrangements are described, and the results and comments are discussed.

Key words: Dynamic stiffness, Laser interferometer, Slideway—bed