

高等学校教材

金属切削机床实验

(第2版)

天津大学 朱梦周 张德泉 主编

机械工业出版社



根据全国高等工业学校机械制造工艺与设备专业教学指导委员会意见,特对原版《金属切削机床实验指导书》进行了修订,并改名为《金属切削机床实验》。该书包括机床几何精度检验、机床传动系统空载功率测定、机床动态性能实验、机床噪声评价和频谱分析、机床模态分析技术等12个实验和两个现场教学。每个实验介绍了本实验的目的、实验内容、实验原理、实验方法、实验数据的处理、思考题和实验报告格式等。

本书主要作为高等学校、电视大学、职工大学机械制造工艺与设备专业的教学用书,也可供从事有关专业的科研院所和机床工业的工程技术人员参考。

金属切削机床实验

(第2版)

天津大学 朱梦周 张德泉 主编

*

责任编辑:王世刚 钱飒飒 责任校对:张 佳

封面设计:郭景云 版式设计:冉晓华

责任印制:卢子祥

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 7·字数 165 千字

1986年12月重庆第1版

1997年10月第2版第8次印刷

印数 32 201—34 200·定价:9.00元

*

ISBN 7-111-03714-6

ISBN 7-111-03714-6/TG·815(课)



第 2 版 前 言

根据全国高等工业学校机械制造工艺与设备专业教学指导委员会1991年昆明会议的意见,考虑到这本实验指导书已经使用六年之久,印刷六次。其间,机床行业和各兄弟院校的实验工作和设备等已有较大的发展,本书需要在原来的基础上有所调整和改进。在修订过程中,编者力求既能符合本专业的基本要求,又能为读者提示在自己设备情况下的灵活性和进一步提高的可能性。实验内容有一些增减,不常使用的设备和方法有些更新。原书实验十二,机床零件模型动特性实验和实验十三,激光全息测振实验,都是对模型激振,测量振型的实验。前者与实验四相似,后者仪器设备较难获得,不易实现。再版时,根据目前已逐渐普及的模态分析技术做了修改,取代上述两实验,改为实验十二,机床模态分析技术,用现有仪器和计算机软硬件进行实验。此外,一些实验已经或正在制成录相带,可陆续提供需要的单位。

此书由天津大学朱梦周、张德泉主编、西安交通大学陶钟教授审阅。参加编写的有天津大学的邓达茂(实验一)、李印玺(实验二、十)、张德泉(实验三、六)、刘宝善(实验四)、高绮(实验五、十一)、李学熙(实验七、现场教学二)、王太勇(实验八)、汤和(实验九、现场教学一)、宋健伟和朱梦周(实验十二)。

在第2版编写过程中,继续得到了兄弟院校、研究所和工厂的热情支持和帮助,编者再一次表示衷心感谢。由于编者水平有限,有考虑不周和错误之处,还望读者批评指正。

作者

1992年4月

目 录

实验一	机床几何精度检验	1
实验二	机床静刚度实验	10
实验三	机床传动系统空载功率测定	15
实验四	机床动态性能实验	23
实验五	滚齿机的调整	30
实验六	机床噪声评价和频谱分析	38
实验七	机床温度场和热变形的测定	49
实验八	机床低速运动平稳性实验	57
实验九	机床主轴回转精度实验	67
实验十	机床传动精度实验	75
实验十一	机床定位精度实验	84
实验十二	机床模态分析技术	92
现场教学一	卧式车床结构剖析	99
现场教学二	单轴自动车床结构剖析	104
参考文献		106

实验一 机床几何精度检验

一、实验目的

1. 了解机床几何精度检验的内容、原理、方法和步骤。
2. 掌握机床几何精度检验中常用仪器的使用方法。
3. 实验中测试数据的处理及误差曲线的绘制。
4. 了解被测机床的几何精度状况和它对加工精度的关系。

二、实验内容

1. 主轴锥孔中心线的径向跳动检验。
2. 主轴的轴向窜动检验。
3. 导轨直线度的检验。
(1) 用水平仪检验导轨在垂直面内的直线度。
(2) 用自准直测微平行光管检验导轨在垂直面内的直线度和在水平面内的直线度。

三、实验原理

按GB 4020—83卧式车床的标准规定, 车床精度检验应包括车床导轨直线度、平行度、车端面的平面度、主轴回转精度等18项。其它种类机床还有部件之间的垂直度、平行度、同轴度、部件的运动精度等。本实验仅检验车床导轨直线度及主轴径向跳动和轴向窜动。根据GB 4020—83标准中规定如表1-1所示。

表1-1 卧式车床精度(摘录)

序号	项 目 名 称	允 差
1	主轴锥孔中心线的径向跳动	400mm的车床在主轴前端a点为0.01mm, 距a点300mm的b点为0.02mm
2	主轴轴向窜动	轴向窜动允差为0.01mm
3	溜板移动在垂直面内的直线度	溜板每1000mm行程上为0.02mm
4	溜板移动在水平面内的直线度	溜板每1000mm行程上为0.015mm

四、实验用设备和仪器

本实验需要精度较好, 床身長1m以上的车床一台、水平仪、自准直测微平行光管、标准检验棒、千分表和磁性表架等。

1. 水平仪的结构及工作原理 水平仪有条形、框形、合象等几种。水平仪主要由水准器和基座(或框架)组成。水准器是一个弧形闭封式玻璃管,管内壁被磨成100m左右曲率半径的弧面。管内装有对内壁附着力较小的酒精或乙醚之类液体,中间留有一气泡,将两端封固,玻璃管上刻有与曲率半径相对应的间距刻度线。水平仪不论放在什么位置上,管内液面始终保持水平,气泡总是向高处移动。由气泡两端边缘移动的格数,就可以求出水平仪两端点相应的升差或落差。

水平仪的刻度值有0.02/1000~0.05/1000,0.02/1000它表示将该水平仪放在1m长的平尺表面上,将平尺一端垫起0.02mm高时,平尺便倾斜一个 α 角,此时水平仪的气泡便向高处正好移动一个刻度值(即移动了一格)。水平仪连同平尺的倾斜角 α 有图1-1所示中的关系。

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \alpha &= \frac{\Delta H}{L} = \frac{0.02}{1000} \\ &= 0.00002\end{aligned}$$

所以

$$\alpha = 4''$$

但水平仪一般都放在溜板(或过桥)上进行检测工作,溜板(或过桥)的长度不一定是1m长,本实验由于床身长度限制,采用长度为250mm的过桥。

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta H_1}{L_1} = \frac{\Delta H_1}{250}$$

$$\Delta H_1 = 250 \times \operatorname{tg} \alpha = 250 \times 0.00002 \text{ mm} = 0.005 \text{ mm}$$

可见水平仪右边的升(落)差 ΔH_1 与所用过桥长度有关。此外在实际使用中水平仪也不一定准是移动一格,例如移动了两格,过桥长度仍为250mm,则其升(落)差 ΔH_1 为

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \alpha_1 &= \frac{0.02}{1000} \times 2 \text{ mm} = \frac{\Delta H_1}{250} \\ \Delta H_1 &= \frac{250 \times 0.02 \times 2}{1000} \text{ mm} = 0.01 \text{ mm}\end{aligned}$$

因此,计算升(落)差的通式

$$\Delta H_1 = LKn \quad (1-1)$$

式中 L ——过桥长度(mm);

K ——水平仪的刻度值;

n ——水平仪的读数值(格数)。

水平仪读数的符号,习惯上规定:气泡移动的方向和水平仪移动的方向相同时,读数为正值,反之为负值。

2. 自准直测微平行光管的结构及工作原理 自准直测微平行光管又称自准直仪,简称平行光管,是一种高精度的测量仪器。它具有使用范围广、测量精度高、受温度影响小,以及使用方便等优点。最适合测量机床导轨在水平面内或垂直面内的直线度。

该仪器包括仪器本体和它的附件反光镜两部分。仪器本体由物镜、测微目镜、直角棱镜组、十字分划板、角度分划板和光源等组成。它的光路原理如图1-2所示

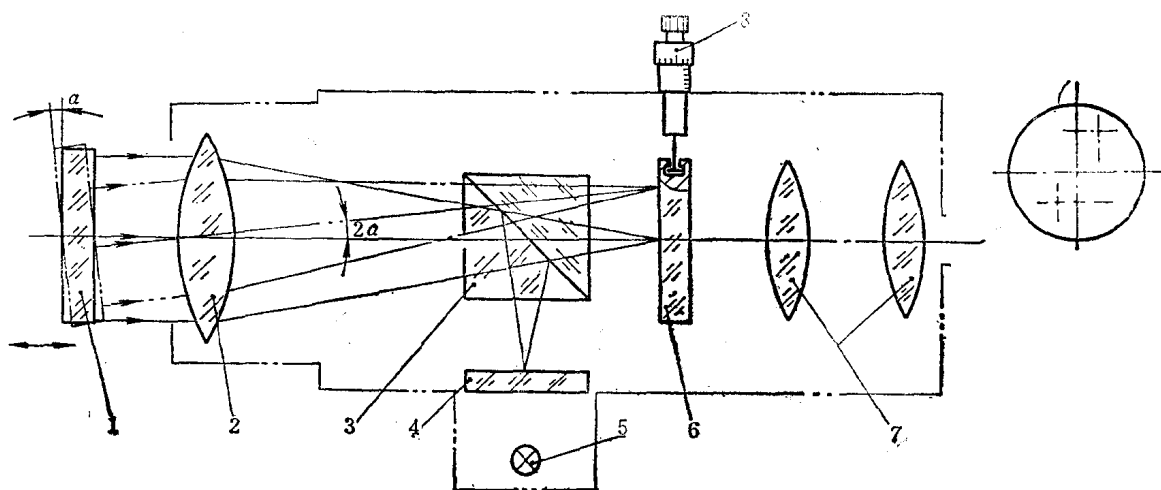


图1-2 自准直平行光管光路图

1—反射镜 2—物镜 3—直角棱镜组 4—十字分划板 5—光源 6—角度分划板 7—目镜 8—读数鼓轮

由光源发出的光线，照亮了经过滤光的绿色分划板。此板刻有十字划线，光线经过线缝，到达镀有折光膜棱镜组的斜面。由于十字分划板和角度分划板分别处在物镜的焦面上，光线经过反射和透射后，一路到达角度分划板，形成深绿色基准十字线像（在目镜视场可观察到）；而另一路反射的光线经过物镜，即以平行光束射出。如果平面反射镜与光轴垂直，则反射的光线与物镜射出的平行光线重合，到达角度分划板形成第二个十字线像。这线像条较粗且呈现浅绿色，它与前述的基准十字线像重合。当反射镜与过桥在导轨面上移动任何一段距离，由于导轨有起伏，在各测点上反射镜与光轴有倾斜。此时，反射回的光线通过物镜到达角度分划板，成像的位置将发生改变，它与基准十字线像不重合，出现相对位差。这种由导轨的直线度而产生的位移量，即表现该测点导轨的倾斜角 α 值，它可通过旋拧读数鼓轮的测微螺钉去移动刻在角度分划板上的黑色十字线像测得。在目镜视场显现的三种十字线像（细、深绿色，粗、浅绿色和黑色），如图1-3所示。

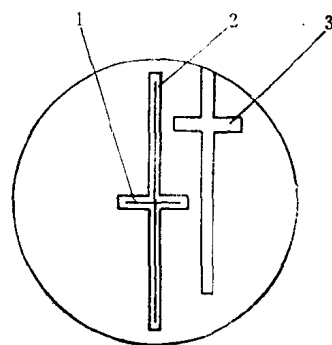


图1-3 十字线像

1—测量十字线像（细、黑色）
2—基准十字线像（细、深绿色）
3—被测十字线像（粗、浅绿色）

读数时转动读数鼓轮，使角度分划板的黑色十字线像的水平线对准基准十字线像的水平线，从固定套管上读出分值、从刻度套管上读出秒值，记为 α_0 。继续转动读数鼓轮，使角度分划板的水平线对准由反射镜反射产生的第二个十字线像的水平线，读出角度值，记为 α_1 。以后每移动一次过桥，只需对准反射镜反射回的十字线像的水平线，读出相对的角度值 α_i 。

以上是检验导轨在垂直面内的直线度，当进行检验导轨在水平面内的直线度时，只将目镜转过 90° 后即可进行测试工作。

五、实验步骤、方法和注意事项

1. 用检验棒和千分表检验主轴锥孔中心线的径向跳动 在机床主轴中心孔中, 紧密地插入一根测距为300mm的标准检验棒。千分表用磁性表架固定在机床床身上、表的测头顶在靠近主轴锥孔端面的检验棒圆柱部上母线, 低速旋转主轴, 从表的指针读出其径向跳动最大值, 此处测点由于最接近锥孔端面, 此点可认为是主轴锥孔中心线偏离主轴回转中心线的误差方向点。用粉笔在主轴端面画一记号“M”, 作为基准点, 如图1-4所示。

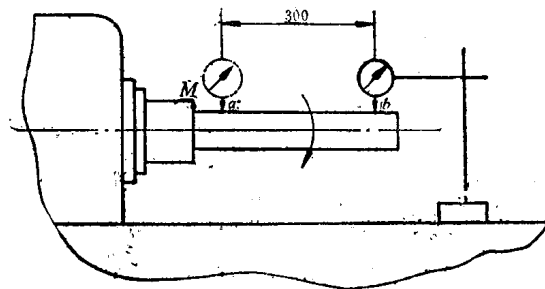


图1-4 测量主轴锥孔中心线的径向跳动

在进行检测工作中, 为了消除检验棒同轴误差, 当检验棒紧密插入锥孔过程中, 要求锥孔轴线与主轴旋转轴线误差方向和检验棒同轴误差方向的一致, 则需将检验棒接近锥孔处, 以“0°”、“90°”、“180°”、“270°”度顺序等分, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为其等分点(当然, 若能按360个等分点更佳), 将这些划分点依次分别对准“M”点装配, 一共进行四次装配检测工作。分别从千分表表针的跳动中, 读得 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 点以及远离这些点300mm处相同母线上的 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 点的径向跳动最大值, 分别记入实验报告表1-2中。在进行数据处理时, 每对称点(即 a_1 对 a_3 、 a_2 对 a_4 ; b_1 对 b_3 、 b_2 对 b_4), 最大径向跳动量的算术平均值, 即是已经消除了标准检验棒的同轴误差后主轴在该处(a 和 b 处)的最大径向跳动量。

2. 用检验棒和千分表检验主轴的轴向窜动 在机床主轴锥孔中紧密插入一根标准检验棒(长约200mm), 检验棒外端中心孔处用黄油粘一 $\phi 5$ mm的小钢球, 千分表架固定在机床床身上, 表头测杆水平放置, 表的平面测头沿检验棒中心线紧靠钢球表面, 如图1-5所示。预压表的长针半圈, 调长针于“0”点处。低速旋转主轴, 千分表的最大读数差值就是机床主轴的轴向窜动量。将值记入实验报告表1-2中。

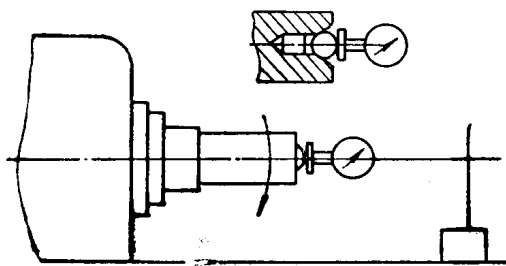


图1-5 测量主轴的轴向窜动

3. 用水平仪测量机床导轨在垂直面内的直线度 卸下机床尾座, 以250mm长等分机床导轨成若干段, 将过桥放置在导轨的尾端, 作为检验工作的起点。把水平仪放置在过桥的纵向调整板上, 如图1-6所示。通过调整过桥纵板的调整螺丝, 使水平仪气泡置中, 定为检验工作的零位起点, 然后按导轨分段, 依次放置过桥, 记下每一位置的检验数值及其正反符号, 填入实验报告表1-3中, 应用表中数据作实验报告图1-8的误差曲线图。使用水平仪时要注意温度对气泡位置的影响, 防止面对气泡呼吸。

4. 用平行光管测量导轨在垂直面内的直线度 将平行光管放在专用支架上, 反射镜放在过桥上, 如图1-7所示。调整支架高度及反光镜左右的位置, 利用平行光管支座上的三个微调螺钉, 进行反复调试, 要求反光镜及平行光管的光轴大约一致, 求得目镜视场中能看到反射的十字线像(线像较粗, 呈浅绿色), 它接近基准十字线像(线像较细, 呈深绿色)。手拧鼓轮旋

钮，使角度分划板的十字线像（线像细，呈黑色）的水平线与基准十字线像的水平线重合，读出 α_0 。并在各测量段分别读出 α_1 、 α_2 …。将数据记在实验报告表1-4中。应用表中数据作实验报告图1-9的误差曲线。

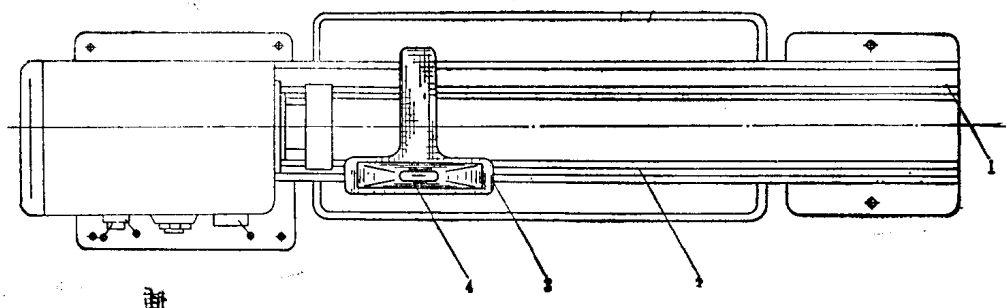


图1-6 用水平仪测量导轨垂直面内的直线度

1—后导轨 2—前导轨 3—过桥 4—水平仪

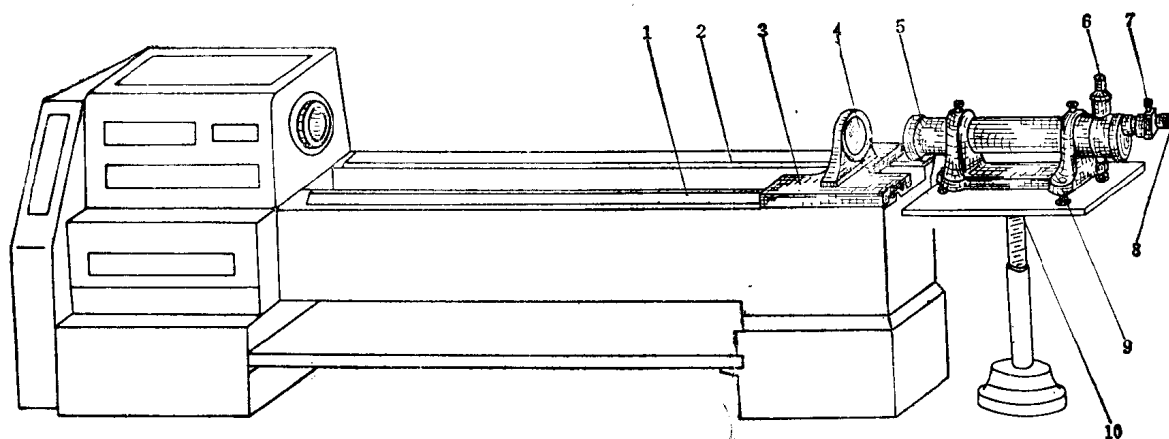


图1-7 用平行光管测量导轨垂直面内的直线度

1—前导轨 2—后导轨 3—过桥 4—反光镜 5—物镜 6—光源 7—读数鼓轮 8—目镜 9—可调螺钉 10—支架

5. 用平行光管测量机床导轨在水平面内的直线度 将目镜转过 90° ，再按上述方法进行测量，把数据填入实验报告表1-5中，作图1-10误差曲线。

注意禁止用手接触仪器的任何镜面，要保持镜面的清洁。

六、实验数据的处理

1. 各段升落差的计算 本实验使用的过桥长度为250mm。根据式(1-1)，应用测量数据计算各测量段的升、落差。

2. 确定直线度误差值 以每测量段端点的位置为横坐标；将升、落差逐段累加，用每段的累积高度为纵坐标，连接各点的曲线即为误差曲线，其误差值的取法，一般常用两端点联线法。曲线上各点到各端点连线的最大坐标距离（即取联线两侧最大坐标绝对值之和），即为该点的直线度误差。

3. 用平行光管检测时数据处理的方法 在检测机床导轨直线度工作中，使用水平仪和使用平行光管，数据的处理方法是相同的，只是一般平行光管的说明书，都按反射镜底边长

给出系数。例如：JZC型自准直测微平行光管给出的系数为0.000528mm，它表示反射镜底边长为110mm。本实验在检测工作中，是将反射镜底座放在250mm的过桥上，经换算后的系数为0.0012mm。因此，当过桥移动 L_i 时，由读出的 $\alpha_0, \alpha_i, \dots$ 可求出导轨各段的升差或落差 ΔH_i 。

$$\Delta H_i = (\alpha_0 - \alpha_i) 0.0012$$

其它如每段相邻两点高度差的计算，各点累积高度差的计算，误差曲线的绘制，各点直线度误差的取法都与用水平仪时相同。

七、思考题

1. 检验主轴锥孔中心线的径向跳动时，为什么将检验棒旋转 180° 后插入主轴锥孔，进行第二次检测，这样就可以消除检验棒锥面中心线与柱面中心线不在同一直线上的误差？
2. 所检测的机床导轨直线度实际形状如何？对加工精度有何影响？

八、实验报告

实验名称：机床几何精度检验

班级 姓名 实验日期

1. 实验记录表

表1-2 用千分表检验主轴锥孔中心线径向跳动和轴向窜动数据 (mm)

验棒相对主轴锥孔“M”记号	对“M”记号0°方位时 $a_1 =$	对“M”记号90°方位时 $a_2 =$	对“M”记号0°方位时 $b_1 =$	对“M”记号90°方位时 $b_2 =$
所处方位，主轴径向跳动值	对“M”记号180°方位时 $a_3 =$	对“M”记号270°方位时 $a_4 =$	对“M”记号180°方位时 $b_3 =$	对“M”记号270°方位时 $b_4 =$
测点对称方位(相对180°) 主轴径向跳动平均值	$\frac{a_1 + a_3}{2} =$	$\frac{a_2 + a_4}{2} =$	$\frac{b_1 + b_3}{2} =$	$\frac{b_2 + b_4}{2} =$
取平均值的最大值作为评 价值				
主轴轴向窜动值				

表1-3 用水平仪检验导轨在垂直面内的直线度数据

水平仪放置位置 (mm)	水平仪读数的平均值 n_i (格)	L_i 段的升差或落差 ΔH (mm)	累积的升差或落差 $\sum_{i=1}^k \Delta H_i$ (mm)
0~250			
250~500			
500~750			
750~1000			
1000~1250			
1250~1500			

表1-4 用平行光管检验导轨在垂直面内的直线度数据

反射镜放置位置 (mm)	平行光管的平均读数 a_i	L_i 段的升差或落差 ΔH_i (mm)	累积的升差或落差 $\sum_{i=1}^k \Delta H_i$ (mm)
0~250			
250~500			
500~750			
750~1000			
1000~1250			
1250~1500			

表1-5 用平行光管检验导轨在水平面内的直线度数据

反射镜放置位置 (mm)	平行光管的平均读数 a_i	L_i 段的升差或落差 ΔH_i (mm)	累积的升差或落差 $\sum_{i=1}^k \Delta H_i$ (mm)
0~250			
250~500			
500~750			
750~1000			
1000~1250			
1250~1500			

2. 实验曲线

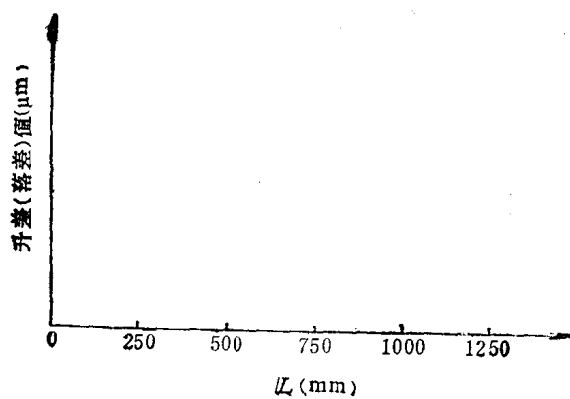


图1-8 用水平仪检验导轨在垂直面内的直线度误差曲线

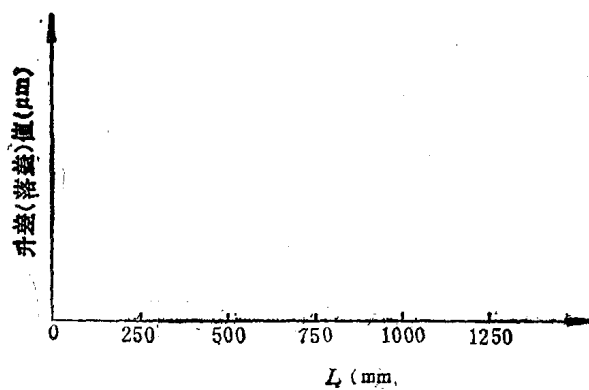


图1-9 用平行光管检验导轨在垂直面内的直线度误差曲线

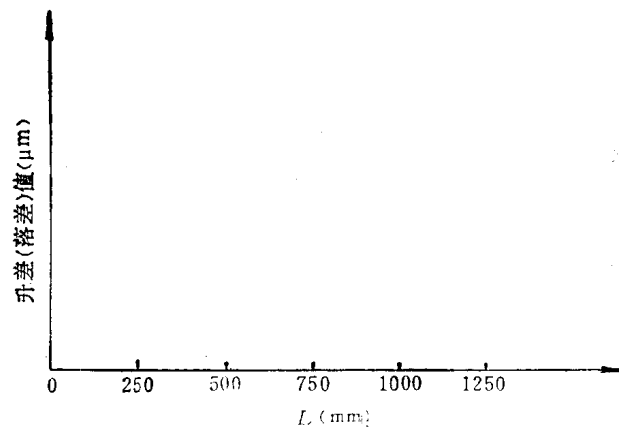


图1-10 用平行光管检验导轨在水平面内的直线度误差曲线

3. 实验结果分析

实验二 机床静刚度实验

一、实验目的

1. 通过对车床静刚度的测定, 学习机床静刚度的基本测量方法。
2. 加深理解机床静刚度的基本概念。
3. 学习根据实验数据计算机床静刚度的方法。

二、实验内容

1. 测量车床静刚度。
2. 根据实验数据计算车床的静刚度。

三、实验原理

车床静刚度的基本测定方法是在车床静止状态下, 模拟车削刚度很大的工件时, 测量车床静刚度的方法。实验时用三向加载静刚度仪均匀地对车床施加合力 F (由特定的安装角度再取出径向分力 F_r), 分别用百分表测出已知载荷下床头、尾座和刀架的变形 y_T 、 y_W 和 y_D 。由已知载荷 F_r 和各载荷下相应的变形, 建立各部件的静刚度曲线, 再通过计算求出车床各部件的平均静刚度 K_{ST} 、 K_{SW} 、 K_{SD} 和系统的平均静刚度 K_S 。为了对车床静刚度的变化规律有一个较为完整的认识, 实验至少要做2~3次加载及卸载的完整过程。

四、实验设备和仪器

实验用的基本设备和仪器:

1. 卧式车床一台。
2. 车床三向加载静刚度仪一套。
3. 百分表四只, 磁力表架三套。
4. 顶尖两个, 双向拨盘一个。

实验常用的车床三向加载静刚度仪有两种结构形式:

1. U形弹簧式车床三向加载静刚度仪 U形弹簧式车床三向加载静刚度仪结构如图2-1所示。主要由刚度很大的支架、加力装置和测力装置三部分组成。实验时, 用双向拨盘将支架稳固地安装在前后顶尖之间, 把模拟车刀夹在刀架上, 使加力点在支架长度的1/2处。拧动螺钉3, 通过U形弹簧5, 经推杆6及滚珠将载荷 F 施加在车刀上。反作用力通过支架1及前后顶尖传给床头和尾座。载荷 F 的大小由百分表2指示, 百分表的示值为U形弹簧5的

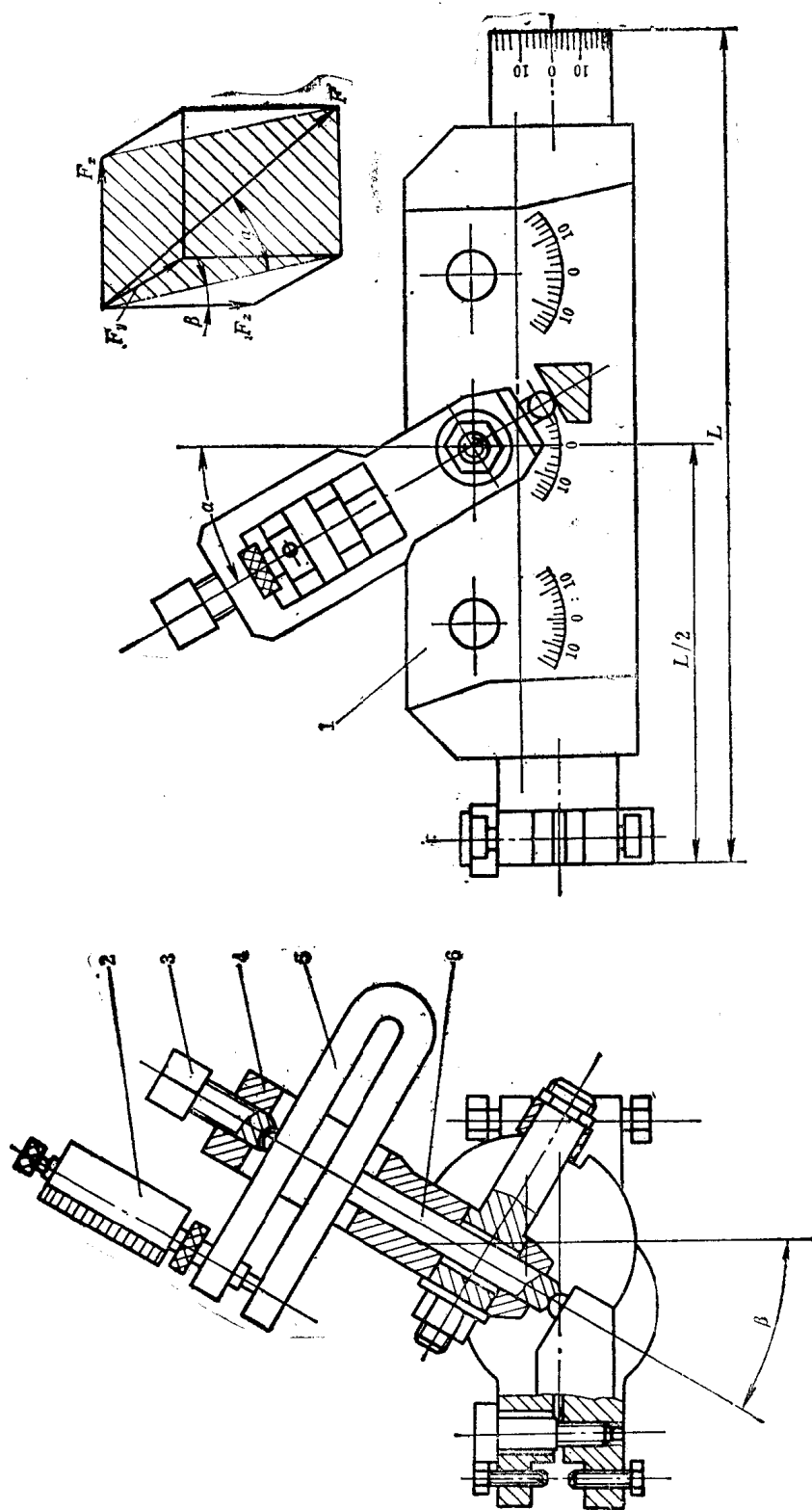


图2-1 车床三向加载静刚度仪
1—支架 2—百分表 3—螺钉 4—动杆 5—弹簧 6—推杆

变形。U形弹簧在实验前需经严格标定。因此,可以根据实验时U形弹簧的变形,由标定曲线查得相应的力(U形弹簧的标定曲线作为其特有性能参数在标准材料实验机上定标并由指导教师给出)。调整图2-1中 α 和 β 角的角度,就可以得到所需要的 F_x 、 F_y 和 F_z 力。

$$F_x = F \cos \alpha \cos \beta \quad (2-1)$$

$$F_y = F \cos \alpha \sin \beta \quad (2-2)$$

$$F_z = F \sin \alpha \quad (2-3)$$

由切削原理知:切削时通常 $F_y/F_x=0.3\sim0.5$; $F_z/F_x=0.15\sim0.3$ 。本实验取 $F_y/F_x=0.4$; $F_z/F_x=0.25$ 。这时 $\alpha=13^\circ$; $\beta=22^\circ$ 。

床头、尾座和刀架在不同载荷下的变形 y_T 、 y_W 和 y_D 分别由图2-2所示的百分表T、Z和W测出。

2. 测力环式三向加载静刚度仪 测力环式三向加载静刚度仪如图2-3所示。它由刚度很大的弓形加载支架,加载螺杆,环形测力计,模拟车刀,定位卡箍等组成。实验时,用定位卡箍将弓形加载支架稳固地安装在前后顶尖之间,把模拟车刀夹在刀架上,使加力点在支架长度的1/2处。

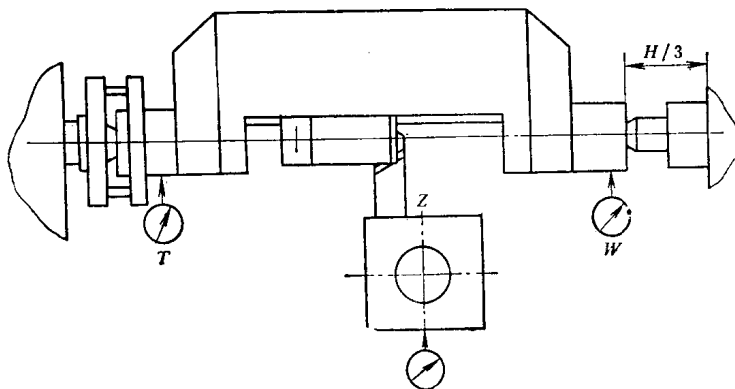


图2-2 测变形百分表位置图

拧动加载螺杆,通过环形测力计及滚珠将载荷施加在模拟车刀上。反作用力通过支架传给床头和尾座。载荷 F 的大小由测力环变形(测力环上百分表指示)查测力环标定曲线得到(作为产品性能指标由测力环说明书给出)。调整图2-3中 α 和 β 角的角度,就可以得到所需要的 F_x 、 F_y 和 F_z 力。床头、尾座、刀架以及其它部位的变形可通过相应安装的百分表或测微仪传感器测出。

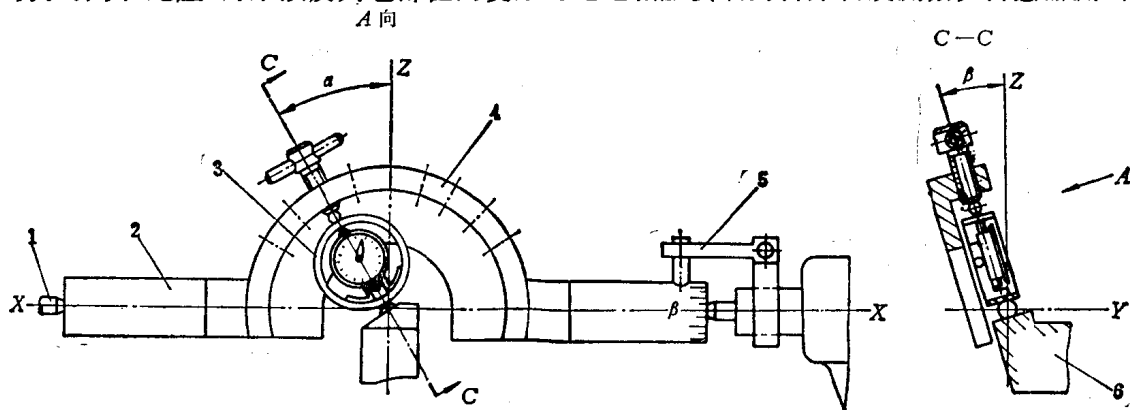


图2-3 车床三向刚度测定加载装置

1—前顶尖 2—接长套筒 3—测力环 4—弓形加载器 5—定位卡箍 6—模拟车刀

五、实验步骤、方法和注意事项

本实验用U形三向加载静刚度仪。实验步骤:按图2-1装好刚度仪,调整好 $\alpha=13^\circ$; $\beta=$

22°将百分表按图2-2装好。

实验时，百分表读数从“0”开始，拧动图2-1中螺钉3均匀地对车床施加静载荷。加载时观察并记录百分表2的读数。为防止U形弹簧因塑性变形而丧失性能，百分表的最大读数应加以控制（由指导教师给定）。加载完毕，再均匀卸载至“0”。记录每次加载、卸载后百分表2和图2-2中百分表T、Z、W的读数。重复上述加载、卸载循环（至少做2~3次）。

六、实验数据处理

由于加力点在支架的1/2处，床头和尾座处的Y方向作用力均为 $F_y/2$ ，床头的静刚度为 $K_{st}=F_y/2y_t$ ；尾座的静刚度 $K_{sw}=F_y/2y_w$ ；刀架的静刚度 $K_{sd}=F_y/y_d$ ，计算出在不同载荷作用下的 K_{st} 、 K_{sw} 、 K_{sd} ，再计算出它们的平均静刚度 $\bar{K}_{st}$ 、 $\bar{K}_{sw}$ 、 $\bar{K}_{sd}$ 。在距床头的距离为X的任一截面处车床系统的静柔度 C_{sx} （系统静刚度的倒数）为

$$C_{sx}=1/K_{sx} \quad (2-4)$$

$$C_{sx}=(X/L)/K_{sw}^2+(1-X/L)^2/K_{st}+1/K_{sd} \quad (2-5)$$

式中 L ——刚度仪支架长度。

七、思考题

1. 加载和卸载静刚度曲线是否重合？为什么？
2. 根据实测 K_s 值估计切削 $\phi 80\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 的工件的轴截面形状。