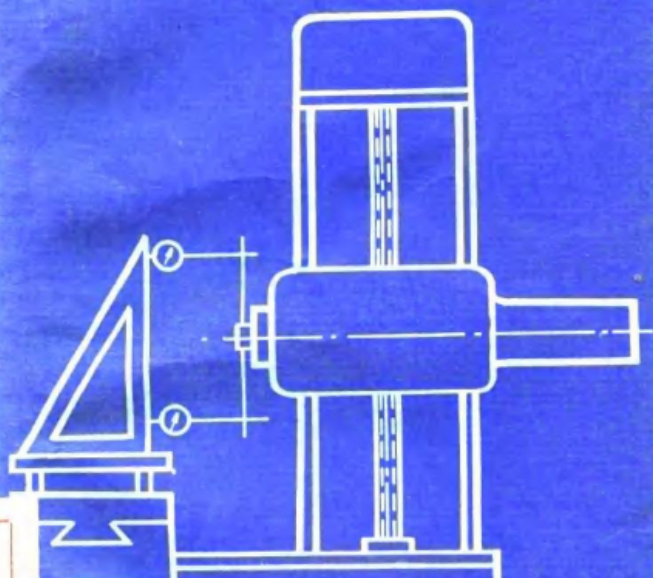


机床试验的 原理和方法



天津大学 张策 高斯脱等 编

机械工业出版社

前 言

随着科学技术和国民经济的发展,对金属切削机床的质量提出了愈来愈高的要求,所以,近年来对机床试验研究的项目和内容日趋广泛和深入,试验研究的方法和手段也日益完善,要求更为严格。为此,开展有关机床试验原理和试验方法的探讨,是保证和提高机床质量的重要措施,也是设计与制造机床的必要环节。

本书着重阐述了机床精度、刚度、抗振性、噪声、爬行、切削力、切削功率与效率、温升与热变形、模型试验等方面的基础理论和试验方法,并针对各项试验,扼要介绍了有关测试仪器的工作原理及其应用,以及数据处理的基本知识。

本书可供从事机床设计、制造、维修和试验研究的技术人员参考,也可作为高等学校机械制造专业以及机械类其它专业高年级学生和研究生的选修教材及参考书。

本书由天津大学机械系张策、高斯脱、朱梦周、陈家骥、汪元辉、于恩远、杜君文、张德泉同志编写,并由张策、高斯脱同志对全书进行了修改和整理。在编写过程中,承蒙清华大学精仪系易锡麟、魏从武、李民范以及韩玉俊、金之垣、杨润林、刘汉塘、徐占娣、张玉峰、蔡复之、周汉安、方仲彦同志对全书进行了审阅。此外,北京机床研究所盛伯浩同志、原一机部教材编辑室朱骥北同志,对本书的编写提纲和内容提出了宝贵意见,天津大学机械系一些同志还参加了部分图稿设计、文稿校核及整理工作,在此一并表示感谢。

限于作者的学术水平,书中错误和不妥之处在所难免,希望读者指正。

一九八一年九月

目 录

第一章 概论	1
第一节 机床试验的类型	1
一、机床验收试验	1
二、新产品样机试验	1
三、机床研究试验	2
第二节 机床试验的条件、项目和内容	2
一、机床试验的条件和试验前的准备工作	2
二、样机试验的项目和试验程序	4
三、试验的内容	4
第三章 试验数据的处理	10
第一节 测量误差和有效数字	10
一、测量误差的分类	10
二、偶然误差的表示方法	13
三、精确度和准确度	15
四、误差的校正和消除	15
五、有效数字	20
第二节 间接测量中误差的传递	22
一、误差传递的一般公式及基本运算	22
二、均方根误差的传递	26
第三节 试验数据的表示方法	27
一、列表法	27
二、图解法	28
三、方程法	33
第三章 常用的显示装置与记录装置	38

IV

第一节 常用的显示装置	39
一、电子示波器	39
二、光线示波器	51
三、数字显示装置	56
第二节 常用的记录装置	68
一、通用笔式记录仪	69
二、函数记录仪	71
三、电平记录仪	73
四、磁带记录仪	76
第三节 电子仪器的选取和使用	80
一、电子仪器的选取	80
二、电子仪器的使用	81
第四章 机床几何精度检验	83
第一节 概述	83
第二节 机床几何精度检验内容和检验技术	83
一、导轨直线度的检验	83
二、平行度的检验	96
三、工作台面平面度的检验	101
四、导轨或部件间的垂直度检验	102
五、回转精度的检验	106
六、同轴度检验	108
七、回转工作台分度精度检验	110
第三节 激光技术在几何精度检验中的应用	112
一、激光准直仪的原理与应用	112
二、激光干涉测长仪	115
第五章 机床主轴回转运动精度试验	122
第一节 概述	122
一、主轴回转运动精度	122
二、主轴回转误差运动	123

三、误差敏感方向	125
第二节 测量位移的传感器	127
一、电感传感器	127
二、电容传感器	133
三、其它类型的传感器	137
第三节 测微仪	139
一、电感测微仪	139
二、电容测微仪	143
第四节 主轴回转运动精度的测试与分析	146
一、主轴回转运动精度的测试方法	146
二、主轴回转运动误差图象分析与评定	152
第六章 机床传动精度试验	157
第一节 概述	157
第二节 机床传动链误差来源和传递	157
一、机床传动链传动误差的来源	157
二、传动误差的传递规律	161
第三节 机床传动精度试验的仪器	165
一、机床传动精度的试验原理	165
二、机床传动精度检查仪	167
第四节 机床传动精度试验方法	180
一、HYQ010A滚齿机传动仪的试验方法	180
二、机床传动精度试验分析	187
第七章 机床定位精度试验	196
第一节 概述	196
第二节 定位精度测量中常用的测量元件和测量系统	198
一、基准测量件	198
二、常用的测量件与测量系统	204
第三节 定位误差分析和定位精度试验方法	221
一、定位误差的分析	221

二、定位精度的试验方法	228
三、坐标定位误差数据的处理	230
第八章 机床爬行试验	239
第一节 概述	239
一、机床爬行现象及其描述方法	239
二、爬行对机床性能的影响	241
三、影响爬行的因素	242
第二节 爬行试验的内容和项目	250
一、爬行时动态参数的表示方法	250
二、机床爬行试验的项目	252
第三节 爬行测试仪器与测试方法	255
一、利用相对式位移传感器测量	256
二、利用相对式速度传感器测量	257
三、利用惯性式加速度计测量	258
四、利用磁尺测量	259
五、利用光栅测量	260
第四节 直线光栅式爬行测量仪及其应用	260
一、工作原理和使用方法	261
二、记录图形的处理	263
第九章 机床切削力的测定	268
第一节 概述	268
第二节 电阻应变片和电阻应变仪	269
一、电阻应变片的工作原理和应用	269
二、电阻应变仪	280
第三节 切削力的测量	293
一、测力仪性能的基本要求	293
二、测力仪及其应用	294
三、测力仪的标定	307
第十章 机床功率和效率的测定	309

第一节 概述	309
一、功、功率及效率	309
二、机床运转时所消耗的功	313
三、机床功率和效率的测量装置	315
第二节 转速的测定	316
一、转数计	316
二、离心式转速计	316
三、闪光测速仪	317
四、测速发电机	318
五、利用电脉冲记数的仪器	319
六、利用频率比较法测定转速	323
七、瞬时转速的记录	323
第三节 扭矩的测量	323
一、电阻式扭矩仪	324
二、电感式扭矩仪	327
三、平衡电动机	330
第四节 功率的测定	332
一、输入功率的测定	332
二、空载功率的测定	335
三、输出功率的测定	338
第十一章 机床静刚度试验	344
第一节 概述	344
第二节 机床受力变形及静刚度计算	348
一、机床受力和变形的分析	348
二、机床系统的简化和静刚度计算	358
第三节 机床静刚度的试验方法和数据处理	364
一、机床综合静刚度的测定	365
二、机床零件刚度的测定	371
三、准静态测定法	373

四、机床静刚度试验的方法与步骤	373
五、试验数据整理和分析方法	382
第四节 提高机床静刚度的主要措施	386
一、提高连接零件的接触刚度	386
二、选用合理的零件结构和断面形状	387
三、减小重力变形	388
四、采用辅助支承	390
五、正确布置垫铁位置	391
第十二章 机床抗振性试验	393
第一节 概述	393
一、机床振动形式	393
二、机床振动的利弊	395
第二节 振动的基本概念	396
一、周期振动和简谐振动	396
二、单自由度振动系统	397
三、振动矢量的复数表示法	399
四、机床抗振性的表征参数	406
第三节 机床抗振性试验常用的仪器	412
一、测振仪器	412
二、激振器	428
三、频谱分析	438
第四节 机床抗振性试验的基本方法	441
一、机床振动试验的目的	441
二、机床振动试验的程序	443
三、切削试验	444
四、空运转振动试验(查找振源试验)	451
五、激振试验	456
第十三章 机床噪声试验	479
第一节 概述	479

第二节 噪声的基本概念及其量度	480
一、噪声的物理性质	480
二、噪声的主观评价	494
第三节 机床噪声测试仪器	499
一、声级计	499
二、频率分析仪	504
三、磁带记录仪	506
第四节 机床噪声的测试方法与声源分析	507
一、声级测量	508
二、声功率级测量	515
三、噪声频谱测量与声源分析	520
四、脉冲噪声及其测量	532
第十四章 机床的模型试验	536
第一节 概述	536
一、机床模型试验的特点	536
二、机床模型试验的分类	537
第二节 机床模型试验原理	538
一、相似与相似比	538
二、代表值	540
三、代表值的物理量和量纲	540
四、基本相似比和导出相似比	543
五、无量纲乘积—— π 数	544
六、相似定理	545
第三节 相似模型的设计(相似律的推导)	549
一、物理定律法	549
二、量纲分析法	555
第四节 机床模型材料和制造工艺	558
一、机床模型材料的选择	558
二、机床模型的制造工艺	565

X

第五节 机床模型的试验方法	569
一、机床基础件静刚度试验	569
二、机床模型动刚度试验	576
第十五章 机床温度场和热变形试验	581
第一节 概述	581
一、热变形对加工精度的影响	581
二、热源	588
三、热的传递和热平衡	590
四、热变形的试验方法	591
第二节 温度测量仪器	592
一、玻璃管液体温度计	594
二、半导体点温计	595
三、热电阻温度计	597
四、热电偶温度计	599
五、辐射温度计	607
六、热相机	608
第三节 机床温升和热变形的测定	610
一、温升和温度场的测量	610
二、机床热变形的测量	613
参考文献	616

第一章 概 论

第一节 机床试验的类型

机床试验分为机床验收试验、新产品样机试验和机床研究试验三个类型。

一、机床验收试验

机床验收试验的主要目的，是检验所制造出的或修理过的机床是否符合所规定的技术要求，并检验各机构和部件协调动作的正确性和准确性以及机床的工作能力。

机床验收试验的项目和要求，应符合我国第一机械工业部颁布的《金属切削机床通用技术条件》(JB2278-78)。对不同类型(系列)的金属切削机床，如有补充制订的制造与验收技术要求，也必须符合其中相应的规定。

机床验收试验的主要内容，一般包括机床空运转试验、噪声试验、几何精度和工作精度试验以及载荷试验。此外，对于机床的静刚度和抗振性以及主传动的空载功率等，有时也进行抽查试验。

机床验收试验通常在车间内由工厂的检验部门进行；对特殊订货的机床，经用户同意，也可在用户处进行。这类试验的要求和所使用的仪器比较简单，花费时间也较少。

二、新产品样机试验

新产品样机试验的主要目的，是对新试制的机床进行样机性能试验，全面评价机床结构设计和制造工艺的技术水平，

提出需要深入研究的课题和改进设计的措施。因此，新产品样机试验是发展机床新产品不可缺少的一环。

机床样机试验的项目和内容比较广泛，要求较为严格，除进行静态检验外，还应进行动态特性鉴定，常使用一些较先进的测试技术。

机床样机试验一般在试验室条件下由鉴定小组进行，须指定专职试验人员和负责人；试验方案的拟订应有设计人员参加，必要时设计人员应参加试验工作。试验人员应同设计人员共同讨论试验结果并制定改造方案，对改进设计的样机，应重新进行试验。

三、机床研究试验

在研制新型机床过程中，常涉及到一些基础理论问题。对拟采用的新方案、新系统、新结构、新材料、新工艺等，应分别进行机床的研究试验。这类试验要求在试验室条件下进行，而且往往是在专门的试验台上进行，常使用各种完善的先进仪器。在试验的同时，还应进行理论上的分析研究，并提出试验研究报告。

第二节 机床试验的条件、项目和内容

本节以新产品样机试验为主，扼要地介绍其所应进行的试验项目和内容。至于机床研究试验，它与新产品样机试验相比较没有本质上的区别，只是研究试验的内容更为深入，要求更为严格，而且往往是专项的系统试验研究。样机试验应对所规定的各项技术指标进行全面的试验。机床验收试验则可按照 JB2278-78 通用技术条件中有关规定进行。

一、机床试验的条件和试验前的准备工作

(一) 机床试验的条件

机床试验应在下述试验条件下进行:

① 试验场地的面积一般不小于 50 平方米, 被试验机床安装位置距离墙壁不得小于 2 米, 在机床四周 2 米范围内也不得有任何障碍物。

② 机床安装位置避免阳光直射, 并不受气流的影响。

③ 地基应符合机床说明书中的要求, 支承点不得有虚浮现象, 地脚螺钉的夹紧力应保持均匀。

④ 对于有恒温要求的机床, 试验对室温应保证为 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$; 用线纹尺检验定位精度时, 在试验过程中, 室温波动不应超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。对于无恒温要求的机床, 在试验过程中, 室温波动不应超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$; 对温度波动不敏感的试验项目, 如噪声、刚度和振动等, 当条件不具备时, 允许室温波动不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

(二) 机床试验前的准备工作

在样机试验之前, 必须按照 JB2278-78 通用技术条件先行验收合格, 在验收试验的基础上再进行样机试验, 并作好如下准备工作:

① 按照机床说明书要求调整机床水平, 保证不超过 $0.02 \sim 0.04$ 毫米/1000 毫米, 按照出厂检验单检验几何精度, 记录数据。

② 按照机床说明书要求注入润滑油, 油量应符合要求, 润滑油牌号应符合说明书规定, 不得以其它油、脂代替。

③ 试验所用测试仪器和量仪, 均应在试验前经过标定, 要有检验合格证。对于有恒温要求的机床, 其所用测试仪器、量仪和装备等, 均应在恒温条件下先行静置 24 小时。

④ 被试验的机床必须先进行高速空运转温升试验, 绘出主要发热源和部件的高速温升曲线, 并观察其工作是否正常。

常。

⑤ 除特殊规定外，机床应在中速 $\left(\frac{1}{2}\text{最大转速}\right)$ 空运转一小时后再进行试验。与测试结果无关的运动不必运转。

二、样机试验的项目和试验程序

样机试验的项目和试验程序如下：

- ① 噪声试验；
- ② 空运转振动试验；
- ③ 热变形试验；
- ④ 静刚度试验；
- ⑤ 主传动系统的功率和效率试验；
- ⑥ 切削抗振性试验；
- ⑦ 激振试验；
- ⑧ 定位精度试验；
- ⑨ 主轴回转精度试验；
- ⑩ 爬行试验；
- ⑪ 传动精度试验
- ⑫ 加工精度试验；
- ⑬ 可靠性试验。

各类机床所应进行的样机试验项目如表 1-1 所示。但也可根据各类机床样机试验规范细则和试验单位的具体条件，因地制宜地选择上述试验项目或增加新的项目。表中※为应该进行的试验项目，(※)为可供选择的试验项目。数控机床以外的其它自动化机床，也应进行第⑬项（可靠性）试验。

三、试验的内容

（一）机床噪声试验

机床噪声试验的内容，包括测定机床总噪声水平（噪声

评价)和寻找机床的主要噪声源。为测定总噪声水平,推荐采用声功率试验的工程法。在试验条件不具备的情况下,允许按照《金属切削机床噪声测量标准》(JB2281-78)测量机床噪声的声压级(A声级)。为了更确切地反映出噪声的总能量和有利于制定抑制噪声的对策,在测试仪器允许的条件下,应对噪声进行频谱分析,找出机床的主要噪声源。

(二) 空运转振动试验

机床的零、部件由于制造精度不良、回转体不平衡、液压系统油液的脉动和周期切削力等，将激起机床结构系统的

表1-1 各类机床试验项目

[illegible]

强迫振动，从而影响加工工件的质量，如不圆度和表面粗糙度；即使某些绝对振动的振幅远远大于刀具和工件间的相对振幅而并不严重影响加工精度，也会使操作者感到极大不安，因此，应进行空运转的绝对振动试验和相对振动试验。

空运转绝对振动试验的拾振点应靠近切削位置，或较能正确反映切削点振动的位置，在敏感方向由低速到高速进行测量。若振幅很小时，可只测量若干高速级的绝对振动值。

对于精密机床，应在静止和空运转状态下测量主轴箱的绝对振动。测量静止状态下的绝对振动，是为了测定外界振动对精密机床的影响。

对于直线往复运动的机床，应测量夹持刀具的部件（如刀架、磨头）相对于安装工件的部件（如工作台、夹头）的相对振动。

（三）热变形试验

机床因受热变形而引起的几何精度与定位精度的变化，往往超过规定公差的若干倍，因此它已成为机床制造业中普遍重视的问题。

热变形试验可以分为直接试验法和间接试验法。前者指在典型切削工艺条件下加工一批典型工件，直接测定机床受热引起的综合变形，可作为“加工精度”试验项目处理；后者则指在机床运转或模拟状态下，测量机床的几何精度变化，主要测定主轴和定位元件的位移，以及热检几何精度的指定项目。

（四）静刚度试验

静刚度的一般概念，是指系统上作用力与引起作用力方向的位移之比。机床在切削力作用下必将产生一定的弹性位移。机床静刚度试验是将切削力模拟为静力，观察机床在静态切削力作用下的变形情况。机床验收试验时，以此位移量

的大小作为评价静刚度的依据。

为了评价机床的综合刚度,某些机床的样机试验应进行弹性位移分配试验,即在模拟作用静态切削力的情况下,将机床各部件的位移值折算到加载位置,观察各部件的位移在总位移量中所占的分量,用以分析各部件刚度及其对机床综合刚度的影响。

提高机床薄弱环节的静刚度,对提高机床综合刚度的效果是很显著的。机床零件静刚度的试验与改进,则属于研究试验的内容。

(五) 主传动系统的功率和效率试验

机床电机的输出功率,除了一部分作为切削时的有效功率外,其余部分就成为机床传动链中的摩擦损耗。因此,这项试验适用于传动链较长的主传动系统。

试验内容包括逐级测定机床空载时的消耗功率,加载时电机、机床的输出功率、电机效率、主传动系统效率以及机床的总效率。

(六) 切削抗振性试验

切削抗振性试验是在规定的切削条件下(包括工件材料和刀具材料与几何参数等),以极限切削宽度 b_{lim} 和切削过程中的功率利用率作为评价指标。切削过程中的功率利用率,表征了在单位时间内机床可以进行工作的金属切除率,也就是粗加工工序时机床的潜在生产率。

试验内容包括满功率切削试验、有限功率(≤ 0.7 电机额定功率)切削试验和极限切削宽度试验。由操作者通过触觉、听觉以及观察切削表面的波纹和敏感方向的振幅来判断颤振的起始点。

(七) 激振试验