

# 机械实验学

王义行 张广义 陈洪海 编

3

吉林大学出版社

## 前 言

迄今为止，实验研究仍然是机械工程科学的主要研究手段，是机械工业发展的一个主要的基本的方面。但是，限于历史的原因，我国高等工科机械类专业的教学中，一般还只是注重高等数学、工程数学、理论力学、材料力学、工程力学等基础理论学科，以及机械制图、机械原理、机械零件等技术理论课，而忽视了培养学生独立开展实验研究工作必须的内容，诸如：实验设计、实验台架设计、组织实施实验、数据结果处理等旨在提高实验研究能力的培养。为此我们尝试编写了这本供机械学研究生用的《机械实验学》试用教材，作为改变这一现状迈出的试探性的一步。

编者认为，这份教材可供高等学校机械类学生选用，亦可供机械工程界从事试验研究、产品测试及实验室工作人员参考。并祈求通过教学实践，听取来自各方面的宝贵意见，今后不断改进，以至完善。

编 者

一九八六年十一月

# 目 录

绪 论	(1)
第一章 机械实验	(3)
§ 1.1 机械实验类型	(3)
1.1.1 零件精度的实验	(3)
1.1.2 摩擦实验	(4)
1.1.3 强度实验	(7)
1.1.4 刚度实验	(9)
1.1.5 热变形实验	(10)
1.1.6 振动实验	(11)
1.1.7 无损检测	(13)
§ 1.2 参数测量	(14)
1.2.1 测量设计	(14)
1.2.2 机械参数的电测量	(19)
1.2.3 纯机械测量仪器和记录器	(31)
1.2.4 机械-气动方法	(32)
1.2.5 机械-声学方法	(33)
1.2.6 机械-光学方法	(34)
§ 1.3 机械的电模拟	(35)
§ 1.4 实验模型的建立	(41)
第二章 测量误差及数据处理	(43)
§ 2.1 测量误差理论	(43)
2.1.1 测量误差的类型及其规律性	(43)
2.1.2 系统误差的检验与剔除	(44)
2.1.3 粗误差的判别与剔除	(49)
2.1.4 随机误差的处理与评定	(52)
2.1.5 不等精度测量结果的处理	(59)
2.1.6 间接测量参数误差的处理	(61)
2.1.7 测量计算中的有效数字及其处理	(62)
§ 2.2 实验数据的回归分析	(64)
2.2.1 相关分析的基本概念	(64)
2.2.2 直线相关	(66)
2.2.3 多个量的相关	(72)
2.2.4 曲线相关联系	(73)
2.2.5 相关分析应用举例	(74)
§ 2.3 随机过程及其数据处理简介	(75)

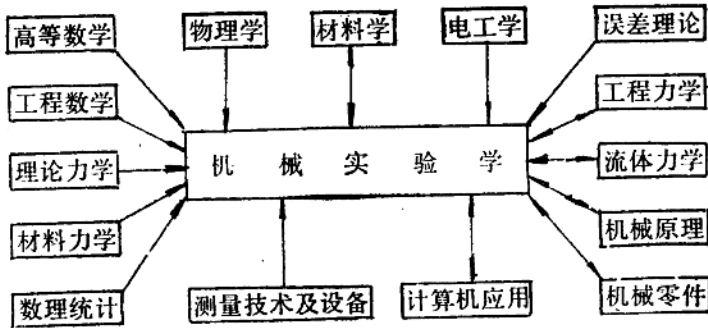
2.3.1	随机过程及其特征量	(75)
2.3.2	平稳随机过程的特征量	(78)
2.3.3	随机过程的简化处理	(84)
§ 2.4	时间序列方法	(86)
2.4.1	时间序列方法的基本知识	(86)
2.4.2	ARMA (n, m) 模型的特性	(90)
2.4.3	最佳预测	(94)
2.4.4	建模	(97)
<b>第三章</b>	<b>实验设计</b>	(105)
§ 3.1	正交实验的直观分析设计法	(105)
3.1.1	正交实验设计法	(105)
3.1.2	正交表	(107)
3.1.3	实验方案的设计	(109)
3.1.4	实验数据的计算分析	(111)
3.1.5	因子水平数不同的试验	(112)
3.1.6	有正交作用的试验	(113)
§ 3.2	正交实验的统计分析法	(115)
3.2.1	数据构造模型	(115)
3.2.2	效应的计算	(116)
3.2.3	二水平试验的方差分析	(120)
3.2.4	三水平试验的方差分析	(122)
3.2.5	重复试验	(125)
§ 3.3	各试验设计方法的比较与实施次序	(128)
3.3.1	三种试验配置法比较	(128)
3.3.2	方差检验精度的分析	(128)
3.3.3	完全随机化法与随机区组法效果的比较	(129)
3.3.4	分割试验的优缺点	(130)
3.3.5	试验设计的实施次序	(130)
<b>附 录</b>		(131)
<b>第四章</b>	<b>抽样检验</b>	(137)
§ 4.1	统计抽样检验方法	(137)
4.1.1	几个基本的名词术语	(137)
4.1.2	计数抽样检验中几个常用的概率分布	(138)
4.1.3	计数一次抽样方案	(139)
4.1.4	计数二次抽样方案	(148)
§ 4.2	计数调整型抽样方案——105D介绍	(152)
<b>附 录</b>		(160)
<b>第五章</b>	<b>典型实验</b>	(163)

§ 5.1	试验台架分类及加载装置实习.....	(163)
§ 5.2	力学参数、速度、加速度、位移的测量实验.....	(167)
§ 5.3	机械效率实验.....	(170)
§ 5.4	磁带机数据采集及数据的基本统计分析实验.....	(173)
§ 5.5	随机信号的功率谱分析实验.....	(175)

# 绪 论

《机械实验学》是一门数学理论与应用科学紧密相连的综合课程。它通过机械实验这一纽带把数学、力学、电学等基础学科与机械设计类课程联系在一起。本课程主要叙述各类机械实验的目的和手段，实验设计、抽样检验与测试数据处理等内容。因此，《机械实验学》就其内容来说应有硬件与软件两部分组成。它是机械学学生不可缺少的一门课程。实践证明实验研究的水平，会影响各种机械产品的水平，掌握科学的机械实验知识，是机械工程界取得技术进步强有力的手段。

本课程与众多课程相关，下图反映了与《机械实验学》同有关课程的联系。这些课程是学习《机械实验学》的基础，通过对实验结果进行科学的整理，最后再应用验证成功的科研成果来填补力学和机械学方面的有关理论。



学习《机械实验学》应抓住实验设备、实验方法，误差分析及数据处理这一主线，值得注意的是应重视力和运动的相互关系，亦即是动力学研究。因为随着机械工业的发展，机器动力学的试验研究越来越显示出重要性。由牛顿定律的含义知道，作用在物体上并使之运动的力称为主动力。根据达朗贝尔原理，施加在物体上的并与加速度方向相反作用力叫做惯性力。主动力通常是位移、速度和时间的函数。如果它已知，那么确定质点运动规律就可以用一个或一组微分方程来描述。如果研究的是由弹簧质量组成的振动系统，其振动规律同样可以用微分方程来描述。由于任何机械零件都可以抽象的弹簧质量振动系统，所以机械振动又是普遍存在的，因此研究振动及其影响正是机械动力学的首要任务。至于静力学的研究主要是载荷与变形之间的相互关系，它体现了动力学中的一种特殊情况，即与时间无关的力与变形的过程。运动学研究的是机械或机械的几何运动过程，它表现在动力学里面的是：它是在构件无质量，不变形的前题下去研究几何运动的。然而构件的惯性力可能产生的弹性变形会比起运动学中所计算的位移往往导致更为显著的误差。修正这一误差就必须从动力学方面去进行分析。因此机械动力学在机

械发展过程中占有相当重要的位置，而与之相适应的动力学测量技术也就显得特别重要了。

《机械实验学》是一门以机械产品为对象的实验学，它不同于物理学中的光、电、热力学等基础理论实验。但是，物理实验中应用的研究方法、指导思想与现代物理测试技术则是本课程的重要基础。

《机械实验学》与机械零件实验和机械原理试验有着密切的联系，广义地说，它们是本课程的一个组成部分，不过当前的教学安排中，零件实验与原理实验更多的是示范式的、验证式的，学生缺乏实验设计与实验技巧的训练，更谈不上对测试结果的处理与误差分析了。本课程将以实践为主来组织教学以提高学习者的实验研究能力。

学好本门课程的基础是，要紧紧地抓住该课程所相关的各门基础理论课的学习，融会贯通这些知识的横向与纵向联系。要经常注意国内外测试技术的发展及先进的实验台架的结构，要养成主动地用教学的观点来处理所涉及到的机械实验问题。学好本门课程将使学员在今后的工作过程中，对我国机械产品的技术进步有所裨益。

限于总体学时的安排，本课程在教学过程中不能对所涉及到的各相关专门学科的知识作过多的赘述，为了不影响课程内容的完整性及了解同相关课程的有机联系，故在教材中尽量将主要的内容编入。学员可以对照教材与有关参考书自学。但凡是实验的部分则要求亲自动手，以培养学员具有实际的使用能力。这一点，希望在选修本课程时应充分注意到。

# 第一章 机械实验

机械、机器及其零部件的试验是机械制造专业技术进步的主要手段，机械实验本身也是验证，发现基础理论的有效措施。由于电子系统的终端总需要有一个执行机构式系统。所以，从这个意义上讲，机械实验又是一切现代化科学技术的基础。

## § 1.1 机械实验类型

### 1.1.1 零件精度的实验

零件的精度就是其形状和尺寸与所要求的形状和尺寸接近的程度。为了保证零件和部件的工作能力和可靠性，零件的精度是必须的。

制造误差对下面一些因素有最根本的影响：

过盈联接的强度（即使在2级精度的公差带内，强度的波动亦可能达到几倍）。

轴承的间隙偏离了最佳值和载荷分布不均，关系到它的承载能力和寿命。

齿轮传动中沿齿长方向载荷分布不均、各齿间载荷的再分配和动载荷，均关系到它的承载能力和寿命。

零件的循环强度取决于表面状况。

零件的精度能确定整个机器的工作能力，其中包括金属切削机床和其他加工机器的加工精度，运输机械的工作平稳性和无噪声工作。

零件的几何精度用测量长度、角度、不圆度、表面粗糙度的通用工具和仪器测量，也用测量单个零件——齿轮、螺纹、滚动轴承的仪器检查。

平直度和平面度以及运动链精度的检查属于复杂的检查。

大尺寸零件的平直度和平面度的检查可用下述方法进行：

用光学观测法测量被测表面上每块小面积的坐标值，用张紧的琴弦（钢丝）（在水面内）测量，用直尺测量；

用精密水平仪测量被测表面上相邻小块面积的倾角同时逐步绘制其轮廓图。

近来，采用激光射线进行检查。

用光学的和电气的方法检查运动精度。光学法使用分度头、圆刻度盘、测量显微镜、带准直仪的经纬仪。

用感应-相应法测量运动精度时，传动的误差就会使反相器的转子与定子作异步旋转，其电讯号可用电位计、自动记录仪和示波器记录下来。

精密的运动精度仪所能达到的最高精度为全周范围内，极限误差0.5s。

精确的直线位移，例如丝杠的位移，借助于块规和显微镜或标准丝杠检查。

实质上，测量的误差应远小于被测参数的公差，以不大于被测对象公差带的35%为



好。在遵守阿贝原则（被测尺寸轴线或尺寸线应与测量仪器的标尺或其他评定尺寸的基准在一条直线上）时，测量精度可大大提高。这时，导轨中的挠曲和不平行度对测量精度影响很小。

精度的测量应优先采用机械的和光学的仪器。当需要测量自动化或自动处理结果时宜采用电气的方法。

机械式仪器中力的测量，特别是用于测量刚性小的零件时，不得太大。用于固定测量仪器的架子应有足够的刚性。当架子的刚性很小时往往导致测量精度的显著降低。

为了计算重要零件，不仅应当知道参数的平均值及其偏差范围，而且应当知道它们的分布规律的特性，所以期望用于连续测量的仪器，应能立即显示尺寸的平均值和均方差。

在设计试验装置和特别精密的机器时，务必预先拟定测量方法，规定用于测量的和仪器安装的基准等等。

### 1.1.2 摩擦实验

研究摩擦损失的目的是为了减少这些损失，这无论从节约能量的观点，或者从减小机器的发热和磨损的观点来说，都是重要的。此外，还可以将摩擦损失作为机器装配质量的指标。在最简单的试验中，仅限于测定空载损失；而在其他情况下，还要测量带有负载运行时的损失和建立效率与负载的关系曲线。

施加给被试部件或零件的力矩，通常借助于平衡电动机来测量。平衡电动机就是一般的电动机，它的定子架在滚动轴承上，可以转动（图1-1）。如果平衡配重或测力计使定子平衡，则可很容易地测得定子的力矩，且该力矩与转子的力矩相等。

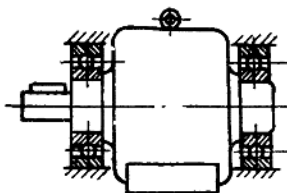


图 1-1 平衡电动机

带负载运行时的损失和效率依据输入和输出轴的功率之差来确定，两轴上的功率值可能很接近，因而要精确地测量。

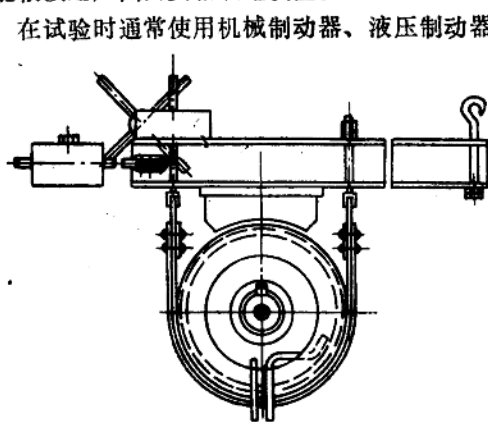


图 1-2 勃洛尼制动器

在试验时通常使用机械制动器、液压制动器和电力制动器来产生和测量输出轴的力矩。机械制动器通常采用带闸式的（勃洛尼制动器，图1-2）。改变钢带张力即可调节制动力矩。在制动力矩较小的制动器中，可用装在丝杠螺母副上的手轮进行调节，而在力矩较大的制动器中，则装有蜗杆传动。杠杆应当有专门的配重平衡。制动器用冷却液来冷却，冷却液通过管路流过制动轮的内表面，而管口的装设必须迎着液体在鼓轮上运动的方向。润滑油从油芯式油杯里流入制动轮的摩

擦表面，以防止摩擦振动，机械式的振动器不大常用。

目前，广泛使用流体动力式液压制动器，其阻力矩与转速的平方成正比例。所以，在低速时其阻力矩很小。该制动器可保证运转稳定和经久耐用。通常使用自来水（高压水）作制动器的工作介质，同时，它还具有带走热量的功能。改变涡流工作室中的充水量可以调节力矩。制动器外壳可在自身的滚动轴承支承中转动，于是借助测力计、贴在杠杆上的应变片或磅秤装置就能测量力矩。

大功率的制动器常做成双排转子式的。液力制动器可装备当工况变动时能自动保持恒定力矩的装置。申克与高夫曼等公司以集中方式生产液力制动器。

电力制动器可采用如下一些设备：

他激式直流电动机；用励磁电路或电枢中的变阻器调节力矩；

绕线式异步感应电动机；用转子电路中的变阻器调节力矩；当电动机的工作转速低于同步转速时，通过切换导线可使磁场旋转的方向与转子旋转方向相反。亦可将电动机的定子供以直流电，同时用变阻器调节。

按照涡流原理工作的感应式制动器靠磁场实现制动。这种制动器能使力矩稳定，而且可按给定程序实现自动控制。亦可把转子制成惯性矩最小的直径不大的圆盘形或圆柱形，以增强它的高速性能。为了测量力矩，可将定子安装在自身的滚动轴承上，使其能自由转动。

电磁粉末制动器（图1-3）是最方便的，它的工质是铁粉，在磁力线流的作用下，铁粉被磁化愈强，其抗剪强度愈大。电磁粉末制动器的优点是能稳定地精确地控制力矩、其力矩与速度的关系不大，工作寿命长，轮廓尺寸小等。

为了提高测试精度，广泛采用封闭式回路试验法，这时，驱动功率仅用于克服摩擦，而且功率的测量具有足够的精度。

在大多数试验装置中，测得的力矩中均包含有辅助支承的摩擦阻力矩。这时可采用摩擦阻力很小的甚至无摩擦的轴承。

消除摩擦阻力矩的办法，可从下列诸方法中任选之：

相对于运动方向周期性地改变摩擦力的方向。在这种情况下，摩擦力时而制动，时而助动，因而其影响的总和是非常小的，例如，在转动支承中使轴承外圈作快速摆动，使摩擦力具有垂直于测量平面的方向。为此，须使垂直于测量平面的平面快速摆动；

使转轴支承的两个负载大致相等，并使它们的摩擦力具有相对于外圈的转动有彼此相反的方向。

当滑动速度较小时，采用液体静压支承效果最好，静压支承中的摩擦系数已成功地达到了 $10^{-6}$ 。

当前认为研究机器零件的摩擦和磨损是最迫切的任务，因为大多数机器及其零件均由于磨损而损坏。

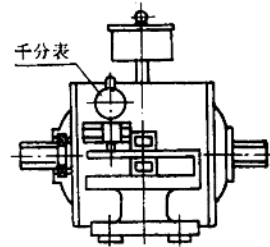


图 1-3 电磁粉末制动器

液体摩擦的研究包括测量摩擦力或摩擦力矩（见前述）、油压、油膜厚度和温度。

在常定工况下的轴承与圆形导轨中测油压，可使用精密压力表，但因难于用油充满油路而给使用带来麻烦。最常用的惯性压力表有下列类型：

弹性圆柱管式，在弹性圆柱管的表面上绕有数圈导线作为电阻传感器线圈或用一圆柱形塞头，其底部为弹性薄膜（用电容式、电感式或电阻式传感器测量后者的弯曲变形）；

半导体传感器，它的电阻取决于压力的变化。

测量油膜厚度可使用测量位移的一般方法（见前述）。根据电阻的突变可近似地检查是否已形成了液体摩擦。

摩擦表面的温度用热电偶或电阻温度计测量（见下文）。测量时，常将其放置在零件内，使其尽可能地接近零件的工作表面。

磨损的研究是在实验室条件下在试件和零件上进行，以及在常规使用条件下在真实机器上进行的。根据磨损的基本类型，主要进行磨料磨损试验和粘着磨损试验。

材料、防护装置、润滑等的磨料磨损的对比试验主要在试件上进行。试验是在打磨砂纸、砂轮或锉削摩擦的条件下进行的。在不同的滑动和滚动速度比、不同的接触线位置、角度等情况下，在试件上可有效地进行抗胶合的试验。

接近于工作条件的磨料磨损试验是长期的，而且伴随频繁的人为起动和停车，强化加载状态或人为的污染，所以这些试验也带有对比特性。

粘着磨损试验可以是短期的（一次试验的最短时间为零件的热循环时间）。当然，短期的试验不能反映零件的磨料磨损对粘着的影响。在粘着磨损试验时除了压力和速度相似之外，热过程相似有着特殊的意义。

由于在实验室条件下很难再现污染、载荷集中、磨料磨损和粘着磨损的相互影响以及其他因素的实际工作条件，因此使用观察具有很大的意义。

评定磨损可用下述方法：

根据受试物体几何参数——长度尺寸，形状和微观几何的变化评定磨损，这是基本的方法；

根据试件重量减轻的程度评定磨损，这种方法仅当用于不吸油的小试件时才有效；

根据磨损生成物的数量评定磨损。

根据放射性表面层放射性减弱的程度评定磨损；

根据部件工作性能指数的降低（例如泄漏量增大、燃料消耗量增大），评定磨损，这是仅在观察运转中的磨损情况时才使用的方法。

检查几何因素的变化。常使用测量磨损后的试件尺寸的方法（适用于小而简单的试件）、测量相对于未磨损基面的磨损深度的方法、轮廓图象法或切槽法。切槽法是最广泛使用的方法，它是在磨损表面上预先切出一条逐渐收缩的不很深的月牙凹槽。即使由于不大的磨损，月牙凹槽的长度也会急剧减小。根据测得的月牙凹槽长度的减小值计算磨损深度。利用这个方法能测量局部磨损。卡里布尔工厂生产由机械学研究所研制的，切槽刀盘和测量月牙槽的仪器。

磨损微粒数量的测量可用化学分析法或润滑油的光谱分析法，或在润滑油的密封系

统内借助于放射性同位素进行测量。

为了评定耐磨性，了解摩擦表面上的压力分布是很重要的。

为此，采用如下几种测量方法：

靠测量接合面电阻来进行测量。由于接合电阻取决于实际接触面积，因而也取决于压力。接触的零件之一，制成刚性连接且对电绝缘的组合件，因而此法相当复杂。在电流通过接合面时测量电压降；

在测定局部接近量的基础上进行测量，这个方法是在一个零件上钻一些孔，把粘附有电阻应变片的圆柱型塑料敏感元件插入这些孔中，并且用螺钉把它们压紧在与其相配的另一零件上，为适应于接触零件的加工质量和材料起见，传感器根据压力校准。由于这个方法必须损伤零件，且要求精确安装、专门校准以及敏感元件复杂，因此，它的应用受到限制；

在低弹性模数零件共轭的情况下，用压电式传感器测量随时间而变化的压力。压力通过弹性薄膜传给传感器。这个方法由莫斯科包曼高等技术学校成功地应用于研究汽车制动器衬里的压力分布；

超声波振动法。超声波具有部分地自接合表面反射回来的能力，反射多少取决于接触的紧密程度。超声波振动以短脉冲发射，且在以回声信号的形式自接合面反射时返回，这时就用仪器测量。目前，普遍使用带有压电式振荡器头的工业超声脉冲回声探伤仪。为适应于接触零件的加工质量和材料起见，必须进行校准。

### 1.1.3 强度实验

机器零件强度的综合实验研究，有下列内容。

应力状态 强度-静强度，周期性强度，冲击强度，高温和低温强度，在腐蚀条件下的强度及蠕变，接合强度等等。

研究的方向如下：计算的校核及进一步精确；材料机械特性的确定；材料及其强化方法的合理选择；结构参数的优化；具体的机械制造结构强度的保证。

应力状态实验研究可在简单的模型上，应用相似原理的模型上，以及真实零件上进行。主要研究应力场和个别点的应力。

用模型来研究应力场的实验方法中，光弹性法的应用最为普遍，这个方法的原理是偏振光通过用透明光敏材料制成的模型时发生干涉。当一束偏振光透射模型时，即分为两束在主应力平面上振动的光，并且这两束偏振光的透射速度与相应的主应力成线性关系。借助于检偏镜，偏振光被转置在一个平面内，但是它们具有与主应力差成正比例的光程差，因而发生干涉。被测定的应力差与相应的暗色干涉条纹的色序成比例。

近来，光弹性装置已做得非常紧凑，并且能投射到分开放置的屏幕上。

光弹性法主要在平面模型上应用。然而，目前已成功地推广应用到空间模型上。其中又以应力“冻结”切片法用得最普遍，其所贴模型薄片的厚度为1~3mm，随后象平面模型一样地以偏振光照射。这一方法的实质是：当模型被加热到80~130℃时，其多态构造的材料被软化，而应力由弹性的未被软化的构造骨架承受。在受载的情况下冷却，而其变形仍然保持着。对于每一个应力状态，需要单独做模型。对于立体模型也可

用贴片模型法，其中包括在透明非光敏材料模型上粘贴光敏材料和在光敏材料模型上粘贴偏振片或反射层。为了预先估计应力状态也可使用光散射法。

借助光敏材料覆盖层来研究应力场是很有前途的。覆盖层系厚度为1~3 mm的粘贴的薄片或薄层。它们在涂层时呈液态，聚合后变为固态。当用偏振光照射覆盖层时光线自零件表面或覆盖层内表面反射出来。这一方法用在真实零件上可保证很高的灵敏度。

研究超出弹性极限的应力、热应力和动态应力亦可使用光弹性法。激光技术和全息摄影的使用，用光学方法测定应力分布的发展。

为了研究大的弹性变形（例如在橡胶试件上）和大的塑性变形（例如在金属试件上）情况下的应力状态，可采用网格法。网格用光刻法或滚花法形成。根据网格形状的变化来评定变形和应力状态。复印法也是一种网格法，这种方法是，用划痕的方法在塑性材料上刻网格，且在加载之前和之后复制出它们的压痕（复印痕）。在复印痕上测量比在真实零件上测量具有更高的精度。

为了研究（包括板状零件在内）形状匀称的零件的应力状态，可采用波纹条带法。它的原理是用光学法使已变形零件上的小网格（网线）和未变形的网线重合，因而得到波纹条带。网线是用光学方法刻出的。

变应力幅时应力循环次数可用铜或铜合金在零件表面镀层的方法测定。当作用重复变应力时，在覆盖层表面上出现暗斑的浓密程度随着应力和载荷循环数的增大而增强。

测定具有晶体结构金属的弹性变形可用X射线法，用来测量晶格在不同方向的长度并折算成应力。

使用脆性涂层法可很方便地预测最大应力区和确定复杂零件的主应力方向。在涂层中发生的弹性变形同在零件表面层中的变形是相同的。当变形达到极限值时，涂层发生裂纹。推荐使用溶于二硫化碳溶剂的透明松香清漆涂层。高温时用玻璃珐琅涂层。经氧化处理过的铝箔用脆性涂层，是有发展前途的，因它的性能稳定且可预先标定。

众所周知，应力分布服从弹性理论方程。它同流体动力学、电动力学等方程是相似的，因此，为了研究或者演示应力分布，有时使用以流体动力学、电动力学以及薄膜等相似理论为基础模型。

为逐点地确定应力而进行的变形量测量，可使用应变计和电阻应变传感器（见前述）。

测定单向应力状态的主应力只须使用一个传感器，测定方向为已知的主应力时，必须使用两个传感器，而在平面应力状态的一般情况下测定主应力则须使用由三个传感器组成的碟状传感器。

强度试验可在试件及真实零件上进行。近来，已广泛开展在接近于真实零件的工作条件下的强度试验，例如在大型模型上或在真实零件上进行试验和再现运转中载荷变化实际规律的程序加载试验。程序由凸轮机构、指令装置、穿孔卡片和磁带的记录给出。在新机器中的载荷很难设定，但可依据真实机器的载荷在磁带上的记录来实现。

疲劳试验的加快速度是切实可行的，它可借助于提高应力变化的频率、增大应力和

去除载荷谱中对疲劳过程实际不发生影响的一些应力方法来实现。近三十年来，疲劳试验机的速度也已从300r/min提高到了50000r/min。此外，用于小试件的共振型激振器已具有高于50000Hz的频率。现代高频激振器的应用，缩短了单个零件的试验期限，例如汽轮机叶片的试验时间不超过几十分钟。在无塑性变形和不增大内摩擦的情况下，加载频率对疲劳极限通常影响较小。并可在文献资料数据或试验的基础上引入修正数值。对那些工作时数与应力关系稳定（亦包括接触应力）并对其有足够研究的产品，宜进行加大应力的试验。对于部件，包括揭示其薄弱环节则采用强化载荷的试验。在进行多次加载快速试验时，可从试验程序中除去那些低于疲劳极限0.6—0.7倍的应力而并不影响疲劳过程，因为这些加载试验常占用很多的时间。

在试验过程中使用分级加载法（包括洛卡提方法）能快速测定零件的疲劳极限。根据这个方法进行试验所取的应力值，在开始时应为疲劳极限的0.8—1倍，然后以恒定的应力差和每级相同工作时间逐级加大应力进行试验，下一步为计算三条疲劳曲线（假想的和两条极限情况的）疲劳破坏前的循环比之和  $\sum \frac{t_i}{N_i}$ 。根据循环比总和  $\sum \frac{t_i}{N_i} = 1$  的条件，用图解内插法计算三个点的疲劳极限。

扫描电子显微镜为分析断口特性和破坏本质提供了很大的可能性。

#### 1.1.4 刚度实验

在机器制造中，必须对零件、部件和整个机器进行刚度试验。测定刚度就是测定某些点上的力同其在对零部件工作性能影响最大的方向上的位移量的比值。通用加工设备及其部件的试验条件应当符合于最典型的加工形式。在机械加工领域中引入了平均刚度和刚度的均方差的概念。对于机器和部件，除了确定其总刚度之外，还需决定弹性位移的平衡，这样就能定出提高刚度的最有效的方法。

刚度试验通常在静载条件下进行，所用的加载方式为外部加载或内部加载。前者包括使用拉-压试验机在内。试验机应有足够大的工作空间。对于极少数的试验，可利用金属切削机床作为加载装置。图1-4所示的通用试验台，可在工作空间的任一点和任何角度下施加工作载荷。

试验时的内部加载可用螺旋千斤顶或液压缸实现。载荷通常用测力计测量，而在精密试验机上则使用机器载荷秤度量。当利用液压缸（千斤顶）加载时可依据精密压力表的读数检测所加的载荷，同时应当注意减小缸内的摩擦，为此可在活塞上开出数个使压力均匀分布的环槽或使用流体静压卸载装置。

为了保证被试零件上施力点的精确方向和坐标，加

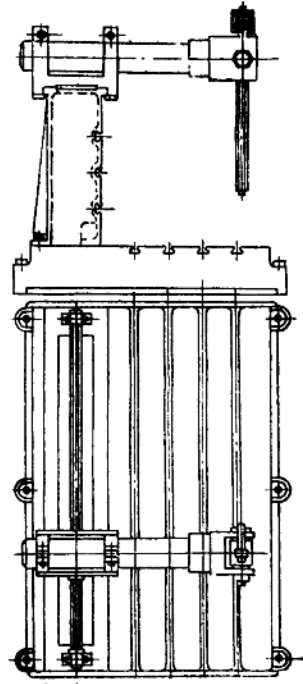


图1-4 通用刚度试验台

载系统中应当有两个铰接点（通常为两个钢球，载荷通过钢球传给测力计并由测力计传给被试零件）。在各种情况下，通过球或具有球面支承表面的零件都能更加精确地传递载荷。

机器中的弹性位移由本身位移和接触位移组成。接触弹性位移不与载荷成线性关系。本身弹性位移由于接触条件的变化和材料属性可能具有非线性的性质。因此要在分级增大或减小载荷的情况下测定并绘出其相应的图象。在第一次加载时，会发生选择间隙和微观不平度的塑性变形问题，这个问题在大的公称面积接触条件下显得特别重要。所以，试验应在两三次预压以后方能进行。

弹性位移相对于不变形的基面来测量，如果难于做到时，可相对于与其相配的零件来测量。在试验本身刚度时，通常所有测量都是相对于固定的基面进行的，而在试验接触刚度时，则最好是相对于与其相配的零件进行测量。为了绘制床身型长零件的弹性曲线，可利用图象检查平直度的同样方法进行。测量弹性位移的手段参见第1.2节。

在真实机器上和模型上进行刚度的研究。在真实机器上进行研究，其结果最接近于实际情况，然而，对于那些尚未制造出来的金属构件来说，这种试验将得不到结果，而且难于进行个别构件和个别参数影响的对比试验。在进行模拟试验时，通常认为一些最简单的模型要比一个通用的模型更好些，因为它可以单纯地研究一些需要研究的因素。

在金属模型上进行刚度试验时，要求施加很大的载荷和需要有很精密的测试手段。在保持几何相似的条件下，弹性位移将在不超过材料比例极限的加载条件下随着模型尺寸的减小而减小。所以弹性模数小而比例极限相对高的材料是最理想的模型材料。有机玻璃就是这样的材料。它还具有工艺性好的优点，容易加工且能用胶水很好地粘合，胶水的弹性模数与聚异丁烯酸玻璃的弹性模数差别不大。当使用由聚异丁烯酸玻璃制造的组合模型时，必须考虑到，聚异丁烯酸玻璃对聚异丁烯酸玻璃的摩擦系数为0.5—0.6，亦即它比金属对金属的摩擦系数大得多。在对不同弹性模数的元件组成的结构进行模拟试验时（例如带有基础或带有条形车间混凝土基础的机座）应根据所要求的弹性模数关系来选择塑料。

### 1.1.5 热变形实验

为了评定摩擦部件的工作能力、机器的耐热性和精度必须研究温度场。温度所以会影响摩擦部件的工作是由于温度的变化会使其间隙改变、会使油的粘度急剧地改变、会使材料表面层的性质，特别是干摩擦系数改变。在高温情况下，材料的机械性能会降低及发生热脆和蠕变。因此，热变形对测量机械、精密机床和其他机器有着极其重要的影响。

众所周知，测量机器零件的温度，可使用液体温度计、热电偶和电阻式温度计。

当热过程缓慢和温度计的球部与被测介质接触良好时，宜使用液体温度计。为了得到这种良好的接触，通常在测量的地方钻一些插温度计的孔，以油或水银注满孔中，或者把温度计放入油池中（温度计的球部——装有水银的温包，必须完全浸入油中）。

使用热电偶测量零件温度是最通用的方法。在由两根以末端熔接或焊接的不同种类

金属导线组成的热电偶中，由于温度的变化而产生电动势。在变温过程和要求测量装置具有小的热惯性的条件下以及在安放液体温度计不方便的情况下使用热电偶测量温度。研究机器零件时首先会碰到0—150℃范围内的温度，为此，使用下面的一些材料做热电极是最合适的：铜-康铜(100℃时的电动势为4.1mV)，铁-康铜(100℃时，电动势为5.2mV)和镍铬合金-康铜(100℃时，电动势为6.6mV)。把热电偶的热端焊在零件上，以柔软的，通常用铅制的薄片压紧，用粘合剂或粘土粘封，或者浸入媒质中，热端作成扁球形，以保证和零件很好的接触。有时将热电偶作成热触偶的形式，能在停车后马上就测量出零件的温度。将热端制成薄片状，它具有最小的热惯性。热电偶的冷端和测量热电动势的仪器导线连接。冷端应具有恒定的温度，使之不得受发热零件的影响。

常采用下列指针式仪表作为测量温度的热电动势的仪器：刻度为10mV数量级的毫伏计，刻度值为 $10^{-7}$ A的电流计或微安表。当需要测量几个点的温度时，可使用弱电流的转换开关，信号经过放大器放大后，用自动记录仪记录温度。

借助于电阻式温度计能够在较宽的温度范围内(-200—+500℃)以较高的精度测定温度。它的工作原理是，当温度发生变化时，金属和半导体的电阻也发生变化，测量出电阻值即可测得温度。传感器是缠绕在绝缘棒上的细金属线或放在夹持器内的半导体器件。借助于电位差计、电桥或电桥温度计测量温度计的电阻。

为了定性地评定发热零件的温度场，可用热灵敏涂料。用这种方法评定温度的精度低于温度计和热电偶的测量精度，约在±5℃的范围内变化。所测温度范围为30—300℃，或更高。有代表性的应用范围是热力式发动机的汽缸型零件，这些零件往往被加热到很高的温度。

热变形的测量类似于弹性变形的测量，但是必须考虑到夹具和测量工具本身亦可能发热。

### 1.1.6 振动实验

测量振动可使用机械的、光学的、和电气的测量方法。

用杠杆系统放大位移量的机械式测量手段，仅在重型机器零件的大振幅低频振动中还保持着有限的使用价值。

光学仪器应用的也较少，仅局限于用在一些零件周围有多余的空间能装置光学仪器并通过光线的场合。使用光学仪器远不如使用电气仪器方便。

电气仪器应用得最广泛。当以零件的强度为出发点来研究振动时，应用电气仪器便于直接记录零件中的应力。这时使用粘贴电阻应变传感器是最合理的。研究人员常常对振动时的位移感兴趣。这时当然使用能对位移作出反应的传感器，亦即根据位移校准了的电感式、电容式和电阻应变式的传感器。也可使用能对速度作出反应的电感式传感器，而能反应加速度(力)的传感器是压电式传感器。借助于这些传感器，同时利用专门的电气积分装置，能直接记录位移曲线(尽管积分时必然会带来某些误差)。

借助于地震仪型的仪器能测量一个零件或零件上一点相对于另一个零件的相对振动，或零件的绝对振动的位移和速度。测量相对振动具有很大的意义。因判读绝对振动的记录是困难的。



激振器亦即产生周期性激励的装置对于研究振动具有极重要的意义。研究振动时，使用激振器把集中的激励加给试验对象，或把激振器装在试验对象上，亦可把对象放在振动台上。激振器对被研究振动系统的特性，首先是质量，不得有大的影响。激振力对频率的独立性是很重要的。然而，这个条件不是所有的激振器中都能满足的。

常用的激振器有：

最简单的带有旋转载荷的离心式激振器，旋转载荷是由偏心重物产生的；

载荷沿轴线作用的离心式激振器，载荷是由配有对称布置的偏心重块的两个啮合齿轮产生的；

内部加载的凸轮式激振器，凸轮做成具有平滑廓线的星轮形状，在星轮上装有由弹簧压紧的滚子；

使用变频电源的电磁铁型的电磁式激振器；

电动式激振器；

电力液压式激振器。

离心式激振器最简单，但由于它们难于以高速工作，以及离心力与速度的平方成比例地增加而会使共振曲线失真，因而在相当大的频率范围内试验时要更换重物，所以使用受到限制。

电磁式、电动式和电力液压式激振器是最有发展前途的。电气激振器可实现最高频率的加载。然而这种电气激振器很重，而且具有较大的轮廓尺寸。但是，它们的可动部分能够做得很轻（环状线圈或轻型线圈），这是很重要的，因为这样就能避免消耗相当大的，用于克服振动零件的惯性力和当量质量变化的功率。电力液压式激振器的轮廓尺寸较小。

振动系统的参数用计算的或实验的方法确定。质量和质量的惯性矩大多用计算的方法确定。刚性的确定参见本章第1.6节。到目前为止计算法还未能包括振动能耗(阻尼)的所有形式。因而，实验测定阻尼的问题是亟待解决的。为了解决自振、临近共振点的强迫振动和许多其他的动态稳定性问题，有关阻尼方面的知识是特别需要的。

可用下述任何一种方法确定振动的阻尼：

依据自由振动的衰减测定阻尼。对弹性变形系统实行突然卸载并把自由衰减振动记录下来。突然卸载可用“破坏”法实现，例如所谓的玻璃炸滴（凝结的玻璃滴）法，载荷通过玻璃炸滴来传递。当斩断其锐利的突出部时，炸滴立即破碎。缓慢加载后的突然卸载可用具有锐边的和向径突变的凸轮实现。依据衰减振动测定阻尼是最简单、最经济的方法；

根据共振曲线的形状测定阻尼。用激振器变化载荷的频率来绘制幅-频共振曲线。共振曲线越宽，系统中的内摩擦愈大；

根据振动的能量耗散测定阻尼。试验宜在共振的条件下进行。首先用实验方法确定共振频率。在这个频率下把振动的振幅和激振器输出的功率记录下来，从输出功率中减去激振器本身和振动装置耗散的功率，而后两者的功率则用对阻尼很小的试件进行试验的方法确定；

根据周期性变形产生的热量测定阻尼。被耗散的能量变为热量，能用测热法或直接