

机械零件试验机与试验台

С. П. Л. Н. 列謝多夫 等著

МАШИНЫ И СТЕНДЫ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
ДЕТАЛЕЙ

机械工业出版社

机械零件试验机与试验台

〔苏〕Д. Н. 列谢多夫 等著

傅懋年 黄华梁 译

傅懋年 校



机械工业出版社

本书介绍了有关机械零件试验的一般问题,并详细论述了按零、部件的各项基本准则进行试验研究的方法。同时对齿轮、带、链等机械传动,滚动轴承、滑动轴承、联轴器与离合器的试验方法、加载方式、测试手段和试验机、试验台的结构方案亦作了比较详细的介绍。

本书对机械专业的科研、设计人员以及工科院校的实验室工作人员、教师及研究生均有参考价值。

**МАШИНЫ И СТЕНДЫ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
ДЕТАЛЕЙ**

Д.Н.РЕШЕТОВ

МОСКВА • «МАШИНОСТРОЕНИЕ» • 1979

* * *

机械零件试验机与试验台

〔苏〕 Д.Н. 列谢多夫 等著

傅琳年 黄华梁 译

傅琳年 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 • 新华书店经售

*

**开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ • 印张 $12\frac{1}{4}$ • 字数 324 千字
1985年12月北京第一版 • 1985年12月北京第一次印刷**

印数 0,001—5,380 • 定价 3.60 元

*

统一书号: 15033 • 6029

译 序

从技术的观点来看,设计、工艺及试验研究是发展机械工业的三个主要的、基本的方面。而开展机械产品及其零、部件的试验研究是不断提高机器制造业水平的最可靠、见效最快的途径。

在现代的产品设计和科学研究中,大都采用理论计算与试验研究紧密结合的方法,而这时的试验研究工作仍然占有相当大的比重。因此试验研究的水平在一定程度上标志了机械工业的水平。开展试验研究对我国机器制造业的发展具有实际的和重要的意义。

《机械零件试验机与试验台》(《Машины и стенды для испытания деталей машин》)一书主要介绍和分析了齿轮及蜗杆传动,行星及谐波传动,链、带传动,滑动和滚动轴承,联轴器与离合器的试验方法、加载方式、测试手段、试验机与试验台的结构方案。内容比较丰富。其中的某些试验原理及方法对于非标准零部件及非常规的开发性的试验研究也是有用的。

希望此书中译本的出版能对我国机械专业的设计和研究人員、生产部门的工程技术人员、工科院校的教師以及研究生有一定的参考价值。亦希望有助于发展我国机械产品及其零部件的试验研究工作。同时希望对我国高等院校机械零件实验室的工作有所促进。

本书共分八章,第一至三章由黄华梁译,第四至八章由傅楦年译。全书由傅楦年作了文字及技术方面的统一、整理和校订。

由于水平有限,望读者指正。

译 者

1984年5月

目 录

第一章 机器零件的试验	1
1.1 概述	1
1.2 单个参数的测量	5
1.3 零件精度的试验研究	12
1.4 摩擦损失的试验研究	14
1.5 强度的试验研究	16
1.6 刚度的试验研究	20
1.7 摩擦与磨损的试验研究	22
1.8 温度场及热变形的试验研究	25
1.9 振动的试验研究	26
1.10 无损检测	29
1.11 科学的试验计划	30
参考文献	34
第二章 齿轮传动和蜗杆传动	36
2.1 接触强度、胶合及磨损试验	36
2.2 弯曲强度及刚度试验	44
2.3 变载荷下的弯曲及接触疲劳强度试验	45
2.4 动态试验	47
2.5 减速器的试验	49
2.6 测定效率的试验	51
2.7 试验台结构的选用介绍	55
参考文献	113
第三章 行星齿轮及谐波齿轮传动	118
3.1 概述、试验的种类及任务	118
3.2 试验台简图	118
3.3 行星和谐波齿轮减速器的效率	125
3.4 行星传动中行星轮间和沿齿长的载荷分布	128

3.5 谐波齿轮传动中同时啮合的轮齿数, 载荷沿齿长的分布	132
3.6 谐波传动中谐波发生器上载荷的测定	141
3.7 传动从动件位置误差的测定	151
3.8 试验台驱动功率的确定	157
3.9 电磁粉末制动器类型尺寸的选择	158
3.10 扭力轴及弹性测试元件参数的选择	159
3.11 典型试验台	165
参考文献	171
第四章 链传动	174
参考文献	188
第五章 带传动	189
5.1 试验台的方案	189
5.2 封闭回路试验方法	194
5.3 三带轮传动的试验	203
5.4 带传动的滑动试验	210
5.5 试验机与试验台	219
参考文献	234
第六章 滑动轴承	236
6.1 试验方法	236
6.2 试验机的分类	246
6.3 测试手段	282
6.4 轴承试验机结构的选择	290
6.5 本书未载入的一些有关滑动轴承试验机的书刊索引	291
参考文献	293
第七章 滚动轴承	298
7.1 普通滚动轴承的可靠性及寿命试验	298
7.2 评定轴承极限转速的试验	313
7.3 在高温和较高温下轴承的热稳定性试验	314
7.4 润滑剂及润滑装置的试验	315
7.5 轴承的专门试验	315
7.6 试验机	316
参考文献	340

第八章 联轴器与离合器	342
8.1 联轴器试验的种类及其试验台	342
8.2 制动式或封闭式加载的联轴器试验	344
8.3 在联轴器不转动的试验台上进行静态和动态试验	348
8.4 离合器和自作用联轴器的试验形式及其试验台	351
8.5 嵌入式离合器的试验	353
8.6 摩擦离合器中摩擦副特性的测定	354
8.7 许用闭合频率及热负荷的测定	355
8.8 电磁离合器的试验	357
8.9 安全联轴器的试验	358
参考文献	386

第一章 机器零件的试验

1.1 概 述

机器及其零部件的试验，是机器制造业取得技术进步的强有力的手段。

不借助材料的试验特性而仅靠固体物理学方面的知识从理论上计算零件的强度是不可能的。应用材料力学的方法固然可对杆件及板、壳零件进行相当精确的计算，但对形状复杂的现代机器零件来说其计算往往与实际不符。零件通常处于复杂交变的和非稳定的应力状态，且常工作在腐蚀性介质中。

机器零件温度的精确计算仅得到有限的应用，因为这些问题是要用类似于弹性理论那样的复杂方程组来描述的。

为了保证耐磨性，机器零件的两摩擦表面应被油膜隔开。然而，用于计算液体摩擦副的流体动力润滑理论的经典方法，在许多情况下是不能满足要求的。因为它们没有考虑到零件的加工误差和弹性变形、摩擦表面的温度和润滑油粘度的变化等等。由于对实际粗糙表面的流体动力润滑问题，油膜与材料表面的相互作用问题尚缺少足够研究，目前的磨损理论用于估算实际工作条件下零件的工作寿命尚达不到所要求的精确度。

所以，这种把试件的试验结果用在真实零件上的机器零件的理论计算是不够的，而真实零件的试验则具有越来越大的意义。

试验对保证机器的可靠性特别重要。机器可靠性和寿命的使用观察，只有通过长期的使用才能从统计学上表明是可靠的。目前认为，对国民经济至关重要的机器可靠性研究之所以停顿不前，就在于还不能按照使用观察准则进行快速试验。

全套机器试验按这样的顺序进行：由零件到部件，由部件到整机，由实验室试验到现场试验、试运转试验和连续运转试验。试验的规模取决于机器的重要性和用途，它的强度，磨损度和生

产量。在全部试验中，都应当评定试验的精度和保证结果可靠。

按照机器零件的工作能力和可靠性的基本准则对它们进行精度、摩擦损失、强度、刚度、耐热性、耐磨性和抗振性试验。

零件试验可在试验装置上进行，以便使用相对便宜的试件、进行超载快速试验和精确测试；或在更接近于使用条件下的实际机器及其部件上进行。

试验装置上的试验具有普遍的意义。在真实机器中的试验可很方便地按照精度、刚度和抗振性准则进行而不损坏零件。

试验分为短期的和长期的。短期试验可确定试验对象当时的状态，而在长期试验过程中可检测随时间而变化的状态。短期试验尤其是测试需要有一段时间以使系统达到热稳定状态。按照初始精度、单位负载下的强度、刚度和抗振性准则进行的试验属于短期试验，而疲劳、磨损和腐蚀则属于长期试验，试验一般要进行到破坏或失效为止。

为了按照极重要的散布指标（其中包括强度储备散布指标在内）试验机器零件，必须利用统计学的方法。选样（即应受试验的产品数量）应当有足够的代表性，它取决于产量的规模、产品及其试验的价格、技术指标的散布等等。

可靠性试验和按照与损伤累积有关的所有准则的试验，都需要长时间。认为由于不能快速评定可靠性，因而给保证设备必须的可靠性这一首要任务带来了困难。所以快速试验是个很迫切的问题。加快试验速度有下列基本途径（或是多种途径的组合）：

- 保证试验的不间断性；
- 提高加载频率或滑动速度；
- 增大载荷或从载荷谱中取消一些对寿命无影响或影响微小的载荷；
- 加剧环境介质（污染物、腐蚀物等）的作用；
- 提高测量精度；
- 利用统计学的方法和已掌握的规律处理试验结果；
- 采用科学的实验计划。

快速试验时，零件的损坏特征务必保持和使用情况一致，当确定可能的超载规范时，这是必不可少的条件。快速试验用于对比试验和检查产品质量稳定性时特别方便。当利用快速试验评定寿命时，必须在使用观察与长期试验的结果对比的基础上确定换算系数。

完整的寿命试验，常是将抽样组中的全部成品试验到破坏为止，从而得到寿命分布曲线。而缩短期限的试验只是将组中 $(100 - \gamma)\%$ 的成品进行试验，其中 γ 为寿命有保证的成品百分比。或是只试验若干个成品，直到足以对成品质量作出结论，或是求出平均寿命为止。

大型零件的试验是昂贵的，需要大的功率和大的实验室面积，因此，相当大部分试验用缩小尺寸的试件进行。为了转换为真实零件而利用相似原理，以及为了确定尺寸因素的影响而进行专门的研究。

当长期试验能够在试验机上进行时，常采用内加载原理。在做减速器和变速箱传动试验时，由它们本身组成封闭系统（图1.1）。封闭系统借助弹性元件的变形（通常是扭力杆的扭转）或液压的方法（很少用气动方法）实现封闭加载。近来，封闭加载法在有滑差的传动中成功地得到推广（参看第五章）。用改变封闭系统中一个传动的传动比的办法可以迫使滑差率变化，从而使载荷得到调整。其中，在试验三角带传动时，这可将一个带轮做成可以拉开的来实现。试验联轴器时，半联轴器安装在空心轴上，使系统封闭的扭力轴由空心轴中穿过。试验丝杠—螺母传动时，一根丝杠采用两个螺母，靠两螺母间的弹簧的压力加载。试

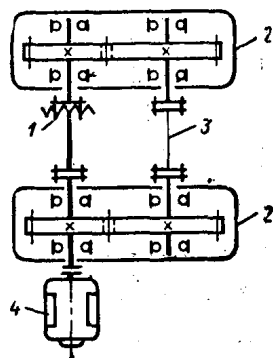


图1.1 试验齿轮部件
的封闭回路

- 1—加载联轴器 2—被试装置
3—扭转轴 4—平衡电动机

4

验轴承时，可用轴承之间的轴向推力形成载荷。

封闭加载的试验（采用封闭系统）具有如下优点：

驱动功率仅被用在克服摩擦力上，即可在试验机上用小功率电机和小的功耗进行大功率机器零件的试验，

可精确地测量摩擦损失。

甚至象透平减速器这样的大功率装置也用封闭回路法进行试验。试验装置宜采用静定结构（除确定运动和位置所必须的约束以外，无多余的约束）。这样可以减小由于系统中初始位移和弹性位移所造成的误差。

用试验方法测定研究对象的参数可用直接测量法（例如，尺寸），和使系统处于平衡状态时的测量（例如，用普通磅秤称重，借助于惠斯登电桥进行电测）。用试验方法确定研究对象所受的作用时，亦可根据对象受到作用后产生的结果进行（例如，可根据研究对象的弹性变形测定力）。

高温和低温时的试验，在专用箱中以加热或冷却被试零件的方式进行，为此，在机器中应安排设置专用箱的地方。加热用电流，而冷却则使用由杜瓦真空瓶处理过的氮气，并利用温度自动调节器调定温度。有时候则将液态氮注入专用箱腔。现有一种通用低温箱（室），但是利用它们试验机器零件是不经济的。

由于试验机多是小批和单件生产的，因而统一它们的定型元件、以及在机器中应用标准元件、大批和大量生产的机器元件、标准器材，从经济上来说，是特别有利的。用于试验通用机器零件（齿轮、蜗杆、链和带传动、轴承、联轴器、紧固件、弹簧和板簧、密封等）的机器和试验台应当集中制造，而用于试验个别部门的特殊部件的试验台应当在该部门范围内集中制造。

试验机器零件时测量参数的方法，可分为机械的、气动的、光学的和电气的。

在需要改变常量参数或缓慢变化的参数时，宜使用较简单的方法——机械法或光学法。气动法是非接触式的。测量迅速变化的参数以及自动检测尺寸时，最好采用电测法。它的优点是惯性

小，由于传感器的质量和尺寸小而对测量对象的影响小，能远距离测量，借助于示波器等仪器可方便地记录结果，容易实现自动化等。采用电气微分和积分装置可以根据所测量的位移显示记录速度和加速度，或者相反。

试验时，由于不可能完全再现使用机器时的真实条件以及贵重产品的试验费用高，人们才认真地把注意力集中在使用观察上面。观察应当由用户和厂家共同进行，且认真的确定故障，零件服务期限，工作性能降低指数。拟订符合用户要求的机器使用说明书。使用观察要有足够的试验规模、试验期限和结果的统计处理。

教学试验在机器零件的试验中占有特殊的地位。其要求如下：能验证基本原理；试验结果直观；必须在一节课内完成试验；试验装置的外廓尺寸小；试件便宜。

1.2 单个参数的测量

试验机器零件时，一般需要测量：

位移量和变形量（弹性的和塑性的位移和变形，油膜厚度，振幅，精密分度的位移）；

转动和移动的速度；

力和扭矩。

位移（不变的或很缓慢的位移）用标准的长度测量仪测量，这些仪器应具有如下特性：

	刻度值(mm)	测量范围(mm)
千分表	0.01	5~10
	0.002	2
	0.001	1
千分比较仪	0.005	±0.15
	0.002	±0.06
	0.001	±0.03
千分尺	0.005	±0.15

米克罗卡特计(микрокатор) 0.0002 $\pm$ 0.06

具有给定测量基准的弹性和塑性位移用应变仪测量。如同位移和变形的所有测量手段一样,应变仪分为机械的、光学的、气动的、声学的(振弦的)和电气的。

机械应变仪利用机械杠杆、组合杠杆和齿轮—齿条传动来放大所测量的位移。放大系数为100~2000。

光学应变仪利用光学杠杆或干涉仪原理,它的灵敏度高,但在通用性和使用方便性方面不及电气的。这些仪器仅在实验室条件下使用。

气动应变仪是根据间隙变化时通过喷口的空气流量的变化和产生相应的压力降的原理设计的,其压力用压力计(常用充水的U型管压力计)测量。放大系数可以很大。作为非接触式的气动式仪器,包括用于测定旋转轴位移的仪器在内,是很方便的。它的刻度值从0.2到2 μ m。

振弦式应变仪的原理是被测零件的变形引起振弦张力的变化,从而改变了振弦的固有频率。

试验机器零件时最广泛地采用电测量位移的方法亦即电气应变仪,它的原理是测量电感、电容和电阻。

电感式传感器(图1.2 a)由铁芯、衔铁和感应线圈组成。当衔铁移动时,线圈的电感和仪器磁路的磁阻抗发生变化。为了测量小的位移(包括小基准上的弹性位移在内),采用衔铁横向移动的传感器。在传感器结构允许时,用两个铁芯间衔铁差动位移的方式以提高灵敏度和扩大特性的线性段。为了测量不大于几毫米的位移,采用衔铁纵向移动的传感器,它的特性曲线的线性段沿长度方向是相当大的。感应式传感器由于尺寸较大而在零件试验的应用中受到限制。

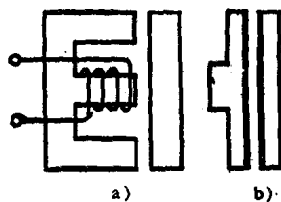


图1.2 传感器

a) 感应式的 b) 电容式的

电容式传感器(图1.2 b)是对电绝缘的薄板(电容器),在移动薄板时,电容器的电容改变。一个零件(包括旋转轴)的表面可作为电容的一个极板。这种极板横向移动的传感器主要用于测量微小的位移。对于中等位移则使用极板纵向移动的传感器。精确测量大的位移,可采用带有绝缘夹层的望远镜套管式传感器,管状极可沿轴线相对移动。电容式传感器已成功地用于包括测量滑动轴承轴颈位移的机器零件试验中。

在电测变形和位移的方法中,应用得最广泛的是应变方法。其原理是导体和半导体材料变形时电阻发生变化。在应变式仪器的应用中,占优势的要算电阻应变传感器(应变片),其敏感元件是由精细的金属丝或金属箔制成的线栅,或者是由半导体材料制成的箔片。敏感元件粘贴在纸上,箔膜上或织物上,然后把它们粘贴在被测零件上。电阻应变式传感器所以得到广泛应用是由于它们的尺寸和质量小,可多点遥测,频率和温度范围宽。

金属丝电阻应变片(图1.3 a)有由直径为 $2\sim 30\mu\text{m}$ 的精细金属丝制造的敏感元件,它为线栅型,可增大输出信号。多匝回线状线栅式电阻应变片由于它们制造简单而最通用。多匝的无环状线栅式电阻应变片由于它们几乎没有横向灵敏度的缘故而被采用。为了测量一个点的不同方向的变形,采用多元件的电阻应变片(碟状的)。金属丝电阻应变片以集中方式制造,其中包括一般用途的,其工作基长为2到100mm和阻值为20到400 Ω 的以及用于

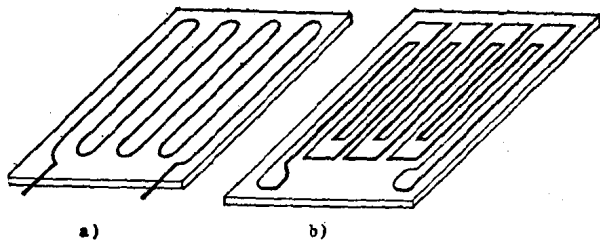


图1.3 电阻应变式传感器

a) 金属丝式的 b) 金属箔式的

低温、中温和高温的应变片。

金属箔式电阻应变片（图1.3 b）具有由厚为 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的康铜金属箔制造的线栅式敏感元件。它们比金属丝的有较高的特性指数（许用电流和输出信号大，横向灵敏度小，最小基长为 0.3mm ）。金属箔式电阻应变片的制造工艺的原理是感光化学过程。目前生产的电阻应变片有下列几种类型：有一直角线栅，但有不同抽头位置的单元件式；由两条线栅按 90° 组成的双元件式；由三条线栅组成的三元件式。

半导体电阻应变片具有厚为 $20\sim 50\mu\text{m}$ ，宽到 0.5mm 和长为 $2\sim 12\text{mm}$ 的硅、锗的单晶体或其他半导体敏感元件。半导体电阻应变片具有灵敏度高和输出信号大的优点，但变形的范围有限且温度对其特性有影响。

电阻应变片便于装入应变计、示振器和其他仪器中。

在其他依据电阻变化来测量位移的手段中，还应指出的，尚有电位差式和血压计式两种方法。在电位差式仪器中，被测位移传给电位差计的是可变电阻，所以，它们适宜测量相当大的位移。在血压计式仪器中，利用电子管作传感器，其内阻的变化取决于电极间的距离。

近来，为了精确地测量大的位移，成功地使用着激光技术。

全息摄影干涉仪是研究位移的新的强有力的方法。全息摄影术语来源于希腊字“*holos*”，其意思是“全部”。全息摄影的特点是能获得整个表面的空间位移场。被测试零件在其变形或其它位移之前和之后都在全息胶片的同一位置上感光。此时，借助胶片上的重影可得到表面上任一点的位移。确定平面的位移最方便。在一般情况下，为了确定沿三个坐标轴的位移，必须拍三个方向的干涉图象。测试可在普通加工质量的无专门镀层的真实零件和机器上进行。

此法可以得到零点几微米的高精度。大规模的检测可在专门的校准装置——转换器上进行，转换器借助于测微螺丝和楔形装置来保证精确的微小位移。

恒定角速度的测量，在一次性的运转试验中，主要使用转数计数器或离心式转速表。在低转速（不大于 100 r/min ）时，可在零件上标出白粉标记，利用秒表和直接数出零件的转数进行测量。离心式转速表精度低且须经常校准。

为了比较精确地测量角速度，特别是当有滑差时（例如在带传动中），应用频闪观测的方法。频闪观测法的原理是众所周知的，即，如果通过一个周期性被遮断的孔或借助一闪动光（其光源惯性要小）的照射来观察转动着的零件，当闪光频率与零件转动频率重合时，旋转的零件看起来好象是不动的。若两频率之差不大时，则可看到零件在缓慢转动的图象。用秒表可测出其相对旋转频率。用闪动光源或周期地被遮断的孔来观测精确的频率时，可借助频闪仪。若只测量滑差，问题就简化了，因为脉冲可由驱动轴得到。频闪观测法不及电测法方便。

特别是对于可变角速度，借助于发电机（单极机或整流子发电机）的测量，得到了广泛的应用。

由于机器转速的提高，非接触式（感应式和光电式）转速传感器得到了广泛的普及。感应式传感器可对旋转零件的导磁率的局部变化（如在小平面上，沟槽处）或局部磁化强度的变化作出反应。光学传感器可对光束的中断或不同的表面反射率引起的光通量变化作出反应。其信号被送到频率计上或综合的电气机械计量仪器上。在研究滑差时使用频率测计时很方便，这种仪器对来自两个信号源的脉冲频率进行比较。

在测量变化的速度时，信号可记录在带有时标的示波器输出纸带上。有关测量滑差的具体知识见第五章的第5.4节。

线位移速度的测量，可以预先将它变为角速度并应用上述的一种方法进行测量，或直接测量。在测量速度的直接方法中，最基本的方法是感应法，其原理是切割磁力线的线圈中会产生感应的电动势。

载荷的测量采用下述方法：

试验时人为加载的测量；

静态力的测定，例如螺纹联接、带传动、滚动轴承的预紧力，摩擦力，齿轮传动中轴向分力的测定等；

机器零件工作时的动载荷的测定，例如齿轮传动，链传动和其他传动中的冲击力；

测定整机工作时的动载荷；

测定运行中的载荷分布。

作用在机器零件上的力，在多数情况下都是通过弹性变形或位移来测量的。这是很方便的，因为根据虎克定律，弹性变形和位移与其作用力成比例。用已知力平衡被测力的方法，它类似于简单磅秤的工作原理，用得较少。平衡法成功地用于测量力矩，例如用平衡电动机测量能保证有较高的精度。

力的测量：

用通用的或专用的测力计测量，例如试验时人为加的力、切削力的测量等；

按人为地削弱了的零件（用以代替真实零件）的弹性位移来测量作用力，这是为了易于测量（在静态试验中是允许的）；

利用真实零件的弹性位移测量力（包括动态试验）。

在用于静态加载的测力计中，采用最简单的环状弹性系统（弹簧），有时可用滚动轴承的座圈（图1.4 a），及Π-形铁（图1.4 b）或框架系统。弹性系统中不应当有接口，因为它会引起非线性的和滞后的现象。同样，也不希望有焊缝。为了独立地测量作用力的分量（例如切削力），采用带有复杂弹性系统的测力计，测量手段通常是千分表或电阻应变式传感器。测量动态载荷时，主要采用

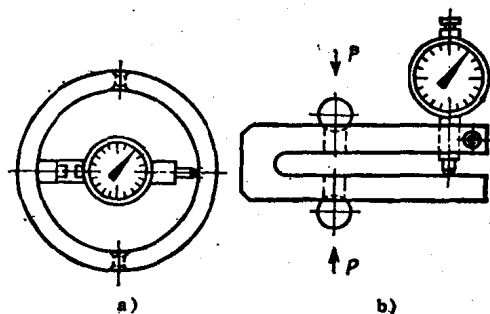


图1.4 测力计

a) 环状的 b) Π形的

的分量（例如切削力），采用带有复杂弹性系统的测力计，测量手段通常是千分表或电阻应变式传感器。测量动态载荷时，主要采用