

试验机丛书



试验机的负荷与位移 测量系统

邬显义 施纪泽 编



机械工业出版社

本书较系统地介绍了试验机中所用各种类型负荷与位移传感器的原理、结构、特点及其电子测量线路、校准方法、使用方法以及有关注意事项等。对某些常用的传感器设计计算方法及其制造工艺以及在测试当中所用的仪器原理及使用方法也作了较为详细的介绍。书中还论述了动态负荷的测量及其校验方法。

本书可供从事试验测试技术的科技人员及其有关人员参考，亦可供高等院校有关师生参考。

试验机丛书

试验机的负荷与位移测量系统

郭显义 施纪泽 编

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登记证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 12 5/8 · 字数 273 千字

1985年11月北京第一版·1985年11月北京第一次印刷

印数 0,001—2,220 定价 3.00 元

统一书号：15033·5974

前 言

试验机是在各种条件、环境下测定金属材料、非金属材料、机械零件、工程结构等的机械性能、工艺性能、内部缺陷和校验旋转零部件动态不平衡量的仪器。在研究和探索新材料、新工艺、新技术和新结构的过程中，试验机是一种不可缺少的重要测试仪器。它广泛应用于机械、冶金、石油、化工、建筑、航空、造船、交通运输等工业部门及大专院校等。对有效使用材料、改进工艺、提高产品质量、降低成本、保证安全可靠，都具有重要作用。

近年来，我国试验机和试验测试技术水平取得了较快的发展，从事这方面工作的人员也大量增多，为了适应新形势发展需要，帮助有关人员了解和掌握试验机的基本知识，我们组织编写了这套《试验机丛书》。

本丛书预定分为十一分册，其中有：《金属材料试验机》、《非金属材料试验机》、《硬度计及其应用》、《试验机的负荷与位移测量系统》、《试验机的电液伺服系统》、《试验机的环境模拟装置》、《振动试验与振动台》、《转子平衡技术与平衡机》、《超声无损检测仪》、《射线探伤机》、《电磁探伤机》，将陆续出版。

本丛书在文字叙述上力求深入浅出、简明易懂，在内容上重点阐述各种试验机的原理、结构、用途，并扼要介绍试验机的使用、试验方法、维护要点以及发展趋势等。

这套丛书是在中国仪器仪表学会领导下，在有关高等院

校、科研单位和工厂的大力支持下，由试验机学会组织编写的，很多同志为我们收集和提供了丰富的资料，并在编写和审校过程中提出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于我们的水平所限，从书中不当之处甚至错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

本书是由中国计量科学研究院总工程师蔡正平、工程师施昌彦主审。

目 录

绪 言	1
第一章 负荷测量系统	2
第一节 概 述	2
第二节 应变式负荷传感器	4
一、“应变”与“微应变”	4
二、应变式负荷传感器的结构、工作原理和特点	4
三、应变片	6
1.应变片的结构和工作原理	6
2 应变片的种类	7
3.应变片的主要参数	10
4.应变片的选用	16
四、弹性元件	19
1.弹性元件的特性	19
2.弹性元件的分类、结构 and 特点	20
3.弹性元件的材料	37
4.弹性元件的加工及热处理工艺	37
五、粘接剂	40
1.对粘接剂的要求	40
2.粘接剂的种类	41
3.粘接剂的选定	44
六、贴片工艺	44
1.弹性元件的准备工作	46
2.应变片的准备工作	47
3.贴片及固化	47
4.贴片质量检查	49

5. 防潮处理	50
七、应变片的布置和接桥	51
1. 惠斯登电桥	51
2. 应变片的布置与接桥	53
八、传感器的电路补偿和调整	54
1. 零点温度补偿	55
2. 零点输出调整	56
3. 线性补偿	57
4. 灵敏度温度补偿	61
5. 灵敏度标准化调整	63
6. 输入电阻标准化调整	63
九、传感器的外壳及附属结构	66
1. 外壳	66
2. 过载保护机构	68
3. 气压补偿机构	69
4. 连接件	70
十、使用注意事项	72
十一、弹性元件的设计计算	77
1. 柱式弹性元件	77
2. 悬臂梁式正应力弹性元件	79
3. 悬臂梁式剪应力弹性元件	79
4. 梁式弹性元件	81
5. 剪辐式弹性元件	83
6. S 型弹性元件	84
7. 圆环式及板环式弹性元件	86
第三节 其它类型的负荷传感器	87
一、电容式负荷传感器	87
二、电感式负荷传感器	88
三、压磁式负荷传感器	89

1. 工作原理及结构	89
2. 优缺点	90
四、压电式负荷传感器	91
1. 工作原理及结构	91
2. 优缺点	94
五、应变式压力传感器	94
1. 工作原理与结构	94
2. 优缺点	97
3. 设计计算公式	97
第四节 测量仪表	99
一、测量仪表的分类	99
二、动态应变仪的工作原理	100
1. 动态应变仪的典型方框图	100
2. 直流电桥和交流电桥的预调平衡	102
3. 正弦振荡器	105
4. 交流放大器	111
5. 相敏解调器	114
6. 移相器	120
7. 滤波器	122
8. 预调平衡指示	128
9. 电标定	130
10. 供桥方式的改进	132
11. 电容自动跟踪技术 (CST 技术)	134
三、动态应变仪的技术指标	135
四、动态应变仪配用的显示记录仪表	136
五、动态应变仪使用注意事项	139
六、静态应变仪	140
1. 静态应变仪的特点及分类	140
2. 手动平衡式静态应变仪	140

3. 自动平衡式静态应变仪	141
4. 数字式静态应变仪	142
七、遥测应变仪	143
八、测量放大器	144
1. 直接耦合型直流放大器	145
2. 斩波型直流放大器	148
3. 宽带交流放大器	149
4. 选频放大器	149
九、直线检波器	149
十、电荷放大器	155
第五节 负荷测量系统的技术指标和力值的传递	157
一、负荷测量系统的技术指标	157
二、示值误差的表示方法	161
1. 绝对误差	161
2. 引用误差	161
3. 相对误差	162
4. 分段表示方式	163
三、力值计量的传递系统	164
第六节 动态试验机的负荷测量和校验	166
一、动态试验机负荷测量的特点	166
二、动负荷的测量方法	168
三、峰值计	169
四、动静分离线路	173
五、动态误差的校验	175
六、动负荷测量误差的补偿	179
第二章 位移测量系统	181
第一节 概述	181
第二节 电感式(差动变压器式)位移传感器	183
一、电感式位移传感器的种类	183

二、差动变压器的结构和工作原理	185
三、差动变压器的技术参数	187
四、差动变压器的优缺点	188
五、差动变压器的测量线路	189
1. 开环线路	189
2. 闭环线路	191
3. 和、差平均值运算线路	194
六、直流差动变压器	194
七、高温差动变压器	195
八、差动变压器应用实例	197
九、差动变压器的设计	199
第三节 应变式位移传感器	202
一、应变式位移传感器的工作原理	202
二、应变式位移传感器的分类	202
三、应变式位移传感器的特点	204
四、应变式位移传感器的设计计算	208
1. 悬臂梁式弹性元件的设计	209
2. 纯弯曲梁式弹性元件的设计	211
3. 曲杆式弹性元件的设计	214
五、应变式位移传感器实例	214
1. 标准拉伸试样用的轴向引伸计	214
2. 小标距轴向引伸计	216
3. 动态应变引伸计	217
4. 径向引伸计	217
5. 夹式引伸计	220
6. 板材浅裂缝张开位移计	223
六、应变式位移传感器的测量线路	225
第四节 电位器式位移传感器	226
一、电位器式位移传感器的结构与原理	226

二、电位计电路	227
1. 原理与特性	227
2. 误差分析	229
三、电桥电路	232
四、电位器式位移传感器的特点	234
五、应用实例	234
第五节 电容式位移传感器	236
一、电容式位移传感器的工作原理	236
1. 变极板间距型电容式位移传感器	237
2. 变面积型电容式位移传感器	241
3. 变介质型电容式位移传感器	242
二、电容式位移传感器的特点	244
三、常用测量线路	246
1. 不平衡交流电桥	246
2. 平衡交流电桥	247
3. 调频式线路	249
4. 谐振式线路	249
5. 脉冲宽度调制式线路	250
四、电容式位移传感器的应用	252
1. 高精度高分辨率位移测量	252
2. 高温应变计	253
3. 差动电容式加速度传感器	254
第六节 涡流式位移传感器	254
一、涡流式位移传感器的工作原理	254
二、涡流式位移传感器的结构	257
三、涡流式传感器的测量线路	257
1. 定频测量线路	257
2. 调频测量线路	259
第七节 光电式位移传感器	260

一、光电式位移传感器的工作原理	261
二、模拟式光电位移传感器的结构	261
1.遮光式光电位移传感器	261
2.反射式光电位移传感器	262
3.光电式电位计	263
三、脉冲式光电传感器的结构	265
1.光电式角位移传感器	265
2.光电式径向变形仪	266
四、光电式位移传感器的测量线路	267
第八节 其它类型位移测量装置	269
一、旋转变压器	269
1.鉴相型	270
2.鉴幅型	271
3.线性型	271
二、感应同步器	272
1.直线式感应同步器	272
2.圆盘式感应同步器	278
3.型号与规格	278
三、磁栅	279
四、光栅	283
五、霍尔位移传感器	289
1.霍尔位移传感器的工作原理	289
2.霍尔位移传感器的结构	290
3.霍尔位移传感器的特点	291
4.测量线路	291
5.应用实例——霍尔角位移传感器	291
第九节 自动跟踪式位移测量系统	293
一、光电跟踪式测长仪	293
二、感应同步器式自动跟踪系统	296
三、自整角机式自动跟踪系统	298

1. 力矩式	298
2. 控制式	298
四、其它	299
第十节 位移测量系统的标定	299
一、名词术语及其定义	300
二、性能指标及其分级	301
1. 标距的精度	301
2. 示值精度	302
3. 分辨率	302
三、标定器	302
1. 对机架的要求	302
2. 对位移给定机构的要求	302
3. 对位移测量机构的要求	303
4. 标定器的性能	303
四、标定前的检查	303
五、指示值的标定	304
六、标定系数和定级	305
七、标定记录	306
八、实例	306
参考文献	309
附 录	311
一、力值单位换算表	311
二、压力(应力)单位换算表	312
三、从公斤力到牛顿(kgf→N)的换算表	314
四、从牛顿到公斤力(N→kgf)的换算表	320
五、中华人民共和国专业标准 UDC	
电阻应变计 ZB Y117—82	326
六、可疑值的舍弃方法(参考件)	357
七、灵敏系数标定梁表面应变的计算方法(参考件)	358

八、检定设备(参考件).....	359
九、国际标准 ISO 4965—1979 (E) 轴向加荷 疲劳试验机—动态力校准—应变计技术 1979—04—01 第一版	366
十、国际标准 ISO/TC164/SCI N50E 1981.7 试验机校验用的弹性检测装置的校准 (建 议草案第一稿)	380

绪 言

在进行各种材料及构件的机械性能试验时，往往需要测量负荷（包括扭矩和弯矩）或位移（包括变形及角位移）。在早期的试验中大都采用机械式测量装置（包括油压式和光学式等），从五十年代开始，随着非电量电测技术的发展，传统的测量方法逐渐地被电测法所取代，并且出现一些新型的试验机和试验设备，如电子万能试验机及电液伺服试验机等。在今天电子计算机和微处理机日益飞速发展和普及的时代，负荷和位移电测装置更成为必不可少的手段之一。为了使从事试验机工作的同志能初步掌握此项技术，特编著本分册。

本分册分两大部分，第一章为负荷测量系统，主要论述目前应用最广的应变式负荷传感器的原理、结构、设计、制造工艺及其测量线路。同时介绍其它几种测力传感器的工作原理和结构，以及负荷测量系统的技术指标，力值的传递、动负荷的测量和校验。第二章为位移测量系统，主要论述应变式及差动变压器式位移计的原理、结构和设计，同时介绍其它几种位移测量方法及有关线路。

在附录中，收集了若干项有关的标准及公斤力-牛顿换算表，以供读者参考。

本书根据“关于在我国统一实行法定计量单位的命令”一律采用中华人民共和国法定计量单位。

第一章 负荷测量系统

第一节 概 述

负荷也称负载、载荷，通常指力，广义来说包括扭矩和弯矩。在拉力、万能、疲劳、松弛等试验机中，以及一些结构或模拟试验设备中，都要求测量试样或构件上所受的负荷，负荷测量精度是这些试验机的主要技术指标之一。负荷测量装置一般有下列几类：

- 1) 机械式测力装置；
- 2) 油压式测力装置；
- 3) 应用电测技术的测力装置（以下简称为电子测力系统）。

机械式及油压式测力装置由杠杆、砝码或油缸、活塞、砝码等构成，将在本丛书有关分册中介绍。本分册专述电子测力系统。

电子测力系统一般由下列几部分组成（见图 1-1）：

负荷传感器 它直接感受被测对象所承受负荷的种类、大小、方向，将它们转换成电信号输出。根据工作原理，负荷传感器可以分为应变式、电容式、电感式、压磁式、压电式等。其中应变式优点较多，应用最广，本章把其作为重点详细介绍。

测量放大器 由于负荷传感器输出信号的幅度和功率一般都很小，不便直接显示记录，因此往往需要通过测量放大器加以放大。在测量放大器中，一般都还具有供桥（或激

励) 电源、调零、量程变换、电标定等环节。在某些动态测量场合, 测量放大器将动态信号变换成平均值或峰值输出, 以利显示、记录或控制。在一些大型试验中, 测试点较多, 可以在输入端配用多点巡回检测装置。

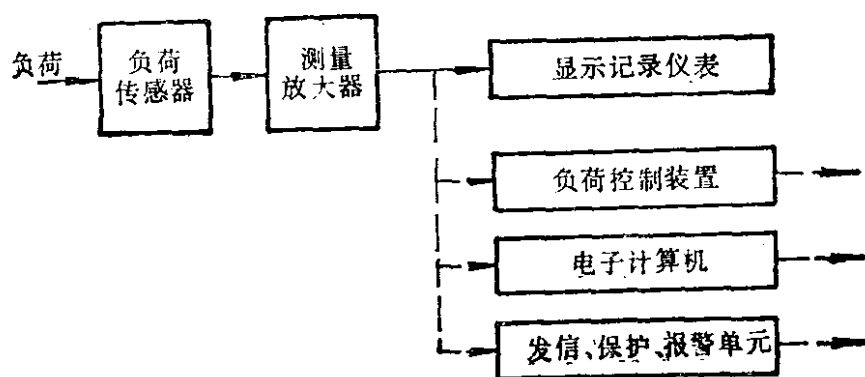


图1-1 电子测力系统方框图

显示记录仪表 显示仪表广泛采用数字式仪表。为实现自动记录或显示动态过程, 根据不同要求, 可配用笔式记录仪、自动平衡式记录仪、光线示波器等, 也可采用数字打印机、磁带记录器、阴极射线示波器等。

测量放大器的输出信号除供显示记录外, 还可输入到控制系统中去, 进行负荷自动控制。配用简单的发信单元后, 可以实现负荷定值发信、循环控制、试样破断、自动停车、过载保护、报警等功能。在近代新型试验机中, 由于采用电子计算机或微处理机, 可以综合实现负荷的自动显示、数据处理、打印、作图、制表、控制、报警等, 大大提高了自动化程度和效率。

电子测力系统的主要优点是响应速度快, 灵敏度高, 精度较高, 负荷测量范围宽, 传感器刚性好, 使用灵活方便, 可在许多复杂条件下应用, 可远距离测量, 易于自动控制及配用计算机。目前, 电子测力系统最大可以测量几十兆牛

(几千吨力)，最小可分辨 1 微牛（约 0.1 毫克力）以下力的变化。测量精度一般可达示值的千分之几，静态测量时最高可达万分之三以上；动态测量工作频率可达 50 千赫甚至 200 千赫。其缺点是长期稳定性稍差，技术难度较大；成本也较高。但随着科学技术的发展，这些不足之处必将逐步得到克服，电子测力系统必将得到越来越广泛的应用。

第二节 应变式负荷传感器

一、“应变”与“微应变”

任何物体在外力作用下均会产生变形，“应变”是表征相对变形大小的一个物理量，在线应变的情况下可用公式表示为：

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l}{l} = \frac{\Delta l}{l} \quad (1-1)$$

式中 l ——变形前物体上某两点间的距离；

l_1 ——变形后该两点间的距离；

Δl ——该两点间距离的绝对变化量。

ε 是一个无量纲的量，但习惯上需在数据后面加上“应变”或符号“ ε ”。应变可分为拉伸应变和压缩应变，分别用正负号表示。

由于工程上遇到的应变都非常小，常用分数单位“微应变”（ $\mu\varepsilon$ ）来进行计量， $1\mu\varepsilon = 10^{-6}\varepsilon$ 。

二、应变式负荷传感器的结构、工作原理和特点

应变式负荷传感器的典型结构见图 1-2，主要由弹性元件 1、应变片 2 及外壳 3 等部分构成。将应变片用粘接剂粘贴在弹性元件的变形部位上，弹性元件在外力作用下产生的应变，通过粘接剂传递给应变片上的电阻丝栅，使电阻丝栅随