

机械测量

〔美〕 T.G. 贝克威斯 著
N.L. 巴克



中国工业出版社

内 容 简 介

本书论述机械测量的基本原理,并着重介绍各种常用物理量,包括长度、位移、力、转矩、压力、流量、重量、温度、速度、加速度、频率、振动和噪声等参数的基本测试技术。著者从实际应用出发,综合了大量文献资料,对每一专题简明扼要地作了系统阐述。同时还介绍了近年来国际上机械测试技术的进展情况,并在各章末附有习题,在书末附有习题答案和重要参考文献。

本书原为美国匹兹堡大学机械工程系测试技术课程的教材,其内容可供我国高等院校一般工科专业的师生以及从事机械测量技术的工程技术人员学习参考。

Thomas G. Beckwith

N. Lewis Buck

Mechanical Measurements

2nd edition 1978

ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY

* * *

机 械 测 量

[美] T. G. 贝克威思 著
N. L. 巴克

朱钦铨 李崇豪 冼福生 许介卫 译

完定远 校 高良润 审

中国农业机械出版社出版

北京市海淀区阜成路东钓鱼台乙七号

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

*

850×1168 32 开·20²/₈ 印张·534 千字

1984 年 1 月北京第一版·1984 年 1 月北京第一次印刷

印数: 00,001—13,200 定价: 2.50 元

统一书号: 15216·188

译者的话

测试技术是工程技术和科学研究工作的必不可少的重要手段。近几年来,我国高等院校的工科专业虽已普遍设置“测试技术”课程,但是在课程内容、测试仪器和设备,以及测试程序等方面尚待不断充实提高。

本书译自美国匹兹堡大学贝克威思(T. G. Backwith)和巴克(N. L. Buck)合著的《机械测量》(Mechanical Measurement)第二版(1978年)。原书是一本适用于机械工程类专业的“测试技术”课程的教材。其内容分为两篇:第一篇着重论述机械测量的基本原理;第二篇为机械测量的具体应用,主要介绍各种常用物理量,包括长度、位移、力、转矩、压力、流量、重量、温度、速度、加速度、频率、振动和噪声等参数的基本测试技术。同时,书中还简明扼要地介绍了本领域中的一些最新测试技术和测试方法,从而可以窥见近年来国际上机械测试技术的进展情况。本书作者较为重视课程内容的具体应用和实践,因此在各章末附有必要的习题,其内容包括实验、思考题和运算题,以供读者练习,在书末还附有习题答案和重要参考文献。

本书由江苏工学院朱钦铨、李崇豪、冼福生、许介卫负责翻译(朱钦铨翻译1、5、9、12、13、14章、附录、习题答案,李崇豪翻译2、4、10、17、18章,冼福生翻译3、8、11章,许介卫翻译序言、6、7、15、16章),完定远负责校对,高良润教授负责审定。

由于本书内容涉及的知识面较广,又限于我们的业务水平,译文中有不当或错误之处,恳请读者批评指正。

译者

1982年9月

序 言

自从本书第一版出版发行以来，机械测量在实际中的应用有了长足的发展，同时在有关技术课程中这方面的内容亦有所增加。机械测量是一门内容广泛的学科。一般说来，在许多大学中，已经逐步代替原来开设的机械-动力实验课程。旧的实验方法和技术不断改进，新的试验程序日有发展。此外，“实验性设计和实验性发展”的原理用来作为解决复杂工程设计问题的合理手段，已得到普遍的承认。

本书第二版的目的和原来第一版的设想是一致的，即专门为指导攻读机械工程的大学生而编写的。不过在这里，我们把大学生设想为某工程研究部门的设计组成员，第一次承担工程课题的研究工作，因此，他们的基本任务是通过实验测量来取得数据资料，探索 and 了解机械测量方法可能出现的问题与不足之处，及其对于取得有益的结果的重要影响。至于从事实际工作的工程师，如希望进一步研究机械测量的某些特定领域，或希望全面了解机械测量的概况，本书可以作为参考书，供引导入门之用。

本书每一章都是一个重要的专题，其内容亦是一篇完整的论文，所以本书又可作为深入研究机械测量某个特定领域的入门书籍。本书所附的详尽的参考文献可帮助大学生和实际工作人员查阅自己特别感兴趣的知识。

本书象第一版一样，仍分为两部分，即第一篇，机械测量的基本原理；第二篇，机械测量的应用。为了使某些内容的表达顺序更为合理，本版对这些内容进行了重新安排。第二章中，有关基本原理部分的篇幅增加较多，其中尤以关于系统动态特性方面为最。至于在原始标准方面，时间和长度两个基本单位在1961年已经重新制订定义，这些变化在本版中已反映了。当前，与机械

测量有关的元件已经取得长足的发展，例如大量的电子管已为晶体管所取代，从而使仪表的重量更轻、结构更为紧凑而可靠程度更为良好。虽然这些内容不是本书的主要范围，但是这些变化的公认部分，也在书中作了适当的叙述。固体电路技术的出现，为应变测量开辟了广阔的光明前景，这些新技术发展概况在新增的有关章节中均有论述。关于压力和流量测量的章节，内容亦较前更加丰富了。

产生噪声的机械设备已经引起了群众和政府的极大关注，迫切需要制订有关“防止污染安静环境”的法律。根据这种情况，正确测量噪声的科学方法也就显得很重要了，所以在第二版中新增加了“音响测量”一章。

修订本的每章后面都附有习题。有许多习题内容是按实验形式来叙述的。由于各大学实验室的设备有很大差异，所以取消了专门实验的内容。

在第一版中由于疏忽大意而产生的某些错误，现已订正。但是在第二版中，错误恐仍难免。因此，衷心希望读者不吝指教，以便将其中不妥之处，及早予以更正。

最后，作者对同行和第一版的读者口头或书面提出的建设性批评和建议，非常感谢，对匹兹堡大学盖格 (G. Geiger) 和马尔戈尼 (R. Marangoni) 博士帮助阅审原稿及对梅林 (L. Malin) 女士所作的专业秘书工作亦表示谢意。

贝克威思 (T. G. Backwith)

巴 克 (N. L. Buck)

目 录

第一篇 机械测量的基本原理

第一章 机械测量的重要性	1
第二章 一般测量系统	9
2.1 什么是测量	9
2.2 测量的基本方法	9
2.3 一般测量系统	11
2.4 标定	14
2.5 灵敏度和周期的关系	15
2.6 阻尼的重要性	17
2.7 简化的测量系统的动态特性	18
2.8 一阶系统的特性	19
2.9 二阶系统的特性	26
第三章 动态信号的特征	35
3.1 输入信号的类型	35
3.2 简谐关系	36
3.3 角频率的含义	37
3.4 复合关系	38
3.5 特殊波形	44
3.6 谐波分析	48
3.7 分析方法	50
3.8 系统响应	58
3.9 特殊波形的用途	64
3.10 结束语	64
第四章 计量标准	70
4.1 引言	70
4.2 计量标准的法定情况	70
4.3 长度标准	71

4.4	质量标准	73
4.5	时间和频率标准	73
4.6	温度标准	81
4.7	电的单位	84
第五章 数理统计分析		89
5.1	引言	89
5.2	误差分类	89
5.3	术语	91
5.4	多级抽样的数据处理	95
5.5	多级抽样数据处理实例	98
5.6	一次抽样数据处理	101
第六章 传感器的基本元件		105
6.1	引言	105
6.2	信号源的负载	105
6.3	二次传感器	106
6.4	第一级装置的分类	107
6.5	机械式一次传感器元件	110
6.6	电测传感器元件	112
6.7	电测元件的优点	112
6.8	可变电阻传感器元件	112
6.9	滑动变阻器	113
6.10	电阻丝应变片	115
6.11	热敏电阻	116
6.12	热电偶	116
6.13	可变电感传感器元件	116
6.14	差动变压器	120
6.15	磁阻传感器	124
6.16	电容传感器	125
6.17	压电效应	127
6.18	光电传感器	128
6.19	电子传感器	130
6.20	电离传感器	131

6.21 电动力传感器	132
第七章 中间变换系统	135
7.1 引言	135
7.2 机械系统的主要问题	135
7.3 运动的线性	137
7.4 机械放大	137
7.5 摩擦反射放大	137
7.6 惯性反射放大	138
7.7 间隙和弹性变形的放大	139
7.8 公差问题	141
7.9 温度问题	146
7.10 减小温度误差的方法	151
7.11 普遍使用电方法的原因	152
7.12 电式中间变换装置	153
7.13 输入电路	153
7.14 简单电流灵敏电路	154
7.15 镇流电路	156
7.16 分压电位器电路	158
7.17 电位器电压平衡电路	161
7.18 电阻电桥	162
7.19 电抗或阻抗电桥	169
7.20 谐振电路	171
7.21 电子放大 (即增益)	172
7.22 电子放大器	173
7.23 电子管放大器	173
7.24 晶体管放大器	178
7.25 特种电路	180
7.26 遥测技术	186
第八章 终端设备及其种类	193
8.1 引言	193
8.2 指示仪表	194
8.3 电子管电压表	196

8.4	机械计数器	197
8.5	电子计数器	198
8.6	阴极射线示波器 (CRO)	200
8.7	电子开关	206
8.8	阴极射线示波器的记录技术	206
8.9	录波器	207
8.10	市售的通用录波器系列	209
8.11	检流计理论	210

第二篇 机械测量的应用

第九章	计数、计数率和时间间隔的测量	219
9.1	引言	219
9.2	计数器的使用	220
9.3	闪光测速仪	222
9.4	应用频率标准器的直接比较法	225
9.5	应用利萨如图确定频率和相位的关系	229
9.6	频率源的校准	233
9.7	角运动的测量	234
第十章	位移和尺寸的测量	237
10.1	引言	237
10.2	尺寸测量中的问题	238
10.3	块规	239
10.4	组配块规堆	241
10.5	平板	242
10.6	温度问题	243
10.7	块规和专用附件配合应用	245
10.8	比较仪的应用	246
10.9	用光学的方法测量长度	250
10.10	单色光	250
10.11	光学平晶	252
10.12	单色光和光学平晶的应用	252
10.13	用光学平晶和单色光进行尺寸比较	255

X

10.14	干涉仪	257
10.15	测量显微镜	261
10.16	光学仪器	265
10.17	长程干涉测量法	269
10.18	表面粗糙度	271
10.19	粗糙度测量的单位	271
10.20	位移传感器	275
第十一章 应力测量		279
11.1	引言	279
11.2	应变梯度	280
11.3	机械式和机械-光学式应变仪	281
11.4	光弹性应变规	284
11.5	电测应变规	285
11.6	电阻应变片	287
11.7	金属电阻应变片	289
11.8	粘贴型金属电阻应变片的选用与粘贴	292
11.9	金属应变片的电路原理	298
11.10	应变片镇流电路	299
11.11	应变片桥式电路	300
11.12	温度补偿	303
11.13	标定	306
11.14	半导体压阻型应变片	308
11.15	市售的应变测量系统	312
11.16	应变片的切换	316
11.17	应变片在旋转轴上的应用	318
11.18	应力-应变关系	319
11.19	应变片的合理取向和结果的处理	326
11.20	特殊问题	333
第十二章 力和转矩的测量		342
12.1	质量、重量和力	342
12.2	测量方法	344
12.3	机械式称重装置	344

12.4	弹性传感器	349
12.5	冲击式称重装置	358
12.6	液压和气动测力装置	360
12.7	转矩测量	363
12.8	传动式测功器	368
12.9	组合力和组合扭矩的测量	369
第十三章 压力测量		373
13.1	引言	373
13.2	压力测量系统	375
13.3	压力测量传感器	376
13.4	重力式传感器	377
13.5	弹性传感器	380
13.6	弹性膜片	380
13.7	与膜片配合使用的二次传感器	383
13.8	应变式压力传感器	386
13.9	高压测量	389
13.10	低压测量	391
13.11	压力测量系统的动态特性	394
13.12	标定方法	399
第十四章 流量测量		407
14.1	引言	407
14.2	流体特性	408
14.3	阻碍物式流量计	410
14.4	阻碍物式流量计测量可压缩流体	417
14.5	变截面流量计	420
14.6	流速测量	422
14.7	压力探测器	422
14.8	测量流量的特种方法和装置	428
14.9	流量计性能的预测	433
14.10	流量测量装置的标定	434
第十五章 温度测量		438
15.1	引言	438
15.2	双材料的使用	442

15.3	压力温度计	445
15.4	热电测温技术	447
15.5	热电阻元件	447
15.6	热电偶	456
15.7	线性石英温度计	467
15.8	高温测量	467
15.9	测量温度的其他方法	475
15.10	其他问题	476
15.11	温度测量装置的标定	489
第十六章 振动和冲击的测试方法		494
16.1	引言	494
I. 测量振动和冲击的仪表		494
16.2	振动计和加速度计	494
16.3	简单的振动计和振动探测器	495
16.4	简单加速度计	497
16.5	“质量-弹簧”型测振仪	498
16.6	“质量-弹簧”型测振仪的基本原理	499
16.7	“质量-弹簧”型加速度计	505
16.8	实用振动计	507
16.9	实用加速度计	508
16.10	标定	510
16.11	运动传感器的标定	511
16.12	加速度计的标定	513
16.13	“质量-弹簧”型测振仪的固有频率和阻尼比的确定	516
16.14	“质量-弹簧”型测振仪瞬态响应	518
16.15	用“质量-弹簧”型测振仪测量速度	520
16.16	振动和冲击测试	521
II. 振动试验		522
16.17	激振器系统	522
16.18	振动测试的技术规范	530
16.19	振动试验方法	532
III. 冲击试验		535
16.20	引言	535

16.21	冲击装置	536
16.22	冲击试验基本理论	545
第十七章 音响测量		553
17.1	引言	553
17.2	基本的音响参数	554
17.3	音质的关系	558
17.4	测量声音的仪器和方法	560
17.5	标定方法	566
17.6	结束语	568
第十八章 放射性同位素在机械测量中的应用		569
18.1	引言	569
18.2	什么是放射性同位素	569
18.3	放射性的种类	570
18.4	放射性同位素的来源	573
18.5	放射性的测量	574
18.6	中间装置和读出装置	579
18.7	放射性同位素电离特性的直接应用	579
18.8	用于测量密度和厚度	580
18.9	γ 射线用于射线照相	581
18.10	放射性示踪原子技术	582
18.11	安全措施	583
附录 A 应力和应变关系		585
A.1	一般平面应力情况	585
A.2	主应力的方向和大小	587
A.3	剪应力的大小与方向的关系	589
A.4	主平面的剪应力	590
A.5	根据主应力推导出一般应力公式	590
A.6	莫尔应力圆	591
A.7	点应变	597
附录 B 谐波分析法的理论基础		602
附录 C 正弦谐波和余弦谐波		604
附录 D 表		608

XIV

表 D-1	国际单位制	608
表 D-2	美国标准局推荐如下词冠和代号表示倍数和分数单位	609
表 D-3	水的特性	610
表 D-4	干空气的特性	610
参考文献		611
习题答案		631

第一篇 机械测量的基本原理

第一章 机械测量的重要性

各类工程技术部门的基本任务是设计工作。如设计各类产品，设计加工机械，设计动力机械，设计电气设备和电子仪器，设计公路、航道和排污系统，设计工艺规程和工艺装备以及选用材料等。工程技术部门还有另一个任务，那就是要保证上述设备或系统能正常工作和便于维护保养。如果某设备或系统的工作性能和经济效果都不能达到预期的要求，那么该设备或系统的实用价值^①就成问题了。工程技术部门的这两项任务都需要把测量作为手段来提供重要而必须的数据资料。没有数据资料就不能顺利完成上述两项任务。

由于测量的作用巨大，因此必须了解影响测量过程的各种因素。例如，实践中，测量过程本身往往会造成测试条件的变动，从而不易获得预期的精确数据。自然，这种影响通常可以忽略不计，但在很多情况下就不是这样。总之，对测量系统的性能了解得越全面、越透彻，则测量结果就越有价值。

测量分力学型测量和动力型测量，而与机械工程技术有关的大多数测量属于这两种主要类型中的任一种或者介于两者之间。力学型测量通常用于实验或发展程序中；而动力型测量往往作为控制系统中的一部分，一般用于监测，即运行测量。

对于动力型测量来说，其测试装置往往是生产流程系统或动力机械的必要组成部分。例如火力发电厂要能正常运行并获得经济效益，就必需连续地监测流程的各种状态。即除了测量各种燃烧情况外，还必须不断地测定蒸气压力、温度、流量、振动频率

^① 除某些科学研究或试验仪器外。

与振幅等。其目的倒不是为了进一步改进该系统，而是为了确保该系统能正常运行。所测得的量通常显示记录下来，并用来控制流程的某些部分。实际上，测量是自动化或自动控制整个领域的基础。控制一词的概念便是要求保证实际工况与要求工况之间在预定的差异范围之内。而系统的控制部分必须能分辨差异的大小和方向而作出有效的反应。

另一方面，测量可以作为一种设计手段。在机械设计时，如要妥善解决复杂问题，需要综合运用下述三种不同的设计方法或手段：(a)经验法；(b)理论法；(c)试验法。

经验法设计取决于“可靠的工程技术判断”。它的基础是各种已有的良好的资料。这些资料是从亲身观测或公认的“可靠实践”得来的，并可以归纳为“经验法则”、手册数据或设计规范等。

理论法设计，如严格应用，则要求每一设计步骤都应该以公认的科学理论或定律为依据。就机械设计而言，这些理论大多属于力学和热力学的范畴。其中比较重要的领域有：静力学、动力学、材料力学、弹性力学、流体力学和传热学等；此外还包括可以应用于设计问题的其他科学知识。

实际上，除了最简单的设计问题外，不论是单独使用经验法还是单独使用严格理论法，往往都不能妥善解决设计问题。为此，在许多情况下，这两种方法即使结合起来，往往仍不能直接解决问题。

过去，新机器在图板上设计、绘制详图，然后制造样机，接着就是“消除缺点”；在计划中往往不列试验程序，只是在万不得已的情况下才予以安排。而发展工作往往在新机器交付使用以后才开始。简言之，人们并不认为发展工作是设计过程的组成部分，而只是不得已而为之的事情。

至少对于那些现代复杂的工程设备来说，那种时代已经过去了。目前人们认为**试验法设计**不但是必要的设计步骤，而且是完成设计的有效途径。这是一种广泛的设计领域，其基础就是精确

测定各种有关联的物理量。

除试验法设计外，还可采用**发展性设计**，甚至还可采用试探法设计。然而，要认识到这种方法决不是随心所欲的，这一点至为紧要。试探必须精心实施，处理误差要有经验。事实上，这就是“研究和发展”这一术语的含意。研究和发展近来尽人皆知，常用英文缩写 R & D 来表示。

让我们用一个比较复杂的问题，即汽车自动变速装置的发展过程，来说明上述论点。这种装置可以由若干个零件装配而成，每个零件都是普普通通的，并不存在特殊的设计问题。然而，这些零件装配后，其离合、制动和齿轮换挡之间的同步，对变速装置的正常工作是极为重要的。整个部件的动作协调成为起决定性作用的必要条件。简言之，机器要能正常工作，精心设计每个零件是重要条件，但远不是充分条件。一般说来，机器性能是否正常的问题，只有在样机制成并进行试验以后才能最终解决。在经过一系列试验运转（也就是测量）后，才可能以比较现实的态度来认识整个问题。假如前景看来有希望，那么就接着进入试验阶段，来发展该变速装置（这就是试验法设计）。

图 1-1 进一步说明这个问题。该图指出研制一种新型航空发动机所需要的时间〔1〕[⊖]。请注意，在设计开始后约五个月，第一台发动机开始运转，经过试验一年左右后，才安装到飞机上进行飞行试验。只需四年的发展时间就可发运第一台批量生产的发动机。当然，精心测量并对所测得的值进行明智的判断，乃是长期试验研究的基本任务。

大家都相信凯尔文（Kelvin）勋爵的以下论点：“我常说，如果你能够测量你所讨论的事物，并且能用数值来表示，那么你对该事物就有所认识；如果你不能用数值来表示，那么你对它的认识非常肤浅而不能解决问题。可是无论如何，这总算是认识的开端，但这种认识还没有上升到科学的阶段”。发展工程技术在很大程度上取决于如何测定数据，即如何用实验方法来取得数

⊖ 括号里数字表示本书末参考文献序号。