

全国高等农业院校试用教材

农机测试技术

北京农业机械化学院主编

农业机械化专业用

农业出版社

全国高等农业院校试用教材

农 机 测 试 技 术

北京农业机械化学院主编

农业机械化专业用

农 业 出 版 社

主 编 北京农业机械化学院 丁至成
副主编 西北农学院 邵维民
编 者 辽宁农学院农机分院 徐国富
东北农学院 顾永慷

全国高等农业院校试用教材

农 机 测 试 技 术

北京农业机械化学院主编

农业出版社出版（北京朝内大街130号）

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米16开本 17印张 1插页 418千字

1983年6月第1版 1983年6月北京第1次印刷

印数 1—5,200册

统一书号 15144.649 定价 1.80 元

前 言

本教材是根据我国农业机械化专业教学计划安排编写的。

本课程的任务是介绍以电阻应变测量系统为主体的测试技术及其在农机试验中的应用、试验方法的设计、试验数据处理和测量误差分析。对近年发展起来的模型试验、模拟试验等新的试验方法和技术仅作一般介绍。

书中着重阐述电阻应变测量的基本原理和仪器、各种典型机械参数的测量方法、典型传感器的设计方法、数据处理方法以及测试结果的分析等。

由于授课学时的限制，将部分内容编入附录或采用小字排印，未列入本课程的教学计划，可供参考或作为选学内容。

在教材内容的组织和编排方面，着重于实用和对基本原理的阐述。

本书于1979年完成初稿，经过试用和征求意见，作了进一步的修改，于1980年7月定稿。在编写过程中，曾参阅了一些文献资料。除在书末所列举的参考文献外，还参阅了若干院校、研究院、所和工厂的技术资料。镇江农业机械学院冼福生、南京林产工业学院王国瑞、太原工学院施雄茂、华中工学院黄长艺、洛阳农业机械学院常佑武以及吉林工业大学、中国农业机械化科学研究院、北京农业机械化学院的部分同志曾审阅本书初稿，参加了审稿定稿工作，并提出了许多宝贵意见，给予热情的支持和帮助，谨在此表示深切的感谢。

本书是初次编写，缺乏经验，同时限于我们的思想水平和业务水平，书中难免有不少缺点和错误，恳切希望读者予以批评指正。

编 者

目 录

绪 言	1
第一章 非电量电测的基本原理	3
第一节 电测变换器	4
一、电阻变换器	4
二、电容变换器	4
三、电感变换器	5
四、压磁变换器	6
五、电磁感应式变换器	6
六、光电变换器	7
七、热敏变换器	8
八、热电变换器(热电偶)	9
九、压电变换器	10
十、霍尔元件	11
第二节 电阻应变片	12
一、电阻丝的应变效应	12
二、对制造应变片所用材料的要求	13
三、应变片的特性	14
四、应变片的类型及特点	20
五、应变片的主要参数及选用	23
六、应变片的粘贴及保护	24
第三节 电桥电路	27
一、直流电桥	28
二、交流电桥	30
三、等臂对称电桥的加减特性	34
四、不等臂对称电桥的特性	35
五、电桥的非线性问题及解决办法	37
六、应变片的温度线路补偿法	38
七、电桥的平衡装置	38
第四节 测量各种载荷时应变片的排列和接桥	40
一、拉(压)力的测量	40
二、弯曲载荷的测量	40
三、弯曲及拉(压)联合作用时的测量	47
四、剪力的测量	47
五、圆轴扭转时横断面上剪应力和扭矩的测量	48
第二章 电阻应变仪及记录器	49
第一节 电阻应变仪	49
一、应变仪的工作过程	49
二、应变仪的类型及特点	50

三、典型应变仪线路分析	53
四、应变仪的使用	62
五、应变仪的校验	63
六、测得值的计算及修正	66
第二节 记录仪器	70
一、记录器的类型和特点	70
二、光线示波器	73
三、描笔式记录仪	86
四、磁带记录器	89
第三章 动力学参数测量	96
第一节 力的测量	96
一、拉(压)力测量	96
二、空间力测量	100
三、压力(压强)测量	108
四、农机应力测量	111
第二节 扭矩、转速和功率测量	119
一、扭矩测量	119
二、转速测量	122
三、机械功率的测量	126
四、集流环	130
第三节 位移、速度和加速度测量	134
一、位移测量	134
二、速度测量	141
三、线加速度测量	144
第四节 振动测量方法概述	151
一、周期性振动频率的测量	151
二、周期振动的相位测量	152
三、机械系统固有频率的测量	152
四、振型测量	153
第五节 农机参数综合测量	154
一、耗油量传感器	154
二、速度传感器	155
三、打滑率传感器	155
四、牵引力传感器	155
五、农机综合测试仪	156
第六节 典型弹性元件的设计	157
一、设计弹性元件的一般原则	158
二、典型弹性元件的设计	160
三、传感器的检验	175
第四章 测量误差分析及试验数据处理	176
第一节 误差理论	176
一、测量误差概述	176
二、误差的种类	177
三、随机变量的分布规律	177
四、统计特征数的计算	180
五、统计特征数的应用举例	181

第二节 测量误差分析	183
一、间接测量的误差	183
二、标定误差	186
三、电测各环节产生的误差及其修正	187
第三节 随机数据处理及仪器	188
一、数据处理方法	188
二、平均值数据整理仪	195
三、数据系统	198
四、测得值规律的表达	199
第五章 农机试验设计	207
第一节 试验设计的原则	207
一、设置区组	207
二、随机化	208
三、重复试验	209
第二节 正交试验设计	209
一、正交试验设计原理	210
二、正交设计的应用	211
三、平衡不完全区组设计	214
附录	218
一、土壤(及作物)物理——机械性质的测量及常用仪器	218
二、电测车	225
三、无线电遥测	227
四、谷粒损失率监测仪表	232
五、高速摄影在农机试验研究中的应用	234
六、模型试验	239
七、快速疲劳试验	246
附表	252

绪 言

先进的农机科学技术，是农机事业发展的关键，而采用科学的试验方法和先进的测试手段，则是实现农机科学技术的现代化，加快农机研制过程，多快好省地发展农机化事业的重要措施。

农机科学研究包括理论研究和实验研究两个方面，而实验方法是研究农业机械的主要方法。这是由农机本身的工作特点所决定的。

大多数农业机械是在田间工作，工作条件恶劣；农机的主要作业对象是土壤和作物，其物理-机械性质变化很大；我国地域辽阔，自然条件复杂多变，土壤、作物种类繁多，耕作制度各异。所有这些，都给农机理论研究带来较大的困难，因此在农机科学研究中，实验具有特别重要的意义。

鉴于农机工作的特殊性，农机试验也必然具有其相应的特点：

1. 农机试验仪器应尽可能满足防尘、抗震、轻便、省电、性能稳定可靠、使用操作方便以及不使用工业电源等项要求。

2. 由于农业机械的运用必须配合农时，受季节性的影响很大，许多农机具每年的试验时间往往只有几天或者十几天。在这样短促的时间内要得到大量的、充分的、可靠的试验数据，必须有很高的试验工作效率，这对于加速试验过程，缩短农机的研究和设计周期具有重要的意义。

3. 由于农机的主要作业对象是土壤和作物，它们之间有着密切的关系，因此必须注重土壤和作物的物理-机械性质的研究。

农机试验的基本目的是：为农机理论研究和产品设计提供科学依据以及评定农机产品（整机或部件）的制造质量（是否符合设计技术要求）、工作质量（能否满足农业技术要求）、经济效益（确定农机生产效率、功率消耗）、结构强度以及使用耐久性等。

农机试验一般分为实验室试验和田间试验。

实验室试验是在人为控制的条件下对农机整机或部件进行的性能试验或结构试验。因此，它可以不受自然条件的限制，从而可延长试验时间。此外，在可控的条件下容易实现“单因子”试验，因而更便于进行精确的测量和研究。实验室试验通常在专门的试验台上进行（如土槽试验台、排种器试验台等），一般具有科学研究的性质。由于在实验室模拟田间工作条件有一定困难，因而这类试验有一定的局限性。

田间试验是在田间条件下进行的性能试验和结构试验，试验地块一般都要经过选择，使其具有典型性或代表性。田间试验可以是科学研究性质的，也可以是生产鉴定性质的。

在农机试验中，科学研究性质的试验一般是根据科研课题的要求进行的，它有着广泛的内容，在试验中往往要测量若干种参数。

近几十年来，农机试验技术有了很大的发展。从二十年代末到五十年代初，所使用的测量仪表基本上是机械式或者液压式的。随着电子工业的发展，某些国家开始在农机试验中采

用非电量的电测法,并用电测车跟踪拖拉机或其他农业机器进行田间测试,仪器基本上是电子管式的。

七十年代中期以后,由于电子技术的高速度发展,特别是大规模集成电路的应用,电子计算技术、磁记录技术、无线电遥测技术、显示技术以及快速试验技术等,也逐渐在农机试验中获得广泛应用,从而使农机试验技术的面貌焕然一新。

目前,国外农机试验技术发展的某些情况及动向,大致表现在以下几方面:

1.在仪器设备方面:向着小型化、数字化、多用化、系列化、成套化以及非接触式测量的方向发展。

2.在测试技术方面:

以自车法和遥测法取代跟踪法 随着测试仪器设备的小型化,这已成为一种发展趋势。自车法是将全部仪器设备直接配置在被测拖拉机和农机具上进行田间试验的方法。由于可以不用电测车,并且可以摆脱连接电缆的累赘,因而提高了田间试验的机动性和工作效率。

遥测法的应用进一步使农机田间试验手段现代化。利用流动遥测接收站(遥测车),可在数公里的范围内同时接收多达数十个通道的电测模拟信号,配备磁带记录器和实时计算机系统,可在田间进行试验数据的处理和分析,能立即获得测试结果。

实现试验过程和数据处理的自动化 自动化试验技术首先在内燃机等动力系统的性能试验中获得广泛应用。如利用成套测试仪器设备,对发动机多种性能参数进行测量,整个试验过程均在电子计算机的控制下自动进行。对于多点应力测量,采用自动巡回检测装置,通过电传打字机自动打印出测试结果。在试验数据处理方面,除配备专项数据分析设备以外,还广泛应用电子计算机,使试验工作效率大为提高。

发展农机快速试验技术和模型试验技术 目前已经成为农机试验的重要组成部分。如农机动态模型试验,可在实验室条件下模拟田间载荷进行机具的结构试验,主要用于强度研究。可大大缩短田间试验周期,并且不受田间自然条件的限制;模型试验多用于农机件零、部件的研究。一般是在实验室条件下,借助某些测试手段,对处于各种工况下的农机模型进行细致的观察和研究,从而探讨某些科学规律。模型试验可以解决一些用实物试验很难解决的问题,从而缩短产品的研制周期。

在大型农业机器上设置农机监视仪表 这对于提高机器的生产效率、改善劳动条件具有重要意义。目前多见于联合收割机和宽幅播种机工作的自动监视,如联合收割机谷粒损失监视和轴速监视。七十年代又出现了较先进的,能够显示单位面积谷粒损失的监视仪表。

我国从五十年代中期开始在农机试验中应用电测法。各农机科研单位和高等院校都相继开展了电测试验,如农机强度和各种动力学参数的电测试验,为农机理论研究和产品设计、鉴定提供了大量的、有价值的科学数据。目前电测技术已经在农机试验中获得广泛应用,并已初具规模和水平。群众性的农机科研与测试工作正在蓬勃发展。

我国已能成批生产多种非电量的电测仪器设备,近年来,已能生产多通道磁带记录器、遥测应变仪以及多种数字式非电量的电测仪表,并开始制造微处理机及其他专项数据分析仪器设备。

尽管农机测试技术在我国已经有了很大的发展和进步,但同世界先进水平相比,仍有较大的差距。摆在我们面前的任务是艰巨而繁重的。为了实现四个现代化的宏伟目标,我们必须继续努力、加快步伐,赶超世界先进水平,使农机测试技术更好地为科研和生产服务。

第一章 非电量电测的基本原理

农机试验中所需测定的参数，可用各种不同类型的仪器进行测量。但随着电子工业发展而发展起来的“非电量电测技术”，由于较用其他仪器（如机械式）有许多优点，故在农机试验中也逐渐得到广泛的应用。其优点是：

1. 电子仪器具有较高的灵敏度和精确度。例如用应变片可测出5微应变的变形量，对于钢材，相当于10公斤/厘米²的应力。

2. 电测变换器的尺寸小，重量轻，这在测量技术上有着突出的优越性。例如在农机上有许多待测的部位（如脱粒机滚筒轴的应力等），由于结构的限制，没有足够的空间来安装一般的测量仪器，而“电测法”则往往不受此种限制。

3. 便于多线测量和同步记录多路信号，以利分析比较。如悬挂机组的耕深、耕宽、机组前进速度等参数共需十来线，而犁架、拖拉机大梁的应力测量等，有时多达几十至上百线。

4. 可测高速变化的过程（频率高达数百兆赫）。这是一般机械式仪器不可能达到的。

5. 电信号易于传递、放大，可遥测，可将输出信号贮存起来或输至计算机作进一步的处理。

6. 电子仪器的通用性、适应性强，一般只需作少许的改变，即可对不同的物理量进行测量，对不同的环境条件（即使是非常恶劣的环境）亦能较好地适应。

“非电量电测”（简称“电测”）的基本原理是：用变换器（或称传感器）将所需测定的非电量（如拉、压力，应力，速度，加速度，位移，角度，温度和流量等）转换为电量（如电阻、电压、电感等），然后通过一定的测量电路及仪表对此电量进行测量，测得了电量，就可知与之成比例的非电量。“电测”法的测量系统，由变换器、测量电路、放大电路、显示或记录仪表、电源等组成。

变换器 是将非电量转换成电量的元件。例如在电阻应变测量中，多用应变片作为转换元件，应变片输出端的电量 ΔR ，与输入端的非电量 Δl 之间应有一定的线性函数关系。

测量电路 是连接变换器至放大器之间的全部线路。在电阻应变测量中，通常采用电桥电路，将应变片变形引起的电阻变化 ΔR ，转变为电压的变化量 Δu 。显然，两者应尽可能呈线性函数关系。

放大电路 将测量电路的微弱信号（ Δu ）加以放大。通常做成专门的仪器，如直流放大器、载波放大器、低频放大器等，常用的应变仪就是一种载波放大器。当然，也应使放大后的信号（ Δi ）与输入的信号（ Δu ）成线性函数关系。如果测量电路的信号足够大，可以推动显示或记录仪表，则在测量系统中，可以省掉放大电路这一环节。

显示、记录仪表 用以将放大的测量信号（ Δi ）用数字或曲线的形式显示、记录下来。一般分直读式和记录式两种，直读式显示仪表如毫安表、伏特表等，在专用仪器上则往往按非电量刻度，以便直接读数。在动态测量中常用记录式仪器，如记录仪、光线示波器等。显示、记录仪表的指示值，也应与放大电路的输入值（ Δi ）成一定的线性函数关系。

电源 供给测量系统以能量。

第一节 电测变换器

电测变换器可分为参量变换器和发电变换器两大类。前者是将非电量转变为电阻、电容、电感等电参量的变化，常用的有电阻变换器、电容变换器、电感变换器、热敏变换器等；后者则是通过非电量的作用产生电压或电流，常用的有压电式、热电式、电磁感应式、光电变换器和霍尔元件等。

一、电阻变换器

电阻变换器包括变阻式和应变片两类。后者在测试技术中应用最广。

变阻式变换器实际上是一滑线电阻或线绕式电位器。由物理学知，导线的电阻为

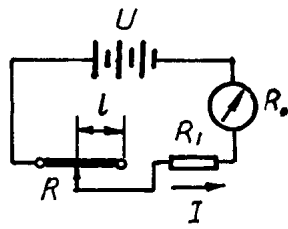
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1-1)$$

式中 R ——导线电阻， Ω

ρ ——导线的电阻系数（电阻率）， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

l ——导线的长度， m

A ——导线的截面积， mm^2



如果改变导线的长度 l ，则导线的电阻 R 就会发生变化，此即变阻式变换器的工作原理。图 1-1 是一种最简单的测量线路，当由于位移等非电量变化，带动变阻器滑动触头移动时， l 将发生变化，从而引起电阻 R 发生变化，因此也使测量电路中的电流 I 发生改变，最后由电表指示出数值。

这种变换器由于结构简单，输出功率大，故在农机试验中应用较多，例如测量拖拉机踏板和方向盘的线位移和角位移、农机具的牵引阻力等。其缺点是滑动接触点的接触电阻不稳定，易于产生误差，尤其是当变换器在振动条件下工作时，则更为不利。此外，由于变阻器的滑动部分易磨损，使其工作速度受到限制。

这种变换器在设计时应注意正确选择结构参数，以便获得较高的灵敏度和较好的线性。

二、电容变换器

电容变换器是利用电路中电容的改变来确定所测非电量的数值。根据物理学，两平板之间的电容量 C 近似地可由下式表示

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} \quad (1-2)$$

式中 C ——电容量， F

ϵ ——极板间介电质的相对介电常数

ϵ_0 ——真空的介电常数， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$

S ——两平行板相互覆盖面积， m^2

d ——两平行板间距离， m

上述电容的表达式中， ϵ 、 S 、 d 中任一参数在待测非电量的作用下发生变化时，电容 C

将有相应的改变。图1-2a表示通过改变极板间距离 d 的方法测量线位移或力 P 等,极板2固定在弹簧上,极板1固定不动,在被测力 P (或位移)的作用下,两极板间的距离 d 发生变化,从而改变了电容量 C ;图1-2b则是利用改变齿形极板相互覆盖面积 S 的办法来测定线位移;谷物或土壤的含水量不同,相对介电常数 ϵ 也不同,可据此来测定其含水量。

这种变换器的电容量一般都比较小,仅为数十到数百微微法拉。为了减少内阻和增大变换器的输出功率,必须采用高频或超高频电路。因此,测量仪器的结构和调整都比较复杂。此外,为了消除电路中导线和零件等所造成的寄生电容和外界电场的影响,导线和变换器本身都需要良好的屏蔽。

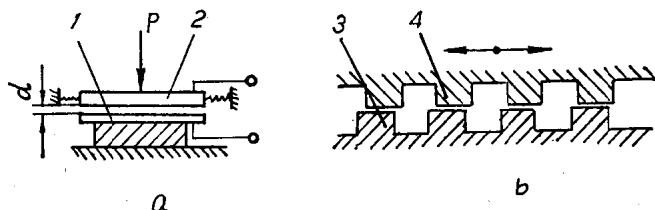


图1-2 电容变换器工作原理
1、2.极板 3.固定齿板 4.活动齿板

这种变换器的优点是灵敏度高,常用来测量百分之几微米的小位移,以及测量那些用一般方法难于测量的非电量,例如测量拖拉机或汽车行驶时的轮胎变形,以及非悬挂质量(如前桥)相对路面振动的振幅等。

三、电感变换器

根据变换原理,电感变换器可分为变磁阻式和涡流式两类。前者又可分为自感式和互感式(差动变压器)两种。

(一)变磁阻式 它是根据电磁效应原理而工作的。当线圈中通过交流电时,将产生自感电势,使线圈呈现一定的感抗,而感抗的大小与磁路中的磁阻有关,如果磁阻的变化是由待测非电量引起,则由线圈感抗的变化,可测出该非电量的大小。

图1-3a、b是自感式工作原理示意图。在图a中,铁芯上绕有电感线圈 L ,当零件2随待测非电量(如力、位移等)而移动时,使磁路中的空气隙 δ 发生变化,因而改变了磁阻,亦即改变了线圈 L 的感抗。这种型式的变换器,由于感抗和空气隙 δ 的关系是非线性函数(具有双曲线特性),以及因环境温度等其他外界条件影响较大,实际中采用较少。一般广泛采用的是图1-3b所示的差动式自感变换器。此种变换器采用电桥电路(将 L_1 、 L_2 组成电桥的相邻臂),灵敏度较高;在 δ 变化较大时,仍可使空气隙 δ 与感抗保持线性关系,而且

可以消除温度等外界因素的影响。

此类变换器的突出优点,是能获得较大的输出功率(1—5瓦),因此有时可以不用放大器而直接用一般指示仪表显示。此外,因工作可靠、使用寿命长,故常作为固定设备。在农机试验中常用它测量位移、力和变

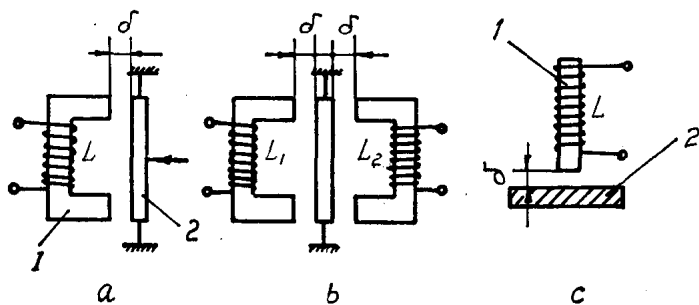


图1-3 电感变换器工作原理示意图
1.铁芯 2.零件(金属物)

形等。

(二)涡流式变换器 它的主要工作部件是一个探头,由铁芯及绕在其上的线圈 L 构成(图1-3c)。当给 L 通以高频电流时,则高频电流所产生的磁场,作用于被测金属物的表面,由于趋肤效应,在金属表面产生涡流,此涡流又产生高频磁场反作用于线圈 L ,使 L 的感抗发生变化,其变化量与探头和金属表面的距离 δ 有关,用仪器测得此感抗的变化,即可知 δ 的变化。

显然,这是一种非接触式的测量装置,其特点是:测量范围宽(适于频率由0—10000赫的线位移)、灵敏度高、结构尺寸小、便于安装、对环境的影响不敏感、测头不受磨损等。其缺点是被测表面的电磁特性不均匀时,将会造成误差,影响测量精度。目前我国已根据此种原理研制成油膜测厚仪、轴心轨迹仪、转速测量仪等,可用来测定位移、轴的振动、转速和检查加工表面的不平度等。

四、压磁变换器

某些铁磁材料(如硅钢片等)在受外力作用后,在其内部产生了机械应力,从而引起导磁系数的变化,此种现象称作“压磁效应”。压磁变换器就是利用压磁效应而工作的。

图1-4所示为一种压磁变换器的原理图。变换器的原边绕组 W_1 与副边绕组 W_2 互相垂直地安装在导磁体(由同样形状的硅钢片迭合而成)之中,原边绕组供给以交流电源 U (图1-4a)。当不受力时,原边绕组的磁力线呈对称分布,且不与副边绕组相交链(图1-4b),此时

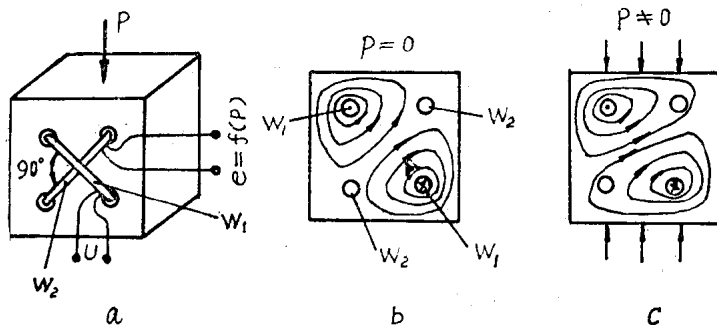


图1-4 压磁变换器工作原理

副边绕组的电动势 e 为零;当受力后材料的导磁率发生改变,受拉伸方向的导磁率增大,受压缩方向则导磁率减小,并且磁力线与副边绕组相交链(图1-4c),因而在副边绕组中感应出电动势。此电动势的大小,正比于变换器上所受的力 P 。当用仪器测得此电动势的大小时,即可得到与之成比例的 P 力的大小。

这类变换器具有输出功率大(可不用放大器)、抗干扰力强、精度高、线性好、动态响应时间短(约几十毫秒)、寿命长、维护方便等优点,在测试技术中广泛用来测量拉、压力。

五、电磁感应式变换器

电磁感应式变换器是基于电磁感应原理,即导体在磁场中运动切割磁力线,导体两端产生感应电动势(如测速发电机);或者在静止的导体周围磁力线发生变化时,静止导体两端也感生出电动势(如电磁式变换器)。

图1-5为测速发电机工作原理图。导线绕组在一永久磁铁中旋转,其感应电动势 e 为

$$e = Blv \quad \text{V} \quad (1-3)$$

式中 B ——垂直于速度的均匀磁场磁感应强度, Wb/m^2

l ——导线的有效长度, m

v ——导体的运动速度, m/s

对于成品测速发电机, Bl 是常数, 因此, 输出电压 e 仅同导体运动的速度 v 成正比。测得了 e 值, 即可知与之相应的速度 v 。

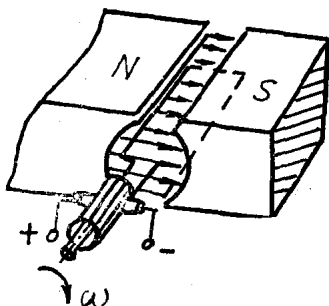


图1-5 测速发电机工作原理

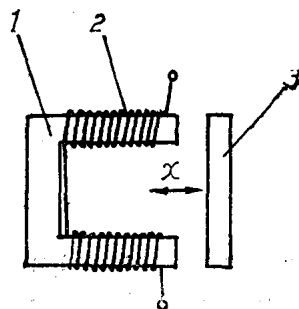


图1-6 电磁式变换器原理图
1. 磁铁 2. 感应线圈 3. 铁磁材料

图 1-6 所示为测振动用的电磁式变换器。在磁铁上绕有感应线圈（注意：图 1-3a 是在铁芯上绕有通交流电的电感线圈。结构不同，工作原理也不同），图 1-6 中 3 表示同变换器相接近的被测振动物体， x 表示它的振动方向，通常要求 3 是铁磁材料，否则应在它上边贴一铁磁材料薄片（如硅钢片等）。在测振动时，振动物体与永久磁铁发生相对运动，从而使它们之间的气隙发生改变，线圈内的磁通密度也跟着变化，因此在线圈两端产生感应电动势 e ，它与线圈内磁通对时间的变化率成正比，亦即同被测振动物体相对速度 v 成正比，即

$$e = -n \frac{d\varphi}{dt} = -n \frac{d\varphi}{dx} v \quad (1-4)$$

式中 n ——线圈匝数（ n 越大变换器灵敏度越高）

φ ——磁路最大磁通量

这种变换器的灵敏度随着磁路气隙的大小而变化，因此它的动态幅值特性不是线性的。但是，当被测振动的位移远比磁路气隙小时，它的幅值范围基本上符合线性规律。

此种变换器的最大特点是不与被测物体接触，因而没有附加质量施于被测振动物体。适于薄型结构物的振动或回转轴横向振动的测量。一个耳机即可作为此种变换器，很适用于做轴转速信号变换器。

六、光电变换器

此类变换器是依据光电效应原理而工作的。光电效应可归纳为外光电效应和内光电效应两种。当物质（金属或金属的氧化物）受到光线照射时，光的能量转变为物质内某些电子的能量，使一些电子从物质表面逸出体外，这种现象称为外光电效应；当物质（多半为半导体）受到光线照射时，内部的原子释放出电子，但这些电子只能在物质内部运动，使其导电性增加，这种现象称为内光电效应。利用光电效应做成的光电变换器，有具有外光电效应的光电管和具有内光效应的光敏电阻（光导管）、光敏管（半导体光电二极管等）和光电池（属发电类变换器）等。

图1-7为光电二极管使用时的原理图。 U 为电源（对二极管加反向电压）， R_L 是负载电阻，信号电压 U_L 就从它的两端输出。当无光照射时，二极管的两端呈现很大的电阻，而有光照射时则呈现较小的电阻。显然，回路电流和负载压降将随着光照的强弱而变化，这样就实现了光—电的变换。

光电变换器主要用于自动控制，在农机试验中也逐渐得到广泛的应用。例如种子数粒仪和播种机上的排种监视装置，就是利用种子通过时隔断光线，通过光电变换器——光敏电阻或光敏管等，形成光电脉冲，然后用计数器计数。根据同样的道理，也可用来进行转速的测量。

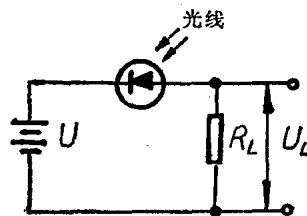


图1-7 光电二极管工作原理

七、热敏变换器

在农机测试中，常用热电阻和热敏电阻两种类型的热敏变换器。

热电阻的变换原理是：给导线通以电流，导线将发出热量，此热量的一部分使导线本身加热，另一部分则通过导线和周围媒介质的对流、传导及辐射而散入媒介质。在热稳定平衡条件下，导线的温度与下列因素有关：导线的性质及附件的形状和尺寸；导线的媒介质的温度；媒介质的运动速度；媒介质的密度和组成成分等。

由于导线的电阻与温度有关，即与周围媒介质的运动速度和组成成分有关，故可以利用测量导线电阻的办法来测量这些非电量。用于此目的的导线，即称为热电阻。常用的热线风速仪，就是利用气流速度的不同，而引起导线电阻变化的原理来测量风速的。同样可根据气体组成成分的不同，而引起电阻变化的原理来测量气体的组成成分，如各种气体分析仪等。

为了有效利用热电阻来测量非电量，在设计或使用此变换器时，应注意创造条件，使被测非电量对热电阻值有最大的影响，而其余各非测的量尽可能不影响它的阻值，并应尽量减少通过导线的传导、辐射而散去的热量。一般导线的长度 l 比它的直径 d 大得多（ $l \geq 500d$ ）时，通过导线传导的散热，可忽略不计。如果导线的温度 t_s 与媒介质的温度 t_c 的差值（ $t_s - t_c$ ）不超过100度时，导线辐射散热可忽略不计。

热敏电阻的变换原理是：半导体材料的电阻具有随温度的变化而改变的特性。利用这种特性，可以制成一种对冷热非常敏感的元件，称热敏电阻。半导体热敏电阻一般具有负的温度系数，即其电阻值随温度的升高而迅速下降，如图1-8所示。热敏电阻一般用氧化钠、氧化钴等金属氧化物制成，它可以作成球状、片状和棒状等。

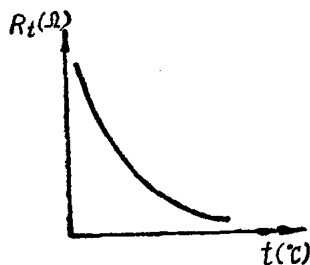


图1-8 热敏电阻阻值和温度的关系

热敏电阻现已被广泛应用于温度的测量和控制、稳幅及稳压、液面测量、气压测量、风速测量、红外探测等方面，图1-9是其测温的典型线路图。图中 R_t 为热敏电阻， R_2 为满刻度电阻， R_7 、 R_8 、 R_9 为分压电阻， R_6 起限流作用， R_5 为灵敏度补偿。也可以改用自动记录装置来代替微安表，这样可记下温度的连续变化。显然，微安表的指针偏转，可以反映出被测温度的高低。如果事先用试验方法测知温度和微安表读数的对应关系，并标注在微安表的刻度盘上，测量时即可直接从微安表上读出被测温度。

图1-10是利用热敏变换原理制成的两种风速计原理示意图。热电阻（又称热线）通常是

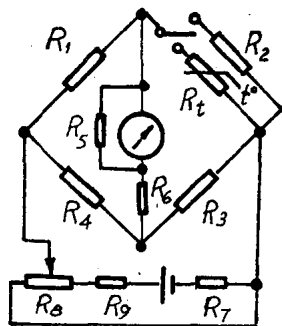


图1-9 热敏电阻测温原理

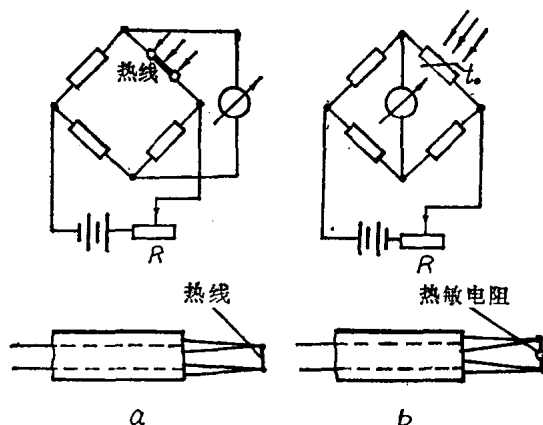


图1-10 热线、热敏风速计原理

用直径0.1毫米的铂丝或镍丝做成，测量时气流与热线方向垂直，测量热线电阻有定电流法和定电压法两种，定电压法是保持电压一定时，测量电流的变化（定电流法与此相反）。图1-10a是采用定电压法的桥式电路，此法的特点是在电流计中没有加热线的电流直接通过，故可使用灵敏度高的检流计，精确地测出热线电阻的微小变化。

热敏风速仪是采用球形热敏电阻作为传感元件（图1-10b），由于它具有很大的温度系数，故测量灵敏度较高，其缺点是热容量较大，对风速的响应特性不如热线式的好。

这两种风速计的缺点是：输出电流与风速之间并非线性关系，随着风速的提高，其测量灵敏度将降低；此外，测量值显然还与气流温度有关。故目前国内外研制的此类风速计，一般都采用线性补偿及温度补偿电路措施，可以成功地测定低至每秒零点几米，高至每秒近百米的风速，由于传感器可做得很小，故可测分布很密各点的风速。

八、热电变换器（热电偶）

热电变换器是将温度量转变为电势量的一种转换元件。它和直流电位差计、毫伏计、电子电位差计等配套使用，是测试技术中广泛使用的一种测温装置。

当两种具有不同化学成分的导体（图1-11a、b）接触时，由于自由电子的差异，在其接触面上，分别出现等值异号的电荷（图1-11a），因而产生“接触电势”（又称接触电位差）。接触电势与温度有关，温度不同接触电势也不同，如果两接触点1与2处于相同温度，则它们的闭合电路中没有电流，若把接触点1（热端）加热，或把接触点2（冷端）冷却（图1-11b），使两接触点温度不同，则电路中就有电势而产生电流。这种现象称为“热电现象”或“热电效应”。此即热电偶的测温原理。

欲求热电偶热端的温度，可把热电偶冷端接触点分开，接入测量仪表（图1-12）。通过测量仪表G测出热电势变化，即可得到温度的变化。

为了增加热电偶所产生的热电势，常将数个热电偶串联起来使用，这种装置叫热电堆。

由于这种测温装置的感温部分是具有不同化学成分的两根导线的接触点，所以可做得很小，因而热容量小，反应快，且不会因测温装置吸热过多，而改变被测物体的温度，故适于测量一个很小范围内的温度。因此广泛地被用来测定液体、气体、固体的温度。

制作热电偶的材料很多，铂—铑热电偶可以相当精确的测温直达1400℃，所以在试验研

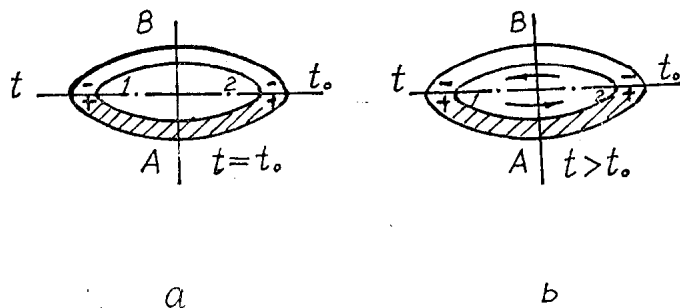


图1-11 热电偶工作原理

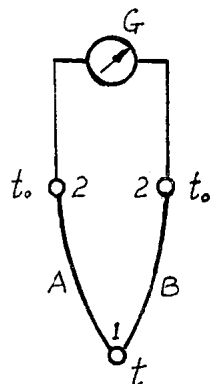


图1-12 热电偶测量电路示意图

究中广泛用来校正其他高温计量仪器；镍铬—镍铝热电偶适于测量1000℃以下的温度，可用来测定发动机排气温度、排气门温度等高温部分；铁—康铜热电偶可用到600℃左右，铜—康铜热电偶可用到300℃，适于测量发动机或农机的低温部分。

热电测温计由热电偶、测量仪表和导线组成。如前所述，接触电势的大小取决于两种金属的种类和接触点的温度，当在回路中接入第三种金属时，如果接触点的温度相等，则不影响热电势值。

一般工业用的热电偶温度计，冷端是放在大气中，针对大气温度的变化，当温度指示器用动圈式仪表时，用双金属片来移动零点；当用电子管式自动平衡仪器时，则装入感温电阻，构成基准接点温度的自动补偿电路。但当用于试验研究时，最好用0℃的冰水（冰和水的混合物）作为标准冷接点，以减少测量误差。

九、压电变换器

某些晶体（如天然石英晶体、人工极化陶瓷等）在一定方向外力作用下或承受变形时，它的晶面或极化面上将有电荷产生，这种现象称为正压电效应。压电变换器就是利用压电效应而工作的。当晶体在某一轴线方向受力的作用而产生弹性变形时，其产生的电荷 Q 与作用力 F 的大小成正比例，即

$$Q = K \cdot F \quad (1-5)$$

式中 K ——晶体的压电常数，C/kg

F ——作用在晶体上的力，kg

图1-13为其工作原理示意图，两块晶体用金属板隔开，晶体产生负电荷的表面与中间极板相接触，以便将负电势通过引线接入放大器，正极则通过外壳接地。

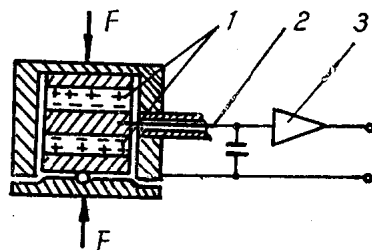


图1-13 压电变换器工作原理

1.晶体 2.引线 3.放大器

压电效应是一种静电现象，压电元件（晶体）受压时所产生的电荷，在压力消失时也立即消失。

压电变换器所产生的电量极其微弱，为了减少电荷的漏损，必须有较高的绝缘电阻，以便使电荷不致在两次受力期间流失掉，当测量动力过程频率高时，测量电路的绝缘电阻可以小些。由于测量电路的内阻实际上不能达到无穷大，电荷总要不断地泄漏以致不能测量，所以压电变换器不能进行静态测量。