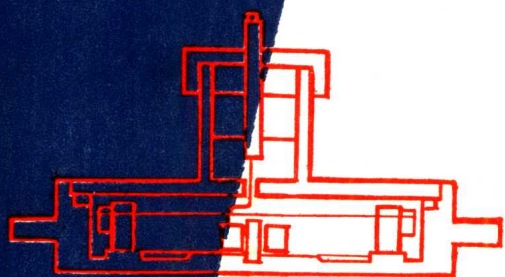


工程测试技术丛书

钢弦式传感器及其应用



中国铁道出版社

工程测试技术丛书
钢弦式传感器及其应用

刘 宝 有 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 刘曼华 封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 8.625 字数: 191 千

1986年3月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—2,000册 定价: 1.85 元

内 容 简 介

本书除绪论外共分七章。第一章叙述了钢弦式传感器的构造原理；第二、三、四章分别叙述各种钢弦式传感器的设计要点和使用方法；第五章叙述了钢弦频率测定仪的发展及多种测定仪的技术指标；第六、七两章叙述各种传感器的标定方法及其在工程中的应用。书后的附录给出了传感器受压板的计算方法和安装工艺。

本书可供从事工程测试和科学试验人员参考。

前 言

目前在铁路桥梁、隧道、线路、房屋建筑等工程结构的研究、设计、建造和使用中，为了验证设计理论、选定设计方案、鉴定工程质量和分析使用中产生的问题等，往往需要对工程结构进行静态或动态试验。测试技术，特别是电测技术，是获得各种试验数据的基本手段。此外，电测技术在机车车辆、飞机、船舶、汽车、拖拉机和各种机械设备的研究试验工作中，也得到了广泛应用。

随着我国社会主义建设事业的迅速发展，国防、工农业生产 and 科学研究部门，需要进行工程结构的试验日益增多，测试技术本身也相应地向前发展。为了便于从事工程结构和各种机械设备的测试人员初步掌握测试技术，不断总结和提高测试技术水平，铁道部科学研究院铁道建筑研究所编写了这套工程测试技术丛书。已出版的有：《电阻应变片》、《电阻应变仪》、《光线示波器》、《振动测试和分析》、《电阻式压力传感器》、《CZ测震仪与测振技术》、《模拟磁带机》、《波形和频谱分析与随机数据处理》，重点介绍了测试技术中的基础知识，传感器及测量仪器的原理、使用方法和一般维修技术。本书亦为这套丛书之一。全稿由欧阳葆元同志审阅并提出许多宝贵意见。另外在编写过程中，得到了胡中玉同志和广州铁路局科研所林培源同志的热情帮助，谨此表示衷心的感谢。

欢迎读者对本书提出批评意见。

编 者

目 录

绪 论	1
第一章 钢弦式传感器的工作原理和结构	4
第一节 钢弦式传感器的工作原理	4
第二节 钢弦式传感器的结构和特点	9
第二章 钢弦式应变传感器	25
第一节 钢弦式表面应变传感器	25
第二节 钢弦式钢筋应力传感器	38
第三节 钢弦式内部应变传感器	46
第三章 钢弦式土压力传感器	65
第一节 量测土压力的目的和特点	65
第二节 钢弦式土压力传感器的 “匹配误差”	66
第三节 钢弦式土压力传感器	83
第四节 钢弦式动态土压力传感器	107
第四章 钢弦式测力传感器及其他用途的传感器	111
第一节 钢弦式测力传感器	111
第二节 钢弦式流体压力传感器	122
第三节 钢弦式孔隙水压力传感器	126
第四节 钢弦式摩擦力传感器	132
第五节 钢弦式岩体应力传感器	134
第六节 钢弦式扭矩传感器	136
第七节 钢弦式钢轨应力传感器	138
第五章 钢弦频率测定仪	139
第一节 钢弦频率测定仪的发展	140

第二节	耳机式钢弦频率测定仪	143
第三节	直读式钢弦频率测定仪	148
第四节	数字式钢弦周期测定仪	151
第五节	GP-2 型 钢弦频率测定仪	154
第六节	JD-8 型 钢弦频率 (周期) 测定仪	155
第七节	双线圈连续激振的数字式钢弦 频率测定仪	161
第八节	DK-1 型 矿压仪	162
第九节	钢弦频率协调仪	164
第六章	钢弦式传感器主要元件的热处理 工艺及其标定方法	166
第一节	钢弦式传感器主要元件的 热处理工艺	166
第二节	钢弦式传感器的标定	172
第三节	钢弦式传感器的温度影响	192
第七章	钢弦式传感器在工程中的应用	198
第一节	传感器的选择方法	198
第二节	工程测试中的布点原则	205
第三节	传感器的埋设	206
第四节	钢弦式土压力传感器的应用	216
第五节	钢弦式应变传感器的应用	239
第六节	钢弦式其他用途传感器的应用	248
附录 I	无油腔钢弦式土压力传感器的受压板的厚度 计算	254
附录 II	改进后的 G124-N 型 钢 弦 式 土 压 力 传 感 器 的 安装工艺	255
附录 III	沥青囊的制作工艺	262
主要参考资料和文献		266

结 论

工程测试技术是实验科学的一部分，它的任务是利用现代的测试手段对所研究的工程结构物及其周围介质（岩石和土壤）的受力和变形状态，进行现场和实验室的量测。通过对测试数据的综合分析，以验证工程结构的设计理论，为工程结构物的设计提供依据。

工程中的主要力学参数包括结构物的表面、内部应力应变和接触压力以及周围介质中的应力应变等等。量测这些力学参数的方法很多，如机械法、液压法、光学法和电测法等，本书论述的为电测法中的钢弦频率法，此法具有以下优点：

1. 结构简单可靠，制作安装方便

钢弦式传感器的敏感元件是一根金属丝弦，它与传感器的受力部件易于连接固定，结构简单可靠，传感器的设计、制造、安装和调试都非常方便。

2. 零点非常稳定，适宜长期观测

传感器中的钢弦，经过热处理之后，其蠕变极小，零点稳定。在国内外的工程测试实践中证明，钢弦式传感器适宜长期观测。如北京铁道科学研究院铁道建筑研究所研制的G124-N型钢弦土压力传感器，在铁路隧道衬砌上埋设的时间已达二十余年，至今仍继续进行观测工作。据国外资料介绍，埋入坝体的钢弦应变传感器有的长达30年之久仍能继续工作。

3. 宜于多点远传，便于数字化

因为钢弦式传感器所测定的参数的主要特征是频率或周

期，所以输出电压波形幅值若有失真或衰减，对量测的结果没有影响，因此宜于远程控制和多点量测。如国内石油井孔中压力量测及海洋中深水压力的量测中，其测距均在1000m以上。法国的德来马克仪器仪表公司生产的钢弦式传感器的测距指标为3000m。另外传感器输出的频率讯号，不需要变换，可以直接进行数字显示，或者直接输入到电子计算机中做数据处理。

4. 易于解决防潮和防水问题

用于工程结构物试验中的任何一种传感器，其防潮防水问题，都非常重要。特别是对电阻应变式传感器，要求其绝缘电阻要在 $200\text{M}\Omega$ 以上，而使用钢弦式传感器，要求其绝缘电阻只有几百个欧姆，就能满足量测要求。在一般钢弦式传感器产品中，规定其绝缘电阻不低于 $50\text{M}\Omega$ 。

另外，钢弦式传感器坚固耐用，造价低廉，并且与传感器配套的钢弦频率（或周期）测定仪也小巧轻便，适宜现场使用。

由于以上优点，所以钢弦式传感器在国内外工程测试的实践中得到了极其广泛的应用。自从30年代研究成功了这类仪器仪表之后，德国的麦哈克仪器仪表公司、法国的德来马克仪器仪表公司和美国的IRAD地质技术仪器仪表公司都专门生产了多种钢弦式传感器，闻名于国际市场。国内于60年代初至70年代间，曾研制成功了多种同类产品，用于铁道、交通、水利电力、石油、建筑等部门。仅铁道科学研究院从1959年到目前为止，在铁道干线的隧道衬砌上就埋设了约两千个钢弦式压力、应变传感器。

钢弦频率法的量测系统

一般电测法指非电量电测法而言，即将工程中的力学量转换成电量进行量测的方法。实现这种转换的元件和装置叫

转换器，或叫变换器，也称换能器，还有的称一次仪表，而工程测试中叫传感器。因为经过转换后的电量非常微弱，必须配用放大器把电量放大才能驱动由测量电路构成的专用测量仪器。这样，根据需要可以通过记录仪表，记录下被测量的力学参数。然而常用的钢弦频率法的量测系统非常简单，仅由一次仪表钢弦式传感器和二次仪表钢弦频率（或周期）测定仪，即构成了力学参数的量测系统。

在工程测试中常用的钢弦式传感器有：钢弦式应变传感器；钢弦式压力传感器；钢弦式其他用途的传感器。这几类钢弦式传感器中，按照量测的力学参数的不同，可分为数种传感器，其详细情况则为本书所叙述的主要内容。

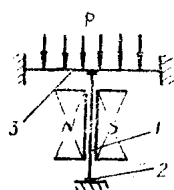
随着土木工程建筑的发展，现代钢弦频率法试验技术不断得到提高。目前国内已研制出了钢弦动态土压力传感器和钢弦岩石应力传感器，山东矿业学院研制并由湘潭无线电仪器仪表厂试制了 DK-1 型矿压仪、交通部三航局科研所与上海自动化仪表所共同研制成了 JD-1 型多路振弦仪等等。实现了多路自动巡测、定检测、自动运算、自动记录的新型测量装置。

第一章 钢弦式传感器的 工作原理和结构

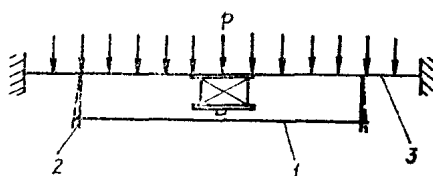
第一节 钢弦式传感器的工作原理

一、基本原理

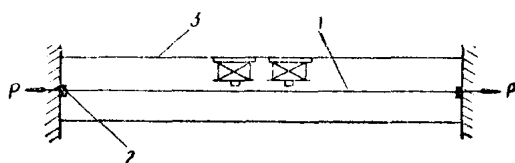
钢弦式传感器的工作原理可以用图 1—1 来说明。图 1—1 中的 1 为预先拉紧的金属丝弦，该金属丝弦在钢弦式传感器中称为“钢弦(或钨弦)”、也叫“振弦”、简称“弦”。



(a) 竖式压力传感器



(b) 卧式压力传感器



(c) 应变传感器

图 1—1 钢弦式传感器工作原理图

1 —— 钢弦； 2 —— 支架； 3 —— 受力部件。

在图 1—1 中 (a) 图的钢弦 1 被置于永久磁铁产生的磁场内，其一端固定在支架 2 上，另一端与传感器的受力部件 3 相连，且垂直于受力部件。(b) 图中钢弦 1 被置于电磁激励线圈和铁芯产生的磁场里，其两端均固定在传感器受

力部件 3 的两个支架 2 上，且平行于受力部件。而 (c) 图中则钢弦 1 置于两个电磁激励线圈（称双线圈）和铁芯产生的磁场中，被固定于受力部件 3 的两端，且位于受力部件的轴线上。对压力传感器而言，该受力部件 3 系指受压板，也叫受压膜或受力膜。当受压板受到外荷载后，则产生微小的挠曲，致使支架 2 产生相对倾角而松弛或拉紧了钢弦，钢弦的内应力发生了变化，则使钢弦的振动频率相应变化，对应变传感器而言，该受力部件 3 系指传力应变筒，当应变筒受到外荷载之后，产生轴向变形，则钢弦被拉紧或松弛产生内应力 σ_c 的大小，由待测的力学参数决定。

由于钢弦的自振频率取决于它的长度、钢弦材料的密度和钢弦的内应力。故其关系式表示为：

$$N = \frac{1}{2l_c} \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho}} \quad (1-1)$$

式中 N ——钢弦的自振频率 (Hz)；

l_c ——钢弦的长度 (cm)；

σ_c ——钢弦的内应力 (kgf/cm²)；

ρ ——钢弦材料的密度 (钢材为 $8 \cdot 10^{-6}$ kgf·s²/cm⁴)。

从式 (1-1) 可见，对于 l_c 和 ρ 为一定值的钢弦，其自振频率 N 值由钢弦的内应力 σ_c 所决定，所以 σ_c 可用 N 值来表示。由于钢弦被置于磁场中，因此它在振动时则在线圈中感应出电势 V 。感应电势 V 的频率就是钢弦振动的频率。因而测出 V 的频率就可以知道钢弦的振动频率，也就知道了待测的钢弦内应力 σ_c 的大小。

钢弦的内应力的变化为：

$$\Delta\sigma = 4l^2\rho(N_2^2 - N_1^2) \quad (1-2)$$

式中 N_1 ——钢弦原有的频率 (Hz)；

N_2 ——变化后的频率 (Hz)。

若以钢弦的变形和弹性模量 E 来表示钢弦内应力的增量, 则得:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{4l^2 \rho}{E} (N_2^2 - N_1^2) \quad (1-3)$$

或

$$\Delta l = \frac{4l^3 \rho}{E} (N_2^2 - N_1^2)$$

由式 (1-1) 看出, 钢弦式传感器的输入-输出特性曲线为抛物线 (图 1-2)。为了得到线性的输入-输出关系, 可在该曲线中选取近似直线的一段。作传感器的测量范围, 如果 σ_c 的变化范围不大, 该要求可以满足。当 σ_c 范围在 σ_{c1} 至 σ_{c2} 之间变化时, 钢弦的振动频率为 1000 ~ 2000 Hz 或更高一些, 在这一小段内, 基本上可以获得非线性误差小于 1%。根据这一要求, 为了取得特性曲线中较直的一段, 初始频率不为零, 而有一定的数值。

当待测力学参数改变时, 输出电势的频率就在初始频率附近变。为了使传感器有一定的初始频率, 对钢弦要有一定的初始内应力 σ_0 。

如果把传感器做成两根弦差动的工作方式, 当待测力学参数作用时, 两根钢弦的频率相应地变化, 通过测量电路中的

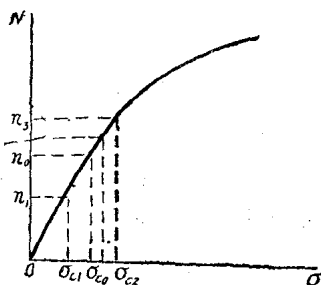


图 1-2 钢弦式传感器的输出特性

的差频电路, 以两根钢弦的频率差来表示内应力, 这样即可减少传感器的温度误差, 也可以减少其非线性误差。

二、钢弦振动的激励方式

激励钢弦振动的目的是测出钢弦振动的频率, 目前采用的激励方式有:

(一) 间歇激励法

间歇激励法如图 1—3 所示。当电磁激励线圈通入一脉冲电流时，电磁铁就把钢弦吸住。当电流断开时，电磁铁就失去吸力。因而钢弦产生张弛振动，其振动频率即为钢弦的固有频率。

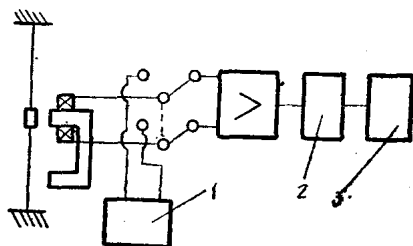


图 1—3 间歇激励的方框图

1——激励电压；2——整形；3——计数。

(二) 连续激励法

为了便于量测，在工程测试中随测试条件的变化，需要让钢弦处于连续振动的状态，为此采用了连续激励的方式，此时钢弦

成为振荡线路的一部分。

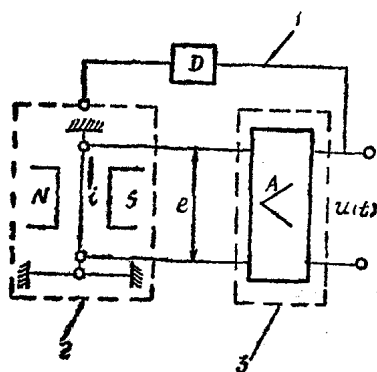


图 1—4 电流连续激励方框图

1——反馈回路；2——振荡回路；3——耦合回路。

1. 电流连续激励法，即钢弦上有电流通过如图 1—4 所示。当传感器与测量电路相连通电后，则有一个初始电脉冲流经钢弦。因为钢弦位于磁场中，且钢弦受到垂直于磁力线的作用，从而激励钢弦振动。为了保持钢弦的

等幅振动，将大部分放大的功率反馈到钢弦的两端，并和钢弦所产生的电压同相，使钢弦得到等幅连续振动。美国生产的钢弦式差压变压器就采用了这种电流连续激励的方式。苏

联近年来生产的钢弦式仪表都采用了此法激励钢弦振动。

2. 线圈连续激励法，即钢弦上无电流通过。该法采用两个电磁激励线圈，一个用来连续激励；另一个作接收信号。如图1—5所示，测量时，传感器与测量仪表相连，一旦电流接通，一个初始脉冲电流通过激励线圈，使磁铁的磁通密度发生变化，把钢弦吸动，使钢弦开始振动，接收线圈中产生了感应电势，感应电势放大后正反馈一部分到激励线圈。这样，钢弦就维持连续振动。铁道部上海通信工厂生产的扭力仪和上海三航局科研所研制的钢弦式钢筋应力传感器均采用了这种线圈连续激励的方法。

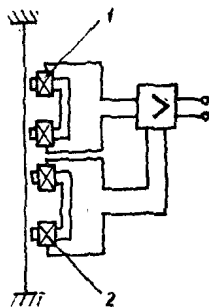


图1—5 线圈连续激励方框图

1 ——接收线圈；
2 ——激励线圈。

三、测量电路

钢弦式传感器的输出量是由钢弦振动产生的频率值，其测量电路分为比较式和直读式两类。

（一）比较式

把传感器输出的感应电势频率与标准振荡器的频率相比较，调节标准频率器的频率，使它与传感器的频率相等，此时的频率值即为所测的频率值。确定两者频率相等的方法可看李沙育图形，或用耳机听谐振声，以及用差频指示器看电流表指零等方式。

（二）直读式是直接读出频率值，或者转换成模拟量、数字量表示被测力学参数的值。

第二节 钢弦式传感器的结构和特点

一、钢弦式传感器的结构

目前国内外工程测试中常用的钢弦式传感器其结构示意图如图1—6 a、b、c、d、e、f、g、h所示。图1—6 a是一种用来量测工程结构物的接触压力的边界式钢弦土压力传感器。图1—6 b从原理上讲,是一种带油腔的边界式钢弦土压力传感器,用来量测工程结构物的接触压力。如果设计和制作得当,也可以用来量测土中自由场的压力。但由于这类产品制作难度大,所以国内使用的不多。对图1—6 a和b中两种量测接触压力的传感器,导线可以从后盖板引出。若用作量测土中自由场压力,则在设计上应满足几何尺寸比、挠度比、质量匹配和刚度匹配等要求。带有油腔结构的传感器受力更加均匀可靠,还能提高其刚度和灵敏度,但应选择温度系数低的油类,否则会影响传感器的性能,使之不易稳定。由图1—6 c是量测隧道和地下铁道装配式衬砌上接触压力的竖式钢弦压力传感器,其特点是可拆卸,传感器的直径小。图1—6 d是在竖式土压力传感器的基础上加上了油腔结构,在受压板上设有环形膜片,受到外荷载后能够平行移动,可用来量测工程结构的接触压力。图1—6 e和f的结构是由图1—6 c图上的受压板前加上一片透水石,用来量测孔隙水压力的。图1—6 f图则适用于钻孔中的孔隙水压力的量测。(g)和(h)图是两种常用的应变传感器,前者直径较大,多由圆钢车成、后者直径小,是定型管材制成,其激励器的体积仍然较大,且有足够大的刚度,而不影响应变的变形。

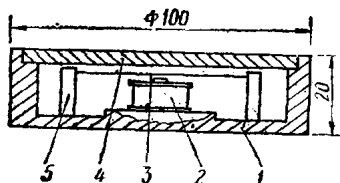


图 1-6 a 单受压板边界式钢弦土压力传感器

- 1 — 受压板；2 — 电磁激励线圈；3 — 钢弦；4 — 后盖板；5 — 支架。

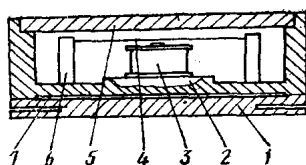


图 1-6 b 带油腔土压力传感器

- 1 — 受压板；2 — 二次膜；3 — 电磁激励线圈；4 — 钢弦；5 — 后盖板；6 — 油腔；7 — 油腔。

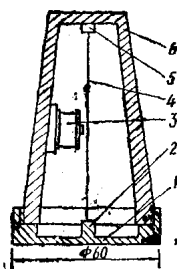


图 1-6 c 竖式钢弦土压力传感器

- 1 — 受压板；2 — 锥形套夹头；3 — 电磁激励线圈；4 — 钢弦；5 — 螺钉夹紧夹头；6 — 外壳。

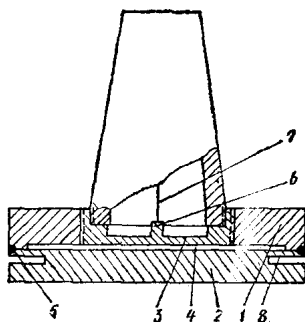


图 1-6 d 带油腔竖式土压力传感器

- 1 — 传感器体；2 — 受压板；3 — 二次膜；4 — 油腔；5 — 焊缝；6 — 锥形套夹头；7 — 钢弦；8 — 环形膜片。

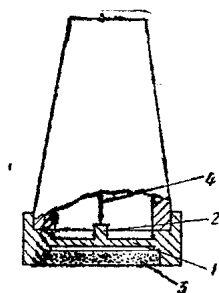


图 1—6 e 钢弦式孔隙
水压力传感器

1 — 受压板；2 — 钢弦夹头；
3 — 透水石；4 — 钢弦。

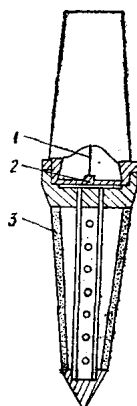


图 1—6 f 用于钻孔中的孔隙水
压力传感器

1 — 钢弦；2 — 带钢弦夹头的受
压板；3 — 透水石。

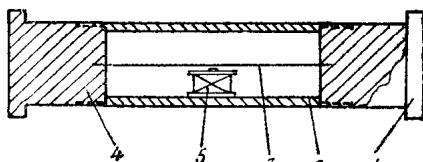


图 1—6 g 钢弦式应变传感器

1 — 凸缘；2 — 应变管；3 — 钢弦；4 — 固弦端；
5 — 电磁激励线圈。

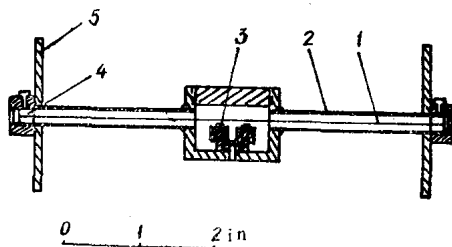


图 1—6 h 埋入式钢弦应变传感器

1 — 钢弦；2 — 应变管；3 — 电磁激励线圈；4 — 弦夹头；
5 — 凸缘。