

实验应力分析论文选编

中国科学技术情报研究所重庆分所

1973年1月

实验应力分析论文选编

中国科学技术情报研究所重庆分所编辑

中国科学技术情报研究所重庆分所出版

重庆市市中区胜利路137号

四川省新华书店重庆发行所发行

重 庆 印 制 第 一 厂

1973年1月出版 定价： 0.50元（内部发行）

034

毛主席语录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

要抓革命，促生产，促工作，促战备，把各方面的工作做得更好。

要采用先进技术，必须发挥我国人民的聪明才智，大搞科学实验。外国一切好的经验，好的技术，都要吸收过来，为我所用。学习外国必须同独创精神相结合。

毛主席语录

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

中国应该大量吸收外国的进步文化，作为自己文化食粮的原料，这种工作过去还做得很不够。……但是一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

编 者 的 话

“无产阶级文化大革命是使我国社会生产力发展的一个强大的推动力。”经过无产阶级文化大革命锻炼和洗礼的我国人民,在以毛主席为首的党中央的领导下,高举党的“九大”团结胜利的旗帜,在党的社会主义建设总路线的光辉照耀下,沿着《鞍钢宪法》所指引的道路,“抓革命,促生产,促工作,促战备”,把我国的工农业生产推向一个新的高潮。

随着工业、交通和基本建设的大发展,对于产品的质量提出了新的要求。一个零件或部件的设计质量如何,都直接关系到整个机器、整个构筑物工作情况和使用寿命。往往有这样的情况,由于零件或构件在使用过程中某一点出现应力集中,导致整个机器或构筑物损坏,甚至不能工作。因此,检测物体内部的受力状态,是确保产品质量的重要环节之一。

毛主席指出:“力求节省,用较少的钱办较多的事。”对于工业、交通和基本建设来说,摸清物体的受力状态,掌握内力分布规律,是落实毛主席革命路线的具体措施之一。

掌握物体内部的应力分布情况,当然可以采用数学方法。但是,数学方法复杂和烦琐,使用起来甚感不便。实验分析方法,避免了上述缺点,引起了应力分析工作者的重视。

我国的实验应力分析工作,是解放后在毛主席领导下建立和发展起来的。解放前,由于国民党反动政府的反动统治,勾结美帝国主义,肆意摧残我国科学技术文化的发展,尽管实验应力分析技术早在三十年代就已经出现,但是在我国一直是一个空白。中华人民共和国成立以后,在以毛主席为首的党中央的关怀下,实验应力工作才得到迅速发展。党为发展这门技术,提供了优越的物质条件,培育了大批人才;在实验应力分析迅速发展的基础上,于1966年春召开了我国首次实验应力分析技术交流会,促进了这一工作的进一步发展。目前,除各高等院校和科研单位外,不少厂矿都建立了自己的实验应力分析机构。

现在,随着工业建设的进一步发展,为了交流实验应力分析方面所取得的成果和促进今后工作的更好开展,有的地区在党的一元化领导下,以毛主席“路线是个纲,纲举目张”这一重要指示为指导,召开了地区性的实验应力分析技术交流会。

为适应国民经济发展对实验力学提出的要求,根据毛主席“洋为中用”的原则,我们从近期外文期刊中选译了几篇文章,编辑出版了这本《实验应力分析论文选编》,供从事这一工作的同志参考。

本《选编》包括光弹性、应变计、磁法和遥测等四个方面的内容。此外,还选译了一篇简介各种应力测量方法的文章。遥测应力,是应力分析中值得引起注视的一个新苗头。它是一种利用无线电遥测术来测量物体应力状态的方法。这种方法为在施测对象处于运动状态的区域,例如,在往复式发动机内活塞上进行应力测量,提供了一个简便的方法。目前,国内已有一些单位着手利用这种方法测量应力的研究。残余应力的测定,在许多情况下,难于用光学和电学方法完成,因此有人试用磁测法。但是目前尚未见到更多的这方面的资料。随着激光技术的发展,实验力学中已开始采用全息摄影法,目前这一方法已引起国内技术工作者的重视。

在编译这本《选编》的过程中,承蒙四川地区重庆大学等兄弟单位的大力协助和指导,使得编译工作顺利进行。在此,谨致以衷心谢意。

由于时间仓促,资料收集不全,加上我们的政治水平和业务水平都很不高,因此,本《选编》在内容上既不能反映国外实验应力分析的最近动态的全貌,也不能满足实验应力分析工作者的要求,在此,谨致以歉意;对于本《选编》中存在着的谬误之处,敬希不吝赐教。

目 录

测定应力的十三种方法.....	(1)
-----------------	-------

遥 测 术

利用无线电遥测术对应变和温度进行无线测量.....	(6)
---------------------------	-------

无线电遥测术在实验应力分析中的应用.....	(11)
------------------------	--------

应 变 计

用于恶劣环境的应变计装置.....	(18)
-------------------	--------

低温条件下的应变片.....	(23)
----------------	--------

汽轮机的应变测量.....	(28)
---------------	--------

对可焊接应变计在核反应堆环境中的估价.....	(34)
-------------------------	--------

高重力加速度环境下的应变计.....	(40)
--------------------	--------

半导体应变计的玻璃粘结技术.....	(43)
--------------------	--------

光 弹 性

三维光弹性模型的制造和切片.....	(48)
--------------------	--------

三维光弹性分析的自动过程.....	(55)
-------------------	--------

散射光光弹性的自动系统.....	(61)
------------------	--------

磁 法

磁法测定残余应力.....	(66)
---------------	--------

测定应力的十三种方法

从根本上说,所有应力分析方法都是测量零件在荷载作用下的应变和与应变有关的现象。然后利用惯用的应力-应变关系将应变值转换为应力。而根据这种理论上的推论,应力分析被认为十分简单。

之所以使应力分析蒙上许多混乱和神奥,在于有十二种以上的方法(其中有几种使用费用昂贵)都能进行应力分析。但是,实际上有几种使用方法是简易的,花费也不大,而且是非破坏性的。唯一的问题,在于选择一种最适合于零件作应力分析的方法,而且这种方法能提供所需的精确度。

实验应力分析中,最常用的方法是应力涂层法,应变计法,光弹性涂层法和光弹性法。不太广泛使用的其他三种方法是莫尔法,全息摄影法和X-射线绕射法。偶尔使用的另外四种方法是磁吸法,声学-弹性法,红外线辐射计法和射频频谱法。假定所有这些方法都能够用来解决所提出的问题,那末它们基本上会给出相同的资料。所以,实际一种方法常常有各自比较合适的应用。

术 语

C ——对以光弹性涂层法获得的增强的修正系数

E ——扬氏模量(磅/吋²)

f ——在光弹性涂层中产生一条干涉带所需要的应变($\times 10^{-6}$ 吋/吋)

GF ——传感系数或校准系数

K ——应变-光学常数

N ——同光-应力计成法向入射角下的干涉带级数

n ——光弹性试件上的干涉带级数和干涉带数目

P ——光弹性应变灵敏度

R ——电阻(欧姆)

ΔR ——电阻变化(欧姆)

T ——塑性涂层的厚度(吋)

t ——光弹性试件的厚度(吋)

ϵ^* ——应变(吋/吋)

θ ——应变花1或2和最大应力轴之间的角度

λ ——光的波长(吋)

μ ——泊松比

σ^* ——应力(磅/吋²)

应力涂层法

应力涂层的脆漆-涂层方法是一种定性方法,这种方法被用来在铸件、变速箱或壳体上探测最脆弱的区域。根据这种方法,将脆漆喷涂在被分析的零件上,脆漆干燥一个晚上,然后以静力、动力或冲击方式加载。脆漆会在垂直于最大应力的方向发生裂缝——首先是在受力最大(或最脆弱)的区域。当荷载增大时,裂缝图形随着高应力区域变得更大而扩大。

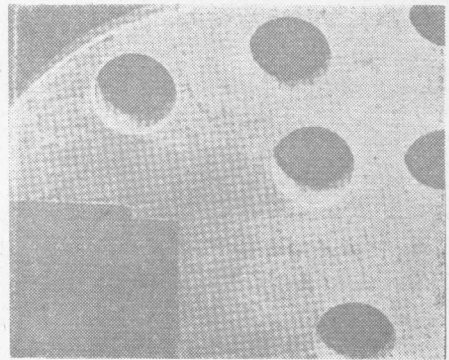


图 1

应力涂层用的脆漆必须根据试验时所预期的温度加以选择,以获取最大的应变灵敏性。现用的脆漆对湿度不敏感。

涂层的应变灵敏度是采用应力涂层制造厂提供的基准棒来测定的。此基准棒与受试验的零件一起喷漆一起干燥,然后象悬臂梁那样将其挠曲。如果涂层选择得当,就能够得到 500×10^{-6} 吋/吋那样小的灵敏度。

试验以后,应力涂层能够很容易从零件上除去,方法是用一根软木刮零件或者先喷砂随后以溶剂清洗。

应变计法

有几种应变计可用于测量表面应变。这些应变计都必须贴附到被测量应变的零件表面。最普通的类型有:纸基电阻丝应变计,悬挂式电阻丝应变计,箔式电阻应变计,可焊接电阻应变计, Tukerman 光学应变计和机械划线应变计。电阻和光学类型的应变计都能够测量每吋几百万分之一吋那样小的应变,而机械划线式应变计,长度为3吋,能测量每吋83300万分之

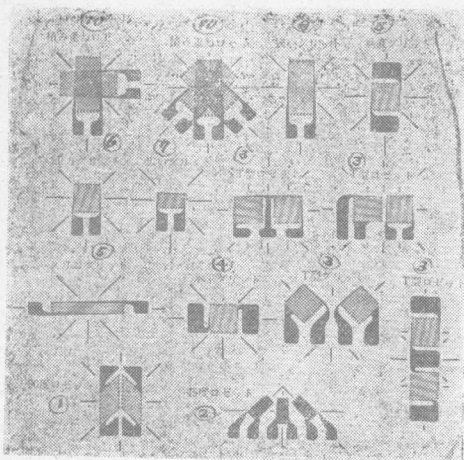


图 2

图中 ①90°应变花, ②45°应变花, ③T形应变花, ④水平格栅, ⑤细格栅, ⑥方形格栅, ⑦宽格栅, ⑧垂直格栅, ⑨窄格栅, ⑩多层应变花。

一时那样小的应变。

箔式、电阻丝和悬挂式电阻丝应变计(图2)

电阻丝和箔式电阻应变计是一种电阻元件, 它与粘结在结构上的载体粘接; 悬挂式电阻丝应变计是金属丝电阻元件, 它与零件表面上的绝缘体粘接。所有这三种应变计对于定性应变测量都是精确的。零件内的应变是利用应变计元件伸延时应变计的电阻变化来表示。

$$\text{电阻变化与应变的关系为 } \varepsilon = \frac{\Delta R/R}{GF}.$$

如果主应变的方向用应力涂层法来测定, 则应变计就能够以合适的定向来安设, 以测定这些应变。在单轴应力场内, 测定应变(而后应力)只需一个应变计。在双轴应力场内, 为确定点的应力值需要有二个应变计, 因为

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x)$$

如果在双轴应力场内的主应力方向不明确, 那末为确定点的应力就需要三个应变计(三叶片应变花)。在三叶片矩形应变花(其中二个应变片相互成90°, 而第三个应变片与前两个则成45°)情况下, 应力方程组变为

$$\sigma_x = \frac{F}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1-\mu} + \frac{\sqrt{2}}{1+\mu} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1-\mu} + \frac{2\mu}{1+\mu} \cdot \right]$$

$$\cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}$$

主应变方向为

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} \right]$$

电阻应变计的大小以它的“应变计长度”来确定, “应变计长度”就是电阻元件的长度。标准的应变计长度从0.015到1.00吋, 宽度范围一般从0.010到0.300吋。应变计的厚度大约为0.001吋。

在低温到大约1800°F的温度范围内可使用各种应变计, 但是没有单独一种应变计能够在整个温度范围内使用。各种应变计是用不同合金制成的, 并使用于特定的温度范围。

有几种粘合剂可用以将应变计粘结到所试验的零件上。象选择应变计一样, 根据进行试验的温度范围选择这些粘合剂。除粘合剂以外, 火焰喷射法能用来接合悬挂式电阻丝应变计。在这种方法中, 将高纯度耐火氧化物喷成雾状并吹到应变计上, 形成硬的涂层, 此硬涂层将应变计固着在绝缘表面上。

所使用的应变计的正确长度取决于测量面积的大小。应变计的电输出表示应变计电阻元件长度内应变的平均值。这样, 如果应力集中内的应变必须测定, 那末应变计长度必须不大于存在应力集中的整个范围的长度。如果使用的应变计长度大了, 那末应力集中内的应变将是整个应变计长度范围内的平均值。

对于室温的研究, 使用纸基电阻丝应变计一般是应力分析的最简单形式。这种应变计所给出的数据资料能与箔式应变计所得出的数据资料一样精确, 而且易于贴附到被试验的零件上。

可焊接电阻应变计 可焊接电阻应变计是由一些不锈钢或因科镍合金管组成, 其中, 激励电阻元件以绝缘粉末填塞压紧。激励元件蚀刻成大约为0.001吋的直径, 所以, 它对应变是灵敏的。

应变计的引线是应变计元件的主要部分。将电阻丝在管内折迭一次, 以使两根引线在一端露出, 而将另一端密封。铝、钛、不锈钢或因科600合金的薄凸缘从管的两侧伸出, 以使应变计可以焊接到试验表面。应变通过凸缘焊接点从表面传输到凸缘, 通过焊接线从凸缘传输到管子, 并通过压紧的绝缘粉末从管子传输到电阻元件。

这种应变计比箔式和纸基应变计优越之点, 在于它们能够在高温和更为恶劣的条件下使用。而且, 试件的表面制备要求也不象使用纸基和箔式应变计时那样苛刻。

可焊接电阻应变计由于采用密封在不锈钢管内的引线, 可防水。

机械划线式应变计(图3) 机械划线式应变计

是由二块小的不锈钢基板、划线杆（焊接在小的基板上）和不锈钢管组成，在不锈钢管中装有 8 根直径为 0.008 吋的不锈钢丝，构成一个驱动刷。当两块基板之间产生运动时，驱动刷接触并转动目标物(target)。划线器安装在划线杆上并与目标物（软的黄铜垫圈）接触。目标物借助一个定位刷相对于两个滚子定

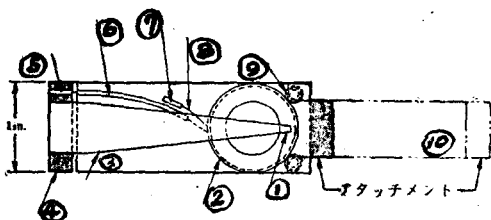


图 3

图中 ①划线器，②目标物，③焊在小底板上的划线器臂，④小底板附件，⑤焊在小底板上的管子（驱动刷的固定端），⑥焊在大底板上的管子（使驱动刷导向目标物），⑦焊在大底板上的管子（定位刷的固定端），⑧定位刷，⑨目标导棍，⑩应变计的伸长。

位，定位刷安装一根焊于大基板上的不锈钢管内，定位刷由 8 根直径为 0.008 吋的不锈钢丝制成，其作用象一根悬臂弹簧。驱动刷在目的物圆周上的构槽接触。当两个基板之间产生由局部位移引起的运动时，驱动刷来回移动，同时转动目标物。

此应变计能够利用螺钉、电阻焊接或粘合剂接合在结构上。

Tuckerman应变计 这种应变计是一种光学仪器，用以测量表面偏移（应变）。应变在固定的刀刃和旋转菱形体之间测量。它们之间的距离是应变计长度，可以在 $\frac{1}{4}$ 到 12 吋之间变化。一般使用的应变计长度为 1 或 2 吋。使用了具有变量控制光源的自动准直仪来取应变计读数。

当表面产生应变时，菱形体转动，而在自动准直仪的刻度盘上可读出该转动。刻度盘的分度能读出以微吋计算的应变。用这种应变计可以测量的最小运动为 2×10^{-6} 吋。Tuckerman 应变计适用于室温和高温应变测量（图 4）。

光弹性涂层法

光弹性涂层法是一种分析二维应力的方法，在该方法中把透明塑料粘贴到要被分析的部件表面上。当表面受到应力时，应力就传到透明塑料上而引起双折

实验应力分析方法比较

方 法	灵敏度和精确度①	适用的试验环境②	实验室或现场使用③	设备费用	试验费用	所需要的经验	是否适用于动力或冲击试验	试验温度范围 (F)
应力涂层法	1	A, O	L, F	2	1	2	是	0—120
应变计法								
箔式应变计法	4	A, O	L, F	1	2	2	是	—454—1800
纸基电阻丝应变计法	4	A, O	L, F	1	2	1	是	—320—180
光弹性涂层法	3	A, O, W	L, F	3	3	3	是	—60—500
光弹性法	3	A, O, W	L	4	4	4	是	—454—500
莫尔法	3	A	L	4	3	3	否	—454—2200
全息摄影法	3	A	L	4	4	4	否	—454和—454以上④
X 射线绕射法	2	A	L	4	4	4	否	室温—1000
声学弹性法	3	A	L	3	4	4	是	室温
磁吸法	2	A	L, F	2	3	3	否	室温和室温以上
红外线辐射计法	2	A	L	2	3	3	是	室温和室温以上
射频频谱法	2	A	L	2	3	3	否	室温和室温以上

注：① 1、4 分别表示灵敏度、精度、费用最低和最高或所需要的经验最少和最多。

② A——空气，W——水，O——油。

③ L 表示只能在实验室用；F 表示设备能够用于现场，不影响精确度。

④ 没有确定的上限。

射。在偏振光的照射下塑料上出现了表示表面应力分布的黑带和色带。(见图4)

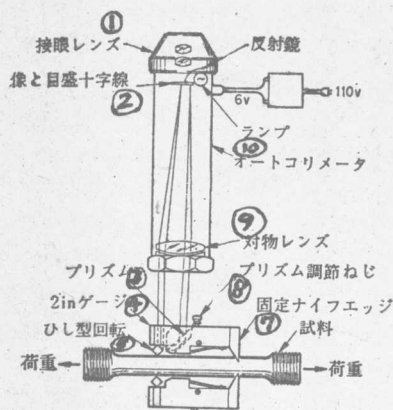


图 4

①目镜, ②象和刻度盘定位分度线, ③棱镜, ④2吋应变计, ⑤旋转的0 2吋菱形物, ⑦固定刀刃, ⑧棱镜调整螺钉, ⑨物镜, ⑩自动校直器。

黑带(等倾线)是一种主应变方向平行的点轨迹。色带(等色线)是主应变间差值不变的点轨迹。每条色带表明主应变差($\epsilon_x - \epsilon_y$)的一个特定值。红色与绿色等色线之间的明显的分界线是一个应变级并称为干涉条纹。根据塑料的校准系数可计算出这个应变级。 10×10^{-6} 时/时级的应变能探测出来。

等压线(表示最大最小主应力的正交线)按照等倾线求出来。

在用光应力测量器垂直照射下, 主应变差数由下



(a)

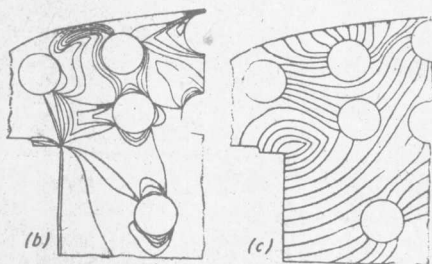


图 5

式求出:

$$\epsilon_x - \epsilon_y = \frac{N\lambda}{2TKC} = \frac{Nf}{C}$$

式中 $f = \lambda/2TK$

不计强化系数此方程式可写为 $\epsilon_x - \epsilon_y = Nf$ 或

$$\sigma_x - \sigma_y = NfE/(1+\mu)$$

为了区分主应变 ϵ_x 和 ϵ_y , 必须采用反射偏振光镜斜照射装置取塑料涂层的斜照射读数。在这过程中干涉条纹级是固定角时的读数, 应用斜照射和垂直照射读数能计算出主应变。采用光弹性涂层法能在误差约8%以内求得主应变(或应力)的差值。

光弹性涂层法比较难于使用且成本要比应变计或应力涂层法昂贵, 但采用这种方法在涂层上不管那里能得到主应力的方向及其大小, 因此, 光弹性涂层综合了应力涂层和应变片的特性。

光弹性模型法(图5)

二维光弹性应力分析的原理和方法, 除了试件是透明的应变传感塑料模型以外, 与光弹性涂层法的相似。在荷载的作用下, 试件的一边受到偏振光的照射, 从另一边观察到干涉条纹和等倾线图。

三维光弹性模型在预定温度条件下施加荷载, 并使其在荷载作用下冷却到室温, 这个过程把由于荷载作用所引起的应变固定下来, 叫做应力冻结。然后把模型分割开来并在三个方向上测量应变。经观察可发现最大和最小应力的位置。

光弹性最适用于三维模型边界应力的测定、应力集中系数的实验评价及理论解求不到的问题。

与光弹性涂层法一样, 等色线用于确定应力差的值, 等倾线用于确定主应力的方向。

主应变的差以下式表示

$$\epsilon_x - \epsilon_y = \frac{Pn}{t}$$

莫尔法(图6)

应力分析用的莫尔法表明当主(不变形的)格栅叠加于粘贴在被分析的部件上的变形格栅上时, 在所观察到的干涉条纹部分中有应变存在。

由千百条线所组成的一种格栅粘贴在受应变的表面上, 然后把由相同数线条组成的主格栅放到已安装的格栅上。在部件受到荷载之前, 由于叠加格栅上的相应线条是平行的, 就没有干涉条纹发生。当表面受到应变时, 被粘贴的格栅上的线条就产生变形同时它的密度也变化了。主格栅叠加到变形格栅上时干涉条纹图就显示出来。这种干涉条纹图就用于确定部件表面上的应变值。这个方法的灵敏度取决于格栅上的线条

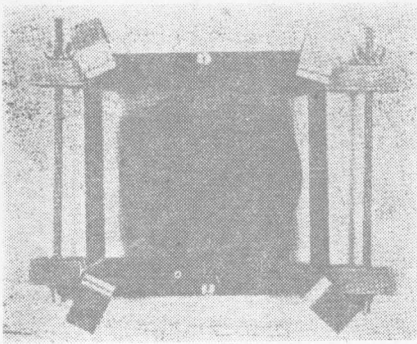


图 6

密度。

在用其它方法不能作应力分析的部件上，诸如在高温条件下的应变测量、薄膜和低模数材料的高弹性及塑性应变的测量以及各种温度条件下的长期稳定性的测量，可应用莫尔法。

全息摄影(Holograms, Holography) (图7)

全息摄影法的过程分两个步骤，在这过程中把应变记录在软片上然后再显示出来，这种记录称为全息摄影。先把无应变试件拍摄下来而后用加载试件在同一软片上进行第二次曝光。双重曝光全息摄影的结果录下了干涉条纹，此干涉条纹与光弹性所形成的干涉条纹相似。

无应变试件的全息摄影影像也能叠加在实际试件上。当试件受到荷载作用时，则无应变摄影和应变表面之间的干涉形成显著的干涉条纹图，此图可拍摄下来。

这种方法还没有发展到可作为定量工具来应用的地步，而且现在没有适用的完整全息摄影应变测量系统的市售光源。

很少使用的方法

X射线绕射法 此法把已知波长X射线束投射到试验的对象体上并把反射的射线记录下来，这样就能测量出对象体上的原子平面间的距离。由于所施加的荷载或残余应力的作用引起该距离变化。

只有晶体材料能用这种方法进行试验，而且只达到大约0.001吋的表面深度。但是与其它方法比较，



图 7

这种方法有一个优点，即可在没有损坏部件或结构的情况下测定表面残余应力。

磁吸法 此法是基于这样的原理，即当铁磁性材料受到磁化和应力时，材料的磁吸信号的变化与应力变化成比例。

磁吸能量是用射频线圈供给试件的，并用高频磁场测量信号。这种方法主要用于磁性材料，但能应用于有磁性体涂层的非磁性材料。

声学弹性法 在此法中使偏振声波穿过部件，与应力方向成直角。当每一个波穿过应力区时，它的偏振角与应力值成比例地变化。这种方法的精确度取决于材料的弹性性质、各向异性程度及应力-应变曲线形状，据报导精确度平均达 ± 10000 磅/吋²。

红外线辐射计法 此法系利用红外线辐射计测量来确定部件在材料弹性极限内因快速变形所产生的温度变化。

射频频谱法 此法是利用核四极共振频谱测量树脂固化时其内产生的内应力。当在树脂内分散一种敏感化合物（用来校正压力与核四极频率的关系）时，这种化合物的探测器就吸收能量，在示波器上显示出能量频率。探测器的校正曲线给出部件内的应力。

(Machine Design, 1971, Vol. 43, No. 7)

利用无线电遥测术对应变和温度进行无线测量

结 论

近距离无线电遥测术为在受测对象处于运动状态的区域进行精确测量提供了一个方便而又简单的方法。在某些情况下,例如,在往复发动机内活塞上进行测量,其它施测方法常常是行不通的。就是在可以有效地利用各种测量方法的情况下,无线电遥测术在便于使用、可靠性及数据精确度等方面,仍然可以显示出卓越优点。例如,在转动的机械上,集流环在安装、调正和维护(特别在腐蚀条件下)等方面,常常较之无线电遥测术困难得多。此外,无线电遥测术在数据精确度和信-噪比方面,通常能提供优良的性能。

所有这些优点,最近几年来才成为可能,这首先是因为晶体管和集成电路发展中的惊人成就。现今可用的集成电路,能完成同十年前的“分立”晶体管电路(其体积较前者要大 10^3 倍)相同的功能。并且当然十年前的晶体管电路比其祖先——前十年的真空管电路,具有相似的尺寸优点。

在电路微型化方面进展的同时,在降低动力消耗和增加物理强度方面,也取得了类似的进展。

后一类——物理强度,对于这类设备的设计和发展,是一个重要的因素。极端温度及高重力加速度荷载可破坏最常用的电路。然而,采用合适的电路设计和组装,在 -50 到 $+150^\circ\text{C}$ 温度范围内能得到精确而又可靠的工作,而且 $30,000g$ 的重力加速度也不会影响性能。

至今所发展的发射机的类型

动应变

这类发射机是最容易发展的一种。这种发射机的一个例子示于图1。类似这种发射机的装置已制成有 4厘米^3 (0.25吋^3)那样小。应变计的输出由交流耦合的音频放大器(标准响应30赫芝到20千赫)加以放大;放大器输出频率调制射频(RF)振荡器(通常100兆赫)。这类调制是“直接调频”,而且严格地说,是一种用于标准调频广播的同一方法。

虽然类似于图1所示的发射机在许多应用中得到了成功的使用,但使用者对两个相当容易改正的缺点感到不满。第一个缺点是电池电压变化引起应变计激励的变化,因此产生测量的误差。这一点可通过添加一个稳压器来纠正。由于添加了这种稳压器而得的附加好处,就是它也可使射频振荡器的稳定性增加。

图1发射机所引起的第二个困难就更是微妙。因为这些设备一般是安装在运动物体上的,这些设备可能是改变到金属物体的距离(和电容)的主因。这能引起射频振荡器的调频调制,这种调制在接收机上出现一种假的应变信号。虽然屏蔽射频振荡器将有助于解决此问题,但这种影响通过发射天线仍能耦入。除了金属-距离的影响外,当某些这类发射机在同一近程内一起工作时,有时会出现路际串音。

已经发展了一种以射频缓冲放大器形式解决这些问题的简单方法。这种放大器把射频振荡器同天线隔开(和与“外面世界”隔开)并使外面距离影响和串音减小到小于应变范围的1%。经改进的动应变发射机(包括稳压器和射频缓冲放大器)的方块图示于图2。图3是真实发射机的照片图,图4、5、6、7示出了标准发射机的性能试验结果。

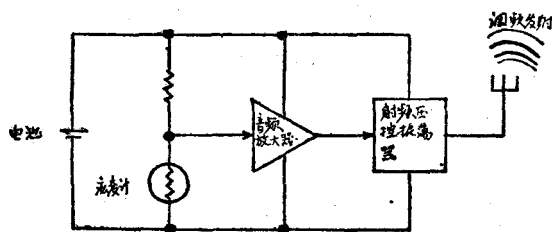


图1 简单动应变发射机

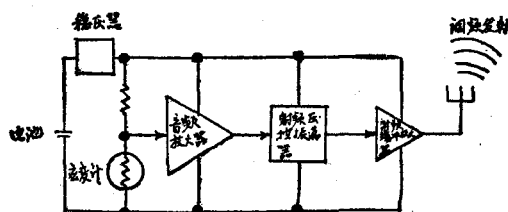


图2 经改进的具有稳压器及射频缓冲放大器的动应变发射机

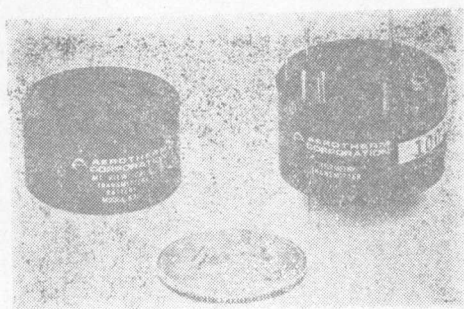


图3 动应变发射机和75小时电池

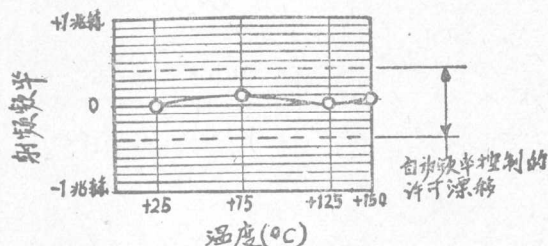


图4 动应变发射机射频频率变化与温度的关系曲线

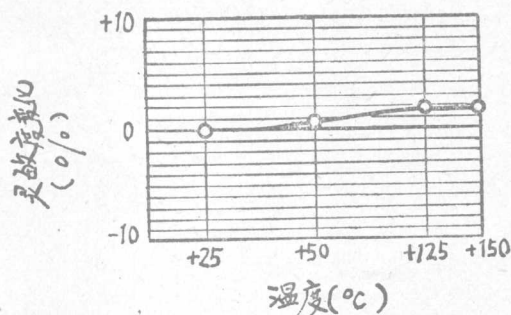


图5 动应变发射机灵敏度与温度的关系曲线

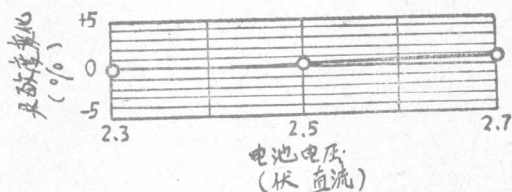


图6 动应变发射机灵敏度与电池电压的关系曲线

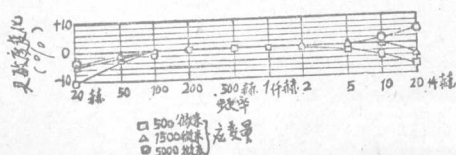


图7 动应变发射机灵敏度与频率的关系曲线

喷气发动机的动应变遥测术——喷气发动机制造者常常要求测量运转的发动机内涡轮叶片的动应变。这种资料对于振动效应的估计是很重要的，以发现和修正过度的共振以及预测叶片的寿命。

在过去，这些应变都是通过集流环来测的，然而，却有许多困难：（1）集流环的安装和调整是非常精密的，并且在发动机发热和热膨胀时难以保持。

（2）集流环的接触性质会在测量中引起噪音。（3）工作寿命常常太短，难以有适当的试验时间。（4）在“多轴”式发动机，如风扇式喷气发动机中，同心轴装置要求有大的集流环直径。这些大的直径引起滑动接点的表面的速度很高，这个问题再加上上述问题常常导致完全不能采用集流环。面对后面这一问题，发动机制造者常常用局部可拆开的形式，即采用可移去的外风扇系统，来试验风扇式喷气发动机。至于采用这种“零零碎碎”试验是否确信指明了完全的发动机特性，其说不一。

由于这些各种问题，许多年来一直在找寻集流环的代替者。近年来有三家最大的发动机制造公司都采用无线电遥测术（通常是由他们自己设制的）进行了实验；无论如何，对于大部份情况，这些实验仅取得局部成效。然而，这些结果足以指望推动将来的研究。

或许，这个问题的最困难的点在于研制一种能经受住高温（125℃）和高加速度（30,000g）联合作用的封装电路。明显的方法是把电路用某些封装材料（如环氧树脂）进行密封；在气热学（Aerotherm）中，这种方法被选择作为最有希望的方法。然而，在此法被认为满意地发展以前，封装并试验了30个以上的试样。选择封装材料的考虑点之一在于：虽然它必须要有足于支持高重力加速度和高温的刚度，但如果电子元件（和相互连接）在热循环过程中产生非常大的应力，则它必须屈服。

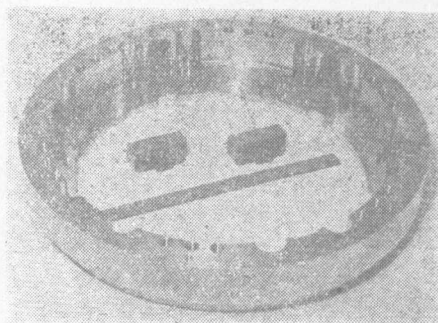
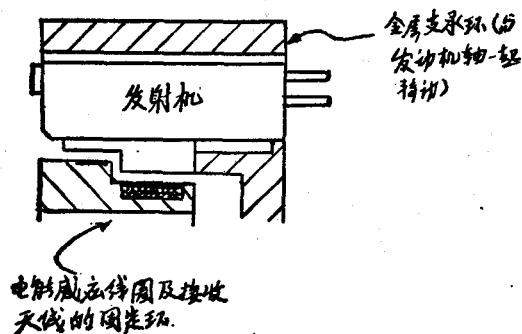


图8 装在转动支承环内的六架喷气发动机发射机。（也示出了两架附加发射机和一根6吋长的尺）

图8示出装在与发动机轴一起转动的支承环内的六架发射机。在一个环内最多可装入40架发射机。同心装在支承环内的是一个非转动的感应线圈，它向发射机辐射出一个160千赫的磁场（如图9所示）。这个磁场由发射机内的调谐线圈传感，线圈的电输出被



发动机中横

图9 喷气发动机的标准遥测装置的横截面

整流并加调节，以提供稳定的直流电压。这种电压被用来激励应变计并对发射机电路供电。固定感应线圈和发射机之间的名义缝隙为2毫米（0.080吋），在由于偏心所致径向缝隙变化容许±1毫米，而轴不对准性可容许±2毫米。

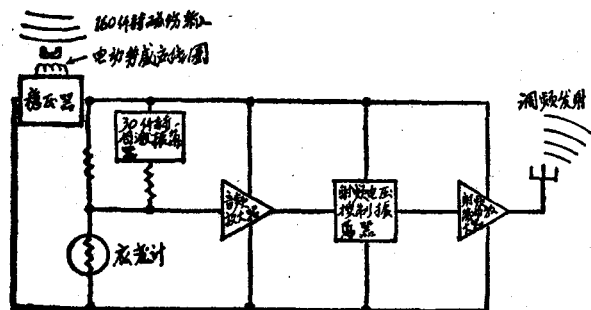


图10 用于喷气发动机装置的具有感应能系统的动应变发射机

图10示出这种发射机的方块图。从许多方面来看，它类似于图2所示的发射机；其主要差别在于附加了感应能传感器和一个30千赫的试验自激振荡器。这个振荡器可连续验证发射机在工作时的性能。接收机内的选择滤波器从真实应变信号中区分出这种试验信号。所有性能曲线及试验结果都类似于前面所述的动应变发射机。

也研制并试验了同一环境下工作的热电偶遥测技术伙伴发射机。这种装置遥测铬镍合金/铝镍合金热电偶的输出。提供了两个测量范围：0—600℃（32—1,112°F）和500—1,100℃（932—2,012°F）。精度为±12℃（22°F）。

静应变测量

静应变发射机（其输入数据频率下降到直流），对遥测术设计人员始终提出了一个困难得多的问题，其理由是，应变计电桥输出值（有时几微伏那样低），和遥测术电子学的直流漂移量相比，常常是很小的。这一点在动应变发射机内不是一个问题，因为直流信息（或漂移）没有通过交流耦合系统。

调频-调频（FM）方法——图11示出了静应变遥测术调频-调频方法的一个典型例子。在这里，应变计电桥的输出用一个直流放大器放大，此放大器激励副载波压控振荡器。这个振荡器的输出，激励一个射频发射压控振荡器。这种技术，虽然是广泛地利用的，但会因温度感应零漂移（见图中指出的漂移）而大受影响。这种零漂移主要来自直流放大器。在进行降低这种漂移的尝试中，某些制造者转向应变计的交流激励。这样做实际上消除了直流放大器及其伴随的漂移；然而，采用交流激励电桥，又产生了一个新的问题。交流激励系统，对于导线方位是非常敏感的。甚至导线稍略移动，都会引起大的零漂移。在许多情况下，其净结果甚至要比直流激励方案不稳定。

虽然大多数调频-调频应变遥测术使用者惯常受零漂移问题的影响，但是他们感到调频-调频这种方法能为应变遥测术提供良好的噪音抑制。诚然，调幅（AM）-调频方法（将在下面论述）在噪音抑制方面，要比典型的调频-调频系统好三倍。关于这一点的解释在于调频“调制指数”，此指数等于载波或副载波的频率用偏移频率（应变频率）来除。无论在什么地方，这个“调制指数”都小于 $1/\sqrt{3}$ （0.58），调频系统的噪音比调幅系统的大。调频-调频应变遥测接收机常常使用约0.3的副载波调制指数，这样基本的副载波噪音电平约比调幅副载波的高一倍，此外，调频副载频通常比处理相同应变信号所要求的调幅副载频高一些（高1.5倍），这就减少了调频载波调制指数，结果使发射机系统的全部噪音抑制能力降低。

经改良的调幅-调频方法——作者研制了一种调幅-调频方法作为应变遥测术的更替方法。它有三个优点：①没有直流放大器或副载波压控振荡器，从而不存在随之而来的漂移。②这种调幅-调频调制法的噪音抑制比调频-调频法的大（典型的大3倍）。③线路得到大大简化，因此可以减小尺寸、重量和电池消

耗。调幅-调频发射机的方块图示于图12。在这种系统中,应变计电桥是由2伏直流稳压器的输出激励。直流电桥输出由场效应晶体管(FET)斩波器变换成2千赫方波,斩波器由副载频振荡器带动。场效应晶体管斩波器是一种接近完美的调幅器,实际上没有零漂移。它的输出是方波,其振幅精确地等于应变计电桥的直流信号。这样,在把直流静应变信号变换成交流信号以后,就能和动应变中所用的相同方法来遥测静应变。事实上,这种发射机的其余部分是和图2的动应变方案相同。这其余线路,是交流耦合的,不可能产生零漂移。在接收机(如图13所示的单通道装置)内,方波(比例于应变值)被逆变换成其原始的直流。

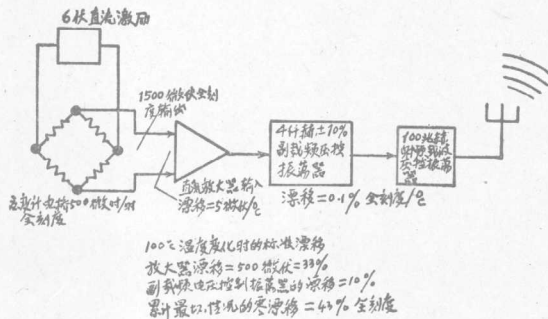


图11 静应变遥测调频-调频方法的例子

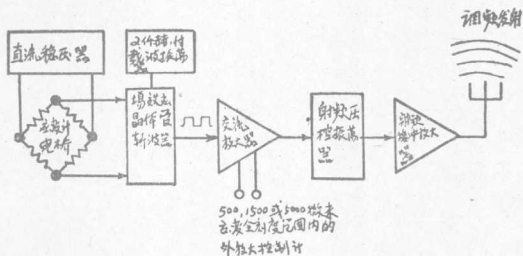


图12 经改进的调幅-调频静应变发射机

这类系统的实际频率响应极限为 $F_{max} = F_{chop} / k$, 式中, F_{max} ——可测最大应变频率, F_{chop} ——间断副载波频率, k ——偶数的主动应变计时为2, k ——奇数的主动应变计时为4。

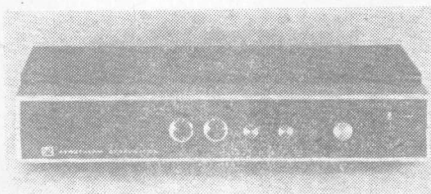


图13 具有数字读出的单通道应变接收机

作者的发射机采用2千赫间断频率,因此,能测量从直流到1千赫内的应变。图14示出用一投产的典型装置进行温度-稳定性试验的结果。

热电偶发射机——在许多方面,这个问题类似于静应变问题,即低值直流传感器输出。因此,这种发

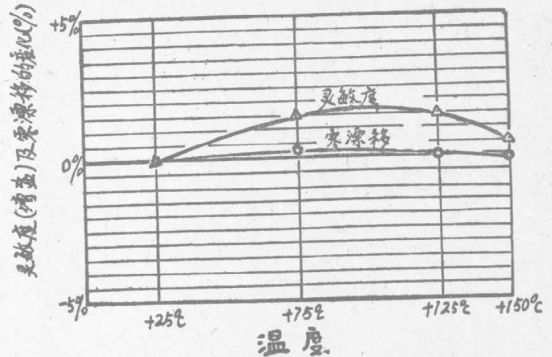


图14 典型调幅-调频静应变发射机稳定性与周围温度的关系曲线

射机的设计非常类似于静应变发射机。其主要差别是,取恒定温度基准槽的位置来提供装入的温度统调基准结。

无线及传感器导线的探讨

在安装发射机时,发射天线必须被容许来辐射到接收天线。对于大多数的应用,两种天线之间的“视线”通路是最好的。如有可能,“视线”不要为任何导电材料所阻碍;然而,非导电材料有小的影响。

如果发射机安装位置使“视线”通路难以达到,通常有可能把线的长度相连到发射机射频输出端,并把它固定于适当的“视线”位置。即使在不绝对要求附加线的装置中,为了改善发射信号的强度,也常常希望采用附加线。

在转动的机械中,圆形接收天线通常可用来在整个360°旋转区内进行接收。这种天线通常是由两个单独结尾并在接收机上组合在一起的绝缘半圆组成。当环路圆周大于二分之一的射频载波波长时就需要这种两个弓形环路,以避免由驻波所引起的零及一次周围的衰落。如果环路圆周小于二分之一的波长(1/2波长在108兆赫时等于55吋),一根连续的环形天线是满意的了。

在系统有效工作中的另一个重要探讨,就是传感器的位置及其到发射机的导线。此导线必须牢固安设并精心屏蔽,以避免导线内不需要的信号拾音(噪音)。这一点在高速转动应用中特别重要。

发射机的电源

几种型式的电源已在短程遥测系统中应用:

电池——这是通常使用的最价廉和最简单的类型。水银电池用环氧树脂封装,以增加其工作温度的上限,达到 $+150^{\circ}\text{C}$ 。温度的下限未被确定,但在 0° 到 -40°C 之间。本文所描述的发射机被设计得所需电流很小,能使电池工作寿命达到50—200小时(电池尺寸近似于发射机)。(精确的工作时间取决于发射机的类型和应变计的电阻)当然,使用更大的电池,使用时间可以更长。

发现在高重力加速度荷载下电池的工作寿命减小。这是由于水银蓄积发生内短路之故。已对水银电池的某些代替品作了试验,并发现这些代替品在这些条件下的使用期要长得得多。现在在这一方面进行着补充试验。

感应电源——这种方法常用于转动式机械。使用这种方法,取消了电池,因而工作寿命可以很长。

已经介绍的一个例子,就是图8所示的喷气发动机发射机。由固定的圆形感应线圈产生一个160千赫交流磁场。发射机有一个被调到这一频率的小型电动势感应线圈。线圈的输出被整流并调制到能提供稳定的直流电源。在某些情况下,例如希望获得相当大的工作距离(离固定线圈达25毫米),电动势感应线圈和调节器最好置于单独微型组件内,此微型组件的尺寸大约和发射机的相同。这种类型的单个微型组件能够给几个发射机供电。

多路传输

也研制了一种多路系统,这种系统扩大了前面所述的发射机的能力。这种系统包含有一个固体选择器微型组件,此微型组件从多达九个传感器中选择任何一个来和发射机连结。除了九个输入以外,在第十步位时激活一个内校准和标准输入。这种标准信号(由方波组成)验证发射机校准和多路系统的步位。九个传感器中的一个传感器的两根导线可被开关;这一点在某些应变计如果发生接地短路时可以防止路际互相作用。虽然静应变模型只能接受四个全电桥,但选择器微型组件可以用来同本文所述任何发射机一块使用。

步的指令由“指令控制”底盘产生,此底盘提供视觉显示和表明哪条通道在工作的输出电码。没有人工选择控制,以选择任何一条输入通道或一条校准/标

准通道。此外,设有一个自动程序装置,当它工作时,可以1—15步位/分的可调速率自动地依次通过所有通道。步的指令由达到几时作用的距离的磁场输入传输到选择器微型组件上。

近距离遥测术的某些典型应用

主动轴扭矩——这是易于采用静应变遥测术发射机的例子。将这种发射机和电池用软管夹附在汽车的主轴上。轴上的四臂式应变计电桥产生一个同扭矩成比例的应变信号。用Tinius-Olsen静扭力机完成静力校准。12伏直流输入静换流器对装在车上的Aero-therm遥测接收机和CEC记录器供电。记录器对跑车试验过程中的轴扭矩进行连续记录。

大型汽轮机——在大型汽轮机的平衡插头孔内安装一些动应变发射机。发射机遥测装在涡轮叶片上的应变计的输出。通常用电池作电源;然而计划在将来使用感应电源。已在实验室研究机和现场商用运转涡轮机这两种情况下完成了这些试验。由这种试验所得的动应变数据在被用来改进涡轮叶片的设计。

柴油机活塞的温度——在这里,遥测术可能是获取其数据的唯一实用方法。温度发射机和电池附在活塞内侧面上。导线用环氧树脂贴到活塞内壁上,从发射机引到埋置在活塞顶内的传感器上。其传输由曲轴箱内的小接收天线来拾波。

轴扭转动力测量——在这里,采用“静”发射机(直流1千赫)的低频响应优于采用动力测量用的标准动发射机。发射机被用来研究齿轮箱到固定燃气涡轮发动机的连结轴(直径5吋)的扭转动力。用简易狭带条在轴上安装发射机和电池。轴的转速为每分钟4100转。通常,这类测量可用集流环来完成;然而,采用遥测术,费用大大降低,安装期大为缩短,而且测量数据更加精确。

将来的发展

作者经常被问及关于在高温及高重力加速度荷载下工作的可能性问题。如果周围温度被限制在 $50\sim 75^{\circ}\text{C}$ 左右,现在设计的发射机将很有可能在50000~100000个重力加速度下工作。现在正在进行提高封装材料的高温强度的研究。指望这种研究将来有可能提高温度和加速度的组合极限。

(Experimental Mechanics 1971, Vol. 11, No. 8)

无线电遥测术在实验应力分析中的应用

绪 论

实现工业无线电遥测以前,是用集流环将电阻应变计和热电偶信号从转动部件传出的。如果转动轴的端部容易被接近的话,使用商用集流环,对于轴端不易被接近的情况,使用局部被做成周围缠绕的集流环。使用这两类集流环,一般的说,噪-信比高,而且安装周围缠绕的集流环的费用也高。

随着无线电遥测术的发展,从转动部件传出的热电偶和应变计的输出的费用有所下降。而且,到目前为止所进行的试验表明,噪-信比是小的,从而可获得更精确的数据。

本文介绍了对(美)佛罗里达州 Electronics Corporation of Melbourne 制造的两个由四个无线电发射机和两个接收机所组成的系统的估价和应用。这两个系统在现场使用之前都在实验室进行了检验。

估价了三个电阻应变计发射机和一个热电偶发射机。两个应变计发射机由惠斯顿电桥的阻抗控制,并有一个副载波振荡器和一个射频振荡器。这些发射机能用来测量静应变和动应变。第三个是由单一电阻应变计的阻抗来控制,称为应变发射器(Straintel),它只有一个射频振荡器而无副载波振荡器。这种发射机只能用来测量动应变。电桥控制振荡器发射机通常称为桥控振荡器式发射机。热电偶发射机是电压控制的,具有一个副载波振荡器和一个射频振荡器。它被称为压控振荡器式发射机。

调频-调频遥测术系统的描述

调频-调频遥测术系统是用下述元件做成的:①传感元件,②电池,③发射机,④接收机,⑤鉴别器,⑥直流放大器,⑦记录器及⑧发射天线和接收天线。这些元件和辅助设备一块示于图1。

传 感 元 件

传感元件是一种把所测的变量转换为适应电学量的装置。桥控振荡器式发射机的传感元件是一种120欧姆应变计或用导线连成具有1、2或4个有效应变计的惠斯顿电桥线路的电阻型温度传感器。当有效应

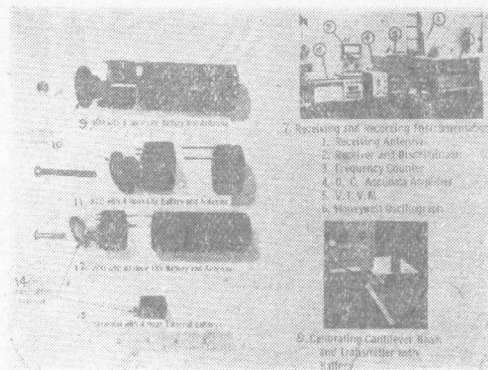


图1 桥控振荡器式的和压控振荡器式的无线电发射机、电池和发射天线及桥控振荡器式发射机校准装置 1. 接收天线, 2. 接收机和鉴别器, 3. 频率计数器, 4. 直流 Aceudata 放大器, 5. 电子管电压表, 6. Honeywell 示波器, 7. 接收器和记录设备, 8. 校准悬臂梁和具有电池的发射机, 9. 装有8小时寿命电池和天线的桥控式发射机, 10 和 14. 发射天线, 11. 装有4小时寿命电池和天线的桥控式发射机, 12. 装有40小时寿命电池和天线的压控式发射机, 15. 装有4小时寿命内电池的应变发射器

变计少于4个时,电桥必须用假应变计或电阻来完成。电桥电阻的范围为50到500欧姆,但是为了得到最大的灵敏度和稳定性,电桥电阻应被调整到120欧姆。

压控振荡器式发射机的传感元件是铜-康铜热电偶。这种发射机具有冷结补偿的机内电路。也可采用其它的热电偶,但必须用压控振荡器式发射机进行校准,而且必须用人工作冷结补偿。其它的毫伏输出装置也可用于压控振荡器式发射机。

电 池

三个可再充电的9伏镍镉电池用于桥控振荡器式和压控振荡器式发射机。这些均示于图1。IEC的E-25和E-27型电池,其使用寿命依次为4小时和9小时,其尺寸依次为 $1\frac{3}{4}$ 吋直径 $\times\frac{3}{4}$ 吋长和 $1\frac{3}{4}$ 吋直径 $\times 3\frac{1}{4}$ 吋长。这些电池用于桥控振荡器式发射机。