

喷锚支护及测试

PENMAOZHIHUJICESHI

技术文集

JISHU
WENJI

科学技术文献出版社重庆分社

表4 沿观测孔轴外锚头附近受拉区深度和其余部分受力状态

深度: 米

	7*		8*		10*		12*	
	外 部	内 部	外 部	内 部	外 部	内 部	外 部	内 部
张拉镇定后	0~6.8	受 压	受 压	受 压	受 压	3~13	0~6	7~13
后	0~4	受 压	0~1.3	11~13	0~4	6~12	0~45	受 压

第五、从对锚索张拉和岩塞爆破时动载作用下使岩体发生压缩变形后,回弹量很小说明,岩体变形主要表现为塑性变形。又由于这种变形主要表现为压缩变形,因此它不危及岩体的稳定状态。

第六、岩塞爆破的动载作用下,未加固岩体比加固岩体的变形量大说明,预应力锚索的锚固效果发挥了作用。

第七、为保证“均匀受压区”的出现,锚索长度 L 与间距 S 之比 $(L/S) \geq 2$ 为适宜,同时要使其间距 S 小于岩体切割块直径的三倍。

第八、预应力锚索的锚固效果好坏,是通过岩体变形大小来衡量的。一般来讲,变形大,效果明显,变形小,效果差。但是,岩体变形大小又与岩体构造

发育情况、结构面的破碎状态、充填物的性质、预应力方向与主要结构面交角的大小等因素有关。

参 考 资 料

〔1〕 ×××水电站扩建工程进水口山体加固效果静态观测,东北勘测设计院科学研究所

〔2〕 道路与工程,日本

〔3〕 在节理发育的坚石内使用锚杆支撑,澳大利亚雪山地下工程的设计与施工经验介绍

〔4〕 地下工程的永久性灌浆锚杆支撑,澳大利亚雪山水电工程锚杆设计施工方面的经验和成就

〔5〕 光爆锚喷技术在310工程中的应用,水利电力部东北勘测设计院

喷锚支护及测试技术文集

中国科学技术情报研究所重庆分所 编辑
科学技术文献出版社重庆分社 出版
重庆市市中区胜利路91号

四川省新华书店重庆发行所 发行
重 庆 新 华 印 刷 厂 印刷

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 13 字数: 41万
1979年7月第一版 1979年 10月第一次印刷
印数: 6000

统一书号: 15176·368

定价: 1.30元

前 言

喷锚支护是最近二十年来发展起来的一类新型支护形式。从1965年起先后在我国煤炭、冶金、水电、交通等系统陆续试用。应用范围由坚硬稳定岩石发展到松软破碎岩石，由小巷道发展到大跨度峒室，由静荷条件发展到动荷条件，由建设工程发展到工程抢险和结构补强。实践证明，喷锚支护可以降低成本40%；节约木材100%；提高工效1~2倍；为地下工程大型机械化施工，创造了条件。

1974年，针对国民经济建设的需要和喷锚支护本身在机具、工艺、设计理论方面有待解决的问题，国家建委将喷锚支护课题列入计划，组织各有关单位联合攻关。喷锚支护设计理论及测试技术就是其中的一个分课题。

喷锚支护从受力机制方面看，主要是加固和利用围岩，调整围岩应力场，从而发挥围岩的自承作用。因此要搞清喷锚支护作用原理，必须研究岩体，了解岩体开挖前后力学形态变化规律及喷锚支护的受力特性。1977年底，设计理论及测试技术攻关小组在昆明协调会议上提出：应继续从测试技术、工程实践、岩体力学特性及参数测定、模拟试验及有限元分析等四个方面进行研究。并计划组织几次较为系统的专题讨论会。

1978年5月在马鞍山由冶金部马鞍山矿山研究院主持召开了喷锚支护测试技术专题讨论会；同年9月在北京由铁道部科学研究院主持召开了喷锚支护工程试验及长期观测讨论会。这些会议分别按专题交流了经验，进行了学术讨论，对测试技术、工程试验及喷锚支护作用原理以及相应的设计方法进行了系统讨论和评议，发扬了百花齐放、百家争鸣、互相学习、联合攻关的精神。

本文集系根据上述两次会议的撰文编辑的。它分两部分：第一部分，主要介绍有关测试手段；第二部分则着重介绍有关工程试验及喷锚支护作用原理。

喷锚支护，从实践解决了的岩体和支护组成统一结构这一概念出发，去解决地下工程的支护问题。它的一套支护设计思想和设计程序有别于过去的传统支护形式。因此，喷锚支护的出现，带来了一系列新课题。这些课题目前国内外都在大力进行探讨。大量工程实验和实践、测试手段及技术、电子计算机，以及工程地质力学、岩体力学、隧道力学的发展，必将推动地下工程设计理论新的发展。我们希望本文集能为喷锚支护理论的完善，进而为地下工程设计理论的发展有所帮助。

为节省篇幅，插图编号按总顺序编号，省略那些重复出现的图形。附表仍按每篇出现的次序编号。

目 录

第 一 部 分

SGY—135 型钢弦式应变计的研究和应用	(1)
“YCW—80 型差动变压器式位移计”研制初步总结	(10)
机械式八点钻孔伸长计	(20)
电感式岩石位移测定仪及其工程应用	(24)
锚杆拉拔试验设备——空心千斤顶	(30)
MC 型锚杆测力计	(31)
ZHC型油压枕	(32)
普济隧道“形变-电阻率法”对围岩力学形态变化的量测.....	(33)
喷锚支护效果的声波检测	(43)
关于岩体绝对应力测量技术	(49)
隧道喷混凝土衬砌表面应力解除试验	(54)
普济隧道地表钻孔预埋元件量测试验	(61)
喷锚支护的测试技术小结	(69)
张家洼铁矿区软弱岩体工程喷锚支护量测技术	(80)

第 二 部 分

喷锚支护作用机理的几个问题	(95)
关于锚喷支护作用机理的初步探讨	(99)
地应力与喷锚支护机理	(106)
从岩体变形破坏规律角度探讨喷锚结构作用原理	(111)
对围岩及喷锚衬砌相互作用的长期观测	(119)

松软围岩中喷射混凝土支护的试验研究	(125)
张家洼破碎岩体巷道喷锚支护试验与应用总结	(135)
在软弱围岩中隧道喷混凝土支护接触应力的实地量测	(148)
隧道开挖对围岩的扰动状况的分析	(161)
梅山铁矿软弱围岩巷道喷锚支护力学形态观测总结	(167)
皇后岭隧道喷锚衬砌量测试验	(183)
预应力锚索的锚固效果	(190)

第一部分

SGY-135型钢弦式应变计的研究和应用

铁道部科学研究院铁建所隧道室

利用钢弦的振动频率特性设计和制成的应力、应变、位移或压力传感器，在国内外的工程试验中已成为一种很普遍的量测手段。我室在1972年设计和试制了本文所介绍的这种应变计。经过室内性能试验和现场实际应用，目前已通过初步技术鉴定，定型为SGY-135型钢弦式应变计。现将这种应变计的设计、试验、研究中的若干问题，以及在工程中的应用情况分述于后。应变计外形见图1和图2。

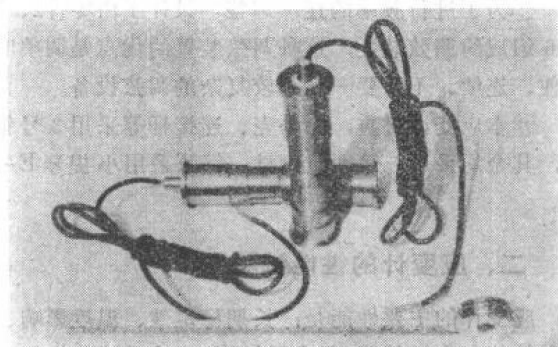


图1 用于混凝土内应变测试的SGY-135型应变计

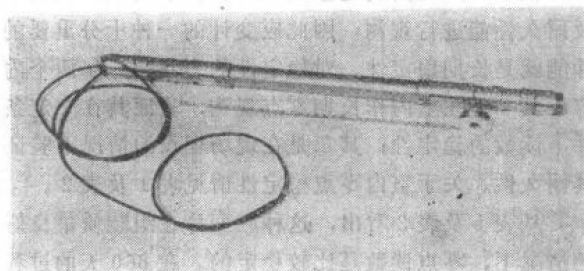


图2 用于围岩钻孔测试的SGY-135型应变计

一、应变计的设计

(一)问题的提出

地下结构物和岩体力学的研究工作中的一个很重要课题，就是关于围岩稳定性和围岩变形的测试。地下洞室一经开挖，洞体周围就要产生扰动变形，也即破坏了原始应力状态，围岩中产生应力重分布。此时，为了约束围岩随时间的继续变形，就需要进行衬砌支护。这种支护所提供的抗力（或支护所受的外力），其大小与分布必然与围岩扰动范围有密切关系。为了研究上述问题，重要的手段之一就是进行实地量测。国内外有很多人对支护和围岩的相互关系问题进行了研究。例如芬纳（Fenner）等人对静水压力场圆洞的弹塑性解，得出公式：

$$P_i = -c \cdot \operatorname{ctg} \phi + [c \cdot \operatorname{ctg} \phi + P_0 (1 - \sin \phi)] (r/R)^{\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}}$$

其中： P_i 为衬砌所提供的抗力； c 、 ϕ 为岩体的凝聚力和内摩擦角； r 为隧道半径； R 为塑性区半径； P_0 为岩体原始应力。卡斯特纳和卡柯等人也都推导出了类似的方程。在这些理论方程中， R 的大小就是洞室的塑性区（或看成扰动区）范围，这是一个重要的数据。它只有通过实地测试才能获得。

另外，为了指导施工，需要得到围岩内部应变随时间而变化的数值，这个数值也要进行测试。

最后，隧道衬砌的混凝土，或者其他结构的混凝土当受到外力作用后，其内部应力—应变情况如何，以及在长期受力情况下应变的发展情况，这些数据对于设计和了解结构的效果和承载能力都是十分重要的，而它也必须通过实地测试才能获得。

综上所述，要正确地进行工程结构设计和检验结构的可靠性，必须有一种既能长期有效地进行观察，又能确切定量地反映实际变形状态的测试元件。目

前,国内外都在作大量的研究工作。我室为了工作的需要也进行了这方面的一些工作。

(二)设计的要求和结构特点

应变计的组装情况如图3所示。

1. 根据上面谈到的几点理由,所设计的应变计

必须满足:能长期地、性能稳定地进行现场测试,能进行围岩内部应变测试,又能进行混凝土内应变的测试;能经受搬运、车辆运输、安装时所难免的各种震动;在围岩钻孔测试中能将应变计放于任何深度,而且能将数个应变计串成一根测杆,同时又能保护引出线不被损坏。

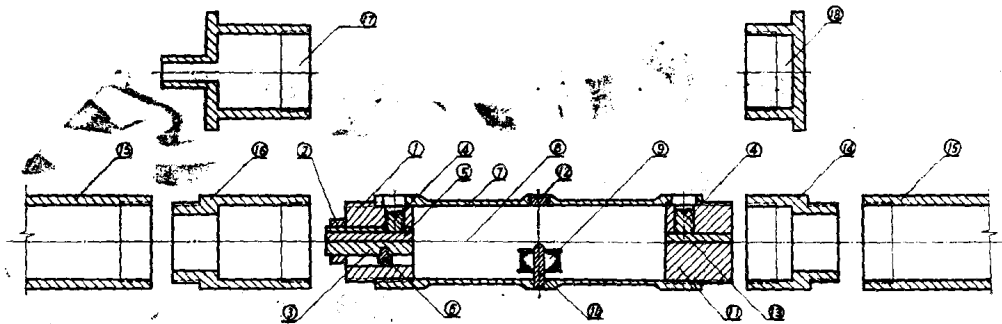


图3 应变计组装图

①端头1, ②调弦螺母, ③调弦螺杆, ④顶弦螺丝, ⑤固弦销1, ⑥止旋螺丝, ⑦外壳, ⑧钢弦, ⑨线圈, ⑩线圈铁芯, ⑪端头2, ⑫封固螺丝, ⑬固弦销2, ⑭连接套2, ⑮连接杆, ⑯连接套1, ⑰端套1, ⑱端套2

2. 为了达到上述设计要求,在选型和结构设计上作了如下考虑:

在选型方面。对比了电阻式、电感式和钢弦式几种基本元件的优缺点,前二者具有灵敏度高的优点,但是长期耐久性较差,对绝缘度的要求甚高,大多数这种元件在几个月的现场使用中失效;而后者灵敏度稍差,但是长期耐久和稳定性好,大多数元件在现场都能使用5年以上,现在已有10年以上的例子。根据这一原因,选用振弦原理作为设计的基本前提。

在结构方面,有如下一些特点:

①应变计外型采用薄壁圆管式。这种形式优点是:受力明确、率定简易、计算方便。

②为了适应钻孔内埋置使用,设计时考虑将位于钻孔不同深度所有应变计的引出线都从钻孔测杆内部通过,端头1和端头2(零件1和零件11)都钻有6个孔(与轴线平行),这就保证测杆组装时,可将前一个应变计的引出线从后一个应变计内部通过。为此,使得所有应变计的引线都可通过测杆内部,最后从杆端引出,从而保证了安装到钻孔去时引出线的安全。

③钻孔测杆是用若干连接杆连接相邻的应变计组成的。连接杆也为薄壁圆管状,而且全部带螺纹。组装时为避免应变计旋转,在零件14、15、16中应用正反螺纹原理设计。

④为了适应混凝土内部埋设使用,应变计还增设了零件17和18,由于混凝土内应变测量一般都是单点

进行,所以无需连接杆等零件。可用零件17、18取代零件14、15、16。

⑤为了进行频率的连续调整,设计了由零件2、3和6组成的调弦装置,这种调弦装置的优点是调整时方便、连续、不需要一系列较复杂的调弦设备。

⑥本应变计材质,除外壳、连接杆等采用3号钢外,其余均采用5号硬质钢材。钢弦采用小提琴E-1弦。

二、应变计的性能试验

应变计的主要性能是:长期稳定性、温度影响、抗震性能和力学性能(包含灵敏度)。针对这些性能,作了一系列试验。

(一)零点稳定性

在很多工程的实地量测中,都要求对其长期效果及耐久性能进行观测;因此应变计的一种十分重要的性能就是长期稳定性。对稳定性的检验分为两个内容,其一是在室内作长期零点观测,验证其在一定条件下读数的稳定性;其二是在现场埋设的情况下验证其耐久性。关于室内零点稳定性请见表1及表2。

从表1及表2看出,这种应变计在组装质量良好的情况下,零点读数是比较稳定的。在660天的过程中,这些应变计虽经加热、低温、拉压率定,以及几经搬运,但是其频率变化都在5赫以内。

表 1 零 点 稳 定 情 况

编 号	时 间 温 度 读 数 值	(天)	(1)	(3)	(4)	(6)	(7)	(9)	(11)	(14)	(17)	(48)
		23℃	27℃	26℃	25℃	25℃	24℃	27℃	28℃	26℃	24℃	27℃
		初读数 (赫)	与初读数 之差	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
1		1685	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-3
2		1839	-3	0	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-
3		1468	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	0	0
4		1481	0	0	+1	+1	0	+1	+1	+1	+2	+3
5		1471	-2	-2	0	-1	-2	-1	-1	-1	0	+2
6		1505	-2	-3	0	-1	-2	-1	0	0	+1	+7
7		1491	-2	-2	-1	-1	-1	0	+1	0	0	+1
8		1457	-1	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	0	+1
9		1486	-2	-2	-2	-2	-2	-1	0	-1	0	+1
10		1462	-2	-2	-1	-2	-1	-1	0	-1	+1	+10

表 2 长 期 零 点 稳 定 情 况

编 号	时 间 温 度 读 数 值	73. 7. 18 (30℃)	73. 11. 19 (125天) (6℃)	74. 6. 3 (320天) (28℃)	75. 2. 14 (576天) (12℃)	75. 5. 6 (660天) (22℃)
		初 读 数 (赫)	与 初 读 数 之差(赫)	同 左	同 左	同 左
6		1509	未 测	未 测	-4	-1
7		1487	”	”	-1	+1
8		1442	-4	+3	+1	+1
10		1473	+2	+5	+5	+2

(二)温度影响

为了了解应变计在温度变化的情况下能否适用,进行了温度影响试验。

试验分为两次进行,第一次是将全部应变计放于恒温箱内进行,从常温 22℃ 升到 52℃ 然后回复到 22℃,试验结果列于表 3。第二次是将 8*、9*、10* 三只应变计放于保温瓶中作降温试验,从 10℃ 降到 -17℃,然后回复到 10℃,试验结果列于表 4。

从试验结果可以看到:

1. 频率随着温度的升高而增高,随着温度的降低而减少。当温度回复到初始温度时,频率基本上回复到初始点;

2. 从表 3、表 4 所列数据可以计算,当温度每变化 1℃ 时频率的平均变化值 ≤ 0.2 赫,升温 and 降温时情况相同。也就是说温度系数应为 ± 0.2 赫/ $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

(三)抗震性能

为了解应变计的抗震性能,以适应组装后的运输、埋设中的震动影响,以及可能用于钢筋混凝土结构的钢筋应力测量,进行了应变计的抗震试验。试验方法为:将应变计直接放于混凝土震动台上震动 1 分钟,震动台参数为:振幅 0.5 毫米,频率 2850 次/分。试验结果表明,震动前后频率没有变化。

另外,应变计在经过火车托运,汽车搬运后,其变化很小。例如八只应变计在从北京到某隧道工地的运

表3 升温影响情况

温 度 编 号	初读数 (赫)	与初读数 之差(赫)	同左	同左	同左	同左	同左
1	1682	+1	-6	+7	+6	+9	+1
2	1837	0	+5	+5	+6	+6	0
3	1467	1	+1	+2	+4	+4	1
4	1481	+1	+3	+3	+5	+5	+1
5	1470	1	+3	+3	+5	+6	1
6	1504	1	+3	+4	+7	+9	1
7	1490	1	+3	+3	+5	+7	0
8	1456	1	+3	+2	+4	+5	0
9	1484	0	+3	+3	+4	+5	+1
10	1469	1	0	0	+1	+1	1

表4 降温影响情况

温 度 编 号	初读数 (赫)	与初读数 之差(赫)	同左	同左	同左
8	1438	-4	-6	-6	-1
9	1485	-1	-3	-4	-1
10	1475	0	-1	-1	-1

输中, 频率变化在0~2赫之间, 资料见表5。

(四)力学性能

为了解应变计在受拉受压情况下频率变化特性, 作了应变计受拉和受压试验。在此基础上还对每一只应变计进行了率定, 作出轴向变形-频率曲线。

受拉试验分两种情况, 第一种情况如图4所示的是测杆(包含五只壁厚3毫米的应变计)在砝码加载情况下的曲线。第二种情况如图5所示为单个应变计(壁厚1毫米)在拉力试验机上的拉力-频率曲线。

表5 应变计经运输后的变化

情 况	应 变 计 号 频 率 (赫)	4	16	18	32	44	48	52	62
托 运 前		1507	1448	1427	1442	1428	1467	1425	1490
到 工 地 后		1507	1449	1429	1442	1430	1469	1452	1490
差		0	+1	+2	+1	+2	+2	0	0

除了上述拉力试验外, 大量的工作是进行单个应变计的受压变形率定试验, 以作出每只应变计的变形-频率特性曲线, 供实际测试时使用。图6所示为任选三只应变计的率定曲线。

从曲线可以看出, 受压时和回复时, 重复性较好, 因此可近似地将受压曲线的率定值用于受拉中去。

从上述三组曲线分析可以看出:

1. 不论受拉或受压, 不论是单个受力或测杆受力, 三组曲线都具有较好的重复性, 这就为实际使用提供了基本的条件;

2. 图4和图5所示分别为壁厚3毫米和1毫米, 而弦长相等的应变计, 从图看出, 当受轴向力时, 后

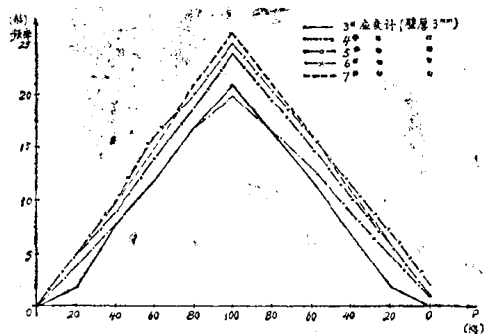


图4 由五只应变计组成的测杆受拉试验

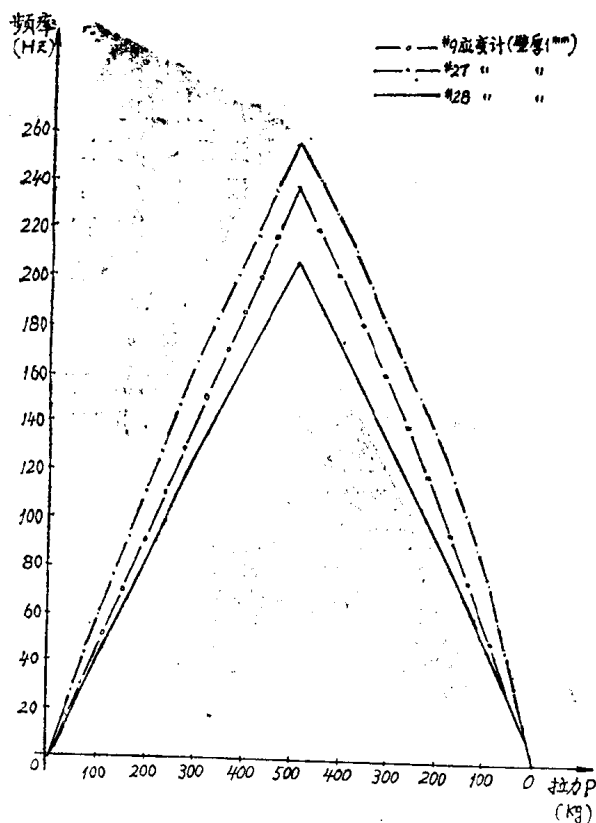


图5 单个应变计受拉试验

者灵敏度比前者高一倍左右；

3. 在实际使用中，可利用图6所示单个应变计的变形率定曲线。由于率定时量测的变形是应变计全长 L 内的变形数值，因此如果要用应变—频率曲线，只要将变形值除以 L 即可。

三、应变计若干问题的研究

(一)关于应变计的稳定性

就应变计本身来说，影响其稳定性和耐久性的因素主要是：钢弦的频率是否稳定；应变计的结构是否符合

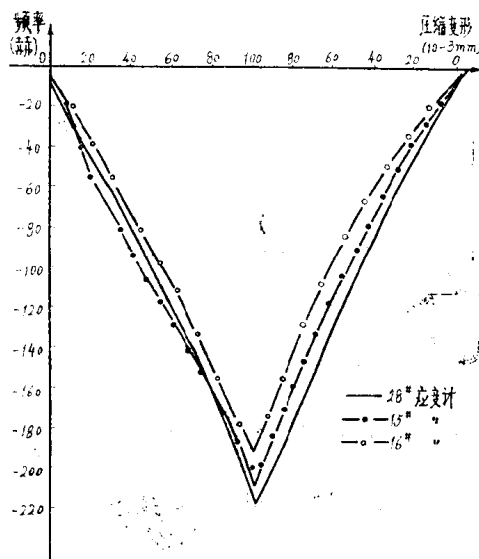


图6 单个应变计变形—频率曲线

理；应变计的组装质量的好坏以及磁感元件性能是否稳定。根据室内试验和现场观测的资料证明，SGY-135型应变计在组装质量良好的情况下，具有较好的长期稳定性和耐久性，因此这种应变计作为围岩和混凝土内部应变的长期测试是能够胜任的。

(二)关于应变计的灵敏度

振弦式测试元件中，钢弦的自振频率 f 和钢弦长度 l ，钢弦应力 σ 和钢弦密度 ρ 之间有如下关系：

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

$$\text{即 } f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$f^2 = \frac{E}{4l^2 \rho}$$

取 f 对 E 的微分，得：

$$2f df = \frac{E}{4l^2 \rho} dE$$

整理后得下述公式：

$$df = \frac{E}{8l^2 \rho f} dE$$

从上面的公式可以看出：假定钢弦 E ， ρ 是常数，当钢弦有一应变增量 $d\varepsilon$ 时，钢弦频率增量 df 与钢弦长度 l 的平方成反比，与测试时的频率 f 成反比。众所周知，当有同一个应变增量 $d\varepsilon$ 时，则 df 越大，该种应变计的灵敏度就越高。根据上述公式，减小钢弦长度和减小元件初始频率都能提高应变计的灵敏度。

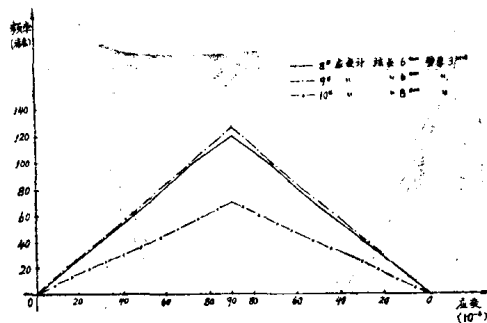


图7 钢弦长度不同时频率—应变曲线

图7所示为弦长 $l_1 = 8$ 厘米和 $l_2 = 6$ 厘米之频率—应变曲线， $l_1^2:l_2^2 = 8^2:6^2 = 64:36$ ，从曲线所列数值可看出，相应的频率增量比 $df_1:df_2$ 与 l 的平方很近似地成反比例，验证了上述公式的正确性。

从理论上讲，应变计钢弦长度越小，灵敏度越高，但是从试验看出，钢弦越短带来阻尼越大、衰减越快的缺点，频率越高则衰减越大，当示波式仪器Y轴增益不够时，就无法量测，对数字式仪器来说，也不易测得稳定读数。建议当采用小提琴E弦时，其长度取4~6厘米为宜。当采用更细的钢弦时，此长度还可适当减小。SGY-135型应变计采用6厘米。

另外，对于初始点的灵敏度来说，应变计的初始频率越低越好。但是对于受压的情况来说，初频太低就不适宜，因此在一般情况下，根据使用在不同结构中的情况，建议初频选择在1000~1500赫。SGY-135型应变计当用在围岩钻孔和喷射混凝土结构时初频选择在1400赫左右。

(三)关于连接杆的影响问题

在围岩变形的钻孔量测中，采用连接杆将几个应变计串成一根测杆，使应变计处于围岩的不同深度，以测得不同点围岩的变形。有一种意见认为连接杆有一定刚度，因此会使相邻应变计的变形相互传递、相互影响。实践证明，对于长度 ≥ 30 厘米的空心薄壁钢管的连接杆来说，在砂浆锚固良好的情况下，这种影响甚微，可以忽略不计。例如进行整拱加载的试验时，在八种加载方案过程中，处于不同深度的三个应变计的变形，靠近岩面的一个受拉变形均很大，而相邻的两个应变计变形都近于零。这一结果清楚地表明，相邻应变计不会相互影响，连接杆是可以使用的。

(四)应变计与周围介质共同变形问题

应变计在实际使用中，是埋设于围岩或者混凝土之中的，这就等于从围岩或混凝土中取走了一个圆

柱，代之以一个钢管。因此，必然带来一个问题，即围岩或混凝土在该处是否被加强而能否共同变形的问題。现从轴向弹性变形的情况分析：任一非长细杆件 L ，在轴向变形时，其变形增量 ΔL 可用下式计算：

$$\epsilon = \Delta L / L,$$

$$\text{由于 } \epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P/F}{E} = \frac{P}{EF}$$

代入上式，得：

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{P}{EF}$$

$$\therefore \Delta L = \frac{PL}{EF}$$

从此公式可知：当外力 P 和应变计长度 L 一定时，其变形增量只与 EF 成反比， E 为弹模， F 为圆柱（或应变计的管壁）的截面积。假设圆柱为 $E_{柱}F_{柱}$ ，应变计的管壁为 $E_{计}F_{计}$ 。共同变形条件显然应该是 $\Delta L_{柱} = \Delta L_{计}$ 。也即 $E_{柱}F_{柱} = E_{计}F_{计}$

$$\text{或 } \frac{E_{柱}}{E_{计}} = \frac{F_{计}}{F_{柱}}$$

也就是说：当满足应变计管壁和圆柱的截面积和相应的弹模成反比时，那末用此应变计取代围岩或混凝土的圆柱，就能达到共同变形之目的。

如果结构是受挠弹性变形，也可有其相应的共同变形条件，此不赘述。

(五)关于应变计的换算刚度概念

前面已经提到，应变计在轴向受力时的变形增量 ΔL 可用下式计算：

$$\Delta L = \frac{PL}{EF}$$

公式右边， L 为应变计长度，SGY-135应变计 $L = 13.5$ 厘米； P 为轴向力，假定为100公斤。根据图5的曲线可查得每100公斤拉力（或压力）应变计的频率变化 Δf ，例如28#应变计 $\Delta f = 44$ 赫，再从图6可查得28#应变计变化44赫时，相应的变形 $\Delta L = 24 \times 10^{-3}$ 毫米 $= 24 \times 10^{-4}$ 厘米。将28#应变计的上述数据代入公式两边得：

$$24 \times 10^{-4} = \frac{13.5 \times 100}{EF}$$

$$\text{则 } EF = \frac{13.5 \times 100}{24 \times 10^{-4}} = 5.63 \times 10^5 \text{ 公斤/厘米}^2 \cdot \text{厘米}^2$$

$$\text{设 } W_G = EF$$

W_G 称为应变计的换算刚度。其物理意义是：由

于应变计是一个变截面的元件,在丝扣螺纹间又充填有微量的弹性模量很小的环氧树脂,因此,应变计的刚度可以用一个刚度为 EF 的均匀圆管来代替,这就是应变计的换算刚度。从率定曲线看,每一个应变计都有一个换算刚度,但当壁厚相同时,其数值很相近。

在实用中,它可用来和混凝土或围岩的圆柱相比较。比如,对于 $E_R = 2 \times 10^5$ 公斤/厘米², $F_R = \pi D^2/4 = \pi \times 3^2/4 = 7.06$ 厘米²的岩石圆柱,其轴向变形刚度为:

$$W_R = E_R \cdot F_R = 2 \times 10^5 \times 7.06 = 14.1 \times 10^5 \text{ 公斤/厘米}^2 \cdot \text{厘米}^2$$

$$\frac{W_R}{W_G} = \frac{14.1 \times 10^5}{5.63 \times 10^5} = 2.5$$

也就是说,在实际上,这种岩石的刚度为应变计换算刚度的2.5倍。这在使用上还是允许的。

四、应变计在工程中的应用

钢弦式应变计通过室内长期观测,证明其稳定性良好,受温、湿度等外界影响较小,能适应隧道现场测试的复杂条件。从75年起,先后在灰峪隧道喷锚试验峒及腊树坳隧道喷锚整治病害段应用该应变计于现场加载结构试验及长期观测中,测试围岩变形及喷混凝土衬砌内应变,据以分析喷锚支护及围岩共同作用的力学特性及其支护效果。用于长期观测的应变计,最长的已有两年半时间,且尚在继续观测中,大多数元件工作正常,获得了一批实测数据。现将测试情况简述于下。

(一)在灰峪隧道喷锚试验峒测试围岩径向变形

灰峪隧道试验峒于1975年开始进行喷锚结构长期观测与加载试验,该试验峒通过 $f = 3 \sim 4$ 的破碎石灰岩地层。采用厚10厘米喷混凝土及长2.0米、间距1.0米的砂浆锚杆作为衬砌。为了了解岩层在峒室开挖过程及其以后的松动和变形情况,把5只SGY-135型钢弦应变计用连接杆串联起来,组成长2米的测杆,各应变计导线通过应变计预留的内孔及连接杆的管腔由测杆尾部引出,沿隧道径向埋设在围岩中。埋设前用风钻钻出 $\phi 40$ 毫米,深2米的孔,用注浆罐注入水泥砂浆,要求将孔中空气排净,将测杆徐徐插入,挤出多余的砂浆,使测杆与围岩紧密粘结,共同变形。

量测分为喷锚支护的长期观测及结构加载试验观测两项。

长期观测所用测杆埋设于拱顶,用以量测拱部围

岩的径向变形。测杆埋设后两个多月内,经历了钻眼、放炮、扩大以及安设锚杆、喷混凝土等施工工序,围岩在上述工序过程及其后28个月的长期观测中的变形状态示于图8中。由于爆破开挖及断面跨度加大的影响,围岩沿径向发生张性变形。如埋深1.8米的12#应变计在最初三个月里频率增长129赫,相当于0.13毫米的张拉值。其后,喷锚支护开始发挥支护作用,围岩变形趋于平缓。但由于围岩破碎,稳定性较差,在外界因素(如地震、雨季等)影响下,变形曲线仍有起伏,但变化比较平缓,没有发生围岩失稳的迹象。

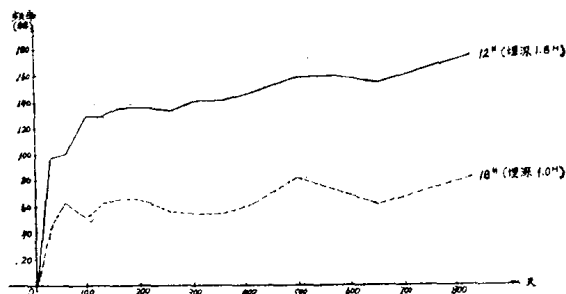


图8 钢弦式测杆频率—时间曲线

在喷混凝土拱带结构加载试验中,测杆埋设在拱顶左侧的径向位置。

图9中表示距岩面1米处5#应变计的频率-荷载关系曲线。从曲线看出,在外荷逐级增加的情况下,围岩在该点沿径向受张变形,变形的线性较好,而且在卸载以后,该点的变形完全回复,说明围岩在本次加载过程中基本处于弹性阶段。以后又通过不同形式的外荷作用,应变计仍工作正常。

(二)在腊树坳隧道病害衬砌喷网加固长期观测中的应用

腊树坳隧道处于 $f = 2 \sim 4$ 的变质泥质及泥灰质板岩中。由于地压较大,以及设计施工等多方面的原因,使隧道局部地段衬砌拱部产生多处纵向裂缝,拱腰内缘张裂,拱顶内缘挤碎。

为保证行车安全,恢复衬砌的承载能力,广州铁路局于1976年对隧道病害进行了整治。采用厚10~25厘米的喷混凝土及钢筋网(主筋 $\phi 16 \sim \phi 19$ 毫米,网格 25×25 厘米)进行拱部加固。为了探索加固拱的受力性能,并对其长期运营效能进行监测,广州铁路局科研所和我室协作在距进口181米的拱部断面混凝土中沿环向埋设SGY-135型应变计5只,跨越右拱腰张性裂缝埋设2只,分别测试喷层的环向应变及裂缝的变形。

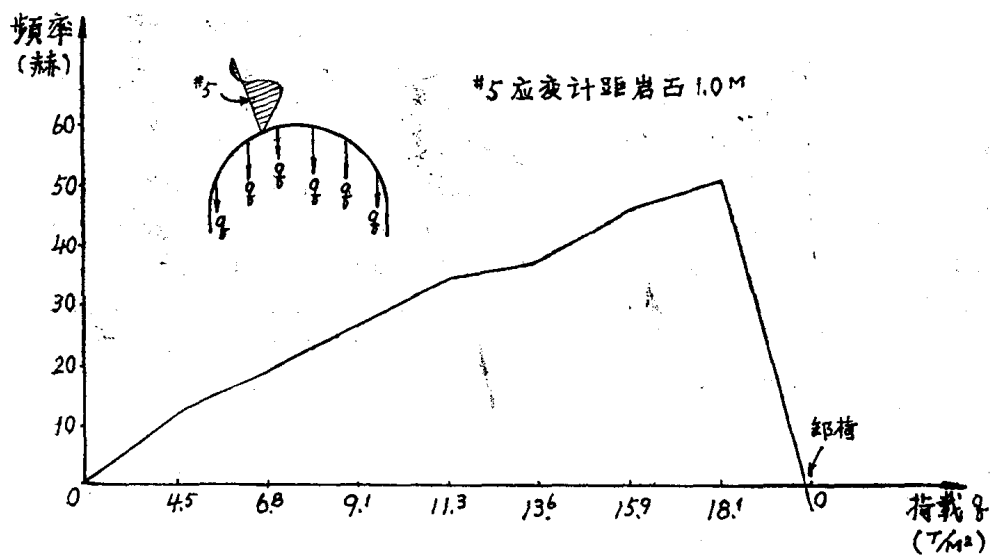


图9 钢弦应变计在整拱加载试验中 频率-荷载曲线

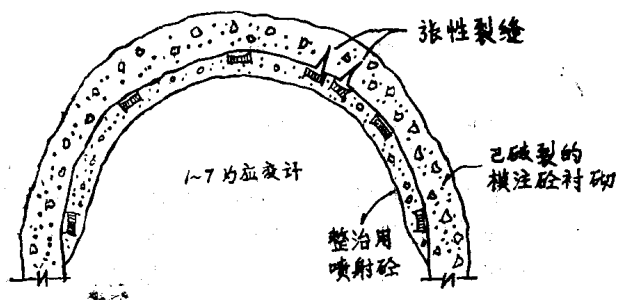


图10 应变计分布图

应变计装设前, 先将预定位置围岩清理干净, 按要求方向(环向)预埋固定应变计的细铁丝, 将应变计初步固定, 并将应变计导线沿岩面顺理至测试集中点。按照喷混凝土的配比拌和少量混凝土(少放石子), 埋护应变计和导线, 以防喷射时损伤, 为了解应变计非受力变形影响及仪器的零点飘移情况, 另埋设一只无应力计, 即将同类型的钢弦应变计裹以混凝土, 松动地置于一空管内, 将管悬挂在工作应变计附近。无应力计除不受力外, 其他条件(如温湿度等)基本与工作应变计相同。应变计及导线装置妥当后, 即喷射混凝土, 将工作应变计及无

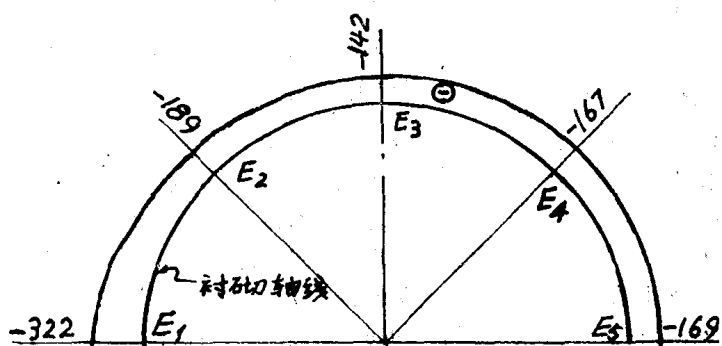


图11 喷层第476天切向应变分布曲线

应力计管均喷埋于混凝土中, 结成一体。应变计在拱部的布置见图10。从1976年11月至1978年3月, 按期进行测试, 图11为拱部喷层第476天切向应变分布曲线。图12为拱腰裂缝变形的发展情况, 经过近一年半的时间, 喷层内力有所发展, 全拱均受压, 说明它参

与了工作, 起到加固作用。但应力数值不大, 如应变值最大点左拱脚 E_1 为 $-322 \mu\epsilon$, 大体相当于58公斤/厘米², 对200级的喷混凝土尚有很大安全储备。右拱腰裂缝略有张开, 最大值仅0.021毫米, 且变化渐趋平缓。目前, 观测仍在继续进行, 除个别应变计出现故

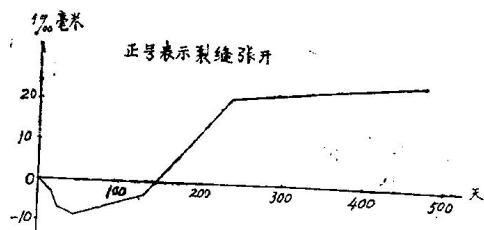


图12 右拱腰裂缝变形—时间曲线

障外，大多数应变计工作正常。

SGY-135型钢弦式应变计除在隧道中用于衬砌及围岩变形量测外，尚可用于桥梁、房建、矿山及水工建筑的混凝土与钢筋混凝土结构，除测试混凝土变形外，也可以经过改装后与钢筋焊接，以测试钢筋的应力、应变。

五、应变计的组装工艺

1. 应变计在组装前，应将各零件(除线圈外)用汽油或丙酮洗刷干净，尤其是两个端头和紧固钢弦的零件。钢弦应无锈斑，无手汗渍和油污，外壳的内侧应无锈斑或其他脏物，以免在长期量测中产生不良影响。

2. 安装零件1，拧入外壳，并使零件1的顶弦螺丝孔对准外壳的预留孔。

3. 将线圈从外壳另一端放入，同时将线圈导线从零件1的Φ3孔中引出，然后用铁芯(零件10)将线圈固定于外壳，并用环氧树脂粘接剂牢固粘结之，但注意此时铁芯先不要粘结，以便调正。

4. 安装零件11，拧入外壳另一端，同时使其顶弦螺丝孔对准外壳预留孔。

5. 将钢弦用零件5(固弦销1)固定于零件3(调弦螺杆)孔中，注意钢弦应位于零件3的中心位置，并将零件2拧上。

6. 将固定于零件3上的钢弦穿过另一端的零件11的中心孔，使其位于零件11的中心位置。并可通过外壳的中部三个观察孔观察钢弦是否居中，以及调正铁芯上下位置，使铁芯顶面与钢弦距离保证在0.8~1.0毫米。注意在钢弦安装时切勿使其扭转，以免影响

质量。

7. 拉紧钢弦，并用零件13(固弦销2)固定钢弦，然后将零件4(顶弦螺丝)拧入，通过零件13顶紧钢弦，在拉紧钢弦时也必须注意勿使钢弦扭转。

8. 此时可进行频率试测。调节零件2(调弦螺母)，可拉紧或放松钢弦，用以连续选择钢弦频率，至所需初频为止，然后拧入零件4，通过销1顶紧钢弦。

9. 所有丝扣螺纹均涂以环氧树脂粘接剂，但注意零件4、10、12均在组装调整完成后粘接。实践证明，此项处理能有效地防止应变计受潮损坏。

10. 组装好的单个应变计应通过专门设计的率定器进行率定(图13)，从而得到每一应变计的应变-频率曲线。如没有率定器，也可通过小吨位压力试验机配以千分表进行率定。该应变计在埋设前无需再行率定。

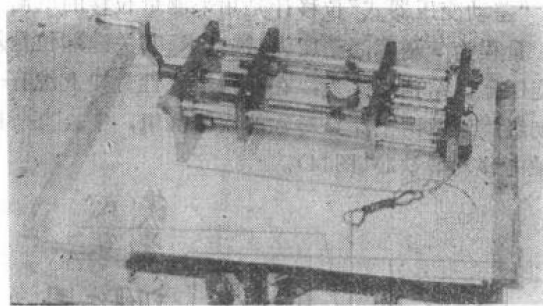


图13 应变计变形率定器

11. 根据用途的不同，作不同的最后连接处理。当用于钻孔测试时，则用零件14、15、16连接相邻两个应变计，连接杆长度可根据需要而定，一般要求大于30厘米；当用于混凝土内部测试时，则用零件17、18取代14、15、16，而组装成单个混凝土内应变计。

12. 为加速钢弦在受拉时的松弛过程，钢弦应进行热处理。热处理方法是把应变计放入恒温箱，反复三次，温度为85~90℃，时间分48小时、24小时、12小时三次，频率调整到1900~2000赫。

如果较严格地按上述方法进行组装，即能保证应变计在试验和使用中的质量。

“YCW-80型差动变压器式位移计”

研制初步总结

水电部东北勘测设计院科学研究所喷锚组

为满足工程建设和科研工作的需要，我们试制了“差动变压器式”位移计，并用以进行了几个工程的实测工作，效果尚好，现将其有关情况介绍如下。

一、工作原理概述

“差动变压器式”位移计是用来测量位移的电测元件。量程为5毫米，精度为1%毫米。其关键部位是差动变压器，结构形式为：在线轴形磁性骨架上绕有一个初级绕组及两个完全对称的次级绕组，中心有一根可轴向移动的铁芯(图14)。

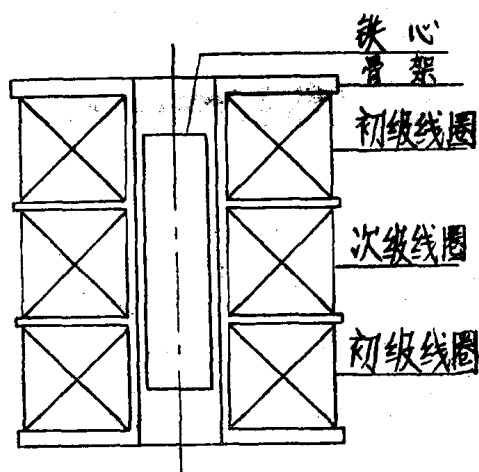


图14 差动变压器结构示意图

当初级绕组加上交流电(220伏，50赫)后，两个次级绕组便分别产生感应电势 E_1 和 E_2 ，其值之大小随铁芯位置的改变而变化。若铁芯处于中间位置，因 W_1 与 W_2 完全对称，故 $E_1 = E_2$ 见(图15)。

若铁芯移动 ΔX ，则 E_1 便增大 ΔE_1 ，而 E_2 减小 ΔE_2 ，在线性范围 $|\Delta E_1| = |\Delta E_2|$ 内(图16)。

由上述特性所定，次级绕组有两种接线方式：即顺接法和反接法。我们采用了顺接法，如图17示： $E = E_1 + E_2$ 。在线性范围内 ΔE_1 与 ΔE_2 正好互相抵消。所以，当铁芯移动时， E 值保持不变，但 E' 点之电位(相对于C或D点)却随铁芯移动而变化。

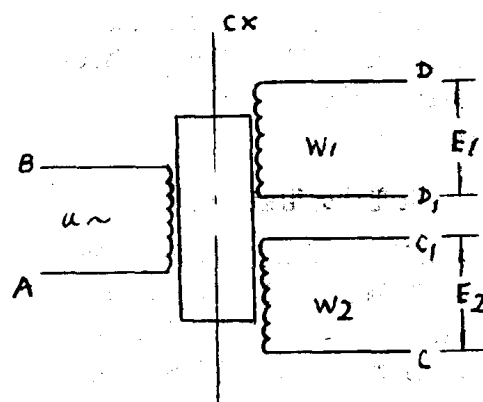


图15 差动变压器原理示意图

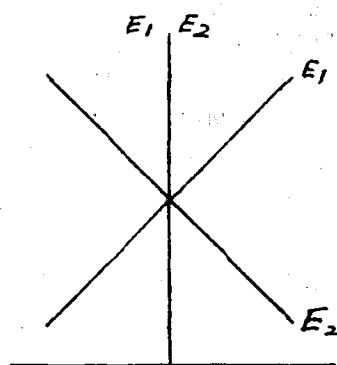


图16 差动变压器特性曲线

当铁芯处于中心位置时，电位器W若亦处于中心位置时，且 $W_1 = W_2$ ，则此时桥路平衡。C、D两点电位相等，输入到指零放大器的讯号是零，指零电表亦指“0”。当铁芯向某一方向移动时，则桥路平衡遭破坏，有一不平衡讯号输入指零放大器放大，经相敏整流后，指零电表向某一方向偏转，此时，就须手动改变电位器W之位置，直至桥路重新平衡，指零电表指“0”为止。若铁芯向另一方向移动，则情况恰与上述相反。

我们采用第一机械工业部材料试验机研究所生产的“CC-702”型差动变压器测长仪作为接收器。它的电

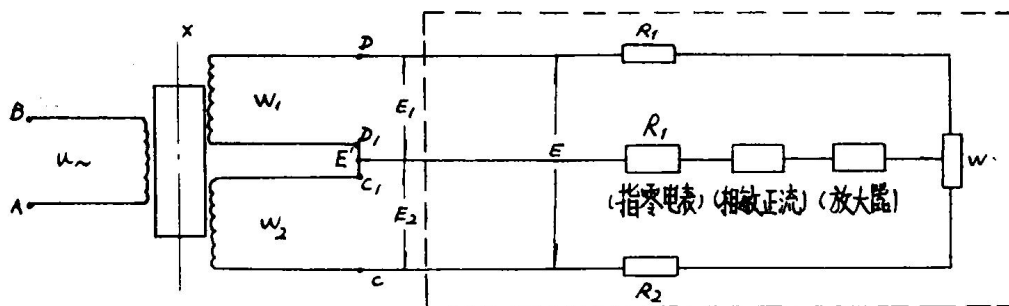


图17 差动变压器顺接法示意图

位器W是由几组成对的十进位精密电阻组成。可直接读出对应的长度单位。如：X1毫米，X0.1毫米，X0.01毫米，X0.001毫米。因此，操作和资料整理都很方便。

二、结构型式及几何尺寸

目前，我们已试制成的“差动变压器式位移计”有

数种，其区别主要是金属波纹管的长度和柔韧度有所不同，见图18~20：

下面着重介绍，“YCW-80型”差动变压器式位移计。其结构见图21及图22，它的主要部件有：

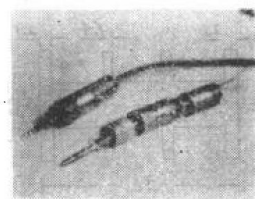


图20 差动变压器式千分表

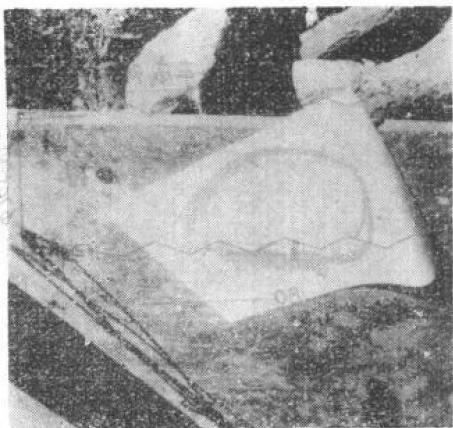


图18 硬波纹管差动变压器式位移计

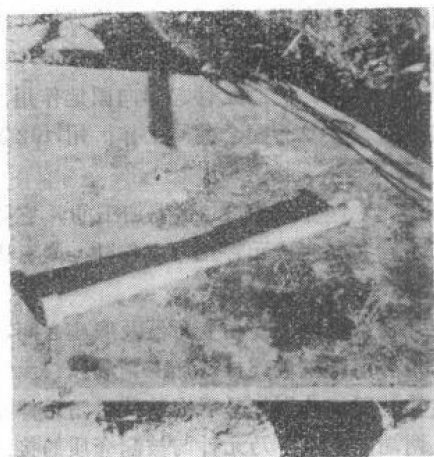


图19 有加长杆的差动变压器式位移计

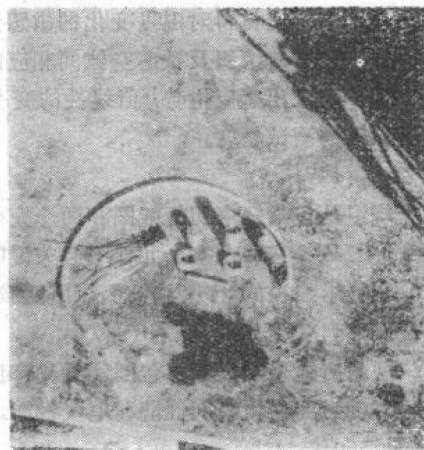


图21 元件的各部

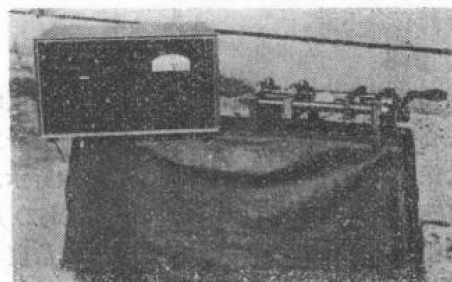


图22 差动变压器位移计

(一) 差动变压器

差动变压器由高频瓷性骨架、绕组和铁心组成。

1. 高频瓷性骨架:

高频瓷性骨架在差动变压器中起骨骼作用，它既是缠绕组之必需部位，又是铁芯运动的必经之路。由此可见，合理选择高频瓷性骨架对测试精度的关系甚为密切。我们所用的80450-ZB型高频瓷性骨架是苏州高频瓷厂的产品，其几何尺寸见图23。它具有导磁率高，能排除由于温度改变而引起感应电势 E 值变化的影响等优点。

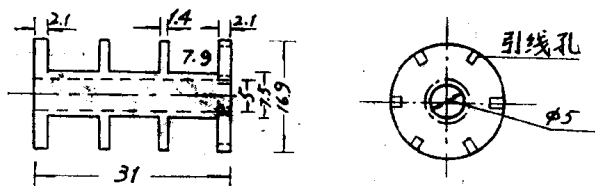


图23 高频瓷性骨架

在选择骨架时,除了按设计要求满足几何尺寸之外,尚需考虑该骨架材料对温度变化的敏感性。若超过允许范围则会引起绕组及铁芯空隙间相应的改变,这样势必会产生输出感应电势 E 值线性的变化,从而降低整个元件的测试精度。

2. 绕组:

所指绕组是包括一个初级线圈和两个完全对称的次级线圈(图14)。它们在整个元件中起关键的作用。我们用0.12毫米线径的QY型耐高温聚酰亚胺漆包圆铜线缠绕做成。

QY 型耐高温聚酰胺漆包圆铜线具有优良的热稳定性、机械强度、耐溶剂性能和电气性能。其击穿电压不低于550伏。

我们每缠1425圈为一线圈，阻值 $R \approx 78\Omega$ 。在实际缠制过程中，我们感到：每层的平整程度及紧密程度尤为重要。所以，对此必须引起高度的重视，做到线线排列有条不紊。

3. 铁芯:

元件的工作情况是由铁心位置的改变而反映出来的。铁心置于高频磁性骨架里，且与后者有一定的间隙，以保证铁芯自由活动，其结构如图24所示。

因铁芯由工业纯铁(DT4E)和黄铜(H62)压配合组成,在加工过程中,若达不到所需的光洁度与同心度,便产生铁芯滑动受阻的现象,不能如实反映量测的真值从而影响到元件的精度,对此不应予以忽视。

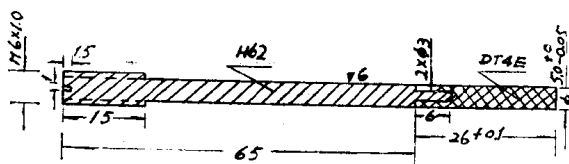


图24 铁芯

(二) 金属波纹管

金属波纹管又称手风琴管、折皱管等。金属波纹管可分为螺旋形和环形两种，后者又可分为单层和多层。

金属波纹管是由薄壁金属管采用液压或机械滚压方法造成。目前,我国的上海、天津等地均有定型产品。

我们所用的金属波纹管(图25), 由于市场上无此规格, 我们在学习外地经验的基础上, 发扬了自力更生的革命精神, 在普通车床上采用冷滚压法用H62黄铜薄壁圆管加工而成。

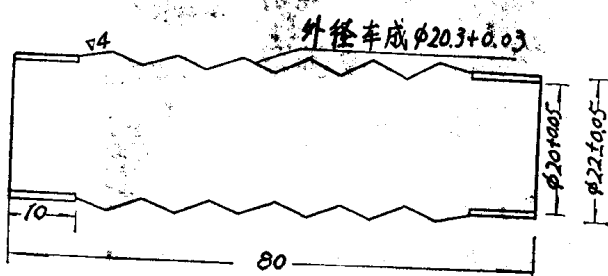


图25 金属波纹管

(三) 外壳

外壳包括导向固定端、底座、绝缘垫、突轮和压盖五部分。各结构见图26。

导向固定端：它对元件起导向固定作用。它直接与铁芯和金属波纹管配合共同工作。用H62黄铜材料加工的。

底座：底座亦是使用H62黄铜加工的。它除了配合导向固定端共同完成元件正常工作外，尚有固定差动变压器及保护引线的作用。

绝缘垫：安置于差动变压器及底座之间，主要起绝缘作用。用有机玻璃材料加工制成。

突轮及压盖分别起易于安装及封闭元件和防潮之作用。两端的突轮, 乃元件与被测介质的接触部分, 是元件量测范围的标志。