

建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1981

No. 14

CBY—100 型

电感式工具应变计的研制

Tensometer Type CBY-100

中国建筑科学研究院

CHINESE ACADEMY OF BUILDING RESEARCH

提 要

本文介绍以差动变压器 (LVDT) 为传感元件的可重复使用的工具化混凝土应变计的工作原理、结构特点和以应变仪为测量仪表的连接和使用方法。通过研究试验和实际测量的结果, 表明本应变计用国产定型差动变压器进行设计装配, 并以普通应变仪为测量仪表, 可以达到下述技术特性:

量 程:	额定 $\pm 2000 \times 10^{-6}$,	最大 $\pm 4000 \times 10^{-6}$
标 距:	100mm	
非 线 性 误 差:	额定 $\leq 1\% F \cdot S$,	最大 $\leq 2\% F \cdot S$
温度对零点影响:	$< 0.5\% \cdot F \cdot S / ^\circ C$	
时间对零点影响:	$< 10 \times 10^{-6}$	
分 辨 力:	5×10^{-6}	

Tensometer Type CBY-100

Abstract

The paper introduces the principle and structural feature of tensometer CBY-100, the connection of it with strain indicator and the method to use it. The tensometer CBY-100, which is a linear variable differential transformer, can be repeatedly used on the surface of concrete to measure strain. The result of the research work and application of it in practice shows that the tensometer, which is designed and installed with LVDT made in China, can reach the following technical data when the ordinary strain indicator is used as measuring equipment.

1. Range: normal $\pm 2000 \times 10^{-6}$, maximum $\pm 4000 \times 10^{-6}$
2. Measuring distance: 100mm.
3. Non linearity: normal $\leq 1\% F \cdot S$, maximum $\leq 2\% F \cdot S$
4. Zero drift of time: $10 \times 10^{-6} / 4h$
5. Zero drift of temperature: $< 0.5\% F \cdot S / ^\circ C$
6. Sensitivity: 5×10^{-6}

或称应变计

工具应变计

指示器是应变计

应变计指示器

应变计指示器 (应变计指示器)

前 言	(1)
一、工具应变计及传感元件	(1)
二、CQZ-0B 型差动变压器技术特性	(4)
三、工具式应变计结构设计	(5)
四、工具式应变计的二次仪表	(6)
五、CBY-100 型电感式工具应变计特性试验	(10)
六、CBY-100 型工具应变计应用试验	(15)
七、结论	(17)

电感式工具应变计的研制

建筑结构研究所 董世民

前 言

混凝土表面应变是确定结构应力状态的重要参量,长期以来,主要采用电阻应变片测量。应变片有许多优点,但也有它不遇之处,主要是测点表面准备、粘贴处理等工作量较大,周期较长,而且应变片一经粘贴便不能重复使用。随着工程结构研究发展,混凝土表面测点不断增多,特别是现场的恶劣环境,给应变片技术的应用带来许多困难。针对上述情况,五十年代国际上出现了可以重复使用,能适应一定环境条件使用的工具化应变计。这类应变计按其原理不同可分为振弦式、电感式两大类,用于大体积混凝土及机械结构应力测量。在材料试验机上,做为材料试验的引伸计也是工具式应变计的一个品种,以电感式(差动变压器型)类型最多,应用较广并已系列化。

为了探索混凝土工程结构表面应变测量的工具式应变计,从1976年开始了研制工作。参考国内外有关这方面的技术,应用电感原理,选用国产 CWZ-03 型差动变压器做感应—电量转换元件,用静、动态电阻应变仪做二次仪表,自制了工具式应变计,通过一系列试验,基本上达到了预定技术指标(标距 100 毫米、量程 $\pm 2000 \mu\epsilon$,非线性误差 $\pm 1\%$,分辨率 $5 \mu\epsilon$),并在如何以电阻应变仪为二次仪表方面,做了有效的工作。

一、工具应变计及传感元件

工具式应变计是测量试件固定标距内平均应变的引伸计,有机测和电测两类;杠杆式引伸仪、镜式引伸仪(马丁仪)、接触式引伸仪、百分表或千分表引伸仪属于第一类,这种机械型仪器只能目读不能遥测;振弦引伸仪、电感引伸仪属于第二类,又叫电测法工具式应变计,它通过内部非电量——电量转换元件实现应变遥测,本文介绍的就是这种类型的工具式应变计。

从工具应变计构造上来看,不管是机测或电测型,主要结构大同小异,一般都有机架、支点、传感件、指示器四个部分。

机架是支承工具应变计内部零件及安装于试件上用的主体结构。

支点是保证标距不变,固定在试件表面,跟随试件变形用的支撑机构,一般有两点或叁点支撑两种。

传感件是工具应变计的核心,它把试件标距内的相对变形变成绝对位移,通过自身放大或转换机构传给指示器。比如,杠杆引伸仪的杠杆放大部分、振弦应变计的金属弦和电感式工具应变计的差动变压器都是传感件。

指示器是把应变或绝对位移指示出来的仪表型机构,如杠杆引伸仪的表针及刻度盘。机械型应变计指示器和主体结构在一起,而电测型应变计指示器由于笨重一般和主体结构分开成为二次仪表(应变计本身又叫一次仪表)。

电感工具式应变计采用差动变压器做应变传感元件。下面介绍这种传感元件的一般原理及其特性：

1. 差动变压器工作原理

差动变压器是以差动电感原理制成的位移——电量转换元件，它由一个初级线圈和两个相同电气参数对称配置的次级线圈以及一个穿过线圈中间的铁心组成。因为两个次级线圈反相串联时，其输出电压是两线圈电压之差，因此叫差动变压器。差动变压器借助铁心机械位移引起的初次级线圈互感变化，把机械位移转换成电量输出，因而实现电气遥测化。

图1—1表示了差动变压器的结构原理图。铁心材料是铁氧体或纯铁，连接它的传动轴由非铁磁性材料制成。整个差动变压器用不锈钢或“坡莫”合金屏蔽起来。传动轴必须和测量对象接触，以感受位移变化。

图1—2表示只有一个次级线圈的变压器铁心位移和输出电压的特性关系。按照变压器原理，次级线圈 W_2 的感应电动势 e_2 和次级线圈圈数 N_2 成正比即：

$$e_2 = -K \frac{N_2}{N_1} e_1 \quad (1.1)$$

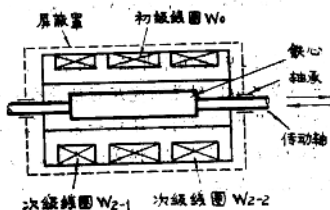


图1—1 差动变压器结构

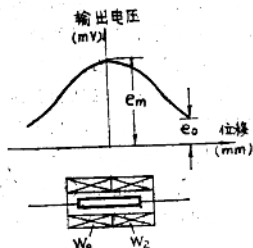


图1—2 变压器输出电压和铁心位移关系

式中 K 是耦合系数，它和铁心位移成正比。

e_1 是输入电动势。当铁心处于中心位置时输出电动势达到最大值 e_m ，铁心远离中心位置时输出电动势达到最小值 e_o ，因此输出电动势 e_2 是铁心位置变化 K 的函数即：

$$e_2 = C \cdot f(K) \quad (1.2)$$

$$\text{式中 } C = -\frac{N_2}{N_1} e_1$$

有两个次级线圈和一个初级线圈的差动变压器，铁心位移和差动联接的次级线圈输出特性如图1.3所示。由图中看出两条峰状曲线的代数和是一条V型线性曲线。总输出电动势 e_2 为：

$$e_2 = e_{2-1} + (-e_{2-2}) = e_{2-1} - e_{2-2} \quad (1.3)$$

图1—3的意义是，当铁心处于中心位置时两个次级线圈对初级线圈互感系数大小相等，但输出电动势相位相反，因而输出电动势 e_2 为零，输出电压也为零。

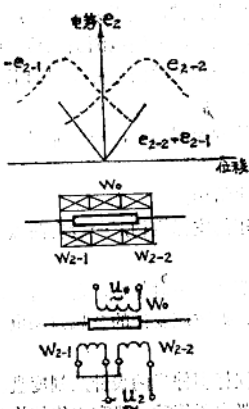


图1—3 差动变压器输出特性

在铁心偏移中心位置时输出电动势和铁心位移成正比，因而输出电动势和输出电压也成正比关系。

着重指出的是，由于材料和制造工艺原因，次级线圈几何参数和电器参数实际上存在一定的非对称性，铁心处于中心位置时输出电动势不可能为零，总有一个残余电动势，不管铁心的中心位置如何调整也不能使输出电压为零，因此这个电压通常叫零位输出电压。除从制造工艺和设计方面尽可能减小这个电压外，实用的差动变压器，从外电路采取零位补偿措施是很必要的，以利于实际应用。

2. 差动变压器的特性

初级电压和灵敏度的关系：当一个差动变压器机械和电气结构都固定时，输入电压对灵敏度有很大关系。从图1—4可以看出，当有不同的输入电压时，输出电压斜率随输入电压的增加而增加。若把输出电压换算成单位位移量的关系，即转换成输入电压和输出电压灵敏度的关系，则如图1—5所示。当然，灵敏度曲线不是线性性上升的。当输入电压增大到使铁心磁通饱和时，灵敏度再不增加，即如图1—5虚线部分所示。因此差动变压器线性范围是有一定数值的。

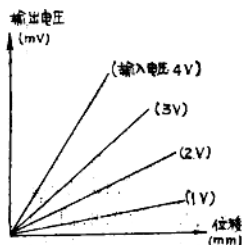


图1—4 差动变压器铁心位移和输出电压关系

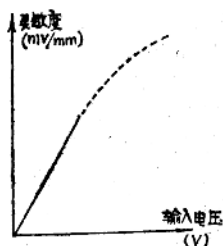


图1—5 差动变压器输入电压和灵敏度关系

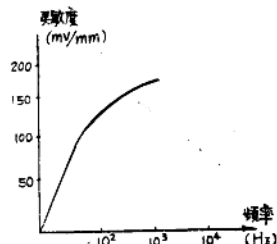


图1—6 差动变压器输入电压频率和灵敏度的关系

输入电压频率和灵敏度的关系：随输入电源频率的增加灵敏度亦增加，当频率增加到一定程度后，因差动变压器感抗迅速增加，输出灵敏度趋于饱和。若初级电压为 E_1 ，线圈电阻为 r ，电感为 L ，初次级线圈间互感为 M ，其感应电动势 e_2 为：

$$e_2 = E_1 M \omega \frac{\cos \omega t}{\sqrt{(\omega L)^2 + r^2}} \quad (1.4)$$

式 (1.4) 说明，当 M 和 r 固定时，输出电压 e_2 与频率 ω 有关。当 $\omega L \ll r$ 时：

$$e_2 = E_1 M \omega \frac{\cos \omega t}{r} \quad (1.5)$$

灵敏度随频率的增加而增加，见图1—6上升段。当 $\omega L \gg r$ 时：

$$e_2 = E_1 M \frac{\cos \omega t}{L} \quad (1.6)$$

灵敏度和输入电压频率关系平缓, 见图 1—6 平缓段, 这种频率和灵敏度的关系, 对如何选择初级电源频率是重要的依据。

二、CWZ-03型差动变压器技术特性

差动变压器是一种灵敏度高、测量范围大结构较简单、性能较稳定的位移—电量转换元件, 能够进行微米级位移测量。我们选用阜新传感器厂的 CWZ-03 型差动变压器做工具应变计的传感元件, 并做了一些性能试验。CWZ-03 差动变压器性能如下:

1. 技术性能

线性范围: $\pm 2\mu\text{m} \sim 3\text{mm}$

线性度: 小于 3 %

灵敏度: 70 mV/mm/y

零位输出电压: 小于 20 mV (初级电压 7 伏时, 未补偿)

输出阻抗: $1.2 \text{ K}\Omega$

激励电压: $1 \sim 7 \text{ V}$

激励电源频率: 1 KC

电源最大功率消耗: 0.23 VA

初级线圈直流电阻: 65Ω

次级线圈直流电阻: 550Ω

使用环境温度: $-20^\circ\text{C} \sim +65^\circ\text{C}$

2. 输入电压和灵敏度的关系

CWZ-03 输入电压和灵敏度测试电路如图 2—1 所示。输入电压范围是 $0.4 \text{ V} \sim 1.6 \text{ V}$, 电源频率为 2000 Hz 正弦波。铁心位移范围 $0 \sim \pm 0.5 \text{ mm}$ 。用瑞士虎根伯厂产品“百分表—千分表校正仪”调节位移, 测试结果如表 2·1 和图 2—2 所示。从结果可以看出, 正、负向灵敏度稍有差别, 主要是零位输出未补偿所致。上述测试条件下, 零位输出电压在 $5 \sim 9$ 毫伏之间。

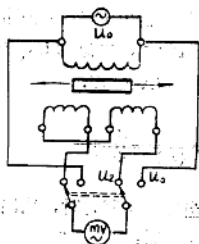


图2—1 输入电压和灵敏度关系测试电路

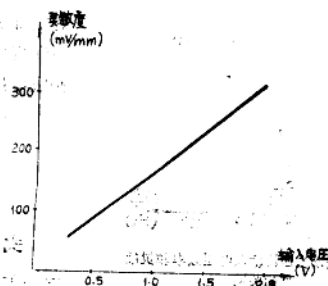


图2—2 输入电压和灵敏度关系

3. 输入电压频率和灵敏度关系

测试线路和图 2—1 相同, 输入信号源用“音讯—1 甲型”低频信号发生器。测试结果如图 2—3 和表 2·2 所示。从结果可以看出, 频率在 $1000 \sim 3000 \text{ Hz}$ 范围内, 可以得到

输入电压和灵敏度关系

表2.1

输入电压 (V)	负向灵敏度 (mV/mm)	正向灵敏度 (mV/mm)	平均灵敏度 (mV/mm)	总灵敏度 (mV/mm/V)
0	10	10	10	0.6
0.4	56	60	58	145
0.6	82	88	85	148
0.8	114	118	116	145
1.0	146	168	157	157
1.2	174	178	176	147
1.4	192	210	201	143
1.6	220	240	230	144

频率和灵敏度关系

表2.2

频率 (Hz)	负向灵敏度 (mV/mm)	正向灵敏度 (mV/mm)	平均灵敏度 (mV/mm)
50	30	36	33
200	86	102	94
500	120	130	125
1000	134	154	144
2000	134	146	140
5000	134	136	135
10000	116	118	117
20000	116	110	113

140 mV/mm 的较高灵敏度(曲线平缓段)。在 500~5000 Hz 范围内也可以得到 120 mV/mm 以上的灵敏度,在此范围之外灵敏度大大降低。由上述结果可以得到一个重要结论:当频率选在 1000~3000 Hz 范围时,灵敏度变化不大,因而对输入电压频率稳定度要求不很高,这一点对使用差动变压器时很重要。

三、工具式应变计结构设计

对工具式应变计结构的要求是:

满足 CWZ-03 型差动变压器铁心传动要求,不得产生径向及附加作用力,以保证动铁心传动

灵活、重复性好,

整体结构刚度好,以保证应变测量的精确性。体积小,重量轻;

标距支脚稳定、可靠、不产生滑移,

工具应变计往试件上装卡方便,位置任意,不影响技术性能。

1. 差动变压器铁心传动机构

工具式应变计由静、动标距支撑点,跟随试件变形产生应变位移。动标距点通过传动机构把微米级位移传到差动变压器动铁心上,实现位移的电气测量。为保证上述要求,采用弹簧片支撑的平谷四连杆机构,如图 8-1 所示。差动变压器铁心通过导杆和动标距支撑点刚

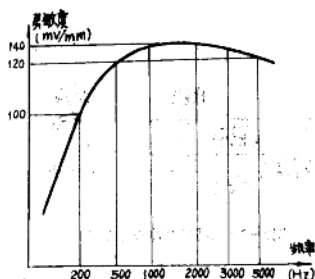


图2-3 频率和灵敏度关系

性连接，动标距支撑点由 T 形板和两个 II 形簧片固定在底板上。T 形板上横边和差动变压器中心线平行。当试件变形时，动标距支撑点连同 T 形板带动导杆和动铁心一起产生绝对位移 Δl 。由于 II 形簧片的作用，在卡紧力 P 的作用下，试件变形时，T 形板只能产生和水平方向相平行的位移而不产生角位移。卡紧力 P 的作用，通过簧片的拉应力，传到支脚上和试件上。由于卡紧力的方向垂直于应变变形方向，并且差动变压器铁心和轴承摩擦极小，所以，工具应变计消耗的应变测量作用力也是很小的。

2. 工具应变计结构刚度

研制的工具应变计采用 7~8 毫米厚的铝合金底板，有较好的刚度，在卡紧力的作用下不会影响测量精度，但由此而使重量加大，体积也有所增加，今后如改用筒形卧式结构，可以减小重量且有更好的刚度。目前采用的是 CWZ-03 形差动变压器，体积重量都较大，今后若改用中原量仪厂的小型电感测量头，会进一步缩小体积，减轻重量。

3. 支撑脚结构

工具应变计采用三点支撑方式。静标距支撑点有两个，相互距离 20 毫米，和应变计轴线垂直布置。动标距点是一个。支点由淬硬钢制成，并经磨光尖锐，有很好的耐磨性和卡紧作用。今后若用硬质合金材料制作，效果更好。

4. 装卡及固定方法

采用两端固定法，用弹簧或橡皮条，钩挂预先粘接于试件表面的固定块上。固定块用木块或铁件，粘接剂是快速胶水如 502 胶、快速固化环氧树脂等。也可以采用杠杆引伸仪的装卡方法，用通用附件和试件联接。两端固定方法如图 3-2 所示。在混凝土等硬表面试件上使用工具应变计，也可以在标距点上贴上紫铜片，以保证工作可靠性，减少支点磨损。

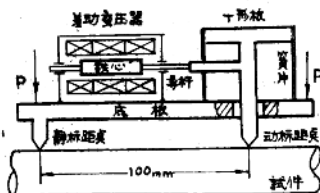


图3-1 工具应变计结构

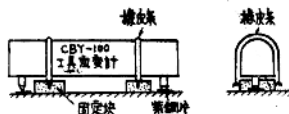


图3-2 工具应变计装卡方法

四、工具式应变计的二次仪表

差动变压器是用音频交流电源工作的一次仪表。因为输出灵敏度高，讯号强，对于 10^{-3} 毫米级变形或 10^{-4} 级应变测量，用一个稳定的音频电压源或交流高阻抗毫伏表做二次仪表就可以了，不必采用放大器。

我们的目的是用差动变压器做 10^{-4} 级应变测量，而且要鉴别正、负变形方向，因此必须采用有相敏放大器的二次仪表。

根据研制技术指标要求，在标距为 100 mm 时，分辨率为 10^{-6} mm (即 $10^{-4}\%$)，这个分辨率的绝对位移量是：

输出灵敏度 $\Delta l = 1 \times 10^{-6}$ mm = $100 \times 10 \times 10^{-6}$ = 1×10^{-3} 毫米

输入灵敏度 $\Delta l = 1 \times 10^{-6}$ mm，分辨 10^{-6} mm 的灵敏度是 0.07 mm/10 mm

几种应变仪的技术性能

表4.1

型 号	量 程 ($\mu\epsilon$)	基本误差	供桥电压 (V)	载波频率 (Hz)	线性误差 (%)	最大线性 电流输出 (mA)	电阻平衡 范 围	电容平衡 范 围
YJD-1	0~1600	不超过测值的 $\pm 2\%$ (最小 $5\mu\epsilon$)	1.1 ± 0.1	$2000 \pm 10\%$	$< 3\%$	> 5	$\pm 2000\mu\epsilon$	$\pm 2000\text{pf}$
YJ-5	± 11100	不超过测值的 $\pm 1\%$, 100 $\mu\epsilon$ 以下 为 $1\mu\epsilon$	0.7~1.5	530	$\pm 1\%$		$\pm 2500\mu\epsilon$	$\pm 2000\text{pf}$
YJD-7	5~31000	$\pm 0.5\%$	2	1000	$\pm 0.5\%$ ($5\mu\epsilon$)		$\pm 2500\mu\epsilon$	$\pm 2000\text{pf}$
Y5D-2	0~ ± 6000	1000 $\mu\epsilon$ 以下 为 $5\mu\epsilon$	15可调	5000			120 Ω 时 $\pm 0.6\%$	$\pm 2000\text{pf}$
Y6D-2	0~ ± 6400	$\pm 1\%$	1, 2, 3	5000		0~ ± 10	120 Ω 时 $\pm 0.6\%$	$\pm 2000\text{pf}$
Y6D-3	0~ $\pm 10^4$	$\pm 1\%$		10000	输出振幅特 性 误 差 ± 1	0~ ± 8	120 Ω 时 $\geq \pm 1.0\%$	$\geq 1500\text{pf}$
YJB-1	$\pm 1 \sim$ ± 1000	不超过测值 $\pm 0.2\%$ 100 $\mu\epsilon$ 以下为 $1\mu\epsilon$	$0.8 \pm 5\%$	$800 \pm 10\%$			$\pm 2000\mu\epsilon$	$\pm 2000\text{pf}$

mm/v, 也就是说, 工具应变计分辨 10^{-3}mm 的输出讯号为 0.07 mv 时, 才相当于分辨试件的 $10\mu\epsilon$ 。没有放大器的二次仪表很难有这样高的分辨率, 因此, 工具应变计的二次仪表必须有放大器才行。

1. 为什么选择应变仪做工具应变计二次仪表

工具应变计内的差动变压器所需要的二次仪表条件是: 有足够的放大倍数; 初级励磁音频电压稳定、频率合适; 有零位和相位补偿作用; 能鉴别应变极性和大小; 输出信号稳定, 有一定负载能力以带动记录仪器工作。

上述条件对于静、动态电阻应变仪能满足要求。应变仪是建筑结构试验常用电测仪器, 许多科研、设计、施工单位都有, 因此选应变仪做二次仪表便于普及应用。当然用专门设计的二次仪表也可以。

下面列出几种能够选用的静、动态应变仪基本性能(见表 4.1)。根据第二节所述 CWZ-03 差动变压器输入电压频率和输出灵敏度的关系曲线和数据, 对照表 4.1 仪器性能来看, 除 YJ-S 型和 Y6D-3 型应变仪因供桥电源频率较低或较高外, 其他几种仪器都可以使用。特别是 YJD-1、YJD-7, 因载波频率在 1000~3000 Hz 范围内, 频率变化对输出灵敏度影响较小, 有利于差动变压器工作的稳定。

2. 相位和零点补偿以及灵敏度调整方法

差动变压器的输出阻抗中, 有感抗、电阻和容抗三个分量, 这三个分量综合表现出输出电压和电流相位是不一致的。对于电阻应变仪来讲, 输入讯号电压和调制电压必须同相位, 否则输出信号严重失真, 便是很快饱和, 达不到应有的线性放大作用。现在, 我们把差

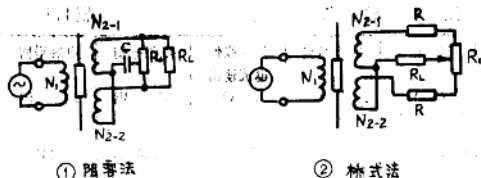
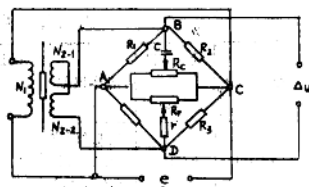


图4—1 两种差动变压器零位补偿电路



差动变压器电路 (1KC~5KC)电桥电路

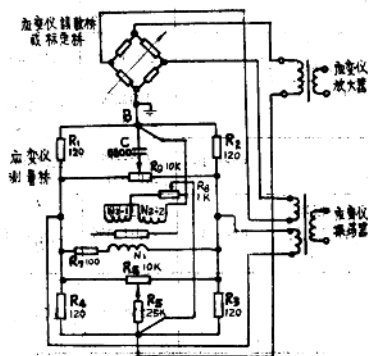


图4—3 差动变压器输入应变仪实用电路

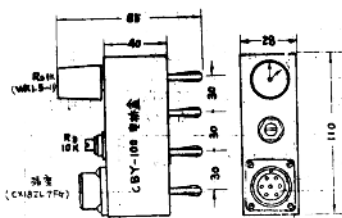


图4-4 工具式应变计配应变仪附加电桥盒

动变压器当作应变仪的负载,在输入电路中必须有相位及零点补偿电路,才能达到使用要求。

由于差动变压器结构和制造工艺关系,当铁心处于零位时,输出电压不为零。不管

铁心如何调整,总有一个零位输出电压。使用中应尽可能减小这个电压,因此需要零位补偿电路。差动变压器有各种零位补偿电路,图4-1是其中两种。现在大多数采用第②种桥式线路。

电阻应变仪的输入回路中，都有“电阻”、“电容”平衡回路，如图4—2所示。电阻平衡 R_x ，调节电桥初始不平衡电压值，电容平衡 R_c ，调节输出电压相位。这个电桥电路实际上是图4—1的①和②的共同作用。因此，电阻应变仪输入电路能够适应差动变压器零位补偿作用。在图4—2中以电桥A、C端的交流音频率调制电压源供给差动变压器的初级线圈 N_1 ，而差动变压器的输出端和电桥输出电压端B、C并联，这就是差动变压器以电阻应变仪做二次仪表的电气原理。它实际上是用电桥电路可以调整的零位和相位功能去补偿差动变压器输出的各种需要。根据这一原理设计了如图4—3的实用线路图。图中粗线部分的电路是新设计的部分，其余是电阻应变仪原有的。我们把新设计的电路搞成了如图4—4所示的附加电桥盒。

电桥盒可以插入 YJD-1、YJ-5、YJS-8 型应变仪的预调平衡箱中。因为这些平衡箱接线柱的中心距是相等的，所以电桥盒可以通用。

出。电桥盒电路各部分的作用是： R_1 、 R_2 是精密标准电阻（ $120\Omega \pm 0.1\%$ ），它和应变仪内串联电阻 R_3 、 R_4 组成全桥电路。 C 和 R_5 组成相位平衡电路，以调节 R_5 实现。 R_6 、 R_7 是桥臂原有的电阻平衡电路起相位补偿作用。 R_8 是差动变压器输出衰减电阻器，调节输

出灵敏度。\$R_1\$ 是输入电压匹配电阻。因为应变仪音频桥压电源负载按 120 \$\Omega\$ 设计，负载电阻只有数十毫安，而差动变压器初级线圈直流电阻只有 55 \$\Omega\$，因此要用 \$R_1\$ 匹配，限制 \$I_1\$。
 工具式应变计灵敏度的调整，取决于差动变压器铁心绝对位移量下的输出电压范围和应变仪指示范围内的输入讯号强度相互匹配。

单片工作的应变电桥输出电压公式：

$$\Delta u = \frac{1}{2} e \cdot K \cdot \epsilon \quad (4.2)$$

式中 \$e\$ ——电桥输入电压 取 \$e = 2 \text{ v}\$

\$K\$ ——应变片灵敏系数 取 \$K = 2.00\$

\$\epsilon\$ ——应变量

按工具式应变计要求 \$\epsilon = \pm 2000 \text{ } \mu\epsilon\$，取绝对值为 \$4000 \text{ } \mu\epsilon\$ 代入 \$(4.2)\$ 得：

$$\Delta u = \frac{1}{2} \times 2 \times 2.00 \times 4000 \times 10^{-6}$$

$$= 0.004 \text{ v}$$

$$= 4 \text{ mv}$$

这即是说应变仪只需要 4 mv 的信号电压即得到 4000 \$\mu\epsilon\$ 指示量。而差动变压器在满量程 4000 \$\mu\epsilon\$ 时的输出电压是：

$$\Delta u' = \Delta l \times K_e \quad (4.3)$$

式中 \$\Delta l\$ 是差动变压器绝对位移量

$$\Delta l = l \times \epsilon = 100 \times 4000 \times 10^{-6} = 0.4 \text{ mm} \quad (4.4)$$

取差动变压器实测灵敏度（查表 2.1）\$K_e\$ 为：

$$K_e = 58 \text{ mv/mm} \quad (4.5)$$

将 \$(4.4)\$、\$(4.5)\$ 代入 \$(4.3)\$ 得：

$$\Delta u' = \Delta l \times K_e = 0.4 \times 58 = 23.2 \text{ mv} \quad (4.6)$$

由上述计算得知 \$\Delta u' > \Delta u\$，若想 \$\Delta u' = \Delta u\$，必须将 \$\Delta u'\$ 衰减到 \$\Delta u\$，衰减倍数 \$C\$ 为：

$$C = \frac{\Delta u'}{\Delta u} = \frac{23.2}{4} = 6 \quad (4.7)$$

所以，在差动变压器输出端加衰减器 \$R_1\$ 是很必要的。当然需要增加或降低灵敏度时用衰减器 \$R_1\$ 也可以调节。

调节标准灵敏度的目的，是找出工具应变计额定测量范围（\$\pm 2000 \text{ } \mu\epsilon\$）时的 \$R_1\$ 位置，亦即试件实际应变和应变仪指示应变一致时的 \$R_1\$ 刻度位置。方法是按图 4—5 灵敏度校正系统图接好仪器电路（注意工具应变计在测微仪上接装牢固可靠，工具应变计到附加电桥盒的引线长度一致），使工具应变计处于零位，调节“电阻”及“电容”平衡（此时 \$R_1\$ 位置可以放在如图 4—3 的接近于 B 点的位置，如 0.1 圈处），转动测微仪使工具应变计动支点有 \$\pm 0.200 \text{ mm}\$ 位移，此时应变仪应该有 \$\pm \times \times \times \text{ } \mu\epsilon\$ 指示，但不等于 \$\pm 2000 \text{ } \mu\epsilon\$。再将工具应

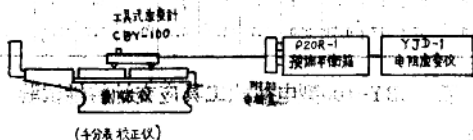


图 4-5 工具应变计灵敏度校正系统图

变回零, 重调“电阻”和“电容”平衡。此时, 增大 R_1 值 (即增加转动圈数), 再转动测微仪, 使支点有 ± 0.20 mm 位移, 应变仪只有一个更接近 $\pm 2000 \mu e$ 的指示值, 依上述过程, 反复调整几次, 直到工具应变计动支点移动 ± 0.200 mm, 应变仪正确指示 $\pm 2000 \mu e$ 为止。此时 R_1 位置即是工具应变计标准灵敏度下的衰减器位置。

3. 附加电桥盒性能试验

为了验证电桥盒设计是否符合工具应变计的要求及适应应变仪的需要, 进行了零位补偿、灵敏度调整、线性标定试验。测试电路如图 4—6 所示。试验结果为表 4.2。输出一位移曲线见图 4—7。

从试验结果来看, 电桥盒对差动变压器零位补偿效果较好, 零位输出小于 1 mV。灵敏度曲线线性度也较好, 非线性误差最大为 1% 左右。灵敏度调节也很方便, 只要改变 R_1 不同位置可以得到不同灵敏度, 表 4.2 只是一个 R_1 位置的结果, 不同灵敏度结果请参看后面表 5.12 和图 5—2。

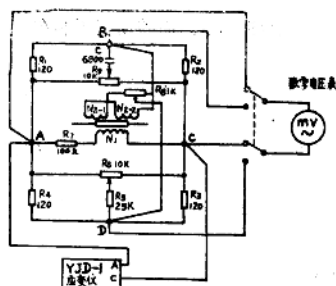


图4—6 附加电桥盒试验电路

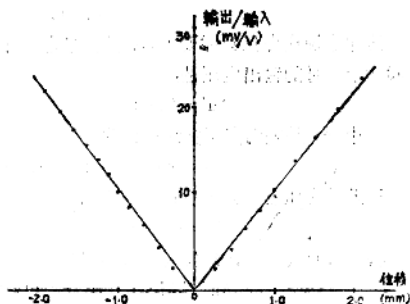


图4—7 输出/输入——位移曲线

电 桥 盒 试 验 结 果

表 4.2

位 移 (mm)	0	+0.2	+0.4	+0.6	+0.8	+1.0	+1.2	+1.4	+1.6	+1.8	+2.0	+2.2	+2.4	+2.6	+2.8	+3.0
输 入 (V)	1.199	1.200	1.199	1.197	1.198	1.198	1.199	1.198	1.196	1.196	1.196	1.196	1.194	1.193	1.192	1.191
输 出 (mV)	0	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	31	34	36	39	41
输出/输入(mV/V)	0	167	4.17	6.70	9.20	117	14.2	16.7	19.2	20.9	24.2	25.8	28.5	30.9	32.7	35.1

位 移 (mm)	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.2	-1.4	-1.6	-1.8	-2.0	-2.2	-2.4	-2.6	-2.8	-3.0
输 入 (V)	1.199	1.201	1.199	1.200	1.200	1.199	1.199	1.200	1.198	200	200	1.194	1.197	1.199	1.197	1.198
输 出 (mV)	0	2	5	8	11	14	17	21	23	28	29	32	34	37	40	42
输出/输入(mV/V)	0	167	417	0.70	920	11.7	14.2	8.3	19.3	21.7	24.2	26.8	28.5	30.9	33.4	35.2

五、CBY-100型电感式工具应变计特性试验

1. 线性误差试验

首先进行了 CWZ-03 差动变压器线性误差试验。校正系统和图 4—5 相同, 只是在测微

仪上装卡 CWZ-03 差动变压器，装卡方法如图 5-1。为保证传动精度，将钢珠用 502 胶粘在动铁心导杆上，用磁钢吸动钢珠从而传动动铁心，这种方法传动可靠，不会产生附加摩擦。

表 5.1、5.2、5.3、5.4 是不同灵敏度下的位移—输出结果。当灵敏度为 $1 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 时， $\pm 3 \text{ mm}$ 内的线性误差在 1% 左右， $\pm 2 \text{ mm}$ 内线性误差小于 1%。灵敏度为 $5 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 时， $\pm 0.5 \text{ mm}$ 范围内，线性误差为 1~2%。当灵敏度为 $10 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 时， $\pm 100 \mu\text{m}$ 内线性误差小于 1%， $\pm 200 \mu\text{m}$ 内，线性误差为 1% 左右， $\pm 500 \mu\text{m}$ 内，线性误差较大。从这些结

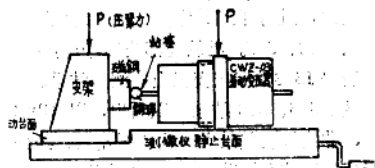


图 5-1 差动变压器在测微仪上装卡图

灵敏度为 $1 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 时的 CWZ-03 输出

表 5.1

位 移 (mm)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
输 出 ($\mu\epsilon$)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	1990	2180	2395	2570	2965	2950

灵敏度为 $5 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 时的 CWZ-03 输出

表 5.2

位 移 (mm)	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
输 出 ($\mu\epsilon$)	0	250	500	750	1005	1270	1525	1785	2040	2305	2560

灵敏度为 $10 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 时的 CWZ-03 输出

表 5.3

位 移 (mm)	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
输 出 ($\mu\epsilon$)	5	495	1000	1510	2010	2440	2870	3370	3790	4245	4700

灵敏度为 $10 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 时的 CWZ-03 输出

表 5.4

位 移 (mm)	输 出 ($\mu\epsilon$)							
	一		二		三		平 均	
	进	回	进	回	进	回	进	回
0	0	-	0	-5	0	-5	0	-5
0.010	100	95	100	95	100	95	100	95
0.020	200	190	200	195	200	190	200	190
0.030	300	290	300	290	300	290	300	290
0.040	400	390	400	390	400	390	400	390
0.050	500	495	500	495	500	490	500	495
0.060	600	595	600	595	600	590	600	595
0.070	700	695	700	695	700	690	700	695
0.080	800	795	800	795	800	795	800	795
0.090	900	895	900	895	900	895	900	895
0.100	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

果可以得出如下结论:

标准灵敏度为 $10 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 时, CWZ-03 差动变压器在工具应变计额定测量范围内 (相当于动支点绝对位移 0.4 mm), 可以得到 1% 的非线性误差。

其次, 进行了工具应变计整体线性误差试验, 试验系统如图 4.4 所示。试验结果列于表 5.5、5.6、5.7。灵敏度都是 $10 \mu\epsilon/\mu\text{m}$ 。表 5.5 是在 YJD-1 应变仪上的测量结果, 表 5.6、5.7 是在 YJS-8 数字应变仪上的测量结果。

从表 5.5、5.6 结果可以看出, 以 CWZ-03 制成工具应变计时, 线性度和重复性都有所降低, 非线性误差最大可达 4% 左右。经分析, 原因是差动变压器通过传动机构及应变计支点产生了摩擦和滑移所致。为验证这个分析又在 YJS-8 应变仪上进行试验, 试验时, 测微

CBY-100(2^{*}) 线性误差试验 (二次仪表 YJD-1)

表 5.5

位 移 (μm)	400	350	300	250	200	150	100	50	
输 出 ($\mu\epsilon$)	3970	3475	3000	2515	2000	1490	980	485	
位 移 (μm)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
输 出 ($\mu\epsilon$)	0	470	950	1475	1980	2500	3000	3490	3960

CBY-100(2^{*}) 线性误差试验 (二次仪表 YJS-8, 灵敏度 $12 \mu\epsilon/\mu\text{m}$)

表 5.6

位 移 (μm)		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	
输 出 ($\mu\epsilon$) (进程)		-1235	-1150	-1025	-910	-980	-645	-515	-390	-265	-140	
输 出 ($\mu\epsilon$) (回程)		-1215	-1100	-980	-850	-725	-590	-460	-335	-210	-90	
位 移 (μm)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
输出 ($\mu\epsilon$) (进程)		-20	80	205	330	460	590	720	850	985	1100	1220
输出 ($\mu\epsilon$) (回程)		+20	130	255	385	515	645	780	910	1035	1150	1220

CBY-100(2^{*}) 线性误差试验 (二次仪表 YJS-8 灵敏度 $12 \mu\epsilon/\mu\text{m}$)

表 5.7

位 移 (μm)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
输 出 (μe) (进程)	-105	-90	-80	-70	-55	-40	-35	-25	-10	-5
输 出 (μe) (回程)	-100	-90	-80	-65	-55	-40	-30	-25	-10	+5

位 移 (μm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
输 出 (μe) (进程)	+5	+15	+30	+40	+50	+60	+70	+85	+95	+110	+125
输 出 (μe) (回程)	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-105	-125

仪每转动一级,轻敲测微仪桌面以克服系统摩擦,得到较好的结果,如表5.7所示,非线性误差大大降低。现在的工具应变计,导杆和差动变压器铁心连接,同心度不够好,影响传动精度。今后提高加工及装配精度,可以解决这个问题。

2. 零点漂移试验

为验证室温下工具应变计自身电气零点参数随时间变化的稳定性,进行了零点漂移试验。

试验时把CBY-100工具应变计放在恒温箱中,温度为 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,工具应变计灵敏度为 $10 \mu\text{e}/\mu\text{m}$ 。应变仪用YJD-型。平衡箱第一号测点是 120Ω 标准电阻点,以验证仪器本身漂移。应变仪预热一小时后,工具应变计调到零点。试验结果如表5.8所示。

零点漂移试验

表5.8

时 间 (时,分)	室 温 ($^{\circ}\text{C}$)	输 出 (μe)			
		温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	CBY-100(1*)	CBY-100(2*)	标准电阻 120Ω
9.30	15.7	25.0	0	0	0
10.20	15.4	25.0	-5	0	0
11.45	14.5	25.0	-10	-5	0
13.05	13.8	25.0	-10	-5	-5
15.00	18.9	25.0	+5	-5	-5

试验结果表明,除去仪器本身漂移之外,工具应变计基本符合小于 $5 \mu\text{e}/4$ 小时的要求,试验中,由于室温变化较大,致使后两小时仪器漂移过大,对试验结果有所影响。

3. 温度特性试验

试验目的是检验环境温度变化对应变计输出的影响。试验是把应变计放在红外线烘箱内进行的,应变计用遮光板隔离,避免光线直射。试验在两种情况下进行,一种是应变计自由状态,另一种是应变计装在钢试件表面。应变仪用YJD-1型。

(1) 应变计自由状态下的温升试验

试验结果列于表5.9和5.10。结果表明:

CBY-100(1*)平均温升输出为 $1.35 \mu\text{e}/^{\circ}\text{C}$,占满量程 $2000 \mu\text{e}$ 的 $0.07\%^{\circ}\text{C}$,小于任务要求的 $0.1\%^{\circ}\text{C}$ 。

CBY-100(2*)平均温升输出为 $1.57 \mu\text{e}/^{\circ}\text{C}$,占满量程 $2000 \mu\text{e}$ 的 $0.08\%^{\circ}\text{C}$,小于任务

CBY-100(1*) 温升试验

表5.9

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	输 出 (μe)	记 录 时 间 (时·分)
21.0	0	13.40
32.5	10	14.00
36.0	15	14.50
47.5	35	16.50
停止加热	35	17.00
32.0	25	17.30
24.0	20	17.45
19.0	15	18.00