

507

1025

816743

当前日本电磁测试技术

王外扬

编译



7

25

湘潭机电专科学校

507

1025

616743

507

1025

前 言

《当前日本电磁测试技术》是根据日文期刊《电气评论》86年11月号刊载的有关论文编译而成的。全书共八章，较全面地介绍了日本电磁测试技术的发展现状。文章内容简明，附有大量图表，主要对一些难以测量或在测量时难以达到精度要求的项目作了重点介绍。

由于本书编译时间仓促，加之笔者水平有限，难免有错误和不妥之处，敬请赐教，深表谢忱。

编译者

一九八七年六月

目 录

前 言

第一章 电压的测量技术

- 1、日本目前的电压标准..... (1)
- 2、电压的精密测量..... (3)
- 3、微电压的测量..... (5)
- 4、高电压的测量..... (7)

第二章 电流的测量技术

- 1、工频交流的测量..... (14)
- 2、直流电流的测量..... (16)
- 3、脉冲电流的测量..... (17)
- 4、雷电流的测量..... (18)

第三章 电阻的测量技术

- 1、非线性电阻的测量..... (20)
- 2、微电阻的测量..... (33)

第四章 功率因数、频率的测量技术

- 1、基本测量技术..... (38)
- 2、现代测量技术..... (44)

第五章 电晕及电晕故障的测量技术

- 1、架空导线的电晕损耗..... (50)
- 2、针对平板电极上的电晕现象..... (51)
- 3、架空线上的电波障碍..... (52)
- 4、绝缘材料的有关电晕现象..... (55)

第六章 电磁感应的测量技术

- 1、工频电流电磁感应的测量..... (56)
- 2、高频电流电磁感应的测量..... (59)

第七章 静电感应的测量技术

- 1、静电感应电压的测量..... (62)
- 2、静电感应电流的测量..... (64)
- 3、交流电场的测量..... (64)

第八章 电腐蚀的测量技术

- 1、地下管道对地电位差的测量..... (68)
- 2、地下管道中电流的测量..... (69)
- 3、地下管道与铁轨间电位差的测量..... (69)
- 4、土壤电阻率的测量..... (69)
- 5、土壤PH值的测量..... (69)

第一章 电压的测量技术

近来,由于电子技术的进步,电磁测试技术得到了飞跃发展,高精度的电子回路装置大大方便了测量操作。计算机和光电技术在测量中的运用,实现了超高压线高压试验自动化,准确无误地进行数据的记录、计算和处理,提高了测量精度,使试验、测量迅速而且省力。

1、日本目前的电压标准

日本目前所采用的电压标准,是1977年1月1日起,采用的利用约瑟夫逊效应的量子标准,在这以前所采用的是使用标准电池的原器标准。这里概括地介绍一下约瑟夫逊电压标准的原理:

如图1,当从导波管来的微波 f 照射到约瑟夫逊元件(由加在液态氮中的铅、氧化铅组成的层状结构元件,大小约为 $0.1\text{mm} \times 0.9\text{mm}$,氧化膜的厚度为几十 $\text{\AA}$)时,就会产生如(1)式的阶跃电压:

$$V_n = n(h/2e)f \dots\dots\dots (1)$$

式中 h 为普朗克恒量, e 为电子电量, n 为阶跃次数, $f = 10\text{GHz}$ 时, n 可达250次, $V_n \approx 5\text{mV}$, (n 越大越好,不过 n 越大,阶跃电压的电流幅度就越小,实际使用不可能)(1)式只由频率 f 就可以决定电压,所以,电压标准的精度可以在原来的标准电池的精度 (1×10^{-6}) 上提高百倍,达到 3×10^{-8} 。其误差主要是由检流计的分辨能力和可变电阻所产生的。 $2e/h$ 的值现在取为 483594.0GHz/V , (1)式中的比例常数 $2e/h$ 的物理条件是从改变外部磁场、温度、电压大

小和物质条件等来考虑的，测量仪器的参量误差都要求在 0.07PPm 以下。

图2是采用约瑟夫逊效应电压标准的回路。图中串联两个约瑟夫逊元件，大约在 10GHz 的微波照射下，它们就会按照(1)式产生约 10mV 的电压，一般所采用的基准电压约为 1V ，这就需要用一装置把 10mV 电压比较成 1V ，图中的可变电阻1和2就是这种比较装置。可变电阻1是由10个 45Ω 的电阻串联而成的，可变电阻2是由10个 40Ω 的电阻并联而成的，它们组合起来可以准确地形成 $100:1$ 的比例关系。把产生大约 1V 的标准电压和 10mV 的约瑟夫逊电压相比较，从而确定标准电池的值，日本电子技术综合研究所用约瑟夫逊电压标准，每月给作基准用的标准电池定值一次，以维持本国的电压稳定供应。

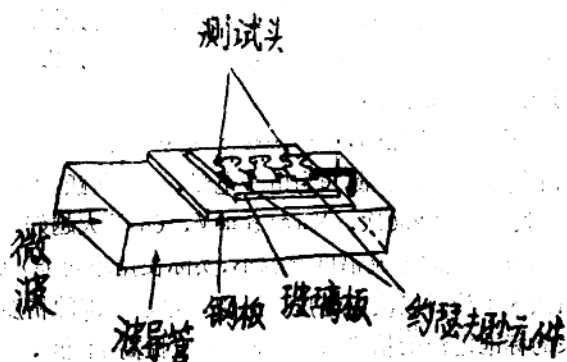


图1 约瑟夫逊元件和其计数方式

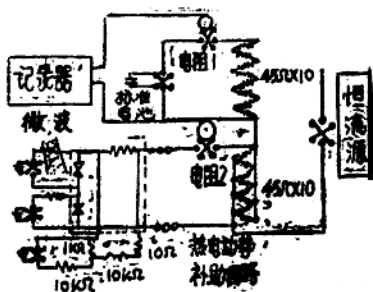


图2 约瑟夫逊电压标准回路

2、电压的精密测量

精密测量电压是采用和基准电压进行比较测量的电位差计进行的，有代表性的电位差计有如下三种型式：（1）电阻分压器式 （2）时间分割式 （3）电流比较式，这里说明一下（1）、（3）两种。

（1）电阻分压器式电位差计

如图3，在电阻分压器中通入恒定电流 I 。首先将开关倒向2，改变分压器电阻使它的电压与标准电池 E_s 平衡，这时有 $E_s = IR_2$ 。其次将开关倒向1，使被测电压 E_x 与分压器电

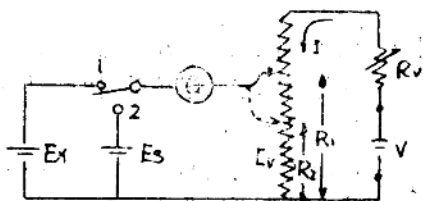


图3 电阻分压器式电位差计

压平衡，设这时分压器的电阻为 R_1 ，则有 $E_x = IR_1$ ，于是就得到：

$$E_x = (R_1/R_2)E_s \dots \dots \dots (2)$$

要使这种关系保持不变，就必须使比较测量中的电流 I 和分压器的电阻元件保持恒定。在精度要求高的测量当中，要特别注意控制电阻分压器的温度。

(2) 电流比较式电位差计

图 4 是电流比较式电位差计的原理图，变压器 T 的原边

线圈 N_1 中通有主电流源来的电流 I_1 ，副边线圈 N_2 中通有副电流源来的电流 I_2 ，这时调节电流 I_2 ，使得当用磁通检测器检查时变压器内的磁通为 0，即得

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

调节副边线圈的圈数，使得当 I_1 、 I_2

分别流过两个电阻值都为 R 的电阻器时，无论开关倒在哪一方，检流计都指示零，于是得到 $E_s = I_1 R$ ， $E_x = I_2 R$ 的关系式，从上述三式可得：

$$E_x = (N_1/N_2)E_s \dots \dots \dots (3)$$

这一关系式只是由变压器的圈数比决定的，不象电阻分压器那样与温度相关，因而它可以作为非常精密而且稳定的电位差计使用。变压器的圈数比为自校正的电位差计，其精度可以

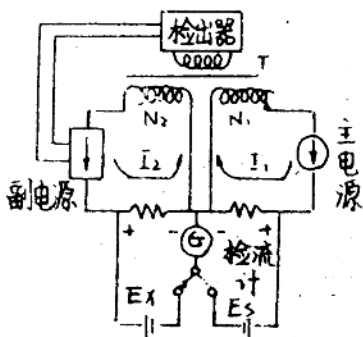


图 4 电流比较式电位差计

达到 10^{-8} ，测量误差大小决定于作基准用的标准电池的校正精度以及磁通检测器和检流计的分辨能力。

3、微电压的测量

测量 μV 以下的直流微电压采用如下三种方法：(1) 检流计；(2) 变频式直流放大器；(3) 差动式直流放大器。测量中存在的问题就是放大器的漂移和杂音，漂移是一种主要由热电动势和电源变动所产生的现象，这种现象即使输入电压恒定不变，输出电压也会慢慢变化。尽量抑制漂移的产生在测量直流微电压中是极为重要的。

(1) 检流计

检流计是一种灵敏度很高的可动线圈式电流计，本来是用来检测电流的有无的，一般地，由于它外接了一个临界制动电阻，不适合于高灵敏度的电压测量。但是，最近市场上出现了一种用高灵敏度检流计和硫化镉 (cds) 之类的光电元件相组合的检流计放大器，这种放大器灵敏度高漂移小。下面概要地介绍一下这种检流放大器：

如图 5 所示，用二块硫化镉片吸收装在检流计上镜片的反射光，镜片发生的振动，通过光传给硫化镉片（或者太阳能电池），经放大作为电阻的变化从电桥输出，然后负反馈到输入电压中。这种放大器具有等效输入阻抗大，

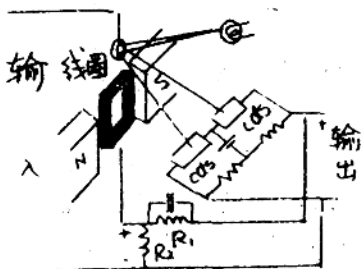


图 5 检流计放大器

响应速度快、不易受振动等外部杂音的影响的优点，它的灵敏度和漂移都可以达到 μV 的程度。

(2) 变频式直流放大器

测量直流微电压需要采用杂音低、漂移小的放大器，变频式直流放大器和差动式直流放大器就是这种要求的放大器。

图6是变频式直流放大器的原理图，用机械式或晶体管式断路器把输入的直流信号变换成交流信号，放大到适当的大小后整流，再用平滑的RC回路变回到直流。这时，放大回路会产生杂音，但是排除了漂移的影响。机械式断路器在ON和OFF两种状态下的电阻值之差较大，温度稳定性好，但不适于含有低频成分的信号放大。这种方式与下述的差动式直流放大器相比，灵敏度高；但存在着杂音大的不足之点。近来，已经生产出了使用晶体管式断路器的直流电压计，其灵敏度可达 μV 以下。

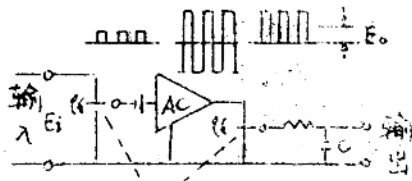


图6 变频式直流放大器原理

(3) 差动式直流放大器

这种放大器与断路器式放大器相比，漂移稍稍大些；但回路简单、杂音小，可以作为 μV 级信号放大和简易型电压器的初级放大器使用，它的所有回路全部采用集成电路块，作在同一基板上，输入是差动式的。温度变化所引起的漂移由于都反映在差动输出上，因而有所减少。一般地，差动式

直流放大器回路采用负反馈来加强其稳定性。近来采用集成电路的小型差动放大器，温度漂移为 $0.2\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 杂音为 $0.08\mu\text{Vp}$ ($0.1\sim 10\text{Hz}$)。

普通交流电压的测量是采用热电偶之类的交直流变换器来进行的，这里从略。

4、高电压的测量

(1) 交流和直流高压的测量

测量交流电压的波峰值和有效值时，达到 $\pm 3\%$ 的精度是比较容易的，而且电器和其它电气元件精度通常达到这个程度就够了。JEC—170（日本电气学会标准下同）1978和IEC Publication（1973）要求测量精度在 3% 以下。

测量直流电压的平均值时，要求测量误差不超过 3% ，脉动的大小在绝对误差上不超过平均值的 1% 。直流电压的情况下，空气中的尘粒和纤维状的物质分布在电场方向上，低压下就可能产生闪络，因此，它比交流电压和脉冲电压的情况更容易产生误差，这一点在测量时要引起注意。

(2) 脉冲电压的测量

JEC—212规定：标准雷脉冲电压，波头长为 $1.2\mu\text{s}$ ，波尾长为 $50\mu\text{s}$ ，标准开关脉冲电压，波头长为 $250\mu\text{s}$ ，波尾长为 $2500\mu\text{s}$ ，这里着重介绍标准脉冲电压的测量方法。

a、脉冲电压的测量精度

JEC—213规定脉冲电压的测量精度如表1所示。根据JEC—213标准，具有比标准雷脉冲电压波头长更长的脉冲电压和它的截断波电压，一般地可以保证在该表精度范围内测量。

表 1 脉冲电压测量精度

被测脉冲电压	波 峰 值 测量精度	波形测量精度
全波电压和它的波峰点以及波尾截断电压	$\pm 3\%$ 以内	波头长、波尾长到截断为止的时间 $\pm 10\%$ 以内
波头截断波电压到截断为止的电压 $T_c > 2\mu s$	$\pm 3\%$ 以内	到截断为止的时间 $\pm 10\%$ 以内
波头截断波电压* 到截断为止的时间 $0.5\mu s \leq T_c \leq 2\mu s$	$\pm 5\%$ 以内	到截断为止的时间 $\pm 10\%$ 以内

* 到截断为止的时间小于 $0.5\mu s$ 的短波头截断电压，波峰值测量精度下降，可能会达 $\pm 5\%$ 以上。

b、用示波器测量

(i) 分压器的种类

分压器从其构成上可以分为电阻分压器、密封式电阻分压器、电容分压器及电阻电容分压器。电阻分压器是由绕制成无感应线圈、固体电阻等构成的，其响应特性比尖顶脉冲电压测量中差。密封电阻分压器采用了密封电极减少高压部分杂散电容的影响，通常用作测量雷脉冲电压。要提高其响应性能就必须使其做成小型。电容分压器适合于测量交流重迭脉冲电压、开关脉冲电压等等，而不适合测量尖顶脉冲电压。电阻电容分压器是由电阻和电容并联而成的，电容值较小的分压器用于测量波头截断波和尖顶波脉冲电压，电阻值较大的分压器用于测量直流重迭脉冲电压。多个电阻电容相串联而成的制动电容分压器特性良好，在这种分压器各

电容上再并联一个大电阻后，就可制成能测量从直流电压到雷脉冲电压的通用分压器。

(ii) 脉冲电压测量系统的特性

含有分压器和示波器的整个测量系统称为脉冲电压测量系统，系统的响应特性是评价测量精度的重要指标。设图 7

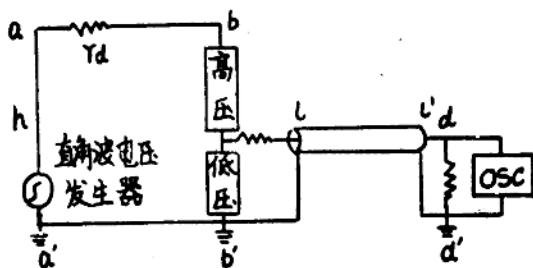


图 7 响应时间测量回路

测量回路的响应时间为 T_h ，则脉冲电压测量系统的响应时间可用下式表示：

$$T = T_h + h(1 - Z/R)/C(\mu s) \dots\dots\dots (4)$$

式中 h 和 Z 分别为垂直联线的长度 (m) 和冲击阻抗 (Ω)， R 为 bb' 间分压器的电阻 (Ω)， C 为光速 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)，用这个关系式可以进行测量系统的校正。表 2 是对脉冲电压的测量系统要求的响应时间。

表 2 测量系统必需的响应时间

被测脉冲电压	脉冲电压测量系统的响应时间 T
标准雷击脉冲电压和它的波峰点及波尾截断电压	$ T \leq 0.2 \mu s$
开关脉冲电压 (波头长 T_{cr}) 和它的波峰点及波尾截断电压	$ T \leq 0.03 T_{cr}$
波头截断电压 (到截断为止的时间 T_c)	$ T \leq 0.03 T_c (T_c > 2 \mu s)$ $ T \leq 0.05 T_c (0.5 \mu s \leq T_c \leq 2 \mu s)$

• $|T|$ 为响应时间的绝对值

测量系统的另一个重要特性就是电压比, 为了保证要求的精度; 必须在 $\pm 1\%$ 精度下决定电压比。

c、用峰值电压表测量

最近峰值电压表和示波器一样广泛用于测量当中, 它是由峰值电压表专用电子回路制成的, 输入阻抗 $1 M\Omega$ 以上, 输入电容 $50 PF$ 以下, 测量精度 (包括波头截断波) 在 $\pm 1\%$ 以内。

除上述方法之外, 还有一种用球罩测量脉冲电压的方法。使用这种方法时, 对示波图的读数误差和排除杂音的方法要作认真的讨论, 关于这一点请参照其它有关文献。

(3) 光电技术的应用

早在70年代初, 人们就发现光电技术用在高压测量当中是极为有效的, 迄今为止, 在这个方面已经有了许多研究。应用光电技术的具体方法有: ①把电压变换成光的强度; ②应用光电效应 (二次光电效应, 光电效应)。通常它们和光

纤维组合构成测量系统。

光学式分压器和光联接器就是将电压变换成光强度变化的例子，它们都是利用以光为媒质的波形模拟传送原理而制成的，在电流和光的强度之间采用具有比例关系的发光二极管。发光二极管所发出的光通过光纤传到大地上，用光敏二极管或光电放大管和示波器观察波形。日本新生产的光学式电阻分压器对于测量电压为1000kV和2000kV的脉冲电压，其响应时间分别为 $5\mu\text{s}$ 和 $10\mu\text{s}$ ，比旧式电阻分压器性能要好得多。一般地用这种方法在温度范围内测量电压时，需要对发光二极管进行温度补偿。用热敏电阻进行温度补偿，就可以在 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内，对光传播距离30m，精度为3%的雷电压进行测量。对于在正负极性上产生振动波形的电压可以采用在发光二极管中流动偏置电流的方法测量，用这种方法还可以测量绝缘断路器中产生的冲击电压。

光电效应应用的例子有使用克尔盒的分压器和使用二次光电元件的电压、电场计。二次光电元件有 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO)、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO)、ZnS等，它们都具有在电场或电压作用下，利用内部穿透光调节相位的物理性质。目前已生产出精度高、频带宽、灵敏度高的BSO和BGO电压、电场测量器。BSO和BGO温度特性良好，前者为 $-10^{\circ}\text{C}\sim +85^{\circ}\text{C}\pm 0.2\%$ ，后者为 $-25^{\circ}\text{C}\sim +85^{\circ}\text{C}\pm 0.5\%$ 。

最近，在加负极性脉冲电压的位垒效应有关实验中，采用ZnS光学晶体测量空间电场。测量结果表明：负极性流光尖端部分到达位垒点时，流光前端的电场急剧增大，使流光继续往前进，穿过位垒产生闪络，这样光电元件在解释放电现象中也得到了广泛的运用。

(4) 计算机在高压测量中的应用

电子计算机、特别是微计算机的飞跃发展,使高压发生装置的控制、试验数据的记录,计算和处理变得轻而易举了。尤其是高速A/D变换技术和光数据传送技术等 的 进 步,使原来不能测量的数据得到了解决,电子计算机应用的范围将来还会越来越大。计算机高压测量系统应用光联接器可以在高压试验所特有的强磁场和强电场的恶劣环境下不产生误动作。

计算机用在测量高压中,有如下几种形式:

- ①脉冲电压发生装置的自动控制;
- ②测量数据的联机处理;
- ③在测量局部放电中的应用;
- ④使附有污染物的绝缘子试验实现自动化;
- ⑤在雷观测中的应用。

下面简单地说明一下主要和高压测量、控制相关的①、②两项。

在脉冲电压试验中,每次加电压前,要校核充电电压值,检查起动计时是否正确,校核决定发生脉冲波峰值的重要因素——充电速度,并且在试验期间要保持光电速度不变。介于这样的充电、起动操作极为烦琐的情况,现在已开发出并且使用了脉冲试验自动化系统。利用这个系统,在用升降法进行脉冲电压试验的试验条件下,就能自动地进行试验,试验结束后,输出50%的闪络电压和标准偏差等。日本电力中央研究所在超高压级相间开关脉冲试验中,用计算机控制两台10MV脉冲电压发生装置,试验结果都由计算机处理,该研究所还研制出了V—t特性全自动测量系统。

计算机用于脉冲电压试验的另一个优点,就是能对作时间分析的脉冲电压波形数据进行运算。近来正在研究分压器

直角波波形修正的数学模式，计算机用于这一方面，将会大大地提高脉冲试验的精度。