

第18章 电气设备的诊断技术

邓 续 魁

电力变压器是电站、变配电所和用电部门最重要、装置量最多和最具有代表性的电气设备，通过众多的电力变压器和不同电压的电机、电器，得以形成工业企业中统一的电力系统。三相交流异步电动机是工业企业中用途最广且装置量最多的低压电气设备。微电子电气控制设备是现代世界各国用途日益广泛的、代表新技术趋向的电气设备。本章将就这些最有代表性的电气设备的故障诊断或诊断技术来进行重点的介绍。

第1节 电力变压器的 诊断技术

构成电力系统（尤其是输配电系统）主要部分的电力变压器，是工业企业供电、用电的重要设备。我国的工矿企业除已大量采用油浸式电力变压器外，有的企业还装置有干式（环氧树脂浇注型和浸渍型）电力变压器；在某些特殊场合，还装有硅油油浸式电力变压器；化工企业还广泛采用SF₆（氟化硫）气体绝缘干式电力变压器。从国外资料看，硅油油浸式电力变压器有发展的趋向；例如，奥地利最近计划在10kV电网中用硅油变压器取代525台干式变压器，广泛用在地下铁道、工厂或高层建筑中，全世界已有3万台在运行。然而，用得最多的还是加普通变压器油的油浸式电力变压器，本节将以该类变压器为代表来叙述它的测定与诊断技术。

（一）电力变压器绕组绝缘潮湿程度的测定

多数电力变压器绕组的绝缘材料是由A级绝缘（如绝缘纸、棉纱及纸板等）构成，这些材料极易吸收潮气，它们的吸湿性一般为10%甚至更高。绝

缘电阻的含湿率不同，使用寿命会截然不同；例如将绝缘纸放在90℃温度下做使用寿命试验，在含湿率极低的真空中，其使用寿命约为350年；放在干燥空气中，其寿命约为140年；而将其放在1.4%的含湿率空气中，其寿命就缩短为30年左右。诊断电力变压器绝缘绕组的潮湿程度是确定该变压器能否正常运行的关键。由于油浸电力变压器的绕组（包有绝缘物）是浸于油中运行，所以，只要测定绝缘油的情况，就可测出变压器绕组的受潮程度。

1. 绝缘油受潮程度的测定

（1）绝缘油取样 电力变压器中充注的绝缘用油（变压器油）的质量，影响电力变压器的绝缘电气强度和使用寿命，油中的机械杂质如沉淀在绕组绝缘上，会减弱冷却效果、产生局部过热并引起沿绝缘表面（运行中的变压器绝缘表面）闪络。若诊断绝缘油是否合格，需先取油样作化验分析。所取油样如做全分析，需油样1.5L；如作简化分析（分析闪点、绝缘强度、酸值、酸碱化应、游离碳、水分和机械杂质），需油样0.8L；如做击穿电压试验，就需油样0.5L。油样应装在具有磨砂瓶塞的广口玻璃瓶中，油样瓶每次使用前，都要用纯净汽油、无水酒精或苯液精心清洗，最后用干净蒸馏水冲洗几次，随即放至温度为100~110℃的恒温箱中烘烤约两小时，待降温后盖好瓶塞才可备用。

应从设备下部的门用油样阀中取出油样，先放出1~2L油以冲洗阀门油道的积污，然后用油冲洗油样瓶两次，随即令油流稳定流入该瓶中，充满油样瓶后立即盖上油塞，贴上标签并注明油样来源。如油样需送外地试验或保存较长时间，则应该用干净纸包好瓶口，外加蜡封。

取油样时还要注意油样瓶温度，应接近并略高于油温，因热油注入冷瓶会使附近空气中的水份在瓶内壁结露而使油样受潮。取油样时要戴上口罩并

不得对着瓶口说话,以免呵气或溅沫喷入油中。

(2) 绝缘油击穿电压试验 在试油杯内,当将两个电极间的电压逐渐升高到一定值时,电极间的油样就会被击穿,该电压即为油的击穿电压。每厘米绝缘油的击穿电压称为油的击穿强度,以 E 表示

$$E = \frac{U}{d} \quad (\text{kV/cm}) \quad (18-1-1)$$

式中 U ——击穿电压有效值 (kV);

d ——电极间距离 (cm)。

我国规定使用直径为25mm的平板形标准电极进行绝缘油击穿试验,极间距离规定为2.5mm。试验结果用击穿电压表示,不需要换算为击穿强度。

绝缘油的击穿过程大致如下:当电压逐渐升高,处于电极附近油中的纤维、水分等杂质(它们的介电常数 ϵ 都比油的要大)便向电场强度较大处移动,并顺着电场的方向在电极间逐渐构成一个“小桥”,当电压升到一定值时即沿此小桥放电。

影响绝缘油击穿电压的因素很多,对现场工作有意义的主要是水分、温度、杂质和升压速度。

水分对绝缘油击穿强度的影响最大,在干燥的油中即使加入万分分之一的水,就可能使其击穿电压降低约 $7/8$ 。而且,越是干燥的油,吸收潮气的速度越快,有时对着油杯呵一口气也能使击穿电压降低。可见水分对绝缘油击穿强度的影响之严重,做试验时应该引起充分注意。

油中如含有纤维、碳粒等杂质,也会使油的击穿电压降低,因为它们是构成“小桥”的材料。有时,纤维的来源是压滤机中不符合要求的滤纸。

受潮的油其击穿电压受温度的影响比较明显,如图18-1-1所示的曲线,在零下 $5 \sim 10^\circ\text{C}$ 时击穿强度有极小值,而 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 时出现极大值。极小值是由于此时水分已成为水的结晶体,容易构成小桥。温度高于 0°C 后,所含的水分还大都处于乳化状态,油的击穿强度较低,随温度继续升高,乳化状态的水逐渐溶解于油中,转变为分子状态的水,遂使击穿强度升高。击穿电压达到最大值以后又渐降低,则是由于水分开始汽化的缘故。可见水分在油中的状态不同,影响击穿电压的程度也不同。对于干燥的油,温度的影响并不明显,可以认为在 100°C 以前击穿电压大致是不变的,图18-1-2可表明这种情况。

做油的击穿电压试验时,如果升压速度太快,将使试验结果不正常地偏高,因在电场作用下需要

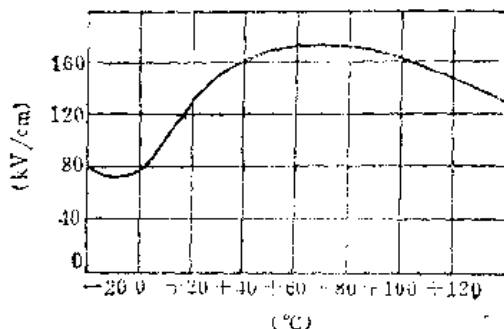


图18-1-1 油中含有水分时击穿强度与温度的关系

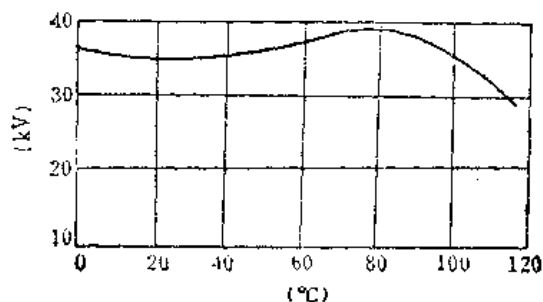


图18-1-2 干燥的油击穿电压与温度的关系
(间隙0.75mm)

一定的时间才能形成极间的“小桥”，升压速度太快会使这种“小桥”来不及形成。

此外,击穿试验所用电极的形状对击穿电压也有影响,以平板形和球形电极为例(图18-1-3),前者极间电场分布均匀,易于使油中杂质连成“小桥”,故击穿电压较大程度上取决于杂质的多少;后者由于球形电场强度比较集中,杂质有较多的机会碰到球面,接受电荷后又被强电场斥去,故不容

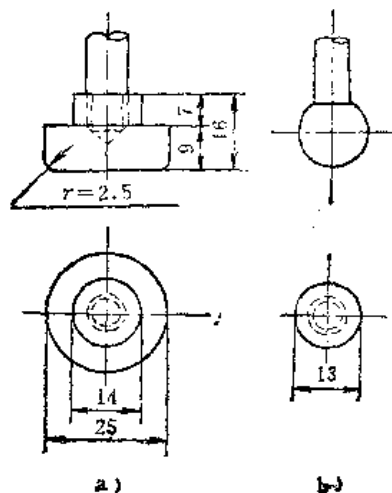


图18-1-3 绝缘油击穿电压试验所用电极 (mm)
a) 平板电极 b) 球形电极

易构成“小桥”。因此，若为检查油中的水分等杂质时，宜用平板电极；而为了试验油本身的击穿强度，则宜用球形电极。前已指出，我国规定以平板电极作为标准试验电极，如图18-1-3 a所示。

绝缘油击穿电压试验步骤如下：

1) 清洗和干燥试油杯、标准量规、搅拌用的玻璃棒和作为杯盖的玻璃板（与清洗、干燥油样瓶的方法相同）。

2) 待油样的温度接近室温后，将油样瓶慢慢颠倒两次，使之混合均匀（而不产生泡沫）。用油样再将试油杯、量规等冲洗两三次。

3) 调好电极间隙为2.5mm，令油样顺搅拌用的玻璃棒缓缓流下，直到油面超过电极不少于15mm（见图18-1-4），盖上玻璃盖，静置15分钟。

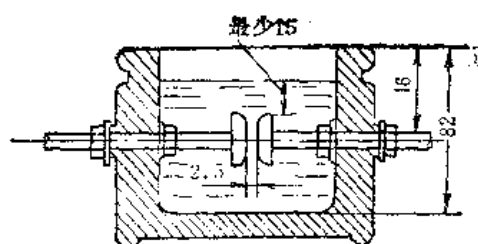


图18-1-4 绝缘油击穿电压试验用油杯
(单位: mm)

4) 接通电源，以大约每秒2000~3000V的速率平稳升压，直到杯中发生击穿。开关自动跳闸，即可降回调压把手，切断电源。击穿前达到的最高电压值，即击穿电压。

5) 用直径为2mm的玻璃棒驱除电极间因击穿而产生的炭粒，搅拌时不要产生泡沫，同时不要用手接触油，搅拌后静置5分钟。

6) 重复4和5项中所述操作，共得6个击穿电压数据，取后5次的平均值作为此油样的击穿电压值。其第1次击穿电压值常偏高，故舍去不用。应注意任一次击穿电压值与五次平均值比较，相差不应超过25%。个别数据偏离平均值过多说明是偶然因素的影响，这次试验即作废，需另取油样，重新试验。

绝缘油的击穿电压试验应在5~35℃的环境温度下进行。新绝缘油的击穿电压标准如表18-1-1所示。

做绝缘油击穿电压试验的设备，现场最常用的是专门设计的“油耐压试验器”，这种成套装置只

表18-1-1 新绝缘油击穿电压标准

充油设备的额定电压 (kV)	15及以下	20~35	44~220
最低允许击穿电压 (kV)	25	35	40

要使用前将外壳可靠接地，对操作人员是比较安全的。采用其他型式的试验变压器进行击穿试验时，如果高压部分暴露在外面，应特别注意高压工作的保安制度。

击穿试验所用的黄铜电极，其极面应光滑无伤痕，在使用中因放电而遗留炭迹时，可用柔软的绒布擦净。为了防止击穿时电极间的电弧产生大量炭粒和气体，可在试验变压器的高压侧串以1~5MΩ的电阻以限制电流。串电阻后应重新调整过流保护装置。

试完后的绝缘油可以留在杯中，并将油杯置于干燥处，以防止油杯受潮。下次使用如相隔时间不久，且上次所试油样是合格的油，则油杯可只用新油样冲洗数次，不需再进行干燥。

(3) 绝缘油的介质损失角测量 油浸电力变压器用绝缘油的介质损失角正切值的测量是诊断变压器绝缘状况的主要方法之一。该法具有较高的灵敏度。

老化了的绝缘油介质损失角正切值 $\tan\delta$ 比之新绝缘油可能增大数十倍以至上千倍，可见绝缘油的 $\tan\delta$ 是判断油质和老化程度的灵敏指标。随设备运至工地的绝缘油，如仅做简化分析，则应加测 $\tan\delta$ 。

油的 $\tan\delta$ 与其击穿电压没有内在联系， $\tan\delta$ 值很大的油其击穿电压可能反而很高。击穿电压主要反映油的污染情况（如水分、纤维等杂质），而 $\tan\delta$ 则表征油的质的变化，这是二者根本不同之处。

酸价大的油， $\tan\delta$ 值也高，但酸价与 $\tan\delta$ 也不是简单的直线关系。常遇到酸价合格而 $\tan\delta$ 大大超过标准的绝缘油。

油的 $\tan\delta$ 随温度升高而增大，越是老化的油其 $\tan\delta$ 随温度的变化也越快。例如，老化了的油在20℃时的 $\tan\delta$ 值仅相当于新油 $\tan\delta$ 值的2倍，在100℃时可能相当20倍。也会遇到这样的情况，20℃时油的 $\tan\delta$ 值不大，而70℃时所测 $\tan\delta$ 又远远超过标准。因此应尽量在高温时测量油的 $\tan\delta$ 值，《交接试验标准》规定必须在70℃温度下测量。

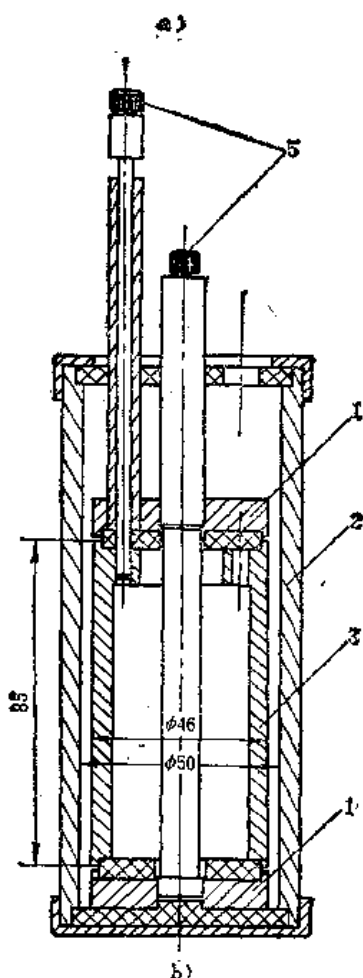
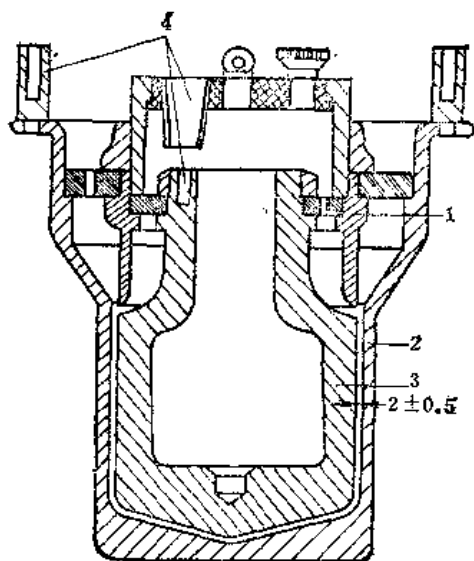


图18-1-5 绝缘油的介质损失角正切值
($\text{tg}\delta$) 测量杯 (mm)

a) J、E及C型 b) 圆柱型

1—遮蔽(保护)环 2—外(高压)电极 3—内
(低压)电极 4—接线孔 5—接线柱

油的 $\text{tg}\delta$ 还随电场强度的大小而变化,一般规定在电极间隙中施加的电压为每毫米1000 V。电场强度再增大时测量的 $\text{tg}\delta$ 值也相应增大,特别是在温度较高时更是如此。

油的 $\text{tg}\delta$ 并随施加电压的时间而变化,故应在施加电压一定时间后再精确平衡测 $\text{tg}\delta$ 值的电桥,而不可一经升起电压便忙着读数。

图18-1-5 a和18-1-5 b是两种不同型式的测量油的 $\text{tg}\delta$ 的油杯,杯体用黄铜或不锈钢制成,钢制杯体的表面最好镀镍或铬。电极表面应尽量光滑,优质的油杯能达到 $R_a 0.2$ 的粗糙度。空杯电容不宜小于50微微法。上述油杯的工作电压均为2000 V,试验电压为4000 V。油杯具有插温度计的测温孔。

测量绝缘油的介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ 时,最好采用QS3型高压电桥,这种电桥所测 $\text{tg}\delta$ 值的范围较广(从0.01%到100%),准确度也较高。在施工现场,为了初步判明油的质量,也可使用QS1型高压电桥,它的精确度虽不高,但因新油和老化油的 $\text{tg}\delta$ 相差很大,所以,QS1型电桥测得的近似结果,也可以说明问题。此外,当具有M型介质损失角试验器时,也可用以测量油的 $\text{tg}\delta$ 。

现以QS3型电桥和图18-1-5 b所示油杯为例,说明绝缘油介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ 的测量步骤:

1) 将内电极从外电极中取出,对二电极进行清洗。如油杯的绝缘部件由有机玻璃做成,应先用汽油清洗2~3次,再用无水酒精洗两次,然后用热风(如电吹风机)吹干,或放在不超过75℃的烘箱中烘干。对于绝缘部件由其他耐高温材料做成的油杯,可以应用苯或四氯化碳清洗,然后放在100~110℃的烘箱中干燥2小时。油杯拆开和组装时注意不要碰伤电极的工作表面。

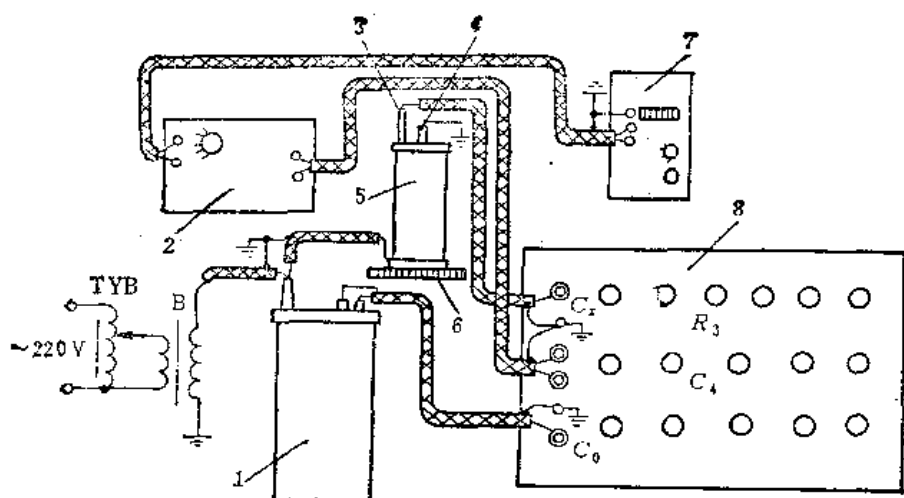
2) 油杯注油前测定空杯的 $\text{tg}\delta$ 值和空杯电容值,所测结果应符合该型油杯的标准。在油杯连续使用情况下不需测定空杯 $\text{tg}\delta$ 和空杯电容。

3) 用被试油样将油杯冲洗2~3次。

4) 缓缓将油注满,使油中气泡得以逸出。

5) 将油杯放在绝缘板上。此板的绝缘电阻不低于2500 MΩ,能承受工频交流电压5000 V 1分钟。

6) 试验地点应选择没有强电磁场干扰的地方。按图18-1-6接线,注意电桥各部件取同相电源。放大器要提前15分钟接通电源,以使其能稳定地工作。

图18-1-6 使用QS3型高压电桥测量绝缘油的 $\text{tg}\delta$ 之接线示意图

1—标准电容器 2—放大器 3—油杯的低压电极导电杆 4—油杯的屏蔽电极导电杆 5—油杯的高压电极 6—绝缘板 7—振盪式检流计 8—QS3型电桥本体

7) 油样静置 10~15min, 然后合上电源, 升压至 1.5 倍试验电压, 停 1min, 应无电离现象。

8) 按照 QS3 型电桥的使用说明平衡电桥, 测出常温下 (10~30°C) 油的 $\text{tg}\delta$, 所测数值应按表 18-1-2 换算至 20°C 之值。

表18-1-2 变压器油 $\text{tg}\delta$ (%) 按温度
换算系数

油温 (°C)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
系数	1.38	1.35	1.31	1.27	1.24	1.20	1.16	1.12	1.08	1.04	1.00
油温 (°C)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
系数	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.76	0.73	0.70	0.67	0.63	

一般规定对绝缘油只测量 70°C 温度下的 $\text{tg}\delta$ 值, 其标准对新油规定为不应大于 0.5%, 运行中的油规定为不应大于 2%。但在时间允许情况下, 不妨加测常温下的 $\text{tg}\delta$ 值, 以积累数据, 为可能遇到无条件加温时的测量创造条件。

9) 在恒温箱中将油加温至 $70 \pm 2^\circ\text{C}$, 再测油的 $\text{tg}\delta$ 值。

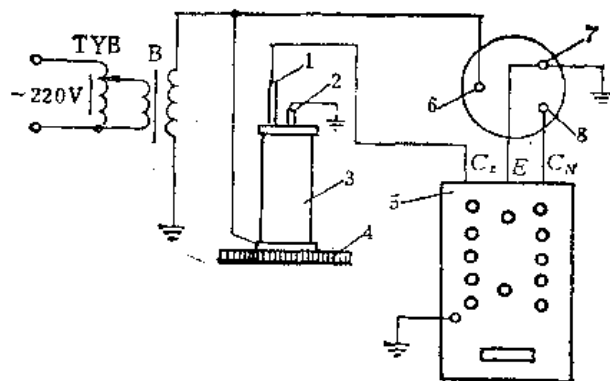
10) 然后将油样倒掉, 再注入同一批油样, 进行常温和 $70 \pm 2^\circ\text{C}$ 温度下的测量。

两次测量结果之差如不大于 $10\% \pm 0.0001$, 则取两次的平均值作为测量结果。

11) 在试验记录上应注明: 油杯型式、空杯电

容值、空杯 $\text{tg}\delta$ 值、试验时油温、相对湿度、高压电桥型号和测量时的试验电压。

使用携带型高压电桥 (QS1 型) 进行测量时, 须应用正接线, 如图 18-1-7。测量步骤可参考前述 QS3 型电桥部分及 QS1 型电桥的使用说明书。

图18-1-7 使用QS1型电桥测量绝缘油的 $\text{tg}\delta$ 时的接线示意图

1—油杯的低压电极导电杆 2—油杯的屏蔽电极导电杆 3—油杯的高压电极 4—绝缘板 5—QS1型电桥本体 6—标准电容器的“高压”接线柱 7—标准电容器的“地”接线柱 8—标准电容器的“低压”接线柱

使用 M 型介质损失角试验器测量油的 $\text{tg}\delta$ 时, 除了由于测量时在被试回路引入无感电阻而造成无法消除的误差外, 另一个问题是必须将低压电极接地, 但油杯外壳处于高压, 因此高压电极与地间的绝缘板中通过的电流将流过测量仪器, 这又造成附

加误差,为消除此影响,可在油杯下垫两层绝缘板,两层绝缘板之间夹一层金属屏蔽,并用导线将此屏蔽接至试验器的屏蔽环上(图18-1-8)。注意靠近油杯那一层绝缘板应能承受交流5000V耐压,历时1分钟,绝缘电阻不低于2500MΩ。

如采用一定型式的油杯,在其内外电极间施加直流电压,可以测出油的体积电阻系数 ρ_V , ρ_V 与 $\lg \delta$ 之间存在以下关系:

$$\lg \delta = \frac{1}{\omega C \rho_V} \quad (18-1-2)$$

式中 ω ——交流电的角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为频率;

C ——两极间充满一定介质时的电容。

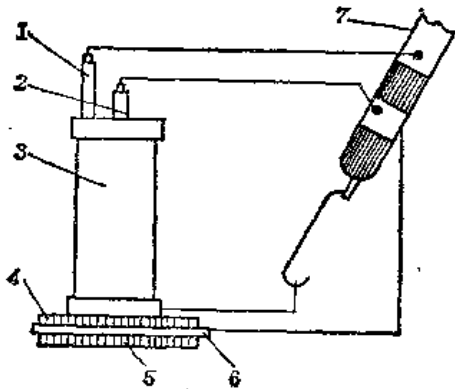


图18-1-8 用M型介质损失角测试器测量绝缘油的 $\lg \delta$ 的接线示意图

1—油杯的低压电极导电杆 2—油杯的屏蔽电极导电杆 3—油杯的高压电极 4、5—绝缘板 6—金属屏蔽 7—M型介质损失角试验器的专用出线

因此, ρ_V 的测量可以代替 $\lg \delta$ 测量, ρ_V 是用兆欧表测出的,从而避免了复杂的高压电桥操作。实用上并不把 ρ_V 换算成 $\lg \delta$,仍以兆欧表所测的绝缘电阻作为判断绝缘油老化程度的指标。东北电力系统曾使用M型介质损失角试验器所附油杯测量油的绝缘电阻,并按表18-1-3所列标准掌握。

表18-1-3 用M型试验器所附油杯测量绝缘油的绝缘电阻值

绝缘油分类	绝缘电阻 (MΩ)	
	20℃	70℃
良好	10000	1000
合格	3000	300
可用	1500	150

由上所述,绝缘油介质损失角的测量需要用高压电桥,准备的工作量较大,接线和操作较为复杂,测量结果有时还会受到外界电磁场及温度的影响。

当然,测量油的绝缘电阻的方法只是一个粗略的方法,其精确度远不及介质损失角测量,表18-1-3也只能起一定的参考作用。油的绝缘电阻测量,同测介质损失角一样,也受温度的影响,因而在测量时要注意温度对测量结果的作用,最好在前后两次测量时,都在相近的温度下进行,以便相互比较而得出正确结果。

还应指出,如果在电力变压器安装或检修中,发现油的介质损失角超出标准而马上换油有困难时,也可暂不换油,只要查明油中不含水分,绕组绝缘也未受潮,即使电力变压器整体的绝缘电阻稍低, $\lg \delta$ 较大,亦不致显著降低其绝缘强度,在一定时间内仍可安全运行。这是因为油的介质损失角正切值 $\lg \delta$ 这个指标比较灵敏, $\lg \delta$ 稍为增大,只说明绝缘油老化的趋势,并非已不能使用,故可先投入运行,待有条件时再换新油或者进行再生处理。

(4) 绝缘油的若干物理化学性能对油浸电力变压器运行的影响 表示绝缘油老化程度的性质主要是水溶性酸或碱、酸值、皂化值等,表示油污染情况的主要是含水量及混入的机械杂质,而油的基本性质如密度、粘度、凝点、闪点、灰分、外貌等对油浸变压器的运行也有密切关系。

1) 水溶性酸、碱可能是净化过程中剩余的微量硫酸或碱,也可能是剧烈氧化所生成的低分子酸。各种酸都能剧烈破坏油的电气性能(使其 $\lg \delta$ 增大,但对击穿电压影响较小),引起金属和绝缘腐蚀,加速油的老化。这是化学分析中最重要的指标之一。新绝缘油应呈中性反应。

2) 酸值的增加表示油已处于氧化的开始阶段,新油的酸值不应大于0.05(就是中和每克油所需的KOH的毫克数)。在酸值测定中仅包括低分子酸而不能测出高分子酸,为了测定高分子酸的数量需要测皂化值。当再生废油时,可借皂化值估算所需的碱量。

3) 粘度也是油的重要指标之一。对电力变压器来讲,油的粘度低有利于散热,在油断路器中,低粘度的油流动性大,有利于断弧。因此我们希望其粘度越低越好。可是粘度降低时油的闪点也跟着

降低,这是我们所不希望的,因而限制了油粘度的降低。粘度随温度而变,一般规定:20℃时不大于31mm/s,50℃时不大于13.3mm/s。

4) 油的凝点主要是针对断路器用绝缘油而提出的。当达到凝固点温度时,油的粘度如此大,以致盛油的试管倾斜45°角,在1分钟内油面仍能保持不变。显然,凝固点高的油对断路器操作是非常不利的,低温下油的粘度增大,断路器的动作速度就减低,使灭弧条件变坏。电力变压器在负载下温升较高,油的粘度相对减小,凝固点高些对它影响不大,但带负载调压电力变压器的调压切换装置,粘度太大会影响其工作。用于这两部分的绝缘油其凝固点不应高于下列标准。对油断路器:气温不低于-10℃的地区,凝固点为-25℃,气温低于-10℃的地区,凝固点为-45℃。对电力变压器:凝固点为-25℃的油,使用地区不限,气温不低于-10℃的地区,还可使用凝固点为-10℃的绝缘油。

5) 闪点表征油的蒸发度,油的闪点愈低其蒸发度愈高。油经长期蒸发会使其粘度增加,体积减少,并生成有害于人体健康和导致爆炸危险的气体。运行中的油其闪点会慢慢升高。变压器的瓦斯保护动作后,同时测得油的闪点降低5℃以上,说明变压器有内部故障,应彻底检查。有时,变压器内还会发生所谓油的“热裂”现象,此时闪点下降到40~50℃,这是十分危险的。分馏过程中遗留的少量轻石油馏分会使闪点急剧降低,例如含有0.5%的汽油,会使油的闪点由180℃降到80℃。一般规定,新油的闪点不应低于135℃。

6) 灰分是绝缘油生产过程中洗涤好坏的指标,如果洗涤不良,则残余的盐类或肥皂能使油烧尽后的灰分超过规定。在运行中,灰分可因与油接触的金属的腐蚀、绝缘漆的溶解、灰尘等杂质的侵入而增加。新油的灰分不应大于0.005%。

油中含有游离态的活性硫或不稳定的硫化物都是不好的,因它们能形成有害的皂类,并使油呈酸性反应,引起金属或绝缘腐蚀。

7) 油的外貌是鉴别油质好坏的最简便办法,新油呈淡黄色,晶莹透明,随着老化程度的增加,逐渐变为橙黄色、暗黄色以致深褐色,透明度也逐渐降低。这说明油中所含游离碳等机械杂质的增加。

由以上的叙述可见,绝缘油的物理化学性能较

为复杂,不同牌号、不同来源的油,或者净化程度不同、老化程度不同的油,以及添加的抗氧化剂不同的油,其性质可能有很大差异。两种不同的油混合在一起,有可能发生凝固点提高,或者安定性(氧化后酸值与氧化后沉淀物)变坏等有害后果。因此,当新装充油电气设备的油量不够,需要补充绝缘油时,应补充同一牌号、同一来源的新油。如不得已需使用不同牌号的油或者牌号相同但已经过运行的油时,则必须按照规定做混油试验,只当混油试验合格,才允许使用。

2. 绕组绝缘电阻的测定

(1) 绝缘电阻和吸收比 绝缘电阻和吸收比是判断绝缘受潮的灵敏指标。对B级绝缘(如同步发电机),绝缘电阻几乎是判断绝缘状况的唯一依据。而对于电力变压器,虽然由于其绝缘结构比较复杂,不能单靠测绝缘电阻和吸收比的方法得出结论,但它仍不失为最重要的试验方法之一。绝缘电阻和吸收比不但能发现绝缘整体受潮,对于检出局部缺陷如电力变压器分接开关传动杆、引出线木夹板、出线套管等部位受潮、脏污或者贯穿性的绝缘损坏,它反映得尤为灵敏。从操作方法上看,测绝缘电阻和吸收比最为简单方便,测试的电源由仪器的自备(手摇)电源或低压电源供给,接线简便,只要注意一般的操作方法,很容易获得准确的测量结果。

绝缘电阻,一般指兆欧表开始转动1分钟后的读数。如果也读出第15秒的读数,就可求得吸收比 K_0 :

$$K_0 = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (18-1-3)$$

式中 R_{60} ——1分钟时兆欧表读数;

R_{15} ——15秒时兆欧表读数。

图18-1-9是一台电力变压器受潮和经干燥后的绝缘电阻与时间的关系曲线。可以看出,干燥后绝缘电阻增加约7倍,吸收比也由1.09增至1.7。

以兆欧表测量电力变压器绕组的绝缘电阻时,按非被测绕组所处的位置,可有下列3种接线方式:

1) 被测绕组接兆欧表的“线路”端子,非被测绕组接兆欧表的“屏蔽”端子,变压器外壳接兆欧表的“地”端子。

2) 被测绕组接“线路”端子,非被测绕组不接线,处于悬浮电位,外壳接“地”端子。

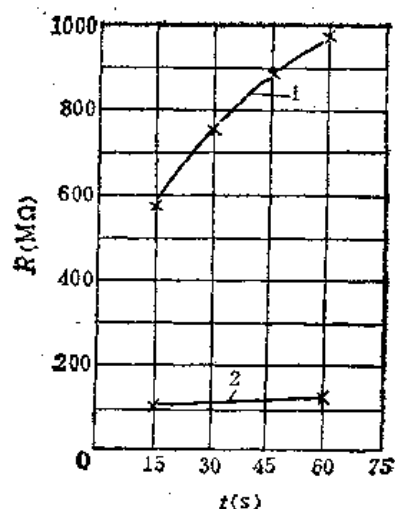


图18-1-9 一台受潮电力变压器干燥前后的绝缘电阻 (R) 与时间 (t) 的关系

1—干燥后, $R_{60}/R_{15}=1.7$ 2—干燥前,
 $R_{60}/R_{15}=1.09$

3) 被测绕组接“线路”端子, 非被测绕组和外壳一起接至兆欧表的“地”端子。

从原理上讲, 第1种方式比较合理, 因为它测出的仅仅是欲测的两个部位之间的绝缘电阻, 不受另一绕组绝缘状况的影响, 便于分析内部故障的部位。第3种接线方式比较简便, 当测绕组对地的绝缘时实际上也测到了绕组之间的绝缘。从测量结果来看, 第1种方式所测绝缘电阻数值比之第3种方式要高些, 而吸收比则较低。用第1种方式测高压绕组对外壳的绝缘电阻时, 即使未受潮的变压器, 其吸收比也达不到1.3, 因这样接线时测量电流只能通过绝缘油达到外壳, 通过低压绕组到达铁芯的支路因屏蔽而不通, 这时的吸收比主要是绝缘油的吸收比, 而绝缘油和高、低压绕组间的绝缘筒等比较起来, 其吸收现象很不显著。

有的变压器制造厂过去曾采用过第2种接线方式。现多采用第3种方式。国外如英、美、苏、德等国也多采用第3种方式。第3种方式的具体接法规定如表18-1-4。

绝缘电阻的数值和设备的几何尺寸、所采用绝缘材料的性质等有关, 一般应用比较方法进行判断, 即同一台电力变压器前后两次测量结果相比, 或者与同型、同电压等级和同容量的电力变压器相比。在安装现场判断绝缘潮湿程度时, 应与制造厂出厂试验结果相比, 在相同温度下, 绝缘电阻不低于厂家值的70%, 即认为绝缘电阻是合格的。显

表18-1-4 测量电力变压器绝缘时的接线

序号	双绕组变压器		三绕组变压器	
	被测绕组	应接地部位	被测绕组	应接地部位
1	低压	高压、外壳	低压	中压、高压及外壳
2	高压	低压、外壳	中压	低压、高压及外壳
3	—	—	高压	低压、中压及外壳
4	低压及高压	外壳	中压及高压及高压	低压及外壳
5	—	—	低压、中压	外壳

注: 1. 被测绕组各出线头应短接起来后再接至兆欧表, 应接地的绕组应短路接地。

2. 只对容量为15000kVA及以上的变压器才进行表中的第4、5两项测量。

然, 只有在测量方法相同的基础上互相比才有价值, 因此, 在安装现场也应采用与制造厂统一的试验接线, 以便于对比。

当没有绝缘电阻的出厂试验记录时, 可参考表18-1-5。如实测绝缘电阻值不低于表中数值, 也可认为是合格的。

表18-1-5 新装油浸式电力变压器绝缘电阻的允许值 (MΩ)

高压绕组电压等级 (kV)	温度 (°C)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
3~15.75	450	300	200	130	90	60	40	25
18~44	600	400	270	180	120	80	50	35
60~220	1200	800	540	360	240	160	100	70

注: 同一电力变压器中压和低压绕组的绝缘电阻标准与高压绕组相同。

至于绝缘吸收比, 未受潮的新装电力变压器在10~30°C时应在1.3~2之间, 受潮或绝缘有局部缺陷的电力变压器其值接近1。沈阳变压器厂规定: 35kV及以下的电力变压器吸收比应大于1.3; 60kV及以上的电力变压器, 吸收比应不小于1.5。

变压器长期运行后, 绝缘油逐渐老化, 油中产生的油泥将附着于电力变压器的绕组及各个绝缘部件上, 使绝缘电阻及吸收比都逐渐降低。

(2) 温度的影响 温度对绝缘电阻的影响很大。随着温度增加, 加速了绝缘介质内分子和离子的运动。同时, 温度升高时绝缘层中的水分会溶解

更多的杂质，也使绝缘电阻降低。而当试品温度低于周围空气的“露点”温度时，潮气将在绝缘表面结露，增加了表面泄漏，绝缘电阻也降低，如果试品表面脏污则降低更为显著。

《高压电气设备绝缘预防性试验方法》（原水利电力部技术改进局编）一书对A级绝缘推荐按以下公式作温度换算：

$$R_2 = R_1 10^{\alpha(t_1 - t_2)} \quad (18-1-4)$$

式中 R_1 、 R_2 ——温度为 t_1 、 t_2 时之绝缘电阻；

α ——系数，对A级绝缘为 $1/40$ 。

同时又指出：不同产品，由于材料成分和绝缘结构的不同，没有一个通用的换算系数。推荐值只能代表某型设备的一般变化趋势，在某一具体设备上未必完全吻合。这样讲是符合实际情况的。

因绝缘电阻是温度的指数函数，式（18-1-4）

对于新装电力变压器，按照表18-1-6的温度换算系数进行换算。

表18-1-6 新装油浸式电力变压器绝缘电阻的温度换算系数

温度差 (°C)	5	10	15	20	25	30
换算系数	1.2	1.5	1.8	2.3	2.8	3.4
温度差 (°C)	35	40	45	50	55	60
换算系数	4.1	5.1	6.2	7.5	9.2	11.2

表18-1-6是根据温度每降低10°C绝缘电阻增加为1.5倍的原则编制的，即相当于式（18-1-5）中

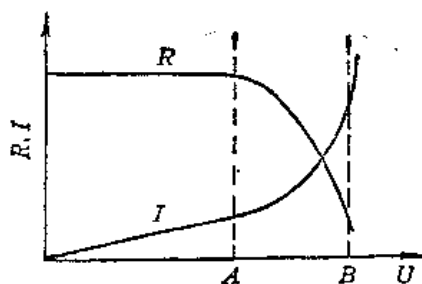


图18-1-12 绝缘介质的绝缘电阻 (R) 和传导电流 (I) 与外施电压 (U) 的关系

测量电力变压器的绝缘电阻时，一般用2500V兆欧表，绝缘良好的变压器，施加以2500伏或更高一些的电压，对绝缘实际上没有影响，远达不到图18-1-12中的A点。但当绝缘存在缺陷时，例如绝缘严重受潮或者局部损坏，情况将不同，可能在较低电压阶段达到图18-1-12中的A点。表18-1-7说明了这种情况。

表18-1-7 试验电压对绝缘电阻的影响

绝缘状态	不同试验电压下的绝缘电阻 ($M\Omega$)		$\frac{R_{2.5}}{R_{20}}$
	2.5kV及以下	20kV	
正 常	500~5000	500~5000	小于 2
有缺陷	400~2000	200~400	2~5
损 坏	10~300	0~20	大于 5，一般为 10~20

注：表中2.5千伏下的绝缘电阻 $R_{2.5}$ 为兆欧表测量数据，20千伏下的绝缘电阻 R_{20} 为用高压整流装置测量数据。

因此，对规定采用2500V兆欧表测绝缘的设备，最好不要采用低一级兆欧表测量。

此处顺便说一下电力变压器做泄漏试验的问题。许多试验单位有过以下经验：对电力变压器，特别是新投入运行的电力变压器，凡是测量泄漏电流能发现的缺陷，用测量绝缘电阻的方法几乎也都能发现。绝缘电阻与泄漏电流本质上是一样的，仅电压高低不同而已。但在有些情况下漏泄试验可能发现绝缘电阻未能发现的缺陷，如一台电力变压器的瓷套管发生裂纹，虽绝缘电阻值仍正常，在升高电压测泄漏电流时发现了缺陷。新颁布的《交接试验标准》增加了测量电力变压器绕组连同套管的泄漏电流的项目，并规定泄漏电流数值与前次比较不应有显著变化。电力变压器在不同温度下的泄漏电流标准也可参考表18-1-8。

表18-1-8 电力变压器泄漏电流参考值

电力变压器 额定电压 (kV)	直流试 验电压 (kV)	在下列温度下的泄漏电流 (μA)						
		10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
>35~220	40	65	100	160	250	400	650	1000
20~35	20	65	100	160	250	400	650	1000
6~15	10	45	70	110	175	300	450	700
3	5	25	40	60	100	150	250	400

测量泄漏电流的接线和试验方法，可参看有关高压电气设备试验涉及电力电缆和避雷器的专著。

(4) 关于使用兆欧表测绕组绝缘电阻的一些问题 兆欧表使用起来简单方便，但要得到准确的测量结果，除去仪表本身应保证一定精确度外，在测量时尚需注意一系列问题。

兆欧表应水平放置，四脚着地，某些兆欧表上附有气泡水准，脚的长短也可调整，很容易达到水平要求。不要把兆欧表放在铁磁物体上使用，除非证明在此情况下读数不受影响。

手摇兆欧表随着转数的增加，其输出电压也上升，当转数达到规定范围时，输出电压即大致达到其额定电压。使用这种摇表，转速不可太慢，以免电压过低，但转速太快也是没有必要的。

接试品前，应先在兆欧表的接线端子短路情况轻轻摇一下，指针应指零，然后去掉短路线，开路下摇一次，指针应指上限 ∞ 处，否则说明兆欧表本身有问题，如内部断线、指针卡涩等。开路试验时，如指针逐渐接近而最终不能达到 ∞ ，常常是内部电阻受潮变质所致，经过干燥可以恢复正常。上述现象也有时是由于外界磁场或电场的影响，特别在刻度的终端，由于转矩较小，即使是蓄留在表玻璃上的静电荷也可能影响它的指示。如果指针同时超过或不到零刻度及 ∞ 刻度，也可能是因指针受到过大冲击已经变弯。

当被试品的电容量较大时，因手摇兆欧表不可能使一转中的每一个角度都具有均匀的速度，在转速高的瞬间兆欧表向试品充电，而转速低的瞬间试品电容蓄集的电荷反过来向兆欧表放电，这就使表针产生周期性的摆动，造成读数困难。遇到这种情况时可以取兆欧表指针摆动的中间点的刻度作为其近似读数。电子管式或电动机驱动的兆欧表可以避免这个缺点，宜用于测量具有大电容的试品。目前有些国产兆欧表，其下限不是零而是5M Ω 或2M Ω ，用以测量大电容试品时因充电时间长，在开始几秒

(甚至几十秒)时间内指针可能还在下限以下,遇此现象,不要误认为绝缘已经损坏,要摇够一分钟再读数。

使用2500伏或更高电压的兆欧表时,最好将高压引线直接接至试品,不要拖在地上或经过其他绝缘不好的支持物,以免漏电影响读数的准确性。

油浸式电力变压器注油后,需静置一段时间方可测量绝缘,以便绕组缝隙中的气泡得以逸出,以及让油充分地浸润绝缘。静置时间随注油方式和容量大小而不同,大、中型电力变压器一般不宜小于12小时。

为使测得的绝缘电阻特别是吸收比准确,测量之前应将电力变压器绕组短路接地进行放电,时间不少于2分钟。经充分放电的试品接上兆欧表而摇把未转动前,其表针静止不动。如果放电不彻底,表针就要向下限方向摆动。测完绝缘之后应再次放电,以免人接触时受到电击。

对于磁套管一类试品,测量前应注意清扫其表面,例如用干净的棉纱蘸酒精擦拭。在潮湿天气,或者套管表面不能擦得很干净的情况下,为防沿表面漏电,可在套管磁裙间加保护环,保护环用柔软的铜绞线做成,并引至兆欧表的屏蔽端子。

测绝缘电阻的记时方法有两种:一种是先接好试品,转动摇把的同时开始记时;一种是先将兆欧表摇至额定转数,然后突然接入试品,同时记时。实践证明两种方式所得结果差别不大,均可使用。此外,读15秒读数时,时间偏差不要大于1秒,因这时绝缘上升得较快,不大的时间偏差也会影响测量结果的准确性。

3. 绕组介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的测定

测量绕组的 $\tan\delta$ 的测定是确定电力变压器绝缘特性的主要方法之一,它的灵敏度很高,易于发现绝缘受潮或者贯通性局部缺陷。运行过的电力变压器如绕组上积有油泥,也会使 $\tan\delta$ 值增大。和测绝缘电阻时一样,当电力变压器中充以已经老化的绝缘油时,会使测得的 $\tan\delta$ 值升高。此外,温度、试验电压等高低不同,也影响测量结果。

电力变压器绕组的 $\tan\delta$ 和温度也是指数关系,所以可用直线表示在半对数坐标纸上,例如图18-1-13所示。式(18-1-6)是 $\tan\delta$ 和温度关系的一般表达式:

$$\tan\delta_2 = \tan\delta_1 K^{\frac{t_2 - t_1}{10}} \quad (18-1-6)$$

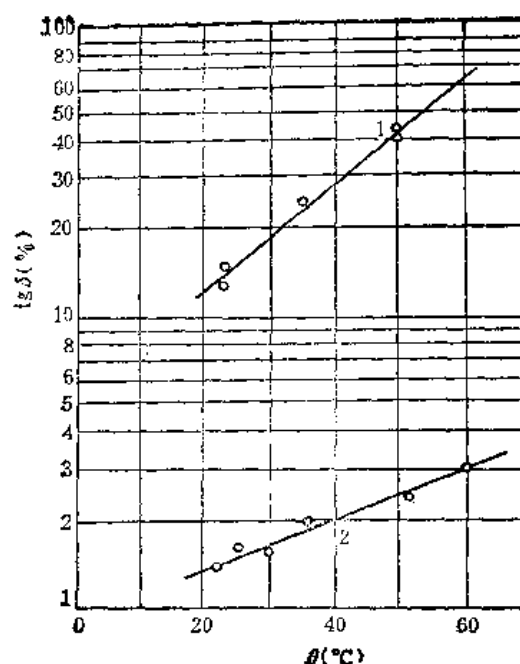


图18-1-13 一台110kV, 15000kVA电力变压器, 在潮湿状态及干燥后, 其低压绕组对高压绕组及外壳的 $\tan\delta$ 与上层油温 θ 的关系
1—潮湿状态 2—干燥后

式(18-1-6)中的 K 与试品所处状态(干燥或潮湿)、绝缘结构和组成绝缘的材料有关,不是一个常数,例如图18-1-13中两条曲线的 K 值分别为1.51(曲线1)和1.21(曲线2),即潮湿绝缘的 $\tan\delta$ 值随温度的变化要大些。

新装电力变压器的 $\tan\delta$ 值,规定按照表18-1-9进行换算,该表18-1-9是根据温度每升高 10°C 时 $\tan\delta$ 大约增加为1.3倍的原则编制的,即相当式(18-1-6)中 $K=1.3$ 。

表18-1-9 新装油浸式电力变压器绕组
 $\tan\delta$ 的温度换算系数

温度差($^\circ\text{C}$)	5	10	15	20	25	30
换算系数	1.15	1.3	1.5	1.7	1.9	2.2
温度差($^\circ\text{C}$)	35	40	45	50	55	60
换算系数	2.5	3.0	3.5	4.0	4.6	5.3

例如制造厂在 32°C 时测得的 $\tan\delta$ 为2.6%,安装试验时的温度为 17°C ,相差 $32 - 17 = 15^\circ\text{C}$,查表18-1-9,温度换算系数为1.5,即制造厂数据换算

到安装试验温度下为 $2.6/1.5=1.73\%$ ，故安装试验时所测 $\tan\delta$ 值应和 1.73% 相比较，不应超过此数值的 130% ，即不应大于 2.25% 。

使用QS1型高压电桥测量电力变压器的介质损失角正切值 $\tan\delta$ ，由于工作电压不高，因而试验电压变化（在 10kV 以内）对测量结果的影响不大。

油浸式电力变压器的 $\tan\delta$ 测量结果实际上包括了两部分的介质损失，即绕组绝缘加绝缘油的损失和套管绝缘的损失，由于这两部分对地电容大小相差悬殊，故两者的 $\tan\delta$ 在综合测量结果中所占的比例也不同。这可从以下的分析中看出来。

我们将介质以等值的电容（ C ）和电阻（ R ）的并联回路表示，如图18-1-14所示，则

$$\tan\delta = \frac{\dot{U}/R}{\dot{U}\omega C} = \frac{1}{\omega CR} \quad (18-1-7)$$

式中 \dot{U} ——电源电压；
 ω ——电源角频率。

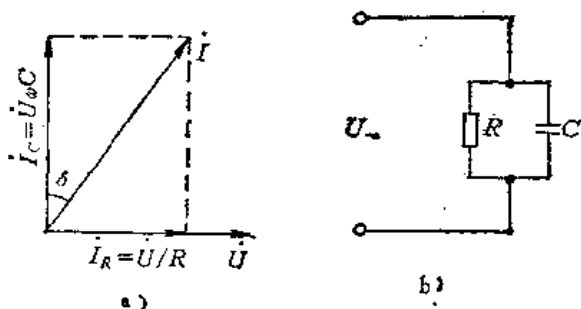


图18-1-14 绝缘介质在交流电压作用下的等值回路和向量图
a) 向量图 b) 等值回路

电力变压器绕组和套管绝缘的等值回路可以用图18-1-15表示，根据式（18-1-7）可导出以下结果：

$$C_X \tan\delta_X = C_Q \tan\delta_Q + C_T \tan\delta_T \quad (18-1-8)$$

式中 $\tan\delta_X$ ——总的介质损失角正切值；
 $\tan\delta_Q$ 和 $\tan\delta_T$ ——绕组和套管的介质损失角正切值；
 C_X ——总的电容， $C_X = C_Q + C_T$ ；
 C_Q 和 C_T ——分别为绕组和套管的电容。

例如一台电力变压器， $C_Q = 17340$ 微微法， $C_T = 46$ 微微法，以之代入式（18-1-8）得

$$17386 \tan\delta_X = 17340 \tan\delta_Q + 46 \tan\delta_T$$

或者写为：

$$\tan\delta_X = \tan\delta_Q + \frac{1}{378} \tan\delta_T$$

可见，综合测量值 $\tan\delta_X$ 主要代表了绕组绝缘和

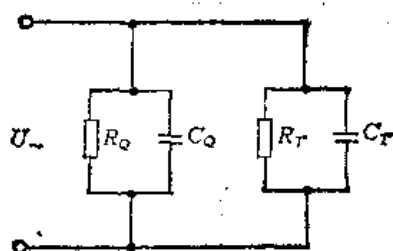


图18-1-15 变压器绝缘的等值回路图

R_Q 、 C_Q —绕组的绝缘电阻及电容

R_T 、 C_T —套管的绝缘电阻及电容

油的介质损失。当套管因受潮而 $\tan\delta$ 增大时，综合测量结果中一般不能明显反映出来。

用西林电桥测量电力变压器的 $\tan\delta$ 时，被试绕组应三相短接，非被试绕组也应三相短接并和油箱一起接地。具体应按表18-1-4进行接线。因电力变压器的油箱都是接地的，故通常采用西林电桥的反接线进行测量。应注意，当绕组有中性点引出线，也应与三相短接。

应特别强调，用西林电桥测电力变压器的介质损失角正切值 $\tan\delta$ 时，如被试绕组或者非被试绕组不进行三相短接，而仅对一相接线或接地时，可能对测量结果带来误差，甚至使电桥不能平衡。引起误差的原因可参看有关串级式电压互感器介质损失角正切值测量部分的分析的专著。

使电桥不能平衡，引起误差的原因可分析如下：

以图18-1-16所示JCC-110型电压互感器二次绕组接地时、一次绕组的对地绝缘等值电路为例。由于这种互感器的结构特点，左面一段一次绕组的对地分布电容 C_g 很小，而绝缘电阻 R_g 很大；右面一段的一次绕组的对地分布电容 C_d 较大而绝缘电阻 R_d 较低。如近似地看，可忽略 C_g 和 R_g 的作用（可看作 C_g 和 R_g 都是断开的）。因此，当A点接电桥的 C_X 端，就好象与试品串接了一个大电感线圈。

先看正常情况下西林电桥各臂的电量关系可参看图18-1-17，该图为假定电桥已经平衡的情况，故检流计G无电流，电流通至 R_3 ，也就是通过试品的电流 I_X ，通过 R_4 和 C_4 的电流之和等于流过标准电容的电流 I_N （图18-1-17 a），由图18-1-17 b可以看出 $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CB}$ ， $\dot{U}_{AD} = \dot{U}_{BD}$ ， $\dot{U}_{CA} + \dot{U}_{AD} = \dot{U}_{CD}$ ； C_N 是无损标准电容，故 I_N 的向量超前 \dot{U}_{CB} 向量的角度是 90° ； R_3 是无感电阻，故 I_X 向量与 \dot{U}_{AD} 平行； I_{R_4} 和 \dot{U}_{CA} 同相， I_{C_4} 超前 \dot{U}_{CA} 的角度也是 90° ，同时，

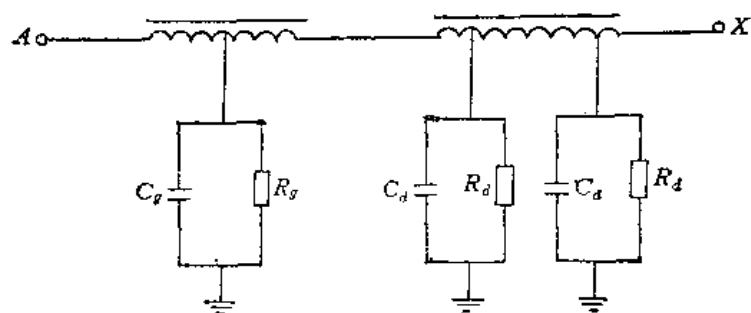
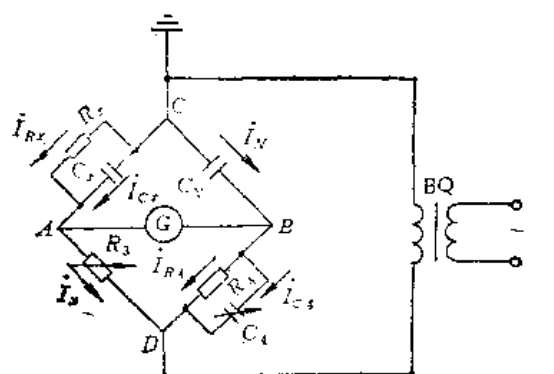


图18-1-16 JCC型电压互感器二次绕组接地时、一次绕组的对地绝缘等值电路

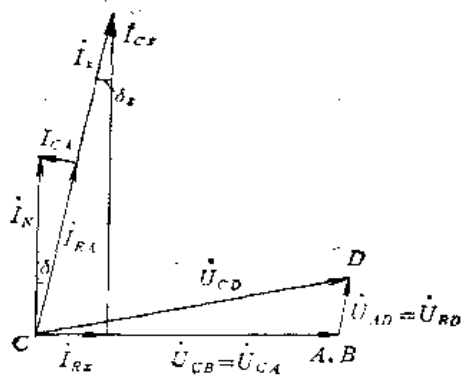
90°。其它关系仍和图18-1-17一样。

由此图不难看出，试品串接电感后，虽然试品本身的介质损失角 δ_x 并无变化，而西林电桥反映出的介质损失角却大为增加，这就是给测量结果带来误差，而使电桥不平衡的原因。

为了分析故障部位，在必要时还应计算出每一绕组单独对地或者绕组之间的 $\lg \delta$ 及电容，以双绕组电力变压器为例，说明如下，参看图18-1-19。



a)



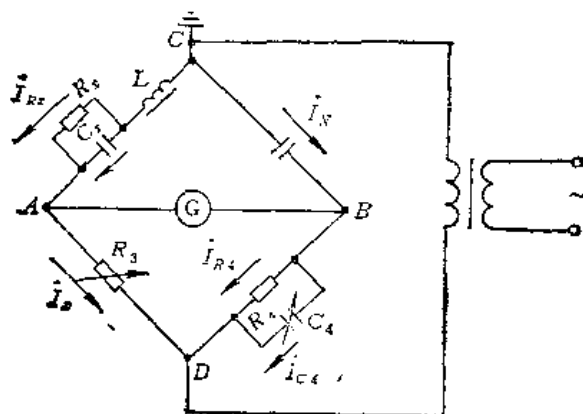
b)

图18-1-17 正常情况下的西林电桥

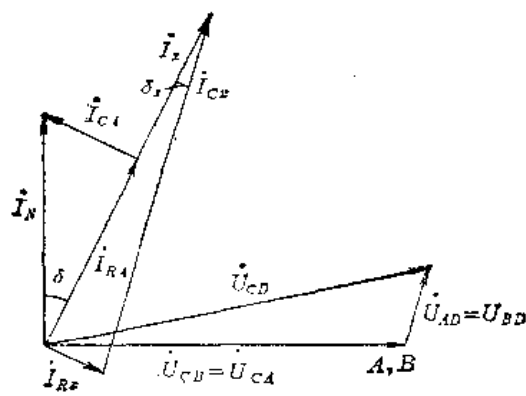
a) 接线图 b) 向量图

$I_{Rx} + I_{Cx} = I_x$ ， I_{R4} 和 \dot{U}_{BD} 平行，也就是和 \dot{U}_{AD} 平行，所以， I_{R4} 和 I_x 落在同一直线上，而 I_{C4} 则领先 \dot{U}_{BD} 90°，此图假设试品是由 C_x 和 R_x 并联组成， I_N 和 I_x 的夹角 δ 就是电桥测得的介质损失角，它和试品本身的介质损失角 δ_x (I_x 与 I_{Cx} 的夹角) 的大小相同。

再看和试品串联电感 L 后的情况，如图18-1-18，由于试品串联了电感，故 I_{Rx} 和 \dot{U}_{CA} 不再同相，而是落后一个角度， I_{Cx} 领先 \dot{U}_{CA} 的角度也不再是



a)



b)

图18-1-18 试品串接电感后的西林电桥

a) 接线图 b) 向量图

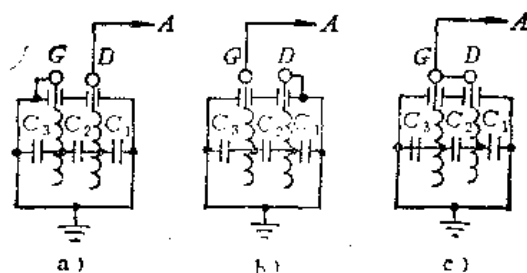


图18-1-19 电力变压器油箱接地时，其绕组的 $\lg \delta$ 和电容的测量

a) $D-G+T$ b) $G-D+T$ c) $G+D-T$
D—低压绕组 G—高压绕组 T—接地的铁芯和油箱 A—接西林电桥的C_x端

由图18-1-19 a 可得

$$\left. \begin{aligned} C_D &= C_1 + C_2 \\ \text{tg} \delta_D &= \frac{C_1 \text{tg} \delta_1 + C_2 \text{tg} \delta_2}{C_D} \end{aligned} \right\} \quad (18-1-9)$$

式中 C_D 、 $\text{tg} \delta_D$ ——高压绕组接地时测得的低压绕组的电容及 $\text{tg} \delta$ ；

C_1 、 C_2 、 $\text{tg} \delta_1$ 、 $\text{tg} \delta_2$ ——是如图所示的绝缘分布电容及相应部分的 $\text{tg} \delta$ 。

由图18-1-19 b 可得

$$\left. \begin{aligned} C_G &= C_2 + C_3 \\ \text{tg} \delta_G &= \frac{C_2 \text{tg} \delta_2 + C_3 \text{tg} \delta_3}{C_G} \end{aligned} \right\} \quad (18-1-10)$$

式中 C_G 、 $\text{tg} \delta_G$ ——低压绕组接地时测得的高压绕组的电容及 $\text{tg} \delta$ 。

由图18-1-19 c 可得

$$\left. \begin{aligned} C_{G+D} &= C_1 + C_3 \\ \text{tg} \delta_{G+D} &= \frac{C_1 \text{tg} \delta_1 + C_3 \text{tg} \delta_3}{C_{G+D}} \end{aligned} \right\} \quad (18-1-11)$$

式中 C_{G+D} 、 $\text{tg} \delta_{G+D}$ ——高压和低压绕组并联后测得的电容和 $\text{tg} \delta$ 。

联解式 (18-1-9)、式 (18-1-10)、式 (18-1-11)，可得

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{C_D - C_G + C_{G+D}}{2} \\ C_2 &= C_D - C_1 \\ C_3 &= C_G - C_2 \end{aligned} \right\} \quad (18-1-12)$$

及

$$\left. \begin{aligned} \text{tg} \delta_1 &= \frac{C_D \text{tg} \delta_D - C_G \text{tg} \delta_G + C_{G+D} \text{tg} \delta_{G+D}}{2C_1} \\ \text{tg} \delta_2 &= \frac{C_D \text{tg} \delta_D - C_1 \text{tg} \delta_1}{C_2} \\ \text{tg} \delta_3 &= \frac{C_G \text{tg} \delta_G - C_2 \text{tg} \delta_2}{C_3} \end{aligned} \right\} \quad (18-1-13)$$

测量介质损失角时所用的试验电压，对额定电压为6kV及以下的绕组取额定电压，对额定电压为10kV及以上的绕组取10kV。

电力变压器干燥过程中，有时需要在未注油情况下测量 $\text{tg} \delta$ ，此时所加试验电压应比上述稍低，对35kV及以上的绕组允许施加10kV；35kV以下的绕组取30%额定电压；3kV以下的绕组，最高试验电压为500V。

关于电力变压器 $\text{tg} \delta$ 测量结果的判断标准，和绝缘电阻类似，主要采用相互比较的方法。新装电

力变压器判断绝缘潮湿程度时，如所测 $\text{tg} \delta$ 值不大于出厂试验值的130%（相同温度下），即认为合格。或者将所测值与表18-1-10比较，不应超过表18-1-10中所列的值。

表18-1-10 新装油浸式电力变压器绕组 $\text{tg} \delta$ 的允许值 (%)

高压绕组电压等级	温 度 (°C)						
	10	20	30	40	50	60	70
35kV及以下	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	11.0
35kV以上	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0

注：同一电力变压器中压和低压绕组的 $\text{tg} \delta$ 标准与高压绕组相同。

如果所测 $\text{tg} \delta$ 值大于厂家试验值的130%，同时也不符合表18-1-10的规定时，应取油样测量绝缘油的 $\text{tg} \delta$ ，油不合格应换油。换油后 $\text{tg} \delta$ 仍不满足要求时，可将电力变压器加热至制造厂出厂试验时的温度，并在该温度下稳定5小时以上，然后重新测量 $\text{tg} \delta$ 。

4. 诊断电力变压器绝缘潮湿程度的电容法

为判断电力变压器绕组绝缘的潮湿程度，以前还曾使用过所谓“电容法”。

电容法是以电力变压器中的不均匀绝缘介质的吸收现象或者层间极化现象为基础的。这种现象在潮湿的绝缘中比较明显。在单一性的介质中，极化过程几乎是瞬时的，而在潮湿的纸绝缘中这个过程是带有一定滞后时间的。

具有一定介质的电容器的电容量可以下式表示：

$$C = C_g \left(1 + \frac{k}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \quad (18-1-14)$$

式中 C_g ——几何电容，可用高频率测出；

k ——常数，决定于介质中导电物质的数量及分布形式；

ω ——交流电的角频率；

τ ——层间极化过程的时间常数，决定于介质性质、半导体物质数量及分布形式。

式 (18-1-14) 说明，当 k 一定时，电容 C 随频率的降低而增大。

当介质温度升高时分子活动比较容易，其中所含杂质的导电性提高，使时间常数 τ 减小。故在某频率下温度升高使介质内部层间极化现象表现得更加完全，因而热态下的电容大于冷态电容。

所以,受潮的电力变压器绝缘介质的电容量决定于频率和温度,而且绝缘愈是潮湿,其电容随频率和温度的变化愈显著。这就是电容法的根据。

工程上采用过的方法,有电容-温度法(测 C_{25}/C_{75} 值)、电容-频率法(测 C_2/C_{50} ,即每秒2周波电容与每秒50周波电容之比)等。

电容法的主要缺点是灵敏度太低,受潮变压器与干燥变压器所测结果的比值, C_{25}/C_{75} 一般在2以内, C_2/C_{50} 也不超过4倍,和绝缘电阻与介质损失角正切值 $\tan \delta$ 测量的灵敏度比较,可能相差一个到二个数量级。此外, C_{25}/C_{75} 的测量还要求变压器加温,也造成不便,因此,判断绝缘潮湿程度的电容法,实际上已经淘汰,目前已很少有人再用此法。所以,关于电容法就不再赘述。

(二) 绝缘的工频交流耐压诊断试验

交流耐压是以模拟电气设备承受过电压的形式,对绝缘作最后一次检验,如果绝缘处于潮湿状态或者存在局部缺陷,就会在试验电压下被击穿。因此应在所有其他绝缘特性试验均已做完,证明绕组绝缘处于良好状态、未发现局部缺陷、绝缘油也合格,然后才对电力变压器进行耐压试验。

交流耐压试验按照图18-1-20进行接线。被试变压器绕组各端短路后引向试验变压器的高压套管端部。非被试绕组也应短路起来和外壳一起可靠接地。此外,当电力变压器采用电容套管时,应将接地端子可靠接地。

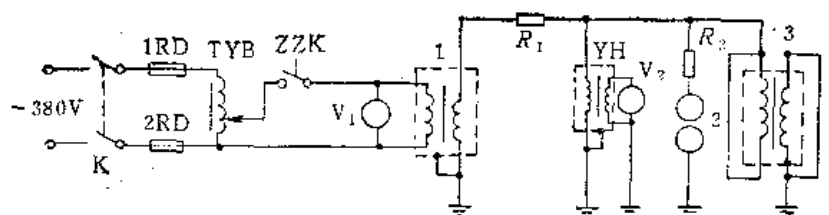


图18-1-20 电力变压器中绝缘的工频耐压试验接线图

1—试验变压器 2—保护球间隙 3—被试电力变压器

电力变压器主绝缘的工频交流耐压试验电压值按表18-1-11,持续时间为1分钟。注意此表适用于充油电力变压器,对于干式变压器其交接试验电压应为出厂试验电压的85%。

在耐压试验过程中,应严密注意试验仪表的指示及电力变压器油箱中的音响等现象。如果未发现油箱中有放电声、放出气体、冒烟,以及仪表指示

表18-1-11 电力变压器的工频试验电压值
(kV)

变压器 额定电压	3	6	10	15	20	35	44	60	110	154	220	330
制造厂 试验电压	18	25	35	45	55	85	95	140	200		400	510
交接试 验电压	15	21	30	38	47	72	81	120	170 (195)	(270)	340	

注:括号中数值适用于中性点非直接接地系统。

没有不正常变化,则认为试验合格。在35~220kV级变压器绕组进行工频交流耐压试验中,如果发现变压器中有个别轻微噼啪声,或者不大的金属撞击声,但未引起试验装置工作状态的变化(例如仪表指示有变动、保护球隙发生放电等现象),并且只在全试验电压下发现,而在复试中又自行消失,则应作为试验合格。上述音响一般是变压器油中存在的气泡在强电场下游离放电所引起,放电后气泡逸走,故复试时上述现象不重复出现。因此,电力变压器注油后一定要静置一段时间再进行绝缘试验。

如果再一次试验时仍有局部放电声,允许在采取措施(例如加热、滤油、摇动器身、再行干燥等)后进行复试,而无需拆开电力变压器。但如再次复试仍发现油箱中有放电现象,试验装置工作状态有变化或有烟放出,则必须吊芯或吊起变压器的钟罩式外壳,仔细检查变压器芯子,消除放电原因后方可再行试验。试验中要特别注意倾听内部放电声音的特征,响亮的金属撞击声多是油隙击穿现象,

电流表突然增大伴随着低沉的放电声,往往是固体绝缘爬电引起,铁芯接地线断开则会引起噼噼叭叭的放电声。

1. 调压方式的选择

调压装置应优先选用自耦调压器。它体积小,电压波形畸变不大。试验容量较大时可采用移圈式调压器,它的优点是无滑动

接触,缺点是漏抗较大,使电压波形发生畸变。不推荐用可变电阻器调压,因为试验变压器激磁电流中的高次谐波在变阻器电阻上的压降,能使试验电压波形畸变,影响试验的准确性。另外,当接近电流谐振时,流过电阻的电流突然减小,电阻上压降也突然减小,使输出电压突然升高。而且电阻调压时的能量损耗也远大于其他调压方式。

施工现场很少使用感应调压器,因它的性能和移圈式调压器相近,而价格较贵。制造部门或科研部门的高压试验室多使用专门的同期发电机作调压设备,其电压波形畸变最小,调压也很方便,只是投资太大。施工现场可能遇到用小型水轮发电机或柴油发电机作调压设备的情况,使用时应注意机组转速调节和励磁调节的稳定性,以及可能发生的自励磁现象。

2. 试验变压器

试验变压器的特点是容量小、电压高,运行中不会受到大气过电压侵袭,因而其绝缘裕度较小,一般出厂试验电压为额定电压的1.1~1.3倍。它的漏抗比同样电压等级的电力变压器要大。

试验变压器并不是按照长期运行设计的,一般允许在额定电压和额定负载下运行半小时,较高电压等级(例如250kV以上)的试验变压器允许持续运行的时间还要短一些。

施工现场常用的试验变压器的性能可参看表18-1-12。

表18-1-12 YDJ型试验变压器技术数据

型 号	额定容量 (kVA)	额定电压 (kV)		损耗 (W)		短路电压 (%)	空载电流 (%)	重量 (kg)
		高压	低压	空载	短路			
YDJ-3/35	3	35	0.20	113	75	3.5	5.0	106
YDJ-100/35	100	35	0.40	240	1800			415
YDJ-200/35	200	35	0.40	1800	3640	5.5	10.6	965
YDJ-5/50	5	50	0.20	110	340	8.0	4.0	110
YDJ-50/50	50	50	0.38	800	700	8.5	15.0	750
YDJ-100/50	100	50	0.40	1000	1620	5.7	7.8	880
YDJ-10/100	10	100	0.20	150	850	10.0	4.0	358
YDJ-25/100	25	100	0.38	1200	330	6.5	16.1	1100
YDJ-50/100	50	100	0.38	800	640	4.4	25.0	480
YDJ-100/100	100	100	0.40	820	2100	8.5	5.8	890
YDJ-25/150	25	150	0.38	750	650	8.0	12.0	1610
YDJ-75/150	75	150	0.22	1150	1645	6.0	11.5	1350
YDJ-100/150	100	150	0.38	1600	2140	8.5	14.8	2690
YDJ-250/250	250	250	0.38	1300	5590	10.45	6.15	2500

注: Y—试验变压器, D—单相, J—油浸自冷式。

用试验变压器进行历时1分钟的耐压试验时,一般可以允许过载50%。有时以电压互感器充作试验变压器,因互感器是按长时工作考虑的,因此过载倍数可以更大些,在1分钟内可以过载200%~300%,而不致使绕组过热。应该注意,当试验变压器过载使用时,电流在漏抗上的压降也以相应的

倍数增大。

3. 试验电压的测量

做耐压诊断试验时,试验变压器的负载实际上是容性负载,与按额定变比计算的电压比较,电容电流在试验变压器漏抗上的压降会使输出电压升高,如图18-1-21所示。如若将其看为带容性负载后试验变压器的变比有所增大,那末,新的变比K就可式(18-1-15)估算出来:

$$K = K_0 \left(1 + \frac{U_0}{U_s} \times \frac{U_K \%}{100} \times \frac{I_C}{I_s} \right) \quad (18-1-15)$$

式中 K_0 ——试验变压器的额定变比;

U_0 ——试验变压器高压侧额定电压;

U_s ——试验电压;

$U_K \%$ ——试验变压器的短路电压(%);

I_C ——在试验电压下流过试品的电容电流;

I_s ——试验变压器高压绕组的额定电流。

例如,使用10kVA、额定电压为100/0.2千伏,额定电流为0.1/50A、短路电压 $U_K \%$ 为10%的YDJ-10/100型试验变压器,对一台110/10.5kV、20000kVA的变压器低压绕组作耐压诊断试验,试验电压为30kV。如测得该被试变压器10.5kV低压绕组对地和对高压绕组的电容为12000pF,则求出 I_C 值后,将已知值代入(18-1-15)式:

$$I_C = \omega C U = 314 \times 12000 \times 10^{-12} \times 30000 = 0.113$$

$$\therefore K = K_0 \left(1 + \frac{100}{30} \times \frac{10}{100} \times \frac{0.113}{0.1} \right) = 1.38 K_0$$

也就是说,相当于试验变压器的变比增加了38%。然而,准确、可靠的办法是在试验变压器高压侧直接测量电压,避免通过公式从低压换算。常用电压互感器和试品并在一起以直接测量电压,如图18-1-20所示。当没有足够高电压的电压互感器时,可采用下列办法:

1) 用接在高压侧的标准球隙,在接上试品时校核低压侧的电压表。升压到不低于80%的试验电压,在此过程中读取点数,作出曲线,并将曲线延伸至试验电压。用球隙测电压时必须进行几次预放电,直到电压稳定后才能读数。在放电电压的40%以前,电压的上升速度可以是任意的,然后按每秒增加3%的放电电压均匀上升,以三次放电电压的平均值作为球隙放电电压,每一读数与平均值之差应小于3%。球隙的构造和一定直径下球隙的放电电

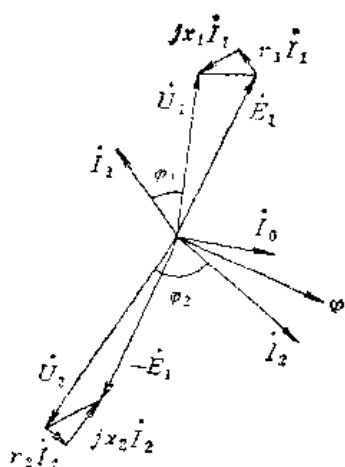


图18-1-21 电力变压器带容性负载时的向量图

压值应符合GB311.1~6—83的规定。

2) 试验现场往往不具备标准球隙, 可用额定电压不低于50%试验电压的电压互感器和静电电压表, 在接上试品时校核低压侧的电压表, 并用标准球隙一样, 作出曲线并延伸至试验电压。应该指出, 有些试验变压器, 除了高压和低压绕组之外, 还有一个绕在同一铁芯上的“测量绕组”, 对大电容试品作耐压试验时, 通过测量绕组测得的电压经换算后, 仍然低于试品所承受的实际电压, 因为测量绕组受初级绕组漏抗压降的影响。

4. 保护设备

为防止试验电压突然升高, 在试验接线时应采用保护球间隙(参看图18-1-20)。球隙的放电电压应整定在试验电压的115%~120%, 还应串接一个电阻 R_2 , 以限制放电电流。 R_2 的阻值按每伏1 Ω 选取。由于大电流会使故障扩大或使试验变压器承受过大的电动力, 为防止试品被击穿, 应在试品回路中串联电阻 R_1 (图18-1-20)。其阻值应按每伏约0.1 Ω 选择, 还应按预计的电容电流大小来估算电阻的容量, 以防其在试验过程中因容量太小而过热或甚至烧断。

5. 升压速度及其他注意事项

耐压试验时, 不得以突然合闸的方式将试验电压加于试品。一般规定, 在试验电压40%以前, 试验电压的上升速度可以任意, 其后的上升速度必须均匀, 每秒约上升3%的试验电压, 升至试验电压并保持规定的时间后, 应在5秒钟内将电压均匀地降至试验电压的25%以下, 然后切断电源。

油浸式电力变压器的耐压诊断试验, 应在注油并静置一段时间后进行, 以免油中气泡在高电压下

游离而引起放电。其静置时间视容量大小和注油方式而定, 一般大、中型电力变压器不宜少于24~36小时, 对真空注油或注油后抽真空者, 静置时间可以略短。

应该说明, 耐压试验虽为重要的诊断试验项目之一, 但新装大、中型的电力变压器极少会发生绝缘击穿现象, 就是小型电力变压器也很少发生, 这是因为, 一方面在变压器检修或制造后, 已在大修厂或电力变压器制造厂进行过出厂耐压试验, 另外, 油浸式电力变压器的主绝缘以变压器油起主要作用, 而绝缘油一般是不容易出问题的。因此, 电压超过35kV级的电力变压器, 当试验设备有困难时, 可以不进行耐压试验。

(三) 绕组直流电阻的测定

测量绕组直流电阻的目的是为了检查绕组的接触部分是否良好, 例如分接开关接触是否可靠、连接螺丝是否拧紧、焊接接头是否有缺陷、多股导线并联的绕组是否有断股等。一般电力变压器的结构都允许倒换分接头时不吊芯或放油, 因此应测量所有分接位置下的直流电阻。对于带负载调压的电力变压器, 须用电动操作来改变分接头的位置, 并应在升压和降压两个方向进行测量。

测量绕组电阻一般可采用电压降法或者电桥法。

以电压降法测直流电阻的接线如图18-1-22。电力变压器绕组的直流电阻数值均甚小, 因此测量时电压表应接在电流引线的内侧, 以免测量结果中计入电流表线圈及接触电阻上的压降。所用表计应不低于0.5级的磁电式电流表和毫伏表, 计算测量结果时应考虑仪表本身的校正值。表计量程选择以表针指到表盘后半部为适宜。应先接通电源、后接通毫伏表, 测完后先断开毫伏表、后切除电源, 以免绕组电感因电流突变而产生的反电动势将毫伏表打坏。当毫伏表内阻较小时, 被测绕组的电阻 R 可

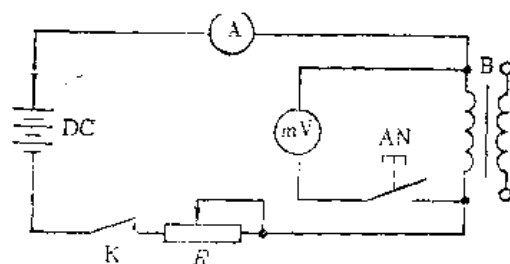


图18-1-22 用电压降法测量变压器绕组的直流电阻

按照式 (18-1-16) 计算,

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} \quad (18-1-16)$$

式中 I —— 电流表读数;
 R_V —— 毫伏表内阻;
 U —— 毫伏表读数。

测量直流电阻时可能遇到的一些问题, 分述如下:

1. 加快测量直流电阻的方法

参加过电力变压器试验工作的同志都知道, 用通常测量直流电阻的方法测量电力变压器的直流电阻时, 由于所通入的直流电流需要一定时间才能稳定, 所以, 常常要花很长时间才能测得一个数据, 此过程对于大型变压器甚至要等十分钟以上。一台双绕组三相变压器, 仅高压侧就要测15个数据, 测一台电力变压器的直流电阻, 要花几个小时。因此, 有必要寻找加快测量直流电阻的方法。

电力变压器绕组既具有电阻 r 又具有电感 L , 可视为等值的 r 、 L 串联回路 (参看图18-1-23)。当加以直流电源时, 回路中的电流为:

$$i = \frac{E}{R+r} \left(1 - e^{-\frac{R+r}{L}t} \right) = I - \Delta i \quad (18-1-17)$$

式中 i —— 电流的瞬时值;
 E —— 电池DC的电压;
 r —— 变压器绕组电阻;
 R —— 附加电阻;
 e —— 自然对数的底;
 L —— 绕组的电感;
 t —— 由合闸到测量的时间;

$I = \frac{E}{R+r}$ —— 电流的稳定分量;

$\Delta i = \frac{E}{R+r} e^{-\frac{R+r}{L}t}$ —— 电流的瞬变分量。

电压表测得的电力变压器绕组上的压降 Δu 是上述电流在 r 和 L 上的压降 Δu_r 和 Δu_L 之和:

$$\begin{aligned} \Delta u &= \Delta u_r + \Delta u_L = ir + L \frac{di}{dt} \\ &= ir + E e^{-\frac{(R+r)}{L}t} \end{aligned} \quad (18-1-18)$$

对于式 (18-1-17), 我们希望电流迅速稳定;
 对于式 (18-1-18), 我们只希望测得 ir 项, 而不希

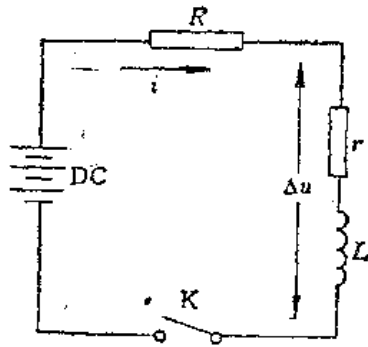


图18-1-23 测量绕组直流电阻的等值电路

望测得 $E e^{-\frac{R+r}{L}t}$ 项, 后者是引起测量误差的原因。显然, $\frac{R+r}{L}t$ 值愈大, 则 $E e^{-\frac{R+r}{L}t}$ 项

愈小, $\frac{L}{R+r}$ 是电路的时间常数, 要想在短时间

内消除 $E e^{-\frac{R+r}{L}t}$ 项的影响可以设法减小 $\frac{L}{R+r}$ 值。减小时间常数可从两方面着手。一是设法减小 L 值, 在通小电流时, 大型电力变压器绕组的电感 L 值是很可观的, 但如通入的电流加大, 例如为空载电流的数倍时, 由于磁通密度的增大, 铁芯磁路高度饱和, 导磁系数 μ 减小, 可使电感 L 值大大降低。具体做法可用直流电焊机作电源, 给电力变压器绕组通入不超过20%额定值的电流, 用压降法进行测量。注意通电时间不宜过长, 以免大电流引起绕组发热, 影响测量准确度。这个方法需要准备一台直流电焊机, 这是不方便的地方。

其次, 增大回路中的附加电阻 R 值, 也可使时间常数减小, 但 R 增大时要求电源电压相应提高, 以便供出必要的测量电流, 而不致影响测量的灵敏度。以一台电力变压器的高压绕组为例, $r = 0.075 \Omega$, $L \approx 30 \text{ H}$ 。计算得知, 当采用1.5 V蓄电池作电源, 串 2.7Ω 附加电阻时, 时间常数 $\frac{L}{R+r}$

$$= \frac{30}{2.7+0.075} = 10.8 \text{ 秒} \quad (\text{通常要经过5个以上时间}$$

常数, 我们才认为电路趋于稳定)。保持同样大小的测量电流, 当电源电压为6 V时, 需串电阻 $R = 11 \Omega$, 此时时间常数约为2.7秒。而采用220 V电源时, 需串电阻 $R = 400 \Omega$, 时间常数减为0.075秒。可见, 串接较大的附加电阻虽然是缩短测量时间的方法之一, 但却要求较高的电源电压。

实际常采用的缩短瞬变过程的方法是“电路突变法”。我们看图18-1-24, 当电路中不串附加电阻时, 充电电流曲线是 i_1 , 串电阻时是 i_2 。当经过很长时间 t_∞ 后, i_2 达到其稳态值 $I_2 = \frac{E}{r+R}$, 经过差不多同样长的时间 i_1 达到其稳态值 $I_1 = \frac{E}{r}$ 。但由图

18-1-24 可以看到, i_1 只需很短时间 t_1 便可达到 I_2 值, 这使我们想到: 如果让充电过程开始沿着 i_1 曲线进行, 当 i_1 达到 I_2 值后, 突然使电路参数转变到适合 i_2 的情况, 这样, 对 i_2 来讲, 瞬变过程马上就可完成, 实践证明这是可行的。我们可按图18-1-25接线, 测量时先合上 K_2 将 R 短接, 再合 K_1 , 接通电路, 待电流增加到预定值后打开 K_2 , 电阻 R 串入电路, 电流便会很快稳定下来。然后再接通电压表测量压降。这样做的结果差不多把瞬变过程的时间由 t_∞ 缩短为 t_1 。当然, 断开 K_2 的时间不一定刚好使 $i_1 = I_2$, 在 i_1 略大于 I_2 断开 K_2 比之在 i_1 略小于 I_2 时断开 K_2 , 瞬变过程结束得更快一些。

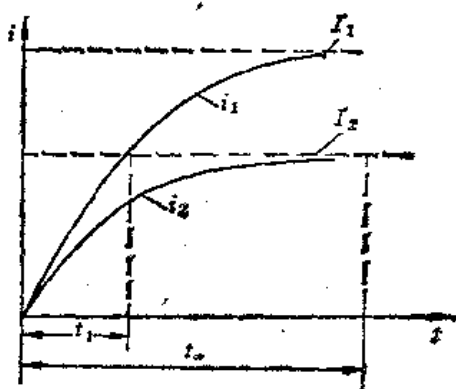


图18-1-24 对应图18-1-23, 当回路中附加电阻不同时充电电流曲线

$$I_1 = \frac{E}{r}, \quad i_1 = \frac{E}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right),$$

$$I_2 = \frac{E}{(r+R)}, \quad i_2 = \frac{E}{r+R} \left[1 - e^{-\frac{(r+R)}{L}t} \right]$$

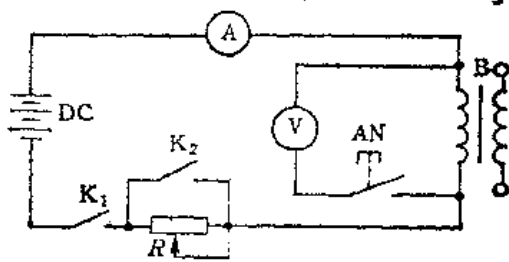


图18-1-25 用电路突变法测量大型电力变压器绕组的直流电阻

此方法中串入电路的附加电阻 R 的数值, 一般取为被测电阻 r 值的 5 倍以上。流过回路的电流 I 可按下式估算:

$$I = \frac{E}{r+R} \quad (18-1-19)$$

式中 E ——电池 DC 的电压。

所选电流表的测限, 应比按式 (18-1-19) 计算的电流约大一倍较为合适。

上述电压降法灵敏度低, 测得的结果不够准确, 而且不能直接读出测量结果, 需经过换算。故此法实际上不常使用。

测量变压器绕组直流电阻通常用电桥法。对于大、中型电力变压器因绕组直流电阻数值较小, 应优先使用双臂电桥。使用双臂电桥时在测量结果中不包括连接电阻和接触电阻。仅在被测绕组电阻大于 1Ω 时才可使用单臂电桥 (惠斯登电桥)。电桥的综合测量误差不应大于 0.5% , 最好使用灵敏度较高的检流计。操作时注意先接通电源, 待电流稳定后再接入检流计; 测量结束, 先断开检流计, 再切断电源, 像前述电压降法中保护毫伏表一样, 来保护电桥的检流计。

使用双臂电桥可按图18-1-26接线。图中的 K_1 系利用电桥本身的电源按钮, R 是滑线电阻, 阻值 $10 \sim 100\Omega$ 者均可。实际测量时, 只要适当调节 R 的大小, 使得接通或断开 K_2 时, 电流表的两个指示值有明显差别, 且较小值接近表盘中部, 一般就能取得满意的效果。

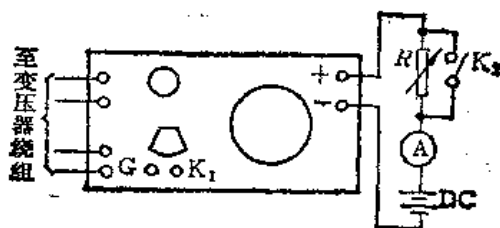


图18-1-26 用双臂电桥以电路突变法测量电力变压器绕组的直流电阻接线示意图

也可利用双臂电桥内部的标准电阻代替外接的附加电阻, 例如 QJ101 型电桥, 其内部标准电阻为被测电阻的 $10 \sim 100$ 倍, 就不需另行外接电阻。

目前还有采用以全电源电压快速充电, 恒流供电测量的“全压—恒流法”来诊断测试电力变压器绕组的直流电阻。此法已取得一定经验。

2. 温度的影响

导线直流电阻会随温度而发生变化, 不同温度

下的直流电阻可按 (18-1-20) 式进行换算:

$$R_2 = R_1 \frac{K + t_2}{K + t_1} \quad (18-1-20)$$

式中 R_2 ——基准工作温度 t_2 °C 时的直流电阻;

R_1 ——冷态温度 t_1 °C 时的直流电阻;

K ——与导线材料有关的常数, 铜材为 $K = 235$, 铝材 $K = 225 \sim 228$ 。

测绕组的直流电阻时, 必须准确测其平均温度。在温度稳定情况下, 可用油温代表电力变压器绕组温度。一般大型电力变压器, 如果其油箱上、下部的温差不超过 3°C, 就可认为其油温是稳定的。

3. 比较标准

在同一分接位置测得各相绕组的直流电阻值, 其相互间的差别不应超过三相绕组直流电阻平均值的 2%。

中性点不引出的 Y 接绕组和内部连接的 Δ 接绕组, 只能测得其“线间电阻” (如 R_{ab} 、 R_{bc} 等), 而不能测其某一相绕组的电阻, 此时相互间差别的比较标准对 Y 接绕组而言应按 1% 考虑, 因 Y 接时每相绕组如有 2% 的偏差, 反映在线电阻上, 大约为 1%。对 Δ 接绕组, 情况较为复杂, 为分析故障方便, 可将“线间电阻”换算为相电阻。不同接法时 A 相电阻按下列二式换算:

$$\text{Y 接法} \quad R_a = \frac{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}{2} \quad (18-1-21)$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{接法} \quad R_a = \frac{1}{2} \left[\frac{4R_{bc}R_{ca}}{R_{bc} + R_{ca} - R_{ab}} \right. \\ \left. - (R_{bc} + R_{ca} - R_{ab}) \right] \end{aligned} \quad (18-1-22)$$

式中 R_a ——A 相绕组的相电阻;

R_{ab} ——从 A 与 B 端子测得的“线间电阻”。

630kVA 以下的小容量电力变压器, 其各相绕组直流电阻差别应小于三相平均值的 4%, 线间差别则不应大于 2%。但实际出厂的电力变压器, 其偏差为 5% 甚至以上, 主要是由于各相引线长短不一。合理的判断方法是将被测三相电阻不平衡情况的百分数与出厂试验的相应百分数加以比较, 规定

其差别不得超过一定标准, 因而要求制造厂有直流电阻的实测数据 (包括各相及分接位置下的数据) 资料提供用户。如无制造厂资料, 就应计算引线长度不同所影响的误差。

4. 分接开关指示器

假如各分接情况下所测直流电阻不按分接位置递增或递减规律, 且三相情况都相同, 则可能是分接开关位置指示器安装不正确所致。对于分相切换分接头位置的大型电力变压器, 这种不规律现象可能只发生在某一相上。

大型电力变压器的分接头位置与分接开关位置可参看图 18-1-27。为叙述方便起见, 假定位置 I 和位置 V 间为 0 位 (此位置并不使用)。

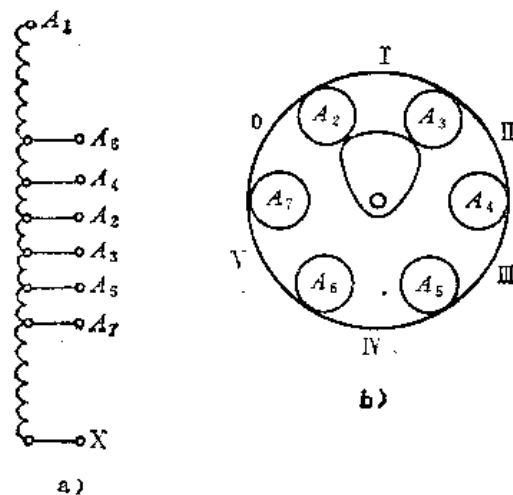


图 18-1-27 电力变压器分接头位置示意图

a) 分接头位置 b) 分接开关位置

设基本绕组 ($A_1 - A_8$) 和 ($A_7 - X$) 的直流电阻为 R , 每一分接部分 ($A_4 - A_8$ 、 $A_3 - A_3$ 等) 的直流电阻为 r 。当分接开关位置正确时, 由 I 至 V 各档的直流电阻应为 $R + 4r$ 、 $R + 3r$ 、 $R + 2r$ 、 $R + r$ 、 R 依次递减。当分接开关实际在第 I 位置, 而指示器却误装在第 I 位置时, 则各档的直流电阻就应该是 $R + 3r$ 、 $R + 2r$ 、 $R + r$ 、 R 、 $R + 2r$, 即已失去递减规律。可能发生的情况将如表 8-1-13 所示。将测量结果与表 18-1-13 比较, 就可判断分接开关指示器应该移向何位置。

表 18-1-13 分接开关实际位置与指示器位置不符可能发生的情况

序号	各分接位置的直流电阻					指示器位置与分接开关实际位置的差别		
	I	II	III	IV	V	指示器位置	分接开关实际位置	指示器应作位移
1	$R + 4r$	$R + 3r$	$R + 2r$	$R + r$	R	I	I	指示器应向后移 1 档
2	$R + 3r$	$R + 2r$	$R + r$	R	$R + 2r$	I	II	指示器应向后移 2 档
3	$R + 2r$	$R + r$	R	$R + 2r$	$R + 4r$	I	III	指示器应向后移 3 档
4	$R + r$	R	$R + 2r$	$R + 4r$	$R + 3r$	I	IV	指示器应向后移 4 档
5	R	$R + 2r$	$R + 4r$	$R + 3r$	$R + 2r$	I	V	指示器应向后移 5 档
6	$R + 2r$	$R + 4r$	$R + 3r$	$R + 2r$	$R + r$	I	0	指示器应向后移 5 档

第2节 电机的故障诊断

由于电机的种类、结构及性能各异,其故障现象和故障诊断方法也就有所不同,本节仅就用途最广的交流三相异步电动机为典型进行介绍。

电机故障诊断一般可分噪声、振动、绝缘劣化、绕组电阻、三相电流不平衡等方面的诊断。适用于电机故障诊断的现代化仪器,如温度、振动及轴承故障等检测仪器,在本篇有关章(第11、12、15、16及19章)节已对它们的性能及检测方法作了介绍,本节就不再重述。

(一) 电机的噪声故障

电机噪声故障的诊断,要根据电机所驱动的设备类型、用途、转速及电机机座尺寸等因素而定。一般用途异步电动机的噪声级允许值可参考表18-2-1。

我国精密机床用小型电机的允许总噪声级,分为7个等级,列于表18-2-2。

表18-2-1 16000kW及以下功率三相异步电机的噪声允许值
(空载和额定转速下测定)

额定功率 (kW)	噪声级允许值(dB)		
	同 步 转 速		
	3000 (r/min)	1500 (r/min)	1000(r/min) 及以下
41~100	85	80	75
101~250	85	85	80
251~630	90	90	85
631~1100	90	90	85
1101~2500	92	92	90
2501~6300	95	95	90
6301~16000	97	97	92

表18-2-2 电机的总噪声级允许等级

代号	SJ-50	SJ-55	SJ-60	SJ-65	SJ-70	SJ-75	SJ-80
总噪声级 (dB)	≤50	≤55	≤60	≤65	≤70	≤75	≤80

电机的噪声源不外乎电磁噪声、机械振动噪声和通风噪声三大类,一般可用以下方法判别其噪声的故障类别:

电磁噪声会随外加电压及负载的升高而增强。

电机起动时,该噪声显著增大,而在电机空转时,噪声会立即消失;机械振动噪声和通风噪声却与外加电压及负载电流无关,而与转速的高低有关。

由定子三相绕组不对称或匝间短路等故障所造成的电磁噪声会导致三相电流的不平衡;由鼠笼转子断条或绕线式转子三相绕组不对称所造成的故障,则会导致定子电流的波动并产生周期性的振动。

电磁噪声与机械振动噪声会时隐时现,通风噪声则相对稳定。

电机如出现以通风噪声为主的噪声,在其进风口和风扇附近的噪声较其它部位要强。

1. 电磁噪声

1) 电机制造不良或维修不当,导致定、转子槽配合选择不当或槽变形,使电机运行时定子产生周期性电磁振动噪声,这是由于定、转子齿谐波相互作用而产生定、转子之间的径向交变磁拉力所致。

如定子齿谐波次数 $(v_1 = \frac{z_1}{p} \pm 1, z_1 \text{ 为定子槽数, } p \text{ 为极对数})$ 与转子齿谐波次数 $(v_2 = \frac{z_2}{p} \pm 1, z_2 \text{ 为转子槽数})$ 的差值为 ± 1 、 ± 2 、 ± 3 ,或机座

及定子铁芯的固有振荡频率接近交变磁拉力的频率而发生共振时,电磁噪声会显著增大;如绕组节距选择不当、转子槽斜度不够,电磁噪声也会提高,噪声频率为电机转速的倍频,其倍数与铁心的齿槽数或极数相等,如电机转速为50 r/s (3000 r/min)、槽配合为24/20,则电磁噪声为1200/1000Hz,一般最刺耳的噪声为700~4000Hz,因而该种电磁噪声成为电机噪声中最刺耳的成分。

2) 鼠笼转子断条、绕线转子匝间短路、转子偏心或气隙严重不均,会引起两倍转差频率的差频噪声,两极电机尤为显著。

3) 定子绕组不对称或匝间短路而使气隙中的磁通分布不均,产生两倍电源频率的噪声。

4) 铸铝转子铁芯在制造时,其闭口槽的槽口如车削不均(一端车去而破口,另一端未车去而无破口),会引起时隐时现、时起时伏的电磁噪声。

5) 铁芯叠压不紧、齿压板松动,会引起“兹兹”的刮削噪声。

6) 机座刚性较好的电机、磁轭较高的电机,其电磁噪声较小;带底座的电机较无底座只带凸缘

的电机噪声要小；铸铁结构电机较钢板焊接结构的电机噪声为小。

2. 机械振动噪声

1) 电机转子不平衡、机组安装配合不良，会产生与转子旋转频率 ($n/60\text{Hz}$, n 为电机每分钟的转速) 相同的低频机械振动噪声。由于转子失去平衡、电磁振动以及轴承振动等的影响，会使电机产生 $300\sim 900\text{Hz}$ 的共振机械噪声。这种噪声常在 3~5 号机座、4 极以下、封闭式电机中出现，可通过适当增加外风扇风罩的厚度、加强机壳的加强筋或缩短机壳长度等方法，以改变其固有振动频率来消除。

2) 电机个别零部件未紧固 (如挡风板松动)、零部件配合不好 (如大型电机的轴瓦与轴承座之间的间隙过大等)，导致电机运行中受振并相互撞击而产生机械振动噪声。

3) 电机的滚动轴承故障 (如轴承滚动体的几何精度降低和内外圈滚道表面波纹度大，而使滚动体撞击轴承内外圈滚道，滚动体旋转不稳而产生交变力作用于转轴和轴承腔室) 导致产生的机械振动噪声。正常的轴承噪声频率较高 (一般为 $1500\sim 5000\text{Hz}$)，偶而会出现 1000Hz 、大于 5000Hz 甚至 10kHz 的噪音。当电机轴承装配不良时，会出现 200Hz 左右的嗡嗡噪声。轴承内圈与转轴的配合过盈、轴承外圈与腔室的配合过盈，有可能导致转轴两端轴承的同轴度误差增大，使轴承转动不灵，噪声会因而增大。

4) 绕线式异步电动机的转子电刷材质太硬、刷压过高以及集电环表面不光滑等，会引起电刷产生频率较高的摩擦声；电刷与集电环的火花放电声；电刷与刷盒间隙过大或集电环偏心会引起电刷跳动的噪声。这些噪声都会加大电机的噪声。当电刷举起时，这些噪声会立即消失。

(二) 电机的温升故障

电机在额定情况下运行时，各部件的实际温升不允许超过一定的标准。当电机出现超过标准的温升情况时，即视为故障征兆。温升标准是根据电机绕组设计和制造时所采用的绝缘等级而定。电机的绕组、轴承及其它部件，只有在低于最高容许的工作温度下运行，才能保证不超过温升标准，才能确保有经济使用寿命^①和运行可靠性。根据我国的电机制造标准，在正常使用条件下 (冷却介质温度低

于 40°C ，海拔高度不超过 1000m)，电机的容许温升标准列于表 18-2-3 所示。

表 18-2-3 我国电机制造所规定的温升标准

绝缘等级	最高允许工作温度 (绕组最热处温度) ($^\circ\text{C}$)	容许温升 ($^\circ\text{C}$)		
		热偶测定法	电阻法或埋入式温度计法	温度计法
A	105		60	50
E	120		75	65
B	130		80	70
F	155		100	85
H	180		125	105
C	180 以上			

注：以上容许温升是根据环境温度为 40°C 时定出。

世界各国的电机制造业对电机绕组绝缘的容许温升等级都有相应的标准规定，例如美国的电机设计标准规定，所采用的绝缘等级允许温升应符合 ANSI (美国国家标准协会)、IEEE (电气及电子工程师协会) 及 NEMA (全国电气制造商协会) 标准，其绕组的绝缘可分为 O、A、B、F 及 H 级，最高容许温度分别为 90 、 105 、 130 、 155 及 180°C 。O 级绝缘很少使用，只限于小型电机，A 级绝缘广泛用于小型 (特别用于分马力) 电机，B 级绝缘在 NEMA 标准中规定用于额定功率为 $1\sim 200$ 马力的交流多相异步电动机，F 级绝缘用在较 B 级绝缘要求高的电机上，H 级绝缘则用于特殊 (装在 $50\sim 65^\circ\text{C}$ 室温中的专用设备上) 的电机上，其容许温升见表 18-2-4。

表 18-2-4 中的容许温升是根据环境温度为 40°C 时定出，在电机实际运行中，一般环境温度为 $10\sim 30^\circ\text{C}$ 范围内，而且不会或很少在满负荷情况下运转，因此绝缘寿命会相应提高，一般每减少 10°C 的使用温度，可使电机绝缘的热寿命增加一倍。表 18-2-4 中所载的电阻法是测定绕组温升公认的标准方法， 1000kW 及以下功率的交流电机几乎全都用电阻法来测定温升。

① 经济使用寿命是根据国民经济发展需要、配套设备更新期限、电机制造及大修成本进行综合核算并参考实际使用寿命的统计资料所确定的产品使用期限。一般电机在正常运行条件下，使用期限为 $10\sim 20$ 年。

表18-2-4 美国电机绝缘等级及容许温升

绝缘等级	最热点 温度 (°C)	容许温升 (°C)			
		用热偶 计 法	用电阻法或嵌入式测温计法		
			TEFC①	在1.15SF 时最大②	TENV③
Q	90	35	45		
A	105	50	60	70	65
B	130	70	80	90	85
F	155	105	105	115	110
H	180	130	125		135

- ① TEFC为Totally Enclosed, fan Cooled的缩写, 意为全封闭风冷式电机。
 ② SF为Safety factor的缩写, 意为安全系数。
 ③ TENV为Totally Enclosed, Non-Ventilating的缩写, 意为全封闭非风冷式电机。

假定在电机温升试验结束时测得绕组的热态电阻为 R_t , 则可按(18-2-1)式计算绕组的平均温升:

$$Q = \left[\frac{R_t - R_l}{R_l} (K + t_1) + t_1 - t_2 \right] (°C) \quad (18-2-1)$$

式中 Q ——电机绕组的平均温升 (°C);

R_t ——绕组的热态电阻 (Ω);

R_l ——绕组的冷态电阻 (Ω);

K ——与绕组导线材料有关的常数, 铜线取235, 铝线取228;

t_1 ——绕组冷态时的温度 (°C);

t_2 ——绕组热态时用温度计测得的绕组表面温度 (°C)。

电机由冷态开始运转, 升温时间较长, 一般小型、高速、封闭式电机的升温时间至少要1.5~3小时; 大型、低速、防护式电机的升温时间则要5小时及以上。电机温升状态是否稳定, 一般可根据电机的铁芯温度来判断, 如电机各部温度的变化, 在一小时时间内不超过1°C, 就可认为温升已经稳定。

电机绕组的温升过高, 其寿命会相应缩短甚至烧毁。例如, A级绝缘绕组最热点的工作温度每超过允许值8°C、E及B级绝缘每超10°C、H级绝缘每超12°C, 其热老化寿命就缩短一半。

电机各部件的允许温升可参看表18-2-5。

表18-2-5 电机各部件容许的温升限度 (温度计法测温)

电机绝缘 等级	容 许 温 升 (°C)			
	与绕组接触的铁芯 及其它部件	不与绕组接触的铁芯 (如鼠笼转子铁芯) 及其它部件	集电环	轴 承
A	60	不应使任何邻近的 绝缘或其它材料超过 容许温升	60	滚动轴承: 95 滑动轴承: 80
E	75		70	
B	80		80	
F	100		90	
H	125		100	
超过容许温 升时会出现的 后果			加速绝缘老 化和电刷磨损	滚动轴承: 润滑油变质、硬化、分解熔化 而严重漏油, 轴承因干摩擦而损坏 滑动轴承: 加速润滑油氧化变质、粘度降 低、油膜不稳定, 引起轴瓦巴氏合金与转轴 干摩擦而熔化

(三) 定子绕组三相电流不平衡的故障诊断

异步电机三相的空载电流不平衡时, 一般是由于定子三相绕组不对称、气隙严重不均匀或磁路不对称所致。为诊断定子三相电流不平衡的原因, 首先应检查绕组的接线: 即检查各相绕组的首、尾端是否接错; 各线圈或相组的极性是否接反; 每极每相槽数是否相等或按一定规律分组 (对不均匀分组

的绕组而言); 线圈有否漏接、断线或有焊接不良处; 一相绕组错接至另一相等情况。然后检查绕组有无相间短路或对地绝缘击穿现象, 可参看本节的(四)中所述。

如定子(或转子)绕组内部接线包扎良好, 那末, 三相绕组引线标记的正确与否, 可用下列方法检查:

1. 绕组引线标记的检查

对三相绕组有9根引线的电机, 其引线标记可

通过检查绕组连接线的办法来确定。

对已经组装,且三相绕组有6根引线的电机,则引线标记可用下述方法检查。但在检查前,要用万用表或兆欧计分清每相绕组的两根线:

(1) 直流法 将一相绕组接至磁电式毫伏计(零点在中央)、另相绕组接1.5V或以上电压的直流电源。当合上电源的瞬间,毫伏计指针若向正向偏转,则电源正极所接引线与毫伏计负极所接引线的极性相同(同为始端或末端);断开电源的瞬间则与所述现象相反。第三相绕组的标记按同法确定。

(2) 交流法 一相绕组接低压交流电源(一般是1/3的额定电压),另两相绕组任意串联接电压表,若不同极性的两根引线接在一起,则电压读数为零。反之,则电压很高,在转子绕组开路时,将接近电源电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

2. 绕组接线的检查

某相绕组内部个别极相组或线圈是否接反,其检查方法是:可将低压直流电源(其电流大小只要能指南针产生偏转即可)通入某相绕组,用指南针沿定子铁心(指转子已抽出情况而言)槽逐槽检查。如在每个极相组上指南针的指向依次改变,其改变次数等于该电机的极数,则表示接线正确,否则接线错误。

如在同一极相组的邻近几槽,指南针的指向变化不定,则说明该极相组有个别线圈嵌反。

如通过上述检查,电机的绕组接线正确、又无短路现象,则三相电流不平衡就可能是由于各相绕组串联的总匝数不等所致,属于电机制造或修理质量问题。此时可将三相绕组首尾串联后,测量分段压降:先测每相电压是否相等;接着测有问题一相的各相组电压是否相等;最后测有问题相组的各线圈电压是否相等,即可找到匝数有错误的线圈。

(四) 电机绝缘的故障诊断

电机的绝缘诊断可迅速判别绕组绝缘是否严重受潮或是否有严重故障及劣化趋向。

1. 电机绕组绝缘的介电强度

(1) 绝缘电阻 在电机的热状态下,绕组对机壳及其相互间的绝缘电阻,不应低于下式的计算值:

$$R_t = \frac{U_n}{1000 + 0.01P_n} \quad (\text{M}\Omega) \quad (18-2-2)$$

式中 P_n ——电机的额定功率(kW);

U_n ——绕组的额定电压(V)。

(2) 对地及相间耐压 绕组的对地及相间绝缘,应能承受数值为 $2U_n + 1000\text{V}$ (1kW以下和10000kW以上的电机例外,频率为50Hz的正弦波交流电压作用历时1分钟,而不被击穿)。

(3) 匝间耐压 电机在空载情况下应能承受1.3倍额定电压作用历时5分钟,匝间绝缘不损坏。

2. 电机绝缘的诊断方法

电机绝缘诊断最常用的方法是绝缘电阻的测定,其方法如下:

1) 测定其绝缘电阻应在电机运转以前用1.0级或1.5级手摇式兆欧计进行。额定电压低于500V的电机,宜用500V兆欧计测定;额定电压在500V以上及3000V以下的电机,要用1000V兆欧计测量;而额定电压为3000V及以上的电机,则要用2500V的兆欧计测定。绝缘电阻值是指施加在电机绕组上的直流电压与指定时间内流过绝缘的总电流之商。在测量过程中,流过绝缘的泄漏电流始终不变,但绝缘中的充电电流和吸收电流,即随时间的延续而衰减,因而绝缘电阻值不断增加,开始时增加迅速,而后渐趋稳定。中小型电机一般在30秒后可达最终值,而干燥、良好的绝缘及分布电容较大的大型电机,其绝缘电阻要数分钟才能趋于稳定。此时,以外施电压一分钟时的绝缘电阻(R_{60})为准。

2) 在诊断测定绝缘电阻的过程中,兆欧计的转速要保持基本恒定(即 $120\text{r/min} \pm 20\%$),以免测量电压波动而引起电机绝缘的充放电而导致兆欧计指针的摆动;测电容较大的电机时,在读数后,应将兆欧计的转速逐渐降低,以免电机在测定过程中所储存的电荷向兆欧计迅速放电而使其指针受到冲击。测定大、中型电机的绝缘电阻后应进行放电(可将绕组与机壳短接),以免人体触及时受到电击。如需重复测量,则放电时间应不低于测量时间,否则会在第二次测量时受残留电荷的影响,而使充电电流减小,并使所测绝缘电阻值 R_{60} 偏高。

3. 冷态绝缘电阻的容许值

一般规定为:500V以下的电机定子及所有绕组式转子绕组不得低于 $1\text{M}\Omega$;500V以上高压电机定子的绝缘电阻应不低于 $(U_n + 1)\text{M}\Omega$, U_n 为以

千伏计的额定电压。

(五) 电机绕组直流电阻的测定

测定绕组冷态与热态下的电阻值，可用以诊断绕组焊接处是否良好并可计算出绕组的平均温升（参阅18-2-1式）。异步电机绕组的直流电阻值可参阅表18-2-6。

表18-2-6 三相异步电动机绕组的直流电阻范围

电动机功率 (kW)	绕组直流电阻值 (Ω)	
	低压电动机	高压电动机
10以下	1~10	—
10~100	0.05~1	—
101~1000	0.001~0.1	0.1~0.5

1. 绕组直流电阻的测量方法

1) 绕组直流电阻的测量误差应该 $\leq \pm 0.5\%$ ，如用电桥测量，其准确度等级不应低于0.5级，读数的有效数应在三位以上。单臂电桥的读数还应减去引线的电阻值。

2) 用压降法测直流电阻时，要用0.2级的电流表和毫伏计。毫伏计的内阻 R_n 如大于被测电阻500倍以上时，则被测电阻应按(18-2-3)式计算。

$$R = \frac{U}{1 - \frac{U}{R_n}} \quad (18-2-3)$$

式中 R ——被测绕组的直流电阻值 (Ω)；

U ——量得的毫伏计指示电压 (V)；

R_n ——毫伏计的内阻 (Ω)。

测量电流不得超过被测绕组额定电流的10%，测量时间应 ≤ 1 分钟，以免绕组发热而使电阻值增大，最好在两种不同的测量电流下测阻值两次，每次测得值与平均值之差，不要超过平均值的 $\pm 0.5\%$ 。绕组的直流电阻应直接在电机出线端上测量。绕线式异步电动机的转子绕组的电阻，应尽可能在绕组与集电环的连接螺钉上测量，而不得通过电刷在转子引线板上测量。

3) 三相绕组如果都有始末引线引出，最好在出线端分相测量绕组的直流电阻。三相绕组若在电机内接成星形或角形，就只能测绕组的线电阻 (R_{ab} 、 R_{bc} 及 R_{ca})，而相电阻 R_a 、 R_b 及 R_c 就只能由线电阻来换算：

① 三相绕组接成星形 (图18-2-1)

$$R_a = \frac{1}{2}(R_{cb} - R_{bc} + R_{ca}) \quad (18-2-4)$$

$$R_b = \frac{1}{2}(R_{bc} - R_{ca} + R_{ab}) \quad (18-2-5)$$

$$R_c = \frac{1}{2}(R_{ca} - R_{ab} + R_{bc}) \quad (18-2-6)$$

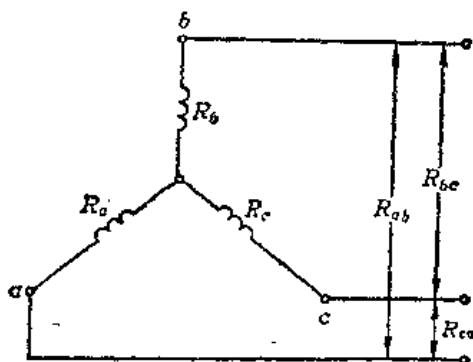


图18-2-1 星形接法的三相绕组

② 三相绕组接成三角形 (图18-2-2)

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_p - R_{bc}} + R_{ba} - R_p \quad (18-2-7)$$

$$R_b = \frac{R_{bc}R_{ab}}{R_p - R_{ca}} + R_{ca} - R_p \quad (18-2-8)$$

$$R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{R_p - R_{ab}} + R_{ab} - R_p \quad (18-2-9)$$

$$\text{式中 } R_p = \frac{1}{2}(R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}) \quad (18-2-10)$$

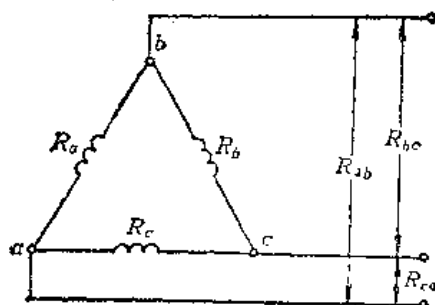


图18-2-2 三角形接法的三相绕组

如三相电阻都平衡，设线间电阻都为 R ，则，星形连接，

$$R_a = R_b = R_c = \frac{1}{2}R \quad (18-2-11)$$

三角形连接，

$$R_a = R_b = R_c = 1.5R \quad (18-2-12)$$

4) 测出三相绕组的直流电阻平均值后，如将其换算到基准工作温度（国际上统一规定用作计算

电机铜耗和转矩的温度; A、E、B级绝缘为75℃, F、H级绝缘为115℃, 电机在运行中, 其基准工作温度接近电机的平均工作温度), 就可计算电机的铜耗。基准工作温度下的直流电阻换算公式可参看(18-1-20)式。

2. 故障分析

测出电机三相绕组的直流电阻后, 如有故障, 即可分析出造成故障的原因:

1) 如星形连接的电机绕组有一相断线, 则非断线相的两线线间电阻正常, 而断线相与另两线间的线间电阻必定是无穷大。

2) 三角形连接的电机绕组有一相断线, 则有断线一相的线间电阻为正常值的3倍, 另两相的线间电阻为正常值的1.5倍。

3) 电机在额定电压下, 空载运行, 如三相线电流不平衡, 此时三相电压相等, 且改换相序后, 三相空载电流仍然不平衡时, 则表明电机某相有匝间短路现象。一般低压电机匝间短路情况较少, 而高压电机匝间短路故障却较为常见, 且大都发生在鼻端、引线端或端部弯角处。表18-2-7示出100kW以下三相异步电动机空载电流占额定电流的百分数。

表18-2-7 100kW以下三相异步电动机
空载电流与额定电流的百分数

极数	容量 (kW)						
		0.125 以下	0.5 以下	2 以下	10 以下	50 以下	100 以下
2		70~95	45~70	40~55	30~45	23~35	18~30
4		80~96	65~85	45~60	35~55	25~46	20~30
6		85~98	70~90	50~65	35~55	30~45	22~33
8		90~98	75~90	50~70	37~76	35~50	25~35

注: 表中空载电流系三相平均值。

(六) 电机的振动诊断

检查振动的目的是为了考核电机装配质量、转子平衡质量和轴承装配质量。

1. 振动测试前的检查

1) 检查振动之前, 应把电机按电动机振动测定方法进行安装, 因为在检查电机振动过程中, 经常发现电机振动原因是电机安装不当引起的。

2) 在检查振动之前, 还应测量电机轴伸的径向偏摆, 其允许值见表18-2-8规定。

表18-2-8 电机轴伸的径向偏摆
值最大允许偏差

轴伸公称直径 (mm)	最大允许偏摆 (mm)
10~18	0.03
18~30	0.04
30~50	0.05
50~80	0.06
90~110	0.08

3) 同时还要检查定转子间气隙不均匀度。气隙平均值, 应由测定相互间隔120°的三点位置的气隙值进行计算, 对于大型电机, 应测量四点后, 计算出平均值。电机定转子间气隙不均匀度允许值见表18-2-9中规定。

不均匀度 =

$$\frac{\text{最大或最小气隙值} - \text{平均气隙值}}{\text{平均气隙值}} \times 100\%$$

(18-2-13)

表18-2-9 气隙不均匀度允许值

公称气隙 (mm)	不均匀度
0.2~0.5	±25%
0.5~0.75	±20%
0.75~1.0	±18%
1.0~1.3	±15%
>1.4	±10%

4) 对于滑动轴承的电机, 还要检查滑动轴承上电机轴伸窜动间隙, 其允许值见表18-2-10中规定。

表18-2-10 电机轴伸窜动间隙允许值

电机容量 (kW)	轴向移动量	
	向一侧 (mm)	向两侧 (mm)
10 以下	0.5	1.0
10~20	0.75	1.5
30~70	1.0	2.0
70~125	1.5	3.0
125 以上	2.0	4.0
轴颈直径大于 200mm	轴颈直径的 2%	

2. 振动测试及其限值

电机振动大小与外施电压和电机转速大小有关, 所以应在额定电压和额定转速下进行。

检查电机振动的工具通常是用一根细长金属棒制做的听棒。为了测出振动值大小, 需用测振仪。

现场常用的测振装置是便携式示振仪或电子测振仪（详见本篇第19章）。

对于中心高45mm~630mm、转速自600~3000 r/min的单台电动机，在空载时的振动限值应符合表18-2-11的要求。

表18-2-11 单台电动机空载时
振动限值表

安装方式	弹性				刚性			
轴中心线高度 (mm)	45~132		>132~225		>225~400		>400~630	
转速 (r/min)	600 ~ 1800	>1800 ~ 3600	600 ~ 1800	>1800 ~ 3600	600 ~ 1800	>1800 ~ 3600	600 ~ 1800	>1800 ~ 3600
振动等级	振动速度有效值 (mm/s)							
N	1.8		2.8		4.5		2.8	
R	0.71	1.12	1.12	1.8	1.8	2.8	1.12	1.8
S	0.45	0.71	0.71	1.12	1.12	1.8	0.71	1.12

注：表中N为普通级，如无其它规定，电机振动应符合N级要求；R为一级；S为优等级。

电机在额定电压下空载运转时，振动振幅不得超过表18-2-12规定的数值，表18-2-13的数据可供参考。

表18-2-12 电机的允许振动振幅

同步转速 (r/min)	3000	1500	1000	750及以下
双倍振幅 (mm)	0.06	0.10	0.13	0.16

表18-2-13 评价电机运转平稳性的数据

同步转速 (r/min)	双倍振幅 (mm)			
	优良	良好	容许	需修理
3000	0.01	0.025	0.06	0.07
1500	0.03	0.07	0.10	0.16
1000	0.055	0.10	0.13	0.22
750及以下	0.07	0.12	0.16	0.25

第3节 微电子控制设备的故障诊断

用微型计算机、微电子进给系统或可编程序控制器控制的机床或设备，一般都设置有各种故障诊

断或检测程序。由于可以及时从完善的故障诊断程序查出故障类型和发生故障的部位，因而可以立即采取相应的措施，将故障防范于未然或防止故障的扩大，避免被加工工件的报废，避免计算机辅助设计或管理软件的破坏。即使故障已经发生，也可及时排除故障，以减少停机台时。

故障诊断程序既可包含在微机系统程序中，以便在系统运行过程中进行检查和诊断，也可作为独立的服务性程序，在系统运行前或故障停机后进行诊断，以便迅速查找故障的部位。

微机系统的核心是中央处理单元（CPU），也就是所谓的微处理器主芯片。微处理器的故障主要表现在它的指令译码和各种控制功能模块的故障、数据操作功能模块的故障、数据存取功能模块的故障以及数据传输功能模块的故障上。

首先分析一下指令译码和各种控制功能模块的故障。该模块的故障主要表现为指令寄存器、指令译码器和各控制逻辑单元的故障；微处理器指令系统中任一指令不能正确执行的故障错误都会在它的数据单元（各寄存器、累加器、状态标志寄存器等）、地址单元（程序计数器、堆栈指示器等）和各外部控制信号单元中表现出来。因为任何一条指令都是由一组特定的指令流程（微处理器的操作顺序）所构成，当指令流程有变化时（例如执行顺序、时间发生了变化），该指令就不能正确执行。因此，可以在微处理器执行指令1后，通过检查各寄存器对累加器、状态标志寄存器的内容以及各外部控制信号是否存在误动作的变化是否正确，来判断指令译码以及各控制功能单元等是否发生相应的功能故障。例如，当检测LDB, A指令时，一方面要检查寄存器B中的内容是否正确，另一方面还要检查堆栈指针SP、程序计数器PC、各寄存器对BC、DE、HL、状态标志寄存器F和累加器A的内容是否正确，才能知道微处理器是否正确执行LDB, A指令。当然，要达到检测故障的目的，一定要将测试码设置得非常合理，使其具有检测相应的功能故障的作用。例如，检测LDB, A指令的测试程序段为：

```
LD SP, STAC; 设置堆栈首址
LD BC, 0306H; 设置寄存器对测试码
LD DE, 0C18H; 设置寄存器对测试码
LD HL, 3060H; 设置寄存器对测试码
LD A, 0C0H; 设置累加器测试码
```

```
LD B, A      , 执行LD B, A指令
PUSH AF      ;
PUSH BC      ;
PUSH DE      ;
PUSH HL      ;
```

其次分析数据操作功能故障。数据操作功能模块的故障,主要表现在逻辑运算单元的故障、产生各状态标志相应电路的故障以及加1器/减1器的故障等。由于各数据操作单元都是以组合逻辑电路的形式来实现,因此,该模块的故障诊断可以根据各数据操作单元具体线路的特点,采用目前比较成熟的组合逻辑电路测试方法(如通路敏化法、反向路径敏化法和布尔差分法等方法)来进行故障检测

```
11 00 11 00 11 00 11 00
```

一般而言,数据传输单元的线路相对来说比较简单,主要包括各数据传输线、地址传输线上存在的各种故障,可以用通路敏化法来诊断该模块的故障现象。还可设置一些测试码,编制在整个测试诊断测试程序中用来诊断相邻传输线路中存在的数码相互干扰等故障。

(一) 故障测试诊断程序的编制

故障诊断程序的编制,应采用逐步深入、逐步扩展测试范围的方法,以进一步提高故障诊断程序的定位查找能力。

1) 采用最少指令复盖法。用复盖器处理器所

```

LD B, 00H ; 循环次数256
LD C, 00H ; 运算数从0开始
LOOP1: LD A, 0CH ; 诊断加法指令
LD E, 0CH ; (C + C) - 2C = 0?
ADD A, 0CH ;
SLA C ;
SUB C ;
JR NZ, ERROR ; 否, 则出错
LD A, 0CH ; 诊断减法指令
SUB E, ; 2C - C - C = 0?
SUB E, ;
JR NZ, ERROR ; 否, 则出错;
SRL C ; 恢复C
INC C ; 运算数加1
DJ NZ, LOOP1 ; 若未诊断完256个数, 则继续
LD D, 00H ; 运算数从0开始
LOOP2: LD A, 0DH ; 诊断与运算指令
AND D ; D ∧ D = D?
CP D ;
JR NZ, ERROR ; 否, 则出错
CPL ;  $\bar{D} \wedge D = 0$ ?
AND D ;
JR NZ, ERROR ; 否, 则出错
LD A, 0DH ; 诊断或运算指令
OR D ;  $D \vee D = D$ ?
CP D ;
JR NZ, ERROR ; 否, 则出错
CPL ;  $\bar{D} \vee D =$  FFH?
OR D ;
CP 0FFH ;
JR NZ, ERROR ; 否, 则出错
INC D ; 运算数加1
DJNZ LOOP2 ; 若未诊断完256个数, 则继续

```

```

RET ; 均正常时, 则返主
ERROR: ; 出错显示“CPU” (略)

```

2. RAM及总线诊断程序

该故障诊断程序主要是检查随机存储器的读、写和存贮功能。因为会破坏原来随机存储器中的存数, 所以在开机时就应该执行该故障诊断程序。设置需要诊断的RAM区首址为2000H, 末址为2FFFH, 其诊断方法是先将0AAH写入设定的存贮单元, 再检查读出是否为0AAH, 如果不是, 则出错; 若为是, 就对每位都作逻辑0和逻辑1的检查, 还需将55H写入这些存贮单元, 然后再作读出检查, 如不是55H, 则出错。其参考程序如下:

主程序

```

LD D, 0AAH ; 存贮单元 ← 0AAH
CALL SSET ;
LD A, D ; 查错
CALL SFIND ;
LD D, 55H ; 存贮单元 ← 55H
CALL SSET ;
LD A, D ; 查错
CALL SFIND ;
置数子程序SSET (D中已存欲置之数)
SSET: LD BC, 1000H; BC ← 存贮单元字节数
LD HL, 2000H; HL ← 存贮单元首址
SSET1: LD (HL), D ; (HL) ← 欲设置数
INC HL ;
DEC BC ;
LD A, B ;
OR C ; BC = 0?
JR NZ, SSET1; 否, 继续置数
RET ; 是, 则返回主程序

```

查错子程序 (待查数已在A中)

```

SFIND: LD    BC, 1000H ; BC ← 待查
                        ; 单元字节数
                        ; HL ← 待查
                        ; 单元首地址

SFIND1: CPI                      ;
      JR    NZ, ERROR ; 若 A ≠
                        ; (HL), 则出
                        ; 错

      RET    PO          ; 若 BC = 0,
                        ; 则返主程序

      JR    SFIND1      ; 否则, 继续
                        ; 检查

ERROR: ;                      ; 显示出错单
                        ; 元 (略)

```

3. EPROM中的故障诊断程序

已固化在EPROM (可擦除P沟道只读存储器) 中的控制程序发生故障的原因有可能是本身失效或读出线路有毛病。诊断这种故障的有效手段是采用“累加和”的办法, 也就是在固化整个控制程序到EPROM中去时, 将该程序的每个字节都进行累加, 而不考虑向高字节的进位。将这样得出的所谓“累加和”(一字节) 固化到某EPROM存储单元, 在诊断时, 将新的EPROM中的控制程序也按字节累加起来, 使所得“累加和”与原固化的“累加和”相比较, 若两个“累加和”相等, 则EPROM无故障, 否则有故障。

例如, 假设要诊断地址为0800H~17FFH中EPROM的控制程序, 其“累加和”固化在17FFH单元中, 那末, 它的诊断程序可编制如下:

```

SEEPROM: LD    A, (17FFH); E ← 原累
                        ; 加和

      LD    E, A          ;
      LD    BC, 07FFH ; BC ← 检
                        ; 查字节数

      LD    HL, 0800H ; HL ← 检
                        ; 查单元首
                        ; 址

EPROM1: XOR    A          ; A ← 00H
LOOP1:  ADD    A, (HL) ; 累加
      LD    D, A          ; D ← 部分
                        ; 累加和

      INC    HL          ;
      DEC    BC          ;

```

```

      LD    A, B          ;
      OR    C              ;
      LD    A, D          ; A ← 部分
                        ; 累加和

      JR    NZ, LOOP1 ; 累加未结
                        ; 束就继续

      LD    A, E          ; A ← 原累
                        ; 加和

      CP    D              ; 两累加和
                        ; 相等?

      RET    Z              ; 是, 则结
                        ; 束, 返主

ERROR: ;                      ; 否, 则出
                        ; 错显示
                        ; (略)

```

其它输入、输出接口部件诸如键盘、显示器、并行I/O电路(PIO)、计数器定时器电路(CTC)等的故障诊断程序, 可以参照上述“累加和”方法作出, 不再赘述。

(三) 微型计算机电路的故障诊断

微型计算机系统 (简称微机系统) 一般都包括中央微处理器、存储器扩展、并行接口、串行接口、CRT显示终端以及相应的外围硬件等电路, 熟练地掌握这些电路的原理图和方框图, 透彻研究这些电路之间的有机联系, 有助于从根本上对微机系统进行有效的故障诊断。

对一个完整的微机工业控制系统进行故障诊断, 通常是采用以下的故障诊断程序框图 (图18-3-1)。

在系统正常状态时, 应按“是”箭头方向进行; 系统不正常时, 则按“否”箭头方向进行。一般情况下, 当微机系统发生综合性故障或无任何响应时, 首先应拔出所有插板, 检查电源。如有电源故障显示, 就设法消除该处故障, 如电源插板正常, 就依次更换其它插板, 从CPU主控板开始, 每次只更换一块, 发现某插板有故障迹象, 就检查该块插板上的芯片组件或元件。但是, 如CPU主控插板有故障时, 一般不必检查其元器件, 在有条件时, 还是以更换整块CPU主控板为宜。所更换下来的CPU主控板或相关的整套板, 其组件或元件一般要由制造厂电子中心更换并作各种试验, 才能满足所有的性能要求。

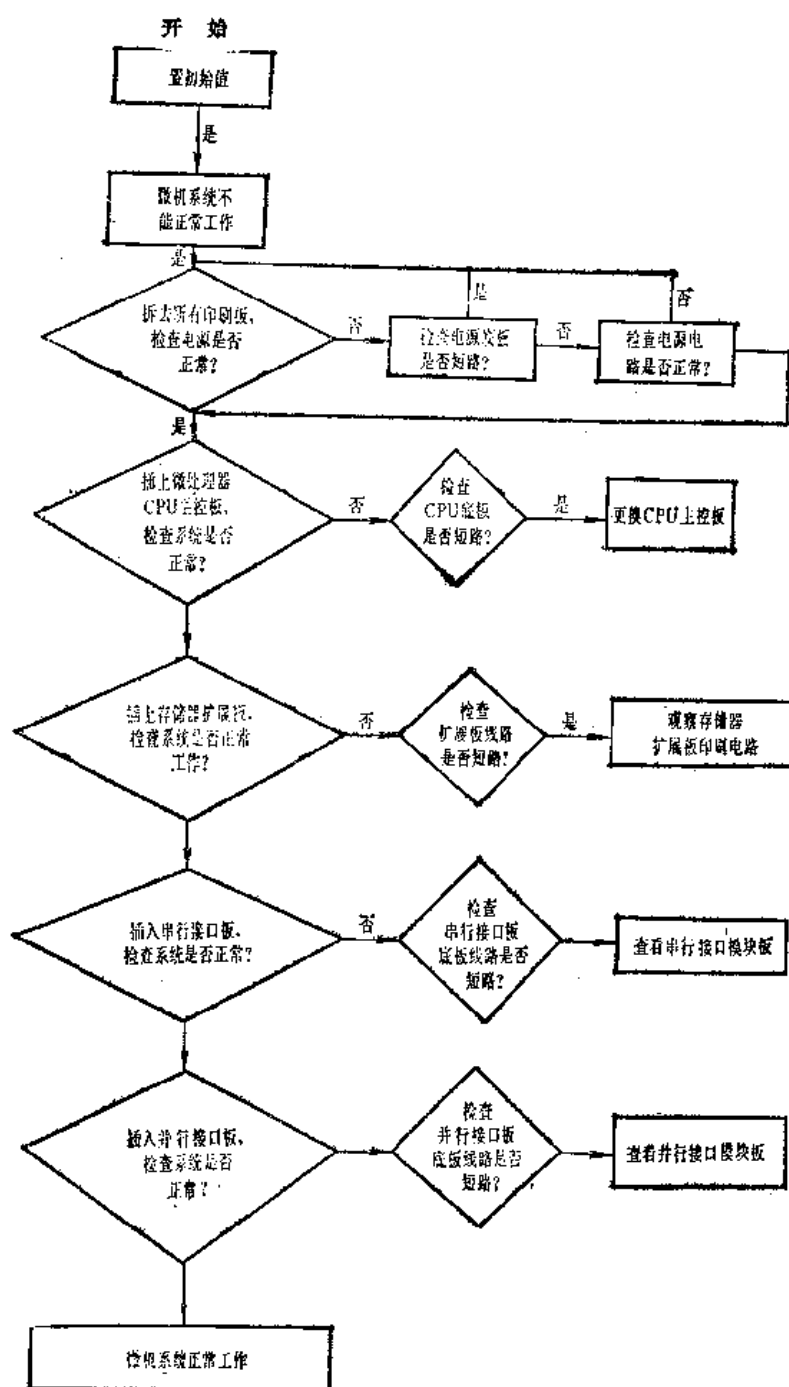


图18-3-1 故障诊断程序框图

(四) 微型计算机故障诊断所用设备与器件

为了有效地对微型计算机进行故障诊断工作,除了采用常规数字电子设备领域内的一般仪器及器件(包括用于测量显示器终端高压的电子式高压表;用于测试数据总线、地址总线、时钟或其它控

制线上的脉冲电量的多踪示波器,以及各式各样的线夹和一般工具)外,在有条件时还可采用一些专用测试设备或器件来提高微型计算机故障诊断的效率。这些专用仪器或器件也适用于任何可编程的、主要由集成电路构成的数字式电子设备。

1. 逻辑笔

该笔 \ominus (又称逻辑探针)可用于测试电子线路的高(1态)及低(0态)逻辑电平,当逻辑笔尖与电路的单线相触时,其逻辑电平指示灯就可立即显示动或静态的逻辑电平;如灯光暗淡,指示电路为1和0电平之间或开路;灯光明亮则指示电路为1态或大于1态的电平;灯光以每秒10次的频率闪烁,则指示电路中有脉动输入电平。当用逻辑脉冲发生器产生模拟量而输入微机的某一部件(如产生时钟频率信号输入到CPU、RAM、ROM或I/O)时,用逻辑笔触及该部件,就可测出该部件的动作情况。逻辑笔还可用于观察到示波器难以检测的短暂和重复频率较低的脉冲信号,例如,脉宽 $\geq 10\text{ns}$ 的信号,可使逻辑笔指示器接通50ms或更长的时间,负脉冲信号可使逻辑笔指示器关断。

由上海碟来仪表厂(南京西路1603弄54号)所生产的DL-TP系列逻辑测试笔是一种用发光二极管直接显示各种电子电路逻辑状态(高、中、低电平)、脉冲极性、脉冲个数的电平测试笔,它对高频

瞬态信号和低频窄脉冲信号,可直观而有效地进行检测,其技术指标列于表18-3-1。

\ominus 我国目前有上海碟来仪表厂所产的DL-TP I、DL-TP II及DL-TP III型逻辑测试笔,可分别用于TTL、CMOS及PMOS电路逻辑电平的测试。美国曾生产有HP(Hewlett Packard)545A及其它等型逻辑笔。

表18-3-1 逻辑测试笔技术参数

型 号	适用电路	输入阻抗 (MΩ)	高 电 平 ($\pm 10\% V$)	中(悬空)电平 ($\pm 10\% V$)	低 电 平 ($\pm 10\% V$)	最小响应脉宽 TK(μs)	最高脉冲响应 频率 f (MC)	额定电平 ($\pm 10\% V$)
DL-TP I	TTL	≥ 0.02	≥ 2.2	< 2.00 > 1.25	≤ 0.8	≥ 0.1	≤ 5	+5
DL-TP II	CMOS	≥ 1.00	≥ 8.0	< 7.00 > 1.40	≤ 1.2	≥ 0.5	≤ 1	+10
DL-TP III	PMOS	≥ 1.00	≥ -2.2	< -3.5 > -7.0	≤ -10	≥ 5.0	≤ 0.1	-20~-24

表18-3-1所列型号逻辑笔的电源线由红色线夹和黑色线夹引出; TTL电路用测试笔红夹接+5V, 黑夹接0V, “I”、“II”发光二极管全亮指示高电平(计数时指示负脉冲), 全暗则指示低电平(计数时即指示正脉冲), “I”亮“II”暗则指示中(悬空)电平; CMOS测试笔的红夹接+10V, 黑夹接0V; PMOS笔的红夹接0V, 黑夹接-24V; MOS笔的“I”亮指示高电平(计数时指示负脉冲), “II”亮指示低电平(计数时指示正脉冲), “I”“II”全暗指示悬空电平; 检测脉冲个数时, 由计数发光二极管按二进制直接显示, 计数检测前, 须先按“0”按钮, 使计数触发器全部清零后, 才能待测, DL-TP I型计数共有2、4、6及8位数四种规格, 计数脉冲的最大容限分别为3、15、63及255个, DL-TP II及III型计数共有二和四位数, 计数脉冲最大容限分别为3及15个。

2. 逻辑脉冲发生器(笔)

逻辑脉冲发生器(笔), 能对电路节点强制注入连续脉冲或单次脉冲, 能输出较大的脉冲电流, 使在线的门电路开通或关断, 如与逻辑电平测试笔配合使用, 可在不拆卸集成组件的情况下, 直接判断或查出逻辑电路故障。例如 DL-CP 系列逻辑脉冲信号发生笔, 即具有以上所述功能, 其性能列于表18-3-2。

脉冲发生笔的输出脉冲由2只发光二极管显示。TTL电路用的DL-CP I型笔, “I”为脉冲指示灯, 可指示连续或单次脉冲信号; “II”为输出端保护之用, 当输出端触及+5V电源时, 灯亮告警, 应将输出端迅速脱离电源, 以免触及时间过长而损坏内部器件; DL-CP II及DL-CP III型笔上的“I”灯, 当用于测PMOS电路时, 由暗到亮即表示

表18-3-2 逻辑脉冲信号发生笔的技术性能

型 号	适用电路	输出阻抗 (Ω)	起始电平 ($\pm 10\% V$)	脉冲信号 幅度 ($\pm 10\% V$)	脉冲 频率 (Hz)	脉冲 宽度 (μs)
DL-CP I	TTL	< 10	< 0.5	> 2	~ 10	~ 10
DL-CP II	CMOS	< 1000	< 0.5	> 8	~ 10	~ 50
DL-CP III	PMOS	< 3000	< -20	> 20	~ 10	~ 50

输出一个脉冲信号, 而用于CMOS电路时, 则由亮到暗表示输出一个脉冲, 其所产生的连续与单脉冲信号由开关 K_2 选择, 单脉冲信号由开关 K_1 控制。用逻辑脉冲发生器(笔)对逻辑门进行故障诊断时, 可按图18-3-2所示来进行测试。脉冲发生器(笔)需产生一个与输入线状态相反的脉冲信号。如在1门的输出端未检测出脉冲信号, 就可在输出端加脉冲信号如图18-3-3所示; 若输出端与 V_{CC} 或公共端无短路, 则逻辑笔应指示出与原指示相反状态的脉冲信号。输入端与输出端是否短路, 最好由电流跟踪器来确定。

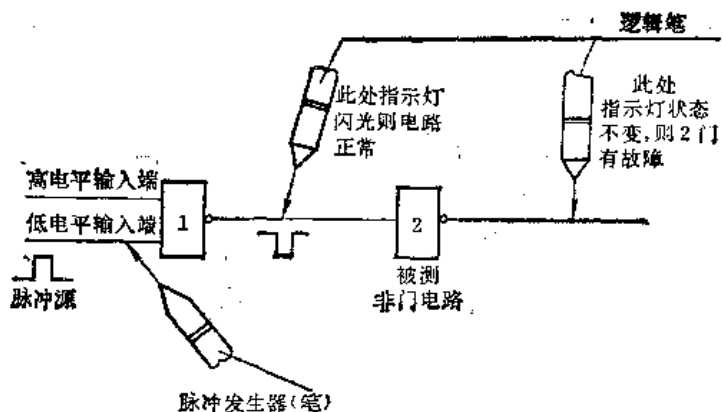


图18-3-2 用逻辑笔诊断逻辑门电路的故障示意图

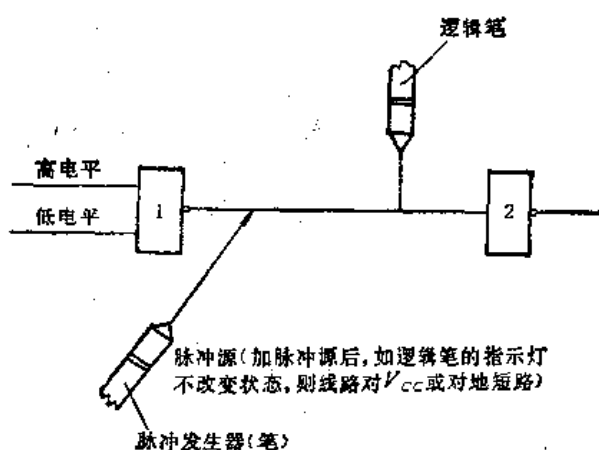


图18-3-3 在1门输出端加脉冲源，用逻辑笔测电路故障

3. 电流跟踪器

电流跟踪器是一种带尖针的仪器，它能确定电子系统电路的低阻抗故障所在点的准确位置。如果沿着印刷电路板的线路，用电流跟踪器的尖针对准激励处，调节该器的灵敏度（调节可由1mA调到1A范围）控制旋钮，直到指示灯发亮；若指示灯不亮，可利用逻辑脉冲发生器激励线路（图18-3-4），再将电流跟踪器尖针置于每个门的输出引脚上，只要门或引脚有故障，指示灯必然发亮。

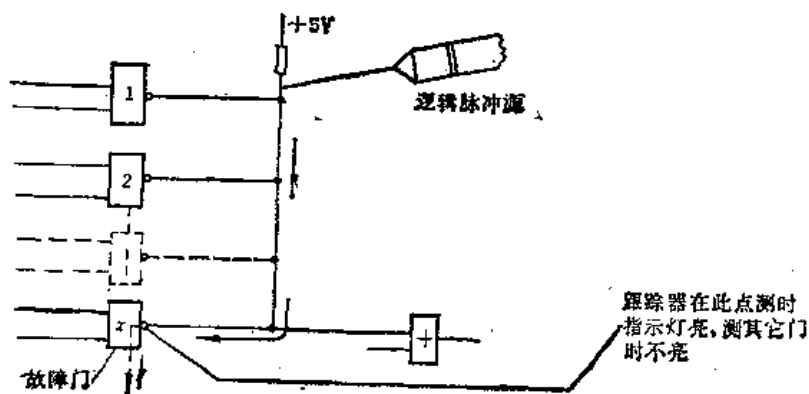


图18-3-4 用电流跟踪器查找出“x”与门的故障

上述电流跟踪器的尖针（探针）自成一体并需独立的电源供电，该电源的电流一般小于75mA，电压在4.5~15V之间。当用它测两个门之间的低阻抗（完全或局部短路）故障时，要和逻辑脉冲发生器结合使用，如图18-3-5所示，即可迅速查出门与门之间的故障。

在检查印刷电路板上的线路有无由于焊料跨接或其它原因而导致短路的情况时，也可用电流跟踪

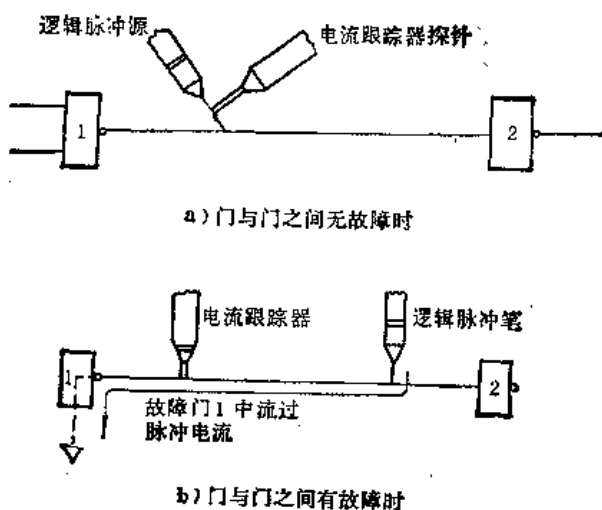


图18-3-5 用电流跟踪器与逻辑脉冲源配合一起查找门与门之间的故障

器进行跟踪测试，如图18-3-6所示。当用跟踪器探针由1门向2门跟踪检查时，指示器在未触及焊料跨接处之前都有灯亮，到达跨线时，则灯的发光状态有明显变化，即可找出跨接短路处。

4. 逻辑电路测试夹

逻辑电路测试夹简称逻辑夹。此种夹是设计用于测定TTL和DTL集成电路的逻辑电平，一般可

测试触发器、门、计数器、缓冲器、加法器、移位寄存器等标准化器件，而对非标准输入电平或扩展门的集成电路则不能测量。逻辑夹有适用于16、20、24及40个引脚的标准结构。如美国HP548A型逻辑夹就只能适用于有16个引脚的电路。

5. 逻辑电平比较器

有一种HP10529型逻辑电平比较器，可同时插入被测集成电路及基准比较集成电路，任何逻辑状态的

差异都可通过比较器显示出来，比较器的16个发光二极管对专用或集成块引脚的逻辑“异”进行识别，一个发光二极管的“亮”与一个逻辑“异”相对应。在检测时，首先插入待测试的IC，然后把良好的基准IC插入，如所测IC的工作状态与基准IC不同，相应的发光二极管会立即有所显示，甚至瞬间的动态错误也可检测出来；比较器以并行信号输入待测集成块与基准集成块，其输出信号如有持续

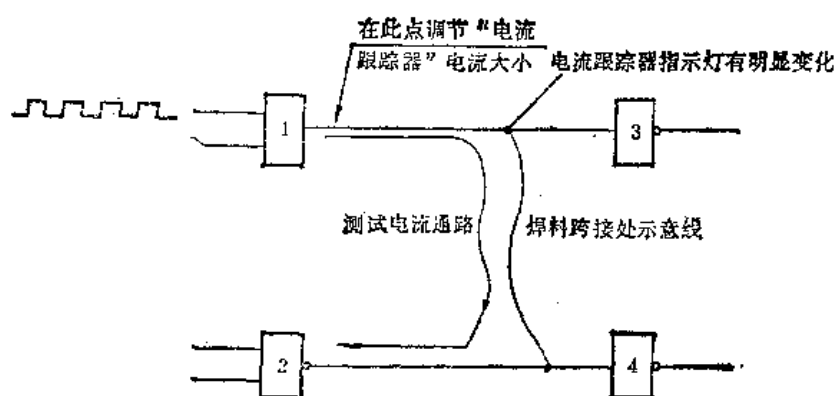


图18-3-6 用电流跟踪器跟踪检查焊接跨接故障

时间大于200ns的任何差异都表示被测IC有故障。输入线上如有短路等故障时，就相当于用正常的IC驱动有故障的IC，即可准确指出发生故障的引脚。

多踪示波器相连，示波器显示屏上就会出现微处理器的扫描脉冲信号，扫描线上出现脉冲信号表示二进制数为1，无脉冲信号表示二进制数为0。

测试开始时，先给图18-3-7中的复位或清零线施加一单脉冲信号，然后将足够幅度的单脉冲信号加至时钟脉冲输入线，直到1号地址码(0001)在地址总线上出现为止。假定在0001地址上程序应为十六进制数7F(相应的二进制数应为0111-1111)，数据字节同样应在数据总线上反映，而示波器显示屏上现在出现的二进制数却是0011-1111。很显然，这一错误的信号指令加给微处理器，系统定会出错，究其原因，可能

(五) 故障诊断的基本方法

可编程控制设备或电器(包括微型计算机、可编程序控制器及数控装置等)的故障诊断基本方法是检查该设备或电器某一个或某几个重要系统(如数据总线系统和地址总线系统)的功能如何，例如可检查重要系统的每步程序，将检查结果与每个地址码和每步程序表进行比较，从而找出故障的症结。通常称这种方法为程序跟踪单步法，即利用逻辑电平脉冲发生器、开关或按钮产生一次一个单脉冲信号，取代正常系统的时钟脉冲，把每个地址的数据与程序中所显示的数据进行检查和比较。

1. 基本的故障诊断法

可以用多踪示波器、复位开关、单步开关或逻辑电平脉冲信号源组成一测试装置对微处理器进行故障诊断。图18-3-7即表示这种测试装置的原理线路。假定是测微处理器中8条数据总线的故障情况，可将每条数据总线与

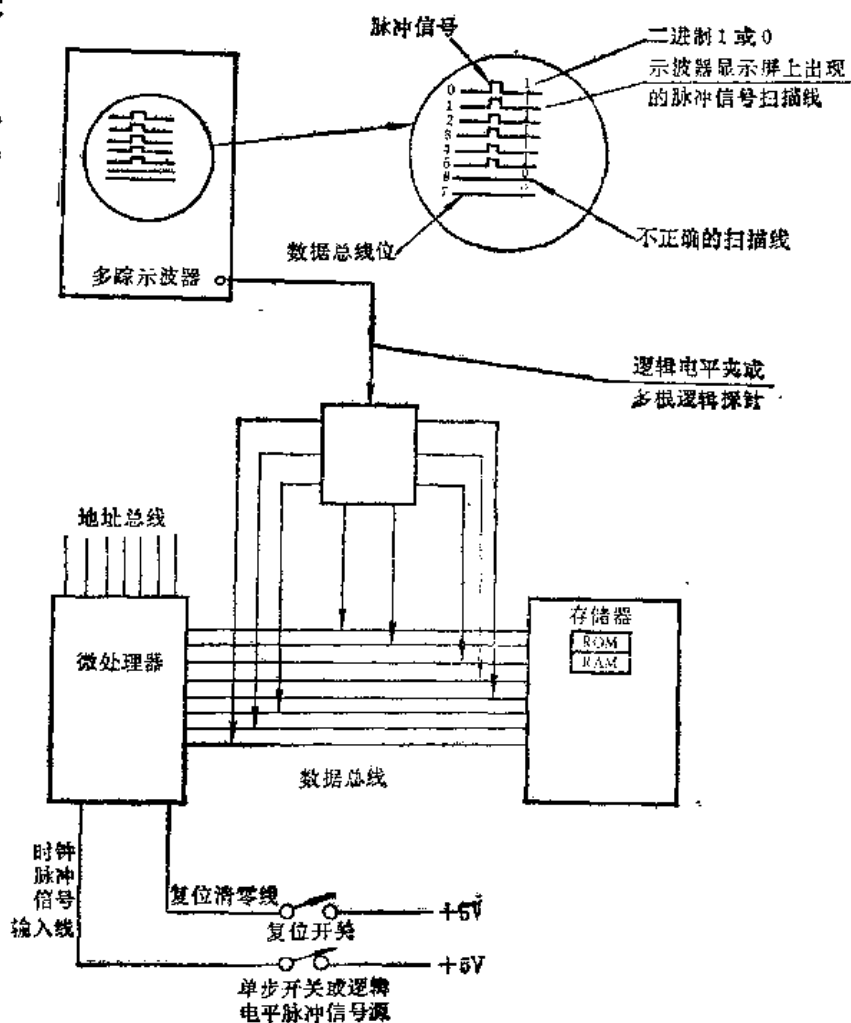


图18-3-7 使用多踪示波器及开关组成的微处理器单步法故障诊断装置

是数据总线上的线路有毛病，存储器有故障，存储器中没有读出脉冲信号，存储器中的读脉冲信号在错误的时间出现（存储器数据缓冲器开通过早或过迟）及其它原因所致。必须根据具体情况进行分析，才能确定程序中的问题症结所在。

如果出现单纯的定时错误，可用示波器检查有关脉冲的时序关系。例如，可按图18-3-8所示，将示波器与数据总线、地址总线以及读脉冲信号线相连。示波器显示屏上即可显示出这些线上各脉冲信号之间的时序关系。图18-3-8中的读脉冲信号必须使存储器数据缓冲器保持关闭，直到所选的地址脉冲信号在地址总线上出现为止。同时，还应使缓冲器有足够的开启时间，以保证该缓冲器在数据总线上恰好出现全部8个数据位。然后，在下一个地址出现之前就关闭缓冲器。实际上，多踪示波器显示屏上可重复显示完整的定时图。

2. 用逻辑分析仪进行故障诊断

逻辑分析仪可以用接近正常系统的速度将整个程序运行一次，并可把程序所需断点或两断点之间的某一数据显示出来。这样一来，就可弥补用单步法和系统的定时检查法所出现的两点不足，即第一点，多踪示波器目前还不能满足对所有数据和地址总线同时跟踪的要求；第二点，一个典型的数据字节为8位，就需8个时钟脉冲信号或一次按8个单步按钮，而任一程序步至少有一个字节（通常有两或三个字节，每字节为8位，则有24位），假如某程序的第3300步出现故障，就应掀按钮很多次，要费许多时间将程序对照地址码的二进制读数进行逐一比较，才能发现问题。而采用逻辑分析仪，可以用开关和控制器或键盘上的按键来进行操作，迅速显示出所选择的特定地址数据，及时查出故障地址。

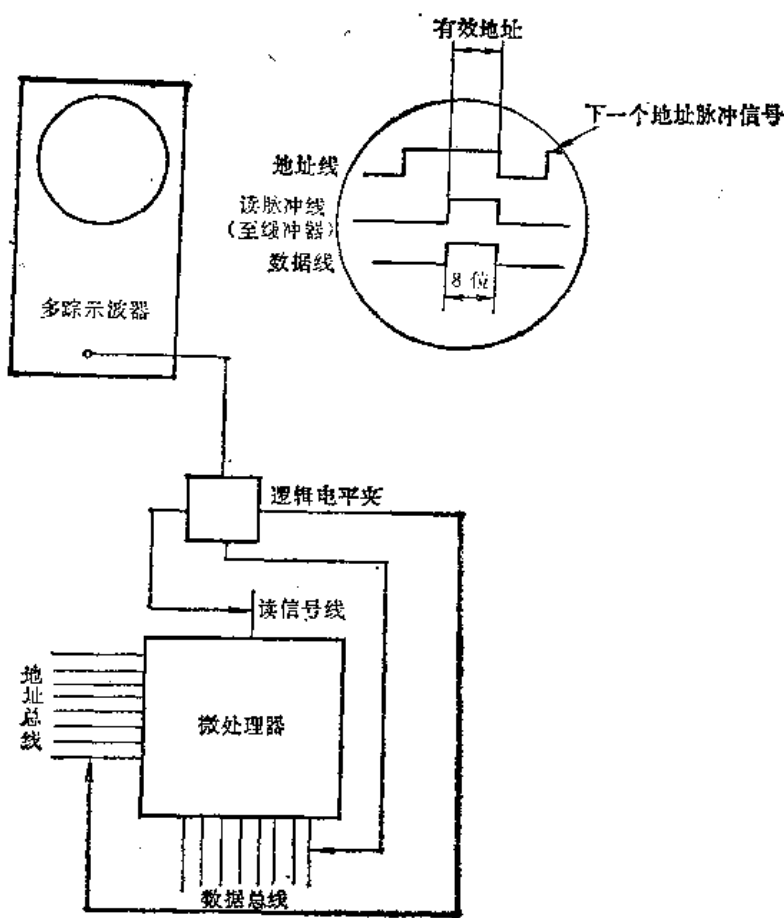


图18-3-8 微处理器定时错误的故障诊断基本测定示意图

逻辑分析仪一般有3种基本的显示型式：即定时式（时域）、表格数据式（数据域）及映象式显示。时域显示可产生典型的时域波形图；数据域显示可同时显示若干数据字节，可在程序的选择点（断点）前后对数据字进行检查（有些逻辑分析仪可用增强亮度显示数据字），即使不熟悉故障诊断的操作者也容易掌握用表格数据式显示法对微型计算机进行故障诊断；映象显示是把数据字的MSB（最高有效）位与逻辑分析仪的垂直偏转电路相接，而将LSB（最低有效）位与该仪的水平偏转电路相接，从而显示一系列点线。所显示的可以是256个点线的阵列，而不是二进制数0和1的表格，每一点线代表16条输入线的一种可能的组合。因此，任何输入信号都可由加亮的点线表示，所有0的输入（或16进制数0000）都在显示屏的左上角显示；而所有1的输入（或16进制数FFFF）都在右下方显示，各点都相互连结，因而，可以观察到数据变化的顺序，也就是可观察到数据流的方向。

美国生产的HP1611A型逻辑分析仪，就是一种由键盘控制的表格数据式显示的分析仪，不仅可用于微型计算机，而且可用于任何以微处理器为基本单元的系统的设计与故障诊断。而HP1610A型逻辑分析仪，则可提供表格数据式和定时图形显示

两种显示方式，可对微处理器基本系统、小型计算机以及任何数字电路进行一般测量或故障诊断，其计数频率可达10MHz、字长达32位，可迅速捕捉到所需的测试数据。HP1602A型逻辑分析仪，则是一种用于设计和诊断各种数字电路系统（包括微型计算机）并用键盘控制的手提式仪器。美国Tektronix公司生产的7D01型逻辑分析仪，能存储和显示16个通道的数字数据，DFI型显示格式器除可提供7D01型逻辑分析仪的时域显示功能外，还可提供数据域显示，并增加了具有比较方式和映象状态表显示的功能。

参考文献

- [1] 袁焱. 高压电气设备试验. 北京：水利电力出版社，1979
- [2] 林德莱·R. 希金斯[美]主编. 维修工程手册（中册）. 邓续魁等译. 北京：机械工业出版社，1987
- [3] 赵家礼编著. 交流电动机节能挖潜修理. 北京：机械工业出版社，1983
- [4] 约翰·德·伦克. 微型计算机故障诊断与维修. 刘甲耀等译. 北京：电子工业出版社，1988