

X线机高压测量与校验

费 双 令

辽宁省医疗器械研究所

1 9 8 1

X线机高压测量与校验

费 双 令

辽宁省医疗器械研究所

1 9 8 1

前 言

进行X线机高电压试验时,准确地测出所施加电压的数值,是保证正确试验的前提。由于高电压的数值较高,对人身和仪表的安全影响很大,往往不能直接测量,只能将它转换成测试仪表可以承受的低电压,进行间接测量。这是高电压测量中的重要方式。例如分压器就是间接测量的一种方式,使用较为方便。我国从75年到现在已由日本ALCO公司进口了三套X线机专用的分压器,但这些进口的分压器误差多大?如何校验?多年来尚未解决。用本文提供的高电压校验方法和仪器,于79年9月在西南厂和其它兄弟厂所的努力下,校验出了它们的误差。

X线机高压发生器产生的是脉动直流高压,一般正负两极均不接地,这是X线机高压的特点。在测量这样的高压中,有关分压器的问题,本文也进行了一些分析。例如:日本进口分压器波形一大一小的原因,由它引起的误差问题。另外,对国内自制分压棒的测量也进行了分析和公式推导,最后导出进口分压器和自制分压棒两者之综合法的计算公式。

由本文的分析可知,准确测量X线机的高压是并非轻而易举的。今后应进行大量科研工作,才能把X线机高压的测量技术提高一步。

由于水平和条件所限,提出的看法,肯定有错误和不妥之处,请批评指正。

本文中所采用的高压实验数据。是在西南医用设备厂和沈阳医疗器械厂实测出的,是上述两厂的领导和同志以及其他厂所院校同志大力协助和指导的结果。在此表示衷心的感谢!

费 双 令

1979年12月

目 录

一、球隙器测量	1
1、球隙器装置	1
2、对球极的主要要求	1
3、保护电阻的选择	1
4、气象条件校正	2
二、静电电压表测量	2
三、电压互感器测量	3
四、分压器测量	3
1、进口的分压器	3
①波形大小不等的原因	3
a) E和G点连线中的电流 I_D	3
b) 地电位的波动	11
②基本误差和附加误差	12
③问题分析	12
a) 共模信号与差动信号	12
b) 附加误差的估算	15
c) 日本进口分压器的有关资料	17
d) 测量 U_{AK} 的注意事项	18
④1022高压试验	18
2、自制的分压棒	22
①参数对称相等的电路	22
②模拟试验及双加法	23
③参数不对称相等的电路	24
3、综合法	27
4、分压器小结	29
五、高压校验	29
六、静电电压表和球隙器的校验结果	31
1、 Q_4-V 的校验结果	31
2、球隙器的校验结果	31
七、日本进口分压器的校验结果	33
八、结论	35
九、参考文献	36

一、球隙器测量

两个直径相同的金属球之间的空气隙，如果球间隙的距离 S 与球直径 D 之比在一定范围内，对各种类型的电压（如：工频、直流和冲击）均具有相当稳定的放电电压。球隙测量就是利用这一特性来测量放电电压的峰值的。球隙放电电压值，应取连续三次以上的放电电压的平均值，并且每次放电电压值与平均值之差不得大于3%。在每两次放电中的间隔时间不应小于一分钟。因为开始几次球隙放电电压常常偏低，故头两三次的放电电压读数可不记录。电压上升速度在球隙放电电压40%以前可以是任意的，其后的升高则必须是均匀的，速度约为每秒3%的放电电压，即从40%算起，大约用20秒升到球隙放电。

1、球隙器装置

球隙器装置由一对球极和一个保护电阻组成，球隙间的布置方式有垂直和水平两种。球隙的安装尺寸见国家标准GB 311—64。球隙间距 S 和球直径 D 的关系应保持在 $0.05D \leq S \leq 0.5D$ 。

为了减小球隙放电的分散性，无论测量何种类型的电压，如球隙距离太小（放电电压在50千伏以下）或球径小于12.5厘米，测量时均应对球隙进行紫外线照射。以使放电稳定。

球隙放电电压与对应的球间隙距离见表1和表2及表3。当使用球隙时，注意在周围的物体，应该放置在不小于圆球直径5倍的距离。

2、对球极的主要要求

球极表面应清洁、光滑、干燥。球极直径 D 的偏差应不超过2%。在放电点区域内（以 $0.3D$ 为半径，以放电点为圆心所划出的区域）应光滑、无焊缝。

3、保护电阻的选择

与球隙串联的保护电阻起着限制放电电流和阻尼可能出现的过电压作用，其值取 $0.1 \sim 0.5$ 欧/伏。

表1 一球接地时，球隙的工频交流、负极性直流和负极性冲击放电电压

气压760毫米汞柱，气温20℃，KV峰值

间隙 cm	1	2	3	4	5	6	6.5	7	8
球径 cm									
12.5	31.5	59.2	85.2	109	129	146	(154)	(162)	(174)
15	31.3	59.2	85.5	110	132	152	161	169	(185)

注：括号内数据准确度较低。

表2 双球对称时, 球隙的工频交流, 正负极性直流和冲击放电电压
气压760毫米汞柱, 气温20℃, KV峰值

间隙 cm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
球径 cm									
12.5	31.5	59.4	85.4	110	132	152	170	187	203
15	31.3	59.2	85.8	111	134	155	175	194	211

表3 一球接地时, 球隙的正极性直流和正极性冲击的放电电压
气压760毫米汞柱, 气温20℃, KV峰值

间隙 cm	1	2	3	4	5	6	6.5	7	8
球径 cm									
12.5	31.6	59.2	85.7	111	134	154	(163)	(172)	(188)
15	31.3	59.2	85.6	111	136	158	168	178	(196)

注: 括号内数据准确度较低。

4、气象条件校正

表1, 表2和表3是标准状况下的放电电压值, 测量时若不是标准状况。则应该进行气象条件校正, 但不作湿度校正, 相对空气密度 δ 应在0.95—1.05范围内, 换算公式如下:

$$U = U_0 \cdot \delta$$

$$\delta = \frac{293 \cdot P}{760 (273 + t)}$$

式中, U_0 —标准状况下的放电电压 KV

U —试验大气条件的放电电压 KV

P —试验时的大气压力毫米汞柱

t —环境温度℃

二、静电电压表测量

静电电压表可以直接测量工频高压的有效值, 也可测量直流及宽频率范围内的交流电压, 还可配合分压器使用, 静电电压表的输入阻抗大, 便于和其它元件组合使用, 静电电压表的误差精度可达1—2%。

三、电压互感器测量

通过电压互感器将高电压转换成低电压,然后用低压电压表测量,测量范围由互感器电压等级决定,精密测量用互感器一般在200千伏以下,可与准确度较高的仪表配合,作为校正其它测量装置之用。

据调查了解到:北京电表厂有沈阳变压器厂制造的0.2级100KV/100V的标准电压互感器。沈阳变压器厂有德国制造的0.1级标准电压互感器和瑞士制造的0.03级200KV/100V的标准电压互感器。

四、分压器测量

X线机高压发生器产生的是正负极性均不接地的对称直流高压。目前对它常用的电阻分压器有进口分压器和自制分压棒两种。

1、进口的分压器

目前我国已经从日本进口了三套X线机专用的分压器。在使用中用它测量X机高压杆伏值时(图1),往往从分压器中A、E和K各点测出如图2所示的电压波形,大小不等,有高有低,其原因何在?按照哪个计算高压杆伏值?所以此大小波形问题很有研究价值。

① 波形大小不等的原因

a) E和G点连线中的电流 I_D

日本进口的分压器是由40个 $10M\Omega$ 的电阻组成的,E点上下各为20个。由于每个电阻都有误差,这就很难使E点两边电阻的总值完全相等,所以E点就不会正好是零电位,可能偏向正或偏向负电位一些。根据北京东方红医疗器械厂和西南医用设备厂的日本进口分压器说明书可算出日本进口分压器的阳极和阴极臂总电阻值为:

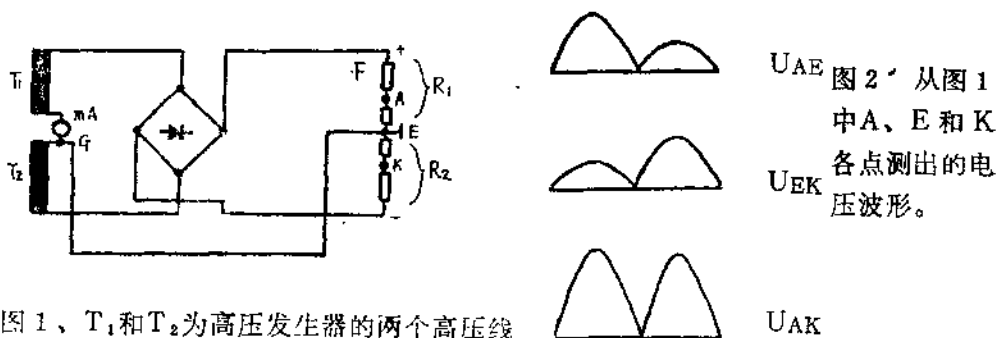


图1、 T_1 和 T_2 为高压发生器的两个高压线圈, F为日本进口分压器。

$$R_1 = 210.51 \text{M}\Omega$$

$$R_2 = 210.62 \text{M}\Omega$$

$$\text{两臂相差 } R_2 - R_1 = 0.01 \text{M}\Omega$$

可见E点的电位是偏向正电位一些。总之E点是偏向正或偏向负的直流电位。

G点位于高压发生器两高压线圈的当中，由于两高压线圈的参数(如电势和内阻抗等)不会完全对称相等以及毫安表的存在，所以G点的电位也可能偏向正或偏向负一些。即G点是偏正或偏负的交流电位。

这样一来，G和E两点的电位就不会相同，在它们的连线中就要出现电流，此电流称为连线电流，用 I_D 表示。此连线电流 I_D 流的方式有许多种。我们做了低压模拟试验，其电路如图3所示，表4、5和6是其试验结果。表中的电压数据是当 R_o 为零时测出的。从低压模拟试验结果可得出如下小结：

- (1) 无阻抗 Z (Z 的含义也包括2个线圈中参数的不对称)时，可将连线电流调到零，有阻抗 Z 时，连线电流就调不到零，即连线电流 I_D 肯定存在。
- (2) 连线电流 I_D 大致可分四种方式，如图5、6、7和8。
- (3) 阻抗 Z 增大时，连线电流 I_D 也增大。
- (4) 连线电流不仅能改变分压器的输出电压波形，而且还能改变X线管上的电压波形。
- (5) 连线电流不相同，同一个分压器的分压比是不相同的。

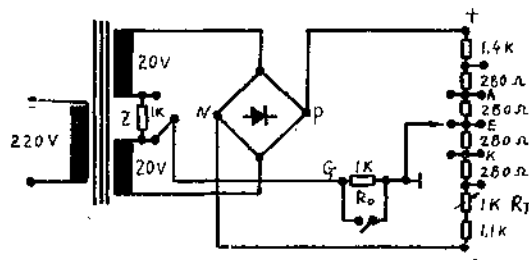


图3 分压器低压模拟试验电路
 R_T 使E点调零用
 Z 相当毫安表。

表 4

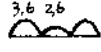
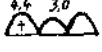
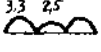
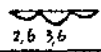
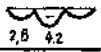
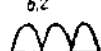
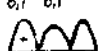
显号	4	5	6
U_E	苒於零	偏 正	偏 负
U_{PN}/U_{AK}	6,4	6,4	6,4
U_{GE}	—		
U_{AE} 伏			
U_{EK} 伏			
U_{AK} 伏			
U_{PN} 伏			

表 5

显号	7	7	7
U_E	苒於零	偏 正	偏 负
U_{PN}/U_{AK}	6,62	6,27	6,27
U_{GE}			
U_{AE} 伏			
U_{EK} 伏			
U_{AK} 伏			
U_{PN} 伏			

表中 U_E 偏正时 $3 > 2.3$ 的原因是, 阳炭臂的电阻值减小了, 故分出来的电压较大。

表 6

量号	8	8	8
U_E	等于零	偏 正	偏 负
U_{PN}/U_{AK}	6,62	6,27	6,27
U_{GE}			
U_{AE} 伏			
U_{EK} 伏			
U_{AK} 伏			
U_{pN} 伏			

表中 U_E 偏正时, $3 > 2.3$ 的原因是, 阳极臂的电阻值减小了, 故分出来的电压较大。

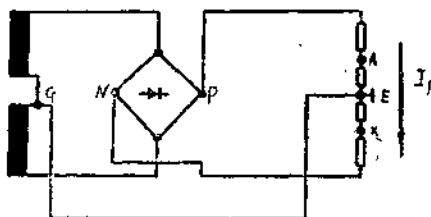
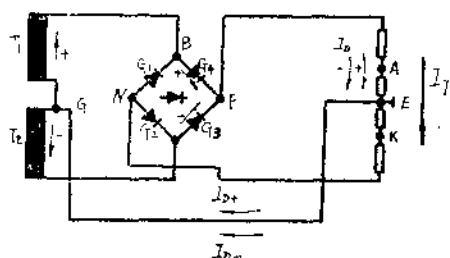


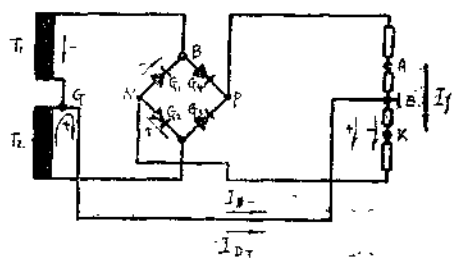
图 4

$U_G = U_E$ 时, GE 连线中无电流,
在分压器的电阻中只有由 U_{PN} 引起的电流 I_t 。



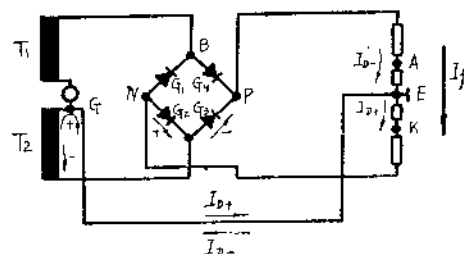
B 点	假 定	I_D 流 过 的 元 件
正 极 性 时	$U_E > U_G$	$T_1 G_4 R_{AE}$ I_{D+}
负 极 性 时	$U_E > U_G$	$T_2 G_3 R_{AE}$ I_{D-}

图 5 连线电流 I_D 的流程



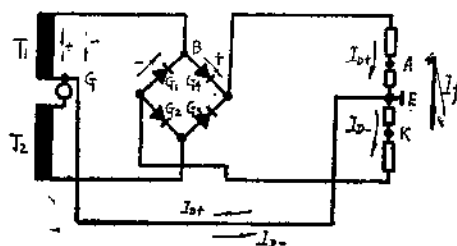
B 点	假 定	I_D 流 过 的 元 件
正 极 性 时	$U_G > U_E$	$T_2 G_2 R_{EK}$ I_{D+}
负 极 性 时	$U_G > U_E$	$T_1 G_1 R_{EK}$ I_{D-}

图 6 连线电流 I_D 的流程



B 点	假 定	I_D 流 过 的 元 件
正 极 性 时	$U_G > U_E$	$T_2 G_2 R_{EK} \xrightarrow{I_{D+}}$
负 极 性 时	$U_G < U_E$	$T_2 G_3 R_{AE} \xleftarrow{I_{D-}}$

图 7 连线电流 I_D 的流程



B 点	假 定	I_D 流 过 的 元 件
正 极 性 时	$U_G < U_E$	$T_1 G_4 R_{AE} \xleftarrow{I_{D+}}$
负 极 性 时	$U_G > U_E$	$T_1 G_1 R_{EK} \xrightarrow{I_{D-}}$

图 8 连线电流 I_D 的流程

上面的低压模拟试验是空载时的情况，下面我们也作了一个带负荷的试验，用电阻

910Ω 和二极管 2 CP16 当负载, 接在图 3 中的 P 和 N 点, 试验结果如下:

图 号	U _E 电位	负 荷	U _{AK} 伏	U _{PN} 伏	U _{PN} /U _{AK}
8	偏 正	空	6.7	42	6.27
		有	4.5	26	5.78

此试验结果表明, 负荷时, 在阻抗 Z 上压降将增大, 而分压器中 E 点的电位仍为一定值, 所以连线电流将增大, 故分压器的分压比改变了, 即在空载和负荷时分压器的分压比是不相同的。

在上述连线电流 I_D 流的四种方式中, 实际上比较可能发生的一种如图 8 所示。若在正半周中, U_E > U_G 时, 则正半周时的 I_{D+} 由 E 点流向 G 点。若在负半周中, U_E < U_G 时, 则负半周时的 I_{D-} 由 G 点流向 E 点。管电压在日本进口分压器上引起的电流为 I_f。I_{D+} 在正半周时只流过 R_{AE}, 它就与流过 R_{AE} 的 I_f 的正半周叠加在一起, 所以 U_{AE} 的正半周幅值就大于它的负半周了。

同理 I_{D-} 在负半周时只流过 R_{EK}, 它就与流过 R_{EK} 的 I_f 的负半周叠加在一起, 所以 U_{EK} 的负半周幅值就大于它的正半周了。

反之如图 7 所示。

表 7 为 79 年 10 月十台统一设计 200—300 毫安高压发生器的测试结果, 这是在西南医用设备厂用该厂的日本进口分压器测出的。此表说明连线电流 I_D 确实存在, 只是大小不等而已。用电阻转换可将图 2 中的电压波形变为图 9 所示的电流波形。根据电工学中的结点定律。当 I₁ > I₂ 时, 在 EG 连线中必有电流 I₃。

$$\text{即 } I_1 = I_2 + I_3$$

当 I₁' < I₂' 时, 在 EG 连线中必有电流 I₃'。

$$\text{即 } I_1' + I_3' = I_2'$$

故说明了在 EG 连线中确有电流 I_D (即 I₃ 和 I₃') , 并且 I_D 为图 7 和 8 所示的交流电流。

表 7 使用不同厂家的高压发生器时日本进口分压器输出电压波形大小之差的百分比

厂 家	电 源 V	U _{AK} %	ΔU _{AE} %	ΔU _{EK} %
西 北	220	4	30	10
	380	1	6—10	6—10
西 南	220	4	10—2	9—2
	380	2	9	8

续表

厂 家	电 源 V	U_{AK} %	ΔU_{AE} %	ΔU_{EK} %
天 津	220	2.5	14	8
	380	1	12	6
鄂 北	220	2.5	2	2
	380	2	20	10
沈 阳	220	2	10	3
	380	2	9	3
上 海	220	2	10	10
	380	2	10	9
北 京	220	2	10	10
	380	2	9	6
山 东	220	1	9	6
	380	1	9	6
江 西	220	1.5	10.5	7.15
	380	2	9	9
湖 南	220	1.5	15	9
	380	1.5	14	10

注：1、表中的百分数为粗略值（未精确测量）。

2、表中的百分数为对较小值的百分比。

3、栏中有两个数据的是两次测试结果。

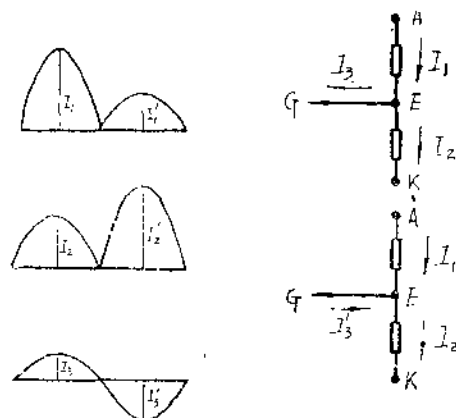


图 9

b) 地电位的波动

高压试验室应具备两个条件：一是屏蔽。二是接地。高压试验室建筑的四周和屋顶应有接地良好的屏蔽网。这样既可防止外界对高压测量的干扰，也可防止高压试验室内的高压对外界的干扰。另外还应有良好的接地体，其接地电阻愈小愈好（最好为1欧姆以下）。用数10根2吋粗2.5米长的钢管，相隔1—3米打入地下，用40×4的扁钢连接好。这样才能得到一个相当低和稳定的地电位，测出的数据才能准确稳定。若试验室中一无屏蔽，二无接地，用三相四线制中的零线作地线，则这个零线电位就既不稳定也易受外界干扰，当三相供电不平衡时，零线的电位就要波动，用相电压220伏或线电压380伏作电源时，测出的结果就会互不相同，另外试验的重复性也会很差。

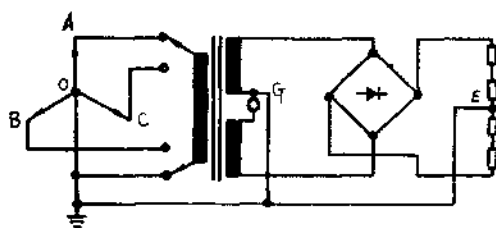


图 10

关于地电位的波动可用图10简单说明一下，当电源使用220伏（A相）和380伏（B和C相）时，可见其中点O的电位是不相同的（由于对称度不同）。在施加电压的一瞬间，接地体各点的电位必将有所波动，距离电源零线的远近，对各点电位的影响也将不同。若G和E两点的接地不在一点，而是有一定的距离时，则该两点的电位必然有所不同。

当管电压为50千伏时,流过日本进口分压器的电流为

$$I_f = \frac{50KV_P}{400M\Omega} = 125 \mu A$$

若连线电流 I_D 为1—2微安时,叠加在 I_f 上就要增加约1%的误差。由此可知 I_D 为微安级,只要地电位发生波动,就会对E和G点的电位有影响,连线电流 I_D 就要发生变动。

综上所述,波形大小不等的原因是GE连线中有电流 I_D ,产生 I_D 的原因有2:一为参数不对称(高压发生器和分压器),二为地电位波动。不论是哪个原因产生的 I_D , I_D 均能使波形大小不等,使分压器的分压比改变,给仟伏值(管电压)的测量带来新的误差,此误差可叫作“附加误差”。

② 基本误差和附加误差

分压器测量高压的原理是将高电压变成低电压,测出低电压后,用分压器的分压比计算出高电压。但是必须注意,这个低电压必须是由欲测的高电压引起的才对,如:要求测X线管两端的电压(管电压),就要测出由管电压在日本进口分压器上引起的电流 I_f ,在 R_{AE} 和 R_{EK} 上产生的电压 U_{AK} 、 U_{AE} 和 U_{EK} ,测出此电压再乘以分压器的分压比,即可得到管电压。此时由于仪表和电阻值的不精确而造成的误差可叫“基本误差”。

从上节的分析,可知GE连线中的电流 I_D 也要流过 R_{AE} 和 R_{EK} ,在其上也要产生电压 U'_{AK} 、 U'_{AE} 和 U'_{EK} ,这些电压与管电压是无直接关系的,如果把它也计算到管电压内,就要给管电压的测量增加新的误差,此误差可叫“附加误差”。

③ 问题分析

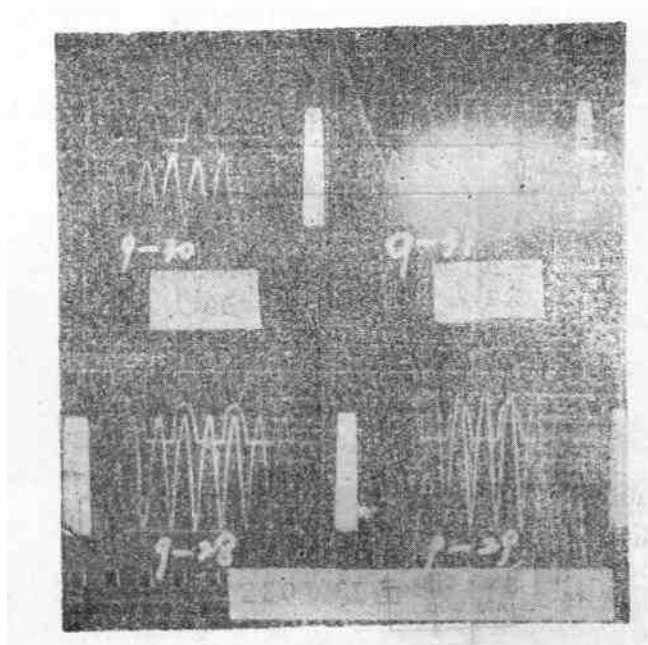
关于日本分压器有这样的说法:“在日本分压器内设有对共模信号能起抑止作用的差动放大器,而一大一小的波形是共模信号。所以当阳极对地或阴极对地测出的波形有明显的一大一小时,从阳极对阴极测出的波形仍能基本保持整齐。故这时用日本分压器测出的仟伏值 U_{AK} 是正确的”。这种说法是值得商榷的,恐有不妥。

a) 共模信号与差动信号

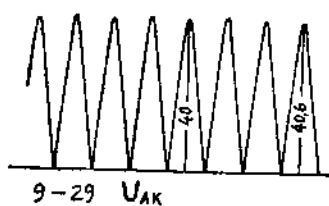
在测量阳极对阴极间的电压时,差动放大器能抑止共模干扰信号的影响。这一点单独看是对的。问题是连线电流 I_D 对差动放大器的阳极—阴极间产生的不是共模干扰信号,而是差动信号,模数、极性和相位均不相同。正半周和负半周连线电流 I_D 的幅值常常是不相同的。即 $I_{D+} \neq I_{D-}$ 。 I_D 对差动放大器的输入端A和K产生的电压极性也正好相反。另外在相位上也不同相。请参阅图5、6、7和8,所以差动放大器对这样的差动信号是比较灵敏和来者不拒的。

在阳极—地(U_{AE})与阴极—地(U_{EK})之间的电压波形有明显的一大一小时,其阳极—阴极(U_{AK})之间的电压波形仍能基本保持整齐的原因是电压 U_{AE} 和 U_{EK} 叠加的结果。请参阅江西厂高压发生器的电压波形照片9—29(U_{AK})、9—30(U_{AE})和9—31(U_{EK})。这三张照片拍照时其示波器垂直轴的灵敏度是没有变动的,所以它们三者幅值之间的关系是有一定参考价值的,图11为其计算图,可看出 $U_{AK} = U_{AE} + U_{EK}$ 、

由于相位的关系，较大的 U_{AE} 加较小的 U_{EK} 与较小的 U_{AE} 加较大的 U_{EK} 的和是相差不多的，故 U_{AK} 的波形能基本上保持整齐。



江西厂高压发生器的波形照片



$$21 + 19 = 40$$

$$19.6 + 21 = 40.6$$

$$\frac{40.6 - 40}{40} = 1.5\%$$



$$\frac{21 - 19}{19} = 10.5\%$$



$$\frac{21 - 19.6}{19.6} = 7.15\%$$

图11 江西厂高压发生器波形计算图

200 mA、 80K VP、 220V