



基本无綫电測量教程

Г. А. 列梅茲 著

高等教育出版社

73.45.2
191



基本无綫电測量教程

Г. А. 列梅茲著

張世箕等譯

高等教育出版社

本书系根据苏联国立电讯书籍出版社(Связьиздат)出版的 Г. А. 列梅兹(Г. А. Ремез)所著“基本无线电测量教程”(Курс основных радиотехнических измерений) 1955 年版译出的。原书根据苏联教学大纲写成,并經苏联高等教育部多科性工学院和机器制造高等学校总管理司审定为无线电工程高等学校和无线电系用的教学参考书。

本书主要讲述无线电技术测量中所遇到的主要物理量的基本测量原理和方法,至于测量设备的完整电路图及其结构的描述,则应当是学生作实验时所使用的专门参考资料的任务。

本书也可供无线电方面的工程技术人员在从事无线电测量工作时参考。

本书系成都电讯工程学院张世箕、黄嵩如、楊国雄、黄香馥、虞厥邦翻译的。

基本无线电测量教程

Г. А. 列梅兹著

张世箕等译

高等教育出版社出版 北京宣武门内承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业许可出字第054号)

京华印书局印刷 新华书店发行

统一书号 15010·770 开本 880×1168 1/32 印张 14 11/16

字数 380,000 印数 0001—7,600 定价 (7) 年 2.00

1959年6月第1版 1959年6月第1次印刷

序 言

高等通訊工程学校无綫电系的学生,除其他課程外,还学习无綫电測量課程。要向讀者推荐的这一本书,是按照这门課程的教学大綱写成的。这本书是根据作者在莫斯科电訊学院多年来讲授无綫电測量这门課的教材編写而成的。

根据所积累的教學法經驗,無論在講課時也好,或者在准备出版这本书時也好,作者都是从下列見解出发的。

第一,本課程的任务是使学生能掌握在无綫电技术測量实践中所遇到的主要物理量的基本測量原理和方法。至于測量設備的完整电路图及其結構的描述,則应当是学生作实验時所使用的專門參考資料的任务。企图用一个教本来同时解决上述两个任务,無論从原則性的特点来考虑,或从这样的教本将有不能容許的巨大篇幅来考虑,都不是适宜的。

第二,如果說,把在較低的无綫电頻率和在超高频時的主要物理量的測量方法分开来叙述,对于专题性質的刊物是完全可以的話,那末对現代的无綫电測量教本來說,这样的划分在教學法上是不正确的。反之,应当向學生指出:基本无綫电測量的原理并不隨頻率範圍而改变,而当頻率範圍扩展时,主要是測量設備元件的結構形式有所改变而已。但是不能不指出,丰富的材料与本书有限的篇幅会造成解决后一任务的巨大困难;由于这个原因,許多問題必須讲解得非常精簡。

第三,与一般采用的講課次序不同,作者認為从电子示波器一章开始讲授在教學法上更为正确。这一点可以这样来解释:在現代无綫电測量技术中示波器是应用得极为广泛而又多样化的,因此为了使學生在学习課程的过程中不致发生疑難,并为了避免多余的重复起見,应

該把这一章看作为課程的緒論。

对于开始学习基本无綫电测量的原理和方法的学生來說，他們在以往讀过的課程中所已熟知的、关于无綫电测量中应用到的供电电源的知識，是完全够用的了。因此，电源这一章可以放在书本的末尾，以免不分散学生对課程的中心部分的注意力。

作者指望这本书不但可作为高等通訊工程学校及其他相近的高等学校的学生的教科书，而且对于广大的无綫电专家們在无綫电测量範圍的实际工作上也会有所帮助。

作者謹对薩馬意罗(К. А. Самойло)，寺拉梯涅可夫(С. А. Злотников)，和华里妥夫(Р. А. Валитов)三位副教授致以謝忱，他們的批評意見促使了这本书的改进。

讀者的批評或建議，請寄莫斯科市中心区清池大街2号国立电訊书籍出版社(Москва-центр, Чистопрудный Бульвар, 2, Связьиздат)，作者将不胜感謝。

列梅茲(Г. А. Ремез)

目 录

序 言	v
第一章 电子示波器	1
1.1. 引言	1
1.2. 低压电子射线管	2
1.3. 示波器的放大器和电源设备	12
1.4. 交流电压在电子射线管中的作用	14
1.5. 交流电压波形的观察	23
1.6. 示波器的典型方框图	53
1.7. 同时观察几个波形图	55
第二章 音频和高频电流的测量	58
2.1. 高频电流测量的特点。对高频安培计提出的基本要求	58
2.2. 热栈式安培计	60
2.3. 热电式安培计	61
2.4. 热电式仪表误差的主要来源	67
2.5. 强电流的测量	73
2.6. 高频安培计的校准	78
第三章 音频和高频电压的测量	83
3.1. 对高频伏特计所提出的要求	83
3.2. 热电式伏特计	85
3.3. 静电式伏特计	87
3.4. 电子管伏特计	89
3.5. 具有半导体整流器(固体整流器)的伏特计(氧化铜伏特计)	133
3.6. 晶体检波器用来测量高频电压	136
3.7. 电子管伏特计和氧化铜伏特计的校准	138
第四章 功率的测量	140
4.1. 概述	140
4.2. 音频与高频功率测量方法的一般特点	142
4.3. 利用具有平方律特性的系统来测量功率	144
4.4. 吸收式瓦特计	146
4.5. 通过功率的测量	165
第五章 频率的测量	175
5.1. 频率的分类	175

5.2.	頻率标准	176
5.3.	音频的測量	179
5.4.	射頻的測量	189
第六章	相位的測量	243
6.1.	概述	243
6.2.	測量两电压間的相位移的示波器法	244
6.3.	利用和差法測量相位	250
6.4.	利用补偿法測量相位移	257
6.5.	直接讀数的双路相位計	259
6.6.	利用頻率变换法測量相位移	261
6.7.	移相器	264
第七章	振蕩的頻率分析. 非直綫性畸变的測量	275
7.1.	引言	275
7.2.	周期振蕩的諧波分析	277
7.3.	非直綫性系数的測量	286
第八章	調制的測量	295
8.1.	調幅深度系数的測量	295
8.2.	調頻的測量	309
8.3.	調幅发射机是否存在有調相的檢驗	323
第九章	集中常数和分布常数电路基本參量的測量	327
9.1.	标准电容、电阻和电感	327
9.2.	电容、电感和电阻的基本測量方法	335
9.3.	測量互感、电容及电感的几种补充方法	377
9.4.	具有分布常数的系統的基本參量的測量	381
第十章	場强的測量	413
10.1.	概說	413
10.2.	場强指示器	419
10.3.	場强仪	420
第十一章	电源. 衰减器	432
11.1.	直流电源	432
11.2.	对交流电源提出的基本要求	432
11.3.	音频发生器	433
11.4.	射頻发生器	443
11.5.	矩形电压发生器. 脉冲发生器	448
11.6.	衰减器	456
主要参考书目		464

第一章 电子示波器

1.1. 引言

用以描繪或攝制所研究的交变电压或电流的瞬时值图形的仪器称为录波器。而示波器则是用来使人們能用眼睛观察所研究的交变电压或电流的仪器。差不多每一个录波器都可以当作示波器来用,反之,差不多每一个示波器都可以当作录波器来用。因此,在本书中,录波器和示波器两个术语不加以特别区分。

示波器分为两类:有惯性的和无惯性的^①。这样的示波器是属于有惯性之列的,即在其中所研究的电压或电流作用于具有大惯性的动作系统上。由于这个原因,这类示波器只能用于約 10 千赫以下的低频范围。在“电磁测量”课程中所研究过的磁电式(回綫式)示波器就是这类示波器的最常見的型式。

所謂电子示波器,它是属于无惯性示波器之列的。在电子示波器中,利用高度聚焦的电子流(射綫)来记录所研究的物理过程。电子流中的电子以高速向复盖着荧光剂的一个面(荧光屏)运动。在电子射綫撞击到屏上的地方,形成了一个明亮的光点,这光点起着和磁电式示波器中的光点同样的作用。

但是,与磁电式示波器不同,电子示波器荧光屏上光点位置的移动是由于电场或磁场对于电子射綫作用的结果而产生的。因为电子射綫对于这种作用的反应实际上是无惯性的(甚至在相当高的频率时亦然),所以利用电子示波器能够研究比利用磁电式示波器时频率高得多

① 不要以为无惯性的示波器是绝对没有惯性的仪器,它也是有惯性的,不过只是在非常高的频率时才会出现惯性罢了。

的交变过程。但在非常高的频率时,电子示波器就不是完全没有惯性的设备了。

电子射线示波器的发展应当大大地归功于祖国(指苏联——译者注)的研究者们。早在1900—1904年波波夫(А. С. Попов)就利用电子射线管来从事于电磁振荡的频率和波形的研究。在1907年罗辛格(Л. Б. Розинг)首先提议采用电子射线管作电视用。在同一年曼吉尔斯坦姆(Л. И. Мандельштам)首先提出锯齿波扫描器的概念和电路。罗兹斯基(Д. А. Рожанский)曾研究了射线管的许多重要结构元件。

苏联的制造者和研究者们曾创造了一系列新颖的电子射线管结构和示波器设备的电路。例如,早在1924年,奥斯特罗乌莫夫(Б. А. Остроумов)提出了一种新颖的电子射线结构。在巴列夫(И. П. Полев)的领导下,发明并生产了充气的以及有聚焦电极的КОП型电子射线管的工业样品。后来КОП型管又被扬车夫斯基(К. М. Янчевский)所改进。

在最近的关于在示波器的理论和技术方面的工作中,应该指出维克新斯基(С. А. Векшинский),车汉诺维奇(В. М. Цеханович),阿斯特里恩(В. А. Астрин),米哈意罗夫(В. А. Михайлов),肩莫法也夫(Л. В. Тимофеев),格林贝尔格(Г. А. Гринберг)等人的工作,特别是斯切可里涅可夫(И. С. Стекольников)的工作,后者在他亲自制造的示波器上创造了描繪速度的新纪录。现在,在苏联研究出了各种用途的极臻完善的电子射线管,以及许多型式的示波器设备。

1. 2. 低压电子射线管

А. 电子射线管的型式

作为电子示波器基本元件的电子射线管可分为两类:高压管和低压管。在无线电技术测量中,无例外地一律采用低压管,这种管的特征

是具有热阴极。因此,下面只描述低压管。

低压电子射线管本身是一个密封的、形状特殊的玻璃管子,管内的空气已被抽出。在管中安置:1)电子枪,它是一个用来造成具有高速的窄细电子射线的装置;2)用来控制射线的装置;3)涂在管底内壁的荧光层,它起着屏的作用,光点就是在它上面出现的。

低压电子射线管分为充气的和真空的两种。其间的差别是在于电子射线聚焦方法不同。但在目前充气管已不用了。

根据射线的控制和聚焦的方法,真空管又分为两类:1)利用电场来实现电子射线聚焦和控制的管子;2)利用磁场来实现电子射线聚焦和控制的管子。用磁场电场混合控制电子射线以及把它聚焦也是可行的。

用电场来控制电子射线并使其聚焦时,对产生这个电场的电压电源来说,它所受的负载要比用磁场聚焦和控制时的小得多。这一点对于射线的控制来说特别重要。照例,为了利用被研究的电压以及避免不希望有的反应起见,与被研究的电压电源相连接的电子射线管的控制机构,必须使前者所受到的负载要尽可能轻一些。此外,在用电场控制的射线管中,射线的偏转在非常宽的频段内都正比于作用的电压。

在磁场控制的电子射线管中,利用电感线圈作为控制机构,射线的偏转正比于流过线圈的电流。因此,当把大小不变而频率不同的控制电压引入到这样的机构时,射线的偏转将反比于频率,这就可能在测量时招致显著的误差。由于这个原因,在为测量用的示波器中,只采用利用电场聚焦和控制的电子射线管。

5. 电子射线管的装置

用电场聚焦和控制的最典型的现代电子射线管,其装置概略地示于图1.1。用来形成射线的电子枪由一组电极组成,这些电极以字母 K , M , A_1 和 A_2 来表示。发射电子的装置 K 本身是一个间接加热的氧化

物阴极。阴极的发射面尺寸要做得尽可能小而且要有徑向对称的形状,以保证得到窄細的电子束。

电极 A_1 称为第一阳极,做成圓柱形(或盘形),它的軸綫与射綫管的軸相重合。有好几个間壁(中心穿孔的膜片)橫截第一阳极的軸綫而放置。对阴极而言,在第一阳极上加有約几百伏的正电压。由阴极发射出来的电子进入第一阳极的加速電場后,便作束状散开而向第一阳极运动。这时,有一部分电子落到第一阳极,形成第一阳极电路內的电流;而穿过阳极膜片小孔的那些电子,則沿着射綫管的軸向荧光屏繼續前进。在电子撞击到屏上的地方就产生光点。

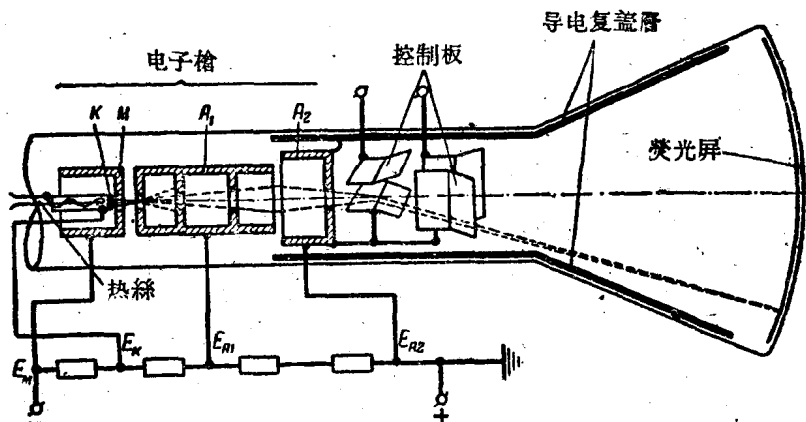


图 1.1 用静电控制和聚焦的电子射线管装置概略图

为了要得到清晰的波形,荧光屏上的光点必須足够亮,而且它的直徑要尽可能的小。当充分集中的电子射綫很窄細,而且以高速度到达荧光屏时,就可以达到上述的要求。电子射綫的集中借助于調制电极(調制极) M 来实现,它是一个圍着阴极的圓柱。在圓柱前面突出的一边上盖上一块膜片,在膜片的中央开了一个圓孔。調制极对于电子流大小的作用与电子管內的控制栅极相似。因此,当变动这电极与阴极相对的电位时,通过調制极的电流的数值就改变,結果荧光屏上的光点的亮度也就改变了。通常在調制极上加上不大的、对阴极而言是負的

电压。

第二阳极 A_2 是一个短圆柱，在对荧光屏的一端由一块膜片封盖起来，膜片中央有一个不大的孔。第二阳极紧置于第一阳极的前面，并且通常与“地”(机壳)相连接。在第二阳极上加有一个比第一阳极更高的正电压(约1—5千伏)。

借助于阳极 A_1 和 A_2 的电场，电子射线的电子获得所需的速度，此外，电子也可在射线管的荧光屏上聚焦。电子聚焦的原理可表述如下：在控制电极和第一阳极之间，以及在第一阳极和第二阳极之间产生了电场，这电场的等位线的布置见图 1.2a。电子射线的电子力求沿着电力线来运动，或者同样可以说，电子力求垂直于这些复杂电场的等位线来运动。因此，在等位线凸向阴极的那一部分电场里，电子都向着射线管的轴线偏转，也就是说，电子被聚集成一条更窄细的射线。在等位线凹入部分是朝着阴极的那一部分电场里，电子则偏离开射线管的轴线。

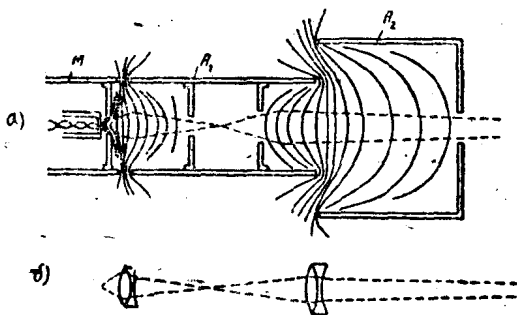


图 1.2 电子射线管内电场的等位线

上面所提到的每一个电场都构成了一种和两片光学透镜相似的、并称为静电电子透镜的系统(图 1.26)。在上述每一个电场中，等位线是用它自己的凸出部分朝着迎面飞来的电子的那一部分电场，相当于一块聚焦的双凸光透镜，而等位线是用它自己的凹入部分朝着迎面飞来的电子的那一部分电场，则相当于一块发散的双凹光透镜。借助于射线管各电极的适当的结构，以及借助于各电极之间电位差的选择，就

可达到上述装置的聚焦作用强于发散作用。

因为射綫管的結構有着軸对称性，那末在正确地选择各电极間的电位差的条件下，射綫的电子就和射綫管的軸相交——电子在荧光屏上的一个点上聚焦。在这种情况下，在荧光屏上就出现一个直径很小的明亮的光点。

在实际运用的条件下，上述的电場图只能用調节射綫管各电极电压的方法来改变，此外，通常只用改变称为聚焦阳极的第一阳极上的电压来实现射綫的聚焦。

上述电子枪的缺点在于調节調制极的电位(为了改变光点的亮度)会影响聚焦，而在改变第一阳极的电位来聚焦时，又会在一定的程度上影响光点的亮度。除此之外，落到荧光屏上的最大电子流是比较小的，因此光点的亮度并不太大。

具有三个阳极的电子射綫管(图 1.3)是上述电子枪的一种变体，在这种电子枪里，上面所指出过的缺点都不存在了。附加的阳极 A_3 安置在調制极和第一阳极(聚焦阳极)之間。它通常具有盘形或浅杯的形状，和第二阳极相連接。因为阳极 A_3 直接位于調制极 M 之后，所以在介于它們之間的区域中，电子获得了一种与第二阳极的电位相应的速度，因而在調制极为零电位的情况下所能得到的最大电流之值就增大了。此外，电极 A_3 的作用如同一个屏蔽罩一样，因而很显著地减弱了第一阳极 A_1 的电位对現在在調制极 M 和电极 A_3 之間形成的那个静电透鏡的影响。由于这样，第一阳极电压的改变并不会影响光点的亮

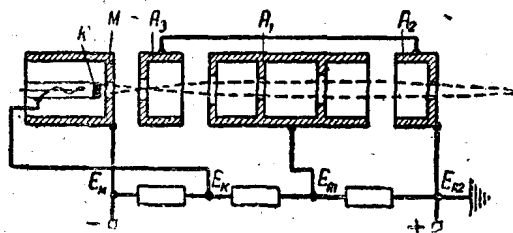


图 1.3 具有加速电极的电子枪的裝置概略图

度。

人們常常把射線管的玻璃管泡的內表面塗敷上一層導電層（金屬或者是石墨的膠狀溶液——即所謂石墨油），一直塗敷到差不多到熒光屏為止，並且在電方面上把這導電層和第二陽極相連接。因此在第二陽極之後的空間里，加速電場是不存在的。和第二陽極相連接的、因而也就是和地相連接的導電層，可把偏轉板屏蔽起來以免受外界場的影響，同時它也中和掉那些從熒光屏被打擊出來的二次電子的影响。在沒有導電層的情況下，這些電子形成空間電荷而將射線管的管壁充電，這樣就對電子射線的聚焦起着不良的影響。

為了控制電子射線，在第二陽極之後（如圖 1.1 所示）裝置有兩對所謂控制（偏轉）板，它們構成了兩個相互垂直放置的、電容量極小的電容器。這兩個電容器的軸綫都和射線管的軸相合。人們常常把每個電容器的一片極板在射線管內和第二陽極相連接，並把這個公共點接地。在某些類型的射線管里，每一片極板都在管外面有一個獨立的引綫。

如設每個電容器的兩偏轉板都相互平行（圖 1.4）並且其間的电位

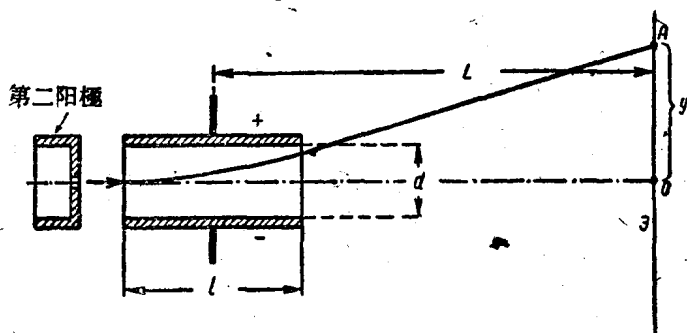


圖 1.4 偏轉板電場對電子射線的作用

差等於零的話，那麼通過第二陽極的出口而具有速度 v 的射線電子，將沿射線管的軸綫運動並降落在熒光屏 $\mathcal{O}$ 上的點 O 。現設兩偏轉板之間存在有某個恒定的電位差。由於這個結果，在偏轉板之間就形成了一

个电场,在第一次近似来说,这个电场可认为是均匀的,并且它的电力线是垂直于偏转板平面来分布的;在偏转板之外电场等于零(我们认为边缘效应等于零)。因为这个场与电子射线的电子运动方向相垂直,电子就朝着那个具有较高电位的偏转板的那一边偏转。这样,在两偏转板间的空间内,电子就沿抛物线运动。一当从这个空间飞出,电子射线就开始沿着抛物线在那一飞出点上的切线而运动,也就是说,它将在和射线管的轴线成某一个角度的方向上进行直线运动而降落在荧光屏上的点 A 。这个 A 点距离光点的原始位置有一段距离 y 。理论上的计算指出,光点在荧光屏上的偏转量可按下列公式来决定:

$$y = \frac{1}{2} \frac{U_y}{d} \cdot \frac{lL}{U_a}, \quad (1.1)$$

其中 U_y 是加在偏转板上的电压, l 是偏转板在射线管轴线方向上的长度, L 是偏转板中心到荧光屏的距离, d 是偏转板之间的距离, U_a 是第二阳极对于阴极的电压。 l , L 和 d 的尺寸应该用同样的单位来表示;偏转量 y 也要用这些单位来量度。

在实际上,由于电容器存在边缘效应,射线的偏转量就和按公式 (1.1) 所计得的稍有差异。但是,在实际上只有在射线离开射线管的偏转量大时,也就是说,在射线很接近(距离约为 0.5 毫米)偏转板而通过时,这个差异才被观察出来。

上面所列入的公式的物理意义是很明显的。事实上,偏转板的长度 l 愈长,电子射线所走过的、受到场的偏转作用的路程就愈长,并且光点在荧光屏上的偏转量就愈大。电容器极板间的距离 d 愈小,在其他条件相等的情况下,极板间的场强 $E = \frac{U_y}{d}$ 就愈强,因而电场对电子射线的偏转作用也就愈大。但是,根据下列原因,显著地把 l 增加和把 d 减小(为了得到射线的大的偏转量)是不可能的。第一,这样就会增大极板间的电容量,而这就限制了示波器的应用,特别是在高频率上的应用。第二,电子射线有落在极板上的危险。因此,为了获得大的射线

偏轉量，人們常常把偏轉板彼此張开一个角度来安置或者使它具有如图 1.1 上所示的形状。

从公式(1.1)可見，荧光屏放置得离偏轉板愈远，則在其他条件相等的情況下，偏轉量 y 也将愈大，这一点显然可从对图 1.4 的研究来得到証实。但是，把距离 L 作显著的增加是不可能的，因为这会使射线的聚焦变得困难并使荧光屏上光点的清晰度变坏。此外，从运用的观点來說，过大的增加 L 会使仪器很不方便(射线管的长度增加)。

从公式(1.1)也可看出，阳极电压 U_a 愈大，光点在荧光屏上的偏轉量就愈小。这一点可用随着电压 U_a 的增高，电子的速度也增高的理由来解釋；此时偏轉电场对电子作用的持續時間减小，因而电子的运动轨道也就甚少变化。与此同时，电子速度的增大就提高了光点的亮度。这样一来，为了增进射线管荧光屏上图形的亮度起見而把电压 U_a 提高，就会使图形的尺寸减小。反之，当减小电压 U_a 时会增大图形的尺寸，但是光点的亮度就会下降并且聚焦变坏。

在做好的射线管里， l 、 L 和 d 的尺寸都是不变的，因此，如果該射线管是工作于第二阳极的电压为固定值并等于 U_a 的情况下，那末公式(1.1)就会具有下列的形式：

$$y = h_y U_y, \quad (1.2)$$

其中 $h_y = \frac{lL}{2dU_a}$ 是一个常数。

比例系数 h_y 称为射线管的静态电压灵敏度。如果在公式(1.2)內置 $U_y = 1$ 伏，那就可从該式求出 h_y 。在这种情况下，当第二阳极取一定的电压 U_a 时，射线管的电压灵敏度就是加 1 伏直流电压在偏轉板时光点在荧光屏上所得到的偏轉量(通常用毫米来表示)。在手册中列举出的射线管的灵敏度常常是在 $U_a = 1,000$ 伏的情况下求得的。

在有直流电压 U_x 加到第二对偏轉板的情况下，也会发生和上述类似的情景。这时，正比于电压 U_x 的光点的偏轉，是在与第一对偏轉

板加有电压时所得到的偏轉相垂直的方向上发生的。比例系数 h_x 是第二对偏轉板的电压灵敏度, 它如同第一对偏轉板的灵敏度一样, 也是由几何尺寸和阳极电压 U_a 来决定的。但是, 由于 L 的数值不一样, 它和 h_y 是稍有差异的。最通行的射綫管的灵敏度位在 0.1—0.5 毫米/伏的范围内。

借助于上面所提到的偏轉板来控制电子射綫称为垂直控制或水平控制 (又称 Y 軸或 X 軸控制)。偏轉板本身常被分別称为 Y -偏轉板或 X -偏轉板。因为被研究的訊号电压通常是加到 Y 偏轉板上去的, 人們也就常常称它們为显象偏轉板 (或称显象軸)。加到 X 偏轉板上的通常是在時間上按已知規律变化的电压。因此, 人們常常把它們叫做時間偏轉板 (或称時間軸)。

正如在上面所指出的, 为要得到一个更亮的光点而增大第二阳极的电压 U_a 时, 会使射綫管的灵敏度降低。为了消除掉这一个矛盾, 在近代的射綫管里, 人們很常使射綫电子經過偏轉之后还再受一次額外的加速。为了这个目的, 人們把射綫管的管子內壁上差不多一直涂敷到荧光屏为止的导电层分为两部分, 其間以一个寬度为 6—12 毫米的間段来隔开 (見图 1.5)。环绕在偏轉板周圍的那一部分导电层在管内

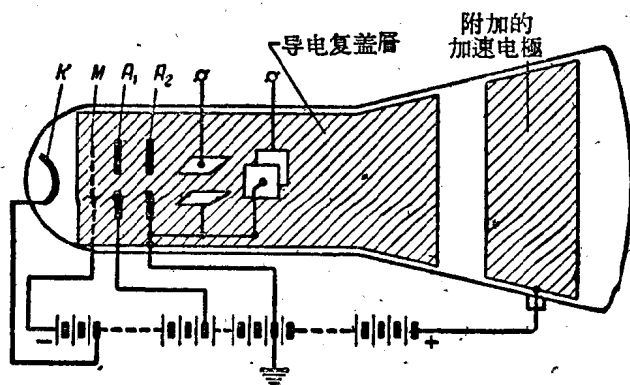


圖 1.5 具有后加速場电子射綫管裝置概略图