

課 題 名 称： 800KV 電纜型冲击电压
發生器設計，試制和試驗研究總結報告

單元課題名称：

研究報告類別：

密 級：

第一机械工业部電纜研究所

1964年 月 上 海

一、序 言

冲击电压发生器的主要元件——高压电容器绝大多数是采用具有集中参数特性的“脉冲电容器”（铁壳、胶木或瓷绝缘外壳的电容器），其回路参数计算和波形分析国外已进行了很多的试验研究工作，并有经典著作可直接采用。近十年来国内外某些电缆制造厂为介决大电容试品的冲击电压试验，亦曾利用长电缆（粘性浸渍纸绝缘电力电缆）来代替脉冲电容器而做成所谓“电缆型冲击电压发生器”，如西德柏林电缆厂于1956年试制了一台2500KV，70KW—S，22500 pF“电缆型冲击电压发生器”；上海电缆厂利用普通的35KV单芯铅包粘性浸渍纸绝缘电力电缆于1960年试制了一台1500KV，22.5KW—S，20000 pF“电缆型冲击电压发生器”。

“电缆型冲击电压发生器”具有分布参数特性，其波形分析和回路参数计算不同于集中参数的电容器型冲击电压发生器。有关“电缆型冲击电压发生器”波形分析及其回路参数计算，已于1962年通过模拟试验（将长电缆等值为由N级单元电容和电感组成的T型回路）结合数学推导加以分析计算（详见“电缆型冲击电压发生器模拟线路试验研究及波形理论分析”研究报告，1962年）。为了进一步试验研究“电缆型冲击电压发生器”的全面性能（包括模拟线路所无法模拟的各级之间的级间电容及其对地之间的杂散电容和回路杂散电感对冲击电压波形的影响），研究高参数冲击电压发生器采用电缆型的可能性，掌握有关冲击电压试验和量测技术，为今后高压电缆试验基地准备条件，以及介决开展有关低压电力电缆样品和高压电力电缆及附件模拟结构的冲击电压性能试验研究工作所需的冲击电压发生器等，本课题贯彻“自力更生”的方针，根据1962年所进行模拟试验所提供的数据，于1963年开始，利用现有35KV单芯铅包粘性浸渍纸绝缘电力电缆（长度约800M），自行设计、试制、安装了一套“800

KV電纜型冲击电压发生器”。经过一年来不断调整，试验和改进，目前已全部完成，并通过波形鑑定试验，其性能基本上符合预定要求。

二、 成套装置组成及其简要说明

本套冲击电压发生器系由下列主要部份组成：

1 冲击电压发生器主体

冲击电压发生器主体的结构形式主要是考虑如何尽可能的降低其总高度、放电回路尽可能短、各元件之间及其对地的杂散电容和电感尽可能小，以及整个结构的机械稳定性和调整维护方便等几个主要因素。

本冲击电压发生器主体系由4级相同元件（包括：高压电容器、充电电阻、放电电阻、阻尼电阻和导火球极及其传动机构等）组成（详见附图）。

高压电容器系由国产OCB型、35KV、 185mm^2 ，单芯（铝芯）、铅包、纸绝缘电力电缆（上海电缆厂1960年生产）组成，每级电缆长度为200M左右，分别绕在特制的托盘上（托盘外径2700MM，内径2000MM，利用3MM厚钢板焊在由12根10号槽钢焊成的星形构架上），每层绕6圈，共绕6层，然后置放在由65×65×8角钢焊成的正方形盘架上。电缆二端分别引出，利用特殊加工的粉质胶木园（半导体橡皮）作为引出套管（ $\Phi 80/50$ ， $l = 600\text{MM}$ ），以减小套管的尺寸。为了增强其绝缘强度，套管内注以低压电缆油。每级电缆二引出端相互短接（线芯与线芯短接，铅护层与铅护层短接），然后引至导火球极支柱相应的位置。为了改善电场分布，减少电晕效应，电缆托盘四周用圆弧形屏蔽罩（由厚度2MM铝板弯成）。每级电缆盘架利用4根电木筒作为支柱。根据电木筒沿面放电梯度（每级电缆之间承受直流电压200KV）和整体结构机械强度及稳定性计算，选择电木筒的尺寸为 $\Phi 240/220$ ， $l = 982\text{MM}$ 。利用特制的法兰盘使电缆盘架固定在电木筒上。由于结构中考虑由电木筒来承受整体结构的重量，电缆盘架只须承受每级电缆本身的重量，可大大降低

对电枢盘架机械强度的要求，特别是最底下一级电枢盘架，这对设计更高参数的冲击电压发生器是有一定的指导作用。

根据“电枢型冲击电压发生器模拟线路试验所获得数据”（详见“电枢型冲击电压发生器模拟线路试验研究及波形理论分析”研究报告，1962年）並考虑了今後进一步试验研究“电枢型冲击电压发生器”在各种不同迴路参数下冲击电压波形的要求，确定阻尼电阻的数值为 2200Ω 和 920Ω ，放电电阻为 13200Ω 。阻尼电阻分成二组，根据试验要求选用其中之一组。每组阻尼电阻均由相同的4级电阻单元组成。第一组阻尼电阻采用36#康铜丝绕制，每级电阻值为 550Ω ；第二组阻尼电阻采用33#康铜丝绕制，每级电阻值为 230Ω 。同样，放电电阻亦由相同的4级电阻单元组成，每级电阻值为 3300Ω ，採用36#康铜丝绕制。所有的电阻元件均绕制在胶木棒上，採用双层无感电阻绕法，使电阻元件电感值降低至最小的数值。每级阻尼电阻分别在50%，70%和85%电阻值的位置装有插座，电阻元件的一端带有软线和插销，可方便地在一定范围内调节电阻值。每级阻尼电阻和放电电阻分别依次交叉地悬挂在每级电缆的铅护层和导火球极支柱之间，维护调节较为方便。

充电电阻取决于冲击电压发生器总放电迴路时间常数，根据国外有关文献介绍充电电阻值一般为放电电阻值的20倍左右。考虑到迴路的对称性，充电电阻系由3级液体电阻（ $\Phi 60$ 长1000MM玻璃管内注满蒸馏水，二端均有铜电极並用环氧树脂密封）组成，每级充电电阻为 $25K\Omega$ 左右，分别固定在第一、二、三和四级导火球极支柱之间（导火球极支柱相应位置设有圆弧形的夹具，充电电阻二端可直接塞入），更换方便。

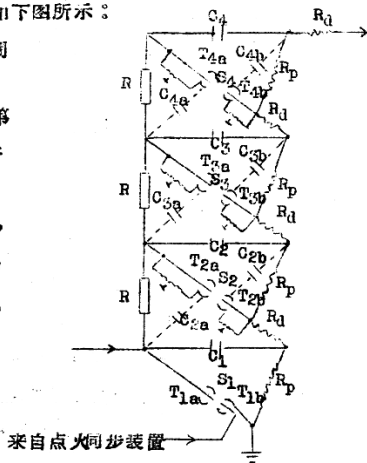
根据充电电压值（200KV）确定导火球极的直径为150MM。导火球极分为固定球极和可动球极，分别固定绝缘支柱相应的法兰盘上。绝缘支柱分别由4根 $\Phi 120/90$ ， $l=982$ MM电木筒垂直重迭组成（利用法兰盘连接）。固定可动球极的绝缘支柱考虑有成套的电气传动机构使可动球极

对固定球极作直线移动。球极间距离借助自整角电动机和伺伏电动机在控制桌上进行远距离指示和控制并在极限位置装有自动限位装置。

为了使冲击电压发生器与示波器之间同步，一般的冲击电压发生器均将第一级导火球极改用所谓“点火球极”（在球极中心轴上装上一根与球极绝缘的点火棒并在与另一球极相对的中心处挖一小孔，使点火棒与小孔周围保持一定的空间圆环间隙）利用外加脉冲信号来触发第一级球极击穿（脉冲信号施加于点火棒上使其周围间隙先行击穿而导致第一级球极击穿）和启动示波器。由于在相同直径和相同球极间距离条件下点火球极的击穿电压值大大低于一般的球极，因此，一般的冲击电压发生器各级球极之间的动作往往不十分可靠（如第一级导火球极已击穿而其他各级导火球极尚未击穿）。本课题采用T.R. Broadbent所介绍的方法，各级导火球极均采用“点火球极”，其接线原理图如下图所示：

当第一级球极 S_1 击穿后，空间电容 C_{2a} 耦合作用使第二级点火球 T_{2a} 的点火棒的电压降低，但由于第二级主电容器 C_2 对地电容的作用将使 T_{2a} 维持原有充电电压，因此一个过电压（其幅值取决于充电电压， C_{2a} 值、 T_{2a} 球和其点火棒之间的电容以及 C_2 对地的电容）突然呈现在 T_{2a} 的点火棒的圆环间隙上并使其击穿；同样，由于空间电容 C_{2b} 耦合作用使 T_{2b} 的点火棒的圆环间隙击穿。亦即，当第一级球极间隙

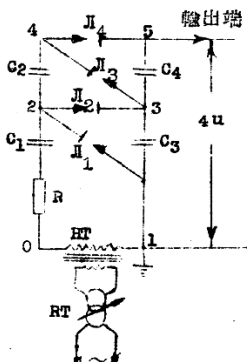
击穿时，第二级及其他各级球极间隙 $S_2 \dots S_n$ 立即迅速击穿（比



採用普通導火球級來得強烈和可靠)。點火線路的时间常數 $C_{2a}R$ 、 $C_{2b}R$ 等並不影響整個沖擊電壓發生器放電迴路的速度，因點火桿的圓環間隙一旦被击穿，電阻 r 立即被短接。電阻 r 的作用主要是使每一級球級在點火之前維持相同的電位。本沖擊電壓發生器 r 採用 4 只 $2K\Omega$ 碳膜電阻串聯。

2 充電裝置

充電裝置主要供給沖擊電壓發生器所需的直流高壓電源。根據沖擊電壓發生器每級高壓電容器所需的充電電壓，確定充電裝置的工作電壓為 200KV。考慮目前國內生產的高壓整流管其反峰電壓值僅達 140 KV，因此，充電裝置採用下列串級線路（四倍電壓串級線路）



圖中：

J_1, J_2, J_3, J_4 —— 高壓整流管

C_1, C_2, C_3, C_4 —— 高壓電容器

R —— 保護電阻

HT —— 高壓變壓器

RT —— 感應調壓器

高壓整流管系採用上海電子管廠生產的 $5E1-0.05/140$ 型整流管（四只）其反峰電壓值為 140KV；工作電流 50mA；燈絲電壓 $10.8 \pm 0.5V$ ，電流 $11.5 \pm 1.1A$ 。根據製造廠使用說明規定——“整流管必須浸在變壓器油內工作”，因此考慮有安裝整流管用的電木筒，其內盛滿變壓器油，二端用環氧樹脂密封。

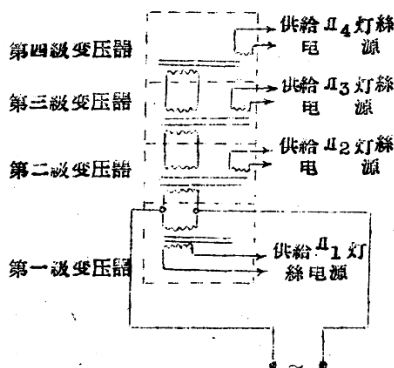
高壓電容器採用西安電力電容器廠生產的 $My-200/0.01$ 型脈沖電容器（四台），脈沖電壓 200KV 電容 $10000\mu F$ ，通過試驗證明，該

电容器允許在直流电压 50KV 下工作。电容器 C_1, C_2 和 C_3, C_4 分别相互重叠构成二个电容器柱，4 級整流管依次跨接于二电容器柱間相应的位置。

充电装置的主要关键是供給整流管灯絲加热用变压器的制作，根据所採用的綫路电位分布如下：

位 置	1	2	3	4	5
电 位	0	$0 \sim 2u$	$2u$	$2u \sim 4u$	$4u$

灯絲加热变压器的絕緣主要是根据各整流管灯絲所处的电位所決定，应保証在該电压作用下长期、可靠地工作。如採用单独的灯絲加热变压器分別供給相应整流管的灯絲电源，則必須制作能承受 $4u$ （相当于直流 200 KV）电压的絕緣变压器，在現有的条件下是比较困难的，（作了很多試驗絕緣均不能达到要求）因此，採用“单柱式串級灯絲加热絕緣变压器”（由四級变压器相互叠接），其原理图如下：



四級变压器相互串接，由第一級变压器依次供給第二、三、四級变压器所需电源，調节第一級变压器初級电压就可保証各級变压器輸出各整流

管所需的灯丝电压值。第一级变压器处于零电位，其绝缘不必特殊考虑，第二、三和四级变压器初、次级绕组之间绝缘应承受 $2u$ 直流电压（100KV），利用35KV变压器引出套管来承受这部分的绝缘（变压器铁心和初级绕组置放于套管内部，次级绕组直接绕于套管外壁）。变压器分别安装在电木筒内，其内盛满变压器油，电木筒二端均有法兰盘，采用环氧树脂密封。借助法兰盘使四级电木筒相互叠接，组成灯丝变压器柱。

充电装置所需的高压交流电源系由所内现有高压试验变压器（单相， $50\text{C}/\text{s}$ ，额定容量50KVA，初级电压380V，次级电压50KV）供电，采用感应调压器（单相， $50\text{C}/\text{s}$ ，额定容量25KVA，初级电压380V，次级电压 $0\sim 380\text{V}$ ）调节所需的电压。

为了测量充电装置的输出电压值，采用“电阻倍率器”与毫安表相互串联的测量系统，根据流过电阻倍率器的电流值即可得出相应的电压值。

倍率电阻器系由15个电阻单元组成。每一电阻单元均採用外涂有机漆的48# 鎳絡絲（ $\Phi 0.04\text{mm}$ ，单位长度电阻值 $810\Omega/\text{M}$ ）依次繞在圆柱形胶木棧盘上，层間絕緣採用 0.02mm 厚的漆綫，电阻值为 $20\text{M}\Omega$ 。每五个单元电阻相互叠接成一組件，放置在电木筒内，筒内注滿变压器油，二端均有法兰盘，採用环氧树脂密封，借助法兰盘使三个組件叠接成一整体。倍率电阻器总电阻值为 $300\text{M}\Omega$ 。选用1.5级毫安表（量程 $0\sim 1\text{mA}$ ）。

为了使冲击电压試驗結束後，高压电容器能迅速放电，确保工作人员的安全，尚考虑有自动接地器。自动接地器系由电动机帶动蜗輪、蜗桿等傳动机构，保証电源切除後接地棒迅速自动接地。

成套充电装置（高压变压器和调压器除外）均按裝在可移动的小車底架上，除了供給冲击电压发生器的充电电源外，尚可单独作为直流高压发生器用。

此外，考虑到EI—0.05/140高压整流管系浸在油内工作，无法直接观察其工作情况，因此，成套充电装置考虑有整流管灯絲断路自动保护

系統，当灯絲迴路故障时，整流管的高压迴路能迅速切断。

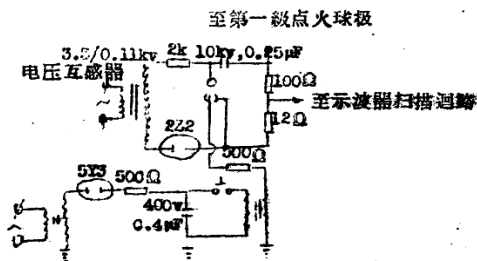
3 分压器

分压器的根本任务是不畸变地傳送冲击电压波形。設計制造分压器时主要应考虑：对地电容所引起的誤差、外部電場的干扰、低压量測迴路的影响和寄生电感所引起的測量誤差等。一般可分为电阻分压器、电容分压器和阻容分压器（每級电容器上並联相应的电阻）等三种类型，从頻率特性和測量誤差来分析，电容分压器和阻容分压器均較电阻分压器优越，特别是載波試驗和較高电压試驗，但电容分压器价格昂貴且較难购置結合本冲击电压試驗要求，基本上是測量800KV以下全波（ $1.5/40\mu S$ ）冲击电压波形，根据国外有关文献介紹採用电阻分压器仍然能满足要求（例如時間常数 $RC = 7\mu S$ 的电阻分压器所測得的 $1.7/40\mu S$ 冲击电压波形与电容分压器所測得波形相差无几，仅波首時間較之拉长3%左右），因此考虑採用电阻分压器。

为了消除由于电阻分压器对地寄生电容不均勻而引起測量波形畸变，分压器考虑由有效电阻和屏蔽电阻組成。为了便于繞制电阻和使用調节方便起見，电阻均分上下二段繞制。有效电阻採用 36# 鎳鉻絲分二層等节距反向繞制于 $\phi 41$ 胶木棒上，上下二段电阻值均为 9500Ω 左右；屏蔽电阻採用 36# 鎳鉻絲繞制（单綫反向兩排繞制）于由胶木板組成的园角形框架上，上下二段电阻值約 6100Ω 左右。有效电阻置放于屏蔽电阻框架的中心軸上。与示波器配合的低压臂电阻亦採用 36# 鎳鉻絲繞制胶木板上，为了匹配量測迴路方便起見，低压臂电阻考虑有100%，50%和25%电阻值的抽头，总电阻值 52Ω （与所选用同軸電纜的波阻抗相等）。

4 点火同步裝置

为了記錄完整的冲击电压波形，要求冲击电压发生器与示波器严密同步。本冲击电压发生器採用如下綫路的点火同步裝置：



示波器外来同步启动电压对冲击电压波形有很大的影响，如启动电压刚刚能启动，则示波器扫描速度在起始处附近就要发生畸变，致使冲击电压波形的波首变陡（实际的波形并非陡波），如启动电压再低些，示波器荧光屏上将呈现一根垂直的电压线，因此，必须保证同步启动电压有足够的数值才不至使所记录的冲击电压波形发生畸变，试验证明：采用现有点火同步装置同步启动电压太低，必须采用其他线路的点火同步装置。本冲击电压发生器目前只用点火同步装置来点燃第一级导火球极，并用天线将导火球极所发出的电磁波引至示波器的扫描回路，基本上能达到相互同步。

5. 控制桌

控制桌作为成套冲击电压发生器的控制中心。所有控制元件（如电源开关、电铃开关、高压变压器线路合闸和分闸按钮、升压和降压按钮、导火球极极间距离的增大和减小按钮以及同步点火讯号触发按钮等），指示测量元件（如各主要元件动作讯号指示灯、充电装置电压指示仪表和导火球极极间距离指示器等）和调节整流管灯丝电压用的调压器等均按装在控制桌面上，其他保护元件（如过电流继电器和熔断器等）和电磁开关（如磁力起动器、接触器和中间继电器等）均安装在控制桌内部，整个冲击电压试验的操作控制均集中在控制桌上进行。为了保护电器元件和连接导线免于遭受由于冲击电压试验过程中地电位抬高而致绝缘损伤，所有经过冲击电压试验区域而引入控制桌的连接导线均分别采用电容器（1KV

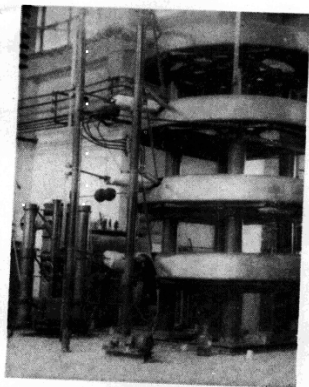
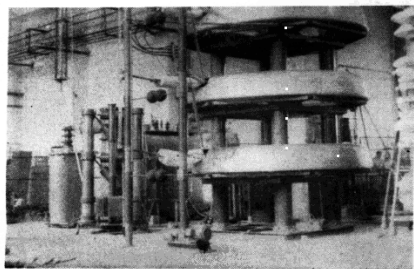
0.1 μF) 保护。

6. 隔离变压器

为了避免由于冲击电压試驗过程中地电位抬高而影响至供电系統的絕緣安全，分別考虑了一台单相和一台三相隔离变压器，其变压比均为1:1，容量約 5KVA 左右，初次級繞組絕緣能承受 50KV 冲击电压（根据有关文献介紹，冲击电压試驗地电位抬高的电压值約每 1000KV 抬高 30KV）。整套冲击电压試驗所須的电源均由隔离变压器供电。此外，示波器的电源亦由单独的隔离变压器供給。

7. 高压示波器

为了錄取冲击电压試驗的波形，自行装配了一台高压示波器（除示波管採用德国进口外，其它元件均採用国产产品或自行制作）。該示波器已进行整機調整試驗，基本上滿足技術要求。（詳見高压示波器試制总结报告）。



三、鑑定試驗

为了全面考核本冲击电压发生器的基本性能，在去年已对成套单件进行試驗的基础上，进行下列鑑定試驗，試驗綫路如图——3-1和图3-2所示：

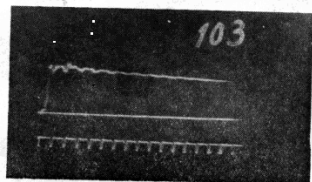
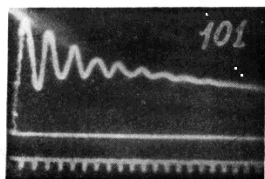
3-1. 迴路寄生参数測定

在正极性接綫条件下将阻尼电阻短接 ($R_d = 0$)，負荷电容 $C_L = 2350 \mu F$ 和 $C_L = 0$ 两种情况下分別錄取振盪波形，並根据振盪周期計算迴路寄生电感和寄生电容，其結果如下：

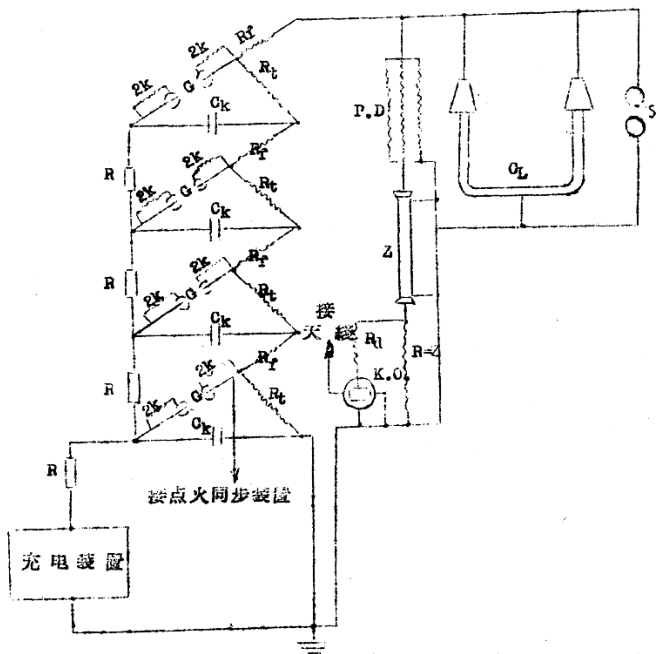
示波图编号	負荷电容 C_L (MMF)	振盪周期 T (MS)
101	2350	2
103	0	1.1

$$\text{迴路寄生电感 } L_0 = \frac{T^2}{4\pi^2 C_k C_L / (C_k + C_L)} \approx 50 \mu H$$

$$\text{迴路寄生电容 } C_0 = \frac{T^2}{4\pi^2 L_0} \approx 610 \mu F$$



(註：所有示波图单位时标为 $1.0 \mu S$)



Ск——主电容，4級電容，每級平均 57500 μF

R ——充电电阻, $20\text{K}\Omega$; R_f ——阻尼电阻 (共有两套不同数值);

R_t —— 放电电阻, 3300Ω ; p.D. —— 电阻分压器 (用第二组);

Z——同軸電纜，波阻抗 $=52\Omega$ ；

C_L —— 負荷電容 (N_1 、2、3 電纜樣品) ;

S —— 測量球級， $\Phi 500$ 毫米；

K.O. — 高压示波器。

图-5-2 800KV "电缆型冲击电压发生器" 负极性接线图

3-2. 正极性接线条件下波首时间与迴路参数关系曲线试验

在各种不同负荷电容值和阻尼电阻值下分别錄取冲击电压波形，並根据示波图直接測量其波首时间和波尾时间，然後分別繪制不同负荷电容值下的阻尼电阻与波首时间关系曲线（如图 3-2-1 所示），試驗結果如下：

示波图编号	负荷电容 C_L (MMF)	$\frac{C_K}{C_L}$	阻尼电阻 (Ω)	波首时间 / 波尾时间 (μs)
				5
1	2	3	4	5
201	4640 + 610	2.7	120	3.9/44
203	4640 + 610	2.7	158	4.25/48
205	4640 + 610	2.7	195	5.6/58
207	4640 + 610	2.7	230	6.5/63.5
209	3480 + 610	3.5	120	2.7/30
211	3480 + 610	3.5	158	3.7/39.6
213	3480 + 610	3.5	195	4.2/48.4
215	3480 + 610	3.5	230	5.1/56.3
217	2350 + 610	4.9	120	2.3/33.1
219	2350 + 610	4.9	158	2.9/39
221	2350 + 610	4.9	195	3.4/39
223	2350 + 610	4.9	230	4.2/45.7
225	1130 + 610	8.3	158	2.1/35.2
227	1130 + 610	8.3	195	2.3/36.1
229	1130 + 610	8.3	230	2.5/37.3
231	1130 + 610	8.3	288	2.8/38

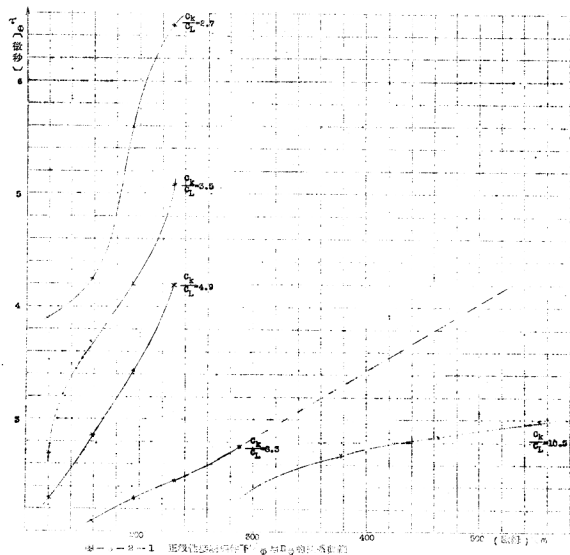


图 1-1-1 质量函数与下 α_k 与 α_l 的比值

1	2	3	4	5
233	760 + 610	10.5	288	2.3/36
235	760 + 610	10.5	378	2.7/38.3
237	760 + 610	10.5	465	2.9/43.2
239	760 + 610	10.5	554	3/47

注：以上試驗波尾电阻固定为 3300 Ω

