

设计参考手册

# 345千伏及以上超高压输电线路

〔美〕J. G. 安德生等著

电力

# 345 千伏及以上超高压输电线路

## 设计参考手册

[美] J. G. 安德生等著

电力工业部武汉高压研究所译

电力工业出版社

## 内 容 简 介

本书是在美国爱迪生电气研究所1968年出版的《超高压输电线路》的基础上重新编写的一本设计手册。它不仅是美国电气研究协会主办的特高压试验基地长期研究工作的结晶,而且还利用了世界各国研究基地的最新成果,较1968年版有不少新的发展,增添了不少新的内容。它是美国当前最新的一本输电线路设计手册。

书中主要论述345~1500千伏输电线路设计所涉及的大多数电气问题。主要内容有:超高压和特高压输电系统,分裂导线结构及其对线路的电气特性,电晕、电晕损失及其对无线电和电视的干扰、对可听噪声的影响,静电场效应及其对环境的生态影响,工频电压、操作过电压和雷电过电压的绝缘设计等。特别着重对特高压输电线路产生可听噪声的限制范围及其不致恶化环境的估计,以及对线路附近的静电场效应的评价等方面的设计标准作了较深入的综合论述。书中列有大量的数据、图表和算例可供从事超高压输电线路的设计、运行及科研部门的技术人员参考使用。

本书由电力工业部武汉高压研究所王焜明、章润陆、朱凤春、龚汝厚、罗卓林、黄继隆、容健刚、阎石城、白永思、王义基、徐喆明、李治德、马仁明和朱家骢等同志译校。

Transmission Line Reference Book  
345KV and above  
Electric Power Research Institute 1975

## 345千伏及以上超高压输电线路 设计参考手册

[美]J.G.安德生等著

电力工业部武汉高压研究所译

\*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 33.75印张 768千字

1981年6月第一版 1981年6月北京第一次印刷

印数 00001—3220册 定价 3.60元

书号 15036·4127

## 前 言 (摘译)

1968年,爱迪生电气研究所出版过一本《超高压输电线路》(EHV Transmission Line Reference Book),它是为美国电力工业编写的一本设计手册。该书是根据通用电气公司和公用事业工业主办的,在马萨诸塞州匹兹菲尔德的超高压试验基地从事多年研究的结果写成的。这项研究是围绕345千伏至735千伏超高压输电的设计和发展进行的。735千伏是当时预期在北美未来几年内会出现的最高交流输电电压。

但是,甚至在该书出版之前,就已看出735千伏不能代表北美输电电压的上限了。当时,美国电力服务公司的765千伏线路已在设计之中,并正考虑于八十年代初实现特高压(800千伏以上)输电。这种考虑是由以下因素促成的,即:电力系统间的联网、难于取得足够的线路走廊和在大负荷中心附近建设发电厂的困难。

认识到这种情况后,1967年,在爱迪生电气研究所和邦维尔电力管理局的资助下,超高压试验基地开始执行一项致力于把输电电压提高到交流1000~1500千伏范围的新的五年研究计划<sup>[1]</sup>。同时,还把该试验基地改称为特高压试验基地,并改由电气研究协会全面主办,以表示对这项更高电压范围的研究工作的重视。而通用电气公司转而作为该工作的主要承包商,负责为试验基地配备人员,并向受科研项目指导委员会指导的电气研究协会成员分发研究成果。

到了1971年,已明显地看出,特高压领域中的某些问题(特别是电晕对环境的影响)的研究,在原定的五年时间内不可能完成。事实上,对环境问题的日益重视,已引起许多研究重点上的重大改变。由于这个原因,在爱迪生电气研究所和邦维尔电力管理局的资助下,又进行了两年的研究,直至1973年。在后面这段时间内,田纳西流域管理局和美国公用动力协会也给予了额外的经费支持。

这项七年研究工作的目标是,写出一本新的输电设计手册,把原先的《超高压输电线路》扩充到1500千伏的特高压等级。因而急需一本贯穿345千伏以上整个系列电压的输电线路设计所涉及的大多数电气问题的手册,从而更新1968年版的设计手册使其适合新的要求,并扩大其使用范围。显然,特别需要对特高压输电线路产生可听噪声的限制范围及其不致恶化环境的估计,以及对特高压线路附近的静电场效应的评价等方面的设计准则作综合评论。

本书是这七年研究工作的结晶。象以前那本书一样,它不仅仅包括特高压试验基地的研究成果,而且还利用了全世界各研究基地的最新资料,把所有这些成果融合在一起,以尽可能广泛地包括多方面的观点。

要说明的是:书中所列出的特高压输电的数据,只是从单相试验中推算出来的,而三相试验验证,需留待1974年开始的三相研究计划完成之后。

即使出版了这本书,对特高压输电的研究仍在继续进行,而且在第一个实际运行的特

高压系统建成以后的很长时间内，也还需要继续进行研究。将来的研究结果无疑会对书中所列数据作某些修正，这是因为未来总是建立在过去的经验之上的缘故。本书中尚存在着某些问题，还不能用充分的技术知识得出明确的结果，而有待于进一步的研究。过去或者将来设计任何一条输电线路，要作到全面考虑每一参数或者完满地选择结论，是一件困难的事。实际上，设计人员往往是根据事物的“正面”或“反面”这样一种直觉来考虑设计的，而这种直觉或判断的运用，却能反映出设计人员是否是一位“优秀”的工程师。本书在遇到这些不确定的问题时，作者都试图指出其不确定性；然而，既然所有设计方案的决定都不可能等到有了全面的了解以后才作出——只要觉得对读者在作决定的过程中会有所帮助，还是提出了设计程序方面的建议。

从这本书的资料中可以得到的一个收获，就是交流输电电压尚看不出存在明显的上限。交流输电的问题总是随着电压的变化而改变的，而且电压越高困难也越大，这就需要我们进行更多的工作。现在看来唯一的限制便是人的独创精神——创造性地解决问题的能力 and 是否愿意面对新的情况——以及人们对提高输电电压必要性所作的真实评价。

#### 单位制

从1973年准备本书的手稿以来，美国在向公制单位过渡方面正取得缓慢而稳步的进展。目前，我们仍处在这样的过渡阶段，在这个阶段要完全遵循英制或者公制，而又不致给许多读者造成混乱是有困难的。作者在所有实用单位中采用了国际制(S.I.)，但在因长期使用习惯而非用不可的场合，也不排除英制单位。实际上，所有与电气有关的量都采用米·公斤·秒制(MKS制)，其中电压用伏特，电流用安培，距离通常用米，电荷用库仑，电场和磁场强度分别用伏/米和安·匝/米，电感用亨利，电容用法拉，重量用公斤。真空的介电常数为 $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ 法/米，真空的导磁率为 $4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米。在那些能简化计算的地方，我们使用了上述单位的倍量（如千伏/厘米，千伏/米，千安等）。这些单位间的换算表列于第2章中的附录2-2，与之有关的换算关系式可在各章中找到。

#### 参 考 文 献

- [1] Anderson, J.G., "Overhead Lines and Substations, Ultra-High Voltage Transmission", Phil. Trans. R. Soc., Lond. A. 275, 139—151 (1973), Printed in Great Britain.

# 目 录

## 前言 (摘译)

## 参考文献

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 第1章 特高压试验基地——研究输电的设施J.G.Anderson & J.R.Doyle .....                    | 1   |
| 1-1 引言 .....                                                          | 1   |
| 1-2 特高压试验基地设施简介 .....                                                 | 2   |
| 1500千伏特高压变压器    900千伏避雷器    电晕损失测量设备    特高压母线系统                       |     |
| 特高压试验线路    电晕试验笼    绝缘子污秽研究    无线电噪声、可听噪声和气象仪                         |     |
| 表    特高压绝缘子试验杆塔和5兆伏冲击电压发生器                                            |     |
| 参考文献 .....                                                            | 12  |
| 第2章 超高压和特高压输电系统C.J.Truax .....                                        | 13  |
| 2-1 引言 .....                                                          | 13  |
| 输电的作用                                                                 |     |
| 2-2 美国发电和输电的发展 .....                                                  | 13  |
| 负荷增长的历史    负荷增长的预测    架空输电线路的英里数    最高输电电压                            |     |
| 2-3 影响超高压和特高压输电发展的因素 .....                                            | 16  |
| 发电机组和发电厂规模的经济性问题    坑口发电厂    水力发电    原子能发电                            |     |
| 地下输电    公共走廊    生态学问题                                                 |     |
| 2-4 超高压和特高压线路的特性 .....                                                | 18  |
| 稳定问题    波阻抗负荷    分裂导线    杆塔设计                                         |     |
| 2-5 超高压和特高压设计应考虑的主要方面 .....                                           | 20  |
| 绝缘    导线结构    天气的影响    设计步骤                                           |     |
| 附录2-1 超高压杆塔几何尺寸和线路特性 .....                                            | 23  |
| 附录2-2 英制单位与国际制(SI)单位换算表 .....                                         | 64  |
| 参考文献 .....                                                            | 67  |
| 第3章 超高压和特高压导线的结构和线路的电气特性A.N.Chaston, J.J.Laforest & A.R.Ramirez ..... | 68  |
| 3-1 引言 .....                                                          | 68  |
| 3-2 导线的表面电位梯度 .....                                                   | 68  |
| 图解法——单回路    图解法——双回路    分裂导线上电位梯度的分布    不对称分裂                         |     |
| 导线的电位梯度                                                               |     |
| 3-3 分裂导线的电抗和电阻 .....                                                  | 86  |
| 引言    导线的类型和材料    感抗    容抗    波阻抗和波阻抗负荷(自然功率)                         |     |
| 电阻    避雷线    等值单导线                                                    |     |
| 3-4 用电抗器补偿的平行输电线路的谐振电压 .....                                          | 113 |
| 问题的陈述    分析    讨论和小结                                                  |     |
| 3-5 输电线路的不平衡 .....                                                    | 119 |
| 静电不平衡    单回路的电磁不平衡    不换位平行双回路线路的不平衡    小结                            |     |

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3-6 平行线路上的感应电压 .....                                                                                                        | 132 |
| 不带电回路上的静电感应    不带电回路上的电磁感应                                                                                                  |     |
| 3-7 分裂导线的机械性能 .....                                                                                                         | 136 |
| 分裂导线的动力学特性    有关分裂导线机械性能的文獻目录                                                                                               |     |
| 附录3-1 电场计算 .....                                                                                                            | 143 |
| 附录3-2 分裂导线的感抗 .....                                                                                                         | 146 |
| 附录3-3 分裂导线的容抗 .....                                                                                                         | 149 |
| 附录3-4 导线的各种表格的计算 .....                                                                                                      | 151 |
| 附录3-5 ABCD分析法 .....                                                                                                         | 153 |
| 附录3-6 谐振电压的静电分析法 .....                                                                                                      | 155 |
| 附录3-7 不平衡系数方程 .....                                                                                                         | 158 |
| 参考文献 .....                                                                                                                  | 163 |
| <b>第4章 交流输电线路的电晕现象M.G.Comber &amp; D.W.Deno</b> .....                                                                       | 164 |
| 4-1 引言 .....                                                                                                                | 164 |
| 4-2 电晕的机理 .....                                                                                                             | 164 |
| 气体放电过程    汤森电子崩过程    直流电晕模式    交流电晕                                                                                         |     |
| 4-3 电晕损失的概念 .....                                                                                                           | 172 |
| 无电晕时的电场    有电晕时的电场——电晕电流    好天气下的电晕损失                                                                                       |     |
| 4-4 表面状况和大气条件的影响 .....                                                                                                      | 178 |
| 好天气下的电晕源    由导线附近质点产生的电晕    导线上水的影响    空气密度、湿度和风的影<br>响    表面状况的影响    表面处理——测量和结果                                           |     |
| 4-5 用单相线路和试验笼计算电晕效应 .....                                                                                                   | 187 |
| 电晕的产生和表面电位梯度    产生量    产生量的理论证明    测量方法    单相试验<br>的有效性                                                                     |     |
| 4-6 冲击电晕和操作波电晕 .....                                                                                                        | 195 |
| 参考文献 .....                                                                                                                  | 199 |
| <b>第5章 无线电干扰和电视干扰M.G.Comber &amp; G.W.Juette</b> .....                                                                      | 201 |
| 5-1 引言 .....                                                                                                                | 201 |
| 5-2 无线电噪声测量 .....                                                                                                           | 202 |
| 无线电噪声计    计权回路    表计响应——频带宽度和脉冲重复率    实际的带通特性<br>架空输电线路无线电噪声的测量                                                             |     |
| 5-3 噪声容许度的标准 .....                                                                                                          | 208 |
| 信噪比    无线电干扰容许度的标准    电视干扰容许度的标准                                                                                            |     |
| 5-4 导线设计原理 .....                                                                                                            | 213 |
| 天气条件    表面状况    分裂导线的几何形状                                                                                                   |     |
| 5-5 输电线路的噪声产生量 .....                                                                                                        | 216 |
| 对称的分裂导线在大雨下的无线电干扰的产生量    在其它坏天气条件下无线电干扰的产<br>生量    好天气下的无线电干扰的产生量    绝缘子串的电噪声的产生量                                           |     |
| 5-6 输电线路的无线电干扰设计数据 .....                                                                                                    | 221 |
| 无线电干扰场的计算    地面上的单导线    多相线路——传播的模式    离散的干扰源<br>在大雨下基本几何尺寸的设计曲线    参数变化的影响——单回路    参数变化的影<br>响——双回路    设计曲线应用举例    无线电干扰统计 |     |
| 5-7 输电线路的电视干扰设计数据 .....                                                                                                     | 241 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5-8 来自变电所的无线电噪声 .....                                                                                                               | 244 |
| 5-9 降低无线电噪声的方法 .....                                                                                                                | 246 |
| 附录5-1 地面上单导线的无线电干扰分析 .....                                                                                                          | 247 |
| 单一干扰源    多干扰源, 连续分布                                                                                                                 |     |
| 附录5-2 以模态量表示的输电线路干扰传播 .....                                                                                                         | 250 |
| 特征方程的模态形式    模态变换矩阵的确定                                                                                                              |     |
| 附录5-3 三相输电线路的简化无线电干扰分析 .....                                                                                                        | 252 |
| 参考文献 .....                                                                                                                          | 256 |
| <b>第6章 可听噪声</b> M.G.Comber & L.E.Zaffanella.....                                                                                    | 259 |
| 6-1 引言 .....                                                                                                                        | 259 |
| 6-2 可听噪声的定义和测量 .....                                                                                                                | 259 |
| 无规噪声和纯音    声压级——分贝    可听噪声计和微音器——计权网络    声的传播、<br>衰减、反射和叠加    输电线路噪声测量方法                                                            |     |
| 6-3 烦恼程度的评价 .....                                                                                                                   | 267 |
| 评定噪声的标准    输电线路噪声的评定    输电线路噪声的设计极限                                                                                                 |     |
| 6-4 导线设计的基本原理 .....                                                                                                                 | 270 |
| 天气条件    表面状况    分裂导线的几何排列                                                                                                           |     |
| 6-5 导线的噪声产生量 .....                                                                                                                  | 272 |
| 分裂导线中分导线上的噪声产生量    对称分裂导线的噪声产生量    120赫交流声的产生<br>量    干燥条件下的可听噪声    分裂导线几何排列的最佳化                                                    |     |
| 6-6 输电线路的可听噪声设计数据 .....                                                                                                             | 292 |
| 可听噪声——无规噪声的计算    杆塔、弧垂和避雷线的影响    可听噪声——交流声的<br>计算    对称分裂导线和基准线路几何排列的可听噪声设计曲线    线路参数变化的影响<br>——单回路    线路参数变化的影响——双回路    可听噪声统计值的计算 |     |
| 6-7 变电所内电晕引起的可听噪声 .....                                                                                                             | 312 |
| 基本电极形状的可听噪声产生量    变电所可听噪声的计算                                                                                                        |     |
| 6-8 减小可听噪声的方法 .....                                                                                                                 | 316 |
| 6-9 可听噪声与无线电噪声和电晕损失之间的相关性 .....                                                                                                     | 319 |
| 可听噪声分贝(A)与无线电噪声的关系    可听噪声交流声与电晕损失的关系                                                                                               |     |
| 附录6-1 下雨时的本底噪声 .....                                                                                                                | 321 |
| 参考文献 .....                                                                                                                          | 322 |
| <b>第7章 电晕损失</b> M.G.Comber & L.E.Zaffanella.....                                                                                    | 324 |
| 7-1 引言 .....                                                                                                                        | 324 |
| 7-2 好天气下的电晕损失 .....                                                                                                                 | 325 |
| 7-3 坏天气下的电晕损失 .....                                                                                                                 | 326 |
| 雨天的电晕损失    雾、雪和霜天气下的电晕损失                                                                                                            |     |
| 7-4 电晕损失的计算 .....                                                                                                                   | 330 |
| 电晕损失的天气模式    对特定气候区内降水量的调整                                                                                                          |     |
| 7-5 大雨时基准几何尺寸线路的电晕损失 .....                                                                                                          | 333 |
| 7-6 电晕损失计算实例 .....                                                                                                                  | 333 |
| 7-7 电晕损失与电阻损失的比较 .....                                                                                                              | 335 |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 参考文献 .....                                                                     | 336 |
| 第 8 章 架空输电线路和变电所的静电效应 D.W.Deno & L.E.Zaffanella.....                           | 337 |
| 8-1 引言 .....                                                                   | 337 |
| 8-2 地面电位梯度 .....                                                               | 337 |
| 感应电流和地面电位梯度之间的关系     静电场中物体的等值表示法                                              |     |
| 8-3 地面电位梯度的计算 .....                                                            | 339 |
| 一般方法     通用曲线     双回路     双回路的通用曲线     地面电位梯度的相位                               |     |
| 8-4 电流对人和动物的影响 .....                                                           | 345 |
| 感觉电流     二次电击电流     一次电击电流                                                     |     |
| 8-5 车辆和其它物体上电流和电压的预计 .....                                                     | 350 |
| 充电电流的计算     物体的对地电容     泄漏电阻     两个例题                                          |     |
| 8-6 强电场对人和动物行为的影响 .....                                                        | 359 |
| 参考文献中的成果介绍                                                                     |     |
| 8-7 燃料着火 .....                                                                 | 361 |
| 8-8 平行线路的静电感应 .....                                                            | 364 |
| 平行回路     避雷线上的静电感应     栅栏                                                      |     |
| 8-9 变电所内的静电场效应 .....                                                           | 366 |
| 8-10 总的意见 .....                                                                | 368 |
| 8-11 超高压和特高压线路净距的选择 .....                                                      | 369 |
| 8-12 电磁效应 .....                                                                | 371 |
| 附录8-1 靠近地面物体上的感应电荷的简化推导法 .....                                                 | 373 |
| 近似法的分析     证实近似法的试验结果                                                          |     |
| 附录8-2 用 1 平方米的测板测量电位梯度 .....                                                   | 375 |
| 附录8-3 用器身绝缘的携带式试验器测量电位梯度 .....                                                 | 377 |
| 电场电流的推导                                                                        |     |
| 参考文献 .....                                                                     | 380 |
| 第 9 章 绝缘设计的一般概念 J.D.Brown J.J.Laforest K.W.Priest C.J.Truax & D.D.Wilson ..... | 381 |
| 9-1 引言 .....                                                                   | 381 |
| 9-2 外绝缘与内绝缘 .....                                                              | 382 |
| 9-3 绝缘设计的平衡 .....                                                              | 382 |
| 9-4 雷电过电压 .....                                                                | 383 |
| 9-5 雷电的绝缘间隙的特点 .....                                                           | 384 |
| 9-6 操作过电压 .....                                                                | 385 |
| 合闸和重合闸     动态过电压     相间过电压     故障过电压     故障的切除                                 |     |
| 9-7 操作过电压绝缘间隙的特点 .....                                                         | 387 |
| 9-8 工频过电压 .....                                                                | 388 |
| 9-9 工频过电压绝缘间隙的特点 .....                                                         | 388 |
| 9-10 各种结果的配合 .....                                                             | 389 |
| 9-11 用暂态网络分析仪 (TNA) 分析暂态过程 .....                                               | 390 |
| 概念     功能     模拟比例系数     模拟部件     研究方法     准确度     小结                          |     |
| 9-12 用数字法解暂态过程 .....                                                           | 394 |

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 数字法的应用                                                                             |     |
| 附录9-1 不可用率 .....                                                                   | 396 |
| 附录9-2 拉格朗日乘子 .....                                                                 | 397 |
| 附录9-3 伯杰龙法 .....                                                                   | 397 |
| 附录9-4 等值电路 .....                                                                   | 398 |
| 参考文献 .....                                                                         | 400 |
| 第10章 工频电压下的绝缘 M. Kawai .....                                                       | 402 |
| 10-1 引言 .....                                                                      | 402 |
| 电力系统的污秽闪络    对超高压和特高压所要考虑的问题    污闪的现场研究    本章的内容                                   |     |
| 10-2 非污秽状况下各种绝缘结构的闪络特性 .....                                                       | 404 |
| 绝缘子和空气间隙    气象校正系数    空气密度的影响    湿度的影响    雨对清洁绝缘子的影响                               |     |
| 10-3 输电系统污秽性能的情况调查 .....                                                           | 409 |
| 地点污秽    地区污秽    污秽的类型和天气情况    反污秽措施                                                |     |
| 10-4 污秽试验方法 .....                                                                  | 413 |
| 引言    试验方法概要    对试验方法的讨论                                                           |     |
| 10-5 特高压试验基地的研究 .....                                                              | 416 |
| 引言    被试绝缘子    对湿润条件的研究    污秽绝缘子的闪络概率    试验电源                                      |     |
| 短串中各类绝缘子的性能    棒型绝缘子和支持绝缘子    在V型串中的性能    半导体釉绝缘子    与盐雾试验的比较    闪络强度与绝缘子长度的非线性关系  |     |
| 10-6 污秽闪络的机理 .....                                                                 | 432 |
| 单片绝缘子的闪络机理    长绝缘子串的闪络机理    讨论                                                     |     |
| 10-7 污秽情况下的绝缘设计 .....                                                              | 438 |
| 污秽情况的预计    绝缘子的选择    绝缘子设计                                                         |     |
| 参考文献 .....                                                                         | 442 |
| 第11章 操作过电压下的绝缘 J. G. Anderson J. J. Laforest K. W. Priest & L. E. Zaffanella ..... | 444 |
| 11-1 引言 .....                                                                      | 444 |
| 11-2 操作波闪络的主要变量 .....                                                              | 445 |
| 波形    极性    电极几何形状对操作波闪络强度的影响    气象条件对操作波闪络强度的影响    操作波闪络强度的统计波动                   |     |
| 11-3 操作波闪络试验方法 .....                                                               | 448 |
| 主要的变量    数据的编制                                                                     |     |
| 11-4 棒间隙的操作波闪络强度 .....                                                             | 451 |
| 棒-板间隙和垂直棒-棒间隙    水平棒-棒间隙                                                           |     |
| 11-5 杆塔窗口和边相间隙的操作波闪络强度 .....                                                       | 454 |
| 11-6 绝缘子串的操作波闪络强度 .....                                                            | 456 |
| 11-7 导线对塔柱之间的操作波闪络强度 .....                                                         | 457 |
| 11-8 在操作波下档距中央与接地物体之间的间隙(导线-平板间隙闪络强度) .....                                        | 458 |
| 异常闪络                                                                               |     |

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 11-9 变电所绝缘的操作波闪络强度和 Design .....                            | 460 |
| 水平的绝缘子串    变电所的支持绝缘子    导线相间的绝缘强度    相间距离的设计                |     |
| 地面对相—相同隙闪络强度的影响                                             |     |
| 11-10 基本间隙的比较 .....                                         | 466 |
| 11-11 操作波闪络数据校正至标准条件 .....                                  | 466 |
| 11-12 几何形状对操作波闪络强度的影响 (校正至标准条件) .....                       | 468 |
| 杆塔窗口的高度    杆塔的宽度    矩形窗口    绝缘子串                            |     |
| 11-13 波形对操作波闪络强度的影响 (校正至标准条件) .....                         | 472 |
| 11-14 湿度对操作波闪络强度的影响 (校正至标准条件) .....                         | 473 |
| 11-15 相对空气密度对操作波闪络强度的影响 (校正至标准条件) .....                     | 477 |
| 11-16 雨对操作波闪络强度的影响 (校正至标准条件) .....                          | 478 |
| 11-17 并联间隙的绝缘 .....                                         | 479 |
| 并联间隙的耐受概率    考虑并联间隙上电压衰减作用时的闪络概率                            |     |
| 11-18 设计程序 .....                                            | 484 |
| 近似的手算法    计算机辅助设计                                           |     |
| 附录11-1 标准偏差 .....                                           | 488 |
| 正态分布    超高压和特高压间隙的标准偏差值                                     |     |
| 附录11-2 临界闪络电压 ( $V_{50\%}$ ) 和标准偏差 ( $\sigma$ ) 的试验方法 ..... | 490 |
| 通常的方法    升降法    用升降法求 $V_{6.7\%}$ 20+20方法                   |     |
| 附录11-3 风偏角分布的计算方法 .....                                     | 490 |
| 风偏角与风速的函数关系    风速的统计                                        |     |
| 参考文献 .....                                                  | 494 |
| 第12章 超高压和特高压线路的防雷性能 J.G.Anderson .....                      | 496 |
| 12-1 引言 .....                                               | 496 |
| 12-2 准确度问题 .....                                            | 496 |
| 12-3 参数问题 .....                                             | 498 |
| 年平均雷暴日水平    雷击线路的次数    每平方英里的对地雷击次数    线路截获的雷击              |     |
| 雷击相导线的频数分布    雷击避雷线和杆塔的频数分布    雷击幅值和波头的频数分布                 |     |
| 12-4 输电线路杆塔和导线的雷电暂态响应的确定 .....                              | 510 |
| 档距中的闪络    杆塔电压                                              |     |
| 12-5 接地电阻 .....                                             | 512 |
| 杆塔接地电阻值统计分布的影响                                              |     |
| 12-6 超高压线路雷击跳闸率的逐步求解法 .....                                 | 517 |
| 12-7 超高压木杆线路的特殊性 .....                                      | 522 |
| 12-8 特高压线路由反击引起的雷击跳闸率的计算 .....                              | 523 |
| 12-9 特高压线路由反击引起的雷击跳闸率的计算举例 .....                            | 527 |
| 12-10 总的看法 .....                                            | 529 |
| 12-11 冲击强度的校正系数 .....                                       | 529 |
| 参考文献 .....                                                  | 530 |

## 第 1 章

# 特高压试验基地——研究输电的设施

J.G.Anderson & J.R.Doyle

### 1-1 引 言

由美国电气研究委员会 (Electric Research Council) 及其后继者电力研究所 (Electric Power Research Institute) 建立和指导的特高压试验基地 (Project UHV), 是一项投资为数百万美元的研究试验工程, 目的是取得有关超高压和特高压架空输电的设计知识。该试验基地位于马萨诸塞州匹兹菲尔德南面豪斯顿的山谷中, 环绕四周的新英格兰山使其不受大风影响, 并避开了严重震动等问题, 但同时又为试验基地提供了研究环境影响的大量雾、雨、雪和变化较大的温度等条件。在附近有通用电气公司高压试验室, 也是确定这一选址的一个重要因素, 而且由通用电气公司提供人员和设备, 并进行研究工作——所有经费都由爱迪生电气研究所、邦维尔电力管理局、田纳西河流域管理局和美国公用动力协会 (后两者从1972年起) 提供。本书中的数据主要——但不是全部——取自该试验基地。

与许多高压输电研究计划一样, 特高压试验基地并不是根据某一项主要计划而建立的, 而是根据时间和经费的允许情况而逐步建立起来的, 也就是说这是一个不断发展和改进的过程。它的前身是超高压试验基地 (Project EHV), 是一个由通用电气公司于1958~1964年投资建立的研究机构, 目的是为当时需要的400~750千伏超高压输电提供设计数据。1965年和1966年, 在爱迪生电气研究所和田纳西河流域管理局的支持下, 在超高压试验基地对超高压线路上的现象进行了1200万次以上的电气、机械和气象测量, 并编写了《超高压输电线路》, 1968年由爱迪生电气研究所出版<sup>[1]</sup>。该书详细叙述了超高压试验基地的情况以及对750千伏及以下电压等级的研究成果。

到了1966年, 发现超高压试验基地原有的高电压试验设施不能适应今后的发展需要。当时, 加拿大魁北克水电局已兴建735千伏输电线路, 美国电力服务公司的765千伏线路也在设计之中。根据发电机容量和输电电压的发展趋势, 以及人口增长和能源需要增加的趋势, 已有明显的迹象表明, 到80年代初期, 在北美就将需要特高压交流输电。因此, 在1966年就开始积极考虑美国将出现特高压输电的问题了, 于是在1967年便开始为特高压试验基地建造设备。拟订了一个1000~1500千伏电压等级的五年研究计划。其目的简述如下:

1. 确定1000~1500千伏交流输电工程用的杆塔几何尺寸和绝缘要求。

2. 得到进一步掌握悬垂绝缘子受到表面污秽时的绝缘强度的试验和分析资料。

3. 评价特高压线路的防雷性能。

4. 用真型试验和试验笼试验两者参证的方法来估算特高压线路的电晕损失。

5. 用真型试验和试验笼试验来评价特高压输电线路的无线电噪声和可听噪声特性，探索降低和限制无线电干扰和可听噪声的方法。而这种资料在选择导线结构时是必需的。

6. 确定特高压输电线路对人身和车辆的影响。

7. 探讨交流输电的现有的技术极限和未来的研究方向。

曾用来研究超高压下这一类问题的超高压试验基地的各种仪表和设备，在进行若干改进之后，又被用到这项新的研究中来了；为了更好地说明试验基地研究内容的扩大，于1967年1月将该试验基地改名为特高压试验基地。

在这项计划的初期各阶段中，在单相线路上进行的研究工作确定了所需要研究的问题和研究重点之后，再进行三相研究，从经济观点来看，才是合理的。三相运行时在每一瞬间产生三组相互混杂的现象，这常使从数量方面去解释每一现象的机理造成困难。随着输电技术的成熟和各种方式的相加或各种影响的迭加变得重要时，以及当该项计划进入了用单相试验不可能取得与三相试验完全一样的结果的那些研究领域时，三相测量才最有价值。因此，从1967年至1971年，为初期研究阶段建设了一条单相试验线路，并投入使用。由于明显地需要增加对特高压输电中一些最重要的课题（例如可听噪声和静电效应）的研究，所以将单相研究延长到1973年。

将单相试验的结果换算成等值三相性能的方法取决于所研究的现象。对绝缘性能来说，除了研究相间间隙的情况外，通常不需要进行换算。各种统计效应（例如可听噪声和无线电噪声）可用杂乱噪声组合的规律相加，只是传播方式不同而已——无线电干扰的传播有如平面波，而可听噪声的传播是从一个点噪声源开始的。导出了各种效应的组合方法。这些方法在适当的章节中叙述。

## 1-2 特高压试验基地设施简介

特高压试验基地的主接线示于图1-2-1中。图1-2-2至图1-2-17是一些主要设备的照片。

在图1-2-1中，有一条接至当地公用事业工业的三相110千伏线路供给该试验基地的用电，并有一台调压用自耦变压器，电压调整范围为110千伏 $\pm 30\%$ ，每5/8%为一级，作为可变电压的电源。图中示出了单相和三相两种试验回路的接线。

### 1500千伏特高压变压器

图1-2-2所示的33兆伏安1500千伏特高压变压器<sup>[2]</sup>是1968~1973年期间该试验基地的主要的特高压试验设备。为了减少绝缘间距的要求，全部绕组都绕在铁芯的同一个芯柱上。在 $193/\sqrt{3}$ 千伏和 $143/\sqrt{3}$ 千伏输入端备有抽头，并以专用联接线接至调压变压器，这就可以选用相电压为345千伏至866千伏范围内的任何电压（相当于线电压为600千伏至1500千伏）。还包括一个带有外部套管的13.8千伏11.5兆伏安的第三绕组，在需要进行特

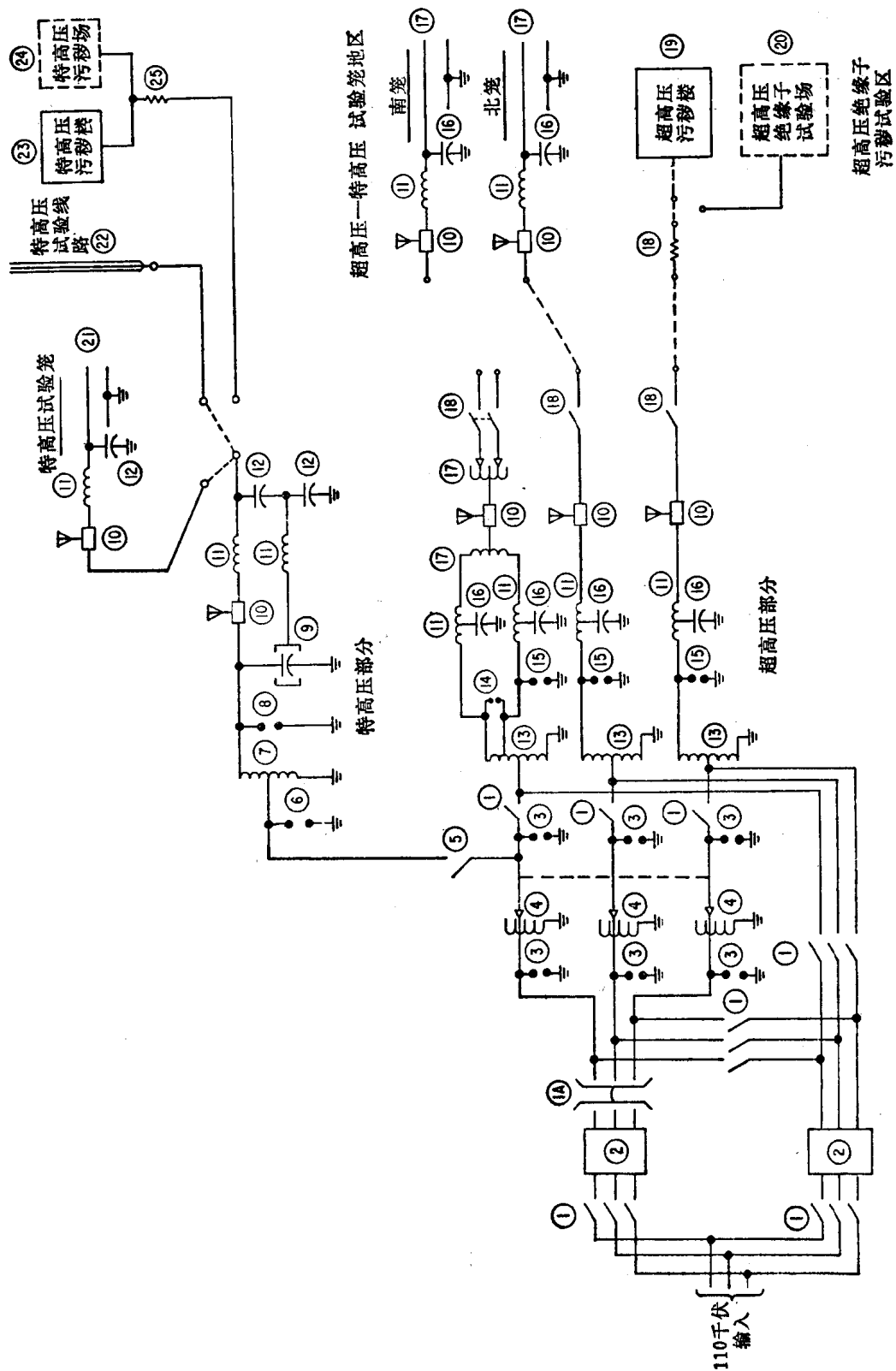


图 1-2-1 特高压试验基地接线图  
(各元件详细规范见表1-2-1)

殊试验时，可用于今后的三相运行，也可用这个第三绕组对变压器进行励磁。

该变压器的特高压端的套管总长为11.9米，并且在油箱盖上面空气侧的高度为8.7米。

表 1-2-1

图 1-2-1 所示设备介绍

| 项目编号 | 设备名称     | 规格                                                                     |
|------|----------|------------------------------------------------------------------------|
| 1    | 隔离开关     | 1200安, 115千伏                                                           |
| 1A   | 可卸跳线     |                                                                        |
| 2    | 空气断路器    | ATB-115-10000, -2400安                                                  |
| 3    | 避雷器      | 9LA3K-97千伏                                                             |
| 4    | 调压变压器    | OH/FA-T-60-30000/40000<br>(输出)线电压/相电压110000/63510±30%                  |
| 5    | 隔离开关     | 1200安, 115千伏, 单相                                                       |
| 6    | 避雷器      | 9L11LBA132-132千伏                                                       |
| 7    | 自耦变压器    | OA/FA-T-60-25000/33000<br>(输出)线电压/相电压1500000/866500-143000/82510-13800 |
| 8    | 避雷器      | 9L16BBX900-900千伏<br>1.5/40微秒2175千伏                                     |
| 9    | 充六氟化硫电容器 | CG1500型                                                                |
| 10   | 遥测发报机    |                                                                        |
| 11   | 无线电干扰滤波器 |                                                                        |
| 12   | 耦合电容器    | CC-1-60-1500                                                           |
| 13   | 自耦变压器    | FOA-T-60 40000(输出)<br>线电压/相电压650000/375000, 线电压/相电压134000/77,365       |
| 14   | 避雷器      | 4千伏                                                                    |
| 15   | 避雷器      | 9LA3K-480千伏                                                            |
| 16   | 耦合电容器    | 6CW33安                                                                 |
| 17   | 隔离变压器    | OA-60-3870-4300-2865                                                   |
| 18   | 隔离开关     | 1600安-750千伏                                                            |

### 900千伏避雷器

用900千伏Alugard型避雷器(如图1-2-1和图1-2-3a所示)对特高压变压器雷电过电压和过分严重的操作过电压进行保护。这是一台高12.3米的特制避雷器, 顶部环绕着一个3.7米直径的屏蔽环。如用单根瓷柱制造这样高的自承式避雷器是不可能的。因此, 它的下部由三根瓷柱组成, 其中两根瓷柱只起机械支撑作用; 它的上部由两根瓷柱组成, 其中一根装有间隙和阀片, 另一根装有均压电容器。

通过试验获得该避雷器的设计特性如下:

|                        |        |
|------------------------|--------|
| 波形为1.5/50微秒时的最大放电电压    | 2175千伏 |
| 5千安下的残压                | 2175千伏 |
| 操作波下的最大放电电压            | 2020千伏 |
| 波头陡度为1200千伏/微秒时的最大放电电压 | 2500千伏 |

### 电晕损失测量设备

特高压试验基地用于测量电晕损失的系统在参考文献<sup>[2,3]</sup>中已有较详细的叙述。它基本上与超高压试验基地使用的是同一测量系统<sup>[1,4,5]</sup>, 并采用了一个经过改进的自动平

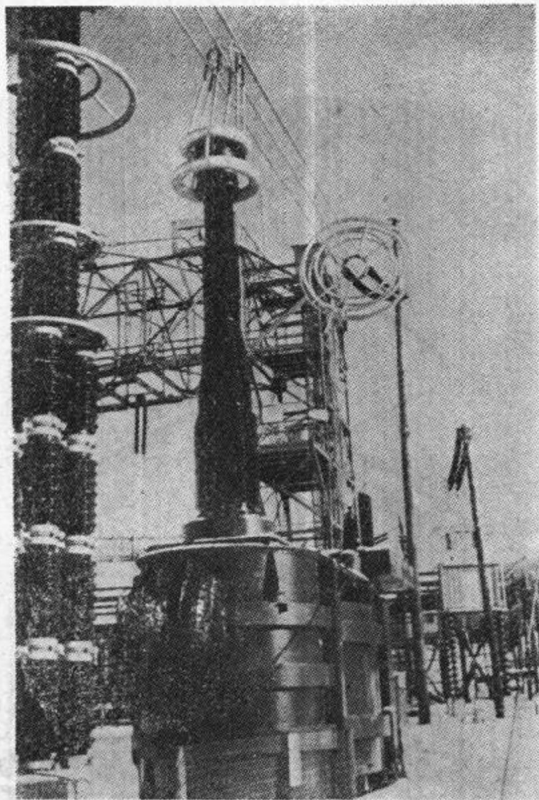


图 1-2-2 单相33兆伏安特高压自耦变压器  
(对地电压:  $1500/\sqrt{3}$  千伏)

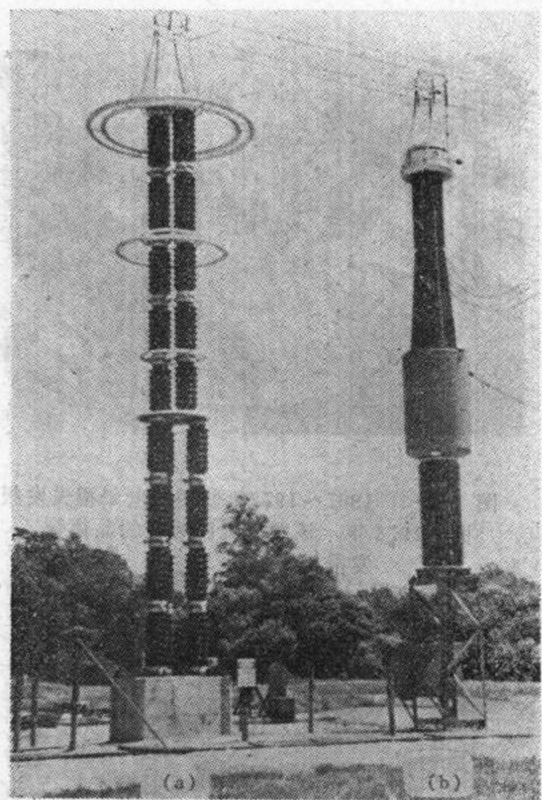


图 1-2-3  
(a) 900 千伏自承式 Alugard 型避雷器;  
(b) 六氟化硫(SF<sub>6</sub>)绝缘的高精度气体电容器

衡的高压电桥。电压是用一个高精度的气体电容器(六氟化硫 SF<sub>6</sub> 绝缘, 基准冲击绝缘水平为 2550 千伏)来测量的, 电流是用一个电阻分流器来测量, 它以 208 兆赫的无线电信号与地面的电桥联系。见图 1-2-3(b), 1-2-4 和 1-2-5。有一个特殊屏蔽的内电极系统<sup>[3]</sup> 保证气体电容器在干燥天气和潮湿天气下的准确度——测得的介质损耗为 0.0% (干燥天气) 和 -0.0008% (潮湿天气)。

### 特高压母线系统

从特高压变压器引出的电压首先必须接至保护系统和高压测量设备, 最后才接到试验线路或被试品本身。在图 1-2-6 中, 可看到架在特高压变压器、避雷器、气体电容器和无线电噪声耦合电容器上空的特高压母线是用软线接到每一设备上的。母线由六根外径为 6.03 厘米的铝管组成, 呈六角形排列, 与中心的距离为 46 厘米。每端装设有 4.12 米直径的大屏蔽环(图 1-2-7), 以消除母线端部金具的电晕, 并降低耐张绝缘子串上的电场强度。这些屏蔽环是用 11 厘米直径的铝管做成的, 每五个环安装成一列, 环间距离约为 46 厘米。这些屏蔽环具有与母线大致相同的起始电晕电压(干燥天气或潮湿天气), 即干燥天气时约为 1100 千伏(线对地), 潮湿天气时约为 500~600 千伏(线对地)。

### 特高压试验线路

单相特高压试验线路长达 440 米——一档——从试验站往南走(图 1-2-8)。它的高度

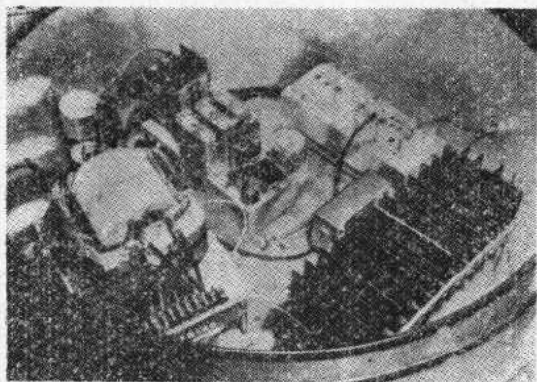


图 1-2-4 1967~1972年使用的电晕损失发报机（1973年，该发报机已为新的晶体管发报机所代替）

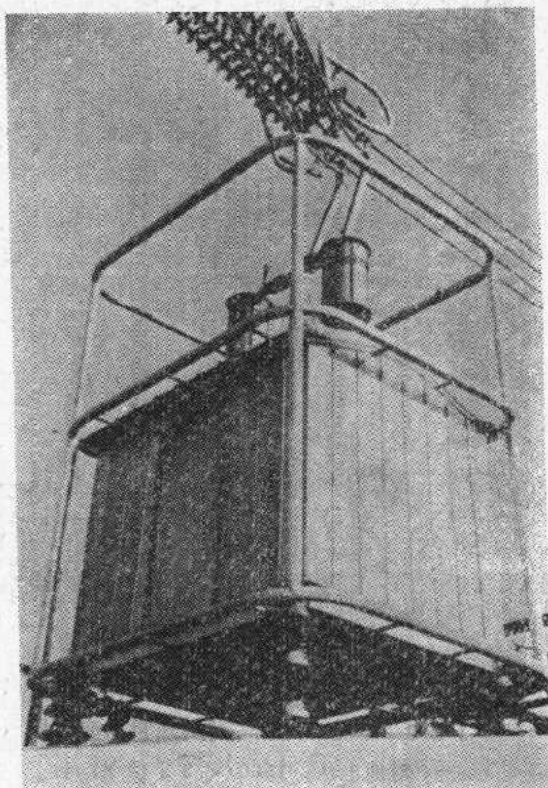


图 1-2-5 超高压试验笼东端的法拉第笼

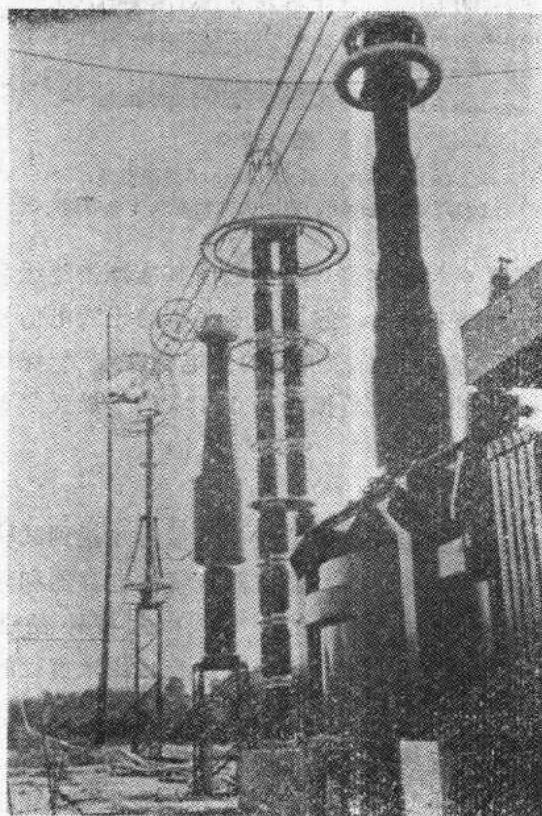


图 1-2-6 架在特高压变压器、避雷器、气体电容器和无线电噪声测量用耦合电容器上空的特高压母线

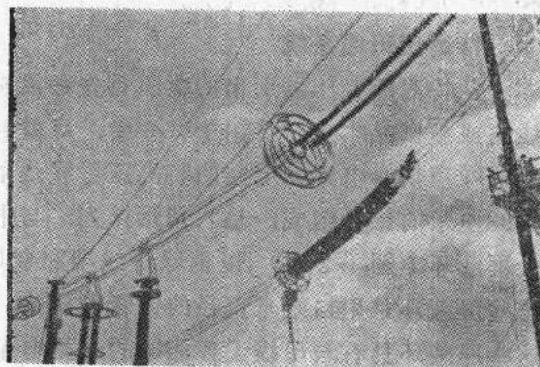


图 1-2-7 特高压母线端部的电晕屏蔽环