

# 电气絕緣設計

(上册)

电气絕緣及电纜技術教研室

刘其昶編

西安交通大學

1964. 1

## 电气絕緣設計

(上 册)

---

編輯者：西 安 交 通 大 学  
电气絕緣及電纜技术教研室刘其昶  
发行者：西 安 交 通 大 学 教 材 供 应 科  
印刷者：西 安 交 通 大 学 印 刷 厂

---

一九六四年一月第一版

印数：400册

# 序

本教科书是根据本人几年来在本校电气絕緣与电纜技术专业絕緣專門組講述“电气絕緣設計”这一課程的讲义編写而成。本課程的目的和任务是通过若干典型的电气絕緣結構的分析来闡明絕緣設計的基本原理。本书亦即按这样一个目的和任务来編写。本书主要只講有关电力方面的絕緣設計。

本教科书分为上下兩冊。上册包括：若干基本电場的計算，电力电容器，高压套管，高压絕緣子等四章；下册将包括变压器絕緣，电机絕緣兩章以及某些特殊問題的討論。

上册的編写系統和内容主要参考了M·И·曼特洛夫专家1956年在我校講授“电气絕緣的計算和設計”讲义。此外，在高压絕緣子这一章中还参考了奥本諾斯专家1957年在清华大学所講授“高压絕緣”的讲义，以及上海交通大学張和康同志所提出的意見，在电力电容器这一章中参考了本校严璋同志所編后經黄华庭同志改編的讲义。

本书在緒論、电容器的游离、高压套管的設計計算和試驗、絕緣子的結構特性等方面有許多是个人一管之見，其中不免有欠妥或錯誤之处，謹希讀者指正。

本书在付印时承任佩余同志协助校对手稿，謹此致謝。

刘其昶 于西安交通大学

1964年1月。

# 目 录

## 序

### 緒論

- 一 电气絕緣設計的意义 ..... 1
- 二 电气絕緣設計的研究和学习方法 ..... 1
- 三 本課程的目的和任务以及基本要求 ..... 1
- 四 本課程的內容 ..... 1

### 第一章 若干基本电場的計算

- § 1-1 簡單电容和电場計算 ..... 5
- § 1-2 具有夹层介質时的电压分布和电場計算 ..... 7
- § 1-3 若干电場的近似計算法 ..... 14
- § 1-4 許华革(Schwaiger) 利用因数 ..... 22
- § 1-5 平板电容器极板邊緣的电場 ..... 26
- § 1-6 电場图繪制法 ..... 27

### 第二章 电力电容器

- § 2-1 概論 ..... 37
- § 2-2 电力电容器的分类和結構 ..... 39
- § 2-3 电力电容器所用的浸漬剂 ..... 51
- § 2-4 电力电容器所用的帞和箔以及新型絕緣材料 ..... 59
- § 2-5 油帞电力电容器制造工艺簡述 ..... 67
- § 2-6 电力电容器油帞絕緣的介电系数和介質損耗 ..... 73
- § 2-7 电容器組合絕緣的耐电强度 ..... 77
- § 2-8 电容器組合絕緣的游离 ..... 82

- § 2-9 油纸絕緣电容器的使用年限和工作場强的選擇... 91
- § 2-10 油纸絕緣移相电容器的几何尺寸与重量的計算... 95
- § 2-11 裝在直角金属箱中的电容器的热計算.....108

### 第三章 高压套管

- § 3-1 套管型结构的电場和其表面放电.....121
- § 3-2 如何防止滑閃放电.....127
- § 3-3 高压套管概述.....130
- § 3-4 純瓷套管.....132
- § 3-5 电容式套管的結構和性能.....138
- § 3-6 高压套管的运行特性曲綫.....140
- § 3-7 高压套管內絕緣强度的特性.....141
- § 3-8 电容式套管的电气計算.....148
- § 3-9 充油套管概述.....170
- § 3-10 充油套管的計算.....172
- § 3-11 充油套管制造工艺簡述.....187
- § 3-12 油纸絕緣电容式套管制造工艺簡述.....189
- § 3-13 变压器、电器及配电設備用电瓷制品的試驗和  
    檢查.....190
- § 3-14 高压套管成品的試驗.....193
- § 3-15 高压电容套管的  $\text{tg}\delta$  試驗和游离試驗.....194
- § 3-16 电容套管的热計算.....198

### 第四章 高压絕緣子

- § 4-1 概述.....203
- § 4-2 高压絕緣子分类.....205
- § 4-3 高压絕緣子电极的布置和絕緣子的基本型式.....205
- § 4-4 絕緣子的基本性能和試驗.....208
- § 4-5 絕緣子用材料.....214
- § 4-6 电瓷工艺要点.....218
- § 4-7 結構和制造工艺方面的要求.....223

§ 4-8	絕緣子的放电距离与放电电压	231
§ 4-9	絕緣子和絕緣子串的电压分布和放电特性	235
§ 4-10	棒形絕緣子表面电压分布和放电特性	242
§ 4-11	湿弧电压的計算	244
§ 4-12	針式絕緣子設計	253
§ 4-13	悬式絕緣子設計	257
§ 4-14	支柱式絕緣子設計	268
§ 4-15	污秽絕緣子	278
§ 4-16	半导体釉絕緣子	289
§ 4-17	高海拔地区用絕緣子	290
<b>附录一</b>	<b>各种电极的电容公式</b>	<b>295</b>
<b>附录二</b>	<b>有关热計算的若干公式和数据</b>	<b>314</b>
<b>附录三</b>	<b>有关高压套管的若干結構和性能</b>	<b>323</b>
<b>附录四</b>	<b>有关高压絕緣子的若干結構和性能</b>	<b>331</b>
<b>附录五</b>	<b>矿物油浸移相电容器电工专业标准(草案試行)</b>	<b>340</b>

# 緒 論

## 一、电气絕緣設計的意义

在工程制造上所謂設計的意义是在于合理地選擇材料和使用材料，充分發揮它們的性能來滿足人們對所設計的設備或產品所提出的要求。這些要求通常有三個方面：工作性能、制造上的經濟性和使用壽命。

电气設備一般可以具有若干部分如導體、絕緣、磁路、結構部件、電子發射等部分。絕緣或介質的作用，除了在電容器中有儲藏能量的作用外，一般只是防止電流向不希望的方向流動和起一些機械固定或支持作用。這些作用在电气設備中看來似乎只是一種“靜止的和消極的”作用，因此在設計中也似乎並不佔有主要的地位。在本世紀三十年代以前，电气絕緣設計還不過是一種粗略的估計而已。在本世紀四十年代以後，由於高電壓、高頻和高溫技術等各方面新技術的發展對电气設備提出了苛刻的要求，而這些要求中很多就是絕緣問題，以致於絕緣在电气設備中變成了最難處理的薄弱環節。在高壓方面，當五十年代出現了380—400千伏的輸電以後，在變壓器、電器和絕緣子領域內提出了許多非常嚴重的絕緣問題。例如一個高壓變壓器套管，看來只是作為引出綫穿過而已，但必須要求具有極高的耐電強度和很低的介質損耗，要求在十分複雜的電場下工作，下部浸在80—90°C的變壓器油中，而上端則又暴露在惡劣的大氣條件下，還要求具有足夠的機械強度以支持引出綫和抵抗短路電流的巨大電動力，以及要求能安全可靠地工作20~30年。

近年來，各種电气設備的電壓、頻率、功率、溫度、濕度和其他使用條件上的限制，电气產品的技術經濟指標，電力系統的安全送電等等各方面，幾乎無一不是嚴重地取決於絕緣的可靠性。在這樣的客觀要求下，近年來絕緣技術已逐漸發展成為一門十分重要的學科。在絕緣材料方面，各種新型絕緣材料應運而生，如合成有機材料中的塑料、人造無機材料中的特种電瓷、人造雲母、玻璃纖維、玻璃薄膜等，液體介

質中的合成液體，氣體介質中的負電性氣體等。在絕緣結構工藝方面也有了巨大的進展，特別是採用了高真空度的干燥和浸漬技術來保證絕緣質量。在絕緣結構方面，採用了各種屏蔽方法、消除滑閃的結構和電容式結構來進一步改善電場分布和提高絕緣強度。在絕緣結構的試驗方面，除了發展了破壞性的工頻、直流、高頻和沖擊電壓的耐壓試驗外，還在非破壞性的預防性試驗上取得了很大的進展，例如絕緣電阻、電容、介質損耗的試驗，游離試驗，以及超聲波探傷和X光技術的應用等各方面，從而可以在一定程度內預測絕緣質量。在絕緣設計方面，亦正在逐漸擺脫“粗略的估計”這種方式而正在向系統性的理論分析和科學實驗方向發展。

但是必須指出，近年來絕緣技術雖然有了上述這些發展，可是還遠遠趕不上客觀的要求。人們自從和電打交道開始之日起就一直接觸着絕緣問題，可是人們掌握絕緣技術方面的知識還不如某些最近一二十年來才新興的學科。在絕緣材料方面，儘管是發展日新月異，但是在高壓領域內如高壓電容器、高壓電纜等設備中，人們已經應用了半個世紀以上的油滷絕緣仍處於獨佔地位，在高壓絕緣子方面，則更是幾乎已有了几千年歷史的陶瓷仍處於獨佔地位。在試驗方面，儘管新技術日益增多，但還是不能達到不通過破壞性的耐壓試驗來確實保證絕緣質量，所有非破壞性試驗都還未能取而代之。在絕緣設計方面，同樣也還是處於困難狀態。這些都有待於絕緣技術的工作者作更大的努力。

任何絕緣材料都有其特性，更不可能只有優點而無缺點，只有充分利用它們的優點而避免或限制它們的缺點才可能適應絕緣結構所提出的性能要求。這就是絕緣設計的任务。人們要求通過絕緣設計從材料和結構、製造和運行等各方面複雜綜錯的關係中來分析判斷，以確定最有利的方案，這樣才能充分發揮絕緣材料的優點而避免或者限制它們的缺點以便達到利用材料的最大效果。因此，電氣絕緣設計乃成為在所有電氣絕緣技術的領域中具有最重要的實際意義。然而，人們對於電氣絕緣設計的知識還是十分不足的。比如進行大電機的設計，人們可以從容應付甚至精確計算大電機的電路、磁路以及機械方面的要求，但是對於絕緣設計主要還只能憑藉經驗來決定。由於絕緣在電機、電器中所受到的因素有電、機、熱、濕度、化學變化等各方



面的影响，远比其他部分复杂和严重。目前，在絕緣設計領域中，除了如电容器，套管等少数情况能进行比較完整的計算外，人們还必須利用大量的經驗数据，經驗公式和試驗曲綫来应付絕緣問題。因此，絕緣設計必須依靠試驗来校驗，但是試驗也常不能得到确切的結論，因而最后还必須經過运行的严格考驗。在这些方面都有待于电气絕緣設計工作者作进一步的研究和发展。

## 二、电气絕緣設計的研究和学习方法

电气絕緣領域內的研究方法有二个方面。一个是純粹理論上的分析或数学推导，得到的結論然后設法用實驗来驗證。由于絕緣所受到的因素复杂，人們对于絕緣的理論分析也还不够完善，因此理論分析中所假設的条件和所获得的結論常常与实际情况不尽相符，乃致工程实践上的意义不足。另一种研究方法是依靠實驗得出若干實驗規律然后应用于工程实践。但是，这种方法所得到的規律缺乏內在联系和理論上的解釋，很难作出进一步的推断，因此在工程实践的应用中有很大的局限性。为此，我們学习电气絕緣設計就必須同时掌握以上这二种方法，然后才能取长补短，互相补充。在学习这门課程时，必須要求学生既要尽可能在理論上作分析和計算，而又要求掌握實驗技术；还要熟記实践中所得的經驗数据、經驗公式、試驗曲綫和某些重要关系，以及能够灵活运用。这也就是說，学生在学习这门課程中，必須逐步培养理論联系实际的能力和判断能力。只有具有这样一些能力，絕緣設計工作者才能正确处理絕緣設計中材料、結構、制造、运行等复杂綜錯的矛盾中求取統一而作出最有利的設計，也只有具有这样一些能力，絕緣設計工作者才能不断发展和充实电气絕緣設計这一門課程。

## 三、本課程的目的和任务以及基本要求

本課程是电气絕緣和电纜技术专业中的一門專門組課程，主要講述有关电力方面的电气设备的絕緣設計。本課程的目的和任务是通过若干典型电气絕緣結構的分析来闡明电气絕緣設計的基本原理，要求培养学生掌握分析絕緣結構、設計計算、分析絕緣材料的性能和选用絕緣材料的能力，在絕緣結構的設計和計算方面能运用已学过的知識，

具有一定的理論联系实际和独立工作能力。

因此，本課程对于学生的基本要求是：

1. 掌握若干基本电場，特别是平板形和圆柱体两种电場的分析、計算方法以及它們在絕緣設計中的应用。

2. 掌握絕緣結構对絕緣材料的基本要求。

3. 了解絕緣結構在电場作用下和在实际运行中的各种变化过程和性能，以及其意义。

4. 熟悉某些基本的数据、計算公式、理論和試驗曲綫以及它們的应用，掌握設計参数的選擇原則和絕緣設計計算原理。

5. 熟悉电气絕緣的若干典型結構的設計参数和大致尺寸，要求对于某些实际的絕緣結構具有一定的設計能力。

6. 明确絕緣設計中技术經濟指标的意义，以及制造和运行間的关系。

7. 明确絕緣結構工艺的要求以及和設計的关系。

8. 明确試驗对于絕緣設計的重要意义，熟悉对于若干典型絕緣結構的測試方法和要求。

#### 四、本課程的內容

本課程分为大致独立的几章：1. 若干基本电場的計算，2. 电力电容器，3. 高压套管，4. 高压絕緣子，5. 变压器絕緣，6. 电机絕緣。其中电力电容器、高压套管和高压絕緣子三者可以是独立的絕緣結構，而变压器絕緣和电机絕緣則不是独立的結構，是隶属于变压器或电机的結構。有关电力方面的絕緣結構还有如电力电纜和电器絕緣等不在本书中讲述。

本教科书分上下二册，上册包括前四章，下册包括后二章以及某些特殊問題。

# 第一章 若干基本电场的计算

## § 1-1 简单电容和电场计算

### 一、平板电容器

#### 1. 电容

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon s}{d} = \frac{\epsilon s}{4\pi d \times 9 \times 10^{11}} \text{ 法} \quad (1.1.1)$$

式中  $\epsilon$  ——介电系数;  $s$  ——极板面积, 厘米<sup>2</sup>;  $d$  ——介质厚度, 厘米;

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^{11}} = 8.86 \times 10^{-14} \text{ 法/厘米。}$$

即  $C = 0.0886 \frac{\epsilon s}{d}$  微微法

#### 2. 电场强度

$$E = \frac{u}{d} \text{ 千伏/厘米} \quad (1.1.2)$$

式中  $u$  ——外施电压, 千伏 (以后不注明者一般均指有效值);  $d$  ——介质厚度, 厘米。

### 二、同心圆柱体

#### 1. 电容:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\epsilon l}{2 \ln \frac{r_2}{r_1} \times 9 \times 10^{11}} \text{ 法} \quad (1.1.3)$$

式中  $l$  ——圆柱体长度, 厘米;  $r_1, r_2$  ——同心圆柱体的内外半径, 厘米。

#### 2. 电场强度:

$$\text{半径为 } r \text{ 处任一点场强 } E_r = \frac{u}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ 千伏/厘米} \quad (1.1.4)$$

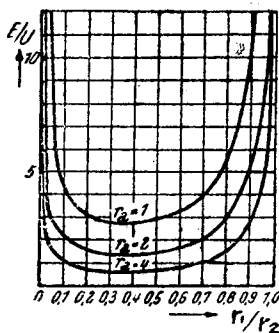


图 1-1 同心圆柱体最大场强与  $r_1/r_2$  比值关系

最大場強在內半徑處  $E_{r_1} = \frac{u}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$  千伏/厘米 (1.1.5)

与平板电容器比較

$$d_{\text{有效}} = r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1.1.6)$$

### 3. 最有利半徑計算

$$u = E r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{或} \quad r_2 = r_1 e^{\frac{u}{E r_1}}$$

当  $E$  給定,  $r_2$  有最小值时  $\frac{dr_2}{dr_1} = 0$

$$\therefore -r_1 e^{\frac{u}{E r_1}} \cdot \frac{u}{E} \cdot \frac{1}{r_1^2} + e^{\frac{u}{E r_1}} = 0$$

$$\therefore \frac{u}{E r_1} - 1 = 0, \quad u = E r_1 \quad \text{即} \quad r_1 = \frac{u}{E} \quad \text{最有利} \quad (1.1.7)$$

此时  $r_2 = r_1 e^{\frac{u}{E r_1}} = e r_1 = \frac{u}{E} e \quad \text{或} \quad r_1 = 0.37 r_2 \quad (1.1.8)$

絕緣厚度  $d = r_2 - r_1 = \frac{u}{E} (e - 1) = 1.718 \frac{u}{E} \quad (1.1.9)$

$$E r_1 (\text{最小}) = \frac{u}{r_1} \quad \text{千伏/厘米} \quad (1.1.10)$$

因此, 高压单芯電纜中常取  $r_2/r_1 = e$ , 此时单位长度电容  $C' = C/l = 0.0555 \varepsilon$  [微法/公里]; 油希絕緣  $\varepsilon = 3.6$  时,  $C' = 0.2$  [微法/公里]。

### 三、同心球电容器

#### 1. 电容

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} = \frac{\varepsilon}{9 \times 10^{11}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad \text{法} \quad (1.1.11)$$

或  $C = \frac{1.11 \varepsilon}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$  微微法 (1.1.12)

#### 2. 电場强度;

为  $r$  处任意点場强  $E_r = \frac{u}{r^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}$  千伏/厘米 (1.1.13)

最大場强  $E_{r_1} = \frac{u}{r_1 \left( 1 - \frac{r_1}{r_2} \right)} = \frac{u}{d} \cdot \frac{r_2}{r_1}$  千伏/厘米 (1.1.14)

由此可知，同心球  $E_r \propto \frac{1}{r^2}$ ，比之同心圆柱体  $E_r \propto \frac{1}{r}$  电场分布更为不均匀。

当外徑  $r_2$  給定时，最有利的內半徑  $r_1$  可由  $\frac{dE_{r_1}}{dr_1} = 0$

求取，可得  $r_1 = \frac{1}{2} r_2$  最为有利，此时  $E_{\text{最大}}/E_{\text{最小}} = 4$ 。

因此，在球型结构的悬式絕緣子中常取此半徑比。

当外电极很大时， $r_2 \gg r_1 = r$  則  $C = 1.11 \varepsilon r$  微微法， $E_r = \frac{u}{r}$  千伏/厘米。

例如，地球的半徑为6360公里，其电容  $C = 1.11 \times 6360 \times 10^5 = 707 \times 10^6 = 707$  微微法。

## § 1-2 具有夹层介质时的电压分布和电场计算

一、平板电容器：

1 当有二层介质时，电场计算：

$$\left. \begin{aligned} E_1/E_2 &= \varepsilon_2/\varepsilon_1 \\ \frac{u_1}{u_2} &= \frac{d_1 \varepsilon_2}{d_2 \varepsilon_1} \\ \text{又} \quad u_1 + u_2 &= u \end{aligned} \right\} \quad (1.2.1)$$

$$\text{解出得} \quad u_1 = u \frac{d_1 \varepsilon_2}{d_2 \varepsilon_1 + d_1 \varepsilon_2}; \quad (1.2.2)$$

$$u_2 = u \frac{d_2 \varepsilon_1}{d_2 \varepsilon_1 + d_1 \varepsilon_2}. \quad (1.2.3)$$

$$\text{而} \quad E_1 = \frac{u_1}{d_1} = \frac{u}{d_1 + \frac{\varepsilon_1 d_2}{\varepsilon_2}}, \quad (1.2.4) \quad E_2 = \frac{u_2}{d_2} = \frac{u}{d_2 + \frac{\varepsilon_2 d_1}{\varepsilon_1}} \quad (1.2.4)$$

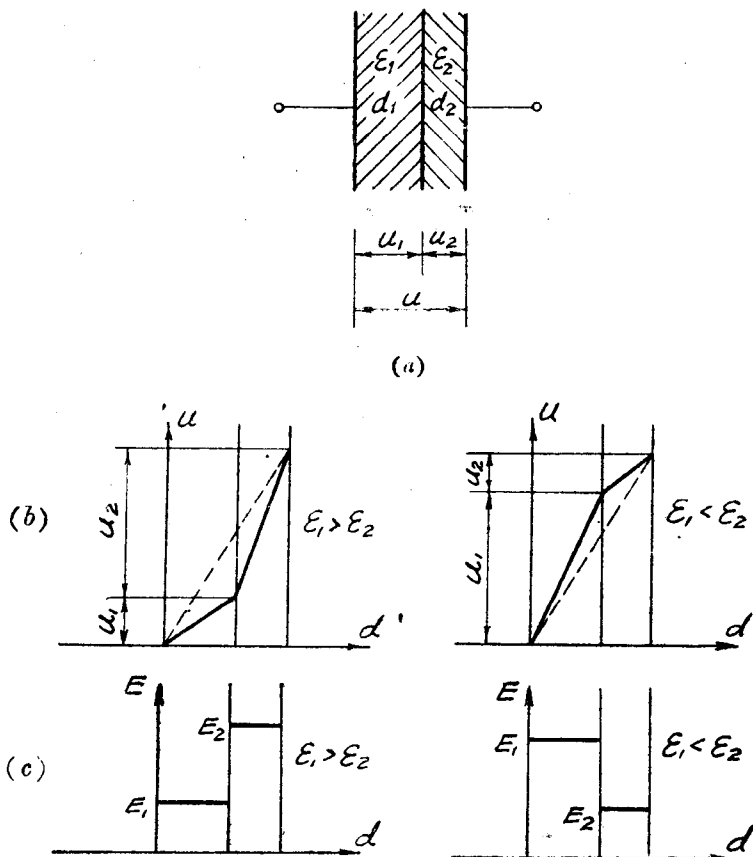


图 1-2 平板电容器具有二层介质时的电压和电场分布 (a) 结构示意图 (b) 电压分布 (c) 电场分布

若一层很薄, 即  $d_1 \gg d_2, d \approx d_1$ , 则在此薄层中  $E_2 = \frac{u}{d} \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = E_0 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$ , 即为平均场强的  $\epsilon_1/\epsilon_2$  倍。例如油纸绝缘,  $\epsilon = 3.6$ , 油的  $\epsilon_{油} = 2.2$ , 空气的  $\epsilon_{空气} = 1$ , 则在电缆或电容器中如出现气膜或油膜时其中场强将很高, 即

$$E_{油膜} = E_0 \frac{3.6}{2.2} = 1.64 E_0$$

$$E_{\text{气膜}} = E_0 \frac{3.6}{1} = 3.6 E_0$$

气层的击穿场强见表 1-1。油膜击穿场强可按下列式计算：

$$E_{\text{油膜}} = \frac{a}{\sqrt[3]{\Delta}} \text{ 千伏/毫米}, \quad (1.2.5)$$

式中  $\Delta$ ——油膜厚度·毫米，

$a$ ——与材料有关的系数，一般工程中等品质的油  $a=4.94$ 。

工频油桥电容器如取工作场强  $E_0=12$  千伏/毫米时，则  $E_{\text{气膜}}=12 \times 3.6=43.2$  千伏/毫米，此值大于空气隙的一般击穿场强，故气隙中会发生游离。

如真空浸油后，则气隙变为油膜，在油膜中  $E_{\text{油膜}}=12 \times 1.64=19.6$  千伏/毫米，此值电缆油或电容器油膜不致击穿，故无游离产生。

表 1-1 均匀电场中空气层的击穿电场强度、击穿电压与厚度关系。

空气层厚度 (厘米)	击穿电压 (千伏最大值)	击穿电场强度 (千伏最大值/厘米)	空气层厚度 (厘米)	击穿电压 (千伏最大值)	击穿电场强度 (千伏最大值/厘米)
0.0005	0.350	700	0.04	2.28	57
0.001	0.400	400	0.05	2.65	53
0.002	0.470	235	0.07	3.36	48
0.005	0.680	136	0.1	4.50	45
0.008	0.888	111	0.3	11.11	37
0.01	0.950	95	0.5	19.0	36
0.02	1.44	72	1.0	32.0	32
0.03	1.86	62	2.0	60.0	30

电容计算：

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 s}{4\pi d_1 \times 9 \times 10^{11}} \text{ 法}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_2 s}{4\pi d_2 \times 9 \times 10^{11}} \text{ 法};$$

$$\text{在串联后} \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{4\pi \times 9 \times 10^{11}}{s} \left( \frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)$$

## 2. 当多层介质串联时

$$C = \frac{s}{4\pi \times 9 \times 10^{11} \left( \frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \frac{d_3}{\varepsilon_3} + \dots + \frac{d_n}{\varepsilon_n} \right)} \text{ 法} \quad (1.2.6)$$

任何一层中場强

$$E_k = \frac{u}{\varepsilon_k \left( \frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \dots + \frac{d_n}{\varepsilon_n} \right)} \text{ 千伏/厘米} \quad (1.2.7)$$

### 二、同心圆柱体

单芯电纜为典型的同心圆柱体结构。它的结构是絞合銅絲作为纜芯同外包二层半导体漆而成为内电极，鉛护层为外电极，常以油漆絕緣为介质。

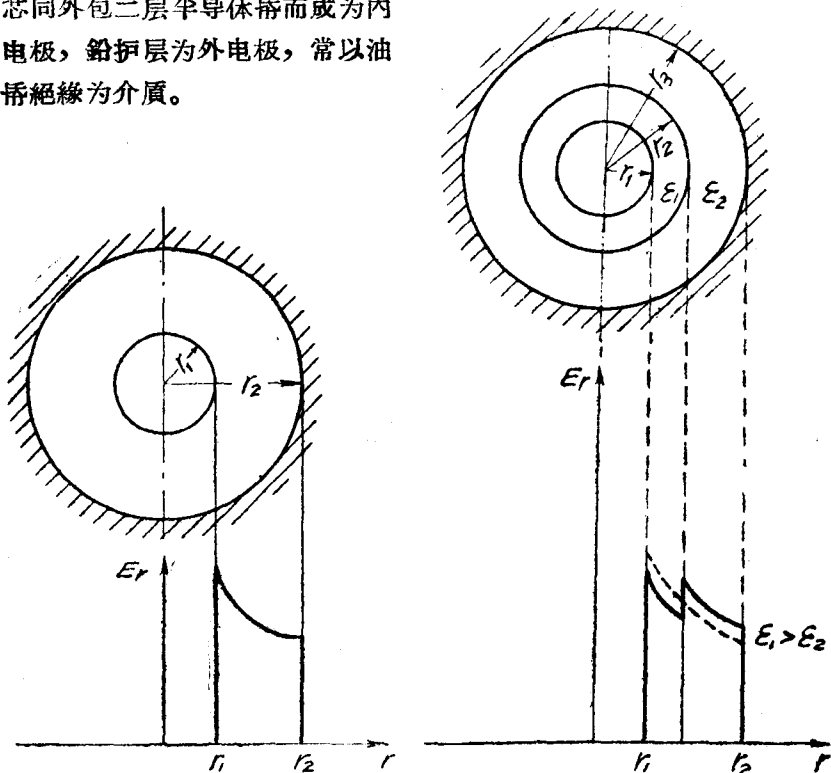


图 1-3 同心圆柱体的电场分布

图 1-4 单芯电纜的分阶絕緣，虛綫为不分阶时的电场分布，实綫为分阶时的电场分布。



## 絕緣中的場强

$$E_r = \frac{u}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad \text{因此 } E_r = f(r) \text{ 为一双曲线如图 1-3.}$$

单芯电纜中  $E_{r_1}$  为给定值(即材料允許工作場强)时, 則最大工作电压为  $u = E_{r_1} r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}$ .

在单芯电纜中, 为了改善电場分布, 提高材料的利用因數, 常采用分阶絕緣方法。例如二层分阶絕緣如图1-4。

則第一层中最大場强

$$E_1 = \frac{u_1}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{u}{r_1 \varepsilon_1 \left( \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\varepsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\varepsilon_2} \right)}$$

第二层中最大場强

$$E_2 = \frac{u_2}{r_2 \ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{u}{r_2 \varepsilon_2 \left( \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\varepsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\varepsilon_2} \right)}$$

因此, 当  $n$  层分阶时, 任何一层中最大場强

$$E_k = \frac{u}{r_k \varepsilon_k \left( \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\varepsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\varepsilon_2} + \dots + \frac{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}{\varepsilon_n} \right)} \quad (1.2.8)$$

当每絕緣层中的击穿裕度相等时可认为分阶最为合理, 即

$$k = \frac{E_{\text{HD}1}}{E_1} = \frac{E_{\text{HD}2}}{E_2} = \dots = \frac{E_{\text{HD}n}}{E_n}$$

由上式得

$$r_1 \varepsilon_1 E_{\text{HD}1} = r_2 \varepsilon_2 E_{\text{HD}2} = \dots = r_n \varepsilon_n E_{\text{HD}n} \quad (1.2.9)$$

如各层材料的  $E_{\text{HD}}$  大致相等时, 則

$$r_1 \varepsilon_1 = r_2 \varepsilon_2 = \dots = r_n \varepsilon_n$$

即分阶絕緣应使  $\varepsilon$  按  $r$  成反比。油棉絕緣  $\varepsilon = 3.3 \sim 3.8$ , 密度大者  $\varepsilon$  大, 应放在中层纜芯附近。

当  $n$  层分阶时, 其电容为