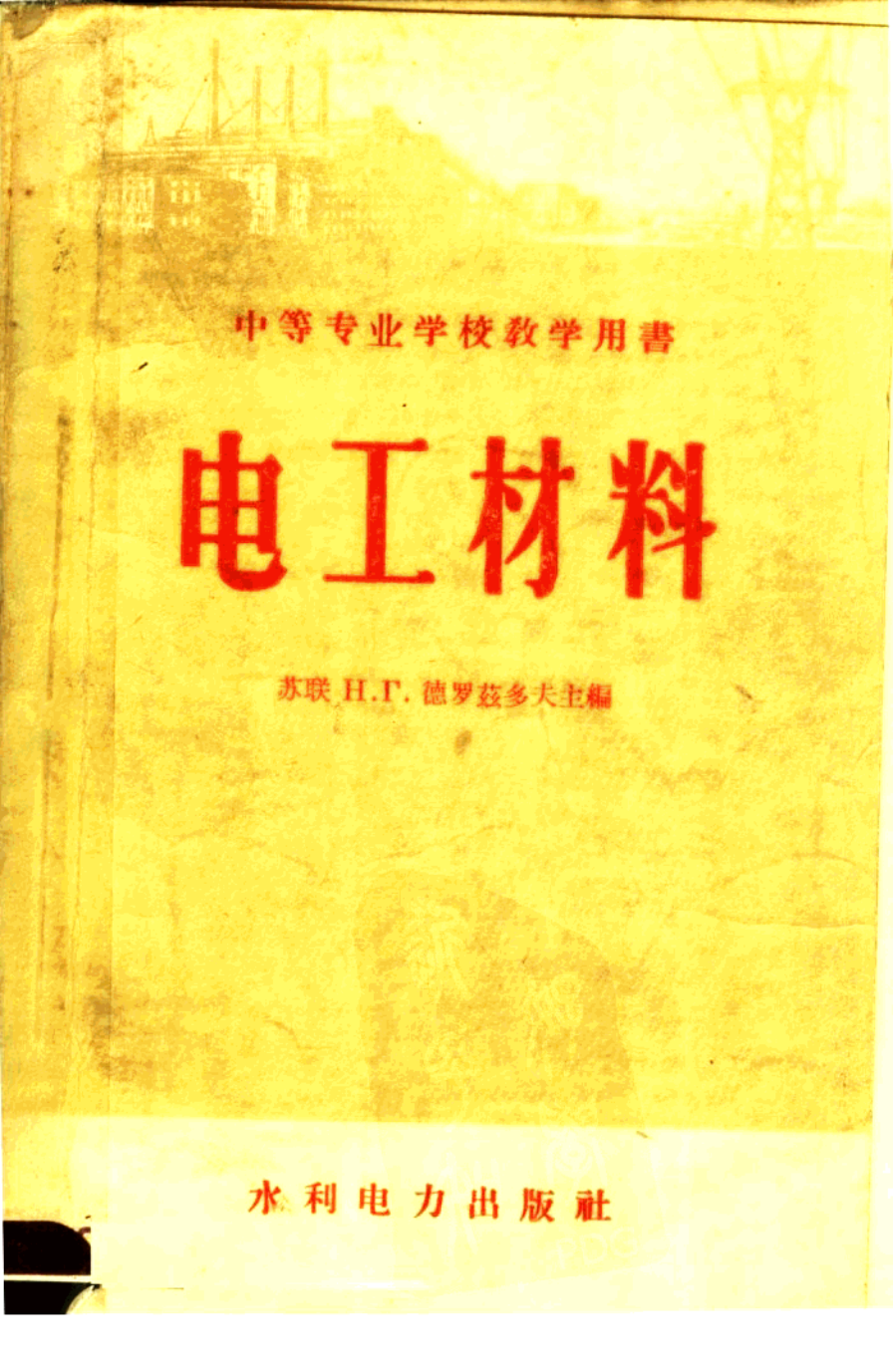




中等专业学校教学用书

电工材料

苏联 H.Γ. 德罗兹多夫主编

水利电力出版社

电 工 材 料

苏联技术科学博士 Н.Г. 德罗兹多夫教授主编
Н.Г. 德罗兹多夫 Н.В. 尼庫林 В.А. 普利維澤采夫
Л.И. 費多罗夫 С.А. 雅馬諾夫著
鄒 兆 年譯

苏联电站和电机工业部教育处审定
为中等技术学校教学参考書

水 利 电 力 出 版 社

本书講述关于电工材料——电介質、导体和磁性材料的基本知識，討論它們的主要特性，以及这些特性与各种外界物理因素的关系，还敘述了材料的試驗方法。

本书是电力工业中等技术学校的教材，也可作为电机制造厂和修配厂工程技術人員的参考书。

Н.Г.ДРОЗДОВ Н.В.НИКУЛИН В.А.ПРИВЕЗЕНЦЕВ
Л.И.ФЕДОРОВ С.А.ЯМАНОВ
ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1954

电 工 材 料

根据苏联国立动力出版社1954年莫斯科版翻譯

譯者 鄭兆年 特約編輯 沈庆輝

*

762 D 282

水利电力出版社出版（北京西郊新學路二里內）

北京市書刊出版業營業許可證出字第105号

水利电力出版社印刷厂印刷

新华书店北京科技发行所发行 各地新华书店經售

*

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本*11%印張*319千字*定价(第9类)1.40元

1958年3月北京第1版

1959年8月北京第3次印刷(5,721—6,840册)

序 言

在培养电气工业方面的专家、工程师和技师时，“电工材料”课程具有重大的意义。它应当给学生介绍电介质、导体和磁性材料的基本理论，以及它们在制造中的化学和工艺方面的基本知识，使学生熟悉试验和研究电工材料性质的方法，最后，给学生介绍关于实际的材料及其应用范围的知识。

这本为电力工业中等技术学校用的教学参考书是作者企图满足对“电工材料”课程的教科书所提出的要求的一个初次尝试。本书是按照苏联电机工业部教育处的规定及其所制定的教学大纲而编写的。参加编写的有：H. Г. 德罗兹多夫教授、B. A. 普利维泽采夫教授、H. B. 尼库林副教授、技术科学副博士 C. A. 雅马诺夫和 Л. И. 费多罗夫工程师。第一章由 H. Г. 德罗兹多夫教授、H. B. 尼库林副教授和 Л. И. 费多罗夫工程师执笔；第二章由 H. B. 尼库林副教授和 Л. И. 费多罗夫工程师执笔；第三章由 H. Г. 德罗兹多夫教授、H. B. 尼库林副教授和 Л. И. 费多罗夫工程师执笔；第四章由 H. B. 尼库林副教授和 Л. И. 费多罗夫工程师执笔；第五章由 B. A. 普利维泽采夫教授和第六章由 H. Г. 德罗兹多夫教授执笔。

B. M. 塔烈也夫教授对本书原稿作了指示，使其缺点显著地减少，技术科学副博士 A. B. 赫瓦里柯夫斯基对本书的校订作了许多工作，作者在此对他们表示衷心的感谢。

欢迎读者提出宝贵的意见，并将意见和要求寄至莫斯科水闸河岸街 10 号国立动力出版社。

作者

对本书译文的批评意见请寄至北京复兴门外社会路电力工业出版社编辑部。

目 录

序言	4
緒論	4
第一章 电介質的理論基础	8
1-1. 电場	8
1-2. 电介質的特性	24
1-3. 电介質的極化	29
1-4. 电介質的电导	39
1-5. 电介質的損耗	45
1-6. 液体电介質的击穿	51
1-7. 固体电介質的击穿	57
1-8. 确定电气絕緣材料的介电特性的方法	63
1-9. 确定电气絕緣材料的机械特性的方法	72
1-10. 电气絕緣材料的物理-化学特性	77
第二章 气体和液体电介質	89
2-1. 气体电介質及其性質	89
2-2. 液体电介質	106
第三章 固体电介質	125
3-1. 固体有机电气絕緣材料	125
3-2. 纖維电气絕緣材料	152
3-3. 橡膠及以橡膠为基础的电气絕緣材料	161
3-4. 硅有机电气絕緣材料	169
3-5. 固体無机电气絕緣材料	177
第四章 絕緣結構及其試驗用設備	197
4-1. 陶瓷絕緣結構	197
4-2. 电容器	222
4-3. 高压絕緣試驗設備	238
4-4. 冲击試驗設備	255
第五章 导电材料和電纜	273
5-1. 金属导电材料	273
5-2. 电綫和电纜	288

5-3. 高电阻合金和接触材料	319
5-4. 电工碳制品	325
第六章 磁性材料	329
6-1. 磁性材料的分类及其主要特性	329
6-2. 软磁材料	335
6-3. 硬磁材料	348
6-4. 磁性介质	359

緒 論

电机、电器、各种电工测量仪器及电气设备的各个部分，都是用具有特殊性質并被称为电工材料材料制成的。这些材料的性質决定了它們的功用。在电机、电器和仪器中，所需的磁場是建立在某一类材料中的。另一类材料的功用是將电流傳导至用戶。然而，为了實現这一点，必需將电机、电器和仪器的导电部分，以及將电流傳送至用戶的导綫彼此絕緣。第三类材料的功用是將具有电位差的各載流部分絕緣，这类材料有許多种。

由此可見，依据其作用和在电工設備中的主要功用，电工材料可以分为三大类：磁性材料、导电材料和絕緣材料。

电气設備或电气裝置，不論是电机、电器或仪器，其任一元件的質量的优良、能否可靠而長期地工作以及其經濟性，在極大的程度上决定于制造这些电气設備所用的材料。

除了以上簡單敘述的决定电工材料功用的主要性質以外，各类材料还應該具有許多其他的性質。其中如：机械强度、容許温度、耐热性、对化学试剂的穩定性、以及工艺上的性質，首先是机械加工的难易程度等等。正确地选择制造某种电气設備的材料就能使它的工作可靠。制出新的、具有更好的性質的材料就能使电机、电器和仪器的制造得到改进和發展。制出新的磁性材料能使电机的尺寸減小，并提高其每單位重量的功率。具有大的介电系数、电阻和击穿强度的新絕緣材料的出現，使能制成大电容的、有較大無功功率的、并能在較高电压下工作的新型电容器。

大家知道，耐热的絕緣能使电机的每單位重量的功率增加，并提高其可靠性，而創造一种具有在机械上很牢固的漆膜的电綫就能使特殊电机和各种繞圈有最好的結構。

苏联的电力工業是在五年計劃期間建立并成長起来的。与电力工

業建立并增長的同时，在其个別的工厂中及在化学工業的工厂中建立了各种电工材料的新工業。

在电力工業的巨大發展中，列宁格勒的“电力”电机制造工厂首先开始制造电气絕緣材料：酚醛树脂漆、層压紙板、变压器用膠木管、汽輪发电机用云母絕緣，后来又制造了漆布。哈尔科夫电机制造厂（ХЭМЗ）首先为自己的电机制造了漆布、云母絕緣和电器用的各种塑料制品。莫斯科电机厂建立了完整的大型車間，对發展电气絕緣工業有很大的貢獻。这車間后来發展成为“絕緣”工厂。

在电器、变压器和輸电綫用瓷絕緣子的制造方面，莫斯科“絕緣子”工厂、斯拉維揚斯克的阿尔捷馬工厂和列宁格勒的“無产者”工厂均有很多貢獻。

所有这些工厂的工程师和工作人員都是建立苏联电气絕緣工業的先驅者。

在掌握并發展电气絕緣材料工業的同时，苏联的学者研究出了絕緣材料的新品种，这就保证了整个电力工業的进一步發展。斯大林獎金获得者 К. А. 安得列安諾夫教授所領導的至苏电工研究所（ВЭИ）电气絕緣部在这方面有很大的貢獻。他和他所領導下的科学工作人員研究出了許多电气絕緣材料：不可燃的液体电介質苏伏油和苏伏多油、耐热和耐潮的絕緣漆、各种灌注和浸漬用的化合物。К. А. 安得列安諾夫教授的最大貢獻是他發明了新的、具有特別高的耐热性和耐潮性的硅有机电介質。

在制造电气絕緣可塑材料方面的先驅者是斯大林獎金获得者、塑料“卡波里特”的發明者 Г. С. 彼得罗夫教授。

同时，在苏联，电介質的科学也發展了。在 А. Ф. 約飞院士領導下的列宁格勒物理-技术研究所和其他的科学研究所中，成長了大批苏联学者，他們的工作保证了电介質科学的进一步發展。在他們中間我們常遇到的有：苏联科学院通訊院士 Б. М. 吳耳教授、Г. И. 斯卡那維教授、П. П. 柯別哥教授、И. В. 庫尔恰托夫院士、Н. П. 鮑高罗齐茨基教授等。苏联的学者們研究了电介質的物理理論中个别極重要的問題，例如，В. А. 福克院士、А. А. 斯姆罗夫教授、苏联科学

院通訊院士 Я. И. 弗連凱耳都作了著名的理論研究。

在電介質科學的萌芽時期，俄羅斯的學者就研究了電介質的理論和實驗，其中首先是舉世聞名的俄羅斯物理學家 П. Н. 列別捷夫教授。

蘇聯電瓷工業的發展對電容器製造和無線電工業的發展起了重大的作用。這種發展是由於蘇聯學者們在創造新的強性介質和新的陶瓷材料方面的卓越工作而得到保證的，這些學者是：蘇聯科學院通訊院士 Б. М. 吳耳教授、Н. П. 鮑高羅齊茨基教授、Г. И. 斯卡那維教授、國立電工陶瓷研究所物理實驗室的領導人技術科學副博士 X. C. 瓦列也夫等人。

Б. М. 塔烈也夫教授在研究電氣絕緣材料的個別問題上，以及在著作許多研究電介質的寶貴手冊和參考材料方面有很大的貢獻。

電綫和電纜工業的發展差不多與電氣絕緣材料工業的發展相類似。在掌握并試制新型電綫和電纜方面，“莫斯科電纜”和“北方電纜”工廠的工程師們起了顯著的作用，他們保證了新型電綫和電纜的試制，並在這方面編著了寶貴的手冊和教科書。

“鑼刀和錘子”、維爾希謝斯基工廠等各冶金工廠掌握并試制了蘇聯的現代磁性材料。在這方面的工作中，А. С. 扎依莫符斯基教授所領導的人員們曾給予很大的幫助，扎依莫符斯基教授等人制出了許多新的磁性材料，並對各種磁性材料作了仔細的研究。

電工技術的發展提出了關於接觸材料的性能的問題。因而不僅要研究這些現象而且要制出適宜的接觸材料。B. B. 烏索夫教授在這方面的工作和貢獻是很大的，他的著作是這方面的基礎。

* * *

在研究上述三類的各種電工材料以前，應對導體和絕緣材料的定義提出一些意見。

可能遇到對導電材料的定義為：它與其他材料不同，它是一種能傳導電流的材料。與此相對應，絕緣材料的特徵為不能傳導電流。這樣的定義是不能令人滿意的。在自然界中沒有一種材料或物質是完全不傳導電流的。在給導電材料和絕緣材料下定義時，決定性的問題

是：这些材料的导电程度如何。如果將一切存在的材料——固体的（晶体的和無定形体的）、液体的和气体的——按照其电导系数值来評定，則它們可以分为三个范围。

- 1) 金屬或导体，其电导 $\gamma = (10^{-3} - 10^{-6}) (\text{欧} \cdot \text{厘米})^{-1}$ ；
- 2) 电介質或絕緣材料，其电导自 $\gamma = 10^{-10} (\text{欧} \cdot \text{厘米})^{-1}$ 起及以下；
- 3) 半导体居于中間的位置。

这样，將材料列入导体类或电介質类的主要根据之一，便是其电导的数值。

然而，它不能充分地評定是电介質或电气絕緣材料。在电介質的范围内，材料承受电場和傳遞电力的性質随着材料电导的減小而加强。所以，根据电气絕緣材料或电介質与电場的关系的观点来判別它們的性質才是正确的。法拉第对此下了很好的定义。他写道：“我利用电介質一詞来表示一种电力能够借着它或者經過它而作用的物質”。因而电介質的主要性質在于借着它能建立电場，或者說，电場仅可能在电介質中建立。

第一章 电介质的理论基础

1-1. 电 场

电场的图形。均匀和不均匀电场。边缘效应

由电工学课程可知，电场可以用与电场强度向量相重合的电力线来描繪，或者可以用相同能阶表面(等位面)的踪跡来描繪，后者是与电力线相垂直的。

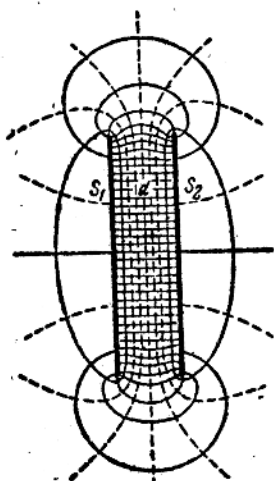


圖 1-1 二平行板的电场

圖 1-1 所示为具有異号电荷的二平行板的电场图形。用起始于平板 S_1 处而终止于平板 S_2 处的线来表示电力线。用垂直于电力线的线来表示等位面的踪跡。平板间的电场不是到处都均匀的。在平板的中部，电力线是互相平行的，且等位面踪跡间的距离是相等的，这种电场称为均匀电场。在接近平板的边缘处，电场的均匀性被破坏——电力线不再是直的也不互相平行了：在这些地方电力线变得较密，等位面踪跡在平板的边缘处也发生类似的变化。这种电场称为不均匀电场。联系上述电介质所特有的电场图形，研究电荷在导体中如何分佈的问题亦是适宜的，而在导体中电荷是能自由移动的。当孤立的导体上产生

異号的电荷时，它们便相互吸引并中和。有同号的电荷时则互相排斥，直到它们处在导体上尽可能边缘的位置为止，即到达与电介质毗連的导体表面上为止。例如，当孤立导体为球形时，电荷便集中在球的外表面上，因为球表面上各点较内部各点离开得更远一些。在長形的导体中，表面上最远各点是导体的兩端，所以电荷便互相排斥

而將力圖处于导体兩端的位置。当导体上有稜角或突出的尖端时，电荷在排斥时将主要处于稜角和尖端的位置。因此，当导体有复杂的形状或者是長形时，导体各部分的电量是不相同的。为了表明导体表面上电荷的分佈情形，可引用导体表面电荷密度的概念。表面电荷密度的数值是指导体表面上每一平方厘米上的电量。在孤立的球形导体中，在球的全部外表面上电荷密度都是相等的。在長形导体中，兩端的电荷密度最大，而中部則最小。在具有稜角、尖端和各种凸出的导体上，最大电荷密度是在稜角、尖端和凸出的地方。結果，在这些地方附近的空間，电场强度增大到这样的程度，以致使电介質游离。

說明了电荷在导体中的分佈情形后，圖 1-1 所示平板邊緣处的电场圖形就能明白了。因为平板的邊緣是导体上最远的部分，所以邊緣上的表面电荷密度数值最大。由此，邊緣处的电位梯度的数值比平板中部的大得多，这样，在邊緣处就有十分不均匀的电场。电极邊緣处电场的这种不均匀性，技术上称为**邊緣效应**。

在实际电气装置中，邊緣效应有許多不利之处，因为由于电场强度十分不均匀，电气装置在邊緣处發生了先期的击穿。所以在实际的結構中，对于消除或显著地減弱邊緣效应的問題是極为注意的。消除或显著地減弱邊緣效应的措施是：

a)使邊緣的表面有較大的曲率半徑，因而降低了邊緣处表面电荷密度；

6)在电极邊緣附近的电场中放入介电系数比电极間媒質的介电系数大的电介質；从以后的叙述中可以看出，这样一来使电极邊緣处的电场强度显著地減低；

b)在有邊緣效应的地方采用电导系数較高的材料。

在电场中放入不带电的导体时所得的不均匀电场具有实际的兴趣。在实际的情况中，这种情

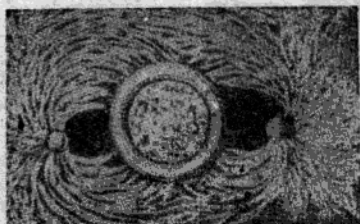


圖 1-2 当在电场中放入金屬环时两个異号电荷的电场圖形。电力綫沿法綫方向指向圓环，并終止于圓环表面。环的内部沒有电场（圖形是利用磨碎的石膏晶体而获得的）

形是常常会遇到的(例如, 在多层绝缘材料、纸、压纸板、云母等中可能含有导电物体)。导电物体大大地改变了电场的圆形并能降低绝缘结构的工作特性。

当在电场中放入不带电的导体时, 电场力使导体内部的固有电荷重新分佈。由于电荷的这种重新分佈, 导体内部各点的电场强度变为等于零, 而外电场的力线将趋于与导体垂直的方向。这可以图 1-2 所示来说明, 该图所示为二个带异号电荷的球当在二球之间的电场中放入金属环时电场的圆形。自图中可以看出, 力线趋向放入场中的金属环, 并终止于环的表面上, 而环的内部则没有电场。这图形实际地证实了下列事实, 即在导体中受电场影响而产生的电荷是分佈在导体的外表面上的(在此情形下, 电荷分佈在环的外表面上)。此时, 导体的外表面变为等位面, 而电场的力线趋于与放入电场的导体表面相垂直。图 1-3 中绘出当在电场中放入实心导体时电场的变化。左图示出

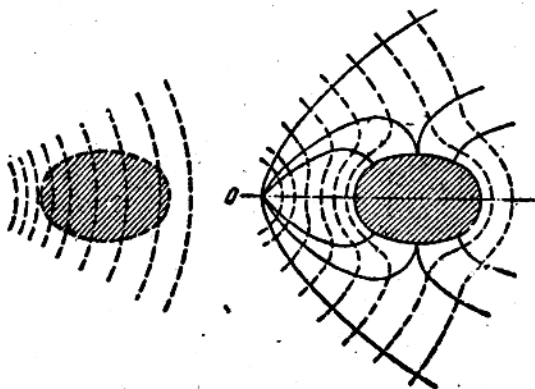


图 1-3 当在点电荷的电场中放入导体时电场的变化

导体未放入以前的电场, 右图则为导体放入以后的电场。从图 1-3 可以看出, 导体表面附近的电位梯度显著地增大。电场强度的增大可以使电介质先期破坏(击穿)。这样, 在电气绝缘结构的电场中放入导体能引起对此结构不利的现象——击穿得比电场中没有导体存在时

要早。

电容。电气絕緣結構用的各种电极形狀的电容 和电场强度的基本公式

在計算电气絕緣結構时，最重要的是計算不同电极形狀的电場，同时必需解析地决定最好的电极形狀，电場的电位与电荷之間的关系等等。为此，可以利用計算电容器的电容和电場的公式。最簡單电容器的計算公式已在电工学課程中講过。这里只附帶研究一下在电气絕緣結構中最常用电极形式的电容器的計算公式。

二平行圓柱体，彼此相隔不远。推导这种圆柱体的电場强度和电容量的公式是复杂的解析題目，所以此处只列出决定半徑相等的二个圆柱体的电容量和电場强度值的公式，而不加以推导。

电容按下式决定：

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon l \pi}{\ln \frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{r}} [\text{法}]. \quad (1-1)$$

式中 $h = \frac{d}{2}$ ，即等于圆柱体軸間距离的一半；

r ——圆柱体的半徑；

l ——長度；

ϵ ——电介質的相对介电系数；

$\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-14}$ 法/厘米。

相互接近的兩圆柱体表面上各点的电場强度不是都相同的，因为由于二个圆柱体的电荷的影响，在圆柱体上 a 点(圖 1-4)的表面电荷密度最大，而 b 点的电荷密度則最小。所以在这些点附近的空間中，电場强度是不同的。

a 点的电場强度按下式决定：

$$E_{\max} = \frac{U}{2r \sqrt{\frac{h-r}{h+r}} \ln \frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{r}} [\text{伏/厘米}], \quad (1-2)$$

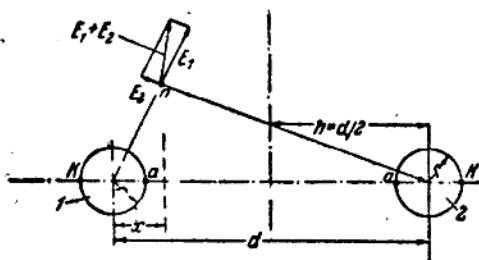


圖 1-4 二平行圆柱体的电场

而 k 点的电场强度按下式决定:

$$E_{MN} = \frac{U}{2r \sqrt{\frac{h+r}{h-r} \ln \frac{h+\sqrt{h^2-r^2}}{r}}} \text{ [伏/厘米]}. \quad (1-3)$$

如在这些公式中取 $h \gg r$, 则 $(h+r)$ 及 $(h-r)$ 将都趋近于数值 h ; 这时(1-1), (1-2)和(1-3)式变为下列的形式:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon \ln \pi}{\ln \frac{2h}{r}}; \quad E_{MNC} = \frac{U}{2r \ln \frac{2h}{r}} \quad \text{和} \quad E_{MN} = \frac{U}{2r \ln \frac{2h}{r}},$$

即对于彼此相距很远的两圆柱体, E_{MNC} 和 E_{MN} 的值是相同的, 而这就证实了当两圆柱体彼此距离相当远时, 它们的电荷的相互影响就很小, 所以圆柱体上的表面电荷密度在整个圆柱体表面上都是均匀的。

圆柱体-平面。 可以用对称线将二圆柱体的电场分为二个相同的部分。在对称线上, 电场力线与对称线相垂直。因此, 对称线是与二个圆柱体等距离的等位面踪跡, 因此对称线上的电位等于 $\frac{U}{2}$, 而二圆柱体的电场则被分为二个相同的部分(电场的一半是另一半的镜像)。注意到了这一点, 就可以根据二圆柱体的公式来决定圆柱体-平面的电容和电场强度。为此, 在这些公式中将 U 代以电压的一半, 将圆柱体间距离 d 代以圆柱体的轴到平面距离的二倍, 即 $2h=d$, 其中 h ——自圆柱体的轴到平面的距离; 此时, 当 $h \gg r$ 时则得电容量的表达式为:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot 2\pi}{\ln \frac{2h}{r}} [\text{法}],$$

而最大场强值为:

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{2h}{r}} [\text{伏/厘米}]. \quad (1-4)$$

二同心圆球。圖 1-5 繪出二同心圆球的电场。內球有电荷 $+q$ ，而外球有一 q 。这些电荷在半径为 r_0 的內球外表面与半径为 r_N 的外球內表面之間的內部空穴中产生了电场。球外沒有电场，因为电荷在二球之間的內部空穴中被彼此抵消着。

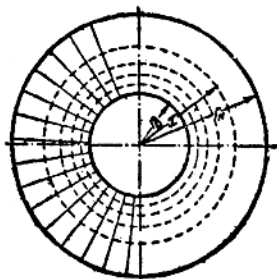


圖 1-5 二同心圆球的电场

在半径为 r 的等位面上的电场强度为:

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon \cdot 4\pi r^2}.$$

內球和外球之間的电位差等于 $U_N - U_0$ 。自外球上移动单位电荷到內球上所需的功表示为:

$$\int_{U_0}^{U_N} dU = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon} \int_{r_N}^{r_0} \frac{dr}{4\pi r^2}.$$

积分后得:

$$U = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon \cdot 4\pi} \left[\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_N} \right] [\text{伏}]; \quad (1-5)$$

結構的电容:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot 4\pi r_N r_0}{r_N - r_0} [\text{法}]. \quad (1-6)$$

以电位差来表示的电场强度为:

$$E = \frac{U}{r^2} \cdot \frac{r_N r_0}{r_N - r_0} [\text{伏/厘米}].$$

圖 1-6 繪出电场强度随等位面半径的改变而变化的图形。自圖中

可以看出, 当 $r=r_0$ 时电场强度为最大。在这种情形下, 它等于:

$$E_{\max} = \frac{U r_n}{r_0 (r_n - r_0)} \text{ [伏/厘米]} \quad (1-7)$$

半径相同的二圆球。二圆球电场的解析计算是极端复杂的, 此处列出计算电容和电场强度的公式而不加推导。

半径相同的二圆球的电容由下列表达式决定:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon n}{4(f-1)} \text{ [法]} \quad (1-8)$$

式中 a ——二圆球间的最短距离, 厘米;

f ——系数, 它与 $\frac{a}{r}$ 的比值有

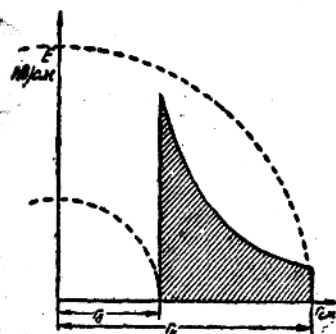


图 1-6 在二同心圆球所形成的电容器中, 电场强度随等位面半径而变化的情形 (取自表 1-1)。

当二球的半径相同时, 系数 f 和 f_1 的值与比例 a/r
(球间最短距离除以其半径) 的关系

表 1-1

a/r	f	f_1	a/r	f	f_1
0.1	1.034	1.03	4.0	2.686	3.21
0.5	1.177	1.18	5.0	3.64	—
1.0	1.366	1.41	10.0	5.60	—
2.0	1.781	1.97	15.0	8.08	—
5.0	2.225	2.59	20.0	10.58	—

二圆球的电场中, 当球面间距离为 a , 并当其中电位的分佈为对称(二球均与地绝缘)时, 在二球的最接近二点上的最大电场强度可由下列表达式决定:

$$E_{\max} = \frac{U}{a} f \text{ [伏/厘米]} \quad (1-9)$$