



电 磁 场 的 应 用

高等学校教学参考书

周省三 张文灿 杨宪章

高等教育出版社



高等学校教学参考书

电磁场的应用

周省三 张文灿 杨宪章

高等教育出版社

(京)112 号

内 容 简 介

本书是为配合高等学校电磁场理论教学而编写的参考书,藉以扩大学生的知识面,密切理论与实际的联系,了解应用电磁场理论分析解决实际问题的途径和方法。

本书收集了电磁场理论的应用实例 100 多个,内容涉及发配电、电线电缆、电机电器、自动化、传感器、仪表、电声、家用电器、纺织、轻工、食品、印刷、交通、农业、高能物理、地质勘探、地震预报、医疗卫生等广泛领域。全书分静电场的应用、恒定电场的应用、恒定磁场的应用、位场边值问题解析法的应用、电磁场数值计算方法的应用、时变电磁场的应用等六章。本书内容丰富,文字通顺、叙述深入浅出,简明可读。

本书供高等学校电类专业师生、研究生及有关工程技术人员阅读。

开本 850×1168 1/32 印张 9 字数 220 000

1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷

印数0001—1 564

ISBN 7-04-002326-1/TN·125

定价5.55元

前 言

电磁场理论是工科电类专业的一门重要的技术基础课。它在物理电磁学的基础上,进一步研究了宏观电磁现象的基本规律和分析方法,这不但是为了学习某些后续专业课程的需要,也是深入理解和分析工程实际中的电磁问题所必须掌握的基本知识。但是,由于课程本身的特点,内容比较抽象,加之讲授又往往不甚得法,理论联系实际不够,初学者常感到不易掌握。为此,我们收集了部分电磁场应用方面的例子,编著成册,作为课程学习的参考和补充,藉以提高学生学习的积极性,并为应用电磁场理论解决实际问题作一响导。对于有关工程技术人员,也能扩大眼界,了解应用电磁场理论分析、解决实际电磁问题的基本方法和途径。本书共分静电场的应用、恒定电场的应用、恒定磁场的应用、位场边值问题解析法的应用、电磁场数值计算方法的应用和时变场的应用六章。其中第一章和第六章由周省三同志编写,第三、第四章由张文灿同志编写,第二、第五章由杨宪章同志编写。本书的体系与通常讲述电磁场的书籍有所不同,不是以理论或方法的介绍为主线来展开讨论,而是尽量通过具体的例子来介绍和讨论电磁场理论的应用,因而,本书的编著是一种尝试,由于编者水平有限,编排方式也不一定合适,缺点、错误在所难免,敬希读者批评指正。

本书承贵州工学院葛真教授审阅,提出了许多宝贵意见和建议,编者致以衷心的感谢。

编 者

1988年6月

目 录

前言

第一章 静电场的应用

§ 1-1 概述	(1)
§ 1-2 电场的分布·绝缘问题	(3)
§ 1-3 电容计算·静电感应	(18)
§ 1-4 静电力及其应用	(31)
§ 1-5 静电的工业应用	(42)
§ 1-6 静电的危害与防护	(58)
参考文献	(68)

第二章 恒定电场的应用

§ 2-1 概述	(70)
§ 2-2 位场的模拟应用	(71)
§ 2-3 电法勘探	(75)
§ 2-4 地震预报	(83)
§ 2-5 超导应用	(88)
§ 2-6 高压变电站人体登杆感应电流的计算	(94)
参考文献	(97)

第三章 恒定磁场的应用

§ 3-1 概述	(98)
§ 3-2 螺管线圈磁场的应用·磁镜	(101)
§ 3-3 载流母线的磁场	(108)
§ 3-4 电感	(114)
§ 3-5 电感式传感器	(122)
§ 3-6 永磁体的应用·磁存储和磁记录	(130)
§ 3-7 磁场力的应用	(138)

§ 3-8 磁场在其他工业方面的应用及其危害·····	(111)
§ 3-9 磁场的治病与致病·····	(151)
参考文献·····	(155)

第四章 位场边值问题解析法的应用

§ 4-1 概述·····	(157)
§ 4-2 直角坐标系中场的计算及应用·····	(158)
§ 4-3 圆柱坐标系中场的计算及应用·····	(166)
§ 4-4 球坐标系中场的计算及应用·····	(171)
§ 4-5 复变函数法的应用·····	(174)
§ 4-6 保角变换法的应用·····	(180)
§ 4-7 许瓦兹-克利斯多菲尔变换法的应用·····	(188)
参考文献·····	(194)

第五章 电磁场数值计算方法的应用

§ 5-1 概述·····	(196)
§ 5-2 许瓦兹变换法的应用·····	(199)
§ 5-3 有限差分法的应用·····	(205)
§ 5-4 有限元方法的应用·····	(210)
§ 5-5 场的网络拓扑法的应用·····	(219)
§ 5-6 等效边界原理的应用·····	(226)
§ 5-7 惩罚函数分解算法的应用·····	(233)
§ 5-8 边界单元法的应用·····	(238)
§ 5-9 模拟电荷法的应用·····	(247)
参考文献·····	(254)

第六章 时变电磁场的应用

§ 6-1 概述·····	(256)
§ 6-2 电磁感应现象及其应用·····	(257)
§ 6-3 涡流与集肤效应·····	(264)
§ 6-4 时变电磁场在无线电领域中的应用·····	(269)
§ 6-5 电磁干扰与防护·····	(273)
参考文献·····	(279)

第一章 静电场的应用

§ 1-1 概 述

人类很早就观察到电的现象。雷电实质上就是大自然中的静电放电现象。我国古代作品《论衡》中有“顿牟掇芥、磁石引针”的记载，顿牟是指琥珀，掇是拾取，芥是轻而小的物体。公元1600年，英国的吉尔伯特创造了“电”这个词。接着，马德堡的盖利克制造了第一台摩擦式静电起电机。18世纪中，发明了莱顿瓶。1752年，富兰克林进行了关于雷电性质的著名实验。1754年发明了避雷针。1785年，发表了著名的库仑定律，为静电学的发展打下了基础。随后，泊松（1811年）、高斯（1839年）等人又发展了静电位的理论。在库仑定律的基础上，高斯作出了电量的定义。1843年法拉第证明了电荷守恒原理。随着伽伐尼、伏打的工作，电池问世，动电（电流）得到发展。1831年，法拉第又发现了电磁感应现象，感应电机随之产生。电磁现象在电工技术上的应用得到愈来愈大的发展。在理论上，逐步总结出法拉第-麦克斯韦关于电磁场的理论。这个理论于1890年为赫兹所证实，它奠定了电磁学理论的物理基础，并进一步推动了无线电技术的发展。

由以上简短的历史回顾可知，人们接触静电是很早的，对静电的认识和研究推动了对动电以及完整的电磁场的认识和研究。但是相当长一个时期以来，人们的注意力似乎为动电所吸引，相对说来，对静电及其应用的研究进行得比较少。本世纪以来，静电技术在生产上的应用开始得到重视和发展。1907年化学家卡脱

莱尔研究了静电沉积并用于静电除尘。接着，静电分离、静电涂层也开始得到发展，1935年，卡尔森研究了静电印刷机，接着又于1944年研制了静电复印机。对于自然界和大气中的静电现象的研究，也受到了重视。此外，由于静电的积累和放电，会给生产以至人的安全带来危害，随着生产技术的发展，特别是随着石油工业、化学工业和电子工业的发展，静电的危害变得愈来愈突出。所有这些都有力地推动了静电理论的发展。

对静电的研究，包括带电机理和技术的研究，静电场分析和计算的研究，静电场性质、效应及其应用的研究，静电的危害及其防护的研究等等。

目前，国内外对静电技术的理论和应用，已经给予一定的重视，并获得不少进展。

苏联在50年代初期就成立了电子离子科学研究所，从事静电场的理论及其应用的研究，积累了有关电晕放电特性和电晕外形结构方面的大量实验资料，并且对于较复杂电极系统的电场强度分布及其体积放电密度，研究出了一系列的近似计算方法。

日本在1967年成立了日本静电学会，出版了《静电气学会志》，对于环境保护工作也给予了极大关注，成立了静电除尘委员会。静电除尘、静电涂层、静电印刷等均得到广泛的应用。

美国于1969年成立了美国静电学会。一些大学和大企业也从事静电技术的应用研究。美国国际商业机器公司对静电印刷和电子照相技术的应用作了研究，研制出配有IBM 3800型计算机的输出打印系统。

欧洲经济合作和发展组织所属的欧洲化学工程联合会静电分会，美国物理学会静电分会都定期开学术讨论会，进行有关静电技术理论的学术讨论和学术交流。

中国物理学会静电专业委员会自1981年成立后，进行了多次学术交流。静电技术在我国也有不同程度的应用，但是和先进国

家相比还有一定差距，有待我们今后的努力。

§ 1-2 电场的分布·绝缘问题

1. 电场强度与介质击穿

在带电体周围的空间，存在着电场。当介质中的电场强度超过一定值时，介质就会发生电击穿，丧失其绝缘性能，这一电场强度称为电介质的临界电场强度。某些常见的绝缘体的临界电场强度如表1-1所示。

为了保证电气设备的安全运行，必须使它们的绝缘体中可能出现的电场强度小于临界电场强度。临界电场强度的大小，不仅和绝缘体本身的结构有关，还和电场分布的不均匀程度以及外界工作条件等有关。因此，在设计、生产、安装各种电气设备，特别是高电压设备时，必须研究它的绝缘问题。除了选用合适的绝缘材料外，还必须正确设计电极形状并对电场进行计算和调整。生产实际的需要，迫使人们对电场的分布问题进行深入的研究。

表 1-1

材 料	相对介电常数 ϵ_r	临界电场强度 kV/cm	电阻系数 $\Omega \cdot \text{cm}$
真 空	1		
空 气	1.00059	30	
变压器油	2.5	100~160	10^{14}
石 棉	2.7	42	1.6×10^{11}
沥 青	3.1	140	6.1×10^{14}
电 木	4.5~5.5	177~216	10^{12}
玻 璃 板	5.5~9.1	300	2×10^{13}
云 母	5~7	210~280	$(0.04 \sim 200)10^{15}$
石 蜡	1.9~2.6	115	10^{16}
瓷	4.4~5.7	80~135	3×10^{14}

2. 平板电容器以及类似结构的场

设两极板间距离为 d ，两极板间所加电压为 U ，略去边缘效

应, 极间的电场强度将为 $E = U/d$, 随着电压的增加, E 也随之增加, 当 E 增加到临界电场强度时, 电容器将被击穿损坏。因此, 根据使用条件, 对电容器的耐压应有不同的要求, 因而影响了电容器的结构。对于高压电容器而言, 要选择高临界电场强度的介质作为极间介质 (例如油浸纸质电容器、云母电容器等), 极间距离也不能太小。

实际的电容器, 在边缘处的电场通常是不均匀的, 称为边缘效应。平板电容器边缘处的电场分布如图1-1所示。由图可见, 在边缘附近电场不均匀, 并且电力线分布较密, 因而比较容易击穿。当极板间充以介质时, 特别容易发生沿介质与空气的交界面处的放电, 称为弧越现象。因此, 高压电容器往往把两个电极按上图中 $U_x = \pm \frac{U}{2}$ 的等位面制作, 并将边缘弯成圆形, 如图1-2所示。使

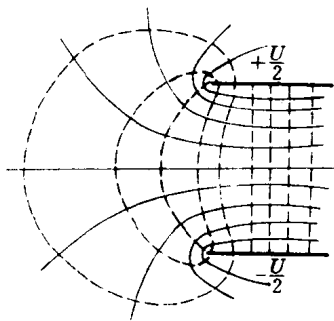


图 1-1

边缘处的电场强度比极板中部的电场强度小。

如果在极板间有两种不同的介质, 如图1-3所示, 则有

$$E_1 d_1 + E_2 d_2 = U$$

$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$$

可解得

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2}$$

$$E_2 = \frac{U}{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} d_1 + d_2}$$

设 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, 则 $E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2} < \frac{U}{d}$

$$E_2 = \frac{U}{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} d_1 + d_2} > \frac{U}{d}$$

可见, 在电容器中放进介质时, 介电常数小的介质中电场强度将增大, 因而更易于击穿。在电机和电器中, 如有两种不同介电常数的介质, 也应当考虑这个问题。特别是当一种介质是空气时, 空气将首先被击穿。因此在制造高压电机、电器时, 应将介质中的空气除去, 并加以浸渍剂 (例如浸在变压器油中)。

3. 同轴电缆

同轴电缆中的电场, 径向分布是不均匀的。在已知极间电压 U 时, 极间电场强度可由下式表示:

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

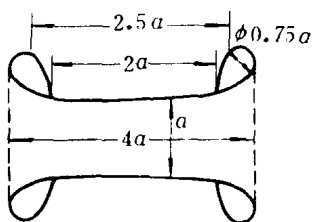


图 1-2

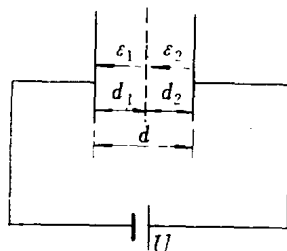


图 1-3

式中 r_1 、 r_2 分别为电缆内外导体的半径。由此可见，在 $r=r_1$ ，即在内导体表面处，电场强度最大为

$$E = E_{\max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

当外半径 r_2 一定， r_1 在某一合适值时，可使 $E_{\max}$ 最小。将上式对 r_1 求导，即令

$$\frac{d}{dr_1} \left(\frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \right) = 0$$

可得

$$r_1 = \frac{r_2}{e} = 0.368 r_2$$

此时

得
$$E_{\max} = \frac{U}{0.368 r_2}$$

r_1 过小则内导体曲率过大， r_1 过大则内外导体距离过小，都会使电场强度增大。

实际高压输电用的单芯同轴电缆（或高压圆柱同轴电容器），其 r_1 规定小于上述数值。当电场强度增加时，在内导体表面发生电晕放电，使内导体的有效半径增大，从而使 $E_{\max}$ 减小。如此时 $E_{\max}$ 小于临界电场强度，则不致全部被击穿。

前面已经提到，当电极间有两种不同介质时，电场的分布将发生变化，在 ϵ 小的介质中电场强度将增大，利用这种特点，可在同轴电缆中充以两种不同介质 $\epsilon_1 > \epsilon_2$ 如图1-4所示。

在 ϵ_1 中，
$$E_{\max} = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_1 R_1}$$

在 ε_2 中, $E'_{\max} = \frac{\tau}{2\pi \varepsilon_2 R_2}$

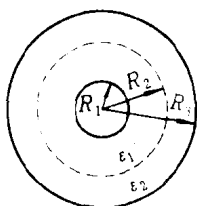


图 1-4

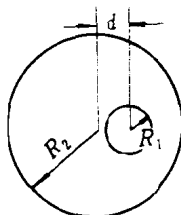


图 1-5

令 $E_{\max} = E'_{\max}$,

此时的最大电场强度, 可求得为

$$E_{\max} = \frac{U}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} + R_2 \ln \frac{R_3}{R_2}} .$$

如果内导体和外导体不完全同轴, 而有一偏心, 如图1-5所示, 则电场强度的最大值将增大, 并出现在内导体最靠近外导体一侧的表面处。设内导体半径为 R_1 , 外导体半径为 R_2 , 偏心的距离为 d 。利用电轴法, 将圆柱导体用等效电轴代替, 便可求得最大的电场强度。

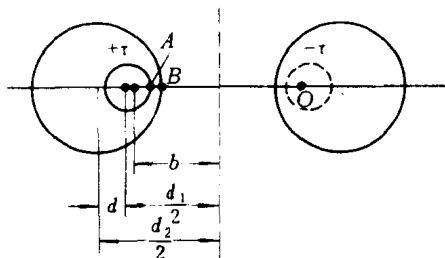


图 1-6

由图 1-6, 可求得

$$U = \varphi_A - \varphi_B = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\frac{d_1}{2R_1} + \sqrt{\left(\frac{d_1}{2R_1}\right)^2 - 1}}{\frac{d_2}{2R_2} + \sqrt{\left(\frac{d_2}{2R_2}\right)^2 - 1}}$$

$$E_{\max} = E_A = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{AC} + \frac{1}{AD} \right]$$

$$= \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{b - \left(\frac{d_1}{2} - R_1\right)} + \frac{1}{b + \left(\frac{d_1}{2} - R_1\right)} \right]$$

$$= \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{2b}{b^2 - \left(\frac{d_1}{2} - R_1\right)^2} \right]$$

$$= \frac{U}{\ln \frac{\frac{d_1}{2R_1} + \sqrt{\left(\frac{d_1}{2R_1}\right)^2 - 1}}{\frac{d_2}{2R_2} + \sqrt{\left(\frac{d_2}{2R_2}\right)^2 - 1}}} \left[\frac{2b}{b^2 - \left(\frac{d_1}{2} - R_1\right)^2} \right]$$

设 $R_1 = 2\text{mm}$, $R_2 = 5\text{mm}$, $d = 1\text{mm}$, $U = 1000\text{V}$

则可求得

$$E_{\max} = 7 \text{ kV/cm}$$

同一尺寸电缆, 在没有偏心时,

$$E_{\max} = 5.43 \text{ kV/cm}$$

可见, 由于偏心使最大电场强度增大。故在电缆制造工业中应进行检测和控制, 使偏心不超过容许值。

4. 绝缘套管

在高压导线穿过接地的电极时，必须采用绝缘套管加以隔离，最简单的套管如图1-7所示。电场强度的最大值发生在导线表面处，其电场可近似地看作是同轴圆柱导体间的场，其值为。

$$E_{\max} = \frac{U_0}{r_1 \ln r_2 / r_1}$$

其中 U_0 为导线上的电压， r_1 、 r_2 为导线和接地孔的半径。这种简单套管的缺点是放电电压不高，只适于电压不太高的场合。高压设备中常用的一种电容套管，其绝缘体由多层介质组成，每层绝缘体包以金属电极，其长度随半径的增大而缩短，如图1-8所示。

设各层介质的介电常数 ϵ 相同，导体电极上带电为 Q ，则各层介质中的径向电场强度为

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon r l}$$

其中 l 为各层中间电极的长度。

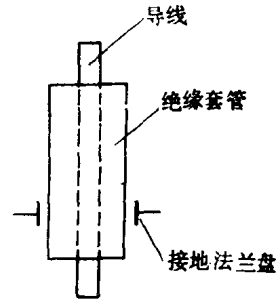


图 1-7

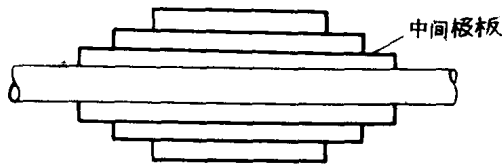


图 1-8

可见，如令 rl 等于常数，各层绝缘体间将有相同的最大径向电场强度。在此情况下，套管的穿击电场强度最大。实际的电

容套管的设计, 还要使沿套管表面电场的分布尽量均匀, 以提高其沿面的放电电压。

在实际上还会碰到同心球极间的电场, 例如一种悬式绝缘子其电极间的电场如图1-9所示。

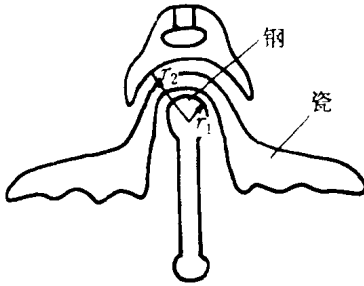


图 1-9

由高斯定理可得电极间任一点电场为 $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$

$$\text{则 } U = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\text{故 } \frac{Q}{4\pi\epsilon} = \frac{Ur_1r_2}{r_2 - r_1}, E = \frac{Ur_1r_2}{r^2(r_2 - r_1)}$$

其最大值出现在 $r = r_1$ 处, 故得

$$E_{\max} = \frac{Ur_1r_2}{r_1^2(r_2 - r_1)} = \frac{Ur_2}{r_1(r_2 - r_1)}$$

当 r_2 一定时, 改变 r_1 可使 $E_{\max}$ 为最小,

$$\text{令 } \frac{dE_{\max}}{dr_1} = Ur_2 \frac{d}{dr_1} \frac{1}{r_1(r_2 - r_1)} = 0, \text{ 可得 } r_1 = \frac{r_2}{2}$$

$$\text{此时, } E_{\max} = \frac{Ur_2}{\frac{r_2}{2} \left(r_2 - \frac{r_2}{2} \right)} = \frac{4U}{r_2}$$

例如，取瓷的临界电场强度为 135kV/cm （见表1-1），设已知 $r_2=5\text{cm}$ ，则容许的最大电压为

$$U_{\max} = \frac{r_2}{4} E_{\max} = \frac{5}{4} \times 135 = 168.75\text{kV}$$

绝缘子的瓷绝缘体，做成裙边形状，是为了防止沿绝缘体表面发生弧越和击穿。

5. 球隙

球隙是高压实验室中用来测量高压的仪器，两个半径相同的球相距一定距离，当空气的温度、压力一定时，球间的放电电压也是一定的。加上待测电压，改变极间距离使其开始放电，由这个距离便可测得所加电压的大小。

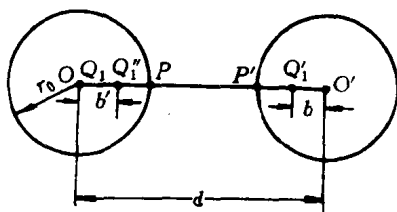


图 1-10

球隙之间的电场，可用镜像法计算。

设 $r_0 = 0.2d$ 可求得各个镜像电荷的大小及位置如表1-2所示。最大电场强度出现于 P 点，对上表数据，可求解为

$$\begin{aligned} E_{\max} = & \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[\frac{Q_1}{r_0^2} + \frac{0.2Q_1}{(0.8r_0)^2} + \frac{0.0417Q_1}{(0.7917r_0)^2} + \frac{0.0087Q_1}{(0.7913r_0)^2} \right. \\ & + \dots + \frac{Q_1}{(0.8d)^2} + \frac{0.2Q_1}{(0.76d)^2} + \frac{0.0417Q_1}{(0.758d)^2} + \frac{0.0087Q_1}{(0.758d)^2} \\ & \left. + \dots \right] = 0.736 \frac{U_0}{r_0} \end{aligned}$$