

国际大电网会议第36.01工作组著

输电系统产生的电场和磁场

现象简述 实用计算导则

邵方殷等译

水利电力出版社



73.183

620

输电系统 产生的电场和磁场

现象简述 实用计算导则

国际大电网会议第36.01工作组著

邵方殷等译

水利电力出版社

40/50
内 容 简 介

本书由国际大电网会议 (CIGRE) 第36.01工作组组织九个国家的专家集体编写, 简明扼要地介绍输电线下空间场强的计算方法、线下物体的感应电压和电流的工程计算方法以及工频电场测量技术和场强表的原理。关于电场对人的生态影响也作了简要的综述。

本书可供从事高压输电运行、设计和研究 人员参考, 也可供高等院校和中等电力学校高压和发电输配电专业师生参考。非这类专业同志也可从本书有关章节了解到输电线路下静电感应的一些基本概念和现象。

Electric and magnetic fields produced by transmission systems Description of phenomena practical guide for calculation Working group 36.01 (Interference and fields) CIGRE 1980 Paris

输电线路下的电场和磁场

现象简述 实用计算基础

国际大电网会议第36.01工作组著 邵方殷等译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

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 32开本 4.125印张 87千字
1984年2月第一版 1984年2月北京第一次印刷

印数 0001—8640册 定价 0.45元

书号 15143·5300

译者的话

随着输电电压的不断提高，在特高压和超高压输电线下以及变电站内存在的工频电场，近年来已引起了人们的关注。我们考虑到500千伏输电线路已在我国建成并投入运行，今后还会不断发展，特将此书翻译出版。这本书简要地总结了各国关于电力系统静电感应的计算、测试技术以及工频电场对生态是否存在影响的较为一致的看法。这样，一方面可介绍国外有关工频电场的计算和测量方法，处于电场中物体的感应电压和电流的计算；另一方面可使读者对工频电场的存在和可能出现的影响有一较为全面的认识，从而消除某些不必要的疑虑。

本书由水利电力部电力科学研究院高压研究所的邵方殷（第一章和第五章）、李顺元（第二章和第六章）、庞廷智（第三章）、崔鼎新（第四章）翻译。杨吟梅校阅了第一、五章，邵方殷校阅了第二、三、四、六章。

北京邮电学院高攸刚同志复校了全稿，并提出了宝贵意见，在此表示感谢。

限于译者水平，错误之处在所难免，请广大读者批评指正。

译者

1982年12月于北京

本文件是由第36.01工作组（干扰和场）准备的，参加人员有：

- C. 加里 (GARY) 先生 (会议召集人) (法国)
- R. 科蒂纳 (CORTINA) 先生 (意大利)
- F. 赫希 (HIRSCH) 先生 (西德)
- B. 霍姆格伦 (HOLMGREN) 先生 (瑞典)
- D. 科霍托娃 (KOHOUTOVA) 夫人 (捷克斯洛伐克)
- N. 科尔西沃 (KOLCIO) 先生 (美国)
- J. 卢姆斯 (LOOMS) 先生 (英国)
- C. 麦拉古蒂 (MALAGUTI) 先生 (意大利)
- P. 皮罗泰 (PIROTTE) 先生 (大会秘书) (比利时)
- A.W. 范德威金 (VAN DER WEEGEN) 先生 (荷兰)

前 言

这六章导则提出了九个国家的专家们关于电场的存在所引起的问题的共同看法。

第一章和最后一章（绪言；电场和电流的效应）提出了有关此问题的一般见解。中间几章（二至五章）实际上全是技术性的。这些章节包括计算电场和评价其效应时所需的物理概念和数学方法，并提供了有实际意义的具体数据。

对于需要了解有关这方面知识和处理这类问题的方法的非专业人员，在第一及第六两章中可以找到他们所需的全部材料。总之，对于为了要了解详细情况而准备阅读中间各章的读者，本导则作者向他们推荐了这些章节所涉及内容的初步材料。

目 录

译者的话

前 言

第一章 绪言 1

第二章 电场计算 8

2.1 几点提示——未畸变场和畸变场 8

2.1.1 准静态电场的定义 8

2.1.2 感应现象——畸变场 8

2.1.3 感应电流 10

2.2 确定电场强度的几种方法 10

2.2.1 等效电荷法 11

2.2.2 有限差分法 12

2.2.3 有限元素法 13

2.2.4 蒙特卡洛 (Monte Carlo) 法 14

2.3 输电线下方的电场 15

2.4 母线下的电场 26

2.5 屏蔽效应：输电线路 32

2.6 屏蔽效应：母线布置 33

2.7 输电线路附近房屋的屏蔽 34

2.7.1 屏蔽的效果 35

第二章附录 椭圆场 36

第三章 带电导线附近物体的感应电压和电流 39

3.1 用于这一现象的一般公式 39

3.2 V_0 , C_0 , i_0 的计算 42

3.2.1 V_0 的计算 42

3.2.2 C_0 的计算	43
3.2.3 i_0 的计算	47
3.3 物体电阻率的影响	50
3.4 在一些普通事例中的应用	52
3.4.1 车辆	52
3.4.2 葡萄园内的金属线和围栏	53
3.4.3 在电场中直立的人	55
3.4.4 和测量结果的比较	59
3.5 瞬时充电和放电情况	60
3.5.1 这种现象的分析	61
3.5.2 数字值	63
第四章 输电线路的磁场	67
4.1 磁场的计算	67
4.1.1 静磁学	67
4.1.2 电力线路的磁场	68
4.2 磁场的测量	70
4.2.1 磁场表的一般特性	70
4.2.2 磁场表的校准	71
4.2.3 影响磁场测量准确度的参数	72
4.2.4 测量输电线路附近磁场的方法	72
4.3 磁场效应和屏蔽	73
第五章 电场强度的测量方法	76
5.1 场强表原理	76
5.1.1 球偶极子型	76
5.1.2 壳状偶极子型	77
5.1.3 平行板仪表	77
5.1.4 地面测量电极	78
5.1.5 不同类型场强表的使用	79

5.1.6 电场计量仪	79
5.2 校准场强表必须具备的条件	80
5.2.1 一般准则	80
5.2.2 足够大空间的均匀电场的产生	81
5.2.3 平板电极的邻近影响	83
5.3 影响电场测量准确度的参数	85
5.3.1 仪表的倾斜	86
5.3.2 电场的均匀性	86
5.3.3 环境的湿度	86
5.3.4 操作人员的影响	87
5.3.5 绝缘支持物的影响	89
5.4 对场强表的质量要求	89
5.4.1 场强表的使用	89
5.4.2 电路特性	90
5.4.3 尺寸	90
5.5 模拟的应用	91
5.5.1 模拟方法的原理	91
5.5.2 电压源	91
5.5.3 测量电极	92
5.5.4 模拟方法的准确度	93
第六章 电场和电流的效应	95
6.1 电场中的各种物理现象	95
6.2 在电场中的感觉	97
6.3 推测的一些影响	101
结论	104
参考文献	106

第一章 绪 言

虽然，人们早已知道在所有电力设备和架空线路附近以及在变电站内有工频电场存在这一现象，但随着特高压的出现，使用电压愈来愈高，这一实际情况重新引起人们对该现象后果的关注。

本导则的目的是使这些电力装置的设计和使用能够利用主要是针对以下两类问题的某些研究成果。

第一类问题涉及到场强的确定，即场强的计算和测量，以及场强的作用方式的分析，亦即确定处于电场中的物体（包括活的有机体）上的感应电流，它们的电位，以及它们的后果。这些问题本质上是客观的和科学的。

第二类问题一般说来涉及到场强对活的有机体的作用，特别是对人的作用这样一些较为棘手的问题。这里有必要区别某些只引起人们不快的效应（例如刺痛和微弱的放电）和所谓生态效应，后者是否真的存在至今仍未确定，如果确有生态效应，它们的性质也还是个在推测和争论的题目。

因此，本导则的目的是在有电场存在的场合，为估算和尽可能减小装置对环境的影响提供需要的数据。同样，对磁场效应的问题，也将加以讨论，但更加简短。

因此，我们将简短地回顾最近15年至20年来，这些不同问题的发展过程，以及它们的现状。

历 史

某些情况下，当人接触金属物体时，在接触瞬间，会出

1111431

现一小火花，同时在接触点（如手指尖）会出现一种使人不愉快的刺痛感，这一事实在较低的输电电压时就已发现，但特别是自 400 千伏出现以来就更引起人们注意了。已经观察到如果金属物体对地绝缘，而人本身是接地的（例如穿着绝缘很差的鞋），上述现象就更加明显。停留在输电线下或变电站内的汽车、架设在水支柱上的金属围栏等就属于这种情况。

然而，对于这类物体，像我们后面将要表明的那样，仅仅瞬时放电可以感觉到，一旦接触牢固，留下的稳态电流就低于人能感觉的临界值。另一方面，如果该金属物体的表面积很大（例如紧靠线路的车库顶棚），接地是必不可少的。如果不接地，则由于稳态电容电流可能达到几个毫安，就会出现危害严重的、甚至是危险的电击。

已提出的另一危害是由于放电而引燃含有碳氢蒸气的燃料，例如汽车在离开线路很近的加油站加油时的情况。但直到目前为止，这种危害仅是理论上存在，幸好实际还未发生过。也曾经担心过实验室或医院内灵敏设备（例如心脏起搏器）的工作可能受到干扰。

对这些各种各样的麻烦事，确实已作了较扼要的调查研究，但因为很少发生，又不太重要，故没有引起工程技术人员很大注意。

然而，从1963年起，为了某些工作于高场强（大于20千伏/米）下的维修人员的需要，促使对使用工具时的电容放电电流进行研究，并且还研究和提出了这些电场可能产生的生态效应问题。

此外，试验表明在某一场强以上（约为20至30千伏/米，它取决于每个人的感觉灵敏程度），电场的存在可以从人和

毛皮动物的毛发根部和皮肤表面的刺痛感觉出来。考虑到这个效应是伴随着刺激性的微弱放电而发生的这一事实，可以想象到人和动物都不乐意停留在已达到感觉临界值的高场强区。需要在强电场中停留的带电作业的发展，提出了从医学方面进行研究的课题，一方面分析从事带电作业的人员的健康记录，另一方面又在实验室里将动物短时置于高场强下进行试验。两个方法都得到了否定的结果，都没有能证明有任何由电场引起的有害影响。然而，为了慎重和避免人们遭受到上述不舒服的感觉，发明了导电服。穿上这种服装，人对所有静电场都有了屏蔽。

当前的 问题

一般说来，电场效应随着所考虑物体的尺寸的增加而增加，并近似地和该物体所在位置的场强成正比。由于后一原因，有必要周密地检验由新的输电电压等级出现所产生的场强，并详细研究其各种可能的效应（始终要记住有超过危险极限的可能性）。这方面的问题也导致去寻求限制场强增加的技术措施，以适应运行电压的不断增长。

众所周知，仅对某些比较简单的布置形状才有可能进行电场的代数计算，能够对其电场进行分析计算的实际结构大概仅限于地面上单层水平布置的导线（对应于单回路线路档距的中央）。此外，为了表示诸如杆塔、相互跨越的母线等复杂结构的需要，最近几年来发展了利用计算机计算电场的各种方法。这些方法包括电荷模拟法、有限差分法和有限元素法（两者都基于求解拉氏方程）以及所谓的蒙特卡洛法。

但是，甚至这些方法也很快到达它们的极限，其原因不是因为为保存数据需要的储存容量太大，就是因为要反置的

矩阵阶数太高。还可以求助于模型方法，用高频电压（为增加测量的灵敏度）加到装置的模型上，借助于特种测量电极可以逐点画出电场图，来研究相应的空间。

但是，不管是用算法，还是用模拟法，最初确定的某一设备所产生的电场，必须用全尺寸的直接测量来验证。为此目的，已研制了几种测量仪器，它们遵循的原理仅稍有差别。这些仪器要求细心操作，它们容易受到很多干扰，最重要的是临近效应，电场的不均匀性，以及仪器的倾斜度。因而需要制定严格的技术条件和详细的使用说明。最后，为确定电场的物理效应，并得出与这些效应有关各量，即不连续的和瞬时的感应电流、处于电场中的物体的电容及“悬浮”物体（即在有电场存在的空间内，电气上绝缘的物体）的电位的数字值，还需要制定出各种计算和测量的方法。

这些纯技术性的各个方面，形成了本导则的主要内容。

工作组考虑了在这个文件体制中论述由高压装置产生的磁场是否合适。考虑到关于磁场对附近电力设备的影响（即导致出现感应电动势），这一问题人们已熟悉了，并且长期以来已采取了必要的预防措施。确定电力线路和电信线路间关系的国际电报电话咨询委员会（CCITT）导则，就是这方面的一个例子，除了这个特定情况，以及和电力线路耦合很强的地下通讯电缆（除在短路的零点几秒期间外，其他时间不会有危险）外，有关专家从未听到出现过有害的干扰影响的报告。

然而，为了完整性，导则仍专列一章，给出了计算高压装置产生的磁场的主要公式，以及测量这些磁场及其某些效应的仪器和步骤。

电场和磁场的生态效应问题

随着导电服解决了带电作业的问题，于是就认为电场效应这个问题已经结束，因为除了这个特定情况外，还没有看到有引起工程技术人员注意的重大影响。

因此，1972年苏联关于电场对人类有不希望的生态效应的报告，引起人们极大惊讶。这些效应使苏联的作者们提出人处于电场中的一些规定，对不限定停留时间（例如变电站内）的限制值定为5千伏/米。碰巧在目前的400千伏线路下，场强通常在这个值附近。全世界有几万公里这样的线路，提供了特别广泛和有意义的运行数据，说明这些线路是完全无害的。苏联的报告不仅对专门从事运行的全体工作人员，而且也对一般公众，清楚地提出了在接近电压等级更高的未来线路的问题。

就后者而论，从1975年起苏联已采纳了下列限制：

10千伏/米 跨越道路和经常会接近的地方；

15千伏/米 非居民区但有可能接近的地区；

20千伏/米 很难接近的地方。

在日本，限制电场的主要理由是因为在撑开的伞上有感应（伞的效应），它很容易引起人们不快的感觉。因此在群众易接近的地方，场强限制在3千伏/米以内，在这些地方常常需要装置屏蔽线（见第二章）。

在其他一些国家，也许是由于上述报告的影响，基于这一生态学方面的辩论，断言电力线对公众健康有有害的影响。这些指控是从登载在1974年“原子科学新闻简报”上路易斯（Louise）和佩顿·扬（Peyton Young）所写的有感染性的文章开始的。从那时起这篇文章一直被流行的报刊引

用，而这些报刊又用日益奇异的现象的传说渲染了它。

这样，这个问题就成为需要在基于客观试验事实的基础上来紧急处理的事情。

这些主张已引起科学家，技术人员和医务界的兴趣，从那以后，许多研究和观察方案已着手进行。目前这些结果已构成大量的、虽然还是不完全的知识。这些数据的适用范围和由此得到的结论在第六章中讨论。

从那里可以看出，现行的研究，例如在实验室内用动物做试验，大部分是在高场强下做的（大于20千伏/米），意图是使任何可能的效应能清楚地显示出来。即使在这种提高的场强下，所反映出的效应仍是微弱的，以至由不同研究者所得到的结果仍然是争论的议题。此外，由于上面所述的理由，当谈到输电设备时，我们的看法的基本点是要确定生物处于小于感觉水平的电场时，电场对生物是否有任何生态影响。

在结束关于电场对生态影响的绪言部分以前，应想到自然界电场的存在，其场强值大体上和高压装置下的场强是相同的。大家知道，好天气下，约有100至150伏/米的持续电场存在，但当雷雨临近时，这一场强迅速增加，在雷云下的地面场强可高达20千伏/米。

因此，区别自然界电场和电力设备产生的电场的不是幅值，而是后者的工频交变特性。应当注意到，我们总是处于一个电磁场的环境内，既有自然界的又有人为的，其频谱从小于1赫兹直到千兆（ 10^9 ）赫兹。但这些电场作用的方式和频率有密切的关系。

这样，在高频场的情况下（例如来自雷达装置和微波炉的微波）是能量机制起作用，特别在液体组织中是以介质

损失的方式出现。我们要着重强调的是：我们这里所考虑的情况，频率非常低，上述作用过程并不存在，或者微乎其微。在工频电场中，唯一能起作用的方式是有一很小的感应电流流过处于电场中导电的人体，这一电流无非是电容耦合电流。

有一些人，他们担心磁场也可能有生态效应。为了确定这一可能性，应该记住由电力设备产生的磁场，在地面附近幅值约为 10^{-6} 至 10^{-5} 韦伯/平方米的数量级，亦即和大地磁场同一数量级。这里再次要提到的是，它和自然磁场的区别仅在于其磁场具有工频交变的特性。

最后，要特别强调的是我们这里仅考虑了由电力装置产生的磁场和电场，没有考虑高频电场和磁场，以及某些特殊装置产生的非常强的电场和磁场。

高压直流输电装置产生的电场也不包括在本导则内。对于直流场，有些工作正在进行，但它们的存在看来并不构成任何威胁，这是因为只有交流才有感应电流，又因为如前所述，无论如何直流电场总还是我们自然环境中的一部分。

除了静电场外，在靠近直流装置附近，有时会有由电晕产生的离子流，在直流电场力（电场强度 $\times$ 电荷）的作用下，它们向地面漂移，而在交流时不存在这个力，因此观察到的各种效应是来自离子流本身，而不是来自电场。

和离子流相连系的空间电荷，很可能会大大改变由计算得到的电场强度。

第二章 电 场 计 算

2.1 几点提示——未畸变场和畸变场

在这一节里，简单回顾一下电场的物理性质以及某种导电物体（无论是金属还是生物体）放入电场后产生的物理现象的本质，或许是值得的。

2.1.1 准静态电场的定义

我们这里所研究的工频交变电场是一种准静态电场，它的一些效应可以用静电场的一般概念来分析。这些场都是由电荷产生的，就高压装置来说，当导线带电时，电荷分布在架空导线的表面。而电场只不过是某一距离上电荷效应的一种表现，这一效应遵守库仑定律。空间任意一点的电场可以用一个力来表示，它的大小和方向与单位正电荷在该点受的力相同。于是，电场力象电位梯度一样可用一个向量来表示。这个定义已全部包含在下列向量表达式中：

$$\vec{F}(M) = q \cdot \vec{E}(M)$$

式中 $\vec{F}$ 是电荷 q 在 M 点所受的力，该点的电场强度为 $\vec{E}$ 。

2.1.2 感应现象——畸变场

根据以上所述，当任何一种导体处在某一电场中，电场就会引起该导体表面电荷的移动，这种在最初发现电时就被认识了的现象称为“静电效应”或“静电感应”。

反之，导体上所带的电荷也产生了一个电场，这个电场叠加在原来的电场上。正是这种叠加，改变了导体附近的整个电场，人们把这种导体周围的场称为“畸变场”。电场强度随着引入物体的曲率半径而局部地变化（图2.1）。