

[苏]米·伊·米哈伊洛夫·列·德·拉祖莫夫 沙·阿·索科洛夫 著

通信设备上的 电磁影响

高 攸 纲 译

人 民 邮 电 出 版 社

通信设备上的电磁影响

〔苏〕米·伊·米哈伊洛夫

列·德·拉祖莫夫 著

沙·阿·索科洛夫

高攸纲 译

人民邮电出版社

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ВЛИЯНИЯ
НА СООРУЖЕНИЯ СВЯЗИ
М.И.МИХАЙЛОВ, Л.Д.РАЗУМОВ
С.А.СОКОЛОВ
МОСКВА.СВЯЗЬ.1979

内 容 提 要

本书是苏联专家米哈伊洛夫等1978年所著《通信设备对外界电磁场影响的防护》一书的姊妹篇。1978年的原著主要介绍了电磁场影响的计算方法和防护措施。而本书则对各种强电影响产生的物理过程,作了比较严密的定性和定量分析。此外,还专章论述了交流电气铁道这种完全不对称的强电系统的影响。书中还给出了超高压电场对人体组织的有害影响。鉴于多导线间的耦合参量是分析内外部干扰的共同基础,本书也作了较详细地阐述。

本书可供电力、铁道、邮电、部队系统的设计、施工、维护等单位的有关工程技术人员使用,同时也可作为有关院校师生的参考书。

通信设备上的电磁影响

〔苏〕米·伊·米哈伊洛夫
列·德·拉祖莫夫 著
沙·阿·索科洛夫
高攸纲 译

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
天津新华印刷一厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经销

开本: 787×1092 1/32 1984年9月第一版
印张: 11 4/32 页数: 178 1984年9月天津第一次印刷
字数: 254千字 印数: 1—4,000册
统一书号: 15045·总2905-有5371
定价: 1.40元

译者序

目前我国除22万伏的高压线网已遍及全国外，有的地区还建有33万伏和50万伏高压输电线，预计在不久的将来还将兴建75万伏以上的高压输电线。发展速度是相当迅速的。

另一方面，我国铁路担负着全国80%的运输任务，是运输战线的骨干。在国民经济建设中，铁路现代化是一个重要方面，而铁路现代化的基本要求是提高牵引重量，加快行车速度、增加列车密度、减少空气污染，交流电气铁道可最好地满足这几方面的要求，因此，我国已决定加速铁路电气化的建设步伐。

高压输电线与交流电气铁道的大规模建设将给通信设备带来严重的电磁影响，必须慎重对待，合理解决。本书系统地阐述了这类影响的物理本质，进行了较详尽的理论分析。对雷电影响的定量计算方法、磁暴影响以及阻性耦合影响也进行了论述。在分析强电线对通信线的电磁影响时常需确定各种单线回路（包括电缆金属缆皮与大地构成的回路等）的电气传输参数，现有文献颇少论述，作者在本书第十章中专门介绍了这些参数的完整计算公式，便于工程技术人员引用。

本书包括了作者近年来的最新科研成果，如经由第三回路的影响、输电线的强电场对人体的危害影响以及金属缆皮的接地阻值对其屏蔽效果的影响等，某些理论也可用来分析光缆中远供回路的感应影响。

本书主要对象为从事通信设备研究、设计、施工及维护的工程技术人员。对教学部门来说，此书也可用作教材。读者在

阅读本书时还可参阅本书作者的另一专著译本：《通信设备对
外界电磁场影响的防护》（人民邮电出版社1983年出版）

译者

1983年2月

• 2 •

前 言

苏共二十五大通过的苏联在1976~1980年间国民经济主要发展方向确定了今后要继续发展电气化、运输工具及通信，继续提高国营生产的效能及产品质量。在第十个五年计划期间规定要为建成统一的全国自动化通信网（EACC）而持续工作，将把长途电话通路长度增为1.6倍，市内及农村的电话数量增为1.4倍，报纸上的传真电报栏增为2倍等。传输系统的通路及回路对各种外界源电磁场影响的抗干扰性及防卫度的要求将要提高，其中包括高压线（ЛВЛ）——输电线及电气铁道线路、雷电及无线电台等场所。

随着电气化步伐的加速，数百个新的大电站以及长距离高压及超高压新输电线的建成，通信线路对外界电磁场影响的防护在近年来已成为非常迫切的问题。通信线与高压线的接近长度不断增加。近来已没有一条电缆干线不与输电线或电气铁道接近。因为在输电线及电气铁道接触网的导线附近有高强度的电磁场，则当通信线与高压线相互接近时，在有线传输系统的通路及回路中将出现长时间（高压线正常运行时）及短时间（高压线在故障状态下）的外来电压及电流。这些电压及电流既会对维护人员及通信机线造成危险影响，又会对通信信号的传输造成干扰影响，后者将要降低通信质量及其可靠性。

在最近十五年中拟大大扩充电站、输电线、电气铁道及通信电缆线路（干线、地区及市话通信）的建设。因此解决高压线与通信线的电磁兼容问题非常重要。

在雷电期间当天电放电时也可能在通信线路的心线及导线

中产生干扰及危险电压与电流。当雷电直击明线及电缆线路的导线时，使线路及机器某些元件产生故障，出现通信长时间中断现象。通常通信线路上的这类故障对国民经济将带来巨大的经济损失，必须加以防止，特别是长途电缆线路，这里的对称及同轴电缆回路具有成百上千个电信通路。

在电缆干线多路传输系统中，采用对电流过负载非常灵敏的半导体载波机、采用长距离远供回路、塑料外皮新型电缆的出现及超高压输电线的建设等，都在外界电磁场对通信线路的影响理论前提出了新的课题。

本书叙述高压线电场及磁场、雷电放电以及磁暴对通信明线及电缆线路影响的基本理论。研究了经过第三回路的影响理论，详细叙述当金属缆皮接地及对地绝缘时对电缆影响的理论，求出了由高压及超高压输电线形成的电场的场强计算公式

本书为1978年出版的“通信设备对外界电磁场影响的防护”专著的补充（作者与本书作者同），在那本书中介绍了通信明线及电缆线路以及接在其中的机器对外界电磁场危险及干扰影响的防护理论及实践。

本书对象为从事通信设备设计、施工及维护的工程技术人员。高等院校的研究生及本科生在研究外界电磁场对通信明线及电缆线路的影响问题时也可用此书作为参考书。

第1、2、3、6、9及10章由米、伊、米哈依洛夫及列、德、拉茹莫夫编写；第4章由米、伊、米哈依洛夫编写；第5及第8章由米、伊、米哈依洛夫及沙、阿、索科洛夫编写；第七章由列、德、拉茹莫夫编写。

技术科学博士伊、伊、格罗德涅夫及技术科学硕士勒、布、费里德曼在评阅本书原稿时曾提出很多宝贵意见，作者表示感谢。

作者

目 录

第一章 外界电磁场的来源	1
1.1 苏联有线通信设备及电气化的发展简况	1
1.2 电场及磁场	3
1.3 各种频率的电磁场场源	7
1.4 地中杂散电流源	40
第二章 高压线对明线单线回路的影响	43
2.1 高压线影响理论的总则	43
2.2 主扰回路及有线通信回路的特性	46
2.3 单线回路间磁影响及电影响的一般方程	48
2.4 主扰回路终接波阻抗时的影响方程	56
2.5 当主扰回路内电流及电压的变化小到可以忽略时单线回路间的影响方程	69
2.6 对导线束的影响	79
2.7 经第三回路的磁影响及电影响方程	80
2.8 用马氏方程确定电影响	84
2.9 对单线回路的地电流影响	96
第三章 完全不对称回路对明线双线回路的影响	109
3.1 一般方程	109
3.2 确定由于电话回路导线对主扰线的位置不对称引起的干扰电压及电流分量	114
3.3 由于电话回路导线的电气参数不对称引起的干扰电压及电流分量的确定	118

3.4	由于输入设备的不平衡在双线回路内引起的 电压的确定	130
3.5	双相及三相高压明线对通信明线回路的影响	134
第四章	超高压线路的电场对人体组织的影响	139
第五章	云层放电对通信明线线路的影响	146
5.1	对通信线路的感应影响	146
5.2	在明线线路导线上发生感应过电压的情况	151
5.3	考虑电晕后在线路导线上感应过电压的数值	152
5.4	直接雷击对通信明线线路的影响	155
5.5	引入电缆及明线线路内介入电缆的过电压	159
第六章	磁暴及地中电流对通信线路的影响	165
6.1	磁暴的产生	165
6.2	有紫外线辐射时地球磁场的变化	168
6.3	当由太阳飞出的带电粒子辐射时地球磁场的 变化	169
6.4	在磁暴时地中不同地点间的电位差及此电位 差对通信回路的影响	170
第七章	高压线路对通信电缆线路的影响	175
7.1	对无金属护套的电缆的影响	175
7.2	对无中直接地的电缆金属护套的影响	175
7.3	有中直接地时对电缆金属护套的影响	183
7.4	当金属护套上无中直接地时对电缆心线的 影响	194
7.5	并行敷设数条电缆时影响的计算	212
7.6	对缆皮多次接地的电缆心线的影响	215
7.7	对电缆线路双线回路的影响	217
第八章	电缆受直接雷击时在缆皮与心线间的电压	220

8·1	雷击点与电缆间电弧的形成·····	220
8·2	计算电缆内电压的总公式的推导·····	222
8·3	在金属缆皮与大地间有经常的固定接触时电 缆中电压的计算·····	226
8·4	在金属缆皮有绝缘套管与大地绝缘的情况下 电缆遭受雷击时电压的计算·····	229
8·5	在缆皮周期性接地的情况下雷击电缆时电压 的计算·····	231
8·6	在雷击点心线与缆皮间绝缘已击穿的情况下 通信电缆沿线电压的计算·····	233
8·7	外导体与金属缆皮绝缘时同轴电缆中电压的 计算·····	236
8·8	敷设于开阔地区的电缆由雷击引起故障的 概率·····	241
8·9	沿森林敷设的地下电缆由雷击引起故障的 概率·····	244
8·10	沿林间道路敷设的电缆由雷击引起故障的 概率·····	248
8·11	位于电缆附近的单株大树或高耸建筑物对电 缆雷击故障的影响·····	250
8·12	位于电缆旁的架空明线对电缆雷击故障的 影响·····	251
8·13	在永久冻层并有两层土壤结构的地区电缆雷 击故障概率的计算·····	251
8·14	最大雷电流与土壤电阻率关系·····	256
第九章	在不同电气系统回路间的电磁耦合参数 ·····	258
9·1	概说·····	258

9.2	明线单线回路间的电容耦合	259
9.3	三相回路与单线回路间的电容耦合	261
9.4	完全对称的三相回路与单线回路间的电容耦合	266
9.5	单线回路与三相线《三线——大地》回路间的电容耦合	271
9.6	三相对称线与双线回路间的电容耦合	272
9.7	单线与双线回路间的电容耦合	276
9.8	明线单线回路间互感的确定	277
9.9	单线回路与双线回路间互感的确定	294
9.10	双线回路间互感的确定	297
9.11	三相对称回路与通信回路间互感的确定	299
9.12	单线直流回路间磁影响参数实数分量的确定	301
9.13	大地导电率	302
9.14	大地导电率的测试	306
第十章	回路的电气参数	312
10.1	孤立明线回路的一次参数	312
10.2	在导线束中通信导线的全阻抗	317
10.3	通信线路导线的电容	320
10.4	《金属护层——大地》回路的一次参数	322
10.5	《心线——缆皮》回路的一次参数	333
10.6	《心线——大地》回路的参数	335
文献		337
索引		341

第一章 外界电磁场的来源

1.1 苏联有线通信设备及电气化的发展简况

苏联电能生产及电气化以极高的速度向前发展。在1975年电能产量已达10380亿千瓦小时（为1913年的370倍），而电站功率则增加至2.18亿千瓦。到1980年底电能生产拟增至13400——13800亿千瓦小时〔1〕。为把电网联成全国统一的电力系统，正在建设高压及超高压的大功率线路。

在1970年电压为35至800千伏的输电线长度达440000公里，其中220——330千伏的高压线部分为63000公里，而500千伏的高压线部分达12000公里。在1975年电压在20千伏以下的配电网长度超过300万公里。正在建设电压为750千伏的三相高压线，电压为1150千伏的高压线也在拟定建设中〔2〕。在苏联建成了世界上第一条电压达800千伏的直流输电线，今后还要建设电压达1500千伏的直流输电线。苏联电能发展的进程见图1-1。

与发展电能生产的同时，电气铁道增长速度也在加大。在1977年已有40000公里的铁路实现了电气化，这就相当于全国铁路总长度的28.8%。在此期间交流电气铁道长度达15000公里。在第十个五年计划末期，预计还有2500公里的铁路可实现电气化〔3〕。

与全国高速电气化的同时也在建设通信线路。在最近12年

中长途通信电路增为6倍。而且同轴电缆获得了优先发展。例如，与1958年相比，在1970年同轴电缆的生产增为5.4倍，而对称电缆则增为1.5倍。在第十个五年计划中准备继续大量增加电缆的生产，干线通信增为1.44倍、区内通信电缆——增为1.51倍、市话通信电缆——增为1.29倍〔4〕。现代主要采用60路传输系统实现对称电缆干线通信，而用K-300及K-1920系统实现同轴电缆干线通信。

统一的自动化通信网（EACC）的建成将在电信通路与回路对各种外界电磁场影响的防卫度及抗干扰性方面提出更高的要求。（待续）

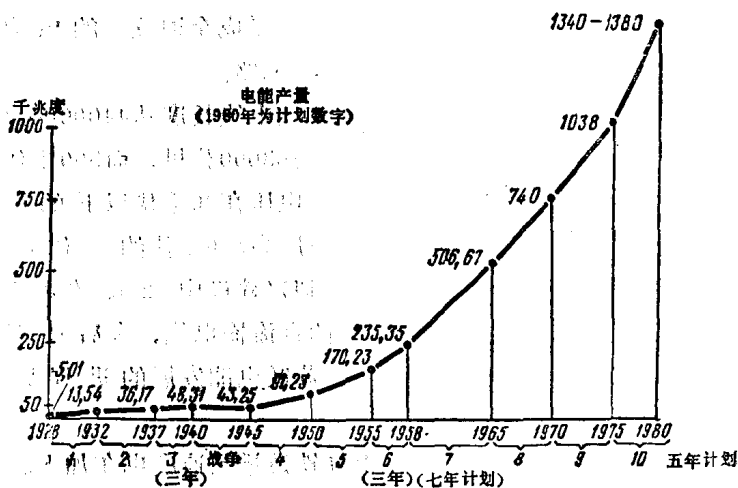


图 1.1 苏联电能发展曲线图

因此正确计算这种影响并制定出经济合理的防护措施就是一个很有现实意义的任务。

（待续）

1.2 电场及磁场

基本原理 现有的电气能源可在电气回路中产生下列几种电流及电压：大小及方向均保持恒定；方向恒定，但大小可变；大小及方向作周期性改变；脉冲性质（单极性及双极性）。不同波形的交变电流及电压将在电气回路周围空间形成交变电场及磁场。这些场的变化特性与所研究回路内电压及电流的变化特性类似。如在回路中加上按正弦规律变化的交变电压，则回路内的电流及此回路周围的磁场与电场也将按此规律交变（图1.2）。当沿导线通过脉流时，此导线周围的磁场与电场也将是脉动的（图1.3）。

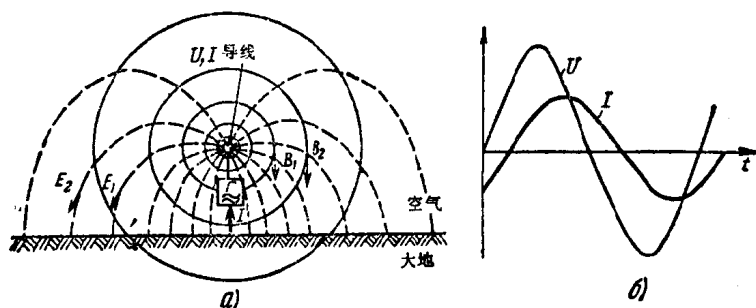


图 1.2 (a) 导线周围空间中的电场强度 (E) 与磁场的磁感应 (B) 及 (b) 导线内电压与电流的正弦曲线

如在带交变电压 $U = \varphi(x, t)$ 及交变电流 $I = \varphi(x, t)$ 的导线旁放入另一导线（图1.4），则在电感应及磁感应影响下，在第二条导线中就产生了所谓感应电压 $u = \varphi(x, t)$ 及感应电流 $i = \varphi(x, t)$ 。当导线（其中接有干扰能源）用大地组成回路（单线回路）时，在与其平行敷设的另一导线（也用大地构成回路）

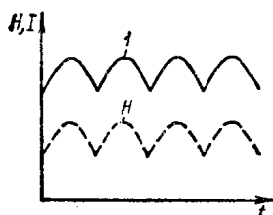


图 1.3 脉流曲线(1)及其磁场强度曲线(H)

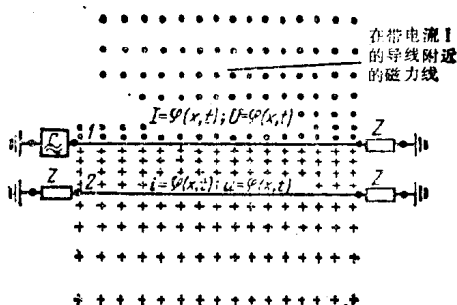


图 1.4 明线线路主扰线(1)及受电磁场影响的被扰线(2)

中,除感应电压及电流外,还有地电流耦合引起的电流及电压(图1.5)。换句话说,第一根导线内的电流,在通过大地返回时,于第二导线的接地处会有部分电流由大地分流进入第二导线。

由某电能能源在其上施加电压并在其中通过电流的第一导线系统称为主扰线或主扰回路。在其中引起电压及电流的第二导线系统称为受电磁影响的被扰线或被扰回路。

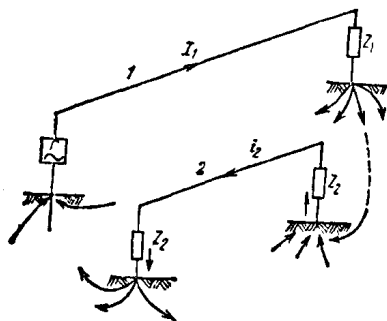


图 1.5 单线回路间的地电流影响

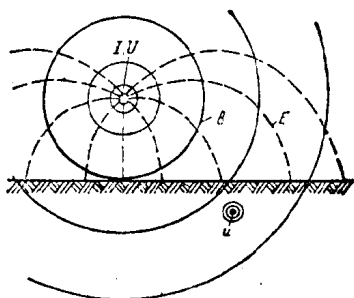


图 1.6 单线明线回路的电磁场及受磁场影响的地下电缆

属于主扰系统的有：电能输电线、电气铁道牵引网、发射高频电磁能的无线电台、雷电放电通道等。属于受上述干扰源影响的导线系统有任意用途的各种电气回路。本书仅研究传输电能值远小于主扰系统所传能量的那些受扰回路。在这种情况下受扰导线的反作用可以忽略。属于这种回路的有明线通信线路及电缆通信线路。

主扰线的电场及磁场都能对通信明线回路产生影响。主扰线的磁场能对地下电缆线路的回路以及架于电杆上有金属外皮的电缆线路的回路产生影响，因电场的力线已被大地表面或金属缆皮屏蔽（图1·6）。对悬挂于电杆上的非金属外皮且无屏蔽的电缆来说，其回路将受到磁场及电场的影响（图1·7）。

由外界电磁场感生的电压及电流对通信回路来说是外来电压及电流。这些电流与传输的工作电流及电压混在一起后，将使之发生畸变，这就降低了传输质量。在一定的条件下，感应电压及电流值可达很大的数值，足以危害通信机线的绝缘。在通信回路中形成的外来电压及电流，根据由它们所引起的影响后果，可分别称为危险或干扰的电压与电流。

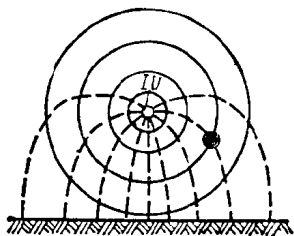


图 1·7 单线明线回路的电磁场及受电场与磁场影响的无金属外皮架空电缆

对受外界电磁场影响的明线及电缆线路而言，要研究以下几个数值：

明线线路：

在通信线路每一导线中的感应对地电压；双线回路导线间的电位差(U_{12})；

单线及双线回路导线中的感应电流；

电缆线路：

心线与金属缆皮间以及心线与大地间的感应电压；金属缆皮与大地间的感应电压；

在金属缆皮内的感应电流；

在电缆心线中的感应电流；

对称电缆线对两心线间或同轴对内外导体间的电位差。

电磁场概述 电磁场是物质的特殊形态。它由下列四个矢量值来表征：电场强度 $\vec{E}$ 、电感应 $\vec{D}$ 、磁场强度 $\vec{H}$ 及磁感应 $\vec{B}$ 。现来确定空间某区域的场——意思就是要指明该区域中任一点的这些场矢量。电磁场各分量——电场分量（矢量 $\vec{E}$ 、 $\vec{D}$ ）及磁场分量（矢量 $\vec{H}$ 、 $\vec{B}$ ）——相互之间存在一定的关系。对真空中的场来说，下列关系式是正确的

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1.1)(1.2)$$

式中 ϵ_0 ——电常数，其值为 $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \approx 8.85 \times 10^{-12}$ 法/米； μ_0 ——磁常数，其值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \approx 1.257 \times 10^{-6}$ 亨/米； $\vec{H}$ ——磁场强度，安/米； $\vec{D}$ ——电感应，库/米²。

电磁场矢量间的相互关系由媒质的特性来决定。交变电磁场理论以下列四条原理为基础：

全电流定律 决定了磁场强度与激励此磁场的电流之间的关系

$$i_r = \oint H dl \quad (1.3)$$

《全电流》的概念本身不仅包括了密度为 $\delta_{r,p} = \sigma E$ 的传导电流，还包括了密度为 $\delta_{CM} = \epsilon_0 \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right)$ 的位移电流。根据这条定律可知，一切随时间而变化的电场 $\left| \frac{\partial E}{\partial t} \right|$ 会引起磁场(H)的出