

电力线路 对 电信线路 的 影响和保护

内 容 提 要

本书是作者根据自己及国内外有关的主要科研成果和设计经验,系统地介绍电力线路对电信线路影响的有关理论、标准、计算方法、保护措施和测量方法等。全书共分十四章:第一章至第六章叙述了“电力线路对电信线路的影响”的基本理论,第七章叙述了“电力线路对电信线路的影响”的标准,第八章至第十二章分别叙述了“电力线路对电信线路的影响”的计算方法、测量方法、测量技术以及保护措施等,在第十一章中专门介绍了大地导电率的测量方法,第十三章简述了电力线路短路电流的计算,第十四章扼要地介绍了直流输电线路对环境的影响和保护。

本书可供电力、电信、铁道等部门从事有关环境电磁工作的科研、设计、运行、施工的工程技术人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

电力线路对电信线路的影响和保护

庞廷智 崔鼎新 孙 鼎等编著

*

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

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 22印张 500千字

1986年12月第一版 1986年12月北京第一次印刷

印数0001—2810册 平装定价4.90元

书号 15143·6223

前 言

目前我国电力工业和电信事业发展迅速，电力系统和电信网络日益扩大，在电力线路与电信线路不断增多的情况下，它们之间的相互接近和交叉跨越总是不可避免的。因此电力线路对电信线路的影响就难以避免，且问题将越来越多，科研和设计工作量也将随之越来越大，这就要求从事这方面工作的人员相应地增加。但目前供这方面专业人员使用的参考书较少，在实际工作中需要的既有理论、又有实际应用、比较系统全面的参考书更少。基于这种情况，我们编写了这本书。

本书总结了作者和国内外主要的科研成果和设计经验，系统地介绍电力线路对电信线路影响的有关理论、标准、计算方法、保护措施和有关测量方法等，供从事这方面工作的科技人员参考。

本书由从事电力线路对电信线路影响和保护科研、设计人员共同编写，全书共十四章，其中第一章、第四章、第十四章、第十章的10-1、10-3、10-7、10-8节由庞廷智编写，第二章、第三章、第六章的6-1、6-2节由崔鼎新编写，第五章由瞿雪娣编写，第七章由傅家骅编写，第八章、第十三章、第十章的10-4、10-5、10-9节由鲁崇周编写，第九章由孙鼎编写，第十一章、第十章的10-2、10-6节由周长兴编写，第十二章由张顺福编写，第六章的6-3节由刘信开编写。第一章至第七章、第十二章、第十四章由崔鼎新校阅，第八章至第十一章、第十三章由孙鼎校阅。全书由庞廷智统一整理、定稿。

本书绝大部分章节经北京邮电学院高攸纲教授审阅，提出许多宝贵意见，在此深表感谢。

限于水平，书中缺点和错误难免，请读者批评指正。

作 者

1985年10月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
1-1 概述	1
1-2 电力线路与电信线路之间的耦合	2
1-3 电力线路对电信线路影响的计算	4
1-4 电力线路对电信线路影响的允许标准	5
1-5 电力线路对电信线路影响的保护措施	5
1-6 电力线路对电信线路影响的测量	6
1-7 大地导电率	7
1-8 电力线路短路电流计算	8
第二章 在电力线路感性及容性耦合影响下电信线路导线对地电压及电流的分布	10
2-1 概述	10
2-2 基本方程的建立和求解	10
2-3 传输线路导线上电压及电流的传输	12
2-4 电信线路导线上电压及电流分布的一般表达式	14
2-5 电信线路导线两端绝缘时的电压及电流分布	19
2-6 电信线路导线两端接地时的电压及电流分布	22
2-7 电信线路导线一端绝缘另一端接地时的电压及电流分布	24
2-8 电信线路导线两端终接波阻抗时的电压及电流分布	27
2-9 电信线路导线延长段很长时的电压及电流分布	28
2-10 电信线路导线为短线段时的电压及电流分布	29
2-11 在长距离电力线路感性及容性耦合影响下电信线路导线上的电压及电流分布	29
2-12 电信线路导线参数不均匀时的电压及电流计算方法	36
2-13 在电压及电流计算中叠加原理的应用	39
第三章 电力线路与电信线路的感性耦合	40
3-1 概述	40
3-2 电磁场的基本方程	40
3-3 振荡方程的解	43
3-4 水平偶极子场及边界条件	44
3-5 有限长两条平行单导线之间互感系数的一般表达式	49
3-6 无限长电力线路与有限长电信线路之间的互感系数	52
3-7 地面上有限长两条单导线之间的互感系数	56
3-8 有限长两条架空单导线之间的互感系数	57
3-9 大地为多层结构时的感性耦合	58
3-10 镜像法在互感系数理论计算中的应用	63

3-11 斜接近段互感系数的计算方法	65
3-12 三相三线电力线路与电信线路之间的互感系数	67
第四章 电力线路与电信线路的容性耦合	71
4-1 概述	71
4-2 容性耦合的一般理论公式	72
4-3 单线电力线路与单线电信线路间的容性耦合	73
4-4 单线电力线路与双线电话回路的容性耦合	76
4-5 三相电力线路与单线电信线路的容性耦合	79
4-6 三相电力线路与双线电话回路的容性耦合	85
4-7 电力线路与多根导线电信线路的容性耦合	90
第五章 电力线路与电信线路的阻性耦合	95
5-1 概述	95
5-2 在均匀大地中接地电极入地电流在其周围大地的电位分布	95
5-3 具有架空地线的电力线路发生闪络接地时入地电流在其周围大地的电位分布	98
5-4 地下电力电缆外皮入地电流在其周围大地的电位分布	100
5-5 架空电力线路对电信设备和地下金属管线的阻性耦合影响	104
5-6 地下电力电缆对电信设备和地下金属管线的阻性耦合影响	112
5-7 在不均匀大地中接地电极入地电流在其周围大地的电位分布	113
第六章 低频屏蔽理论	120
6-1 概述	120
6-2 磁屏蔽	120
6-3 静电屏蔽	139
第七章 危险影响和干扰影响的允许值	150
7-1 概述	150
7-2 危险影响允许值	150
7-3 干扰影响允许值	162
第八章 危险影响计算	166
8-1 概述	166
8-2 感性耦合危险影响计算	167
8-3 容性耦合危险影响计算	180
8-4 阻性耦合危险影响计算	182
第九章 干扰影响计算	183
9-1 概述	183
9-2 感性耦合干扰影响计算	186
9-3 容性耦合干扰影响计算	198
9-4 阻性耦合干扰影响计算	211
9-5 干扰影响计算实例	212
第十章 保护措施	222
10-1 概述	222
10-2 放电管	222

10-3	排流线圈	242
10-4	中和变压器	244
10-5	隔离变压器	248
10-6	屏蔽变压器	249
10-7	抑制谐波的谐振回路	252
10-8	抗干扰人工电报机	253
10-9	有源屏蔽装置——ARS	255
第十一章 大地导电率测定		256
11-1	概述	256
11-2	四极电测深法	257
11-3	电流互感法	270
11-4	电流自感法	274
11-5	地质判定法	275
11-6	偶极法	277
11-7	线圈法	278
第十二章 测量方法及测量技术		281
12-1	概述	281
12-2	危险影响测量	281
12-3	干扰影响测量	283
12-4	等效干扰电流测量	286
12-5	等效干扰电压测量	289
12-6	双电话杂音敏感系数测量	293
12-7	屏蔽系数测量	296
12-8	电信线路参数测量	299
第十三章 短路电流计算		302
13-1	概述	302
13-2	对称分量法	303
13-3	对称分量法在不对称短路时的应用	305
13-4	中性点直接接地系统中单相接地短路电流计算	306
13-5	电力系统元件电气参数计算	307
13-6	相序网络的拟制	319
13-7	网络变换和电流分布计算	320
13-8	计算举例	320
第十四章 直流输电线路对环境的影响和保护		326
14-1	概述	326
14-2	直流输电基本原理和结线	327
14-3	直流输电线路对电信线路的危险影响	328
14-4	直流输电线路对电信线路的干扰影响	331
14-5	直流系统接地电极的影响	339
14-6	保护措施	341
参考文献		342

第一章 绪 论

1-1 概 述

环境电磁学(EMC)是一门综合性很强的边缘学科,它所涉及的范围非常广泛,其任务是研究工频、音频、射频、视频、核电磁脉冲、雷电等干扰源的产生和特性,以及它们对人体的电效应、动植物的生态、弱电系统的影响等。为此,需要研究这些影响的标准、计算方法、测量方法和保护措施。近年来,我国和世界各国对环境电磁问题都非常重视,正在大力开展这方面的科研工作。

本书涉及的是环境电磁学中的一部分,即电力线路对电信线路的影响和保护问题。以下就此问题作一简单的历史回顾。

电报和电话虽然分别在十九世纪三十年代和七十年代就发明了,电力利用也相继在十九世纪七十年代开始,但由于当时电源都是靠近用电地点,故电力与电信之间没有多大联系。到十九世纪八十年代末期,由于电力输送到较远的地方而出现了较长的电力线路,在此同时也有了较长的电信线路,因此才开始出现电力线路对电信线路产生影响的现象。从此在一些国家开始了这方面的研究工作,成立了专门的研究小组,架设试验线路。不但研究产生影响的原因,而且还研究消除影响的方法。例如:在1887年柏林电气协会成立了干扰问题委员会,该委员会不仅研究电信线路本身的干扰影响,也研究由电力线路产生的干扰;1889年英国邮政局为了进行干扰影响的研究,决定在伦敦铺设一条有集中接地外皮的10kV交流电缆线路。目前世界上有许多国家都设立了协商机构和研究机构,制定了电力线路对电信线路影响标准和有关规定,经常研究和协商解决有关这方面的问题。

电力线路对电信线路的影响,主要涉及电力和电信两个部门,由于电力和电信是具有国际性的,故影响问题的研究和解决,不仅需要本国有关部门之间的合作,而且也需要国际合作。因此在国际电报电话咨询委员会(CCITT)、国际大电网会议(CIGRE)、国际铁路联盟(IUR)和国际电工委员会(IEC)等国际组织都设立了专门小组,从事研究电力线路(或交流电气化铁道)对电信线路的影响问题,经常进行国际学术交流活动。例如CCITT,它的前身是在1923年由美国发起,于1924年由19个国家组成的国际电话通信委员会(CCI),1925年召开了按专业组成的工作会议,其中第一组研究干扰问题。1925年CCI决定加入国际电信联盟(ITU),同年成立了国际电报通信委员会(CCIT),1932年CCI改称国际电话咨询委员会(CCIF),CCIT改称国际电报咨询委员会。1956年CCIF与CCIT合并成立CCITT。

CCITT是ITU的四个常设机构之一,而ITU是联合国隶属的十五个专门机构之一,它是世界各国政府的电信主管部门之间协调电信业务方面的一个国际组织。我国于1972年开始以邮电部作为主管部门参加CCITT的一切活动。CCITT按专业分若干研究组,其中第五研

究组研究电力线路对电信线路影响问题。该组织进行过许多课题的国际性研究，由各参加国承担任务，规定每四年为一个研究期，在每一研究期结束时召开一次全会，每一研究期间召开若干次分组会议，除参加国主管部门的代表参加外，还有国际大电网会议、国际铁路联盟、国际无线电咨询委员会（CCIR）、以及一些国家的研究和工业组织的代表参加。在会上讨论和交流科研成果，制定科研计划，其科研成果和具体建议大部分反映在该组织编写的出版物中。于1926年第一次出版了还缺少有机联系的国际标准。于1931年第一次出版《防止电力线路对电信线路危害影响防护导则》（以下简称CCITT《防护导则》），以后经过多次修改和补充有1938年、1952年、1963年版本和1974年、1978年增订版，现在又正在进行修改和补充。

CIGRE是一个学术性协会，于1921年3月在IEC赞助下成立，我国于1980年正式恢复参加该组织的活动。CIGRE在各会员国设有国家委员会，我国目前由中国电机工程学会、电力科学研究院等8个集体会员组成国家委员会。在CIGRE的研究委员会中，第36研究委员会研究电力线路对电信线路和无线电影响问题，它的活动领域现在还包括“电磁生态学”的范围。CIGRE的科研成果和建议都推荐给IEC作为制定有关标准的依据和参考。IUR研究电气化铁道的影响问题。IEC的77技术委员会研究范围更广，即研究关于电磁兼容问题。以上这些组织也是定期开会，进行学术活动。这些组织也都有自己的出版物。

在我国，早在清朝就使用了电力和电话，但规模都非常小，谈不上其间有什么影响。在民国时代，我国电力和电信都有所发展，但其间是否存在影响，也无人重视和过问。新中国成立后，于五十年代初期我国在东北地区自行设计建设了220kV电力线路后，才开始处理和解决电力线路对电信线路的影响工程问题，有关部门进行协商和研究，确定处理方法。随着我国的电力和电信事业的迅速发展，其间的影响问题越来越多和严重，往往由于一时找不到很好的解决办法，产生矛盾，以至影响电力和电信线路的建设，因此就促使有关部门的科研、设计单位单独地或联合起来进行试验研究工作。1959年由水利电力部、邮电部、铁道部、通信兵部和广播事业局组成“四部一局联合试验研究小组”，建立试验基地，结合我国存在的问题，有系统地进行了电力线路对电信线路、铁路信号、广播线等影响的理论和保护措施的研究试验工作。我国也制订了一些规程，作为有关部门在解决此问题时的依据。例如：于1957年由电力工业部、邮电部、通信兵部、广播事业局联合颁发《架空电力线路与弱电线路接近和交叉装置规程》；于1961年由水利电力部、邮电部、铁道部、通信兵部联合颁发《防止和解决电力线路对通信、信号线路危险和干扰影响的原则协议》（以下简称《四部原则协议》）。

为了促进电力线路对电信线路影响和保护科研工作地开展，有利于有关问题的解决，中国电机工程学会于1983年成立了电磁干扰分专业委员会。中国通信学会、中国铁道学会和中国电子学会也都拟设立有关组织。每个学会单独或联合不定期召开学术讨论会，交流科研成果，拟订科研计划，协商解决有关问题。

1-2 电力线路与电信线路之间的耦合

凡电力线路对其邻近的电信线路产生影响，在这两条线路之间必然存在某种形式的耦

合。这种耦合可能是容性（电影响）、感性（磁影响）或是阻性（直接传导）的，或二者兼有，或三者兼有。

对于超高压的电力线路，或是电压虽然不高，但是电力线路与电信线路很接近或是同杆架设，则容性耦合产生的电影响是较大的。1907年F.施罗特克（Schrottke）陈述了容性耦合的理论。容性耦合的计算迄今主要还是采用镜象法，即把大地看成一个理想的导体，并用导线的镜象来代替。对于高压电力线路，往往由于感性耦合产生的磁影响，要求电力线路距离电信线路较远，故平行接近段的容性耦合产生的电影响很小，但交叉跨越段的容性耦合影响可能较大。近年来随着我国超高压电力线路的出现，交越段的容性耦合产生的电影响问题就显得非常突出。

以大地作为回路的不对称电力线路的工作电流，或对称的三相电力线路接地故障的短路电流，或中性点直接接地系统的三相电力线路的零序电流，会在其周围空间产生磁场，由于感性耦合而对其邻近的电信线路产生磁影响。关于感性耦合影响的理论，早在1881年O.赫维塞德（Heaviside）就对两平行线路间的感应问题进行研究，但当时还没有出现电力线路对电信线路的感性耦合影响问题。在1910年布雷西格（Breisig）提出一个简单的互感计算公式，但后来经测量证明该公式只适用于短的平行接近段，对于长的接近段和大的接近距离，该公式误差较大。1920年以后，随着电力和电信线路的发展，电力线路对电信线路的影响越来越大，为了找出两线路间互感阻抗更正确的表示，许多学者进行了仔细的研究工作。在1923年G.A.坎贝尔（Campbell）给出了大地为均匀媒质、低频的有限长地返回电路之间的互感阻抗计算公式。在1926年，F.波拉切克（Pollaczek）、J.R.卡森（Carson）和G.哈伯兰德（Haberland）几乎同时解决了无限长地返回电路之间互感阻抗的理论计算。在1928年F.波拉切克，1931年R.M.福斯特（Foster），1952年L.J.莱西（Lacey）解决了有限长地返回电路之间互感阻抗的理论计算。尔后也有不少人研究这方面的问题，如M.B.柯斯琴柯（Костенко），M.И.米哈伊洛夫（Михайлов）。在1963年版的CCITT《防护导则》中较系统地列出了无限长和有限长线路间互感阻抗新的计算方法。

我国的一些研究工作者在本世纪五十年代就开始研究互感理论问题，于六十年代利用镜象法解决了电力线路短路点附近的终端效应理论计算问题，并于1975年进行了终端效应试验，得到了满意的结果。同时用解析法进行了理论推导，得到有限长考虑架设高度与埋深的地返回电路的计算公式。而且还针对超高压电力线路的实际情况，得出了考虑电力线路架空地线影响的阻性耦合和感性耦合的计算方法。

不对称的电力线路在正常运行情况下，或对称的电力线路在发生接地故障情况下，由于入地电流在接地点周围大地产生高电位，如接地的明线电信线路、电信局（站）和地下金属管线（包括电信电缆）在此地电位的影响范围内，则通过阻性耦合可在这些管线上产生高电位，或在电话回路中产生杂音。在国外早就开展研究变电所地电位升高对电信设备的影响问题，在芬兰、瑞典、挪威等国由于大地电阻率较高，地电位升高问题较为突出，故对此特别重视。CCITT在1965年出版了《电气装置中的高电位对邻近的电信装置和工作人员的危害影响的保护》，补充了1963年出版的《防护导则》。我国近年来也在大

力开展这方面的研究工作，并取得了一些成绩。

关于感性、容性和阻性耦合的理论问题将分别在第三章、第四章和第五章介绍。在感性和容性耦合影响下，电信线路上感应产生的电压和电流分布将在第二章介绍。

1-3 电力线路对电信线路影响的计算

电力线路对电信线路的影响，按物理过程可分为感性耦合影响（磁影响）、容性耦合影响（电影响）和阻性耦合影响（直接传导）。如按影响的性质则可分为危险影响和干扰影响。由于电力线路的影响，在电信线路上感应产生的电压和电流足以危害电信运行维护人员的生命安全、损坏电信设备、引起房屋火灾等，称为危险影响。如在电信线路上感应产生的电压和电流足以破坏电信设备的正常运行，即是使电话回路中产生杂音、降低通信质量、使电报信号和数据传输失真等，称为干扰影响。因此电力线路对电信线路的影响计算，也分危险影响计算和干扰影响计算。其计算方法，在我国目前暂依照《四部原则协议》的要求和所列举的公式进行计算，世界上有些国家则依照 CCITT《防护导则》所推荐的公式进行计算。本书所列举的计算公式是根据我国近年来的科研成果和 CCITT《防护导则》所推荐的计算公式，对“四部原则协议”作了适当补充。

计算电力线路对电信线路的影响时要考虑：

（1）中性点直接接地系统的电力线路发生单相接地短路故障和中性点不直接接地系统的电力线路两相在不同地点同时发生接地短路故障（只对电信电缆线路和铁路信号）的情况下，以及不对称电力线路在正常运行情况下，计算感性耦合产生的危险影响。

运行经验表明，两相在不同地点同时发生接地短路故障实际上可以忽略，故一般不考虑电力线路在这种运行情况下的危险影响。

（2）中性点直接接地系统的电力线路在正常运行情况下、中性点不直接接地系统的电力线路在一相接地故障情况下和不对称的电力线路在正常运行情况下，计算感性耦合的干扰影响。

（3）在上述电力线路第2种运行情况下，计算容性耦合产生的危险影响和干扰影响，但对有金属外皮接地的电缆线路不考虑容性耦合影响。

当电力线路与电信线路之间的接近距离较大时，容性耦合影响是很小的，往往可以忽略。但对同杆架设的电力线路和电信线路，或是超高压电力线路与电信线路交叉跨越，且交越角度较小时，容性耦合影响较大。

（4）不对称的电力线路与单线电话和单线电报回路接近时，计算阻性耦合产生的危险影响和干扰影响。对于中性点直接接地电力系统在发电厂、变电所或电力线路发生接地短路故障时，计算阻性耦合对电信线路和电信局（站）产生的危险影响。

（5）当有多条电力线路接近电信线路时，在正常情况下每条电力线路对电信线路的影响必须分别进行计算，对电信线路的总影响为各条电力线路影响的几何和。在故障情况下也是分别进行计算，但假定电力线路的故障不是同时发生，故只取影响最大的一条电力线路进行计算。不对称电力线路考虑正常运行和故障情况的影响。

电力线路在各种情况下对电信线路影响的计算方法在第八章和第九章介绍。

1-4 电力线路对电信线路影响的允许标准

电力线路对电信线路影响的允许标准分为危险影响标准和干扰影响标准。目前世界上许多国家都制定了本国的标准，一些国家是采用CCITT《防护导则》的推荐标准值。我国经有关部门研究协商，在《四部原则协议》中对有关标准也作出了规定。

危险影响标准一般是从人身和设备安全的要求出发来制定的，对于铁路信号还应考虑信号设备的误动作问题。但根据各国的具体情况不同，有的国家主要是按人身安全的要求来制定的，而有的国家则主要是按设备安全的要求来制定的。对于电力线路在故障情况下的危险影响标准的制定，目前很多国家考虑到概率问题。因为电力线路的接地短路故障是很少的，故障切除时间又极短，而电信线路维修人员又不经常在电杆上作业，故当电力线路发生故障的一瞬间恰好是维修人员在电杆上作业而触电的概率是极小的。引起铁路信号设备误动作的概率更是极小。

基于上述原因，有些国家对危险影响标准已作过多次修改，其允许标准值都在提高。例如CCITT《防护导则》所规定的在电信线路上的允许感应纵电动势现已提高到430V和650V（对高可靠的电力线路）。目前由于一些国家的建议，CCITT正在研究进一步提高危险影响标准值。苏联、澳大利亚、芬兰、意大利等国家根据电力线路故障切除时间长短，目前使用的标准已提高到1000~2000V。我国的危险影响标准值也正在研究修改中。

干扰影响标准的制定首先是根据对电话回路话音清晰度的要求，按照国际规定清晰度在85%以上为优良，清晰度在75%为合格。由于电话回路存在“白”杂音，故由于电力线路的干扰影响在电话回路产生的杂音标准应考虑这一因素。由于对电话的质量要求越来越高，故干扰影响标准值越定越低，例如CCITT《防护导则》所规定的允许的杂音电动势值，1926年对明线电话回路为5mV，1938年对明线为5mV，电缆为2mV。目前的标准是明线和电缆均为1mV。因在电话回路中产生的杂音电动势与其线路本身的质量有关，故干扰影响标准的制定也应从现有线路质量情况出发，如干扰影响标准值要求定得低些，以提高通信质量，但线路质量也要求相应提高。而对线路质量高要求在实际能否达到是应考虑的问题。我国现行的干扰影响标准，根据我国目前的具体情况和实际运行经验是能保证通信质量要求的。

1-5 电力线路对电信线路影响的保护措施

在进行电力线路和电信线路建设时，为避免其间的的影响，首先是考虑使两线路隔开一定的距离。但在实际上往往由于受到地形、地物的限制，电力线路与电信线路有时比较接近是不可避免的，即电力线路对电信线路的影响是不可避免的，特别是在交叉跨越情况下，因此必须采取保护措施。其中常用的是在电信线路上装置专门的保护设备，如放电

管、隔离变压器、中和变压器等，这都是CCITT《防护导则》中推荐采用的。其实这些保护设备在很早以前就使用了，例如中和变压器，其保护原理在1906年由美国的C.F.斯科特（Scott）建立后，就在美国用来保护电气化铁道对电报回路的影响，1914年英国用来保护电话回路，1932年美国用来保护电力线路对电信线路的影响，1936年用来保护变电所地电位升高的影响，1973年又用来保护极低频发射台引起的影响。又如放电管，在1928年国际大电网会议就推荐采用，有些国家采用时间还要早，迄今仍为不少国家普遍采用。放电管的结构和性能不断改进，近年来有些国家已经研究和使用了体积小、容量大、多极数的放电管。

我国在1952年开始使用PB-280型钽放电管，此种放电管体积较大。1964年开始研制新型的陶瓷放电管，并经不断改进，现在使用的3TF-250G、3TF-350G和R-250型陶瓷放电管，具有体积小、容量大、安装维护方便等优点。

目前有些国家提出放电管动作时对数据传输的影响问题，并开展了研究试验工作。我国于七十年代已做过一些研究和试验工作，但尚未得出结论。CCITT第五研究组也已将此问题列入研究课题。我国也在继续进行研究和试验。

采取对电和磁的屏蔽也成为我国及世界许多国家的主要保护措施之一，如电力电缆和电信电缆的外皮和铠装就有很好的屏蔽效果，有的甚至采用高屏蔽的电信电缆。电力线路的架空地线和电信线路的接地导线对电的屏蔽效果很好。我国在1980年研究推荐在交叉跨越的电信线路上设置金属屏蔽网，对降低电力线路的容性耦合影响效果显著。

近年来有不少国家在电信电缆上装置屏蔽变压器，以降低电力线路对电缆线路的危险影响。联邦德国还采用一种新的保护措施——ARS(Active Reduction System)装置，对解决干扰影响问题效果较好。

对于由阻性耦合引起的地电位升高对电信线路和电信局（站）的影响，一般采用中和变压器、隔离变压器、放电管或是绝缘水平较高的全塑电缆等。

对于不同性质的影响采用不同的保护措施在第十章介绍，有关屏蔽理论和屏蔽系数的计算方法在第六章介绍。

1-6 电力线路对电信线路影响的测量

对于电力线路对电信线路的影响进行实地测量是十分重要的，这不但可以测量实际的影响程度，而且通过实地测量可以求得在计算中所需的一些参数，如等效干扰电流和等效干扰电压等。而测量方法和测量设备都直接影响测量的准确度。

例如杂音的测量，在杂音计使用之前，电话回路中的杂音测量是采用一种主观方法。这种方法是利用一个局部杂音发生器产生杂音，再用人耳的听觉对电话回路中的杂音进行比较。这种杂音发生器是由美国发明的。由于这种测量方法受观测者听觉特性的影响较大，故准确性较差。

一种客观的判断方法，约在1920年由美国人H.奥斯本（Osborne）发明。他首先是用大量的试验方法找出叠加在话音上的不同谐波频率的干扰强度，而干扰强度的判断准则主

要是话音的清晰度。由于人耳对各种频率的灵敏度是不一样的，在800~1200Hz 范围内最灵敏，可用一个频率（目前国际上采用800Hz）的干扰强度代表所有谐波频率的干扰强度，即把各谐波频率的干扰强度都折算到800Hz时的干扰强度，这样每个频率对800Hz都有一个“比重”，我们称之为衡重系数或音响作用系数。人们可以根据电话听筒的性能和人耳的特性制定出随频率变化的衡重曲线，利用衡重曲线与一交流测量仪器相配合就得到一种新仪器，称为杂音计。迄今我们采用这种杂音计可以很方便并准确地测量电话回路的杂音电压。美国的一种仪器采用过最早（约在1919年）的衡重曲线。CCIF 在1934 年制定了一条标准的衡重曲线，在1951年进行修改。美国贝尔电话系统首先采用CCIF 制定的标准衡重曲线。目前国内外使用的杂音计都是采用1951年CCIF制定的标准衡重曲线。

电力线路对电信线路的危险影响和干扰影响的测量方法、以及其他有关的测量方法和测量技术在第十二章介绍。

1-7 大地导电率

电力线路与电信线路间的互感系数，除与两线路间的距离和频率有关外，还决定于大地导电率，故可应用互感理论推出大地导电率。目前我们运用的互感理论都是基于大地为两层水平结构的假定。在1949 年，E.D.森德（Sunde）虽然建立了大地为任意层水平结构的互感理论，但是他没有给出工程实用曲线。1953 年J.R.维特（Wait）为了地球物理勘探的需要建立了类似的理论，并于1970年给出了三层曲线。

应用互感理论研究互感与大地导电率的关系，许多学者曾经用不同的方法进行实地测量大地导电率。在1915年美国F.温纳（Wenner）为了地球物理勘探的目的，就建立了直流电垂向电测深的四极法，他用观察地面电位的办法测出不同地层处的大地导电率。但真正为了查明大地导电率和互感关系的实际测量是在1929年由R.J.克莱沃（Klewe）在德国进行，1930 年美国A.E.鲍恩（Bowen）、G.L.吉尔克森（Gilkeson）和1932 年英国J.科勒德（Collard）也进行了实测，都证明了F.波拉切克和J.R.卡森理论的正确性。他们都是用两条接地导线测量其间的互感而推出大地导电率。1936年J.科勒德简化成为线圈法，即将其中一根导线改用一个线圈。1937 年出版的CCITT《防护导则》中推荐了这一方法。1950 年瑞士W.韦伯（Weber）发展了线圈法的测量原理，使它能应用到线圈与感应导线相距较远的情况。同年H.迈斯特（Meister）在瑞士利用这一原理进行了测量，得到了满意的结果。1962年匈牙利也曾用这一方法进行了大地导电率测量。

在1935年英国S.怀特黑德（Whitehead）和W.G.罗德莱（Rodley）发现当频率不同时所测得的大地导电率不同，因此他们应用1915 年F.温纳所创造的四极法测出了不同地层的不同频率的导电率，并在1937年建立了大地结构为两层时的理论。苏联M.И.米哈伊洛夫（Михайлов）和霍罗夫（Хоров）等人在苏联若干地区进行了测试，证明了这一理论的正确性。

由于F.温纳的直流电垂向电测深四极法容易受电极极化和地中杂散电流的影响，因此在1941年美国G.沃斯切克（Wascheck）改用了低频电流进行测量，加用换流器。但又

在电流和电位测量导线间带来感应，影响测量结果的正确性。为了消除这一影响，加拿大 J. 维特 (Wait) 建议将 F. 温纳的直线电极排列的等极距四极法改成电流和电位电极垂直排列法。

在日本也曾用单线大地回路测量自感的办法来推算大地导电率，但计算误差较大。有不少国家采用地质资料来判断大地导电率，但只是得到大地导电率的大致范围值。苏联 M. И. 米哈伊洛夫推荐采用四极等极电测深法进行大地导电率测量。总之，测量大地导电率的方法较多，但目前国内常用的有四极法、互感法、线圈法和地质资料判断法。

在我国各有关部门对大地导电率的测量方法进行过许多研究试验工作，1959年四部一局联合试验研究小组在北京试验基地分别用互感法、自感法和四极法测量大地导电率，测量结果彼此是相近的。目前我国在工程设计中广泛采用四极法进行大地导电率测量，对大地导电率较小的地区的一些工程同时采用大电流互感法进行测量比较。近年来我国研究弱电流互感法，应用此法测量大地导电率与四极法和大电流互感法比较简便。最近又研究了偶极法，该法是直流电测深方法中的一种，系 Л. М. 阿里兹 (Алицин) 于 1938 年向苏联国家地球物理托拉斯科学调查处 (НИОГСГТ) 提出的，1941 年他在《矿产杂志》上较为科学地论述这种测量方法，六十年代该法在苏联开始用于深层电测。七十年代日本电报电话公司用于电力线路对电信线路影响的大地导电率测量。我国采用该法时使用了美国地球物理供应公司 (GISCO) 的 RAC-8 型低频交流电阻率仪，该法特别适用于山区大地导电率的测量。

对于大地导电率的各种测量方法及其应用在第十一章介绍。

1-8 电力线路短路电流计算

电力线路发生短路故障对电力系统运行来说是不希望的，但又往往不可避免，只是要求故障尽量减少，且一旦发生故障后能迅速切除，不要把事故扩大。因此在电力系统的设计和运行工作中，不但为选择合理的电气结线和电气设备、计算各种继电保护和自动装置的参数需要进行短路电流计算，而且当电力线路发生不对称接地短路时，由于对其邻近的电信线路可能产生危险影响，故也需要计算短路电流，以便计算由于感性耦合影响在电信线路上感应产生最大的纵电动势和对地电位值。

电力线路短路有对称的和不对称的相接地短路，但对电信线路有影响的是后者。对中性点直接接地系统要计算电力线路发生一相接地短路故障情况，对中性点不直接接地系统要计算电力线路在不同地点同时发生接地短路故障情况。但由于后者的接地短路故障极不易发生，故一般可不考虑这种接地短路故障产生的影响。

短路电流计算是十分繁杂的，1918年由 C. L. 福蒂斯丘 (Fortescue) 推广采用对称分量法后，短路电流计算就大为简化，迄今还是采用这一方法进行计算。但是用手算或借助计算器来进行计算是繁杂和困难的，特别是对于大的和复杂的电力系统。为此于1916年开始采用直流计算台进行计算。1929年又出现了交流计算台模拟计算装置，它的功能比直流计算台更为完善。从本世纪五十年代中期开始又采用了电子数字计算机进行计算，它比模

拟计算装置优越得多，且计算速度快，结果精确。目前我国由于电子计算机的迅速发展和普及应用，已经越来越多地采用电子计算机来进行各种短路电流的计算。

迄今我国广大科技工作者在进行接地短路电流计算时，都认为是金属接地，即接地电阻假设为零。其实不然，故障接地时存在一定的过渡电阻，但此值变化很大且难以确定。根据CCITT《防护导则》推荐，当缺乏精确资料时，如接地短路故障发生在变电所内，接地电阻取零欧。如接地短路故障发生在线路，若该线路有架空地线时，接地电阻取 15Ω ，若无架空地线则取 50Ω 。

短路电流计算一般是考虑电力系统运行在最大负荷和接地短路故障发生在最不利的地点情况下，但这种情况是极少发生的，同时，在我国以往短路电流的计算都不考虑接地电阻。在此情况下把计算得出的最大短路电流值乘以0.7（对于电信电缆线路乘以0.85）作为实用值是可行的。

有关电力线路接地短路电流的计算方法在第十三章介绍。

考虑到本专业有关书刊、文献的习惯，本书在一些章节中有关相量的符号上也未加黑点，请读者在阅读本书时留意。

第二章 在电力线路感性及 容性耦合影响下电信线路导线对地电压 及电流的分布

2-1 概 述

电力线路在正常运行或单相接地短路情况下,“导线—大地”回路都流过电流。不论不对称电力线路流经大地的负荷电流,还是三相电力线路存在的零序电流,都是以“导线—大地”作为回路的,这样就可以“单导线—大地”回路作为研究的基本电路模型,因此本章主要讨论单导线之间的耦合问题。

为了使问题简化,先假设将耦合参数(如互感系数、互电容等)作为已知量对待,这样就可将场的问题化为路的问题来讨论。通常可将电力线路和电信线路看成具有分布参数的电路,电力线路上的电压和电流看成是时间的谐函数,以下各节都是基于这样的假设。

最后,由于中和变压器保护装置的需要,也对具有“集中—分布”参数电路的电压分布问题进行了讨论。

2-2 基本方程的建立和求解

如图 2-1 所示情况,在电力线路感性及容性耦合的影响下,我们研究电信线路导线上的电压和电流变化关系。在 dx 区段上可认为 U_0 、 I_0 是恒定的,耦合参数为: M_{oa} (互感系数)、 C_{oa} (互电容)、 G_{oa} (互电导),电信线路的一次参数 R 、 L 、 C 、 G 都为常数,这样就可得到如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} u - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) &= R i dx + L \frac{\partial i}{\partial t} dx + M_{oa} \frac{\partial i_0}{\partial t} dx \\ i - \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) &= G u dx + C \frac{\partial u}{\partial t} dx + G_{oa} (u - u_0) dx + C_{oa} \frac{\partial (u - u_0)}{\partial t} dx \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

亦可写为

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R i + L \frac{\partial i}{\partial t} + M_{oa} \frac{\partial i_0}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= (G + G_{oa}) u + (C + C_{oa}) \frac{\partial u}{\partial t} - G_{oa} u_0 - C_{oa} \frac{\partial u_0}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

式中 $u_0 = U_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$, $i_0 = I_0 e^{j(\omega t + \varphi + \alpha)}$, 则

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} = j\omega U_0 e^{j(\omega t + \varphi)} = j\omega \dot{U}_0$$

$$\frac{\partial i_0}{\partial t} = j\omega I_0 e^{j(\omega t + \varphi + \alpha)} = j\omega \dot{I}_0$$

代入(2-2)式得如下微分方程组

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\dot{U}}{dx} &= Z\dot{I} + Z_{oa}\dot{I}_0 \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} &= Y\dot{U} - Y_{oa}\dot{U}_0 \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式中

$\dot{U}_0$ ——电力线路导线对地

(或称不平衡)电压;

$\dot{I}_0$ ——电力线路的不平衡电流;

Z_{oa} 、 Y_{oa} 、 Z 、 Y ——分别等于 $j\omega M_{oa}$ 、 $G_{oa} + j\omega C_{oa}$ 、 $R + j\omega L$ 、 $G + j\omega C$ 。

现在求解(2-3)式。先对其求导,得

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} &= Z \frac{d\dot{I}}{dx} \\ -\frac{d^2\dot{I}}{dx^2} &= Y \frac{d\dot{U}}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

再将(2-3)式代入(2-4)式中得

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} &= -ZY\dot{U} + ZY_{oa}\dot{U}_0 \\ -\frac{d^2\dot{I}}{dx^2} &= -ZY\dot{I} - YZ_{oa}\dot{I}_0 \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

若设 $\gamma^2 = ZY$, 上式可写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\dot{U}}{dx^2} - \gamma^2\dot{U} &= -ZY_{oa}\dot{U}_0 \\ \frac{d^2\dot{I}}{dx^2} - \gamma^2\dot{I} &= YZ_{oa}\dot{I}_0 \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

式中 γ 为电信线路导线对地回路的传播常数。

应用运算微积分解(2-6)方程,若

$$F(p) = p \int_0^\infty e^{-pt} f(t) dt \quad \text{Re } p > 0$$

则

$$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} \div \bullet p^2 F(p) - pf'(0) - p^2 f(0)$$

考虑这个关系,(2-6)式变为

$$\left. \begin{aligned} p^2\dot{U} - p\dot{U}'(0) - p^2\dot{U}(0) - \gamma^2\dot{U} &= -ZY_{oa}\dot{U}_0 \\ p^2\dot{I} - p\dot{I}'(0) - p^2\dot{I}(0) - \gamma^2\dot{I} &= YZ_{oa}\dot{I}_0 \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

联立求解此方程式得

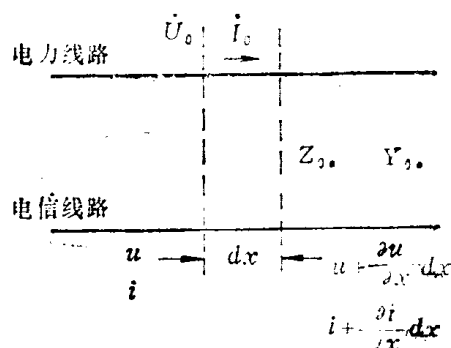


图 2-1 电力线路与电信线路间的接近关系