

复杂环境下输电工程运行 特性数学模型及仿真

祝 贺 杨晓军 著



科学出版社

复杂环境下输电工程运行特性 数学模型及仿真

祝 贺 杨晓军 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了复杂环境下输电工程运行特征理论。全书共 18 章, 分为五大部分, 主要内容包括输电线路邻近建筑物运行特征、输电线路邻近管道运行特征、输电线路邻近树木运行特征、空气湿度对特高压直流输电线路离子流场影响的研究、输电线路邻近山火运行特征。本书理论性与系统性较强, 作者在多年的教学和科研工作中, 不断征求相关单位的意见, 注重理论与实际的联系, 把重点放在基本原理和基本方法上, 尽量避免复杂的理论分析。

本书可作为高压输电线路施工运行与维护专业学生的学习资料, 可供电气工程相关专业技术人员参考, 也可供输电线路技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂环境下输电工程运行特性数学模型及仿真 / 祝贺, 杨晓军著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-060280-0

I. ①复… II. ①祝… ②杨 III. ①输电-电力工程-数学模型(系统工程) IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第297155号

责任编辑: 吴凡洁 王楠楠 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计有限公司

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

天津文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 304 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着我国经济的快速发展，人们对电能的需求日益增长，建设具有输电容量大、输电距离远等优点的输电线路工程是我国电网发展的必然趋势。输电线路的输电距离远，线路通常要途经江河湖泊等高湿度地区。输电线路跨物的多样化使得线路附近的电磁环境发生改变，影响线路走廊附近居民的生活，增加了带电作业的难度，甚至威胁作业人员的生命安全以及影响线路的稳定运行。

为解决上述问题，本书着重介绍输电线路邻近建筑物、油气管道、树木、空气湿度变化、山火条件下的运行特征等内容。本书内容理论性强，作者在多年教学、科研工作中，结合实际工程需要，注重理论联系实际，力求用简洁的数学物理方法求解实际工程问题，尽量避免烦冗的公式推导和数据分析。

本书撰写时依据我国现行的标准、规范，结合吉林省输电工程安全与新技术实验室近年来的科研成果，并融合了作者的教学及科研经验。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者予以批评指正。

祝 贺 杨晓军

2018年8月于东北电力大学

目 录

前言

绪论	1
0.1 输电线路在复杂环境下运行的背景及重要意义	1
0.2 输电线路运行特性基本概念	3
0.2.1 线路走廊	3
0.2.2 直流输电线路的电晕放电	3
0.2.3 耦合影响	3
0.2.4 气球边界	4
0.2.5 有限元分析法	4
0.3 输电线路运行特征研究现状	5
0.3.1 输电线路邻近障碍物的研究现状	5
0.3.2 输电线路周围工频电场研究现状	6
0.3.3 山火模拟试验研究现状	7

第一篇 输电线路邻近建筑物运行特征

第1章 输电线路邻近建筑物工频电场分析	13
1.1 我国输电线路线下电场限制的规定	13
1.2 输电线路电场仿真流程及边界选取原则	13
1.3 输电线路邻近建筑物周围电场分布建模仿真	15
1.3.1 建立输电线路仿真模型	15
1.3.2 不同相序线下电场计算	17
1.3.3 最优相序推荐	20
1.3.4 对地安全距离推算	21
1.4 本章小结	23
第2章 输电线路邻近建筑物安全距离比选	24
2.1 输电线路与建筑物安全距离要求	24
2.2 构建建筑物数学模型	24
2.3 左右对称挂线双回线路邻近建筑物电场分析	27
2.3.1 仿真模型及网格划分	27
2.3.2 输电线路邻近建筑物电场分析	28
2.3.3 输电线路邻近建筑物安全距离推算	30

2.3.4	建筑物对电场的影响分析	36
2.4	右侧单边挂线双回线路邻近建筑物电场分析	37
2.4.1	建立模型及电场分析	37
2.4.2	各种故障状态下线路与观测面间安全距离推算	40
2.4.3	风偏时线路与建筑物间安全距离推算	54
2.5	本章小结	55

第二篇 输电线路邻近管道运行特征

第3章	电磁干扰影响分析及计算感性电压	59
3.1	电磁影响的对象及安全限值	59
3.1.1	电磁影响涉及的对象	59
3.1.2	输电线路对天然气管道的电磁影响限值	60
3.2	电磁干扰的机理分析	61
3.2.1	容性耦合影响	62
3.2.2	阻性耦合影响	62
3.2.3	感性耦合影响	62
3.3	基于管道大地数学模型的感性耦合电压计算	62
3.4	本章小结	65
第4章	利用 CDEGS 软件进行电磁干扰的仿真计算	67
4.1	建立仿真系统	67
4.1.1	系统结构描述	67
4.1.2	系统结构模型的相关参数	67
4.2	仿真计算及结果分析	70
4.2.1	稳态条件下电磁干扰的仿真计算及结果分析	71
4.2.2	稳态条件下影响电磁干扰因素的计算分析	72
4.2.3	暂态条件下电磁干扰的仿真计算及结果分析	79
4.2.4	暂态条件下影响电磁干扰因素的计算分析	81
4.3	本章小结	82
第5章	计算分析与评估管道的交流腐蚀	83
5.1	管道交流腐蚀的评价准则及计算方法	83
5.2	稳态运行下管道交流腐蚀的计算与评估	84
5.3	本章小结	85
第6章	电磁影响超标的防护	86
6.1	稳态运行下管道交流腐蚀超标的防护	86
6.2	单相短路故障时管道对地电压超标的防护	88

6.2.1 接地垫防护	89
6.2.2 绝缘垫或敷设绝缘地面防护	89
6.2.3 针对管道对地电压超标的防护措施	90
6.3 本章小结	91

第三篇 输电线路邻近树木运行特征

第7章 特高压直流输电线路线下树障隐患净空距离数学模型	95
7.1 引言	95
7.2 建立导线应力弧垂动态数学模型	95
7.2.1 建立动态应力数学模型	95
7.2.2 建立弧垂与应力之间的非线性光学数学关系	97
7.3 建立树木生长高度预测数学模型	98
7.3.1 拟合树木生长高度回归方程	98
7.3.2 规划求解生长方程参数	100
7.4 建立线下树障隐患净空距离数学模型	101
7.4.1 建立线下净空距离数学模型	101
7.4.2 线下树障隐患净空距离数学模型实际应用	101
7.5 本章小结	103
第8章 特高压直流输电线路线下树障隐患电场分布仿真分析	104
8.1 引言	104
8.2 计算线下树木空间间隙击穿场强	104
8.3 线下树障电场仿真流程	105
8.4 线路电场分布建模与仿真分析	106
8.4.1 建立线下树障隐患仿真模型	106
8.4.2 正极导线下树障隐患电场分布	107
8.4.3 负极导线下树障隐患电场分布	110
8.5 本章小结	113
第9章 特高压直流输电线路临线树障绝缘特性数学模型	114
9.1 引言	114
9.2 计算导线风偏位移	114
9.3 计算线旁树障空间合成电场	116
9.3.1 计算单极导线标称电场	116
9.3.2 解析法计算空间合成电场	117
9.3.3 计算线旁树木间隙击穿场强	119
9.3.4 建立临线树障隐患绝缘特性数学模型	120

9.4	临线树障隐患绝缘特性数学模型实际应用	120
9.5	本章小结	123
第 10 章	特高压直流输电线路临线树障隐患电场分布仿真分析	124
10.1	引言	124
10.2	建立临线树障隐患仿真模型	124
10.3	临线树障隐患导线与树木空间合成电场分布仿真分析	125
10.3.1	正极导线旁树木电场仿真分析	125
10.3.2	负极导线旁树木电场仿真分析	130
10.3.3	正负极导线间树木电场仿真分析	134
10.4	本章小结	139
第四篇 空气湿度对特高压直流输电线路离子流场影响的研究		
第 11 章	空气湿度对离子流场影响机理的研究	143
11.1	直流输电线路的电晕放电	143
11.2	直流输电线路的离子流场	144
11.3	空气湿度对离子流场影响的物理过程	144
11.3.1	环境空气的组成	144
11.3.2	带电离子碰撞水分子的物理过程	145
11.4	空气湿度对离子流场的影响	145
11.4.1	空气湿度对离子迁移率的影响	146
11.4.2	空气湿度对起晕场强的影响	148
11.5	本章小结	149
第 12 章	空气湿度影响下的$\pm 800\text{kV}$输电线路离子流场计算	150
12.1	考虑空气湿度影响的离子流场计算模型	150
12.1.1	基本假设	150
12.1.2	离子流场的基本控制方程	151
12.1.3	边界条件	151
12.2	离子流场的计算思路	152
12.2.1	有限元法求解泊松方程	153
12.2.2	上流有限元法求解电流连续性方程	153
12.2.3	考虑空气湿度影响的离子流场计算流程	154
12.3	空气湿度影响下的 $\pm 800\text{kV}$ 输电线路地面离子流场计算	156
12.3.1	输电线路模型	156
12.3.2	关键计算参数的确定	156
12.3.3	模型剖分与计算求解	159

12.3.4	计算结果与分析	160
12.3.5	计算结果验证	161
12.4	本章小结	162
第 13 章	空气湿度影响下的带电作业人员体表电场分析	163
13.1	特高压直流输电线路带电作业分析模型	163
13.1.1	带电作业方式	163
13.1.2	杆塔、导线与人体模型	164
13.1.3	作业位置的选取	165
13.2	地电位作业时的人体电场分析	166
13.2.1	作业人员位于横担处的电位与电场分布	166
13.2.2	作业人员位于杆塔侧面的电位与电场分布	169
13.3	中间电位作业时的人体电场分析	171
13.3.1	作业人员位于导线上方 3m 处的电位与电场分布	171
13.3.2	作业人员位于导线水平方向 3m 处的电位与电场分布	174
13.4	等电位作业时的人体电场分析	176
13.4.1	作业人员站在导线上时的电位与电场分布	176
13.4.2	作业人员在导线侧面时的电位与电场分布	179
13.4.3	作业人员站在导线上张开双臂时的电位与电场分布	181
13.5	本章小结	183
第五篇 输电线路邻近山火运行特征		
第 14 章	山火致线路跳闸机理分析及合成电场计算方法	187
14.1	引言	187
14.2	山火致输电线路跳闸的机理分析	187
14.2.1	火焰高温致线路跳闸的作用机理	188
14.2.2	火焰高电荷密度致线路跳闸的作用机理	189
14.2.3	固体颗粒物致线路跳闸的作用机理	191
14.3	特高压直流输电线路合成电场计算方法	192
14.4	本章小结	196
第 15 章	建立山火条件下直流线路合成电场数学模型	197
15.1	引言	197
15.2	山火条件下直流输电线路合成电场计算方法	197
15.2.1	建立山火条件下直流线路合成电场数学模型	197
15.2.2	基本假设及边界条件	199
15.2.3	推导计算模型	199

15.2.4	合成电场计算流程	200
15.3	验证计算方法正确性	202
15.4	分析计算结果	202
15.5	本章小结	205
第 16 章	火焰温度及电荷密度对合成电场影响仿真研究	207
16.1	引言	207
16.2	建立山火条件下直流线路合成电场仿真模型	207
16.3	确定计算场域边界条件及划分网格	209
16.3.1	确定边界条件	209
16.3.2	划分有限元网格	209
16.4	验证仿真方法正确性	210
16.5	火焰温度及电荷密度对合成电场的影响仿真研究	210
16.5.1	建立有限元温度场分析仿真模型	212
16.5.2	火焰温度对击穿场强的影响仿真研究	214
16.5.3	火焰电荷密度对合成电场的影响仿真研究	215
16.5.4	山火中合成电场计算结果与仿真结果对比分析	222
16.6	本章小结	223
第 17 章	山火中颗粒物对电场的影响仿真研究	224
17.1	引言	224
17.2	线路间隙颗粒物致电场畸变仿真研究	224
17.2.1	间隙距离及颗粒物尺寸变化致电场畸变仿真研究	227
17.2.2	颗粒物畸变范围仿真研究	229
17.2.3	颗粒链致电场畸变仿真研究	230
17.3	导线表面颗粒物对电场的影响仿真研究	233
17.3.1	椭圆形颗粒物对电场的影响仿真研究	234
17.3.2	圆形颗粒物对电场的影响仿真研究	235
17.3.3	菱形颗粒物对电场的影响仿真研究	237
17.3.4	颗粒物种类对电场的影响仿真研究	238
17.4	本章小结	239
参考文献		240

绪 论

21 世纪以来,随着国民经济的迅速增长,电能成为生产和生活中不可缺少的一部分,对人类社会生产和生活的进步有着决定性的作用。为满足日益增长的电能需求,建设具有输电容量大、输电距离远等优点的特高压直流输电工程是我国电网发展的必然趋势。特高压直流输电线路的输电距离远,线路通常要途经建筑物、树障、天然气管道、江河湖泊等高湿度地区、山火频发等地区。输电线路环境的多样性使得输电线路运行特征变得异常复杂,了解和掌握复杂环境下输电线路运行特征对输电线路运行和维护有重大意义。

0.1 输电线路在复杂环境下运行的背景及重要意义

随着城市用电负荷的急剧增加及城市面积的不断扩大,电网规模、输电电压等级和配电格局相比以前都发生了重大变化。城市人口密集地区建设了更多高压变电站和配电网,原本多在郊区出现的超高压输电线路也开始邻近城镇建筑物,使得建筑物周围的电磁环境变得十分复杂,电磁辐射对城市居民生活和环境的影响也日益凸现。超高压输电线路周围工频电磁场对环境是存在影响的,电压增容、居民区密度增加使得周围电磁场存在超标现象,对人体长期会产生不好的影响。随着人们的环保意识逐渐提高,对电力设施的电磁防护要求也越来越高,由超高压输电线路引起的社会矛盾时有发生。为了消除公众对交流架空输电线路电磁环境问题的疑虑,评估超高压输电线路对周围电磁环境的影响是否超过标准,对超高压输电线路这样一个强干扰源的电场分布进行深入研究和探讨则显得十分必要。

在传输路径的择优方面,电力及石油天然气行业有着极为相近的原则,特别是当公共走廊受到限制时,高压传输线路与油气传输管道接近和立体跨越甚至共用同一走廊的现象难以避免,相互之间产生电磁干扰的情况十分普遍。线路正常运行时,由于电磁感应的作用,埋地油气传输管道上会产生感应电压,感应电压不断升高,致使油气传输管道绝缘材料被击穿或造成阴极防护设备元件损毁而无法正常工作,这足以危害油气管道维护维修作业人员的安全。在高压输电线路处于暂态情况下,即发生雷击或单相接地短路等故障时,可在邻近金属管道上瞬间产生出几千伏甚至数十千伏的瞬时冲击电压,同时,在发生故障的具体点位会有极大的短时电流产生,有时能达到数千至数万安培。

因此,研究电力传输线路稳态运行及单相接地短路故障情况下对邻近油气

传输管道的电磁干扰,从而判断其是否超过有关安全最大允许值,进而提出减小高压输电线路给油气传输管道造成的电磁影响的方法和防范措施,对于保障人身安全及设备设施运行安全,减少成本支出,提质增效,推动电力及石油天然气行业相互促进、协调共赢、有条不紊地向前发展有着极其重要的理论意义与实际意义。

特高压直流输电线路距离一般较长,线路沿途经过的地区差异非常大,输电线路经常会经过一些山地和高大的山岭,其植被覆盖率很大,输电线路不得不大量跨越森林植被。由于常年雨水充足,树木植被生长速度极快,在自然环境中输电线路走廊内树木的生长使电网传输存在极大的安全隐患,容易造成线路跳闸事故。在设计线路时,必须使线路与树木之间留有足够的距离。但如果盲目增加导线与树冠的距离,过高地增加杆塔高度,将造成不必要的线路投资成本。通过计算树障与线路之间动态间隙下的合成畸变电场,可为规程规定的线路与树木间的安全距离提供理论支持,同时可对树木是否使线路有安全隐患做出预判。可见,无论从输电线路安全运行的可靠性与稳定性角度,还是从保护环境角度来看,开展特高压直流输电线路合成电场特性的研究,对于建设环境友好、安全可靠的特高压直流输电系统都是非常必要的。

同样地,特高压直流输电线路不可避免地通过植被茂密的山林,其为火灾易发地区。山火发生时,火焰高温、高电荷密度及固体颗粒物等因素容易引发输电线路间隙绝缘性能迅速下降,导致输电线路跳闸。山火引发输电线路跳闸后,由于植被燃烧持续时间较长,在此期间重合闸经常失败,会引发多次跳闸和重合闸事故,给电力系统和线路装置带来严重影响。

本书引入火焰温度、火焰中电荷密度两种对特高压直流输电线路合成电场的影响因素,推导火焰温度、火焰中电荷密度与合成电场的数学关系,建立山火条件下特高压直流输电线路合成电场的非线性数学模型,采用 MATLAB 软件,实现对数学模型的求解,最后利用实测数据对数学模型进行验证,实现对特高压直流输电线路因山火跳闸时电场强度的准确计算;同时采用 Comsol 多物理场耦合仿真软件,仿真研究线路间隙中颗粒物以及颗粒链存在时,颗粒物及颗粒链对电场畸变的影响;采用 Ansoft 仿真软件,仿真研究颗粒物形状及种类对特高压直流输电线路导线表面电场的影响。

该数学模型和仿真方法能够计算输电线路走廊产生山火时是否会导致输电线路跳闸,便于调度运行人员采取恰当的措施,防止重合闸失败对电力系统造成的冲击,并使停电时间减少;在设计架空输电线路时,为架空输电线路走廊宽度、导线对地安全距离、导线分裂数、导线分裂间距的设计提供重要依据。

我国地域辽阔,地形和气象条件复杂,特高压直流输电线路送电距离远,沿途跨越江河湖泊等高湿度地区是不可避免的。较高的空气湿度使特高压直流输电线路

附近电磁环境发生改变,影响线路附近的生态环境安全,导致线路的安全可靠供电受到影响,甚至威胁线路下方地面活动人员和带电作业人员的生命安全。因此,开展空气湿度对特高压直流输电线路离子流场影响的研究,以及带电作业过程中合成电场分布规律的研究,对保证作业人员的生命安全和提高线路供电可靠性具有重要的工程实用价值,对输电工程的设计和建设也具有非常重要的指导意义。

0.2 输电线路运行特性基本概念

0.2.1 线路走廊

架空线路所经路径要有足够的地面宽度和净空走廊,或称线路走廊。高压和超高压架空线路及城市供电用架空线路,由于土地利用、自然环境和城市建筑等条件的限制,不易开辟线路走廊,这常常给线路建设带来困难,成为发展架空输电线路的一种障碍。一些工业发达的国家多采用同杆并架的方式,即将相同或不同电压等级的输电线路架设在同一杆塔上,以节省线路走廊。

0.2.2 直流输电线路的电晕放电

空气是架空输电线路导线与导线、导线与地之间的一种良好的绝缘介质。但由于高能射线的作用,空气中存在少量的自由电荷。当空气中存在电场时,空气中的自由电荷将在电场力作用下定向加速运动,运动过程中会与空气分子(或原子)发生碰撞。随着电场强度的增大,自由电荷碰撞前所能获得的能量就增大。使自由电荷获得能够在碰撞过程中使空气分子发生电离的能量的场强,称为空气分子电离的临界场强。碰撞电离产生电子与参与碰撞的电子在电场的作用下定向运动。电场强度足够大时,将持续发生新的碰撞电离,产生更多的电子,发生电子崩。因为离子的质量比较大,电场对离子运动的影响很小,基本可以忽略,发生碰撞电离后电子在电场力的作用下定向运动,正离子继续停在原地。当电子崩发展到一定程度时,放电就会转变为流注放电,也称为电晕放电。导线附近电场强度大小会影响电离层的厚度,导线附近的电场强度将随其与导线之间距离的增大而迅速减小,所以碰撞电离只在导线附近很小的一个区域内发生。在发生碰撞电离的同时,伴随着带电离子的附着、复合过程,会辐射出大量光子,在导线附近空间产生蓝色的光晕,称为电晕区。与导线极性相同的带电离子会因为电场的作用而离开电晕区,向空间中扩散。

0.2.3 耦合影响

1. 容性耦合影响

鉴于输电线路运行时会在周围相当大的范围内产生电场,而电场会通过输电

线路在一定范围内与靠近它的管道之间产生相互电容耦合作用,进而使传输管道和大地之间产生电压差,这种影响就称为容性耦合影响。我国的油气传输管道多数埋在地下,地表上的土壤具有一定的屏蔽作用,因而电场的破坏作用降低了,同时,根据行业规则,在施工和维护维修时应该逐段将传输管道与大地相连,所以输电线路正常负载情况下可忽略容性耦合影响。

2. 感性耦合影响

交流电力传输线路正常负荷运行时,交变的电流在一定范围的空间内也会产生交变的磁场,一定范围内与输电线路接近的管道受此影响便会在本体上产生电压。由于传输管道金属外壁通常包裹的防腐层并不是绝对的非导电材料,大多是各类导体物质,通常传输管道和大地不可避免地有一定的泄漏电压,并在传输管道上产生涂层感应电压。这种电磁的相互作用就称为感性耦合影响。在大多数情况下,在三相交流输电系统结构中,三相导线与传输管道基本上都是不对称的,因此,感性耦合影响很明显。

0.2.4 气球边界

气球边界模拟无限大的求解区域,可以有效地隔绝模型外的电荷源或电压源。对于静电场求解器来说,气球边界条件有两种类型: Charge 和 Voltage。

Voltage 类型模拟无限远处电势为零,实际上是模拟静电接地系统; Charge 类型模拟无限远处的电荷与求解区内的电荷相匹配,强制静电荷为零。在大多数情况下,指定 Voltage 类型的气球边界与指定 Charge 类型的气球边界所得结果非常类似,但实际上无穷远处的电荷并不与求解区域内的电荷相匹配。指定为气球边界条件的边界处,电场既不平行也不垂直于边界。

0.2.5 有限元分析法

有限元分析是指使用有限元方法来分析静态或动态的物理物体或物理系统。在这种方法中,一个物体或系统被分解为由多个相互连接的、简单的、独立的点组成的几何模型,这些独立的点的数量是有限的,因此被称为有限元。由实际的物理模型中推导出来的平衡方程式被应用到每个点上,由此产生了一个方程组。这个方程组可以用线性代数的方法来求解。有限元分析的精确度无法无限提高。元的数目到达一定高度后解的精确度不再提高,只有计算时间不断提高。

有限元分析法通常由三个主要步骤组成。①预处理,用户需建立待分析模型,在此模型中,该部分的几何形状被分割成若干个离散的子区域,或称为单元,各单元在一些称为节点的离散点上相互连接。这些节点中有的有固定的位移,而其余的有给定的载荷,准备这样的模型可能极其耗费时间,所以商用程序之间的相

互竞争就在于,如何用最友好的图形化界面的预处理模块,来帮助用户完成这项烦琐乏味的工作,有些预处理模块作为计算机化的画图和设计过程的组成部分,可在先前存在的 CAD 文件中覆盖网格,因而可以方便地完成有限元分析。②分析,把预处理模块准备好的数据输入有限元程序中,从而构成并求解用线性或非线性代数方程表示的系统, u 和 f 分别为各结点的位移和作用的外力。矩阵 K 的形式取决于求解问题的类。③分析的早期,用户需仔细地研读程序运行后产生的大量数字,即型,本模块将概述桁架与线弹性体应力分析的方法。商用程序可能带有非常大的单元库,不同类型的单元适用于范围广泛的各类问题。有限元分析法的主要优点之一就是:许多不同类型的问题都可用相同的程序来处理,区别仅在于从单元库中指定适用于不同问题的单元类型。

0.3 输电线路运行特征研究现状

0.3.1 输电线路邻近障碍物的研究现状

国内外针对输电线路走廊内由树木生长过高引起线路跳闸的研究,多集中于对树闪故障发生概率的统计和预警平台的构建两方面。基于大量的统计数据,分析在正常运行条件下电力走廊树闪故障发生频率,可预测出走廊植被管理的最优地点和时间。构建树障预警平台,通过图像、视频、距离定位等技术可实时对树木与导线之间的距离、线路走廊环境状况进行监测,从而及时对过高的树木进行修剪,保证线路正常运行。但是这两方面的研究都仅仅通过现场实测分析,依靠长期的运行经验避免树障的发生,并没有分析输电线路下树木的生长对电力系统电气绝缘特性的影响。并且构建树障预警平台所需投资较大,且实际操作复杂,对工作人员的学习能力要求高,不适宜推广。

特高压直流输电线路合成电场计算采用包括有限差分法、有限元法、棱边有限元法、时域有限差分法等,且都较为成熟,但对于在树木生长过高条件下特高压直流输电线路合成电场的计算,国内外研究人员尚未给出具体的数学计算模型。因此,考虑将树木的生长、弧垂的变化作为合成电场的动态边界条件,建立树木生长过高条件下数值法对特高压直流输电线路合成电场计算的数学模型,不仅具有重要的学术意义,而且有实用的工程应用价值。

国内的相关单位最早开展有关埋地油气传输管道的交流电磁干扰方面的研究试验工作。在研究过程中,工作人员对输油管道受到的交流电磁干扰的情况采取大时间段测量记录并进行计算,科研人员发现离输电传输线路变电站较近的输油管道受到的交流电磁干扰比较严重;忠武输气管道工程在设计施工期间开展了大量的高压交流输电传输线路对一定范围内走行接近的金属管道的电磁干扰影响研

究,并不断地进行现场试验,尝试了不同的防护措施和方法,但最后取得的实际防护效果并不尽如人意。在实验室内对电磁影响进行了模拟实验,结果发现了电磁影响显著造成腐蚀速度加快的现象,并得出了产生这一现象的条件是比较单纯的交流电磁干扰,并大胆地得出了埋地金属管道发生各种腐蚀的变化规律,总结了这种腐蚀产生的频率及速度随交流电流密度大小而变的基本规律;最近一个时期,我国加大了科研项目的资金支持力度,由于相关部门及资金的推动,中国电力科学研究院等单位先后对 330~750kV 及 $\pm 800\text{kV}$ 交直流输电传输线路对油气传输管道电磁干扰影响方面开展了大量有益的研究工作,并且取得了一些重要的研究成果。

目前,在有关输电传输线路对相邻金属管道的交流电磁干扰影响方面,国内尚未形成有实力的研究团队和成熟的专有技术,并且实际应用还很少。近年来,伴随着金属传输管道与高压输电传输线路的平行、交叉情况的不断增加,相关设计及施工单位在利用数值模拟仿真技术对工程的设计、施工及维护等方面采取相关技术进行评估评价逐渐得到了重视。国内很多从事电力传输工程设计的研究机构及从事传输管道设计施工的部门已经逐渐开始研究使用这一类软件,并逐渐开始进行系统的学习和使用。但目前,在国内的众多金属管道工程的施工及管理工作中,尚无利用仿真数值模拟技术对高压输电传输线路及金属管道的交流电磁影响情况进行比较系统的试验评估的例子。

0.3.2 输电线路周围工频电场研究现状

对于交流架空输电线路下的工频电场,国内外一般采用模拟电荷法对数学模型进行计算,在仿真方面采用有限元法计算有其优势。当输电线路电压等级过高时,导线周围将出现电晕,但过去的研究者考虑到电晕对地面附近的电场影响较小,因此忽略电晕。同时,杆塔、避雷线、绝缘子、弧垂等对地面附近的电场影响也比较小,通常也将它们忽略,并假设输电导线为无限长直线。模拟电荷法求解无限长直线周围电场时,要将直线上连续的电荷离散成一组等效的模拟电荷,再把每个模拟电荷对电场的贡献叠加起来,直接用解析法求解方程组,因此它的精度较高。在设定边界条件方面,有限元法优于模拟电荷法。模拟电荷法和有限元法作为数值方法,具有普适性强、易于建立模型等特点,因此两者可以结合使用。

国内外对超高压输电线路产生的电磁场数值仿真已取得一定的成果,但很少对超高压输电线路附近有建筑物时建筑物内的电磁场分布进行研究,张贵喜等^[1]已对输电线下有建筑物存在时的电场仿真进行了一些讨论,将超高压输电线看作无限长直导线,计算出了建筑物附近的二维电场,但电场是按三维空间分布的,且建筑物相对输电线路所处位置复杂多变,因此二维模型不能够恰当描述电场的

实际分布情况；文武等^[2]考虑了输电线弧垂等因素，对建筑物附近三维电场分布进行了计算，但在设置输电线上的模拟电荷时，采用了模拟点电荷离散的方法，而事实上输电线上的电荷应该呈连续分布。此外，建筑物的屏蔽方法很少有研究，特别是建筑物自身情况变化(如建筑材料、开窗位置、开窗大小等)对电磁屏蔽效果的影响。国内外研究人员未进行实测验证，只停留在仿真模拟阶段，极少数采用简化的模拟试验平台，但不能真实反映实际线路情况。因此，综合考虑线路档距、弧垂等因素且在有建筑物的情况下，采用线单元模拟电荷，对输电线在建筑物附近产生的三维电场进行仿真计算，通过实测验证修正和分析模型，不但具有重要的学术意义，而且有非常实用的工程应用价值。

0.3.3 山火模拟试验研究现状

国外最先开展山火引发输电线路跳闸的试验研究。美国电力研究协会(EPRI)^[3]设计的山火模拟试验平台采用导线-大地模型，导线与大地之间的距离为 10.7m，各相导线之间的距离为 7.6m，模拟木垛长、宽、高分别为 4.9m、3m、3m，图 0-1 所示为试验布置图。试验中发生了相同次数的相地放电和相间放电。考虑木垛所占间隙高度后，线路间隙平均击穿场强可达 49.3kV/m，导线各相之间间隙的平均击穿场强可达 65.0kV/m；不考虑木垛所占间隙高度，导线-地面间隙的平均击穿场强可达 26.7kV/m。

加拿大水电站研究中心的 Lanioe 等^[4]开展了在桉树火条件下， $\pm 450\text{kV}$ 直流输电线路间隙绝缘特性的研究，试验布置如图 0-2 所示。若不考虑桉树所占间隙高度，线路间隙平均击穿场强为 32.8kV/m；若考虑桉树所占间隙高度，线路间隙平均击穿场强为 58.4kV/m。

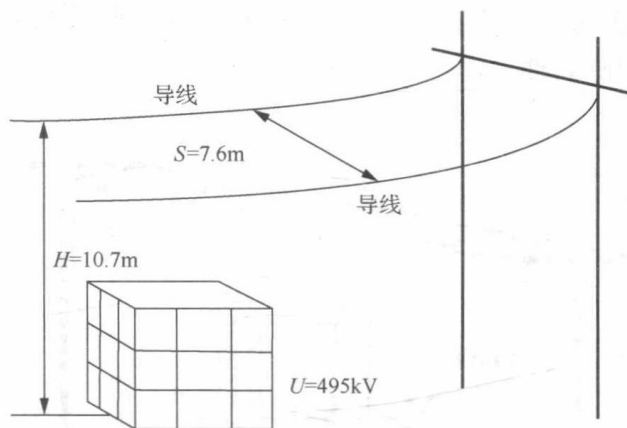


图 0-1 美国电力研究协会试验布置图