



国家电网公司
电力科技著作出版项目

交流输电线路与 电信线路的电磁耦合

张文亮 崔鼎新 等 编著

ELECTROMAGNETIC COUPLING BETWEEN
AC TRANSMISSION LINE
AND TELECOMMUNICATION LINE



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

交流输电线路与 电信线路的电磁耦合

张文亮 崔鼎新 等 编著

ELECTROMAGNETIC COUPLING BETWEEN
AC TRANSMISSION LINE
AND TELECOMMUNICATION LINE



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是编著者依据自己的主要科研成果、实践经验以及国内外有关资料,从电磁场基本理论出发,较全面系统地阐述了交流输电线路与电信线路的电磁耦合机理、数理模型和计算方法、电磁影响限值、保护措施和相关的测量技术等。全书共分为八章,其中第1、2章为交流输电线路时变电流产生的电磁场及感性耦合;第3章为交流输电线路入地电流产生的地电位升高及阻性耦合;第4章为交流输电线路低频电压产生的电场及容性耦合;第5章为在交流输电线路电磁影响下电信线路导线对地电压和电流;第6章为金属导线的低频磁屏蔽作用;第7、8章为影响限值、容许标准、保护措施以及相关的测量技术。

本书是一部理论性与实用性较强的科技专著,可作为从事电磁影响与电磁兼容科研、设计、建设和管理工作的科技人员的参考书,也可作为高等学校的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

交流输电线路与电信线路的电磁耦合/张文亮等编著. —北京:
中国电力出版社, 2013. 3

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4134 - 0

I. ①交… II. ①张… III. ①交流输电—输电线路—影响—通信线路—耦合作用—研究 IV. ①TN913.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 045677 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http: //www. cepp. sgcc. com. cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 6 月第一版 2013 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 202 千字

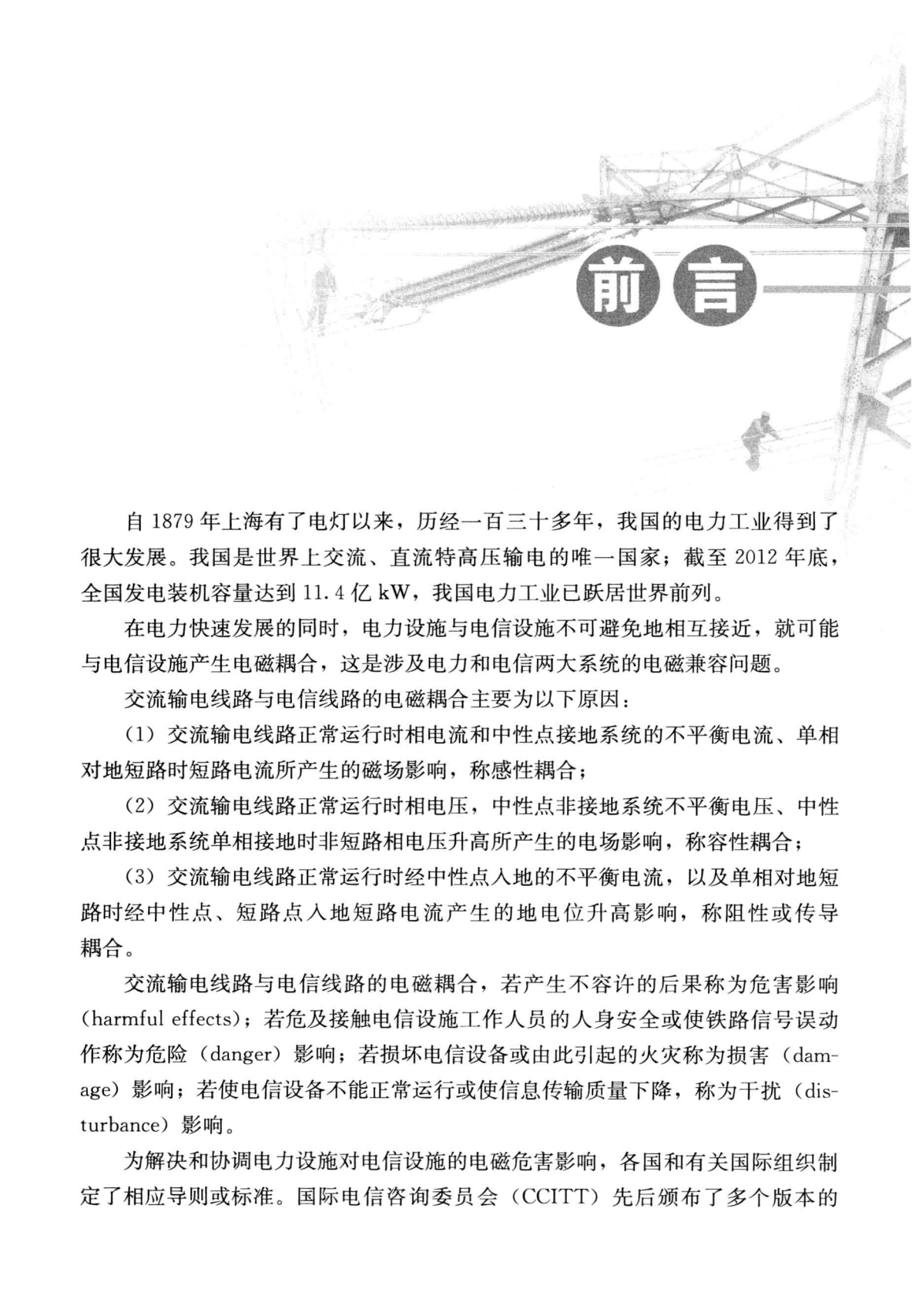
印数 0001—3000 册 定价 60.00 元



敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

自 1879 年上海有了电灯以来，历经一百三十多年，我国的电力工业得到了很大发展。我国是世界上交流、直流特高压输电的唯一国家；截至 2012 年底，全国发电装机容量达到 11.4 亿 kW，我国电力工业已跃居世界前列。

在电力快速发展的同时，电力设施与电信设施不可避免地相互接近，就可能与电信设施产生电磁耦合，这是涉及电力和电信两大系统的电磁兼容问题。

交流输电线路与电信线路的电磁耦合主要为以下原因：

(1) 交流输电线路正常运行时相电流和中性点接地系统的不平衡电流、单相对地短路时短路电流所产生的磁场影响，称感性耦合；

(2) 交流输电线路正常运行时相电压，中性点非接地系统不平衡电压、中性点非接地系统单相接地时非短路相电压升高所产生的电场影响，称容性耦合；

(3) 交流输电线路正常运行时经中性点入地的不平衡电流，以及单相对地短路时经中性点、短路点入地短路电流产生的地电位升高影响，称阻性或传导耦合。

交流输电线路与电信线路的电磁耦合，若产生不容许的后果称为危害影响 (harmful effects)；若危及接触电信设施工作人员的人身安全或使铁路信号误动作称为危险 (danger) 影响；若损坏电信设备或由此引起的火灾称为损害 (damage) 影响；若使电信设备不能正常运行或使信息传输质量下降，称为干扰 (disturbance) 影响。

为解决和协调电力设施对电信设施的电磁危害影响，各国和有关国际组织制定了相应导则或标准。国际电信咨询委员会 (CCITT) 先后颁布了多个版本的

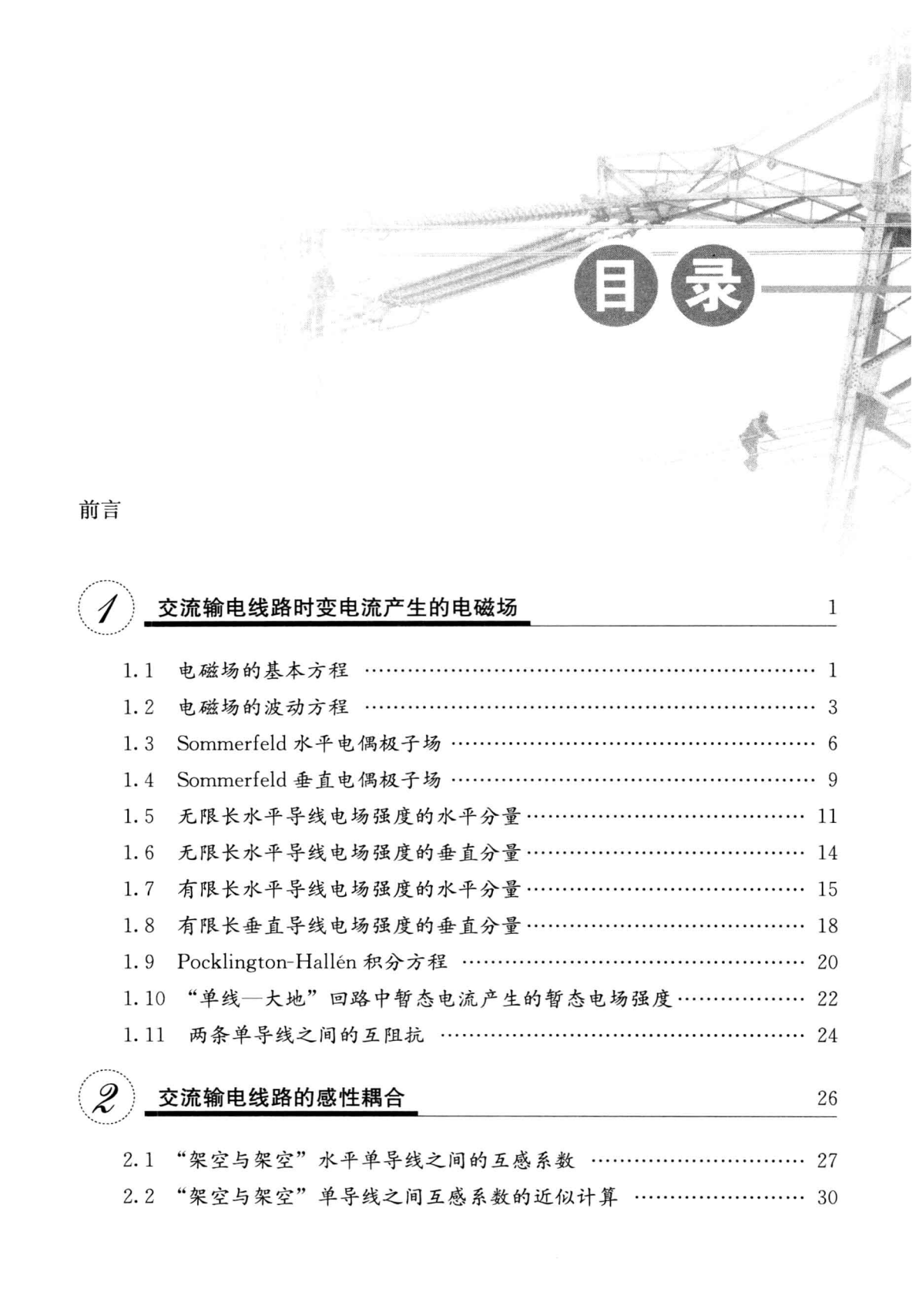
《电力线路对电信线路危害影响保护导则》（简称《保护导则》），其中主要为1963、1989和2005年版本。我国于1961年由水利电力部、邮电部、铁道部、通信兵部联合颁发了《防止和解决电力线路对通信、信号线路危险和干扰影响的原则协议》（简称《四部协议》）；1987年颁发了国标GB 6830—1986《电信线路遭受强电线路危险影响的容许值》；2006年颁布了电力行业推荐标准DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》。实践证明，各国和有关国际组织制定的导则或标准，为解决电力和电信工程建设的电磁影响问题、促进电力和电信的共同发展起到了至关重要的作用。

本书从电磁场基本理论出发，较全面系统地阐述了交流输电线路与电信线路电磁耦合的经典理论和现代技术，给出了基本数理模型，简要介绍了有关的数值计算方法，尽可能地给出解析式或简化计算式，用MATLAB软件编制了含有Struve函数和Neumann函数的互感系数的计算程序。书中也介绍了有关电磁影响限值、容许标准和保护措施，以及相关的测量技术。书中介绍的理论计算方法也适用于受电磁影响的金属管道、轨道电路等。本书主要面向从事电磁影响和电磁兼容研究、设计、建设和管理工作的电力、电信行业科技人员，供工程设计计算和解决实际问题参考。

本书由从事多年电磁影响与电磁兼容的科技工作者集体编著。张文亮主编，于永清、陆家榆副主编，崔鼎新、瞿雪弟撰写，吴桂芳、谢莉补充、校对和编程计算。本书得到了中国电力科学研究院科技专著基金的资助，得到了中国电机工程学会电磁干扰专业委员会、中国电力出版社的大力支持，在此表示衷心地感谢。由于编著者的水平有限，如有不当之处敬请批评指正。

编著者

2013年1月于北京



目 录

前言

1

交流输电线路时变电流产生的电磁场

1

- 1.1 电磁场的基本方程 1
- 1.2 电磁场的波动方程 3
- 1.3 Sommerfeld 水平电偶极子场 6
- 1.4 Sommerfeld 垂直电偶极子场 9
- 1.5 无限长水平导线电场强度的水平分量 11
- 1.6 无限长水平导线电场强度的垂直分量 14
- 1.7 有限长水平导线电场强度的水平分量 15
- 1.8 有限长垂直导线电场强度的垂直分量 18
- 1.9 Pocklington-Hallén 积分方程 20
- 1.10 “单线—大地”回路中暂态电流产生的暂态电场强度 22
- 1.11 两条单导线之间的互阻抗 24

2

交流输电线路的感性耦合

26

- 2.1 “架空与架空”水平单导线之间的互感系数 27
- 2.2 “架空与架空”单导线之间互感系数的近似计算 30

2.3	架空单导线与地中单导线之间的互感系数	35
2.4	地中绝缘单导线与空气中单导线之间的互感系数	36
2.5	地中两条绝缘单导线之间的互感系数	37
2.6	有限长水平单导线和水平单导线的互感系数	38
2.7	复数镜像法求互感系数	41
2.8	大地为多层水平构造无限长水平导线电场强度的水平分量	43
2.9	三相交流输电线路与电信线路之间的互感系数	47
2.10	交流输电线路对双导线回路的磁影响	50
2.11	交流输电线路对架空电缆线路的磁影响算例	53

3

交流输电线路入地电流的阻性耦合

55

3.1	点接地极周围的电位	56
3.2	半圆球形接地极	57
3.3	垂直管状接地极	58
3.4	面形接地极	59
3.5	圆环形接地极	60
3.6	有限长水平线形圆柱接地极	62
3.7	线接地极	63
3.8	等电位接地网	65
3.9	不等电位接地网	66
3.10	点接地极与无限长地下电缆的阻性耦合	69
3.11	点接地极在多层水平结构大地表面引起的电位	72
3.12	钢轨的跨步电压	74

4

交流输电线路的容性耦合

77

4.1	无限长导线上线电荷产生的电场强度	77
4.2	无限长导线上线电荷产生的电位	79
4.3	单导线之间的电耦合系数	80
4.4	三相交流输电线路与单导线之间的电耦合系数	82

4.5	三相交流输电线路与双导线的电耦合系数	86
4.6	中性点直接接地交流输电线路对双线回路的电影响	87
4.7	中性点不接地交流输电线路对双线回路的电影响	89

5

在交流输电线路电磁影响下电信线路导线对地电压和电流	92
--	-----------

5.1	基本方程的建立和求解	92
5.2	传输线上的电压和电流及输入阻抗	96
5.3	单导线上电压和电流分布的一般表达式	98
5.4	无延长段单导线的电压和电流	101
5.5	两端绝缘有延长段导线上感应电压和电流	106
5.6	长距离交流输电线路在电信线路上感应的对地电压和电流	107
5.7	矩量法计算垂直导线上的电流	111
5.8	电信线路导线两端绝缘时的电压及电流分布算例	114

6

金属导线的低频磁屏蔽作用	119
---------------------------	------------

6.1	屏蔽作用原理	119
6.2	理想屏蔽系数	120
6.3	实际屏蔽系数	122
6.4	电信电缆金属外护套的实际屏蔽系数	123
6.5	有限差法求屏蔽线中电流	124
6.6	网络图论法求屏蔽线中电流	131
6.7	双侧消去法求架空地线中电流	133
6.8	用有限差分法计算架空地线电流算例	136

7

交流输电线路对电信线路电磁影响的限值和保护措施	141
--------------------------------------	------------

7.1	电磁影响的限值	141
7.2	国标和规程有关危险影响的限值	146
7.3	国标和规程有关干扰影响的限值	149

7.4 电磁影响的保护措施	153
---------------------	-----



电磁影响的测量技术	155
------------------	-----

8.1 交流输电线路对电信线路电影响的测量	155
8.2 交流输电线路对电信线路磁影响的测量	163
8.3 地电位测量	168
8.4 屏蔽系数的测量	172
8.5 大地电阻率的测量	177

参考文献	186
------------	-----

CONTENTS

Foreword

1. ELECTROMAGNETIC FIELD EXCITED BY TIME-VARYING CURRENT IN TRANSMISSION LINE	1
1.1 Fundamental Equations	1
1.2 Wave Equations	3
1.3 Electromagnetic Field of a Horizontal Dipole Over Earth	6
1.4 Electromagnetic Field of a Vertical Dipole Over Earth	9
1.5 Electric Field Horizontal Component of Infinite-length Conductor	11
1.6 Electric Field Vertical Component of Infinite-length Conductor	14
1.7 Electric Field Horizontal Component of Finite-length Conductor	15
1.8 Electric Field Vertical Component of Finite-length Conductor	18
1.9 Pocklington-Hallén Integral Equation	20
1.10 Electric Field Excited by Transient Current in Single-conductor Circuit With Earth Return	22
1.11 Mutual Impedance of Two Conductors	24
2. INDUCTIVE COUPLING OF TRANSMISSION LINE	26
2.1 Mutual Inductance Coefficient of Two Overhead Horizontal Conductors	27
2.2 Approximate Calculation of Mutual Inductance Coefficient of Two Overhead Horizontal Conductors	30
2.3 Mutual Inductance Coefficient Between Overhead Conductor and Underground Cable	35
2.4 Mutual Inductance Coefficient Between Underground Cable and Conductor in the Air	36
2.5 Mutual Inductance Coefficient of Two Underground Cables	37

2. 6	Mutual Inductance Coefficient of Two Finite-length Horizontal Conductors	38
2. 7	Mutual Inductance Coefficient Calculation by Complex Image Method	41
2. 8	Electric Field Horizontal Component of Infinite-length Line Above Multi-layer Earth	43
2. 9	Mutual Inductance Coefficient Between Three-phase AC Transmission Line and Telecommunication Line	47
2. 10	Magnetic Influence of Transmission Line to Two-wire Circuit	50
2. 11	Example of Magnetic Influence of Transmission Line to Aboveground Cables	53
3.	RESISTIVE COUPLING OF GROUND SHORT-CIRCUIT CURRENT OF TRANSMISSION LINE	55
3. 1	Potential Distribution Around Point Ground Electrode	56
3. 2	Hemispherical Ground Electrode	57
3. 3	Vertical Tubular Ground Electrode	58
3. 4	Plane Ground Electrode	59
3. 5	Annulus Ground Electrode	60
3. 6	Finite-length Horizontal Cylindrical Ground Electrode	62
3. 7	Line Ground Electrodes	63
3. 8	Equipotential Ground Grid	65
3. 9	Ground Grid With Unequal Potential	66
3. 10	Resistive Coupling Between Point Ground Electrode and Infinite-length Underground Cable	69
3. 11	Potential at Surface of Multi-layer Earth Produced by Point Ground Electrode	72
3. 12	Step Voltage of Rail	74
4.	CAPACITIVE COUPLING OF TRANSMISSION LINE	77
4. 1	Electric Field Produced by Line Charge on Infinite-length Conductor	77

4. 2	Potential Produced by Line Charge on Infinite-length Conductor	79
4. 3	Electric Coupling Coefficient of Two Single-conductor Lines	80
4. 4	Electric Coupling Coefficient Between Three-phase Transmission Line and Single Conductor	82
4. 5	Electric Coupling Coefficient Between Three-phase Transmission Line and Two-wire Circuit	86
4. 6	Electric Influence of Neutral Grounded Transmission Line to Two-wire Circuit	87
4. 7	Electric Influence of Isolated Neutral Transmission Line to Two-wire Circuit	89
5.	VOLTAGE AND CURRENT DISTRIBUTION OF CONDUCTOR TO GROUND UNDER ELECTROMAGNETIC INFLUENCE OF TRANSMISSION LINE	92
5. 1	Establishment and Solution of Basic Equations	92
5. 2	Voltage, Current and Input Impedance of Transmission Line	96
5. 3	General Expressions of Voltage and Current of Single Conductor	98
5. 4	Voltage and Current of Single Conductor Without Extention	101
5. 5	Induced Voltage and Current on Conductor With Insulation and Extention at Both Ends	106
5. 6	Voltage and Current to Ground Induced on Telecommunication Line by Long Transmission Line	107
5. 7	Calculation of Current Distribution of Vertical Conductor by MoM	111
5. 8	Example of Voltage and Current Distribution of Telecommunication Line With Both Ends Insulated	114
6.	LOW-FREQUENCY MAGNETIC SHIELDING OF CONDUCTORS ...	119
6. 1	Principles of Shielding	119
6. 2	Ideal Shielding Factor	120
6. 3	Practical Shielding Factor	122
6. 4	Practical Shielding Factor of Telecommunication Cable With Both Ends	

Concetrated Grounded and Middle Section Distributed Grounded	123
6. 5 Current Analysis of Shielding Wire by Finite Difference Method	124
6. 6 Current Analysis of Shielding Wire by Network Graph Theory	131
6. 7 Current Analysis of Overhead Ground Wire by GDSEM	133
6. 8 Calculation Example of Current of Overhead Ground Wire by Finite Difference Method	136
7. LIMITS AND PROTECTION OF ELECTROMAGNETIC INFLUENCE OF AC TRANSMISSION LINE TO TELECOMMUNICATION LINE	141
7. 1 Limits of Electromagnetic Influence	141
7. 2 Limits of Danger Influence in National Standard and Regulations of China	146
7. 3 Limits of Disturbance Influence in Standards and Regulations ...	149
7. 4 Protection of Electromagnetic Influence	153
8. TESTING TECHNIQUES OF ELECTROMAGNETIC INFLUENCE	155
8. 1 Measurement of Electric Influence of Transmission Lines to Telecommunication Lines	155
8. 2 Measurement of Magnetic Influence of Transmission Lines to Telecommunication Lines	163
8. 3 Measurement of Ground Potential	168
8. 4 Measurement of Shielding Coefficient	172
8. 5 Measurement of Earth Resistivity	177
REFERENCES	186

交流输电线路时变电流 产生的电磁场

交流输电线路正常运行状态下导线上的工频负荷电流、谐波电流、电晕电流、电力载波（PLC）电流和短路状态下的暂态短路电流为时间的函数，均为时变电流。现以单导线上时变电流在周围空间产生的电磁场为基本模型进行讨论。

本章从宏观电磁场基本理论出发，依据麦克斯韦（Maxwell）方程组，导出齐次波动方程及其解。按照索末菲（Sommerfeld）偶极子场理论，利用两层媒质（空气和大地）分界面电场强度边界条件的经典方法，求出处于两层媒质中的偶极子产生的电场强度，在此基础上导出无限长、有限长单导线时变电流产生的电场强度，用复数镜像法近似求出处于两层媒质中的单导线时变电流产生的电场强度。对于多层媒质（即空气和多水平层构造大地）用传输线法导出等效电参数，使得两层媒质电场强度的各个计算公式仍然适用。最后简要介绍了 Pocklington-Hallén 积分方程和用矩量法求解原理，以及暂态电磁场计算的基本方法。

1.1 电磁场的基本方程

导线上的时变电流在周围空间产生的电磁场，应遵循电磁场的基本定律，即满足 Maxwell 方程组。

Maxwell 方程组的矢量微分形式^[1]为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.1.4)$$

式中 ∇ ——哈密顿 (Hamilton) 算子;

$\mathbf{H}$ ——磁场强度;

$\mathbf{E}$ ——电场强度;

$\mathbf{B}$ ——磁感应强度;

$\mathbf{D}$ ——电位移;

$\mathbf{J}$ ——电流密度;

ρ ——电荷密度。

对于均匀、线性、各向同性的媒质, 下列关系成立

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.1.5)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.1.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.1.7)$$

式中 μ ——媒质的磁导率, 真空 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$;

ϵ ——媒质的电容率, 真空 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$;

σ ——媒质的电导率, S/m 。

这三个参数在线性均匀媒质中是与场量无关的常数, 在非均匀媒质中是坐标的函数, 在非线性媒质中是与场矢量有关的函数, 在各向异性媒质中为张量。

Maxwell 方程组的矢量积分形式为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \quad (1.1.8)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.1.9)$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho d\tau \quad (1.1.10)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.1.11)$$

式 (1.1.8) 和式 (1.1.9) 中, l 是场区内的闭合曲线, S 是闭合曲线 l 包围的曲面。式 (1.1.10) 和式 (1.1.11) 中, S 是场区内的闭合曲面, V 是闭合曲面 S 包围的体积。

采用何种形式的 Maxwell 方程组，视具体问题的需要和方便而定，本文后面主要用矢量微分形式。

1.2 电磁场的波动方程

由于式 (1.1.3) 成立，磁感应强度 $\mathbf{B}$ 可用矢量位 $\mathbf{A}$ 的旋度来表示，即

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1.2.1)$$

将式 (1.2.1) 代入式 (1.1.2) 中得

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = \mathbf{0}$$

因为矢量旋度为零可用标量负梯度来表示，即

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (1.2.2)$$

又因

$$\nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (1.2.3)$$

将式 (1.1.5) 代入式 (1.1.1)，再将式 (1.1.6) 和式 (1.1.7) 代入，使其与式 (1.2.3) 相等，得

$$\nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} = \mu\sigma \mathbf{E} + \mu\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.2.4)$$

引入洛伦兹 (Lorenz) 条件

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = -\mu\sigma \Phi - \mu\epsilon \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1.2.5)$$

将式 (1.2.2) 和式 (1.2.5) 代入式 (1.2.4) 中，得

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = \mathbf{0} \quad (1.2.6)$$

这就是所求的矢量位 $\mathbf{A}$ 方程。

对于无磁流、磁荷存在的空间，引入赫兹 (Hertz) 电矢量 $\mathbf{\Pi}$ 是方便的^[2]，设

$$\mathbf{A} = \mu\epsilon \frac{\partial \mathbf{\Pi}}{\partial t} + \mu\sigma \mathbf{\Pi} \quad (1.2.7)$$

$$\Phi = -\nabla \cdot \mathbf{\Pi} \quad (1.2.8)$$

将式 (1.2.7) 代入式 (1.2.1) 中, 得

$$\mathbf{B} = \mu\epsilon \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{\Pi} + \mu\sigma \nabla \times \mathbf{\Pi} \quad (1.2.9)$$

将式 (1.2.7) 和式 (1.2.8) 代入式 (1.2.2) 中, 得

$$\mathbf{E} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{\Pi}) - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{\Pi}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{\Pi}}{\partial t} \quad (1.2.10)$$

再将式 (1.2.9) 和式 (1.2.10) 代入式 (1.1.2) 中, 得

$$\mu \left(\epsilon \frac{\partial}{\partial t} + \sigma \right) \left(\nabla^2 \mathbf{\Pi} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{\Pi}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{\Pi}}{\partial t^2} \right) = \mathbf{0} \quad (1.2.11)$$

将此式对时间 t 求积分, 积分常数取零不影响场的确定, 式 (1.2.11) 变为

$$\nabla^2 \mathbf{\Pi} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{\Pi}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{\Pi}}{\partial t^2} = \mathbf{0} \quad (1.2.12)$$

此式就为所要求的赫兹 (Hertz) 电矢量 $\mathbf{\Pi}$ 方程, 称振荡方程。

若激励源是时间的简谐函数, 式 (1.2.12) 变为

$$\nabla^2 \mathbf{\Pi} - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{\Pi} = \mathbf{0} \quad (1.2.13)$$

因媒质 (含色散媒质) 传播常数 $k = j\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$, $k^2 = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$, 则式 (1.2.13) 可写为

$$\nabla^2 \mathbf{\Pi} + k^2 \mathbf{\Pi} = \mathbf{0} \quad (1.2.14)$$

式 (1.2.14) 称齐次亥姆霍兹 (Helmholtz) 方程, 也称波动方程。

该波动方程用分离变量法或格林 (Green) 函数法求解^[3]。Green 函数 $\frac{e^{jkR}}{4\pi R}$ 满足式 (1.2.14), 故为波动方程的解。

在无限空间非导电媒质中, 电偶极子 (直角坐标: $0, 0, h$) 在观察点 P (直角坐标: x, y, z) 处产生的 Hertz 电矢量 $\mathbf{\Pi}$ 的在电偶极矩方向上的分量为

$$\Pi = -\frac{j\omega\mu I dx}{4\pi k^2} \frac{e^{jkR}}{R} \quad (1.2.15)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + (h - z)^2}$$

式中 R ——电偶极子与观测点的距离 (见图 1.1);

h ——电偶极子与地面高度。

由于