

JIEDIWANG  
GUZHANG ZHENDUAN

# 接地网

# 故障诊断

刘健 王森 等著

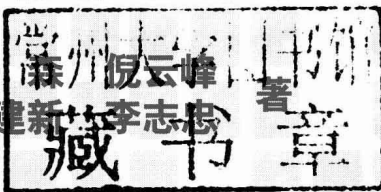


中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

JIEDIWANG  
GUZHANG ZHENDUAN

# 接地网 故障诊断

刘 健 王  
王树奇 王建新



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

接地网是确保电气设备和人身安全的重要设施。接地网故障诊断对于及时发现隐患并采取措施排除隐患具有重要的意义。本书总结了作者团队近年来在接地网故障诊断领域所做的主要工作及取得的成果,包括接地网的模型化方法、接地网故障诊断算法及比较、接地网的可测性分析、接地网故障诊断方法、接地网故障诊断测试方法研究以及其他相关问题共6篇内容。本书可供科研院所的技术人员,变电站设计、运行、维护、检修的技术人员使用,也可供高等院校的师生学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

接地网故障诊断/刘健等著. —北京:中国电力出版社,2010.12  
ISBN 978-7-5123-1197-8

I. 接… II. ①刘… III. ①接地网—故障诊断 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第245571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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2011年4月第一版 2011年4月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 14.5印张 351千字  
印数0001—2000册 定价35.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
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

接地网是确保电气设备和人身安全的重要设施，当接地网存在缺陷时，会危及电气设备和人身安全。接地网故障诊断对于及时发现隐患并采取相应措施具有指导意义，本书作者及其领导的团队近年来在国家电网公司重大科技项目资助下，对接地网故障诊断开展了大量科学研究工作。

作为科技工作者，我们愿意将已经取得的阶段性成果奉献给广大同行，一方面作为抛砖引玉，另一方面，期望其他团队能够迅速借鉴这些成果跃上科学的更高峰，从而避免因认识的局限性以及进一步研究过程中所遇到的困难而延缓了该领域的科技进步——这正是我们出版本书的宗旨。

本书所包括的内容是根据本书作者团队公开发表的学术论文和研究生学位论文整理而成，受到篇幅的限制，可能存在不够详实之处，读者可以直接与作者联系索取更多详细资料。

本书绪论和第 3、9、10、15 章由刘健教授、倪云峰博士和王森高工著作完成，第 1、2、6、8、11 章由刘健教授、王树奇博士、王森高工和李志忠硕士著作完成，第 4、5、7、14 章由刘健教授、王建新博士和王森高工著作完成，第 12、13、16 章和后记由刘健教授和王森高工著作完成，附录由李志忠硕士著作完成。

参加本书写作的还有卢伟硕士、李腾硕士、李增利硕士、于跃硕士、曹笛笛硕士、方园硕士、杨燕娜硕士和王利强硕士，程红丽教授和刘树林教授也参与了本书部分科研过程，西安交通大学罗先觉教授和清华大学曾嵘教授对本书部分科研内容进行了指导和帮助，在此一并表示忠心地感谢！

由于作者水平有限，书中难免有错误与不妥之处，希望读者批评指正。

**作 者**

2010 年夏于西安

## 符 号 表

<p>上标 “<sup>(g)</sup>”：针对支路 <math>g</math> 的算子</p> <p>上标 “[<math>g</math>]”：第 <math>g</math> 处激励位置</p> <p>上标 “<sup>(g)</sup>”：相应层网的层数 <math>g</math></p> <p>上标 “<math>\langle k \rangle</math>”：第 <math>k</math> 次迭代</p> <p><math>E</math>：相对累积误差均值对初值的敏感性</p> <p><math>S</math>：相对累积误差均值的标准差对初值的敏感性</p> <p>加粗斜体：矩阵或向量</p> <p><math>X</math>：<math>\mathbf{X}</math> 中的元素</p> <p><math>[\mathbf{X}]_i</math>：向量 <math>\mathbf{X}</math> 的第 <math>i</math> 个元素</p> <p><math>[\mathbf{X}]_{i,j,\dots,k}</math>：矩阵 <math>\mathbf{X}</math> 的第 <math>i, j, \dots, k</math> 元素</p> <p><math>B</math>：支路数</p> <p><math>N</math>：节点数</p> <p><math>F</math>：单元标识向量，<math>F_i = j</math> 表示第 <math>i</math> 个支路属于第 <math>j</math> 个单元</p> <p><math>FA</math>：单元属性标识向量，<math>FA_i = 1</math> 或 <math>0</math> 分别表示第 <math>i</math> 个支路属于自明单元或非自明单元</p> <p><math>A</math>：节点对支路的关联矩阵</p> <p><math>\hat{A}</math>：节点对支路的不降阶关联矩阵</p> <p><math>G</math>：节点电导矩阵</p> <p><math>\tilde{R}</math>：支路电阻对角线矩阵</p> <p><math>R_0</math>：支路正常电阻向量</p> <p><math>\hat{R}</math>：支路电阻诊断结果向量</p> <p><math>R</math>：支路实际电阻向量</p> <p><math>r</math>：支路相对电阻向量</p> <p><math>R^*</math>：支路电阻最优解向量</p> <p><math>U</math>：节点电压向量</p> <p><math>J</math>：节点注入电流向量</p> <p><math>D^{(1)}</math>：实际接地网的可及节点标识向量</p> <p><math>D^{(2)}</math>：为实际接地网和元版块网的节点对应关系向量</p> <p><math>D^{(3)}</math>：元版块网和可及接地网的节点对应关系向量</p>	<p><math>C^{(2)}</math>：为实际接地网和元版块网的支路对应关系向量</p> <p><math>C^{(3)}</math>：可及接地网和本征接地网的支路对应关系向量</p> <p><math>H^{(g)}</math>：不确定支路标识向量</p> <p><math>b_{i,j}</math>：节点 <math>i</math> 和 <math>j</math> 之间的支路，其中，<math>i</math> 为序号小的节点，<math>j</math> 为序号大的节点</p> <p><math>R_{(i,j)}^{(n)}</math>：节点 <math>i</math> 和 <math>j</math> 之间的支路电阻，其中，<math>i</math> 为序号小的节点，<math>j</math> 为序号大的节点；<math>n</math> 表示分层约简的层，若 <math>n=4</math> 表示本征网层的支路电阻，<math>n=1</math> 表示实际接地网层的支路电阻，通常 <math>n=1</math> 时省略上标</p> <p><math>UD</math>：支路故障诊断结果的不确定度</p> <p><math>GD</math>：接地网故障诊断结果的不确定度</p> <p><math>e(\%)</math>：相对误差</p> <p><math>\tau\%</math>：综合干扰强度</p> <p><math>UDC(\tau)</math>：在综合干扰强度 <math>\tau\%</math> 下，测试明晰支路的平均不确定度（反映综合干扰对接地网故障诊断结果的影响程度）</p> <p><math>UD_I</math>：结构可测性分析中支路的不确定度</p> <p><math>UD_{II}</math>：测试可测性分析中支路的不确定度</p> <p><math>UD_{III}</math>：状态可测性分析中支路的不确定度</p> <p><math>UD_{IV}</math>：干扰可测性分析中支路的不确定度</p> <p><math>F</math>：概率密度函数</p> <p><math>P</math>：概率</p> <p><math>\Psi</math>：实际接地网支路电阻的最大可能取值与其最小可能取值之比</p> <p><math>\mu</math>：均值</p> <p><math>\sigma</math>：标准差</p> <p><math>\square</math>：细框矩形表示明晰支路</p> <p><math>\blacksquare</math>：粗框矩形表示不确定支路</p> <p><math>\ x\ _2</math>：<math>x</math> 的二阶范数</p>
--	---

## 术 语 表

可及节点 (touchable node)	1. 1	准明晰块 (quasi clear block)	3. 1
实际接地网 (actual grounding grid)	1. 1	混合块 (hybrid block)	3. 1
版块 (domain)	1. 1	块的投影 (projection of a block)	3. 1
准元版块 (quasi circuit domain)	1. 1	第 1 类不确定支路组 (the first class uncer -	
元版块 (circuit domain)	1. 1	tain branch group)	3. 2
元版块网 (circuit domain grid)	1. 1	第 2 类不确定支路组 (the second class un -	
元网络 (circuit network)	1. 1	certain branch group)	3. 2
可及接地网 (touchable grounding grid)	1. 1	第 3 类不确定支路组 (the third class uncer -	
本征接地网 (intrinsic grounding grid)	1. 1	tain branch group)	3. 2
本征支路 (intrinsic branch)	1. 1	不确定支路组的原形 (prototype of uncer -	
单元 (unit)	1. 1	tain branch group)	3. 2
明晰支路 (clear branch)	1. 2	子网络 (subgrid)	3. 3
不确定支路 (uncertain branch)	1. 2	扩展子网络 (expanded subgrid)	3. 3
不确定支路组 (uncertain branch group)		增量故障诊断方程组 (increment diagnosis	
	1. 2	equations)	4. 1
交叉元网络 (overlapping circuit networks)		增广增量故障诊断方程组 (augmented in -	
	1. 2	crement diagnosis equations)	4. 2
元网络组 (circuit network group)	1. 2	增广增量故障诊断矩阵 (augmented incre -	
接地网拓扑数据结构 (data structure descri -		ment diagnosis matrix)	4. 2
bing a grounding grid)	2. 1	接地网故障诊断的迭代最小二乘法 (itera -	
相互关联 (related)	3. 1	tion least square approach for grounding grid	
准块 (quasi block)	3. 1	corrosion diagnosis)	4. 2
自明单元 (autonomy unit)	3. 1	接地网故障诊断的禁忌搜索法 (tabu search	
非自明单元 (non-autonomy unit)	3. 1	based approach for grounding grid corrosion	
准块的自明部分 (autonomy part of a quasi		diagnosis)	4. 3
block)	3. 1	基于蒙特卡罗的接地网故障诊断算法评价	
准块的非自明部分 (non-autonomy part of a		(Monte-Carlo based evaluation of grounding	
quasi block)	3. 1	grids corrosion diagnosis)	5. 1
块 (block)	3. 1	算法的诊断准确性比较 (comparison of the	
块的原形 (prototype of block)	3. 1	diagnosis accuracy)	5. 3
明晰块 (clear block)	3. 1	算法对初值的敏感性比较 (comparison of	
不确定块 (uncertain block)	3. 1	the sensitive to the initial value)	5. 4

充分测试方案 (complete test scheme)	6.1	不确定支路组的信息熵 (entropy of an uncertain branch group)	8.5
理想充分测试方案 (ideal complete test scheme)	6.1	接地网的信息熵 (entropy of a grounding grid)	8.5
虚拟测试 (virtual test)	6.1	分区 (region)	9.3
充分虚拟测试 (complete virtual test)	6.1	待求支路 (considered branches)	9.3
结构可测性 (structure testability)	6.2	待求本征支路集 (set of considered intrinsic branches)	9.3
结构明晰支路 (structure clear branch)	6.2	测试公共节点集 (set of common nodes for test)	9.3
结构不确定支路 (structure uncertain branch)	6.2	面向节点 $i$ 的测试 (the $i$ -th node oriented test)	9.3
已知支路 (known branch)	6.2	求解本征支路电阻的线性方法 (linear approach of intrinsic branch resistances evaluation)	9.3
未知支路 (unknown branch)	6.2	接地引下线 (down-lead lines)	10.1
状态可测性 (state testability)	6.6	接地引下线测试与诊断 (test and diagnosis of down-lead lines)	10.1
状态明晰支路 (state clear branch)	6.6	最大电压定理 (law of maximum voltage)	11.1
状态不确定支路 (state uncertain branch)	6.6	理想最优测试方案 (ideal optimal test scheme)	11.3
测试可测性 (measurement testability)	7.1	充分测试方案自动生成 (automatic forming of complete test scheme)	12.1
测试明晰支路 (measurement clear branch)	7.1	测试方案 (test scheme)	12.2
测试不确定支路 (measurement uncertain branch)	7.1	常规测试方式 (normal test mode)	12.2
干扰可测性 (disturbing testability)	7.2	自动测试方式 (automatic test mode)	12.2
支路的不确定度 (uncertainty degree of branch)	7.2	测试工作量 (amount of test work)	12.2
接地网的不确定度 (uncertainty degree of grounding grid)	7.2	接地网故障监测线 (monitoring lines of a grounding grid)	13.1
综合干扰强度 (total disturbance degree)	7.2	接地网故障监测线优化布置 (optimal layout of monitoring lines of a grounding grid)	13.2
干扰的影响程度 (extent of disturbance influence)	7.2	抗干扰性最强原则 (robust principle)	13.3
不确定支路的取值范围 (resistance range of an uncertain branch)	8.3	$N+Y-X$ 原则 ( $N+Y-X$ principle)	13.3
不确定支路的取值概率分布 (probability of resistance of an uncertain branch)	8.4	补充可及节点追加测试法 (approach of	
信息熵 (entropy)	8.5		
不确定支路的信息熵 (entropy of an uncertain branch)	8.5		

adding touchable nodes and testing)	13.5	镜像测试方案 (mirror testing scheme)	15.1
接地网故障诊断自动测试系统 (automatic testing system for grounding grids corrosion diagnosis)	14.1	可及节点位置偏移影响的修正 (modification of the influence of touchable nodes deviation)	15.2
程控切换装置 (intelligent switching device)	14.2	接地网故障诊断的分布式计算方法 (distributed calculation of grounding grids corrosion diagnosis)	16.1
测试数据的直线拟合 (linear curve fitting approach of the testing data)	14.4		
镜像接地网 (mirror grounding grid)	15.1		
镜像可及节点 (mirror touchable node)	15.1		



## 目 录

前言	
符号表	
术语表	
绪论	1

## 第 1 篇 接地网的模型化方法

<b>第 1 章 接地网的分层约简模型</b>	4
1.1 接地网的拆分和约简	4
1.2 明晰支路、不确定支路和不确定支路组	6
1.3 实例	8
1.4 本章小结	19
<b>第 2 章 分层约简模型的数据结构及网络拓扑自动生成算法</b>	20
2.1 接地网拓扑数据结构	20
2.2 接地网分层约简模型的网络拓扑自动生成算法	21
2.3 特殊支路的处理	29
2.4 本章小结	30
<b>第 3 章 接地网的分块模型</b>	31
3.1 接地网的约简和分块模型	31
3.2 不确定支路组的分类	36
3.3 接地网的分块撕裂	38
3.4 实例	44
3.5 本章小结	47

## 第 2 篇 接地网故障诊断算法及比较

<b>第 4 章 接地网故障诊断基本算法</b>	48
4.1 增量故障诊断方程组	48
4.2 增广增量故障诊断方程组及其迭代最小二乘求解	50
4.3 接地网故障诊断的禁忌搜索算法	54
4.4 60 条支路的实验接地网的实验算例	56
4.5 本章小结	61
<b>第 5 章 基于蒙特卡罗方法的接地网故障诊断基本算法比较</b>	62
5.1 评价指标	62

5.2	指标计算	63
5.3	诊断准确性的比较	63
5.4	对初值的敏感性	65
5.5	各种接地网故障诊断算法的比较	65
5.6	本章小结	68

### 第3篇 接地网的可测性分析

<b>第6章</b>	<b>基于分层约简模型的接地网可测性分析</b>	69
6.1	测试方案的独立性和理想充分测试方案	69
6.2	基于分层约简模型的结构可测性分析	70
6.3	根据实际接地网支路电阻计算各层网支路电阻	75
6.4	元网络和元版块可测性判断的数值方法	77
6.5	结构可测性的分析流程	78
6.6	基于分层约简模型的状态可测性分析	79
6.7	实例	80
6.8	本章小结	85
<b>第7章</b>	<b>基于蒙特卡罗方法的接地网可测性分析</b>	86
7.1	基于蒙特卡罗方法的测试可测性分析	86
7.2	基于蒙特卡罗方法的干扰可测性分析	99
7.3	接地网4种可测性的关系	106
7.4	本章小结	107

### 第4篇 接地网故障诊断方法

<b>第8章</b>	<b>基于分层约简模型的接地网故障诊断</b>	108
8.1	基本步骤	108
8.2	各层网支路电阻的最优解	108
8.3	不确定支路电阻可能取值范围估计	109
8.4	不确定支路电阻可能取值范围概率分布估计	110
8.5	接地网故障诊断结果的信息熵估计	111
8.6	实例	113
8.7	本章小结	117
<b>第9章</b>	<b>基于分块模型的接地网撕裂故障诊断</b>	118
9.1	接地网分块故障诊断步骤	118
9.2	分块故障诊断中单元自明性的判断方法	118
9.3	节点分区本征支路电阻的线性求解方法	119
9.4	接地网电阻的逐层上溯求解过程	122
9.5	实例	125

9.6	本章小结 .....	129
<b>第 10 章</b>	<b>接地引下线腐蚀故障诊断 .....</b>	<b>130</b>
10.1	接地引下线对测试的影响 .....	130
10.2	基于接地网分层约简模型的引下线求解新方法 .....	131
10.3	基于分块诊断的接地引下线腐蚀故障诊断方法 .....	133
10.4	本章小结 .....	138

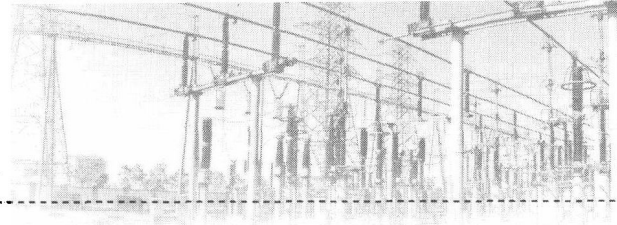
## 第 5 篇 接地网故障诊断测试方法研究

<b>第 11 章</b>	<b>最大电压定理及其推论的应用 .....</b>	<b>139</b>
11.1	接地网故障诊断对测试方案的基本要求 .....	139
11.2	最大电压定理及其推论 .....	140
11.3	一种实用的接地网腐蚀故障诊断测试方案 .....	142
11.4	算例与验证 .....	144
11.5	本章小结 .....	146
<b>第 12 章</b>	<b>测试方案自动生成与优化 .....</b>	<b>147</b>
12.1	接地网故障诊断测试方案的自动生成 .....	147
12.2	基于分块故障诊断法的测试方案优化 .....	152
12.3	实例 .....	157
12.4	本章小结 .....	161
<b>第 13 章</b>	<b>接地网故障监测线优化布置 .....</b>	<b>162</b>
13.1	引言 .....	162
13.2	基本原理 .....	162
13.3	方案的进一步优选 .....	166
13.4	面向接地网撕裂诊断的监测线优化布置 .....	171
13.5	补充可及节点追加测试法 .....	174
13.6	本章小结 .....	176
<b>第 14 章</b>	<b>接地网故障诊断自动测试系统 .....</b>	<b>177</b>
14.1	引言 .....	177
14.2	系统组成 .....	177
14.3	自动测试流程 .....	178
14.4	关键技术问题 .....	180
14.5	实例 .....	183
14.6	本章小结 .....	184

## 第 6 篇 其他相关问题

<b>第 15 章</b>	<b>可及节点偏移的影响分析及应用 .....</b>	<b>185</b>
15.1	可及节点位置偏移对接地网故障诊断的影响 .....	185

15.2	可及节点位置偏移影响的修正	189
15.3	几种故障诊断模式	190
15.4	实例	192
15.5	本章小结	195
<b>第 16 章</b>	<b>接地网故障诊断的分布式计算</b>	<b>196</b>
16.1	基本原理	196
16.2	分布式处理的实现	197
16.3	实例	200
16.4	本章小结	200
附录 A	60 条支路实验接地网 A 的支路电阻	202
附录 B	60 条支路实验接地网 B 的支路电阻	203
附录 C	38 条支路实验接地网拓扑图及各支路阻值	204
附录 D	采用节点分区法对 60 条支路实验接地网 B (不含引下线) 的测试数据	205
附录 E	实验室 60 条支路接地网 (含引下线) 分区节点优化测试方案及测试数据	208
附录 F	38 条支路实验接地网全网节点分区测试方案及测试数据	213
<b>参考文献</b>		<b>216</b>
<b>后记</b>		<b>219</b>



# 绪 论

接地网是确保电气设备和人身安全的重要设施，当接地网存在缺陷时，就会危及电气设备和人身安全。我国敷设接地网所用的材料主要为普通扁钢，因常年的土壤腐蚀和接地短路电流的电动力作用，使接地网水平均压导体或接地引下线出现不同程度的腐蚀，造成接地装置存在严重缺陷，就会引发泄流不畅、场区电位分布不均，造成接地网的可靠性降低甚至性能失效。因接地网腐蚀或发生断裂而引起的电力系统事故时有发生<sup>[1]</sup>，许多事故带来了巨大的经济损失<sup>[2]~[4]</sup>。

接地网故障诊断对于及时发现隐患并采取相应措施具有指导意义，目前已经取得了大量的研究成果。

接地网故障诊断的主要方法有基于电磁场理论分析法和基于电路理论的参数识别法两大类。

基于电磁场理论的接地网故障诊断的典型成果参见参考文献 [5~8]，在这些文献中论述了将电流源注入接地网中，通过分析地表磁场强度的不同分布状况来确定接地网故障位置的诊断方法，并研制了专用信号激励源和专用的检测诊断系统。

基于电路理论的接地网故障诊断的研究更加广泛，接地网导体在直流电流激励下，其分布电感和分布电容可以被忽略，因此理论上可以将接地网等效为纯电阻网络，将可以量测的接地引下线节点定义为可及节点，图 1 为接地网故障诊断示意图。接地网故障诊断的基本方法就是通过接地网在一些直流电流激励条件下的可及节点之间的电压测量值，根据接地网的拓扑结构和电阻设计值，应用适当的计算方法，求出接地网各条导体的实际电阻值。研究表明，支路电阻的增大可以反映其被腐蚀状况，因此可以根据实际值与设计值的比值大小来判断导体腐蚀或断裂情况。因此，诊断出了接地网各条支路的实际电阻值，也就得到了反映接地网腐蚀情况的诊断结果。

但是在实际故障诊断中，一方面由于受到可利用的可及节点数目及分布位置的限制，建

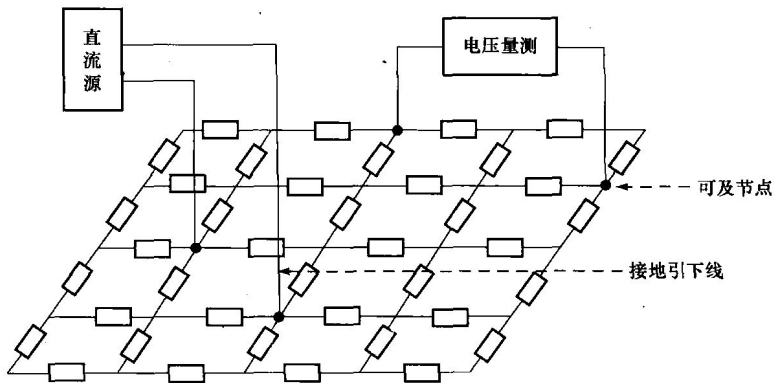


图 1 接地网故障诊断示意图

立的故障诊断方程往往是欠定的；另一方面由于较小的电压量测值易受到引下线电阻、干扰及量测误差的影响，所以接地网故障诊断的困难很大。

参考文献 [9] 和 [10] 利用节点电压方程和矩阵理论，推导出反映接地网支路导体电阻变化对可及节点电压影响的灵敏度方程，并求出各条支路电阻的最优解作为诊断结果。参考文献 [11] 采用灵敏度分析法建立了故障诊断方程，并将能量最低原理及优化技术引入接地网故障诊断方程的求解中。

参考文献 [12] 提出了一种通过比较接地网可及测试点故障前后的电压值进行接地网故障判定，并利用人工神经网络实现智能故障定位的方法。

参考文献 [13] 和 [14] 通过建立故障诊断方程，建议了一种“逐步确定”的思想：即先选取一些可及节点进行测试对故障进行初步判断；然后在初步判断出的故障点附近增加测试以判别故障的真伪，在新的诊断结果中，若故障情况不变则为真实故障，若先前故障消失则为伪故障，反复重复上述过程直至诊断结果不再变化为止。

参考文献 [15] 深入探讨了故障诊断过程中测量用的引下线节点对的选取原则，参考文献 [16] 将 C++ 与 MATLAB 相结合，编写了接地网诊断应用程序。

参考文献 [17] 采用 BFGS 变尺度法求解灵敏度矩阵故障诊断方程，并开发了接地网故障诊断软件系统。参考文献 [18] 提出了一种基于场路结合的不等电位模型的接地网故障诊断方法，对接地网腐蚀前后的电阻变化进行分析，来判断接地网的腐蚀状况。

参考文献 [19] 提出并证明了接地网发生故障的充分必要条件是在接地网施加恒定直流源激励时各个可及节点电压故障前后不等的结论。利用节点撕裂法在某些节点处拟撕裂，并将各个撕裂端口的电流值求和，以结果是否为零作为故障诊断的判定依据。

参考文献 [20] 根据测量接地网可及节点之间的电阻以及接地网的网络拓扑推导出接地网导体的实际电阻值，将其与原始理论值进行比较来判断导体的腐蚀情况。

参考文献 [21] 提出了采用微量法尝试通过人为细化测试电压与每次迭代中对应电压间的偏差，并以测试电压与诊断电压的逼近程度来中断迭代的方法进行故障诊断。

参考文献 [22] 在前人基础上通过附加约束的拟牛顿信赖域方法，对非线性的故障诊断方程进行求解。

参考文献 [23] 通过对不同断裂情况下的接地网模拟计算，总结出相应的导通电阻的变化规律，将计算数据与实际测试数据比较，确定接地网发生故障的位置。

参考文献 [24] 采用遗传算法进行非线性最小二乘优化求解灵敏度故障诊断方程。

参考文献 [25] 采用节点撕裂法将接地网撕裂成若干个子网络和一组自由支路，建立了反映子网络等效不定节点导纳与可及节点电压和撕裂点广义节点电流之间非线性关系的多目标优化模型，并提出了一种基于粒子群优化算法的故障诊断方法。

已经取得的这些成就对于接地网的性能评估和故障诊断作出了重要贡献，但是在接地网故障诊断实践中，还需要解决下列问题：

(1) 接地网的可测性评估。哪些支路可以得到确诊而哪些支路不能确诊？

(2) 接地网不确定支路取值范围估计。哪些不确定支路之间存在相互联系？这些不确定支路的故障风险有多大？

(3) 测试方案及其优化。怎样测试才能充分利用可及节点？怎样测试才是最优的？如何自动生成最优测试方案？

(4) 新建接地网测试极布置。怎样布置测试极才能使接地网的所有支路都可确诊? 怎样对测试极布置方案进行优化?

(5) 接地引下线测试。怎样对接地引下线的腐蚀情况进行测试与诊断?

(6) 可及节点位置偏移的影响。可及节点位置偏移对可测性和诊断结果有什么影响? 怎样进行修正?

(7) 提高计算效率。如何采用分布式计算缩短接地网故障诊断的计算时间?

(8) 自动测试系统。如何构建接地网故障诊断自动测试系统?

上述 8 个方面的问题正是本书作者及其领导的团队近年来所研究的主要领域, 也是本书将要系统论述的主要内容, 更加详细的信息可以参见参考文献 [26~67]。

## 接地网的模型化方法

### 第 1 章 接地网的分层约简模型

#### 1.1 接地网的拆分和约简

对于任意具有  $N$  个节点、 $B$  条支路的接地网，其中可及节点数目为  $N_T$  个 ( $N_T < N$ )，运用电路网络理论对其进行节点撕裂并逐层约简，就可以将一个接地网描述为实际接地网、元版块网、可及接地网和本征接地网 4 个层次。

**【定义 1.1】** 实际接地网：未进行约简的接地网。

**【定义 1.2】** 版块：若以一组可及节点为裂点对一个实际网络进行撕裂，得到一个相对独立的子网络，且该子网络与实际网络剩余部分的连接节点全部是这一组可及节点，则称该子网络为一个版块。

**【定义 1.3】** 准元版块：不可进一步分解为更多版块的版块。

**【定义 1.4】** 元版块：在保留准元版块中全部可及节点的前提下对其中的串、并联支路加以合并得到的结果称为元版块。

**【定义 1.5】** 元版块网：由各个元版块构成的网络。

**【定义 1.6】** 元网络：将一个元版块等效为只含可及节点间支路的等效网络。

**【定义 1.7】** 可及接地网：由各个元网络构成的网络。

**【定义 1.8】** 本征接地网：在保留全部可及节点的前提下，将可及接地网中的并联支路加以合并得到的任意两个可及节点间最多只有一条支路的网络。

**【定义 1.9】** 本征支路：本征接地网中的支路称为本征支路，其数量用  $B_T$  表示。

**【定义 1.10】** 单元：将准元版块、元版块和元网络分别称为实际接地网、元版块网络和可及接地网这 3 个层次上的单元。

根据上述定义，在接地网的分层约简模型中，准元版块是对接地网在可及节点处进行撕裂得到的最基本版块；元版块中不含任何串、并联支路；元网络中的节点都是可及节点，不含不可及节点，并且任意两个节点间最多只有一条支路；可及接地网中的节点都是可及节点，但可及接地网中含有并联支路；本征接地网中的节点都是可及节点，且本征接地网中任意两个节点间最多只有一条支路。

**【例 1-1】** 对于图 1-1 (a) 所示的具有 18 个节点 28 条支路的接地网，其中的电阻表示接地网的各条支路，实心黑点表示可及节点，其余为不可及节点。

以该实际接地网的可及节点为裂点进行撕裂将其分解成一组边界均为可及节点的版块，



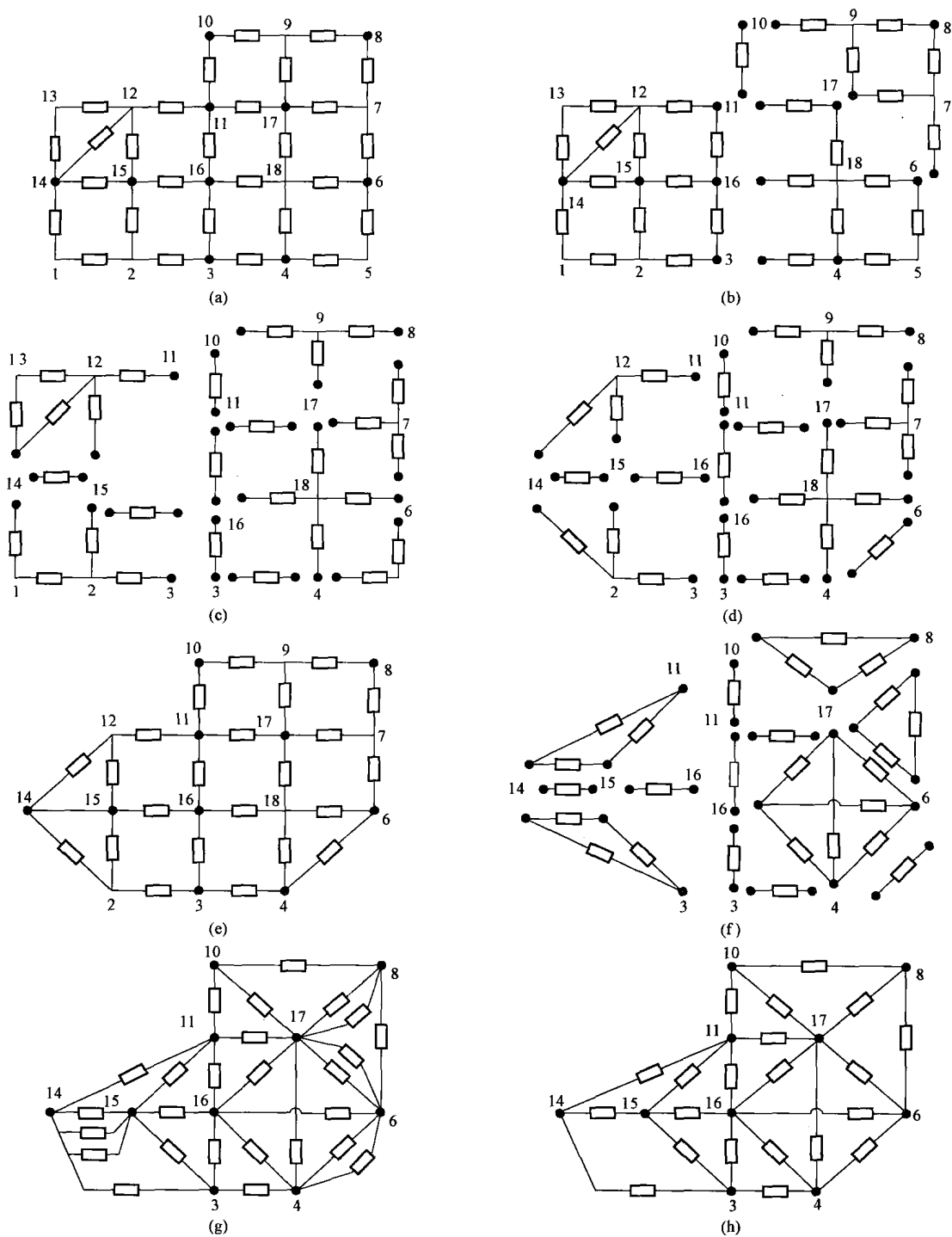


图 1-1 一个接地网的分层约简模型

(a) 实际接地网; (b) 实际接地网中的版块; (c) 实际接地网中的准元版块; (d) 元版块网中的元版块;  
 (e) 元版块网; (f) 可及接地网中的元网络; (g) 可及接地网; (h) 本征接地网