

接地设计 与工程

实践

JIEDI SHEJI YU GONGCHENG SHIJIAN

丛远新◎等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

接地设计与工程实践

丛远新 等编著



机械工业出版社

本书共分 16 章, 包括接地基本原理, 土壤电阻率勘测、分析, 接地电阻常用计算公式, 接地设计原则, 注意从整体直观上理解接地——形状篇、电阻率篇, 软件程序——掌握卓越的接地技术迅捷之路, 接地电阻值测量, 快速掌握卓越接地技术的黄金法则, 择取接地材料的黄金法则, 关于接地材料的选择参考, 发电厂、变电所接地, 输电线路杆塔接地, 通信接地, 工程实践及遇到的问题等, 当前接地建设的主要问题。

本书提供大量具有代表性的翔实的工程案例及配套的电脑程序, 还首次给出了接地模块的正确计算式及计算程序, 可帮助从业者能力尽快达到一些具有数十年工作经验的工程师的水平。

本书适合电力、建筑电气等领域从事接地设计的电气工程师和技术人员学习使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

接地设计与工程实践/丛远新等编著. —北京: 机械工业出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-111-46346-7

I. ①接… II. ①丛… III. ①接地设计 IV. ①TM02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 066526 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王 欢 责任编辑: 王 欢

责任校对: 纪 敬 封面设计: 陈 沛

责任印制: 李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 11.75 印张 · 228 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-46346-7

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社 服 务 中 心: (010)88361066 教 材 网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部: (010)68326294 机 工 官 网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010)88379649 机 工 官 博: <http://weibo.com/cmp1952>

读 者 购 书 热 线: (010)88379203 封 面 无 防 伪 标 均 为 盗 版

序 言

本书与其他接地书籍的最大不同之处是更接近工程的实际，通过大量的工程实例，结合理论知识，给出了接地理论、接地设计的精华。接地是一个系统工程，理论性很强，但是其最大的特点还是每一个接地网模型的计算都是不同的。这就要求接地工程人员除了要有较深的理论知识外，还要具备丰富的工程实践经验。不管是接地的设计人员、监理、施工单位或是业主，都能通过本书快速地学习到接地工程中常用的技术方法和理论计算，同时还能避免一些设计方面常见的错误，辨识施工方面常见的“内幕”、“黑手”，从而能较快地提高自己的接地理论水平和实践经验。对推进国内接地领域的进步来说，这是一件很好的事情。

另一方面，本书还实际地指出了长期以来国内接地领域上的弊端，在专业的设计人员眼里看来，某些产品是“伪科学”的，但是行业的技术能力较低以及“利”字当头的影 响，造就了某些产品大量不科学地应用。既然是“伪科学”，就终究会有撕下面具的一天。只有更多工程人员掌握了接地理论知识，才能够及时辨别这类花样不断翻新的“新技术”的真实面目。

对于一个接地装置来说，接地电阻主要由以下4部分组成：设备与接地引下线的接触电阻；接地引下线及接地网的导体电阻；接地网与地（土壤）的接触电阻；土壤电阻率。

要降低接地电阻，不管采用什么样的降阻方案或者理论计算，都要从上述4处着手才能实现。

1. 设备与接地引下线的接触电阻

导体都是有电阻的，两个导体连接在一起，还会增加一个接触电阻。所以，我们在做设备的接地设计和测量时，就必须从这源头开始解决第一个接地电阻。铜材质的接地体和铝材质的接地体的连接不使用过渡片、设备运行后不注意对接地端子的维护、接地端子锈腐严重、测量接地电阻时夹头与地网接触不良、接触点生锈等，都是常见的不注意处理设备与接地引下线的接触电阻的错误。

2. 接地引下线及接地网的导体电阻

前面说，导体是有电阻的，因此引下线和地网的导体电阻，也是接地电阻的一部分，但是，这一部分影响却非常小。曾经有个变电站接地电阻比较难降下来，马上有人说为什么用扁钢做接地体，用铜下就马上降下来了，然后把元素周期表背一通，显然铜导体的电阻率比铁的电阻率低很多。对于高压输电来说，导体电阻率影响确实非常大，但是对于接地来说，影响微乎其微。我们可以做个简单的计算：铜的导体电

阻率为 $\rho = 0.0172\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 、铁的为 $\rho = 0.1\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，导体电阻计算公式 $R = \rho L/S$ ，假设接地入地的导体长度为 100m，截面为 $5\text{mm} \times 50\text{mm}$ ，计算得到铜接地网的电阻为 0.00688Ω ，铁的电阻为 0.04Ω 。由此可看出接地体的这两种材质对接地电阻是有影响的，但是在工程实践上这影响几乎可以忽略。

3. 接地网与地（土壤）的接触电阻

导体和导体的连接都存在接触电阻，导体与地（土壤）的接触电阻更加不可小视。传统的接地网施工，施工单位挖好接地沟后，敷设接地扁钢，然后回填之前挖出来的泥土，回填土的材质与密实度，成为接触电阻的关键。我多次对变电站的地网进行开挖检查，发现所有的接地网回填都或多或少的存在下列问题：

- 1) 回填土未夯实，土壤与接扁钢接触不紧密。
- 2) 回填土为块状土，回填后与扁钢接触空隙大。
- 3) 回填土包含大量建筑垃圾、石块、泡沫、塑料袋、草皮等杂物。
- 4) 地网埋深不足。
- 5) 焊接点防腐措施不到位，焊接点腐蚀。
- 6) 如包覆降阻剂，还普遍存在降阻剂厚度不均匀，通常扁钢下部无降阻剂或降阻剂非常薄，甚至扁钢下部为空洞，从而造成严重腐蚀；还有降阻剂材料非常劣质，呈干、粉、块状等，吸水性差，不但起不到降阻作用，反而进一步增加接地电阻。

针对上述情况，其实解决的办法也很容易，主要办法如下：

1) 确保扁钢的埋深，规范要求埋深为不低于 0.6m。但是根据实际经验，0.6m 深度仍然容易受到气候的影响，在旱季土壤含水率易受到变化，所以建议埋深为 0.8m，这样也不会过大增加施工难度，但是接地网电阻值较为稳定。

2) 确保回填土为电阻率较低的细实土，如果实在有困难，可以考虑回填与扁钢直接接触的 30cm 左右厚度的细实土。但不论如何，建筑垃圾、石块等杂物不能作为回填物。

3) 加强对焊点的防腐措施。

4) 加强回填土的夯实，可采用手持的小型夯土机对回填土夯实。对于土壤的夯实，还可以采用这样的方法，在三通一平阶段，回填至站址标高负 1.0m 时开始敷设接地扁钢，然后通过大型压路机压实（压实系数大于 0.94）至设计标高。采用这种做法的地网施工，可以达到很好的降阻效果，同时也简化了施工工序，比传统的三通一平后开挖接地沟、敷设扁钢再回填的做法要更容易施工。

4. 土壤电阻率

土壤电阻率是大电流入地的最后一关，也是最难解决的问题。土壤电阻率是自然存在的，也是难以改变的，因此最重要的还是从源头做起。在工程选址初期就尽量避免选在高土壤电阻率地区建变电站。如由于各种原因必须在高土壤电阻率地区建站的话，则必须扎实做好土壤电阻率的测量工作，特别是深层的土壤电阻率及季节对土

壤电阻率的影响。只有测量准确了，才能准确做出地网设计方案，框定工程投资。

接地网的设计和施工理论性强，同时又是隐蔽工程，也容易进行造假。例如，在测量接地电阻的前一天浇盐水、偷敷回流线这些都是某些施工单位常用的作弊手段。深层土壤电阻率测试较难，某些设计勘察单位对土壤电阻率的测量容易敷衍了事。某些监理单位监理不到位，放任施工单位粗放施工。某些业主技术水平不高，容易被一些虚假的技术手段蒙蔽。以上这些，都是这个行业存在的问题。因此，推动接地行业的进步需要多方的努力，才能让整个行业水平有真正的提高。

梁祺

2014年6月

前 言

尽管市面上有关接地技术的书籍不少，但基本上以理论为主，本书则以工程应用为主，可以很好地满足一线工程技术及设计人员的实际需求。

本书免费提供视在电阻率分析软件程序，使得绝大多数工程、设计人员具备了一次性精确设计变电站、发电厂等大型接地装置的潜力，这通常是需要花费数万购进专门的软件包才能实现的。

一般的接地公式只能对付简单、规则的接地极，可若接地极形状稍微复杂一点，无现成公式可用，则要专门推导公式来计算，过程将会相当艰深、复杂，甚至不可能实现。因此，很多从业者从事了一辈子的接地工作可能依然不甚了解。而本书结合国人偏好的整体思维观念，以寥寥几个常见公式，构建了一套非常简约的理论体系，使得普通工程、设计人员能轻松掌握应付绝大多数接地难题的技能。

目前，制约当前设计、工程人员接地水平的并非智力因素，而是错误的意识，为此特地引入了奥卡姆剃刀等先进的科学理念体系，帮助读者快速掌握卓越的实用接地技能。

本书提供很多具有代表性的内容、翔实的工程案例及配套的电脑程序，还首次给出了接地模块的正确计算式及计算程序，可帮助从业者尽快达到一些具有十数年工作经验的工程师的水平。

通过认真阅、学习、应用本书的内容，大多数一线工程技术人员可以掌握真正的实用接地技术。

本书并非按照高校教程的模式编写，可若参考本书，无疑将极大提升相关专业学生适应现实的能力。

参加本书参写工作的还有梁祺、姚治君、杨宇、胡连锋、宗树松、张洪志、熊延瑞、任欢超、白晶龙、王晓娜、赵大海、崔丽波、常鹏宇、杨霖。

丛远新
2014年5月

温馨提示

本书提供作者利用 Excel 编制的接地电阻计算程序，以及使用说明视频。读者可在科学网作者的个人博客搜索下载。

读者也可在机械工业出版社官方网站 (<http://www.cmpbook.com>) 免费下载，具体操作如下：

(1) 进入网址 <http://www.cmpbook.com>，单击“服务中心”，注册成为会员（免费）。

(2) 在左侧“图书查询”处搜索“接地设计与工程实践”，单击作者为丛远新的本书链接。

(3) 在本书页面，单击图书封面右侧“相关下载”，即可免费下载相关 Excel 计算程序和使用说明视频。

也可从作者科学网博客下载：

<http://blog.sciencenet.cn/blog-324673-780757.html>

读者推荐

全书语言深入浅出，很好地把理论和实际工程应用结合了起来。在这一点上，与国内大部分的文献侧重讨论理论或原理，形成了鲜明对比。我们知道，理论和实际永远存在着一定的偏差。尤其是在接地工程降阻领域，这种情况也很严重。如何将正确的理论与实际工程应用结合起来？如何在接地材料的选择上做出正确的判断？我想这本书给出了明确的答案。这本书不仅对设计单位有很好的指导作用，同时也能帮助用户更好地理解及判断设计师的设计意图和选择，当然也会引导生产厂家及相关行业从业人员深入思考产品和应用方案的可持续性、合理性。

——上海艾力高 姚治君

目 录

序言

前言

温馨提示

第 1 章 接地基本原理	1
1.1 常用配电用电设备的接地	1
1.1.1 TT 接地系统	2
1.1.2 TN—S 接地系统	4
1.2 人身安全接地	6
1.2.1 总则——特殊设备	6
1.2.2 总则——特殊的固定设备	7
1.2.3 总则——通过线和插头连接的设备	7
1.2.4 总论	8
1.3 发电厂、变电所接地	8
1.3.1 三峡水利枢纽工程接地	8
1.4 防雷保护——接地的延伸	10
第 2 章 土壤电阻率勘测、分析	12
2.1 单极法	12
2.2 温纳 (winner) 四极法	13
2.3 视在电阻率	14
2.3.1 两层土壤视在电阻率	14
2.3.2 如何解析两层土壤视在电阻率	16
2.4 接地地网设计中电阻率分层解析和接地电阻值计算的研究	17
2.4.1 概述	18
2.4.2 秦皇岛某 220kV 变电站工程案例	18
2.4.3 秦皇岛某 220kV 变电站工程案例的进一步分析	21
2.4.4 某勘测设计院的改进措施及启发意义	22
2.4.5 结论	23
2.5 某 220kV 变电站土壤电阻率测量说明书	23
2.5.1 测量概况	23
2.5.2 测量方法	23
2.5.3 资料解释	24
第 3 章 接地电阻常用计算公式	26

3.1 半球、圆盘工频接地电阻公式	26
3.1.1 半球	26
3.1.2 圆盘	26
3.2 常用人工接地极工频接地电阻公式	26
3.2.1 垂直接地极的接地电阻计算	26
3.2.2 不同形状水平接地极的接地电阻计算	27
3.3 架空线路杆塔接地电阻的计算	28
3.4 网状接地极接地电阻计算式	28
3.4.1 水平接地极为主边缘闭合的复合接地极（接地网）的接地电阻——精确计算	28
3.4.2 水平接地极为主边缘闭合的复合接地极（接地网）的接地电阻——简化计算	29
3.5 变电站接地电阻的计算	30
3.5.1 简化计算	30
3.5.2 复合地网接地电阻值的计算	31
3.6 两层土壤的接地电阻计算公式	32
3.6.1 水平地网	32
3.6.2 垂直接地极	34
3.7 接地模块接地电阻计算式	34
第4章 接地设计原则	35
4.1 系统设计原则	35
4.2 垂直接地极	39
4.2.1 垂直接地极对单根水平接地极接地电阻的影响	40
4.2.2 垂直接地极对大中型地网（网状接地极）接地电阻的影响（均匀土壤）	42
4.2.3 如何应用垂直接地极高效降阻（考虑土壤电阻率均匀的情况）	44
第5章 注意从整体直观上理解接地——形状篇	46
5.1 整体直观能力于接地价值意义	47
5.2 最佳经济、高效接地极形式	49
5.2.1 启示一 避免低效的模块状接地	51
5.2.2 启示二 有关接地模块的大致研究	53
5.2.3 启示三 避免半球形立体地网接地	60
5.3 垂直接地极	62
5.3.1 启示——离子接地极	62
5.3.2 离子接地极问题	63
5.3.3 离子接地极对大型地网的影响	63
5.3.4 改善多大区域土壤才能对大型地网产生较大效果	65
5.4 半球	66
5.5 闭合地网——平板	67
5.6 降阻剂	68
5.7 实践一	70

5.8 实践二	70
第6章 注意从整体直观上理解接地——电阻率篇	71
第7章 软件程序——掌握卓越的接地技术迅捷之路	73
第8章 接地电阻值测量	75
8.1 三极法	75
8.2 输电线路杆塔接地电阻测量	77
8.3 DL/T 475—2006 取得的进步以及当下接地电阻测量的普遍问题	78
第9章 快速掌握卓越接地技术的黄金法则	80
9.1 奥卡姆剃刀	80
9.2 奥卡姆剃刀原则在接地方面的应用	81
9.2.1 剃掉最易使人陷入无限愚蠢的复杂理论	82
9.2.2 剃掉困难、集中精力发展简易的大智慧	83
第10章 择取接地材料的黄金法则	84
10.1 降阻剂	84
10.2 纳米碳防腐导电涂料	85
10.2.1 涂刷完后再运去现场施工	86
10.2.2 在接地沟中铺设好后再涂刷	87
10.2.3 小结	88
10.3 阴极保护	88
10.3.1 阴极保护简介	88
10.3.2 接地网阴极保护现状	89
10.3.3 为何接地网阴极保护设计如此艰难	90
10.4 铜覆钢(铜包钢、铸铜钢、镀铜钢)	90
10.4.1 冷拉铜覆钢(铜包钢)	91
10.4.2 连铸铜覆钢(铸铜钢、铜铸钢)	91
10.4.3 电镀铜覆钢(镀铜钢、铜镀钢)	93
第11章 关于接地材料的选择参考	96
11.1 交流电气装置的截面积选择	96
11.2 防雷接地装置的材料和截面积选择	97
第12章 发电厂、变电所接地	100
12.1 常规地网	100
12.2 长垂直接地极	101
12.2.1 某110kV变电站接地改造工程方案	102
12.3 无开挖深埋辐射形接地极接地技术	105
12.3.1 无开挖论深埋辐射形接地技术在某110kV变电站中的应用	105
12.4 解析当前变电站接地的几点重要缺陷和隐患	108
12.4.1 忽视前期勘测或者勘测、分析不到位,造成重大的长远经济损失	109
12.4.2 忽视腐蚀,导致重大损失	110

12.4.3	忽视载流点的焊接质量, 直接导致高达 24% 的直接损失	111
12.4.4	网内测量, 导致重大隐患	112
12.4.5	忽视局部跨步电压、接触电压, 导致严重的安全隐患	112
12.4.6	总结	113
12.5	某 120kV 变电站接地方案及点评	113
12.5.1	第一次常规降阻	113
12.5.2	第二次深井接地降阻	116
12.5.3	第三次深埋辐射形接地极降阻	118
12.5.4	此 120kV 变电站接地方案计算说明	119
12.5.5	此 120kV 变电站接地方案综合总评	120
第 13 章	输电线路杆塔接地	121
13.1	接地电阻要求	121
13.1.1	GB 50169—2006《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》	121
13.1.2	GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》	122
13.2	方案设计计算	122
13.3	某双回 500kV 输电线路接地装置及其点评	124
13.4	某 500kV 改迁输电线路接地装置及其点评	127
13.5	某 220kV 送电线路接地装置及其点评	129
13.6	某 1000kV 特高压交流试验示范工程	133
13.7	某 ± 800 kV 特高压直流输电线路设计点评	135
13.7.1	电阻率小于 $2000\Omega \cdot m$	135
13.7.2	电阻率为 $2000 \sim 6000\Omega \cdot m$	137
13.7.3	综合点评	139
第 14 章	通信接地	142
14.1	引言	142
14.2	关于地网要求	143
14.3	关于接地电阻含糊要求	145
14.4	雷害事故与接地电阻值几无关系的误区之分析	145
第 15 章	工程实践及遇到的问题	152
15.1	综合接地一(网状接地)	152
15.1.1	大致情况	152
15.1.2	解析	153
15.2	综合接地二(辐射形接地)	154
15.3	综合接地之小结	154
15.4	名校设总、总工的水平常“不及”中学学历的工程师么?	155
15.4.1	名校设总与中学学历工程师的典型案例 (1000kV 特高压输变电线路面临的重要隐患)	158
15.5	复合接地体	159

15.6 降阻剂	160
15.6.1 输变电路	160
15.6.2 变电站	161
15.6.3 降阻剂发展趋势	161
15.7 接地模块	161
15.7.1 接地模块的流行	161
15.7.2 接地模块的发展趋势	162
15.8 离子接地棒	163
15.9 对其他问题的探讨	164
15.10 最佳性价比接地方案	168
15.11 阴极保护、纳米碳防腐导电涂料	169
第 16 章 当前接地建设的主要问题	171
16.1 忽视了最为重要的人身安全接地	171
16.2 将接地材料与降阻效果混为一谈	172
16.3 急功近利	173
16.4 总结	173
参考文献	176

第 1 章 接地基本原理

关于接地的定义，不同的规范不尽相同，一般认为，接地是电气设备的可导部分与地（或可用来代替地的导体）的电气连接。我国行业标准 DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》对接地的定义如下：

接地——将电力系统或建筑物中电气装置、设施的某些导电部分，经接地线连接至接地极。

其中，接地极、接地线的定义分别如下：

- 接地极——埋入地中并直接与大地接触的的金属导体，称为接地极。兼作接地极用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建（构）筑物的基础、金属管道和设备等称为自然接地极。

- 接地线——电气装置、设施的接地端子与接地极连接用的金属导电部分。

但凡用电，就得有电位差（譬如，没有 220V 的电位差，就不可能有我们的日常用电），可若电位差因故障出现在不该出现的地方，则会导致危险甚至致命事故（譬如电热水器漏电导致电位差转移至人体上，则会造成致命的后果，事实上这样的事故年年都有报道）。然而，故障却是无法避免的，无论电气工程师作多大的努力，都无法绝对避免，为此，必须有合理的接地系统以最快的方式消除这些可能产生的故障电流，为此，就得实现最低的接地电阻值。

DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》中按照用途将接地分为如下 4 类：

- 1) 工作（系统）接地——在电力系统电气装置中，为运行需要所设的接地（如中性点直接接地或经其他装置接地等）。

- 2) 保护接地——电气装置的金属外壳、配电装置的构架和线路杆塔等，由于绝缘损坏有可能带电，为防止其危及人身和设备的安全而设的接地。

- 3) 雷电保护接地——为雷电保护装置（避雷针、避雷线和避雷器等）向大地泄放雷电流而设的接地。

- 4) 防静电接地——为防止静电对易燃油、天然气贮罐和管道等的危险作用而设的接地。

下面结合几种最常见接地类型展开讨论：

1.1 常用配用电设备的接地

接地最重要的一大作用就是保护人身安全，这非常必要，然而却常常被忽视。2005 年，国务院多个部门联合发布的《2005 年中国家庭用电环境调查报告》

显示：在全国 20 多个城市 2386 户被调查家庭中，1267 户家庭无地线或接地不可靠，占被调查总数的 53%（如果算上农村，那就远不止 53% 这个比率了）。

这就是说，绝大多数家庭缺少最后一道用电安全保险措施，一旦电气设备出现了故障，金属壳带电，将会极大地增加用户触电致伤、致死的风险。事实上，这样的事故年年在发生：

2012 年 5 月，南宁一位女大学生在 KTV 唱歌时，因麦克风（标准名称为传声器）漏电而触电身亡；

2012 年 1 月，三亚一位 14 岁的中学生在 KTV 唱歌时，同样手握麦克风触电身亡；

2011 年 6 月，在郑州出差的李某用热水器洗澡时触电身亡；

2010 年 6 月，南京仙林大学城某高校一位大二男生在宿舍洗澡时，因电热水器漏电，导致触电后摔倒，经抢救无效身亡；

2010 年 10 月，观澜大水坑溢佳工业园宿舍楼一位女子洗澡时触电身亡。

……

关于电器漏电致人死亡的事故屡见报道，尤以电热水器为最，百度搜索“电热水器触电身亡”，可瞬间显现出 46900 条信息。那么多鲜活的生命一下子就消失了，令人扼腕，那么，有效接地又是如何降低上述触电风险呢？

一般地，家庭用户通过低压（380V/220V）系统配电。低压系统的接地形式一般分为 TN、TT、IT 三种，而 TN 系统又分为 TN—C、TN—S、TN—C—S 三种（DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》、GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》等有详细讨论）。下面将结合最常见的两种基础形式展开讨论。

1.1.1 TT 接地系统

TT 接地系统有一个直接接地点，电气装置的外露导电部分应接至独立于电源系统接地的接地极上，如图 1-1 所示。

一旦外露导电部分因故障带电，人体触及后，良好的接地装置可大大减少通过人体的电流，降低触电的危害。

由图 1-2 所示可知，若无接地保护，则电气设备因绝缘损坏等事故而致使外露导电部分带电时，其上将长期存在电压，一旦有人员触及，电流将会流经人体。其值为

$$I_b = \frac{U}{R_b + R_0}$$

加在人体上的电压值为

$$U_b = \frac{R_b}{R_b + R_0} U$$

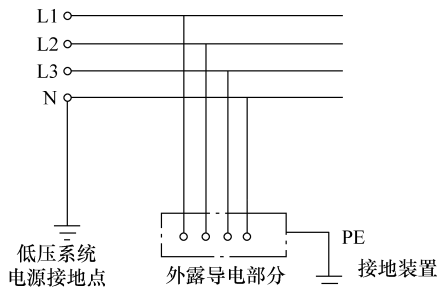


图 1-1 TT 接地系统

式中 U ——电源电压，一般为 220V；

R_0 ——电源中性点的工作接地电阻，一般为 4Ω ；

R_b ——人体以及人脚与地面间的接触电阻，一般为 1500Ω 。代入可计算得流经人体电流为

$$I_b = 0.146\text{A}$$

加在人体上电压为

$$U_b = 219.4\text{V}$$

接近电源电压，严重危及人体安全。

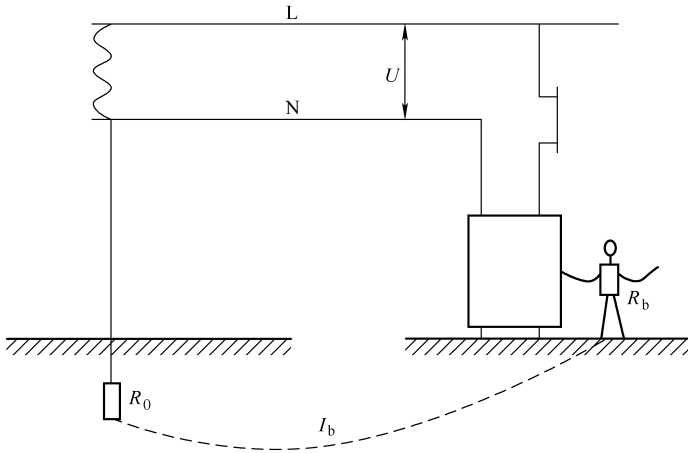


图 1-2 无接地保护触电示意图

如有接地保护，其接地电阻为 R_d ，如图 1-3 所示。

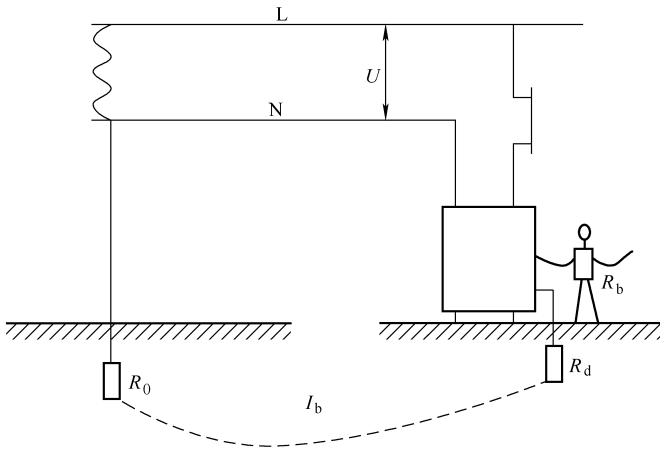


图 1-3 接地保护下触电示意图

简化示意电路图如图 1-4 所示。

此时加在人体上的电压为

$$U_b = \frac{\frac{R_b R_d}{R_b + R_d}}{R_0 + \frac{R_b R_d}{R_b + R_d}} U \approx \frac{R_d}{R_0 + R_d} U$$

取 $R_0 = 4\Omega$, $R_d = 1\Omega$, 则此时加在人体上的电压为

$$U_b \approx \frac{1}{5} U = 44V$$

安全系数将会得到大大提高。

事实上, GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》有如下要求:

TT 接地系统中电气装置外露导电部分应设保护接地的接地装置, 其接地电阻与外露可导电部分的保护导体电阻之和应符合下式的要求:

$$R_A \leq 50/I_a$$

式中 R_A ——季节变化时接地装置的最大接地电阻与外露导电部分的保护导体电阻之和 (Ω);

I_a ——保护电器自动动作的动作电流 (A)。当保护电器为剩余电流保护时, I_a 为额定剩余电流动作电流 $I_{\Delta n}$ 。

换言之, 符合 GB/T 50065—2011 规范的 TT 接地系统可以将故障时设备外露导电部分的对地电位钳制在 50V 以下, 极大地降低了触电风险。不过, 这通常需要较低的接地电阻值。如工作接地电阻值 $R_0 = 4\Omega$, 则保护接地电阻值需降至

$$R_d = (4 \times \frac{50}{220 - 50}) \Omega \approx 1.2\Omega$$

这需要较高的投资, 高电阻率区很难满足相应要求。另外, 如果故障产生的对地电位低于 50V, 保护设备则可能不动作, 对地电位将长期存在, 无法彻底消除隐患。为此, 就得采取更加灵活实用的 TN 接地系统。

1.1.2 TN—S 接地系统

TN 接地系统电源处有一点直接接地, 装置的外露导电部分用保护线与该点连接, 一般分 TN—S、TN—C—S、TN—C 三种基本类型。下面以 TN—S 接地系统为例展开讨论。

整个 TN—S 接地系统的中性线与保护线是分开的, 如图 1-5 所示。

一个基本的事实就是电总是流回电源的。TT 型接地装置可以使得故障电流更快地通过接地体、大地流回电源, 从而使得流经人体的电流大大减少; 而 TN 型接地装置则可使得故障电流直接通过保护线 (图 1-5 中的 PE 线) 流回电源, 此时相

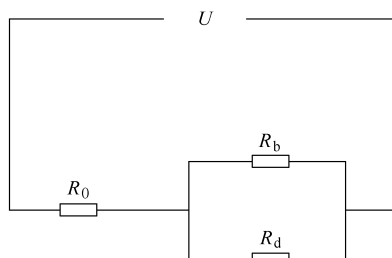


图 1-4 接地保护触电简化示意图