

现代石油井场电气安全

谭刚强 王 豫 李顺平 编著

电子科技大学出版社

绪 论

石油井场实际上包括石油及天然气钻井、试修井场，简称为石油井场。

石油井场电气安全技术规范，包括防爆安全、系统接地及电气安全、等电位联结、浪涌抑制保护、供电接口的规范以及电气设备运行监控六个方面的内容。

电气安全标准多、规范多，很多石油电气装备设计者采用不同的标准，给石油井场装备电气安全的规范化带来一定困难。因此，从实际出发，采用国家标准《系统接地技术及安全技术要求》为石油井场电气安全规范的基础。

我国的防爆规范主要源自美国标准和欧洲标准。国外的 IEC 标准，包括了防爆区域划分和防爆设备的各种标准，但是 IEC 标准的防爆区域划分是一个通用标准，并不是针对石油井场防爆区域划分而制定。而美国 API 标准则是针对石油井场制定的防爆区域划分标准，它根据爆炸性危险气体产生的可能性，按照距爆炸性气体可能产生部位的距离，分为一级 1 类防爆区域和一级 2 类防爆区域。

2005 年以前，中国石油天然气集团公司（以后简称中石油）借鉴 IEC 的防爆区域划分标准，将石油井场防爆区域划分为 0 区、1 区和 2 区。很多油田也相应地按照中石油的方法制定了相应的石油井场防爆区域划分的标准。2005 年以后，出于多种原因，国家经济贸易委员会在石油井场防爆区域划分上，引入 API RP500B 标准，直接采用 API 的石油井场防爆区域划分标准。但是很多油田并没有修改原有的石油井场的防爆区域划分标准，造成了一些混乱。

等电位联结则更加混乱，并且在石油井场方面，并没有适用石油井场使用的等电位联结标准。一般而言，总等电位联结是将总等电位箱内的等电位母排与现场主要金属构件和电气设备的保护接地进行联结，这种连接方式不适用于经常搬迁的石油钻井试井场，部分油田是将总等电位母排“延伸”为一根总等电位母线，但是没有从理论上论证总等电位母线的合理性。

浪涌抑制保护方面，概念也各不相同，一些专家倾向于防雷，而另一些专家倾向浪涌抑制保护。理论上的不同，造成石油井场浪涌保护设备较混杂，甚至无法实施有效的浪涌抑制保护。

石油井场的供电接口更是五花八门，各不相同，目前也没有统一的规范。

电气运行监控主要是对石油井场电气系统的运行情况进行检查，并做好记录。油田一般侧重于重要电机、电控等设备，而没有对供电系统保护的基础进行监控。

综上所述，在石油井场电气安全规范方面，由于标准种类繁多，石油井场没有统一的电气安全规范和标准，造成厂家设计标准不统一和油田使用标准不统一，造成“防爆失效、维护不良、凑合使用”的现象严重。国家发展和改革委员会的井场防火安全标准中，制定出距离井口 30m 以内为电气防爆区的标准，不必要地提高了钻井装备的成本。这个标准，在近年内衍生出许多相关标准，例如石油钻机电控系统、配供电装置系统、综合录井系统、钻机参数仪甚至井场生活区等都必须执行这个标准以及衍生标准，否则很难通过检查。

井场发电房与油罐区之间，发电房与井口之间的安全距离，也没有科学依据，却被人为地规定井场发电房和油罐区距离井口 30m 以上，发电房与油罐区之间距离 20m 以上。采用美国标准的国外钻机，将柴油发电机组回油罐放在发电房内，而我们国内的钻机，却要把柴油发电机的“回油罐”做成整体放在距离发电机组 20m 以外的地方。可见标准的不同，造成设计方案的不同。

有些防爆厂家未按照国家防爆标准，任意改变防爆箱的结构、尺寸甚至形状，造成防爆失效，给石油井场造成严重的安全隐患。

相当数量的石油钻井队，由于现场人员缺乏必要的电气安全和防爆知识，造成很多安全隐患。

钻井队应该消除存在的电气安全隐患，普及电气保护和电气防爆知识，因此我们编辑出版了一套“石油井场常见电气安全隐患挂图”，同时编辑出版了本书。根据石油井场电气安全的特点，制定统一的石油井场电气安全规范，并争取成为石油化工行业标准，从根本上统一石油电气安全规范，解决长期困扰厂家设计者、安全检查者、设备管理者和现场使用者的电气安全规范问题。本书主要介绍与石油井场有关的电气安全规范以及中国石油川庆钻探工程有限公司的石油井场电气规范，以现场中存在的安全隐患为例，进行说明，最后说明现场安全检查的路线、方法和整改措施。然后我们再介绍石油井场主要电气设备原理及安全操作事项。

第一篇 石油井场安全基础

第一章 电气安全防护

第一节 电气安全防护标准体系

电气设备是否安全有两种方法来衡量，一是安全事故，二是标准。消除一种事故不等于不发生另一些事故，而执行安全技术标准是保证电气设备安全的最好办法。

我国电工电子技术领域主要采用国际标准，特别是 IEC 标准，如电气装置类标准包括有：IEC/TC44（机械安全—电工方面）、IEC/TC64（电气装置和电击防护）、IEC/TC71（户外严酷条件下电气装置），涉及基础安全标准方面包括：IEC/TC28（绝缘配合）、IEC/TC64（电气装置和电击防护）、IEC/TC70（外壳防护等级）、IEC/TC73（短路电流）、IEC/TC77（电磁兼容）、IEC/TC81（雷电防护）。

我国对 IEC/TC 类标准大部分得到了采用，其中 IEC/TC64（电气装置和电击防护）以对电气装置的设计、安全防护、设备选择、安装、检验要求具有典型性和权威性。其他的基础安全标准分散在各个 IEC/TC 中，分别从不同的方面规定安全要求，如外壳防护、绝缘配合等，这些基础安全标准适用于所有的电气装置和电气设备。

本篇的目的，是介绍石油井场电气装置和电气设备的典型设计、设备选择、安全防护、安装和检验的要求，将这些基础安全要求加以整理集中，以利于石油电气设计人员、现场维护人员以及电气设备管理人员使用。

第二节 IEC 和电气装置、电气设备的概念

一、国际电工委员会（IEC）

IEC 是国际电工委员会的英文缩写，是世界上成立最早的电工技术领域的非政府性国际标准化机构，成立于 1906 年 6 月，1947 年曾并入国际标准化组织（英文缩写为 ISO），1976 年又从 ISO 中分立出来。

IEC 通过出版包括国际标准在内的出版物实现在电工电子学领域的标准化及有关事物方面的国际合作。IEC 还是联合国社会经济理事会的甲级咨询机构。目前 IEC 有 63 个成员国，中国于 1957 年 8 月加入 IEC，并于 1980 年进入 IEC 执行委员会。

IEC 有三个认证体系，电子元器件质量评定体系（IECQ）、电气设备检测与认证体系（IECEE）和防爆电气安全认证体系（IECEX）。

二、电气装置、电气设备的概念

在电工电子技术领域中，电气装置和电气设备项目是两个不同层次的术语和概念。IEC 有关标准定义如下：

电气装置（electrical installation）：是指用以实现特定的一个或多个目的，且特性相互匹配的相关电气设备的组合。

电气设备（electric equipment）：是指用于发电、变电、输电、配电或利用电能的诸如电机、变压器、开关和控制设备、测量仪器、保护器件、布线系统和用电设备的设备。

从电气设备定义可以看出，石油井场电气设备是指与发电、变电、输电、配电和用电相关的具有某些功能的产品，如柴油发电机组、变压器、井电、电动机、磁力启动器、钻井参数仪、电力布线以及用电的设备等。

电气装置又称为电气设施、成套电气设备。根据 IEC 标准的定义, 电气装置具有三层含义: 它是相关电气设备的组合; 它们为实现一个或多个特定目的而组合; 这些设备的特性相互匹配。石油井场的井电是 MCC 房、总开关柜、降压启动柜、馈电柜、电缆布线、照明设备、电缆槽等相关电气设备的组合, 因此井电的全称为石油及天然气钻机配供电装置, 这个定义是准确的。我国习惯把发电机及控制系统、电动机直流或交流驱动系统等合称为电传动系统, 采用“系统”这个名词, 与“装置”相当。

三、IEC/TC64

IEC/TC64 即国际电工委员会第 64 技术委员会, 其专业名称为“电气装置和电击防护(Electrical Installations And Protection Against Electric Shock)”。

IEC/TC64 负责组织制定和修订的标准分为两类, 第 1 类是 IEC60364《建筑物电气装置》系列标准, 它规定的安全防护原则、设备的选择和安装原则、检查和测试原则, 对所有电气装置都具有参考或指导作用。第 2 类是电击防护基本安全要求标准。IEC/TC64 承担了有关电气设备、装置和系统的电击防护基础安全标准的主导作用, 由它负责制定和修订的标准如下:

IEC 60364-4-41《建筑物电气装置 4-41: 安全防护—电击防护》;

IEC 60364-5-54《建筑物电气装置 5-54: 电气设备的选择和安装—接地配置、保护导体和保护联结导体》

IEC 60449: 2001《电击防护 装置和设备的通用部分》。

第三节 IEC 60364 系列标准和 IEC 有关电气装置 和安全防护标准的采用

一、IEC 60364 系列标准简介

IEC 60364 系列标准见表 1-1。

表 1-1 IEC 60364 系列标准在我国等同采用对应表

IEC 60364 系列标准的编号和名称	国家标准
IEC 60364-1: 1992 建筑物电气装置 第 1 部分: 范围、目的和基本原则	GB 16895.1—1997
IEC 60364-4-41: 2001 建筑物电气装置 第 4 部分: 安全防护 第 41 章: 电击防护	GB 16895.21—2004
IEC 60364-4-42: 2001 建筑物电气装置 第 4 部分: 第 42 章: 热效应防护	GB 16895.2—2005
IEC 60364-4-43: 1997 建筑物电气装置 第 4 部分: 第 43 章: 过电流保护	GB 16895.5—2000
IEC 60364-4-442: 1993 建筑物电气装置 第 4 部分: 安全防护 第 44 章: 过电压保护 第 442 节: 低压电气装置对暂时过电压和高压系统与地之间的故障的防护	GB 16895.11—2001
IEC 60364-4-443: 1995 建筑物电气装置 第 4 部分: 安全防护 第 44 章: 过电压保护 第 443 节: 大气过电压或操作过电压保护	GB 16895.12—2001
IEC 60364-4-444: 1996 建筑物电气装置 第 4 部分: 安全防护 第 44 章: 过电压保护 第 444 节: 建筑物电气装置电磁干扰 (EMI) 防护	GB/T 16895.16—2002
IEC 60364-4-45: 1984 建筑物电气装置 第 4 部分: 安全防护 第 45 章: 欠电压保护	GB/T 16895.10—2001
IEC 60364-5-534: 2001 建筑物电气装置 第 5 部分: 电气设备的选择和安装 第 53 章: 开关设备和控制设备 第 534 节: 过电压保护电器	GB 16895.22—2004
IEC 60364-5-54: 2002 建筑物电气装置 第 5 部分: 电气设备的选择和安装 第 54 章: 接地配置、保护导体和保护联结导体	GB 16895.3—2004

(续表)

IEC 60364 系列标准的编号和名称	国家标准
IEC 60364-5-548:1996 建筑物电气装置 第 5 部分：电气设备的选择和安装 第 54 章：接地配置、保护导体和保护联结导体 第 548 节：信息技术装置的接地配置和等电位联结	GB/T 16895.17—2002

二、IEC 有关电气安全标准的采用

IEC/ACOS 是 IEC 的安全咨询机构，其主要职责是协调 IEC 有关安全标准和其他标准中的安全条款的制定和修订。

IEC/ACOS 在 IEC 导则 104 中列出的一个由 IEC/ACOS 确认的安全基础标准，基本被我国等同采用。见表 1-2。

表 1-2 IEC 电气安全基础标准在我国采用的情况

IEC 60364 系列标准的编号和名称	国家标准	采用情况
IEC 60071-1: 1993 绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则	GB/T 311.1—1997	参照
IEC 60071-2: 1996 绝缘配合 第 2 部分：应用指南	GB/T 311.2—2002	等效
IEC 600364-4-41: 2001 建筑物电气装置 第 4 部分：安全防护 第 41 章：电击防护	GB 16895.21—2004	等同
IEC 60364-5-54: 2002 建筑物电气装置 第 5 部分：电气设备的选择和安装 第 54 章：接地配置、保护导体和保护联结导体	GB 16895.3—2004	等同
IEC 60449: 1973 建筑物电气装置的电压区段	GB/T 18379—2001	等同
IEC 60479-2: 1987 电流通过人体的效应 第 2 部分：特殊情况	GB/T 1370.2—1997	等同
IEC 60529: 1989 外壳防护等级 (IP 代码)	GB/T 4208—1993	等同
IEC 60664-1: 2000 低压系统内设备的绝缘配合 第 1 部分：原则、要求和试验	GB/T 16935.1—1997	等同
IEC 60990: 1990 接触电流和保护导体电流的测量方法	GB/T 12113—2003	等同
IEC 61000 电磁兼容性 (EMC)	GB/T 17625、GB/T 17626 等	等同
IEC 61140: 2001 电击防护 装置和设备的通用部分	GB/T 17045—1997	等同

电击防护直接与人身安全相关，因此我们特别关注有关电击防护的基础标准的研究和使用。

第四节 电气装置设计安装基本原则

本节参考国家标准 GB 16895.1—1997 (IEC 60364-1: 1992)《建筑物电气装置 第 1 部分：范围、目的和基本原则》，结合石油井场特点，介绍为保证石油井场电气装置在预定条件下安全运行和提供应有功能而制定的设计和安装准则。

一、安全防护原则

石油井场电气装置在使用中甚至合理使用中，仍可能发生危险和损害。电击电流和因温度过高可能引起的灼伤、着火和其他有害的效应。本节内容是针对电气装置在石油井场使用中可能发生的危险和损害而提出的防护原则，其目的是保障人和设备的安全。具体防护原则如下：

(一) 电击防护原则

电击防护包括直流接触防护和间接接触防护。

直接接触防护即对于人可能触及电气装置带电部分所发生的危险应予以防护。

防护方法如下：

防止电流从人体上通过；

将通过人体的电流值限制到低于电击电流值。

间接接触防护即对于在故障情况下人触及外露可导电部分可能发生的危险应给予防护。可采取以下方法：

防止故障电流从人体通过；

将能够通过人体的故障电流值限制到低于电击电流值；

在故障情况下，当人体触及外露可导电部分，致使人体通过一个其值等于或大于电击电流值时，在一个规定的时间内自动切断供电。

在间接接触防护中，采用总等电位联结措施可以显著降低预期接触电压，因此是有关电击防护的重要原则之一。

（二）热效应原则

石油井场电气装置的布置应满足以下条件：

不会发生易燃物由于高温或电弧而被引燃的危险；

在设备正常运行期间，人不会有被灼伤的危险。

例如在油罐区附近布置动力或照明电缆时，应考虑到如果油罐区燃油被高温引燃时，是否会因燃料的高温导致危险。在井场水电安装时，水电安装人员在油水罐区附近敷设电缆时，往往从防爆角度考虑电缆与油罐区的距离，如果按照 API 标准，距离油罐外表面 3m 以外就是不分类防爆区域，但如果在这个区域敷设电缆，就不符合热效应原则。如果油罐区内易燃物由于高温引爆或引燃，动力电缆就会受到损害。

（三）过电流保护原则

当带电导体中一旦出现由于过电流而引起的高温或机电应力时，应当保护人不受到伤害以及设备不受到损失。保护方法如下：

在过电流达到危险值（计及过电流的持续时间）之前，自动切断它；

在电流持续时间内，将最大过电流限制在安全值内。

（四）故障电流防护原则

有可能承受故障电流的导体，应能承受故障电流而不会达到过高温。对于石油井场电气设备，包括营房配电，都应特别注意对接地故障电流和漏电流的防护。

对于带电导体而言，满足过电流保护的要求即可保证它们对故障引起的过电流防护。

（五）过电压保护原则

当供电电压在不同的电路的带电部分之间发生故障时，应保护人不会因此受到伤害，设备不会受到损失。

过电压保护也包括由于其他原因（如雷击或操作过电压）出现过高的电压。

二、电气装置设计原则

设计石油井场电气装置时，要求考虑以下因素：

（1）导线截面积

确定导线截面积时，应考虑导体允许的最高温度、允许的电压降、因短路可能出现的机电应力、可能遭受的其他机械应力、与短路保护功能有关的最大阻抗。

（2）布线方式和安装方法

需要考虑场所的性质、人对布线的接近程度、线路电压、短路时可能出现的机电应力。

（3）防护用设备

需要考虑过电流（过负荷、短路）、接地故障电流、过电压、低电压和失压等。

保护用电器应在与回路特性和发生危险的可能性之间出现具有适当关系的电流值、电压值和时间条件下动作。

（4）应急控制

在发生危险时需要立即切断供电的地方，应当装设断电器件。这种器件应易于识别，并能有效快速地动作。

（5）隔离器件

出于维护、测试、检查故障或修理的需要，应设置隔离器件，以实现电气装置、回路或设备的隔离。

（6）相互影响的防止

电气装置的布置应避免该装置与其他装置之间的相互不利的影响。

（7）电气设备的易接近性

电气设备的安置应根据需要留有足够的空间，以便于电气设备的初装和以后更换个别项目，同时其操作、测试、检查、维护和修理时易于接近。

三、电气设备的选择原则

电气装置中选择的每项电气设备都应符合相应的国家标准或 IEC 标准。

（一）特性的选择

所选择的电气装置，除应具备与电气装置设计所依据的数据和条件相适应的适当的特性，更要满足电压、电流、频率和功率的要求。

电压的要求即电气设备应适用可能施加的最高稳定电压（交流电压即有效值）以及可能出现的过电压。

电流的要求即电气设备应按正常运行时承载的最大稳定电流（交流电压即有效值）来选择，同时还要按在规定的时间内，在异常情况下承载的电流（如果装有防护用器件，达到此电流的时间就是该器件的动作时间）来选择。

选择的设备额定频率应与回路中可能出现的频率相适应。

所有按照功率特性选择的电气设备，都应适应其工作方式的要求，考虑负荷系数和正常工作条件。

（二）安装条件的选择

所选择的电气设备应可靠地经受住石油井场各种外力和可能遇到的特有的环境条件的影响。如果某项电气设备的设计性能未能与石油井场相适应，则应在配置了合适的补充保护后方可使用。

（三）防止有害影响

功率因数、电涌电流、负荷的不平衡以及谐波等有害因素不应对所选择的电气设备产生有害影响，也不应在正常运行期间（包括开关操作）对电源特性有所伤害。

四、电气装置的安装和验收原则

（一）安装

电气装置的安装应确保做到以下几点：

1. 为电气装置的安装提供合格的、熟练的人员和适用的材料；

2. 电气设备的特性在安装过程中不受到损害;
3. 应按国家标准对导体进行标识;
4. 导体之间及导体与其他电气设备之间保证安全和可靠的连接;
5. 确保设计所要求的冷却条件;
6. 妥善安置或遮护所有可能产生高温或电弧的电气设备,以消除易燃材料被引燃的危险。如果电气设备裸露部分的温度可能伤害到人体,这些部分应妥善安装或加以遮护,防止人员触及。

(二) 验收

电气装置在投入使用前和进行任何重要改装之后,应进行检查和验收,以验证所完成的工程符合标准。

第五节 电气装置的特性评价

在对电气装置进行设计,特别是在选择安全防护措施时以及选择设备和安装设备时,应当对装置的下列特性加以评价:

- 装置的效用、电源和结构;
- 装置外露时所受的外部影响;
- 装置内设备的兼容性;
- 装置的可维护性等。

一、效用、电源及其结构

石油井场电气装置的设计应当考虑经济性和实用性,实际上是在发热和电压降允许的范围内确定装置或其一部分的最大需求。在确定装置的最大需求时,可以考虑多样性。

(一) 钻机配供电装置的类型

1. 带电导体系统的类型

石油井场电气装置的带电导体类型一般为三相四线制或三相五线制的交流系统。除了系统中的相导体外,中性(N)导体、保护中性(PEN)应视作带电导体,保护导体(PE)不应视作带电导体。

2. 系统的接地类型

电气装置的系统接地类型可用下述字母代号形式表示:

XX-X-X

其中,第1个X表示电源系统对地之间的关系,分别使用以下字母:

T: 表示一个点直接接地;

I: 表示所有带电部分与地隔离,或一个点通过阻抗接地;

第2个X表示装置的外露可导电部分对地之间的关系,分别使用以下字母:

T: 表示装置的外露可导电部分直接接地;

N: 表示外露可导电部分与电源系统的接地点直接电气连接(在交流系统中,电源系统的接地点通常是中性点,如果中性点无法有效接地,则可将一个相导体接地)。

第3个和第4个X(如果存在)用于表示中性导体(或中间导体)和保护导体的配置,分别使用以下字母:

S: 表示保护功能用一根独立于中性导体(或中间导体)或接地的单独导体提供;

C: 表示中性导体(或间导体)和保护功能组合在一根导体(PEN或PE导体)之中。

TN系统的电源有一点直接接地,装置的外露可导电部分通过保护导体与该点连接。根据中

性导体（或中间导体）和保护导体的配置方式，TN 系统可分为如下三类：

TN-S 系统：在整个系统中使用一根独立的保护导体；

TN-C-S 系统：在系统的某些部分，中性导体（或中间导体）和保护功能结合在一根导体中。

TN-C 系统：在整个系统中，中性导体（或中间导体）和保护功能组合在一根导体中。

有部分专家将 TN-S 系统称为三相五线系统，将 TN-C 系统称为三相四线系统（如图 1-1 所示），将 TN-C-S 系统称为三相四线和五线混合系统，另外一些专家按照带电导体系统分类，认为 TN-S 和 TN-C 系统中的相线和 N 线都是带电导体，PE 线不算是带电导体，因此认为 TN-S 和 TN-C 都是四根带电导体，因此都算是三相四线系统。另外一些专家则认为三相五线这个提法极不科学，因此准确的提法还是称为 TN-S 和 TN-C 系统。

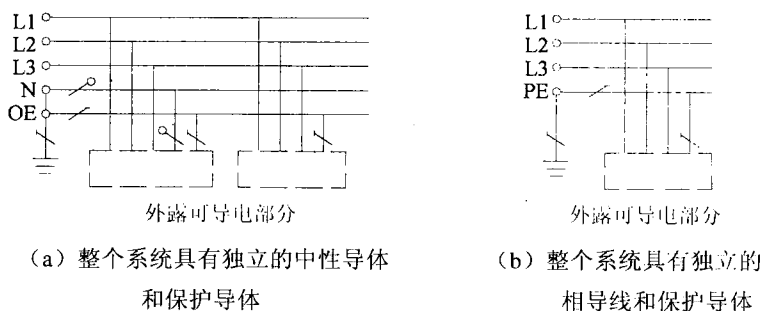


图 1-1 TN-S 和 TN-C 系统

由于石油井场一般都采用 TN 系统，因此我们不再解释 TT、IT 和直流系统。

（二）电源

石油井场的电源主要是柴油发电机组，需要评价的特性如下：

电流和频率特性；

标称电压；

受电点的预短路电流；

包括最大需求在内，装置所要求的适用性。

由于自带发电机组，所以不考虑应急电源的评价。

（三）装置的组成

井场电气系统应划分为几个必要的回路，以实现以下目的：

在故障时避免危险并将麻烦最小化；

便于安全检查、测试和维护；

考虑由单相回路（如井场照明回路）故障可能产生的危险。

井场电气系统中需要独立控制的部分应当提供单独的配电回路，以保证这些回路不会受到其他故障回路的影响。

二、外部影响分类

电气装置的安全防护设计及其电气设备的选择和安装，需要对装置所在处的外部影响进行评价。以下根据 IEC 60721《环境条件分类》，对井场外部环境条件进行分类。

A 环境分为 AA（温度/℃）、AB（温度和湿度）、AC（海拔）、AD（水）、AE（外来固体物）、AF（腐蚀性污染物）、AG（撞击）、AH（振动）、AJ（其他机械应力）、AK（植物）、AM（辐射）、AN（日光辐射）、AQ（雷击）、AR（气流）和 AS（风）。

AA 组将温度划分为 AA1~AA6 六个等级，分别是 -60℃~+5℃、-40℃~+5℃、-25℃~+5℃、

-5℃~+40℃、+5℃~+40℃、+5℃~+60℃。

AC 将海拔划分为≤2000m 和>2000m。

AD 将水划分为 AD1~AD8 八个等级，即可忽略、水滴、水花、溅水、喷水、水浪、浸水和潜水。

AF 将腐蚀性污染物划分为 AF1~AF4 四个等级，即可忽略的、空气的、间歇的和连续的。

AH 将振动划分为 AH1、AH2 和 AH3，即振动轻微、中等和强烈。

AM 将辐射划分为 AM1~AM6 六个等级，即可忽略的、杂散电流的、电磁的、电离的、静电的和感应的。

AQ 将雷击划分为 AQ1、AQ2 和 AQ3，即可忽略的、间接暴露的和直接的。

B 应用分为 BA（人的能力）、BB（人体的电阻）、BD（撤离场所）和 BE（材料）。

BC 将人与地电位接触划分为 BC1~BC4 四个等级，即不接触、不频繁接触、频繁接触和长期接触。

BE 将材料划分为 BE1~BE4 四个等级，即无危险、火灾危险、爆炸危险和污染危险。

三、其他评价

（一）兼容性评价

对于可能对其他设备、装置造成有害影响或损坏的设备的任何特性都应进行评价。这些特性包括：

暂态过电压；
快速变化负载；
启动电流；
谐波电流；
直流反馈；
高频振荡；
接地漏电流；
必要的附加接地。

（二）可维护性评价

应对装置在预期寿命内合理获得的维护次数和质量进行评估，并咨询装备运行管理部门。涉及预期维护次数和质量时，应当考虑：

- （1）在预期寿命内需要有准备地、安全地进行周期性检验、测试、维护和修理。
- （2）在预期寿命内应确保安全防护措施的有效性。
- （3）使装置内正确运行的设备可靠性与其预寿命相适应。

（三）供电电源的评价

主要是指对石油井场柴油发电机组的评价。

第六节 电流通过人体的效应

“电击”是电流通过人体而引起的生理效应。IEC 60479《电流对人和家畜的效应》（对应国家标准 GB/T 13870.1~13870.3）提供了电流通过人体所出现的生理学和病理生理学效应的定性和定量描述以及电击致伤、致死的原因，是研究和制定电击防护措施的理论和技术基础。

生理学效应是指诸如各种各样的肌肉、主动脉和血管的平滑肌、骨骼肌肉、心脏肌肉、神经以及所有的大脑构造等易兴奋的细胞，在遭受外电刺激后的瞬时效应。而病理生理学效应则是指

机体组织受伤导致的可逆的或不可逆的机能障碍或抑制的长期效应。

IEC 60479 所提供的数据对于包括儿童（不论年龄和体重）在内的所有生理条件正常的人都是适用的。

IEC 60479 对电击防护技术的一大贡献，就是它所提供的电流通过人体导致心室纤维性颤动阈值方面的研究成果，使得有可能更好地评价主要物理参数的影响，特别是电流持续流通时间的影响。

在研究和制定电击防护措施时，还应当考虑其他方面：发生故障的概率；触及带电部分或故障部分的概率；已有的运行经验；技术上的可行性和经济性等。

人体阻抗是随接触电压变化而变化的，即人体接触电压与人体电流之间呈非线性关系，因此它们之间的关系数据，即人体阻抗特性非常重要。

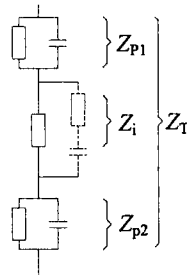
本节只关注 50Hz 或 60Hz 频率的电流效应。

电流对人体造成伤害的机理在于它的刺激作用，如刺激神经和肌肉、诱发心房或心室纤维性颤动。因此无论是科学研究还是运行经验都表明，直流电流对人体造成的伤害事故，都比交流要少得多。

一、人体阻抗

人体电阻抗值为接触电压、频率、皮肤潮湿程度和接触面积的函数。

有关人体阻抗简图如图 1-2 所示。



Z_i —内阻抗 Z_{p1} 、 Z_{p2} —皮肤阻抗 Z_T —总阻抗

图 1-2 人体阻抗

人体阻抗包括人体内阻抗、皮肤阻抗、人体总阻抗。人体初始电阻、50Hz/60Hz 交流时人体总阻抗与接触面积有关系。

（一）人体内阻抗（ Z_i ）

人体内阻抗可视为阻性，其数值取决于电流通路，与接触面积关系较小。如图 1-3 和图 1-4 所示为人体不同部位的内阻抗，它是以人的一手到一脚为通路的阻抗的百分数来表示的。图中的数字为人体各有关部分的人体内阻抗，以通路为一手至一脚的阻抗的百分数表示。需要注意的是，计算某一通路人体的总阻抗时，该电流通路中身体所有部分的内阻抗以及接触面积下的皮肤阻抗需一齐相加。

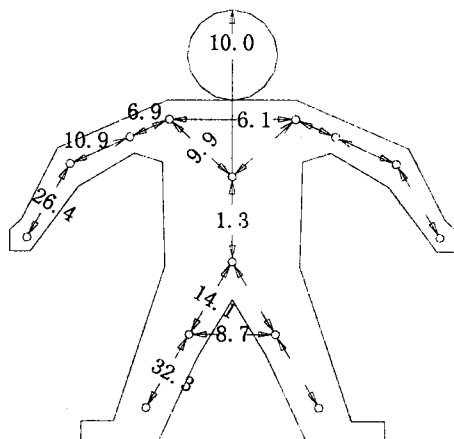
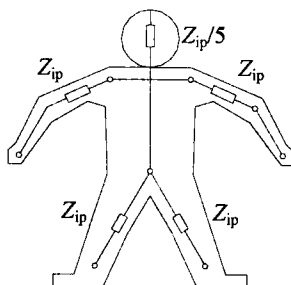


图 1-3 人体不同部位的内阻抗

当电流通路为手到手，或一手到一脚时，则内阻抗主要在四肢上。当略去人体躯干部分的阻抗时，可得出如图 1-4 所示的人体内阻抗简化电路图。



Z_{ip} — 一个肢体部分的内阻抗（手臂或腿）

图 1-4 人体内阻抗简化电路

一手至双脚的内阻抗相当于手至手或一手至一脚阻抗的 75%。双手至双脚的阻抗相应为 50%。双手至躯干的阻抗则相应为 25%。

（二）皮肤阻抗 (Z_p)

皮肤阻抗可视为由半绝缘层和许多小的导体（毛孔）组成的电阻和电容网络。皮肤阻抗值取决于电压、频率、通电时间、接触表面积、接触压力、皮肤的潮湿程度、皮肤的温度种类。

接触电压在交流 50V 及以下时，皮肤阻抗值随接触面积、皮肤的温度、汗分泌程度、呼吸急促程序等而改变。

接触电压超过交流 50V 时，皮肤阻抗值将随着皮肤阻抗的逐步被击穿而显著降低，当全部击穿时则可忽略不计。

由于容性阻抗的原因，皮肤的阻抗将随频率的增大而减小。

（三）人体总阻抗 (Z_T)

人体总阻抗通常是指电流通路为手到手或一手到一脚的阻抗，它们由电阻性和电容性分量组成。

接触电压在交流 50V 及以下时，由于受皮肤阻抗变化的影响，因此人体总阻抗的变化很大。

随着接触电压的增大，由于皮肤阻抗逐步被击穿，人体总阻抗将接近内阻抗。

人体总阻抗与频率的关系直接受皮肤阻抗的影响。人体总阻抗在直流时最高。

1. 50Hz/60Hz 正弦交流条件下的人体总阻抗值

当电压在 50V 以下、接触面用淡水润湿时，测得的数值比干燥时低 10%至 25%；而用导电溶液润湿接触面时，人体总阻值为干燥时的一半。当电压高于 150V 时，人体总阻抗值与湿度和接触面积的关系则越来越小。当接触电压在 5000V 及以下时，其电压值越高，人体总阻抗值下降越快。

2. 20kHz 及以下正弦交流条件下的人体总阻抗值

由于受皮肤电容的影响，当频率高于 50Hz/60Hz 时人体总阻抗值将呈下降趋势，高于 50Hz 时将接近人体的内阻抗 Z_i 。不同的接触电压下，20kHz 及以下的频率时，电压越高，人体总阻抗与频率的曲线越平，电压为 10V 时，50Hz 时人体总阻抗 Z_T/Ω 约为 5000~6000。电压为 1000V 时，50Hz 时人体总阻抗 Z_T/Ω 为最低值，即接近人体内阻抗值 Z_i 。可以这么说，50Hz 时，对人体而言电压越高越危险。其详细数据图表参见参考文献[1]。

3. 直流条件下的人体总阻抗值

试验表明，直流电流条件下，接触电压越高，人体总阻抗或人体总电阻越低，即越危险。测量还表明，当电流通路为一手至一脚时的人体总阻抗比电流通路为手至手时稍低（10%至 30%）。其详细数据图表参见参考文献[1]。

4. 电流对皮肤的效应

皮肤的变化取决于电流密度 $I_s/(\text{mA}/\text{mm}^2)$ 和通电时间。电流对皮肤的效应的划分界限如下：

电流密度低于 $10\text{mA}/\text{mm}^2$ 时，皮肤上通常看不出变化。当通电时间较长（几秒）时，电极下的皮肤可能变成灰白色，且表面粗糙。

电流密度在 $10\text{mA}/\text{mm}^2$ 与 $20\text{mA}/\text{mm}^2$ 之间时，电极下的皮肤渐呈棕红色，沿电极边缘呈白色起伏的隆起。

电流密度在 $20\text{mA}/\text{mm}^2$ 与 $50\text{mA}/\text{mm}^2$ 之间时，电极下的皮肤渐呈棕色并深入皮下，当通电时间很长（几十秒）时，围绕电极周围的皮肤可能充满电流痕迹（水泡）。

在大的接触面积下，即使有足以引起受伤？的电流密度，也不会引起皮肤的任何变化。

二、交流电电流效应

频率范围在 15~100Hz 之间的正弦交流电通过人体的效应可以用时间-电流区域图（见参考文献[1]）来表示。人体电流的时间-电流曲线可以定性表示如下：

AC-1 区域，人可以感知电流的存在，但通常没有生理反应。这个区域的反应阈通常为 0.5mA，与时间无关。

AC-2 区域，通常无有害生理效应。

AC-3 区域，通常预计无器质性损伤，通电时间超过 2s 以上时，很可能发生痉挛状肌肉收缩呼吸困难。随着电流值值的增加，心脏内心电冲动的形成和传导有可逆性障碍以及出现无室纤维性颤动的的心脏短暂停搏。

AC-4 区域，除区域 AC-3 的效应外，随着电流值值的增加，还可能出现一些危险病理生理效应，如心跳停止、呼吸停止及严重烧伤。

AC-4.1，心室纤维性颤动的概率增到大约 5%。

AC-4.2，心室纤维性颤动的概率增到大约 50%。

AC-4.3，心室纤维性颤动的概率超过 50%。

注：随着人体电流的增加，AC 区域从 AC-1 向 AC-2、AC-3、AC-4 区域过渡。

三、雷击对人的效应

(一) 雷电的物理过程

雷电的发生及其动态基本物理过程极其复杂,有的专家认为,雷电是微观的电荷在软的冰雹粒子(也称为软雹)和冰的晶粒之间转移,从而产生了三极性的云层。

雷电是瞬间以强大的电流进行放电的过程,其放电路径的长度是以千米度量的。大多数的闪电都出现在云层内部,称之为云内放电。少数是云层对地的放电。云层对地放电可以引起人的伤害和死亡、对石油井场电源、通信系统和自动控制系统等弱电系统的干扰以及引燃油罐等。

(二) 雷电的分类

云层和大地之间的雷电分为四种类型,其示意图如图 1-5 所示。

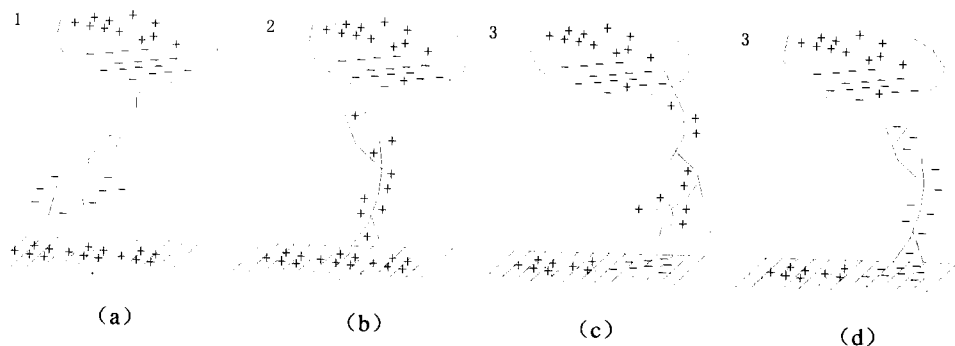


图 1-5 雷电的分类

第 1 类(如图 1-5 (a) 所示):雷电开始从一带负电的先导体向下移动。统计表明,这种云层对地放电约占整个云层对地放电的 90%。

第 2 类(如图 1-5 (b) 所示):雷电有一带正电的先导体,因此这种类型能有效地将负电荷下放到地球上。

第 3 类(如图 1-5 (c) 所示):放电是由向下移动的带正电的先导体激发的。统计表明,这种云层对地放电占整个云层对地放电的百分比不到 10%。

第 4 类(如图 1-5 (d) 所示):先导体带负电,并能有效地地下放正电荷。

第 2 类和第 4 类这种向上引发的闪电相对稀少,但有可能在井架上出现。

(三) 雷电作用于人的方式

1. 直接雷击

雷电流形成的初期,开始以小电流和低的光辐射进行预放电,随着放电作用的增强逐渐形成雷电流通道,称为梯形连续或先导体。直接雷击是一种由梯形连续或先导体的顶端直接达到活着的人体上。

当梯形的先导体向上的顶端到达离地平面几十米高度时,由于场强达到临界值,因而从垂直导体或被引发出一短的向上的光束。全部的放电电流都直接地流经受害者的躯体(如图 1-6 所示)。

直接雷击作用于人体的雷电流包括直接流过人体的躯体电流和经过人体表面的飞弧电流。

飞弧电流沿人体表面形成,对人体内部起到短路作用。此时跨越人体的接触点的电位差足够高,以致对空气形成连续的电击穿。通过人体的电流被减少到仅有几个安培。这就是令人惊奇的有 70% 甚至更多的涉及人的雷击事故中人并未死亡的原因。

2. 接触电压

当物体(不一定是金属)遭受雷击时,其表面上各点的电位被提高。当人体不同部位同时接

触这些点中的两个点，而通常其中一点是在大地上的一点时，这两点之间的电位差称为接触电压。雷电流在人体形成了完整的回路（如图 1-7 所示）。

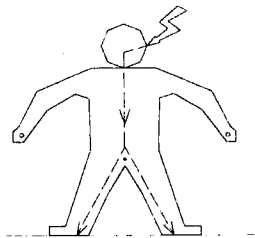


图 1-6 直接雷击

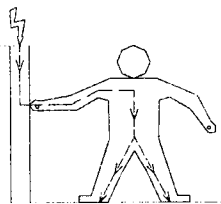


图 1-7 接触电压

3. 侧面闪电

当两个靠近而又不触及的垂直物体中至少有一个遭受雷击时，在两个物体之间产生的电弧称为侧面闪电（如图 1-8 所示）。

人体通过侧面闪电的方式遭受雷击会使人体产生电位，这与接触电压的方式遭受雷击的原理是相同的。

4. 跨步电压

人在具有雷电流的大地表面上行走时遭受的雷击实质上是跨步电压的作用结果，跨步电压的路径通常不包括心脏，而是从腰部向下（如图 1-9 所示）到地被麻痹（闪电性麻痹）。

由于地面上电阻分布不均匀，因此雷电流的分布可能是极不规则的。

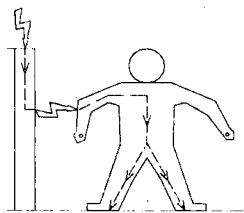


图 1-8 侧面闪电

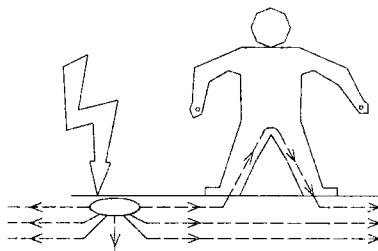


图 1-9 跨步电压

（四）雷击对人的效应

1. 生理学效应

雷电刺激对人体神经肌肉组织的诱发作用包括：引起血管的痉挛，主要的是心搏停止，极少的是造成纤维性心颤；还会发生呼吸作用的停滞，且持续的时间要比心搏停止时间长得多。虽然心脏可能重新跳动，但因缺氧，还会出现继发性心搏停止，而且血泵功能再次丧失，及时通风者除外。偶尔可能出现无意的骨骼肌肉反应，它能导致强烈的收缩和癫痫发作，其结果能产生继发效应。

2. 病理生理学效应

病理生理学效应包括非热性致使易兴奋的非易兴奋型细胞的损坏。膜可能破裂，甚至穿孔。不可能立即发生复原，或永远也不能复原。继发效应可能具有严重的后果。表 1-3 总结了雷电伤害造成的病理生理学效应及其临床表现。

3. 热效应

雷击可以导致人体细胞和细胞器官在失去原有功能的地方，由于瞬间电流加热使其温度升高