

城市轨道交通职业教育系列教材 —— 城轨供电技术

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG ZHIYE JIAOYU XILIE JIAOCAI
CHENGGUI GONGDIAN JISHU

城市轨道交通 电气设备测试



何发武 ○ 主 编

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG
DIANQI SHEBEI CESHI

 西南交通大学出版社

城市轨道交通职业教育系列教材——城轨供电技术

城市轨道交通电气设备测试

何发武 ◎ 主编

西南交通大学出版社

·成都·

图书在版编目（CIP）数据

城市轨道交通电气设备测试 / 何发武主编. —成都：
西南交通大学出版社，2017.8
城市轨道交通职业教育系列教材. 城轨供电技术
ISBN 978-7-5643-5567-8

I. ①城… II. ①何… III. ①城市轨道交通 - 电气化铁道
- 测试 - 职业教育 - 教材 IV. ①U22

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 166624 号

城市轨道交通职业教育系列教材——城轨供电技术

城市轨道交通电气设备测试

	责任编辑 / 李芳芳
何发武 / 主编	特邀编辑 / 李 娟
	封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

（四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031）

发行部电话：028-87600564

网址：<http://www.xnjdcbs.com>

印刷：四川五洲彩印有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 13.75 字数 335 千

版次 2017 年 8 月第 1 版 印次 2017 年 8 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5567-8

定价 35.00 元

课件咨询电话：028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

出版说明

城市轨道交通凭借快捷、准时、舒适、运量大、能耗低、污染小、占地少等优点，日益成为城市现代化建设进程中重要的公益性基础设施项目。城市轨道交通涉及面广、综合性很强，其发展状况已被当成一个城市综合实力和现代化程度的重要评判指标。由此，城市轨道交通建设正在我国兴起一个新的浪潮，社会对城市轨道交通专业人才的需求巨大，给城市轨道交通类专业的职业教育发展带来了良好契机。

西南交通大学出版社与国内诸多交通院校一直保持友好往来，并整合他们在轨道交通领域的尖端科技优势和人才集成优势，致力于为国家轨道交通教育事业做出贡献，形成了以“轨道交通”为核心的出版特色，在教育界、学界都拥有良好的口碑和较高的品牌知名度。

本套丛书从满足快速增长的城市轨道交通专业实用型人才培养需求出发，从校企结合教学直接面向岗位需求这一特点出发，精心组织国内相关专业优秀教育工作者或优秀教育工作高校，分“运营管理”“工程技术”“车辆”“控制”“供电技术”五大类，系统地为学生呈现城市轨道交通教育课程全景。在编写时，力求体现如下特点：

◎ 适用性

理论知识够用即可，在讲述专业知识的基础上，突出实际操作技能的训练，注重岗位关键能力的培养。

◎ 专业性

图书的顶层设计从国家高职高专专业目录规范出发，内容编排紧密结合岗位应用实际，体现专业性和主流设备前沿特征，体现教学实际需求。同时，在编写或修改时，尽可能地让一线用人单位参与进来，根据生产现场实际提出建议。

◎ 生动性

在架构设计和版式设计上，力求简洁生动，图文并茂；努力体现二维码技术等移动互联网时代元素在图书中的应用，尽可能把生产实际和研究成果，用立体生动的形式予以表达，便于读者理解掌握。

这套书可作为高等职业院校、中等职业学校城市轨道交通相关专业的教学用书，也可作为城市轨道交通企业新职工的培训教材。有关教材的课件资料等，可以联系我社使用。

联系电话：028-87600533

邮箱：swjtucbsfx@163.com

西南交通大学出版社

PREFACE 前言

本书系参照国家标准、行业标准、国家电网标准及相关的技术规范、规定编写，涵盖主要一次设备的相关试验项目，规范相应的试验方法和程序，规范试验仪器和设备，主要用于高压电气设备检修工岗位的能力培训。

本书既有高电压技术方面的基础理论知识，也涵盖电气设备测试方法的介绍，特别详细阐述了轨道交通中的电气设备试验，包括变压器试验（主变、整流变及动力变）、断路器试验、GIS 设备检测（110 kV 和 33 kV）互感器试验、电缆检测（110 kV 和 33 kV、DC 1 500V）、避雷器试验及整流变压器和直流开关等相关知识，并对试验中的操作步骤、技术要点、安全注意事项、危险点分析等进行了详细的规范，同时配合视频教学，方便读者快速理解和掌握，用于更好地指导轨道设备的预防性试验工作。

本书也介绍了轨道交通变电所（站）的运行和检修工作，并对运行和检修作业制度、高压设备停电作业、电力电缆作业及 GIS 作业、试验和测量及其他相关作业等进行了规范性介绍。

本书由广州铁路职业技术学院何发武编写，北京市轨道交通运营管理有限公司白青林主审。在编

写过程中，得到广州地铁王国思、广州铁路职业技术学院王亚妮、刘让雄、王吉峰、谭慧铭、赵华军、陈建鑫、黄鉴标、陈海军等人的大力支持，还得到何泽南、冼明珍、杨波琳、何安洋、何发文、何发贤、何凤华、李俊、李逸捷、何月华、李雅、李玮琦、李卓、李宝秀等人的热心帮助，在此一一鸣谢。

本书是“广东省一流高职院校建设计划”成果之一。

编 者

2017 年 4 月

CONTENTS

目 录

第一章	高压电气试验安全防范	001
第一节	高压危险点分析及预控措施	001
第二节	高压电气试验工具	004
第三节	城轨电气设备试验安全规程	012
第二章	绝缘材料特性	022
第一节	电介质的极化、电导和损耗	022
第二节	气体电介质绝缘及应用	027
第三节	液体电介质绝缘及应用	030
第四节	固体电介质绝缘及应用	035
第五节	组合绝缘及应用	039
第三章	高电压检测项目	045
第一节	绝缘电阻及吸收比的测量	046
第二节	泄漏电流的测量	052
第三节	介质损耗角正切值的测量	056
第四节	局部放电测量	064
第五节	直流耐压试验	066
第六节	交流耐压试验和变频串联谐振试验	070
第七节	冲击耐压试验	075
第八节	油色谱分析	080
第九节	微水检测	089
第十节	在线监测	093

第四章	城轨高压设备检测	106
第一节	电力变压器试验	110
第二节	GIS 试验	134
第三节	互感器试验	144
第四节	电力电缆检测	155
第五节	避雷器试验	159
第六节	直流开关柜	164
第七节	城轨低压设备试验检测	176
第五章	城轨防雷接地	190
第一节	雷电种类及城轨避雷保护	192
第二节	城轨避雷器设备	196
第三节	城轨综合接地	201

第一章 高压电气试验安全防范

【内容导读】

在轨道交通电气设备测试操作中，人员和设备的安全是最重要的。如何才能做好防护？

【知识要点】

1. 掌握高压电气试验安全规范，能正确认识并使用安全用具。
2. 能认清高压过程中的危险点，并能有效防范安全风险。

第一节 高压危险点分析及预控措施

电气试验是确保电力系统稳定运行的重要环节。高压试验是电气试验中危险性较大的工作，在高压试验过程中，应遵循国家相关安全规定，确保人身安全和电力系统安全。

电气设备试验就是试验电气设备绝缘性能的好坏和电气设备的运行情况等。电气设备试验一般分为出厂试验、交接验收试验、大修试验、预防性试验。

出厂试验是指厂家根据国家相关的标准和产品技术条件规定的试验项目，对每一台产品都进行检查试验。

交接验收试验是指安装部门、检修部门对新购进的电气设备和大修设备按照有关规章制度进行试验。交接试验指电气设备安装完毕后现场进行的一种试验标准，合格后设备方能投入使用，因施工现场的环境、温湿度与出厂时不同，故交接试验标准不同于出厂试验标准，一般略低于出厂试验标准。“交接”也就是在试验合格后交付使用。

大修试验是指对于设备检修故障，协同厂家进行维修后，为确保电气设备，按照有关规章制度进行试验合格后，方可重新投入使用。

预防性试验是指电气设备投入使用后，到达一定的使用周期时由运行部门、试验部门进行的试验。预防性试验工作专业性强、工作面广、工作量大、试验项目多，其工作质量的好坏直接影响着电气设备的运行情况，也直接关系着电气设备试验工作人员的生命安全。

上述试验都需要按照表 1-1 所列电气试验标准及规程进行。

一、规范性引用文件

表 1-1 是本书中规范性引用的部分文件和标准，这些标准如有新版本，按最新版本执行。

表 1-1 电气试验标准及规范

序号	标准及规程名称	颁发机构
1	《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》(GB 50150—2016)	中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
2	《电力设备预防性试验规程》(DL/T 596—2005)	中华人民共和国电力工业部
3	《现场绝缘试验实施导则》(DL/T 474.4—2006)	国家发展和改革委员会
4	《电力安全工作规程》(发电厂及变电站电气部分)(GB 26860—2011)	国家电网
5	《高电压试验技术第一部分 一般试验要求》(GB/T 16927.1—2011)	国家技术监督局
6	《城轨设计规范》(GB 50517—2013)	中华人民共和国建设部
7	《地下铁道工程施工及验收规范》(GB 50299—2003)	中华人民共和国建设部
8	《城市轨道交通技术规范》(GB 50490—2009)	中华人民共和国建设部

二、危险点及预控措施

电力系统运行中为了确保高压电力设备的正常运行、保证电力系统的运行质量安全,常常需要对电气设备的运行状态进行检测和考核,减少电力系统中的安全隐患,所以要对试验过程中的危险点采取预控措施。

危险点及预控措施的目的重在预防,变“事后分析”为“事前预防”,是安全管理的必要手段。表 1-2 所示的危险点及预控措施是电气设备试验实施过程中的注意事项和预控措施。

表 1-2 危险点及预控措施

序号	工作内容	危险点	预控措施
1	试验前准备	把有故障的试验设备带到现场或遗漏设备	出发工作前应检查试验设备是否齐备、完好,是否在有效期内,对所需工器具应逐一清点核对
		(1) 现场安全措施不能满足要求 (2) 工作负责人对工作任务和安全措施交代不详尽、不清晰 (3) 走错间隔	(1) 工作负责人应在值班人员的带领下核实工作地点、任务,确定现场安全措施满足工作要求 (2) 工作负责人应在开始工作前向全体工作成员交代清楚工作地点、工作任务、已拉开的隔离开关和已合上的接地开关的情况,检查安全围栏和标示牌等安全措施,特别注意与临近带电设备的安全距离,防止走错间隔
		装设试验专用警示围栏,搬运仪器、工具、材料时,与带电设备安全距离不够	(1) 工作人员应注意现场环境,严禁跨越安全围栏 (2) 搬运仪器、工具、材料时与带电设备应保持足够的安全距离

续表

序号	工作内容	危险点	预 控 措 施
1	试验前准备	(1) 误接非检修电源 (2) 放置电源线时触及带电设备 (3) 电源电压过高	(1) 检查电源是否为独立检修电源, 防止误跳运行设备 (2) 放置电源线时严禁将电源线抛起、甩动, 放置完成后电源线必须固定 (3) 在接上检修电源前用万用表测量电源电压是否符合试验要求 (4) 接、拆电源, 必须 2 人进行
		高空坠落	登高人员必须使用安全带, 必要时使用高空作业车
		主变压器或试验设备起火	试验现场放置适当的消防器材, 变压器的消防水喷淋装置尽可能投入
		无关人员可能误入试验场地	安全围栏设置, 不要有缺口, 安全围栏周围派人监护, 防止无关人员进入
2	试验过程	触电	试验范围有带电部位时, 应采取装设隔离挡板等安全措施
		人员误触碰带电的高压试验引线	(1) 在加压之前清理无关人员, 同时对工作组成员交代安全注意事项 (2) 加压过程中设专人监护, 并呼唱 (3) 试验结束后, 确认试验品已降压、放电、接地后, 再进行更换接线工作
		高压试验引线松脱或对接地体距离不够	(1) 绝缘杆应挂牢。高压试验引线必须与被试品连接牢固, 对接地体保持足够的安全距离, 必要时采用绝缘胶带固定, 防止松脱掉下 (2) 移动绝缘杆和试验引线时, 必须加强监护, 注意与临近带电体保持足够的安全距离
		感应电伤人、高压触电	试验中断、更改接线或结束后, 必须切断主回路的电源, 挂上接地线后才可更换试验接线
3	试验现场清理	(1) 试验引线和临时接地线未拆除 (2) 现场遗留工具	工作负责人在试验工作结束后进行认真检查, 确认试验引线和临时接地线已拆除, 现场无遗留工具和杂物

在试验的过程中应该做好记录, 现场试验记录一般应包括以下内容: 试验时间, 温度, 湿度, 被试设备铭牌, 运行编号, 试验部位, 试验项目, 试验数据以及对试验数据进行比较、判断的结果, 被试设备能否投运的评语以及主要试验人员姓名等, 必要时还应记录关键性仪器设备的编号。



复习与思考

QUIZ

1. 在试验过程中, 应如何防范高空和触电危险?
2. 如果试验结束后, 没有拆除地线, 会出现什么问题?
3. 轨道交通行业中, 静电对安全影响有多大?

第二节 高压电气试验工具

在电气设备周围要设置遮栏或围栏，遮栏或围栏与试验设备的高压部分还要有足够的
安全距离，并悬挂警示牌，还要派人专门进行看守。若被试验的电气设备两端不在同一地
点，另外一端也要派人进行看守。

有的电气设备安装在离地面较高的空中，检修人员就必须爬上扶梯进行试验工作，此
时安全带、扶梯等辅助设备就是确保检修人员人身安全的重要保证。如果在电气设备试验
前检修人员没有对安全带、扶梯等辅助设备进行安全检测，当检修人员在高空进行试验时，
若出现安全带断裂、挂钩变形、裂缝、扶梯倒坍等现象，就有可能发生试验人员高空坠落
等严重事故。

高压安全工具是用来直接保护电工人身安全的基本用具。高压安全用具分绝缘安全用
具和一般防护安全用具，绝缘安全用具又可以分为基本安全用具和辅助安全用具。

基本安全用具：绝缘强度应能长期承受工作电压，并能在本工作电压等级产生过电压
时，保证工作人员的人身安全。

辅助安全用具：若绝缘强度不能承受电气设备或线路的工作电压，则只能加强基本安
全用具的保护作用，以防止接触电压、跨步电压、电弧灼伤等对操作人员的危害。

高压绝缘安全用具中，基本安全用具有绝缘棒、绝缘钳和验电笔等；辅助安全用具一
般有绝缘手套、绝缘靴、绝缘垫、绝缘站台和绝缘毯等。低压绝缘安全用具中，基本安
全用具有绝缘手套、装有绝缘柄的工具和低压验电器。辅助安全用具有绝缘台、绝缘垫、绝
缘鞋和绝缘靴等。所以，同样是绝缘手套，在高压和低压中，分类也是不一样的，关键在
于应用的电压不同。

携带型接地线、临时遮栏、标示牌、警告牌、防护目镜、安全带、竹梯、木梯和脚扣
等，这些都是防止工作人员触电、电弧灼伤、高空坠落的一般安全用具，其本身不是绝缘
物，如图 1-1 所示。

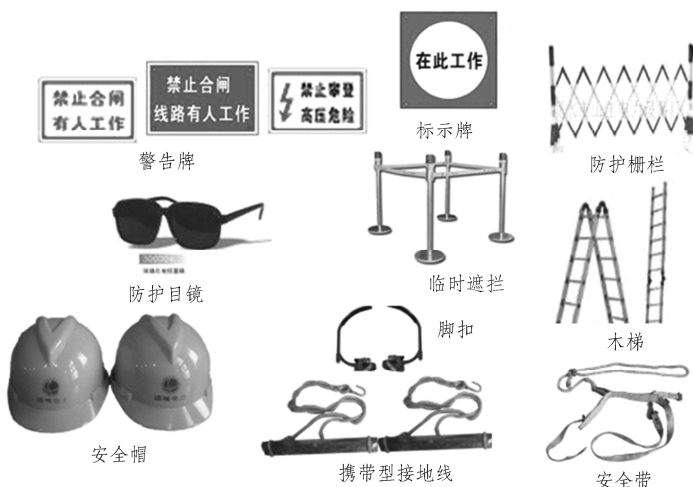


图 1-1 一般防护安全用具

一、常用绝缘安全用具

1. 绝缘棒

绝缘棒也称操作棒或绝缘拉杆，它主要用于断开或闭合高压隔离开关、跌落式熔断器、安装和拆除携带型接地线、进行带电测量和试验工作等。绝缘棒由工作部分、绝缘部分和握手三部分组成。工作部分一般用金属制成，也可以用玻璃钢或具有较大机械强度的绝缘材料制成；绝缘和握手两部分用护环隔开，它们由浸过绝缘漆的木材、硬塑料、胶木或玻璃钢制成。如图 1-2 所示为高压绝缘棒。



图 1-2 高压绝缘棒

绝缘棒操作前，棒面用清洁的干布擦净，操作时应戴绝缘手套、穿绝缘靴或站在绝缘台（垫）上，并注意防止碰伤表面绝缘层。按规定进行定期试验，应存放在干燥处，不得与墙面地面接触，以保护绝缘表面。

2. 验电器

验电器分为高压和低压两类。低压验电器又称为试电笔，其主要作用是检查电气设备或线路是否带有电压；高压验电器还可用于检测是否存在高频电场。验电器是由绝缘材料制成一根空心管子，管子上端有金属制的工作触头，管内装有氖光灯和电容器。另外，绝缘和握手部分用胶木或硬橡胶制成。如图 1-3 所示。



图 1-3 验电器

高压验电前应先检查验电器外观有无损坏，再在带电设备上进行试验，确认验电器完好后方可使用。验电时，不要用验电器直接接触及设备的带电部分，应逐渐靠近带电体，至灯亮或风轮转动或语音提示为止，应注意验电器是否受邻近带电体影响。验电时，必须三相逐一验电，不可贪图省事。如图 1-4 所示为地铁验电操作。



图 1-4 地铁验电操作

低压验电器除可以用于判断电气设备或线路是否带电外，还可以区分相线（火线）和地线（零线）。氖光灯泡发亮是相线，不亮的是地线。此外，还能区分交流电和直流电。交流电通过氖光灯泡时，两电极都发亮；而直流电流通过时仅一个电极发亮。

低压试电笔使用前，应检查试电笔里有无安全电阻，再直观检查试电笔是否有损坏、有无受潮或进水。使用试电笔时，不能用手触及试电笔前端的金属探头，否则会造成人身触电事故。使用试电笔时，一定要用手触及试电笔尾端的金属部分，否则，因带电体、试电笔、人体与大地没有形成回路，试电笔中的氖泡不会发光，从而造成误判，认为带电体不带电。在测量电气设备是否带电之前，先要找一个已知电源测一测试电笔的氖泡能否正常发光，能正常发光的才能使用。在明亮的光线下测试带电体时，应特别注意氖泡是否真的发光（或不发光），必要时可用另一只手遮挡光线仔细判别。千万不要造成误判，将氖泡发光判断为不发光，而将有电判断为无电。

3. 核相器

电力系统核对相位是经常性的工作。传统的定相方法多数采用电压互感器或高压验电器，前者设备笨重，后者依靠微弱的辉光指示容易出现误判断。核相器使高压定相这项危险性较大而又必不可少的工作变得安全可靠，指针显示一目了然，重量只有互感器的 1/10 ~ 1/20，携带方便。

高压语音核相器主要应用于电力线路、变电所的相位校验和相序校验，具有核相、测相序、验电等功能，具备很强的抗干扰性，符合 EMC 标准要求，适用于各种电磁干扰场合。将被测高电压相位信号由采集器取出，经过处理后直接发射出去。由核相仪接收并进行相位比较，对核相后的结果定性。本产品采用无线传输，真正达到安全可靠、快速准确，适用于各种核相场合。如图 1-5 所示是核相器。



图 1-5 核相器

4. 绝缘手套和绝缘靴

绝缘手套和绝缘靴均由特种橡胶制成，一般作为辅助安全用具。但绝缘手套只可以在低压带电设备或线路等工作中作为基本安全用具使用，而绝缘靴在任何电压等级下均可作为防护跨步电压的基本安全用具。图 1-6 是绝缘手套和绝缘靴。



(a) 绝缘手套



(b) 绝缘靴

图 1-6 绝缘手套和绝缘靴

绝缘手套可以使人的双手与带电体绝缘，是用特种橡胶（或乳胶）制成的，分 12 kV（试验电压）和 5 kV 两种电压等级。绝缘手套是不能用医疗手套或化工手套代替使用的。绝缘手套一般作为辅助安全用具，在 1 kV 以下电气设备上使用时可以作为基本安全用具。

绝缘靴又叫高压绝缘靴、矿山靴。所谓绝缘，是指用绝缘材料把带电体封闭起来，借以隔离带电体或不同电位的导体，使电流能按一定的通路流通。良好的绝缘是保证设备和线路正常运行的必要条件，也是防止触电事故的重要措施。绝缘材料往往还起着其他作用：散热冷却、机械支撑和固定、储能、灭弧、防潮、防霉以及保护导体等。绝缘靴采用特种橡胶制成，其作用是使人体与大地绝缘，防止跨步电压。绝缘靴按电压等级一般可以分为：6 kV、20 kV、25 kV 和 35 kV，适用于不同电压等级的环境。它的高度不小于 15 cm，而且上部另加高边 5 cm。绝缘靴必须按规定进行定期试验。

5. 绝缘垫

绝缘胶垫又称为绝缘毯、绝缘垫、绝缘胶板、绝缘橡胶垫、绝缘地胶等，是具有较大体积电阻率和耐电击穿的胶垫，用于配电等工作场合的台面或铺地绝缘材料。按照电压等级可分 5 kV，10 kV，15 kV，20 kV，25 kV，30 kV，35 kV，绝缘橡胶垫主要采用胶类绝缘材料制作、用 NR，SBR 和 IIR 等绝缘性能优良的非极性橡胶制造。

绝缘垫按厚度可分为：2 mm，3 mm，4 mm，5 mm，6 mm，8 mm，10 mm，12 mm。按宽度可分为：1 m，1.2 m，1.5 m，长度依需要而定。它们一般铺设在高、低压开关柜前，作固定的辅助安全用具。如表 1-3 所示为绝缘垫常规配置。

表 1-3 绝缘垫常规配置

序号	电压(kV)	规格(mm)	比重(kg/m ²)
1	5	3	5.8
2	10	5	9.2
3	15	5	9.2
4	20	6	11
5	25	8	14.8
6	30~35	10/12	18.4/22

图 1-7 是绝缘胶垫及其在变电所中的应用。

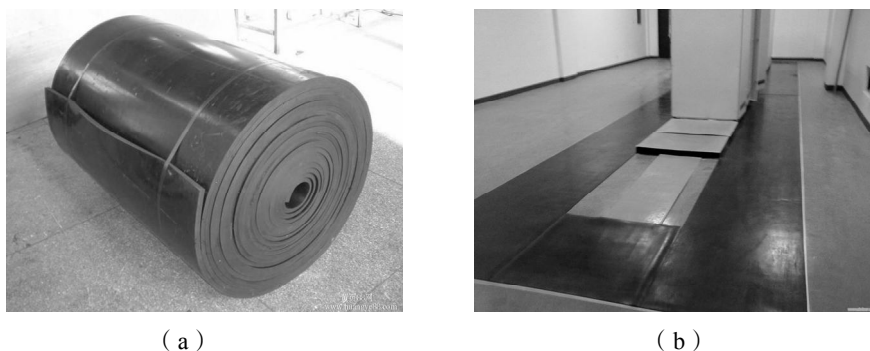


图 1-7 绝缘胶垫及其在变电所中的应用

试验时先将绝缘胶垫上下铺上湿布或金属箔，并应比被测绝缘胶垫四周小 200 mm，连续均匀升压至规定的电压值，保持 1 min，观察有无击穿现象。若无击穿，则试验通过。试样分段试验时，两段试样边缘要重合。

6. 接地线

高压接地线是用于线路和变电施工，为防止临近带电体产生静电感应触电或在误合闸时保证安全之用。携带型高压接地线由绝缘操作杆、导线夹、短路线、接地线、接地端子、汇流夹、接地夹构成。携带型接地线由短路各相和接地用的多股软铜线、将多股软铜裸线固定在各相导电部分和接地极上的专用线夹组成，一般要求多股软铜线的截面面积不小于 25 mm²。如图 1-8 所示是高压接地线。



图 1-8 高压接地线

接地操作步骤为：将接地引下线的地轧可靠地夹在良好的接地轨或地极上。将接地线上端的挂钩可靠地挂接在要短路的线路上。用力拉拽操作杆，保证充分接触。装设接地线必须由两人进行，装、拆接地线均应使用绝缘棒和戴绝缘手套。挂接地线时，先连接接地夹，后接接电夹；拆除接地线时，必须按程序先拆接电夹，后拆接地夹。安装时将接地软铜线分相上双眼铜鼻子固定在接地棒上的接电夹相应位置上，将接地线合相上的单眼铜鼻子固定在接地夹或地针上，构成一套完整的接地线，严禁用缠绕的方法进行接地或短路。

接地操作前应对接地线进行外观检验，方法是：查看接地线的各连接部位是否连接紧固，并保证所有部件均可正常使用。

工作之前必须核实接地棒的电压等级与操作设备的电压等级是否一致，检查接地线、软铜线是否断头，螺丝连接处有无松动，线钩的弹力是否正常，对于不符合要求的应及时调换或修好后再使用。

挂接地线前必须先验电，未验电挂接地线是基层中较普遍的习惯性违章行为，在悬挂时接地线导体不能和身体接触。对于可能送电至停电设备的各方面或停电设备可能产生感应电压的都要装设接地线，在工作地点两端悬挂接地线，以免出现用户倒送电、产生感应电的可能，使用中深受其害的例子不少。接地线在使用过程中不得扭花，不用时应将软铜线盘好；接地线在拆除后，不得从空中丢下或随地乱摔，要用绳索传递，注意接地线的清洁工作。

7. 安全帽

安全帽是电气作业人员必备的安全防护用品，凡有可能发生物体坠落的工作场所，或有可能发生头部碰撞、劳动者自身有坠落危险的场所，都要求佩戴安全帽。戴安全帽时必须系好带子。图 1-9 所示是安全帽。



图 1-9 安全帽