

强电线路的电磁影响与防护

马其祥 黄炎 赵国谦 编著

中国铁道出版社

1989年·北京

的防护措施，也基本适用于电力线路。

在本书编著过程中，电气化工程局电气化勘测设计院、通号勘测设计院、长春邮电学院和铁道部电气化研修中心等单位的有关同志提供了宝贵的资料和有益的帮助。有关章节承电气化工程局王泳焜总工程师，北京邮电学院高攸纲教授和北方交通大学蒋忠涌副教授审阅，在此一并致谢。由于我们水平所限，错误、不当之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编著者

1988年5月

内 容 简 介

本书系统地阐述了交流电气化铁道等强电线路对通信、广播和地下输油、输气金属管线的电磁影响及防护方法。全书共分九章，第一章简要介绍了交流电气化铁道和电力系统的组成及与防干扰有关的技术知识；第二、三、四章介绍了强电线对有线通信、广播线路及无线通信、广播设备产生干扰的原因、分类、允许值及计算方法；第五章是防护设计计算中常用参数的定义、计算及经验数据；第六章介绍了各种干扰及参数的测量方法；第七、八章分强、弱电两个方面，介绍了国内已经采用和正在研制的几种行之有效的防护措施的工作原理、防护效果和工程设置原则；第九章介绍了强电线对地下输油、输气金属管线产生电磁影响的原因、分类、设计计算方法、防护措施及其工程设计原则。

本书供铁道、电力、通信、广播、石油等部门从事防干扰工作的工程设计、科研、教学和管理人员参考，也可作为院校有关专业的教科书和职工技术培训教材。

强电线路的电磁影响与防护

马其祥 黄炎 赵国谦 编著

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 郝晓英 封面设计 刘景山

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：14.375 字数：324千

1989年9月第1版第1次印刷

印数：1-3000册 定价：5.90元

前 言

近年来,我国交流电气化铁道、电力线、地中油气金属管线和电信线路的建设有了大规模发展。随着交流电气化铁道由山区困难区段转入运输繁忙的平原长大干线和500kV高压输电线路投入运营,尤其是交流电气化铁道和超高压输电线进入电信线路和地下输油、输气金属管线密集的大城市,由此而引起的电磁影响与防护问题日益复杂,涉及的部门和从事防护设计与科研工作的人员也越来越多。同时,随着交流电气化铁道AT等新型供电方式的采用,由此而引起的许多技术问题也急待解决。铁道、电力、邮电、广播、通信和石油等部门从事防护工作的人员,迫切需要一本实用性、系统全面的专业参考书。为此目的,我们强电与弱电两方面防干扰技术人员合作编写了这本书。

本书参考了国内外防护方面的先进技术,积累了近年来防护工程设计和科研工作的新成果、新经验,就强电线对通信、广播、无线电设施和地中油气金属管线的电磁影响与防护问题,着重从基本定义、防护原理、工程测量和工程应用等方面进行了叙述,并提供了各种影响和常用参数的计算、测量方法和经验数据,供读者参考。

本书所述的强电线包括交流电气化铁道接触网和电力线路。两种强电线路产生电磁感应的原理相同,其感应计算方法也基本一样,差别主要在有关参数的取值不同。本书着重对交流电气化铁道的电磁影响与防护问题进行了叙述,所介绍的感应计算方法和在电信线路及地下油气金属管线上所采用

目 录

第一章 强电线路概述	1
第一节 交流电气化铁道	1
第二节 电力系统	18
第二章 电磁危险影响	29
第一节 基本定义和允许标准	29
第二节 电磁危险影响计算	41
第三章 杂音干扰影响	86
第一节 基本定义和允许标准	86
第二节 杂音干扰影响计算	94
第四章 无线干扰影响	130
第一节 基本定义和允许标准	130
第二节 无线干扰影响计算	145
第五章 参数计算与数据	152
第一节 钢轨屏蔽系数	152
第二节 通信电缆屏蔽系数	164
第三节 桥隧及城市等的屏蔽系数	189
第四节 敏感系数与传播常数	192
第五节 接地电阻	197
第六章 感应影响与参数测量	205
第一节 危险影响测量	205
第二节 杂音干扰测量	208
第三节 无线干扰影响测量	213
第四节 屏蔽系数与传播常数测量	219

第五节	接地电阻测量	224
第六节	大地电导率测量	231
第七节	等效干扰电流和电压的测量	273
第七章	在接触网和供电系统上采用的防护措施	281
第一节	吸流变压器-回流线装置	281
第二节	自耦变压器供电方式	302
第三节	同轴电力电缆供电方式	324
第四节	单设回流线和 RC 阻尼网络	330
第五节	无线干扰的防护措施	337
第八章	在通信线路和机械设备上采用的防护措施	343
第一节	中和变压器	343
第二节	幻通谐振变压器	354
第三节	屏蔽变压器	361
第四节	绝缘变压器和排流线圈	367
第五节	N 型线圈和横向接地变压器	373
第六节	放电管	377
第七节	杂音抑制器	394
第八节	金属屏蔽地线	396
第九节	在通信机械设备上加设防护网络	407
第九章	强电线对地下金属管线的影响与防护	416
第一节	基本定义和允许标准	416
第二节	交流腐蚀的机理与测试	420
第三节	感应影响计算	425
第四节	防护措施	442
第五节	防护装置的设计	447
参 考 文 献		452

第一章 强电线路概述

强电线路是指交流电气化铁道接触网和电力线路。我国交流电气化铁道采用工频单相交流制，其接触网额定工作电压为25kV；电力线路分输电线路和配电线路，二者在电压等级上没有严格的分界，各国的规定也不同。我国规定电压在110kV及以上的电力线路称高压输电线路，其次还有10kV的农村输电线路；电压在35kV及以下的电力线路称配电线路。

第一节 交流电气化铁道

我国电气化铁道采用单相工频交流制供电，接触网额定工作电压为25kV。同时，电力牵引的供电回路采用接触网钢轨（大地）方式，属于不平衡供电系统。这种不平衡供电回路在其周围空间产生电场和磁场，对附近通信、广播线路和其它电气设施，会产生电磁危险影响和杂音干扰影响，对地中金属管道，也会产生感应电压和电流。为了正确地进行防干扰设计计算和采取相应的防护措施，首先对作为干扰源的电气化铁道供电系统作一简介。

一、电气化铁道的发展

电力牵引开始于上世纪末。到本世纪六十年代初，由于单相工频交流制的出现，可控硅技术的应用，运量的急剧增长，国际市场石油涨价，环境污染日益严重，越来越显示出电力牵引的无比优越性，电气化铁路建设才开始有了大规模

发展。目前,已有52个国家修建了电气化铁路,其中一万公里以上的国家有苏联、日本、西德和法国,五千公里以上的国家有意大利、波兰、瑞典、南非、西班牙、印度和瑞士。电气化铁路的总长度已达191350km,约占世界铁路总营业里程的15.5%,而完成运量却占世界铁路总运量的35%以上。三十多年来的实践表明,铁路电气化不仅是提高铁路运量最有效的措施,而且是合理利用能源和减少环境污染的最好办法,是铁路牵引动力现代化的主要方向。

我国铁路电气化是从1956年开始起步的。1961年8月15日,我国第一条电气化铁路——宝成线的宝鸡至凤州段建成通车,揭开了我国铁路电气化的序幕。六十年代末,为了加快大西南的建设,沟通西南和全国的物资交流,宝成线凤州至成都各段的电气化又重新上马。到1980年,我国又相继建成并开通了宝成铁路全线,阳安线,襄渝线的襄樊至安康段,石太线的石家庄至阳泉段和陇海线的宝鸡至天水段,共计1678km。十一届三中全会以后,更加快了电气化铁路建设的速度,“六五”期间共修建了2500多公里,平均每年修建500km,与前10年相比,建设速度提高了一倍半。1985年一年中就有京秦线、贵昆线的贵水段、太焦线的长月段和成渝线的内重段4条电气化铁路共1148km建成通车,建设速度不仅创造了我国历史最高纪录,而且在电气化铁路技术方面已接近和达到了世界先进水平。例如京秦线采用的AT供电方式、微型计算机远动控制系统等,都具有八十年代世界先进水平。“七五”期间,我国将修建大秦、北同蒲、郑宝、鹰厦、湘黔、川黔和郑武等电气化铁路。到2000年,我国的电气化铁路不论在总里程上,还是在完成铁路总运量的百分比上,一定能够赶上世界先进水平,为我国的四化建设做出更大贡献。

二、牵引供电系统组成

在电气化铁道上运行的电力机车,是一种非自给性机车,它所取用的电能,是由一套专设的供电装置供给,这套供电装置统称牵引供电系统,它主要由牵引变电所和接触网两大部分组成。

牵引供电系统一方面接受国家电力系统的电能,另一方面又将电能输送给电力机车,其一次供电系统(外部电源)和牵引供电系统原理图如图1—1所示。

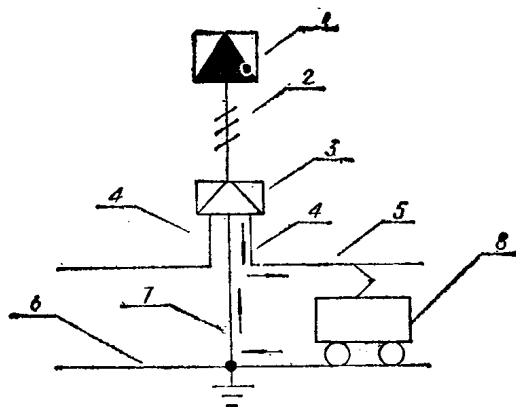


图1—1 一次供电系统与牵引供电系统原理图

1——区域变电所或发电厂, 2——三相高压输电线, 3——牵引变电所, 4——单相馈电线, 5——接触网, 6——钢轨, 7——回流线, 8——电力机车。

图中1和2是国家电力系统的组成部分,通常称为一次供电系统。相对于牵引供电系统而言,也称外部电源或外部供电系统,它由国家电力部门负责建造和管理。3~7各部分统称电气化铁道的牵引供电系统,由铁道部门负责修建和管理。

由图1—1可见,馈电线4、接触网5、钢轨6和回流

线7组成一个双导线供电系统，并经由电力机车8形成一个电回路。而接触网、钢轨、馈电线和回流线组成牵引网，其中以接触网和钢轨为主体。在上述牵引供电回路中流通的电流称牵引电流。由于钢轨与大地之间存在着电导，因此牵引电流在流经电力机车后，有部分电流通过钢轨漏泄入地，这部分电流以大地作为导体，然后经牵引变电所的接地网流回牵引变电所的母线。通常称由大地流回牵引变电所的电流为地中回流，这部分电流是对通信、广播线路和地中金属管道等设备产生电磁感应影响的主要原因。

（一）牵引变电所

牵引变电所是牵引供电系统的核心，其作用是将由外部电力系统所接受的电能，变换为适合电力机车使用的电能形式。一般铁路线路很长，需要设置很多牵引变电所，每一个变电所负责各自区段的馈电任务。牵引变电所按其变压器的接线方式不同，分为三相牵引变电所和单相牵引变电所。三相牵引变电所内采用的是三相变压器，这是我国电气化铁道目前采用最多的形式；单相牵引变电所内采用的是单相变压器。

1. 三相牵引变电所

三相牵引变电所的接线原理图如图1—2所示。

由图1—2可见，三相牵引变电所的接线形式为Y/Δ，其高压侧为Y型接线，接到电压为110kV的电力网上，低压侧的c相接到接地母线和钢轨，其它两相——a相和b相分别接到27.5kV的牵引侧母线上，并由此分别馈入牵引变电所两侧的接触网。由于两侧牵引网电压相位不同，因此两侧的牵引负荷 I_a 和 I_b 相位也不同，其相位相差 60° 。

2. 单相牵引变电所

单相牵引变电所按变压器的接线方式，又分为纯单相接

线和V型接线两种。单相牵引变压器都采用特殊设计的110kV全绝缘结构，次级额定电压为27.5kV。

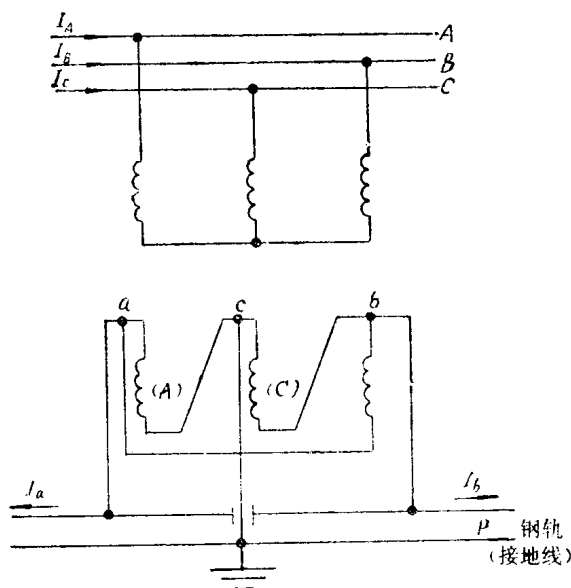


图 1—2 三相牵引变电所接线原理图

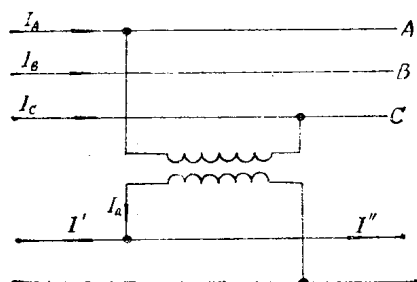
（1）纯单相牵引变电所

纯单相牵引变电所接线原理图见图 1—3（a）所示。

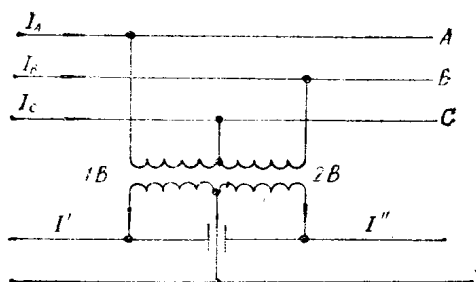
由图 1—3（a）可见，单相牵引变压器的高压侧接到电力网 A、C 两相，低压侧的一端接到 27.5kV 牵引母线上，另一端与接地网和钢轨连接。图中 I' 和 I'' 分别为左、右两侧的牵引负荷，而 I_c 为 I' 和 I'' 之和。

在变电所内，采用两台纯单相接线的变压器并联运行，由于单相变压器的容量利用率可达 100%，所以每台变压器的容量可以较小，从而提高了供电可靠性。单相牵引变电所内设备简单，运营维修方便，造价和运营费用较低。其缺点是没有三相电源，不利于变电所内三相自用电及地区三相电力

供应，对电力系统的不平衡影响也较大，其不对称系数为 1。这种变电所适用于电力比较发达的地区。



(a) 纯单相接线



(b) V型接线

图 1—3 单相牵引变电所接线原理图

(2) V型接线牵引变电所

V型接线又称V/V接线，即用两台单相变压器连接成开口三角形，其接线原理示意图见图 1—3 (b)。图中1B和2B分别为1号和2号单相牵引变压器，1B和2B的高压侧分别接入AC相和BC相，低压侧各取一端接到27.5kV的a、b相母线上，另一端接到接地网和钢轨。a相母线对地电压 u_a 。供应左侧牵引负荷 I' ，b相母线对地电压 u_b 。供应右侧牵引负荷

I'' ，容量利用率可达100%，对电力系统的不平衡影响比纯单相小，其不对称系数为1/2。在正常运行情况下，能提供三相电源。

3. 馈线电流

馈线电流是指牵引变电所牵引侧母线经由馈电线送到牵引网中的电流。这个电流也就是牵引变电所的负荷电流，它与动力负荷有很大差别，其特点是：(1)列车以变化的速度沿区间走行，因而牵引负荷是运动着的。(2)负荷的大小随时间而变化，线路上列车密集，负荷大；反之则小，以至为零。(3)列车可以在供电区段上的任意位置，即负荷在供电区段上任意分布。(4)由于采用半导体整流式机车，整流后使得接触网上的电流波形变为非正弦波。

对馈线电流的计算，主要是用以下3个量值来表达：(1)馈线平均电流。它是指馈线电流在一昼夜间的平均值。(2)馈线有效电流。它是指馈线电流在一昼夜间的均方根值，有时也以最大运行时间来计算馈线有效电流。最大运行时间一般指某些区段内高峰足够长的时间。(3)馈线电流的最大值。由于牵引负荷是一个运动着的随时间而变化的负荷，所以馈线电流的最大值可分为最大瞬时工作电流和最大短时工作电流。

牵引负荷的上述特点，使得产生干扰的现象和防护计算变得很复杂。按最大概率积分95%、平均带电概率为0.5考虑，对接触网正常运行时感应纵电动势的计算，以采用馈线有效电流为宜。

(二) 电力机车

在我国电气化铁道上所使用的电力机车，目前仍大多采用国产韶山1型大功率半导体整流式机车，它主要由车体和转向架组成。机械设备主要有车体、车钩、走行装置和制动

系统等；电气设备主要有受电弓、主断路器、牵引变压器、整流装置和牵引电动机等。韶山型电力机车的原理电路图如图 1—4 所示。

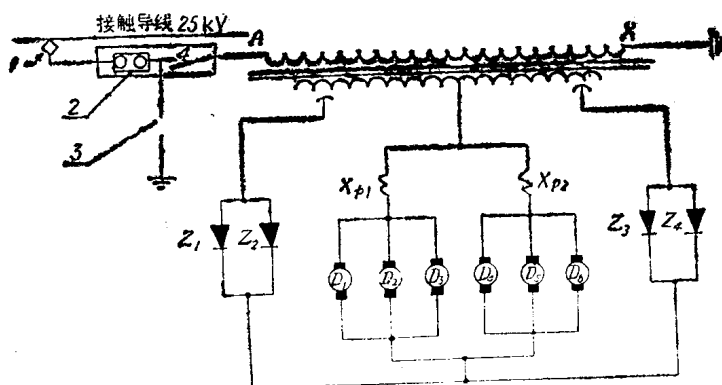


图 1—4 韶山型电力机车原理电路图

1 —— 受电弓； 2 —— 主断路器； 3 —— 放电间隙； 4 —— 隔离开关； $Z_1 \sim Z_4$ —— 硅半导体整流器组； X_{p1}, X_{p2} —— 平波电抗器； $D_1 \sim D_6$ —— 牵引电动机。

由图 1—4 可见，机车受电弓从接触网上取得单相 25kV 交流电后，经主断路器、放电间隙、隔离开关到主变压器高压侧 A-X 接地，再由钢轨和大地流回牵引变电所，形成一个回路。通过机车主变压器降压后，在变压器次级经中间抽头式全波整流及平波电抗器滤波，变成适合牵引电动机使用的直流电 (1500V)，向 6 台牵引电动机供电，再由牵引电动机通过齿轮传动，驱动轮对在钢轨上运行。机车在整流换相过程中，使得 50Hz 的基波电流产生畸变和振荡，这是对有线通信和广播回路产生杂音干扰的干扰源。

受电弓是电力机车高压电源的接受装置，通过它将接触网的高压电源引入机车内部。受电弓的受流性能与对无线电

设备产生干扰的程度关系极大，而受流在很大程度上又取决于接触压力。若压力太小，则接触电阻增大，且易跳动，将导致受电弓因离线而产生火花，加大对无线电设备的脉冲干扰；若压力太大，则摩擦加大，增加受电弓滑板和接触导线的磨损。因此，要求受电弓的机械结构能保证受电弓滑板在工作高度范围内，具有相同的接触压力。

电力机车在运行中有以下3种状态：(1)牵引运行状态。即牵引电动机通电运转，将电能变为机械能，驱动机车，使机车牵引车辆前进。(2)惰行状态。即牵引电动机不通电，列车靠惯性前进。(3)制动状态。即在列车上加制动力，使列车减速前进。

(三) 接触网

接触网的作用是直接向电力机车输送电能，它主要由3部分组成：接触悬挂、支持设备、支柱与基础。其结构见图1—5所示。

1. 接触悬挂

接触悬挂是指直接向电力机车供电的架空线组，它包括接触导线、承力索、吊弦等。

接触导线是接触悬挂的重要组成部分，通过它直接向电力机车供电。由于它与受电弓直接接触，经常处于摩擦状态，因此接触导线的材质除应具有良好的导电性能外，还要求具有足够的强度、耐磨性及耐腐蚀性。我国目前采用的接触导线主要有铜接触线和钢铝接触线两种，铜接触线具有良好的导电性能，强度和硬度较高，耐腐蚀，施工和维修方便，可以回收等优点。同时与炭墨合金受电弓滑板在滑动接触过程中，产生的离线率小，由此而引起的对无线电设备的干扰也小。其缺点是消耗了重要的有色金属——铜。钢铝导线具有强度高、耐磨、线垂稳定性好等优点。缺点是线质硬，歪扭及弯曲不易平整，硬点不易消除，钢铝接合处有时会发生

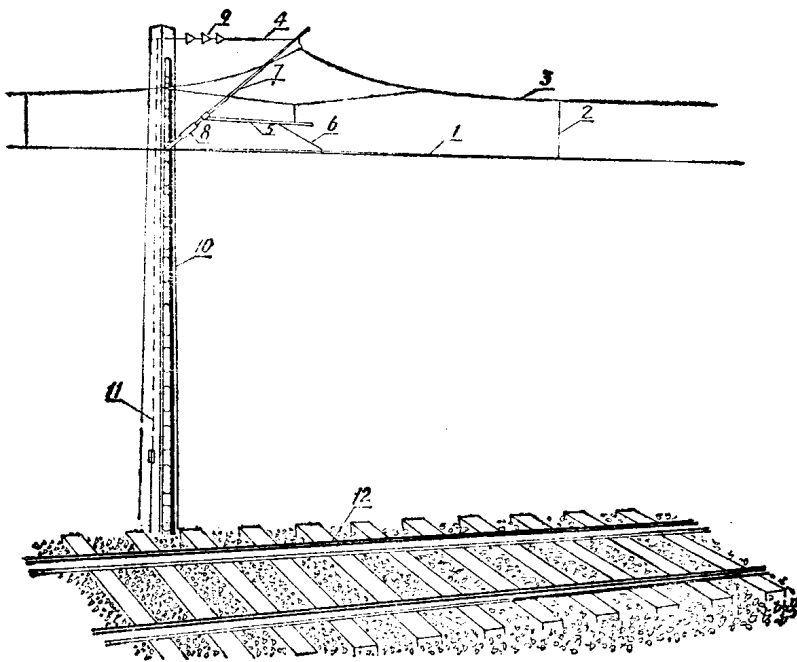


图 1—5 接触网结构示意图

1——接触导线；2——吊弦；3——承力索；4——拉杆；5——定位管；6——定位器；7——腕臂；8——棒式绝缘子；9——悬式绝缘子；10——支柱；11——接地线；12——钢轨。

开裂等。接触导线的架设位置及高度直接与防干扰设计计算有关，其最大弛度时距轨面的最大高度值为6500mm，最小值为：一般中间站和区间站是5700mm；编组站、区段站及配有调车组的中间站内是6200mm。

承力索的主要作用是通过吊弦将接触导线悬挂起来。承力索在电气上和接触导线是并联的，所以和接触导线一样，担负着给电力机车供电的任务。为了使承力索柔软，均采用多股绞线。承力索从材质上可分为铜承力索、钢承力索和双金属承力索。

接触悬挂方式主要有简单悬挂和链形悬挂两种。链形悬挂又有单链形悬挂和复式链形悬挂之分。由于目前我国车速还不太高，电流也不太大，所以一般干线均采用单链形悬挂，简称链形悬挂。

(1) 简单悬挂

简单悬挂是一种直接将接触导线固定到支持装置上的悬挂方式，它结构简单，用料省，投资少。但弹性不均匀，弛度大，可靠性差，一般用于矿山运输、机车入库等低速、次要线路上。随着对受电弓性能和简单悬挂结构的改进，在一些次要干线上也开始采用带弹性吊索的简单悬挂方式。

(2) 链形悬挂

目前我国干线电气化铁路上采用的单链形悬挂，有半补偿链形悬挂和全补偿链形悬挂两种。采用全补偿链形悬挂比起半补偿链形悬挂来说，增加投资不多，但大大节省了维修和安装调整工作量，对提高运营质量效果显著。

1) 半补偿链形悬挂

这种链形悬挂只有接触导线，没有张力自动补偿装置，而承力索是硬锚。当温度变化时，承力索会发生变化，产生弛度，影响到接触导线的弛度、稳定性和弹性均匀度，这些都会发生变化。

2) 全补偿链形悬挂

这种悬挂在承力索和接触导线的两端均设有张力自动补偿装置，因此在温度变化时，接触导线的高度基本不变，可以保持较均匀的弹性。

2. 支持设备

支持设备用来吊挂全部接触悬挂设备，并将它们的重量传给支柱。同时，它还用来将接触导线固定在线路中心的一定位置上。其安装形式有腕臂、软横跨和硬横跨。