



项目 1 轨道交通接触网系统认知

项目概述

轨道交通供电系统是为轨道交通运营提供电能的系统,它不仅为列车提供牵引用电,而且还为轨道交通运营服务的其他设施(如通信、信号、防灾报警、给排水、照明、通风空调及自动扶梯等系统)提供电能。

在轨道交通运营过程中,供电系统一旦断电,不仅会造成运输中断,而且会危及乘客的生命财产安全。安全、可靠、经济合理的电力供给是轨道交通正常运营的保证。

本项目重点介绍轨道交通供电系统的组成、供电制式的发展与选择及接触网系统。

教学目标



知识目标

- (1)掌握外部供电系统各组成部分的功能。
- (2)掌握牵引供电系统各组成部分的功能。
- (3)掌握动力照明供电系统各组成部分的功能。
- (4)了解 SCADA 系统的主要作用。
- (5)掌握轨道交通供电系统的功能。
- (6)了解供电制式的发展历程。
- (7)掌握轨道交通供电系统的供电制式。
- (8)掌握接触网的类型。
- (9)掌握接触网的供电方式及特点。
- (10)掌握接触网的基本要求。



技能目标

- (1) 会区分轨道交通外部供电系统、牵引供电系统、动力照明供电系统及 SCADA 系统的设备,并能说出各部分相应的功能。
- (2) 会区分轨道交通外部供电系统的供电方式。
- (3) 会区分不同类型的接触网。
- (4) 会区分接触网的供电方式。

任务 1.1 轨道交通供电系统

轨道交通供电系统从城市电网取得电能,无须单独建设电厂,城市电网也把轨道交通企业看成一个重要用户。因此,与干线电气化铁路一样,轨道交通运营所需用电由国家电网统一供给。

轨道交通供电系统主要由外部供电系统、牵引供电系统、动力照明供电系统、数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统四部分组成。

1.1.1 外部供电系统

发电厂(站)是发出电能的中心,一般可分为火力发电厂、水力发电站和原子能核电站等。为减少线路的电压损失和能量损耗,发电厂的发电机发出的电能,要先经过升压变压器升高电压,然后以 110 kV 或 220 kV 的高压,通过三相传输线输送到区域变电所。

在区域变电所中,电能先经过降压变压器降低 110 kV 或 220 kV 高压的电压等级(如 10 kV 或 35 kV),然后再经过三相传输线输送给本区域内的各用电中心。轨道交通牵引用电既可以从区域变电所高压线路得电,也可以从下一级电压的城市地方电网得电,这取决于系统和城市地方电网的具体情况以及牵引用电容量的大小。

直接从系统高压电网获得电力的轨道交通供电系统,往往需要再设置一级主降压变电所,将系统输电电压(如 110 kV 或 220 kV)降低到 10 kV 或 35 kV,以适应直流牵引变电所的需要。从管理的角度看,主降压变电所可以由电力系统(电业部门)直接管理,也可以归属于轨道交通运营部门。

城市电网外部供电系统如图 1-1 所示,虚线 2 以上,即从发电厂(站)经升压、高压输电网、区域变电所至主降压变电所部分,通常被称为轨道交通供电系统的“外部(或一次)供电系统”。轨道交通企业作为城市电网的重要用户,属于一级负荷,需要引入双路高压电源对其供电系统进行供电。

电源由城市电网引入,根据不同城市的电网构成,采用合适的供电方式。轨道交通供电系统由多条线路组成,用电范围多为几千米到几十千米,采用何种供电方式,与城市电网的构成及轨道交通线路的分布有密切的关系。轨道交通供电系统对城市电网是用户,对轨道交通的各类负荷又是电源。

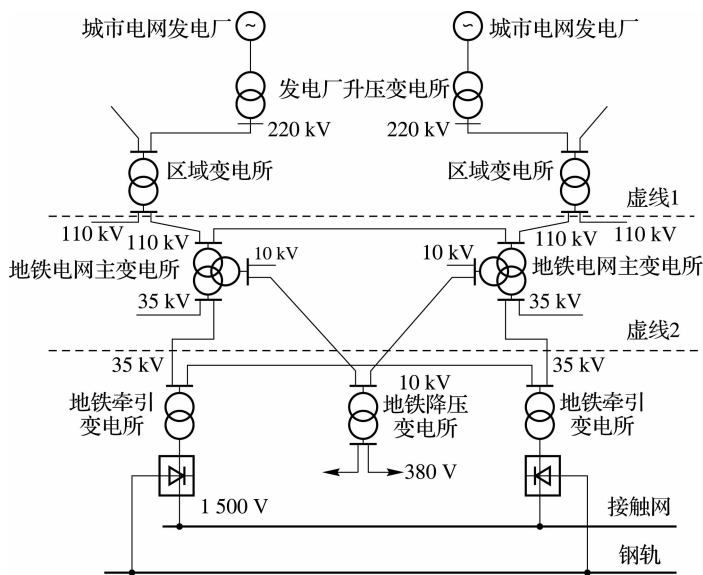


图 1-1 城市电网外部供电系统

城市电网对轨道交通供电系统的供电方式可分为以下三种。

1. 集中供电

由轨道交通专用主变电所构成的供电方案称为集中供电。如图 1-2 所示,沿着轨道交通线路,根据用电容量和轨道交通线路的长短,建设一座或几座轨道交通专用的主变电所。主变电所应有两路独立的进线电源,一般为 110 kV 或 63 kV,由发电厂或区域变电所为其供电。主变电所经过变压后,输出 AC35 kV 或 AC10 kV 的电压等级,为轨道交通的牵引供电系统和动力照明供电系统供电。

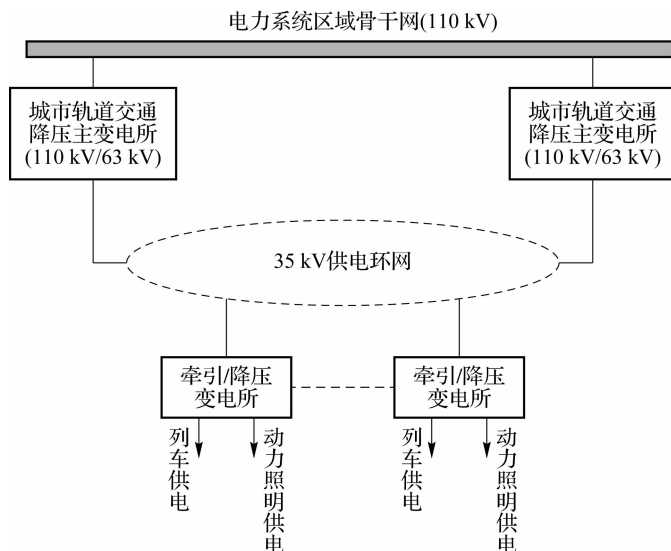


图 1-2 集中供电

上海、香港地铁采用三级电压制集中供电方式(图 1-3),集中供电牵引供电系统的电压



为 35 kV,供配电系统的电压为 10 kV。目前,国内只有少数城市采用这种形式。

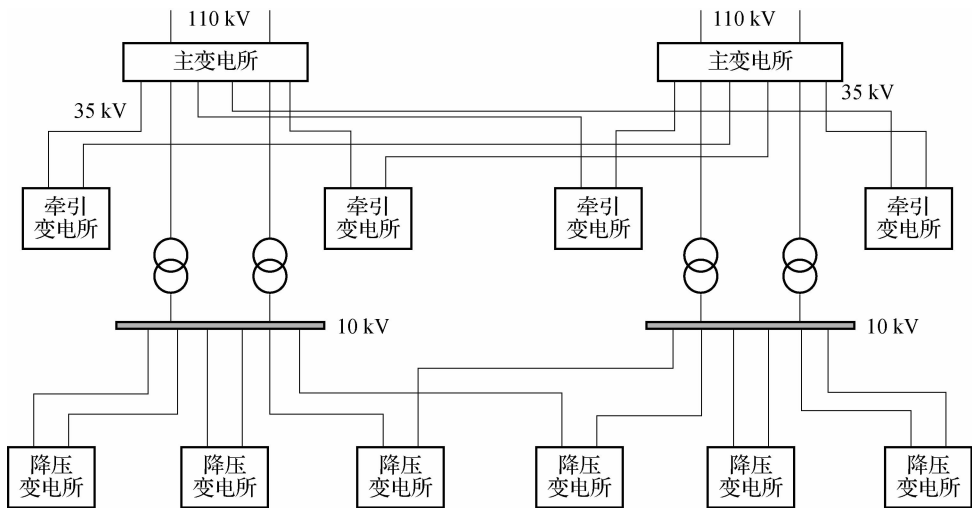


图 1-3 三级电压制集中供电方式

广州地铁采用两级电压制集中供电方式(图 1-4),牵引供电系统和供配电系统的电压均为 33 kV。目前,国内采用集中式供电的城市多为此种形式。

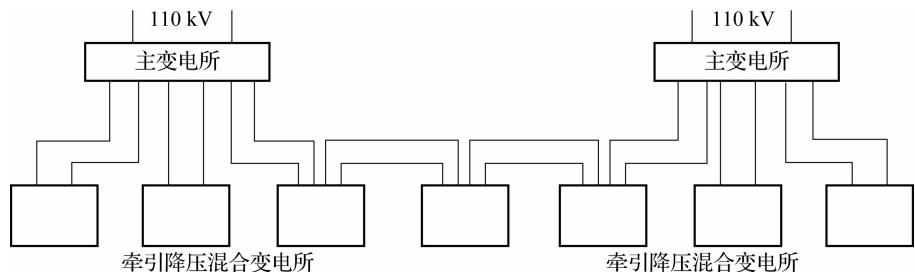


图 1-4 两级电压制集中供电方式

(1)主变电所。城市轨道交通负荷作为一级负荷,主变电所进线一般为双电源。双电源的设计有两种:一种是两路电源均为专用线路,电源可靠性高;另一种是一路电源为专用线路,另一路电源并接于供电线路,与其他用户共享电源。相对来说,并接电源的可靠性虽然较差,但也能满足地铁供电的要求。两路电源分列运行,相互备用。同时,在设计中,通过地铁环网电缆将两座主变电所的母线进行连接,即使两路外部电源同时发生故障,也可以实现主变电所之间的相互支援,提高外部电源的安全可靠性。

主变电所进线电源侧可采用内桥接线或线路变压器组接线(图 1-5),采用何种接线形式,主要考虑外部电源的可靠程度和电力部门的要求。内桥接线的可靠性要略高于线路变压器组接线,主要体现在当一路进线电源故障时,完全不影响地铁供电系统的运行,而此时线路变压器组接线就只能有单台主变压器运行。

主变电所中压侧采用单母线分段接线形式,当其中一台主变压器或一路中压进线不能正常运行时,通过母联开关合闸来保证地铁供电的可靠性。当外部电源不稳定时,通过主变压器有载调压开关来保证地铁电源的稳定性和可靠性。

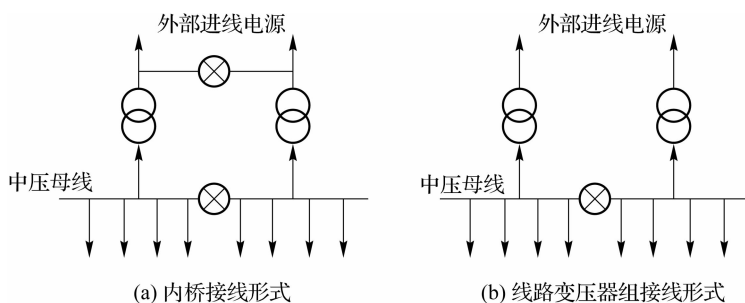


图 1-5 主变电所进线电源侧接线形式

(2)中压供电网络。通过中压母线电缆,在纵向上将上级主变电所和下级牵引变电所、降压变电所连接起来,在横向上把全线的各个牵引变电所、降压变电所连接起来,便构成了中压供电网络,其功能类似于电力系统中的输电线路。

轨道交通的中压交流环网系统既可采用牵引与动力照明相对独立的网络形式,也可采用牵引与动力照明混合的网络形式。对于牵引与动力照明相对独立的网络,牵引供电网络与动力照明网络的电压等级可以相同,也可以不同。供电系统中的中压供电网络应按列车运行的远期通过能力设计,对于互为备用线路,当一路退出运行时,另一路应能承担其一、二级负荷的供电,线路末端电压损失不宜超过 5%。

一个运行可靠、调度灵活的环网供电系统,一般需满足以下设计原则和技术条件:

- ①供电系统应满足经济、可靠、接线简单、运行灵活的要求。
- ②供电系统(含牵引供电)容量按远期高峰小时负荷设计,根据路网规划的设计可预留一定裕度。
- ③供电系统按一级负荷设计,即平时由两路互为备用的独立电源供电,以实现不间断供电。
- ④环网设备容量应满足远期最大高峰小时负荷的要求,并满足当一个主变电所发生故障时(不含中压母线故障),另一个主变电所能承担全线牵引负荷及全线动力照明一、二级负荷的供电。
- ⑤电缆载流量不仅应满足最大高峰小时负荷的要求,而且当主变电所正常运行,环网中一条电缆出现故障时,还能保证轨道交通的正常运行。此时可不考虑主变电所和环网电缆同时发生故障的情况,但需考虑主变电所与一个牵引变电所同时发生故障(三级负荷除外)的情况。

在中压环网电压等级的选取上,国内一般有 AC35/33 kV 和 AC10 kV 两种等级。环网电压高,可相应减少主变电所的个数和降低线路损耗。目前,国内已经开通和即将开通的地铁线路多采用集中供电方式,中压环网电压多采用 AC35/33 kV 等级。

2. 分散供电

在轨道交通沿线,直接由城市电网引入多路地铁所需要的电源而构成的供电系统被称为分散供电,如图 1-6 所示。这种供电方式多为 AC10 kV 电压等级。因为我国各大城市的电网在逐渐取消或改造 AC35/33 kV 这一电压等级,所以要想在几千米到几十千米的范围内引入多路 AC35/33 kV 电源是不可能的。分散供电要保证每座牵引变电所或降压变电所都能获得双路电源。长春轻轨 3、4 号线主要采用分散供电方式。

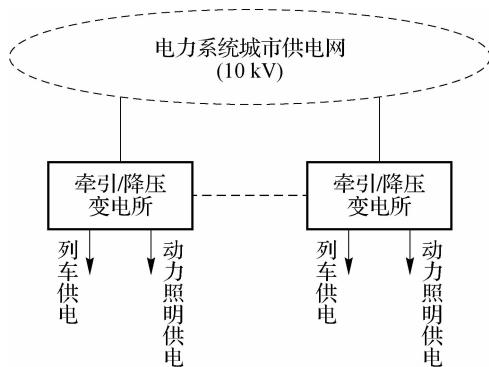


图 1-6 分散供电

采用分散供电方式可以取消地铁主变电所,从而节省主变电所的投资,但是地铁电源系统能否采用这种方式与城市电网的发达程度密切相关。采用集中供电方式可使地铁供电系统与外界的接点减少,便于日后的运营维护。

3. 混合供电

混合供电方式是前两种供电方式的结合,以集中供电为主,个别地段引入城市电网电源作为集中供电方式的补充,使供电系统更加完善和可靠。武汉轨道交通、北京城市轨道交通 1 号线和 2 号线即采用此种供电方式。

1.1.2 牵引供电系统

轨道交通电能由国家电网统一供给,轨道交通电力牵引供电系统如图 1-7 所示。

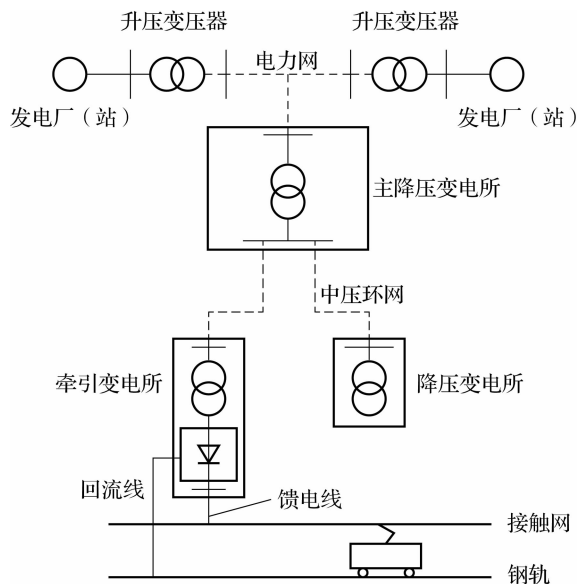


图 1-7 轨道交通电力牵引供电系统

主降压变电所(当它不属于电力部门时)及其以后部分分为以牵引变电所为主的牵引供电系统和以降压变电所为主的动力照明供电系统。

如图 1-8 所示,主降压变电所及其以后部分统称为牵引供电系统,其包括牵引变电所、馈电线、接触网、钢轨及回流线等。在轨道交通牵引供电系统中,电能从牵引变电所经馈电线、接触网输送给电动列车,再从电动列车经钢轨(轨道回路)、回流线流回牵引变电所。由馈电线、接触网、轨道回路及回流线组成的供电网络称为牵引网。牵引供电系统即由牵引变电所和牵引网组成,其中,牵引变电所和接触网是牵引供电系统的主要组成部分。

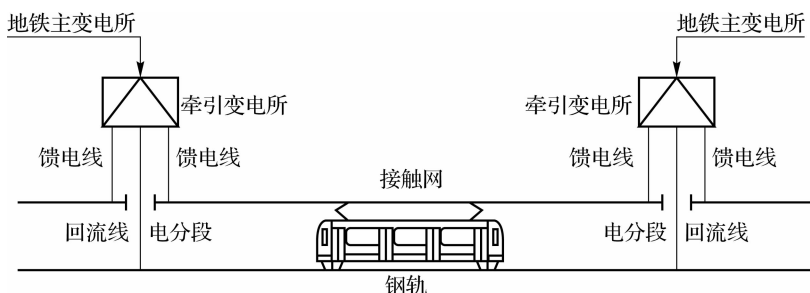


图 1-8 轨道交通牵引供电系统

1. 牵引变电所

牵引变电所是牵引供电系统的核心,一般由进出线单元、变压变流单元和馈出单元构成。其主要功能是将中压环网的 AC35/33 kV 或 AC10 kV 电源经变压变流单元转换为轨道交通列车所需的电能,并分配到上下行区间供列车牵引用。在轨道交通工程中,由于地下土建工程造价较高,因而当地面有条件时,最好将牵引变电所建于地面。但降压变电所由于压损的要求仍应设在车站内,这样可以有效地降低工程造价。

2. 牵引网

(1) 馈电线。馈电线中的“馈”就是“送”的意思,因此,馈电线可以理解为送电线或供电线。馈电线是从牵引变电所向接触网输送牵引电能的导线。

(2) 接触网。接触网是沿列车钢轨架设的一种特殊供电线路,可经电动列车的受电器向其供给电能。接触网是为城市轨道交通车辆运行提供电能的供电设备,机车通过受电弓或集电靴从接触网中得到电能。接触网的特点是电压高、电流大、露天架设、点多线长、没有备用、维护保养复杂、难度大、要求高,其状态好坏直接影响轨道交通的正常运行。

(3) 轨道回路。轨道构成了牵引供电回路的一部分。列车行走时,利用钢轨作为牵引电流回流的电路。当采用跨座式单轨电动车组时,需沿线路专门敷设单独的回流线。

(4) 回流线。供牵引电流返回牵引变电所的导线称为回流线。通过吸流作用,迫使由大地回归的电流,大部分由回流线返回牵引变电所,其回归方向与接触网中的电流方向相反,因而可抵消绝大部分由接触网电流产生的对通信线路的干扰。

1.1.3 动力照明供电系统

动力照明供电系统可为除轨道交通列车以外的其他所有轨道交通用电负荷提供电能,其中事故风机、消防泵、主排水站、售检票机、防灾报警、通信信号、事故照明系统使用一级负荷,这与轨道交通的正常运营密不可分,所以在设计、设备选型和施工过程中都应对动力照明供电系统给予足够的重视。轨道交通降压变电所与城市电网中 10 kV 区域变电所一样,



都是将 10 kV 中压电经变压器变为 380 V 或 220 V 电源供动力照明负荷用电。在引入电源方面,每座降压变电所均从中压环网引入两路电源,有条件时还应从相邻变电所或城市电网区域变电所引一路备用电源;对于特别重要的负荷(如计算机联锁设备等负荷),还应设蓄电池作为备用电源。轨道交通动力照明供电系统如图 1-9 所示。

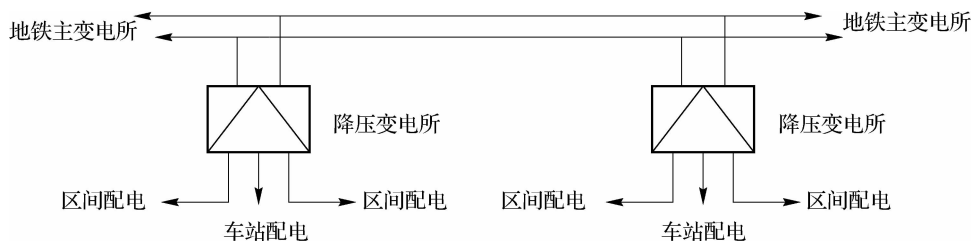


图 1-9 轨道交通动力照明供电系统

1. 降压变电所

降压变电所将三相电源进线电压降压变为三相 380 V 和单相 220 V 交流电,其主要用电设备是通信、信号、防火报警、给排水、照明、通风空调及自动扶梯等系统相关设备。

2. 配电所(室)

配电所(室)仅起到电能分配的作用。降压变电所通过配电所(室)将三相 380 V 和单相 220 V 交流电分别供给动力、照明设备,各配电所(室)为本车站及其两侧区间的动力和照明等设备配电。

地铁车站及区间照明电源采用 380 V/220 V 系统三相五线制系统配电。正常时,工作照明、事故照明均由交流电源供电;当交流电源失去时,事故照明自动切换为蓄电池供电,确保事故期间必要的紧急照明。

3. 配电线路

配电所(室)与用电设备之间的导线为配电线路。

车站设备负荷可分为三级:一级负荷(包括事故风机、消防泵、主排水站、售检票机、防灾报警、通信信号、事故照明)、二级负荷(包括自动扶梯、普通风机、排污泵、工作照明)和三级负荷(包括空调、冷冻机、广告照明、维修电源)。对于一、二级负荷,一般由两路电源供电,当一台变压器故障解列时,另一台变压器可承担全部一、二级负荷。三级负荷由一路电源供电,当一台变压器故障解列时,可根据运营需要自动切除。

1.1.4 SCADA 系统

SCADA 系统由控制中心的电力调度系统(含车辆段的复示系统)、变电所综合自动化系统及联系两者间的通道三部分组成。其中,控制中心的电力调度系统作为一个子系统被纳入综合监控系统(integrated supervision control system, ISCS)。变电所综合自动化系统则被设置在全线的主变电所、牵引降压混合变电所、降压变电所内。跟随所不单独设变电所综合自动化系统,纳入为其供电的主变电所、牵引降压混合变电所或降压变电所内。通信通道是利用综合监控系统组建的骨干传输网。

在车辆段及停车场牵引降压混合变电所内设置的集中监控台设备为值班员提供管理界

面;正线、车辆段和停车场牵引降压混合变电所综合自动化系统接入综合监控系统;综合监控系统与变电所综合自动化系统通信的方式采用冗余以太网,故障时可实现自动切换。

1. SCADA 系统的主要作用

SCADA 系统的作用是保证调度人员在控制中心对供电系统中的主变电所、牵引供电系统及供电系统供电设备的运行状态进行监视、控制及数据采集,直观了解所有运行设备的工作状况,使供电系统安全、可靠、经济地运行。SCADA 系统的作用主要体现在以下三个方面:

(1)对供电系统的安全运行状态进行在线集中监控。当轨道交通供电系统正常运行时,SCADA 系统通过调度管理人员对电网的电压、潮流、负荷、设备运行状态及各项工况指标进行监视和控制,保证供电质量和用户的用电需求。

(2)实现供电系统运行的经济调度。在实现对供电系统安全监控的基础上,通过 SCADA 系统实现电网的经济调度,达到降低损耗、节约电能的目的。

(3)实现供电系统运行的安全分析和事故处理。SCADA 系统对供电系统发生事故之前、之后或发生事故时的信息进行及时采集、分析和处理,缩小事故范围;提供事故处理对策和相应的监控手段,防患于未然;及时处理事故或故障,以减少事故或故障造成的损失。

2. 轨道交通 SCADA 系统的监控对象

轨道交通 SCADA 系统的监控对象包括遥控对象、遥调对象、遥信对象和遥测对象四部分。

(1)遥控是指调度中心向轨道交通沿线被控变电所中的开关电器发送“合闸”“分闸”指令,实行远距离控制操作。

(2)遥调是指监控主站通过命令直接对被控站相关牵引供电设备的工作参数进行远距离调整,如调整变压器的原边电压等。

(3)遥信是指调度中心对轨道交通沿线各变电所中被控对象(如开关电器等)的工作状态信号进行监视。

(4)遥测是指调度中心对轨道交通沿线各变电所中的工作状态参数进行远距离测量。

1.1.5 轨道交通供电系统的功能

轨道交通供电系统应具备安全、可靠、调度方便、技术先进、功能齐全、经济合理的特点,并应具备以下一些功能。

1. 全方位的服务功能

供电系统的服务对象除运送乘客的电动车辆外,还有保证乘客在旅行中有良好卫生环境和秩序的通风换气、空调设施、自动扶梯、自动售检票、屏蔽门、排水泵、排污泵、通信信号、消防设施和各种照明设备。在这个庞大的用电群体中,用电设备有不同的电压等级和电压制式,既有固定的,也有时刻在变化着的,供电系统就是要满足这些不同用途的用电设备对电源的不同需求,使轨道交通供电系统的每种用电设备都能发挥各自的功能和作用,保证轨道交通供电系统能够安全、可靠地运营。

2. 故障自救功能

供电系统无论采用什么样的设备,安全、可靠地供电总是第一位的。供电系统发生任何一种故障,其本身都应有备用措施,以保证轨道交通供电系统的正常运行。供电系统设计以



双电源为主要原则,当一路电源发生故障时,另一路电源应能保证系统的正常供电。例如,主变电所、牵引变电所和降压变电所为双电源、双机组;动力照明的一、二级负荷采用双电源、双回路供电;牵引网同一馈电区采用双边供电(双电源供电)方式,当一座牵引变电所故障解列时,靠两个相邻变电所的过负荷能力对牵引网进行大双边供电,保证列车可以照常运行而不受影响。

3. 自我保护功能

供电系统应有完善、协调的保护措施,供电系统的各级继电保护应相互配合和协调,当供电系统发生故障时,应当只切除故障部分的设备,从而缩小故障范围。供电系统的各级保护应当满足可靠性、灵敏性、速动性、选择性的要求。对牵引供电系统而言,为保证乘客的安全,保护的速动性是第一位的,其保护的 principle 是“宁可误动作,不可不动作”。误动作可以用自动重合闸校正,而保护不动作则很危险,因为直流电弧在不切断电源的情况下可以长时间地维持燃烧,进而威胁乘客安全。由于轨道交通供电系统中压交流侧保护应与城市电网的保护相配合和协调,因此其保护的选择性也受到制约。

4. 防止误操作的功能

供电系统中任何一个环节的操作都有相应的联锁条件,不允许因误操作而导致故障的发生。尤其是对各种隔离开关(无论是电动的还是手动的)或手车式开关的隔离触头,都不允许带负荷操作。防止误操作的联锁条件可以是机械的,也可以是电气的,还可以是电气设备本身所具备的或是操作规程和程序严格规定的。防止误操作是保证供电系统安全、可靠运行所不可缺少的环节。

5. 方便灵活的调度功能

供电系统应能在控制中心进行集中控制、监视和测量,并能根据运行需要,方便、灵活地进行调度,变更运行方式,分配负荷潮流,使供电系统的运行更加经济合理。当供电系统发生故障而使一路或两路电源退出运行时,为保证地铁列车的正常运行,电力调度可以对供电分区进行调度和调整,以达到安全可靠、经济运行的目的。

6. 完善的控制、显示和计量功能

供电系统应能进行本地和远程控制,并可以方便地进行操作转换。供电系统各环节的运行状态应有明确的显示,使运行人员一目了然。各种信号显示应明确,事故信号和预告信号应分别显示。各种电量的测量和电能的计量应准确,便于运行人员查证和分析。牵引用电和动力照明用电应分别计量,以利于对用电指标进行考核和经济分析。在控制中心应对整个供电系统进行控制、信号显示及各种量值的计量统计。

7. 电磁兼容功能

国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)对电磁兼容性(electromagnetic compatibility, EMC)的定义是“设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力”。其中,“任何事物”可以是设备、装置、系统,也可以是有生命的生物或无生命的物体。轨道交通车辆是强电、弱电等多个系统共存的电磁环境,为了使各种设备或系统在这个环境中正常工作,且不对该环境中其他设备、装置或系统构成不能承受的电磁骚扰,各种电气和电子设备的系统内部以及与其他系统之间的

电磁兼容显得尤为重要。供电系统及其设备在地铁这个电磁环境中,首先是作为电磁骚扰源存在的,同时也是敏感设备。在城市轨道的电磁环境中,供电系统与其他设备、装置或系统应是电磁兼容的。在技术上应采取措施抑制骚扰源,消除或减弱电磁耦合,提高敏感设备的抗干扰能力,以达到各系统的电磁兼容,使轨道交通车辆能安全可靠地运行。

任务 1.2 供电制式

电力牵引用于轨道交通供电系统已有 100 多年的历史,随着经济和科学技术的不断发展,用于轨道交通的电力牵引方式出现了许多不同的制式。这里所说的制式,是指供电系统向电动车辆或电力机车供电所采用的电流和电压制式,如直流制或交流制、电压等级、交流制中的频率(工频或低频)及交流制中是单相或三相。

1.2.1 供电制式的发展

1. 直流制式

为了满足轨道交通车辆速度快、能耗小、平稳舒适的运输要求,动力车辆应满足如下要求:

(1)启动加速性能。要求启动加速力大且平稳,即恒定的、大的启动力矩,便于列车快速平稳启动。

(2)动力设备容量利用。对列车的主要动力设备(牵引电动机)的基本性能要求:列车轻载时,运行速度可以高一些;列车重载时,运行速度可以低一些。这样无论列车重载还是轻载,都可以实现对牵引电动机容量的充分利用,因为列车的牵引力与运行速度的乘积为其功率容量,这时近于常数。

(3)调速性能。在调速过程中,既要达到变速的目的,还要尽可能地经济,不要有太大的能量损耗,同时还要容易实现调速。

直流串励电动机的机械特性(转矩与转速的关系特性)符合重载时速度低、轻载时速度高的要求。此外,从直流串励电动机的启动和调速方法看,也是比较容易实现的。为了限制直流串励电动机刚接通电源时启动电流太大和正常运行时为了降速而降低其端电压,最早采用在电动机回路中串联大功率电阻的方法来达到限流和降压的目的。这种方法虽然容易实现,但是会在列车启动和调速过程中造成大量的能量损耗,很不经济。尽管如此,但由于局限于一定时期的技术发展水平,因此直流串励电动机作为牵引动力就成为最早,也是迄今为止被长期采用的形式,这就是供电系统直接以直流电向电动车辆或电力机车供电的电力牵引“直流制式”。

2. 低频单相交流制式

随着矿山和干线电力牵引的发展,列车所需要的功率也越来越大,若采用直流供电制式,则受直流串励电动机端电压不能太高的限制,供电电流很大,导致供电系统的电压损失和能量损耗增大,由此出现了低频单相交流制式。

低频单相交流制式是交流供电制式,交流电通过变压器升降压,因此可以升高供电系统的电压,到了列车以后再经车上的变压器将电压降低到适合牵引电动机应用的电压等级。



由于受到早期整流技术的限制,这种制式采用了在原理上与直流串励电动机相似的单相交流整流子牵引电动机。这种电动机存在整流换向的问题,其困难程度随电源频率的升高而增加。由于采用低频电源使供电系统复杂化,需要由专用低频电厂供电,或由变频电站将国家统一工频电源转变成低频电源再输出,因此低频单相交流制式没有得到广泛应用,只在少数国家的工矿和干线上应用。

3. 工频单相交流制式

工频单相交流制式既保留了交流制可以升高供电电压的长处,又仍然采用直流串励电动机作为牵引电动机。在电力机车上装设的降压变压器和大功率整流设备可将高压电源先降压,再整流成适合直流牵引电动机使用的低压直流电。电动机的调压调速可以通过改变降压变压器的抽头或可控整流装置的电压来实现。工频单相交流制式是当今世界各国干线电气化铁路应用较普遍的牵引供电制式。我国干线电气化铁路即采用这种制式,其额定供电电压为 25 kV。由于供电距离较长,电能在输电线路和接触网中产生电能损耗,使接触网的末端电压降低。为了使接触网的末端电压不低于电力机车的最低工作电压,要求两牵引变电所之间的距离为 40~60 km。牵引变电所馈出母线上的额定电压为 27.5 kV,其实际值需经供电部门计算确定。

4. 三相交流制式

三相交流制式的供电网比较复杂,必须由两根架空接触线和走行轨道构成三相交流电路,两根架空接触线之间又要求高压绝缘,实现起来非常困难,而且投资较大,因此已经被淘汰。

1.2.2 轨道交通供电系统的供电制式

牵引网的供电制式主要指电流制、电压等级和馈电方式。目前,轨道交通的直流牵引电压等级有 DC600 V、DC750 V 和 DC1 500 V 等多种。我国国家标准《城市轨道交通直流牵引供电系统》(GB/T 10411—2005)规定了 DC1 500 V 和 DC750 V 两种电压制式。

牵引网的馈电方式分为架空接触网和接触轨两种基本类型。其中,电压制式与馈电方式是密不可分的。一般架空接触网馈电方式的电压等级采用 DC1 500 V。目前第三轨馈电方式的电压等级主要采用 DC750 V,第三轨馈电方式的电压等级有向 DC1 500 V 发展的趋势。

1. 供电制式的选择原则

(1) 供电制式与客流量及站间距离相适应。客流量是轨道交通设计的基础。通过预测客流量大小,选择适用的电动客车类型和列车编组数量。大运量轨道交通供电系统一般采用 DC1 500 V 电压,中运量轨道交通供电系统可采用 DC750 V 或 DC1 500 V 电压。线路最大站间距离是确定牵引供电电压的重要因素,如果线路有跨海段或跨江段,区间很长且无法设置区间,则牵引变电所的线路应选用 DC1 500 V 电压。表 1-1 为直流牵引供电系统的电压值。

表 1-1 直流牵引供电系统的电压值

单位:V

标称值	最高值	最低值
750	900	500
1 500	1 800	1 000

(2)供电安全可靠。轨道交通是城市交通的骨干,一旦牵引网发生故障,造成列车停运,就会影响市民出行,引起城市交通混乱。因此,安全可靠是选择供电制式最重要的前提条件。

(3)便于安装和事故抢修。所选用的牵引网应便于施工安装和日常维修,一旦牵引网发生故障,应便于抢修,尽快恢复运营。

(4)牵引网的使用寿命长、维修工作量小,是降低轨道交通运营成本的重要条件。

(5)轨道交通是城市的基础设施,应注重环境和景观效果。

(6)工程综合投资成本低。降低工程综合投资成本是轨道交通工程建设必须考虑的重要因素,不仅要考虑供电系统的初次投资成本,还应兼顾线路后期运营成本。由于直流供电制式不可避免地带来杂散电流腐蚀问题,严重影响区间隧道、桥梁及车站结构和沿线金属管线的使用寿命,因此必须考虑其对整个轨道交通工程综合投资成本的影响。

2. 采用直流供电制式的原因

轨道交通几乎毫无例外地都采用直流供电制式。采用直流供电制式的原因有如下几点:

(1)轨道交通电动车辆的功率并不很大,供电半径也不大,因此供电电压不需要太高。

(2)在同样的电压等级下,直流制因为没有电抗压降而比交流制的电压损失小。

(3)轨道交通供电系统的供电线路处在城市建筑群之间,供电电压不宜太高,以确保安全。

(4)大功率半导体整流元件(晶闸管)的出现,使得在直流制电动车辆上采用整流器对直流串励牵引电动机进行调压调速成为可能,它减少了能耗,给直流制增添了新的生命力。

(5)快速晶闸管出现后,由快速晶闸管等组成的逆变器可将直流电逆变成频率可以调节的交流电,解决了多年来想采用结构简单、结实的鼠笼式异步电动机作为牵引电动机的问题。这种用改变频率来改变异步电动机速度的方法(简称变频调速),可使异步牵引电动机的性能满足牵引列车特点的要求。虽然电动车辆上采用的是交流异步牵引电动机,但其供电电压还是直流的,所以还属于直流制式的范畴,这就给直流制的应用提供了一个更广阔的发展空间。

任务 1.3 轨道交通接触网系统

1.3.1 接触网的类型

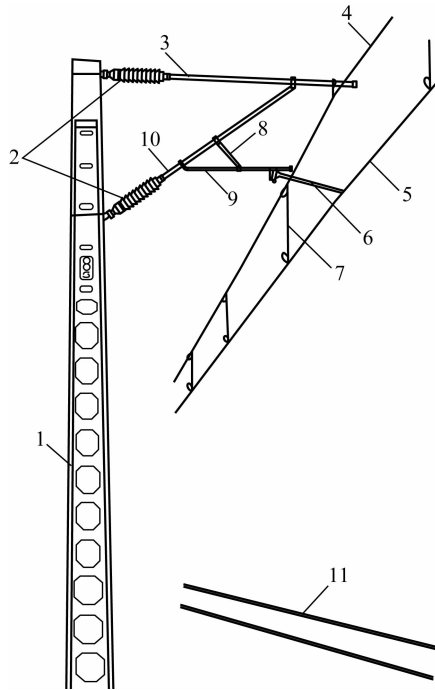
接触网是牵引供电系统的一部分,是一种沿钢轨架设的特殊供电线路,它将从变电所获得的电能传输给电力机车。接触网包括电气化铁路和轨道交通中向电力机车提供电能的多种类型的特殊供电线路,按其结构可分为架空柔性接触网、架空刚性接触网和接触轨。其中,架空柔性接触网和接触轨适用于地下线路、地面线路及高架线路,架空刚性接触网适用于地下线路。

1. 架空柔性接触网

架空柔性接触网是沿着电气化铁路或轨道交通线路上空架设的一条特殊形式的输电线路,它由接触悬挂、支持装置、定位装置、支柱与基础等几部分组成,如图 1-10 所示。它的优



点是投资少,缺点是稳定性差、维护成本高、需要占用较大空间。



1—支柱; 2—棒式绝缘子; 3—平腕臂; 4—承力索; 5—接触线; 6—定位器;
7—吊弦; 8—定位管支撑; 9—定位管; 10—单耳腕臂; 11—钢轨。

图 1-10 架空柔性接触网的组成

因牵引电流大,故架空柔性接触网的主线采用双接触线及双承力索,辅助馈线与接触线和承力索平行布置,使整个系统具有适当的电流分配,如图 1-11 所示。



图 1-11 轨道交通架空柔性接触网

2. 架空刚性接触网

刚性悬挂是一种将接触导线夹装在汇流排上的悬挂方式。架空刚性接触网由支持装置、绝缘子、汇流排和与受电弓接触的接触线组成,一般用于隧道段。架空刚性接触网是将传统的接触线夹装在汇流排中,依靠汇流排自身的刚性使得接触网导线保持在同一安装高

度,从而取消链形悬挂承力索,使接触悬挂系统具备最小的结构高度,最大限度地利用有限的悬挂空间。刚性悬挂系统中的接触导线及汇流排不受张力作用,与柔性接触悬挂系统相比,无断线的可能。

刚性悬挂接触导线一般采用铜银导线,与柔性接触悬挂所采用的接触导线相同。导线通过特殊的机械镶嵌于Π型汇流排的下部(图 1-12),或通过专用夹板固定于 T 型汇流排的下部,与汇流排一起组成接触悬挂。刚性悬挂的最大优点在于可以省去柔性悬挂中的承力索和辅助馈线,取消张力补偿装置,使接触网的结构变得简单、紧凑,极大地方便了运营管理和维修。刚性悬挂在地面与隧道交汇段采用刚柔悬挂过渡。

3. 接触轨

接触轨是采用钢轨或者铺设第三根钢轨将电能传输到地铁和轨道交通供电系统中的电力牵引车辆上的装置,主要由钢铝复合轨(包括铝轨本体和不锈钢带)、膨胀接头、端部弯头等相关部件及绝缘支撑装置组成,如图 1-13 所示。接触轨通过集电靴将电能传输给电力机车。

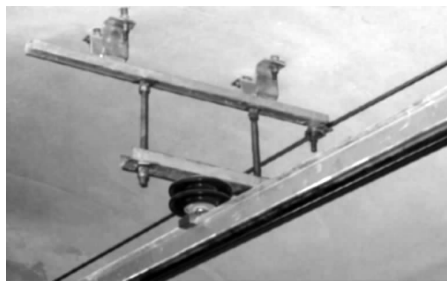


图 1-12 Π型刚性悬挂



图 1-13 接触轨

根据集电靴从接触轨的取流方式不同,接触轨的安装方式可分为上接触式、下接触式、侧面接触式三种,如图 1-14 所示。上接触式接触轨安装在专用绝缘子上,工字形轨底朝下;受电靴自上与之接触受电。上接触式的优点是固定方便,缺点是受电靴在其上面滑行,无法加防护罩。下接触式接触轨轨底朝上,由绝缘体紧固在弓形肩架上,肩架固定在轨枕一侧。其优点是可以加装防护罩,对工作人员较为安全。侧面接触式接触轨的轨头端面朝向走行轨,受电靴从侧面受流。

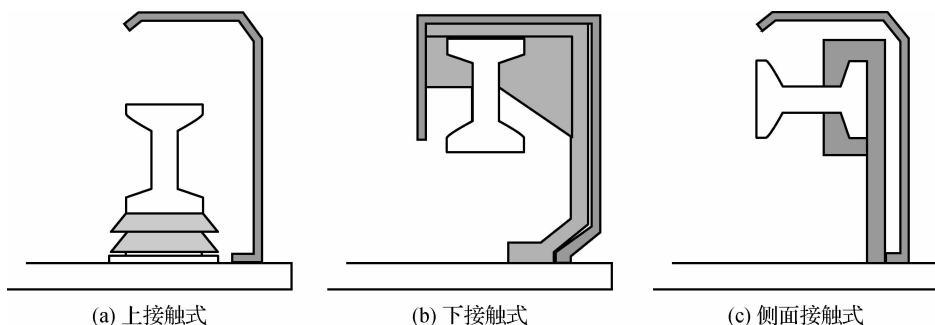


图 1-14 接触轨的安装方式

1.3.2 接触网的供电方式

轨道交通由于采用直流供电制式,其接触网的供电方式主要有单边供电、双边供电、大



双边供电等。电气化铁路由于采用工频单相交流制式,其接触网的供电方式主要有单边供电、越区供电、并联供电等。

1. 单边供电

在两个牵引变电所之间将接触线分成两个供电分区,每个供电分区又称为供电臂。正常情况下,两个相邻供电臂之间的接触网在电气上是绝缘的,通常采用分段绝缘器(或绝缘锚段关节)进行电气隔离,如图 1-15 所示。每个供电分区只从一端的牵引变电所获得电能的供电方式称为单边供电。

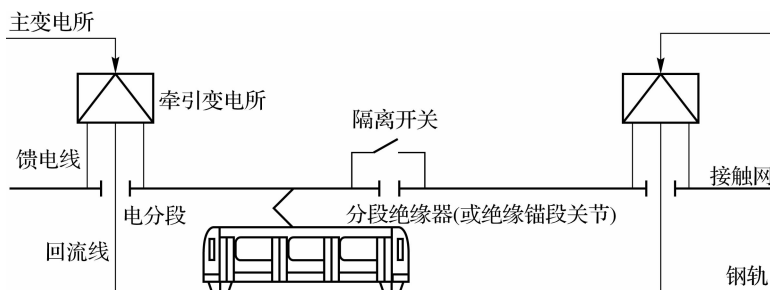


图 1-15 单边供电

单边供电时,相邻供电臂在电气上独立,运行灵活;接触网发生故障时,只会影响本供电分区,故障范围小;牵引变电所馈线保护装置较简单。单边供电不仅是我国电气化铁路主要采用的形式,在轨道交通车辆段(车场线)中也被普遍采用。

2. 越区供电

在单边供电接触网线路中,当某一牵引变电所因故障不能正常供电时,故障变电所担负的供电臂经分区亭中的开关设备与相邻供电臂接通,由相邻牵引变电所进行临时供电,这种供电方式称为越区供电,如图 1-16 所示。由于越区供电增大了该变电所主变压器的负荷,对电器安全和供电质量影响较大,因此只能在较短时间内实行越区供电。越区供电是避免中断运输的临时性措施。

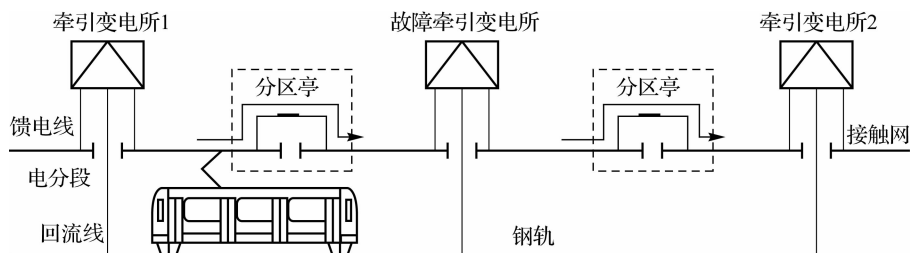


图 1-16 越区供电

3. 双边供电

若两个供电分区通过开关设备在电路上连通,则两个供电分区可同时从两个牵引变电所获得电能,这种供电方式称为双边供电,如图 1-17 所示。双边供电可提高接触网的电压水平,减少电能损耗,但馈线及分区亭的保护及开关设备相对比较复杂,故障范围较大。双边供电方式主要应用于轨道交通正线,部分车辆段(车场线)也采用这种供电方式。

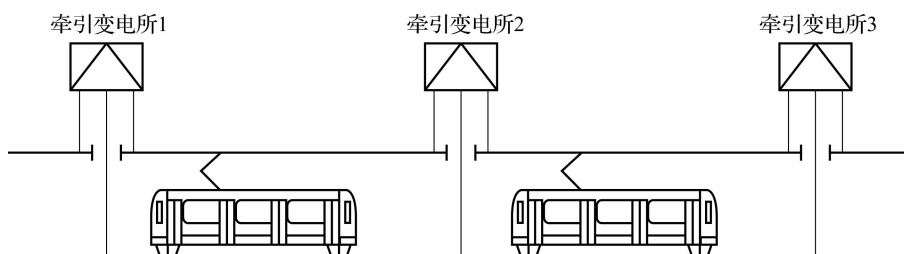


图 1-17 双边供电

4. 大双边供电

在双边供电接触网线路中,若遇到特殊情况(某中间牵引变电所退出运行),牵引变电所越过自己的供电分区而为另外变电所的供电分区进行供电的方式称为大双边供电,如图 1-18 所示。大双边供电是一种特殊的运行方式,主要解决双边供电接触网线路中某一变电所故障所造成的停电问题。

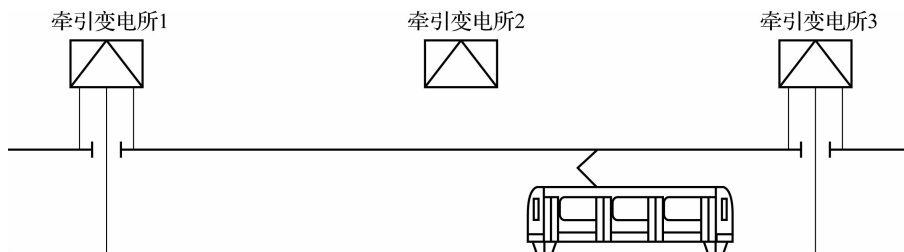


图 1-18 大双边供电

5. 并联供电

复线区段的供电方式与上述基本相同,但每一供电臂分别向上、下行接触网供电,因此牵引变电所的馈出线有四条。同一侧供电臂的上、下行线通过开关设备(或者电连接线)实现并联供电。并联供电可提高供电臂的末端电压,但是当接触网发生事故时,并联供电影响范围大,运行检修不够灵活。复线区段的单边供电和并联供电目前我国都有使用。复线区段的并联供电如图 1-19 所示。

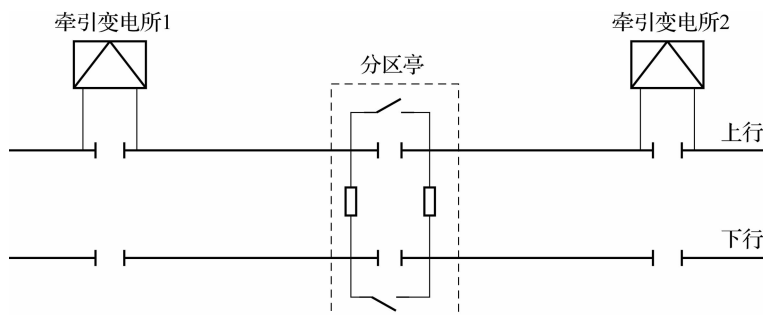


图 1-19 复线区段的并联供电



1.3.3 接触网的基本要求

接触网是轨道交通的主要供电装置之一,是通过与电动列车受电弓直接接触将电能传送给电力机车的一种特殊形式的输电线路,是一种无备用且易损耗的户外供电装置,经常受冰雹、暴雨、暴雪、大风等恶劣气候条件和周围环境的影响,一旦发生故障将中断牵引供电,影响电动列车的正常运行。因此,接触网在设计方面和日常维护方面应满足以下基本要求:

(1)在任何条件下,接触网均不对人员和设备构成安全威胁。接触网带电体与非带电体之间必须有充分的电气绝缘间隙,并具有能有效防止人员触电的措施和方法。

(2)与一般架空电力输电线相比,接触网的电负荷具有很大的波动性和不确定性,接触网系统发生短路事故的概率更大一些。因此,接触网系统应具备充足的过负荷能力和承载短路电流的能力。

(3)接触网的供电电压和电能损失必须控制在可承受的范围之内,馈线上的网点电压及供电臂的末端电压不应超出系统所允许的最高电压值和最低电压值。

(4)接触网的线索和设备均要承受一定的机械负荷。在接触网寿命期内,线索和设备在设计条件下均应处于安全状态。

(5)接触网唯一的服务对象是受电弓,弓网之间有严格的机电匹配关系,不同型号的弓网配合会表现出不同的相互作用特性。在进行弓网系统设计时,应考虑弓网间彼此相适应的结构形式和机电特性。当选定受电弓后,接触网应有与该型号受电弓相适应的结构形式和机电特性。与之相对应,接触网在设计施工完成后,就应由与之相适应的受电弓来运行。受电弓的静态特性、有效工作范围、弓头几何尺寸、滑板特性、运营方式均应与已有接触网相适应。

(6)接触网是露天供电设施,气候及环境污染对接触网的技术性能有决定性影响。接触网必须能适应气候的变化,在设计条件下,温度、湿度、雪雨风霜、冰雾雷电均不应造成接触网设备的损坏,也不应影响接触网功能的正常发挥。

(7)接触网是无备用设备,组成接触网的线索和设备以及接触网整体都必须具备良好的可靠性、可用性和安全性。

(8)接触网的几何参数是以轨道线路中心线和轨平面构成的直角坐标系为基准的,轨道线路的位置、曲线半径、外轨超高、竖曲线半径、线路坡度及其变化率、钢轨不平顺度等参数对弓网的相互作用有重大影响。线路参数和接触网参数的调整必须相互协调、同步进行。接触网所有设备的安装位置均应满足铁路限界和绝缘安全的要求。

(9)接触网应与四周的环境相协调,对动物、植物、自然环境及文化环境应有必要且合理的防护措施。

总而言之,要求接触网无论在何种条件下都能给电动列车提供符合要求的电能,使电动列车安全可靠地运行。在符合上述要求的情况下,接触网尽可能做到零件标准化、结构简约化、施工精细化、维修简便化、投资减低化且便于新技术的应用。

技能训练

技能训练 1-1 认识轨道交通供电系统

授课地点:轨道交通主变电所、牵引降压混合变电所、车站、控制中心(或校内供配电模拟仿真实训室)。

授课形式:分组教学。

授课教师:校内专任教师、轨道交通企业供电段技术员。

1. 实验目的

(1)掌握轨道交通外部供电系统、牵引供电系统、动力照明供电系统及 SCADA 系统的设备组成及功能。

(2)会区分不同线路外部供电系统的供电方式。

(3)会区分车站设备的负荷等级。

2. 实验设备及工具

(1)实验设备。主变电所设备、牵引降压混合变电所设备、车站动力照明设备、控制中心 SCADA 系统终端。

(2)实验工具。防护用具(安全帽、绝缘靴、绝缘手套)。

3. 实验内容

(1)认识轨道交通外部供电系统、牵引供电系统、动力照明供电系统及 SCADA 系统。

(2)认识线路外部供电系统的供电方式。

(3)认识车站设备的负荷等级。

4. 实验步骤

(1)认识轨道交通外部供电系统、牵引供电系统、动力照明供电系统及 SCADA 系统,并填写表 1-2。

表 1-2 认识轨道交通外部供电系统、牵引供电系统、动力照明供电系统及 SCADA 系统

①认识外部供电系统	设备名称	位置 (××市×号线)	进线电压 等级	输出电压 等级	进线电源侧 接线形式	数 量
	主变电所					
②认识牵引供电系统	牵引变电所					
	设备名称	组 成		功 能		
	牵引网					
③认识动力照明供电系统	设备名称	位置 (××市×号线)	进线电压 等级	输出电压 等级	进线电源侧 接线形式	数 量
	降压变电所					
	配电所(室)					



续表

	设备名称	功 能
④认识 SCADA 系统	控制中心的电力调度系统	
	变电所综合自动化系统	
	通信链路	

(2)认识线路外部供电系统的供电方式,并填写表 1-3。

表 1-3 认识线路外部供电系统的供电方式

供电方式	线路名称	特 点
集中供电	_____市_____号线	
分散供电	_____市_____号线	
混合供电	_____市_____号线	

(3)认识车站设备的负荷等级,并填写表 1-4。

表 1-4 认识车站设备的负荷等级

负荷等级	车站设备的名称	特 点
一级负荷		
二级负荷		
三级负荷		

5. 注意事项

- (1)严格按照轨道交通企业工作制度(实训室管理制度)完成训练任务。
- (2)禁止在设备带电的状态下进行相关操作。

技能训练 1-2 认识轨道交通接触网系统

授课地点:轨道交通正线、车辆段(停车场)或校内接触网实训室。

授课形式:分组教学。

授课教师:校内专任教师、轨道交通企业供电段技术员。

1. 实验目的

- (1)掌握轨道交通接触网设备的组成及功能。
- (2)会区分不同线路接触网的供电方式。

2. 实验设备及工具

- (1)实验设备。正线、车辆段(停车场)接触网设备。

(2)实验工具。防护用具(安全帽、绝缘靴、绝缘手套)。

3. 实验内容

- (1)认识城市轨道交通接触网设备。
- (2)认识不同线路接触网的供电方式。

4. 实验步骤

(1)认识城市轨道交通接触网设备,并填写表 1-5。

表 1-5 认识城市轨道交通接触网设备

	电压等级	应用线路	设 备	功 能
①认识架空 柔性接触网			支柱与基础	
			支持装置	
			定位装置	
			接触悬挂	
②认识架空 刚性接触网	电压等级	应用线路及 汇流排类型	设 备	功 能
			支持定位装置	
			接触悬挂	
③认识 接触轨	类 型	特 点		
	上接触式			
	下接触式			
	侧面接触式			

(2)认识不同线路接触网的供电方式,并填写表 1-6。

表 1-6 认识不同线路接触网的供电方式

供电方式	工作原理	优 点	缺 点	应 用
单边供电				
越区供电				
双边供电				
大双边供电				
并联供电				

5. 注意事项

- (1)严格按照轨道交通企业工作制度(实训室管理制度)完成训练任务。
- (2)禁止在设备带电的状态下进行相关操作。



思考与练习

1. 单项选择题

- (1) 在外部供电系统中,由轨道交通专用主变电所构成的供电方案称为()。
- A. 集中供电 B. 分散供电 C. 混合供电 D. 单边供电
- (2) 主变电所应有()独立的进线电源。
- A. 一路 B. 两路 C. 三路 D. 四路
- (3) 在轨道交通沿线,直接由城市电网引入多路地铁所需要的电源而构成的供电系统被称为()。
- A. 集中供电 B. 分散供电 C. 混合供电 D. 单边供电
- (4) 北京城市轨道交通 1、2 号线采用()供电方式。
- A. 集中供电 B. 分散供电 C. 混合供电 D. 单边供电
- (5) ()是从牵引变电所向接触网输送牵引电能的导线。
- A. 馈电线 B. 接触网 C. 轨道回路 D. 回流线
- (6) ()是沿列车走行轨架设的一种特殊供电线路,可经电动列车的受电器向其提供电能。
- A. 馈电线 B. 接触网 C. 轨道回路 D. 回流线
- (7) 供牵引电流返回牵引变电所的导线称为()。
- A. 馈电线 B. 接触网 C. 轨道回路 D. 回流线
- (8) 我国电气化铁路采用单相工频()交流制式。
- A. 25 kV B. 27.5 kV C. 750 V D. 1 500 V
- (9) 在电气化铁路中,牵引变电所馈出母线上的额定电压为()。
- A. 25 kV B. 27.5 kV C. 750 V D. 1 500 V
- (10) 事故风机、消防泵、主排水站、售检票机、防灾报警、通信信号、事故照明系统使用()负荷。
- A. 一级 B. 二级 C. 三级 D. 四级

2. 多项选择题

- (1) 轨道交通供电系统主要由()组成。
- A. 外部供电系统 B. 牵引供电系统
C. 动力照明供电系统 D. SCADA 系统
- (2) 由发电厂的发电机发出的电能要先经过升压变压器升高电压,然后以()或()的高压通过三相传输线输送到区域变电所。
- A. 110 kV B. 220 kV C. 10 kV D. 380 V
- (3) 由()组成的供电网络称为牵引网。
- A. 馈电线 B. 接触网 C. 轨道回路 D. 回流线
- (4) 牵引供电系统由牵引变电所和牵引网组成,其中()和()是牵引供电系统的主要组成部分。

A. 牵引变电所 B. 接触网 C. 轨道回路 D. 回流线

(5) 降压变电所将三相电源进线电压降压变为单相()和三相()交流电。

A. 110 kV B. 220 kV C. 220 V D. 380 V

(6) 轨道交通 SCADA 系统的监控对象包括()。

A. 遥控对象 B. 遥调对象 C. 遥测对象 D. 遥信对象

(7) 我国国家标准《城市轨道交通直流牵引供电系统》规定了()和()两种电压制式。

A. AC25 kV B. AC10 kV C. DC1 500 V D. DC750 V

(8) 架空柔性接触网是沿铁路上空架设的一条特殊形式的输电线路,它由()等几部分组成。

A. 接触悬挂 B. 支持装置 C. 定位装置 D. 支柱与基础

(9) 轨道交通接触网的供电方式主要有()等。

A. 单边供电 B. 双边供电 C. 大双边供电 D. 并联供电

(10) 电气化铁路由于采用工频单相交流制式,其接触网的供电方式主要有()等。

A. 单边供电 B. 越区供电 C. 大双边供电 D. 并联供电

3. 判断题

(1) 主变电所进线电源侧可采用内桥接线或线路变压器组接线。 ()

(2) 轨道交通的中压交流环网系统必须采用牵引与动力照明相对独立的网络形式。 ()

(3) 采用分散供电方式可使地铁供电系统与外界的接点减少,便于日后的运营维护。 ()

(4) 牵引变电所是牵引供电系统的核心。 ()

(5) 地铁车站及区间照明电源采用 380 V/220 V 三相五线制系统配电。 ()

(6) 接触轨和柔性接触网适用于地下线路、地面线路及高架线路,刚性接触网适用于高架线路。 ()

(7) 架空柔性接触网的缺点是稳定性差、维护成本高、需要占用较大空间。 ()

(8) 刚性悬挂是一种将接触导线夹装在汇流排上方的悬挂。 ()

(9) 单边供电是一种特殊的运行方式,主要解决双边供电接触网线路中某一变电所因故障而造成的停电问题。 ()

(10) 遥测是指调度中心对轨道交通沿线各变电所中的工作状态参数进行远距离测量。 ()

4. 简答题

(1) 简述 SCADA 系统的主要作用。

(2) 简述轨道交通供电系统的功能。

(3) 简述供电制式的选择原则。

(4) 简述轨道交通采用直流制式的原因。

(5) 简述接触网的基本要求。