

第三章 城市轨道交通供电系统

第一节 概 述

城市轨道交通的供电系统是负责为其正常运营提供所需电能的重要部门。城市轨道交通列车是电力牵引的电动列车，其动力是电能；此外，为运营服务的辅助设施包括照明、通风、空调、排水、通信、信号、防灾报警、自动扶梯等，也都依赖并消耗电能。在运营中，供电一旦中断不仅会造成地铁运输的瘫痪，而且还会危及乘客生命安全和造成财产的损失。因此高度安全、可靠而又经济合理的供给电力是城市轨道交通正常运营的重要保证和前提。

城市轨道交通是一个重要的供电用户，不同于一般的工业和民间供电。根据其重要性应规定为一级负荷。一级负荷规定应由两路独立的电源供电，当任何一路电源发生故障中断供电时，另一路应保证城市轨道交通一级重要负荷的全部用电需要。

城市轨道交通供电系统一般包括高压电源系统、牵引供电系统和动力照明供电系统，如图 3.1 所示。

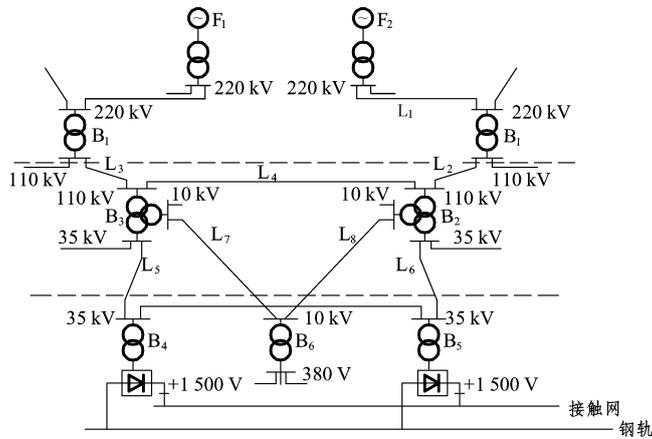


图 3.1 供电系统

F_1, F_2 —城市电网发电厂； $L_1 \sim L_9$ —传输线； $B_1 \sim B_3$ —主变电所；
 B_4, B_5 —牵引变电所； B_6 —降压变电所

一、高压供电系统

高压供电系统是城市电网对轨道交通系统内部变电所的供电方式，有集中、分散和混合三种供电方式。采用何种方式的高压供电系统一般视各城市的情况而定。

(一) 集中式供电

沿城市轨道交通线路，根据用电容量和线路的长短，设置专用主变电所。主变电所有两路独立的 110 kV 电源，由主变电所变压为内部供电系统所需的电压级，一般为 10 kV 或 35 kV。主变电所主接线如图 3.2 所示。

我国上海、广州及香港地铁即为此种供电方式。

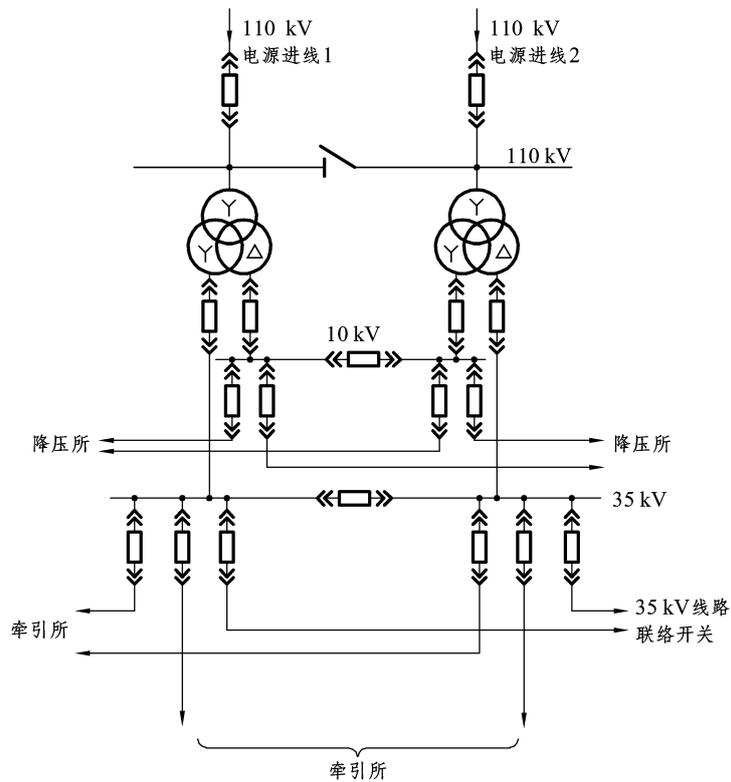


图 3.2 主变电所的主接线（内桥接线类型）

（二）分散式供电

在城市轨道交通线路沿线直接由城市电网引入多路电源，电源电压等级一般为 10 kV，供给各牵引变电所。分散式供电应保证每座牵引变电所和降压变电所皆能获得双路电源。

（三）混合式供电

集中式和分散式两种供电方式的结合，以集中式供电为主，个别地段引入城市电网电源作为集中式供电的补充，使供电系统更加完善和可靠。

北京地铁 1 号线和环线即为此种供电方式。

二、牵引供电系统

牵引供电系统供给城市轨道交通电动车辆运行所需的电能，该系统的组成及相关内容在本章第二节中将作详细介绍。

三、动力照明供电系统

动力照明供电系统由降压变电所及动力照明配电所(室)组成。

(一) 降压变电所

降压变电所将三相电源进线电压降为三相 380 V 交流电。一般每个车站均应设降压变电所；地下车站负荷较大，一般设于站台两端；负荷较小时可以几个车站合设一个。可以将降压变电所附设在某个牵引变电所之中，构成牵引与降压混合变电所(例如地下车站一端的降压变电所)。

(二) 动力照明供电

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)对本车站及其两侧区间动力和照明等设备供电。

动力负荷有以下三大类。

1. 一类负荷

事故风机、消防泵、主排水站、售检票机、防灾报警、通信信号和事故照明。

2. 二类负荷

自动扶梯、普通风机、排污泵和工作照明。

3. 三类负荷

空调、冷冻机、广告照明和维修电源。

对于一、二类负荷，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、二类负荷。三类负荷由一路电源供电，当变压器故障解列时，可根据运营需要自动切除。

照明电源采用 380/220 V 系统配电。正常时，工作、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。

第二节 牵引供电系统

牵引供电系统由牵引变电所和牵引网组成。牵引网是接触网、馈电线、轨道和回流线的总称，接触网又分为架空线式和接触轨式。图 3.3 以架空线式地铁为例，介绍了牵引供电系统的基本组成。

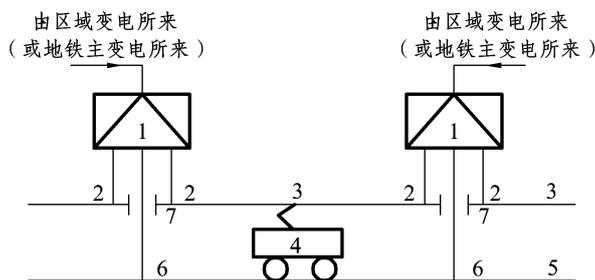


图 3.3 地铁牵引供电系统示意图

1—牵引变电所；2—馈电线；3—接触网；4—电动列车；5—钢轨；6—回流线；7—电分段

一、牵引变电所

由于城市轨道交通列车（车辆）是以一定的速度沿区间运行的，供给一定区段内牵引电能的变电所称为牵引变电所。

牵引变电所从城市轨道交通供电系统中的主变电所获得电能，经过降压和整流变成车辆所需要的直流电。牵引变电所的位置和容量，应根据运行高峰小时的车流密度、车辆编组及车辆形式通过牵引供电计算，经多方案比较后确定。牵引变电所应尽可能的设在地面，这样投资小，运营费用低，运行管理方便。但城市轨道交通多在人口周密，商业繁华的地区通过，城市用地十分紧张；因此，常将地下线路的牵引变电所和降压变电所合建于地下车站的站台端，形成牵引降压混合变电所。相邻两牵引变电所的距离一般为 2~4 km。

牵引变电所内应留有大型设备的进出口和运输通道，应考虑满足通风、散热、防火、防雷电的要求。

（一）牵引变电所的主接线

牵引变电所的主接线如图 3.4 所示。

牵引变电所从主变电所（或区域变电所）获得电能，两路 35 kV 进线接入牵引变压器。牵引变压器一般采用三线圈变压器，两个二次线圈和整流器组成多相整流，可以获得比较平滑的直流电，并可降低交流正弦波形畸变和谐波干扰的问题。整流器输出的直流电正极（+）经直流高速空气开关接到直流侧的正母线上（图 3.4 中的 +1 500 V），负极（-）经开关接到负母线上。接在正母线上的馈线经直流高速开关将电送到隔离开关后再送到接触网（轨）上。负母线经开关与回流线和走行钢轨接通。城市轨道交通电动列车（车辆）的受流器与接触网（轨）接触滑行时，即获得直流电。

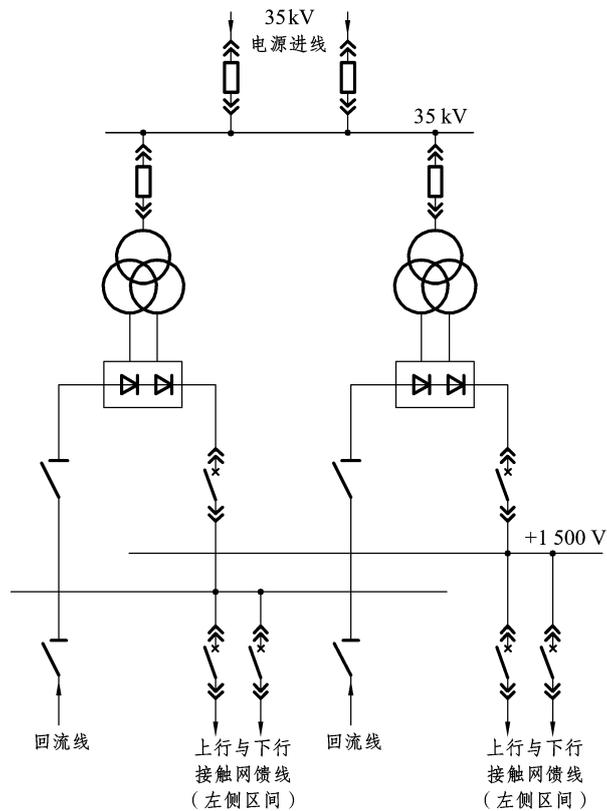


图 3.4 牵引变电所的主接线

(二) 牵引变电所的保护

1. 交流电源侧保护

交流电源侧应具有定时限和过流速断保护。

2. 整流机组保护

整流机组通常由一次侧交流断路器作全电流保护，该保护由瞬时过电流、定时限过电流和反比延时过负荷等阶段保护。此外，还有整流变压器瓦斯保护、正母线接地短路保护、及操作过电压保护等。

3. 直流侧保护

直流侧保护采用快速空气开关保护，开关的跳闸信号采用电流变化率，即在最大值出现之前，根据电流量增加的速率提前给出跳闸信号，这种过电流保护方法称为电流增加 (ΔI) 保护。

二、牵引网

牵引网是牵引供电系统的重要组成部分，它是城市轨道交通供电系统中向电动列车（车辆）供电的直接环节。

（一）牵引网的组成

牵引网包括了接触网、钢轨回路（包括大地）、馈电线和回流线。如图 3.3 所示。

- （1）接触网：经过电动列车的受电弓（受流器）向电动列车供给电能的导电网。
- （2）馈电线：从牵引变电所向接触网输送牵引电能的导线。
- （3）回流线：用以供牵引电流返回牵引变电所的导线。
- （4）电分段：为便于检修和缩小事故范围，将接触网分成若干段每一段称为电分段。
- （5）钢轨：在牵引网中，利用走行钢轨作为牵引电流回流电路的一部分。

（二）接触网

接触网有接触轨式和架空线式两种形式。

1. 接触轨式

接触轨是沿着走行轨道一侧平行铺设的附加第三轨，故又称第三轨式接触网。早期的城

市地铁都采用低电压的直流第三轨受流，如 1863 年开通的伦敦地铁 (DC 630 V)、1904 年开通的纽约地铁 (DC 625 V) 以及 1935 年开通的莫斯科地铁 (DC 825 V)。后来第三轨式接触网的电压多采用 IEC 标准，为 DC 600 V、DC 750 V，少数采用 DC 1 500 V。我国的标准电压为 DC 750 V 和 DC 1 500 V 两种。国内大部分第三轨式接触网电压为 DC 750 V，广州地铁 4 号线采用 DC 1 500 V 第三轨式接触网，这种高压第三轨受流，作为一种新技术，发展前途很大。

采用第三轨式接触网的优点是电动车辆受电靴与第三轨接触面较大且对其磨损极小，故维护简单；另外修建地下线可降低净空，减小开挖土方。

第三轨式接触网是一种传统的刚性接触网，采用电导率较高的钢轨制成。但若采用 DC 750 V 电压，输电距离有限，为弥补这一缺陷，目前世界上已有 60 多个城市采用钢铝复合接触轨代替低碳钢接触轨。这种钢铝复合轨是由不锈钢带通过机械方法与铝合金型材料结合而成的。

钢铝复合接触轨具有以下技术优势：一是电导率高，电压降及牵引能耗成比例下降，供电距离可增加 1.4 倍，适当减少了牵引变电所的数量；二是接触面光滑、耐腐蚀、耐磨耗，延长接触轨与受流器的寿命；三是重量轻，便于施工安装。武汉市轨道交通 1 号线一期工程在国内首次采用国际上最为先进的钢铝复合接触轨下部受流方式，其重量轻、电阻小、稳定性高的优点，能充分保证整条线路的能源供应。广州地铁 4 号线 (DC 1 500 V)、北京地铁 5 号线、天津地铁 1 号线也采用钢铝复合轨。今后，新上的轨道交通项目采用钢铝复合轨已成为趋势。

第三轨式接触网，其接触方式有上接触式、下接触式和侧面接触式三种，上接触式和下

接触式如图 3.5 所示。

上接触式亦称为上部受流。受流器滑靴从上压向接触轨轨头，接触轨顶面受流。受流器的接触力是由向下作用的弹簧的压力进行调节的，受流平稳。上接触式施工作业简便，可以在轨头上部通过支架安装不同类型的防护板。但该接触方式的接触轨表面容易附着杂物、粉尘、冰雪等，对列车取流会产生一定的影响；另外，该方式只能从顶部和线路外侧对接触轨进行防护，故防护不严密，安全性稍差。

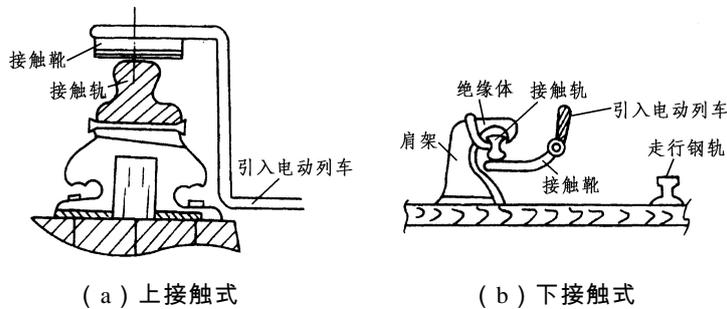


图 3.5 接触轨集电布置图

下接触式亦称下部受流。下接触式的第三轨的轨头朝下，通过绝缘肩架、橡胶垫、扣板收紧螺栓、支架等安装在底座上。下接触式的优点是防护罩从上部通过橡胶垫直接固定在接触轨周围，安全性能好。此外，由于下部受流方式中列车受流器的上抬力与接触轨的挠度方向相反，因而有助于提高受流质量，并可以在挠度允许范围内增大接触轨支架的间距，减少其数量，从而弥补其安装结构复杂、费用较高的不足。显然，若采取接触轨方式，下接触式当为首选。

侧面接触式亦称侧面受流。侧面接触式就是将接触轨的轨头端面朝向走行轨，集电靴从侧面受流。侧面受流亦存在防护不够严密、安全性稍差的问题。

跨座式单轨交通车辆采用侧面接触式受流，其受流器装在转向架下部，接触轨装在轨道

梁上。需要说明的是，重庆轻轨 2 号、3 号线属侧面受流的跨座式轨道交通，采用的是侧面受流刚性接触网，亦称刚性接触轨系统，其结构与悬挂方式均为国内首创（与其他地铁系统采用的直流 750V、1 500V 接触轨有所不同）。接触轨式系统包括接触轨、绝缘支架（或绝缘瓷瓶）及其底座、防护罩、隔离开关、回流电缆等组成部件，其中接触轨、绝缘支架及其底座、防护罩是该系统中各起送电、支撑、防护作用的三大重要部件。

接触轨受流方式在道岔区段及需要设置电分段的地方，接触轨需要断开（即断轨）。正是由于接触轨的不连续性，决定了跨座式单轨交通车辆的运行速度有限。

2. 架空线式

由于接触轨式接触网的第三轨与地面距离较近，绝缘和安全难度大，限制了电压的提高，在城市轨道交通的发展过程中接触网转而向架空线式发展。1955 年开通的罗马地铁率先采用了 DC 1 500 V 架空线式接触网。20 世纪 90 年代以来，我国新建地铁的城市，如上海、广州、深圳等采用的都是 DC 1 500 V 架空线式接触网。

架空线式（架空式）接触网是架设在走行轨道的上部的接触网。由电动列车（车辆）顶部伸出的受电弓与之接触取得电能。按线路形式可分为地面架空式和隧道架空式；按悬挂方式又可分为柔性（悬挂）接触网和刚性（悬挂）接触网。现分述如下。

（1）地面架空式。地面架空式接触网如图 3.6 所示，它由以下几部分组成。

① 接触悬挂：包括承力索、吊弦和接触线。接触悬挂方式很多，图 3.6 为弹性链形悬挂。

② 支持装置：包括腕臂、拉杆和绝缘子。其作用是用以支持接触悬挂，将其负荷传给支柱或其他建筑物的结构。

③ 定位装置：包括定位器和定位管。其作用是保证接触线与受电弓的相对位置在规定范围内。

④ 支柱与基础：用以支承接触悬挂和支持装置，并将接触悬挂固定在规定高度。

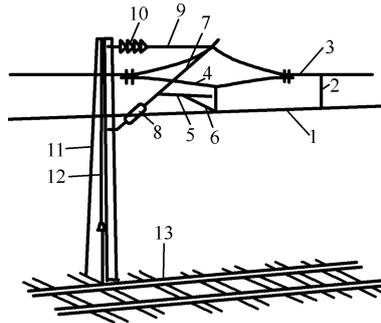


图 3.6 地面架空式接触网

1—接触线；2—吊弦；3—承力索；4—弹性吊弦；5—定位管；6—定位器；7—腕臂；
8—棒式绝缘子；9—拉杆；10—悬式绝缘子；11—支柱；
12—接地线；13—钢轨

地面架空式接触网属于柔性接触悬挂，其特点是弹性好。根据接触悬挂结构的不同，又分为无承力索的简单悬挂和有承力索的链型悬挂两种。其悬挂的接触线采用专门制造的、具有高导电率的铜或铜银合金硬线。由于城轨交通线路的最高运行速度一般为 80 km/h，因此在选用柔性接触网的形式时，一般采用带补偿的弹性简单悬挂和全补偿简单链型悬挂两种形式。

(2) 隧道架空式。隧道架空式接触网如图 3.7 所示。安装在绝缘子上的馈电线通过连接线与接触线连接，使接触网受电。接触线由调节臂固定，调节臂带棒式绝缘子，一端固定安装在隧道洞顶一侧的弹性支架上。调节臂用来调整接触线与轨面之间的高度，弹性支架通过调节臂使接触线与受电弓之间保持足够的弹性，以保证它们之间的良好接触受流。

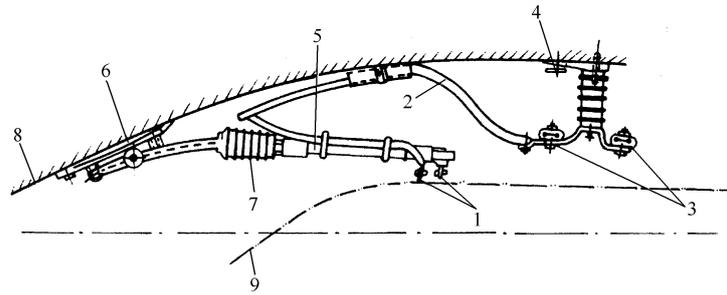


图 3.7 隧道架空式接触网示意图

- 1—接触线；2—连接线；3—馈电线；4—接地线；5—调节臂；
6—弹性支架；7—绝缘子；8—隧道洞顶；9—受电弓

隧道架空式接触网有些属柔性悬挂接触。它虽然具有弹性好的优点，但该悬挂接触方式有如下缺点：使地铁隧道横断面增加，土建费增多；采用冷拉电解铜接触线易磨损；接触网检测维护比较复杂，需专用的接触网检测车，且维修周期短，费用高。

(3) 刚性悬挂。刚性悬挂又称架空刚性接触网，是一种区别于传统柔性接触网的供电方式。

刚性接触网是采用绝缘子来悬挂刚体导线，如同把第三轨架到了隧道顶部，降低了车辆上方的空间。图 3.8 是刚性悬挂的示意图。这种悬挂结构简单，由汇流排、支撑装置、绝缘子、接触线(单根)及架空地线等组成。根据汇流排形式的不同，架空刚性的接触网可分为“T”型和“Π”型刚性悬挂两种。

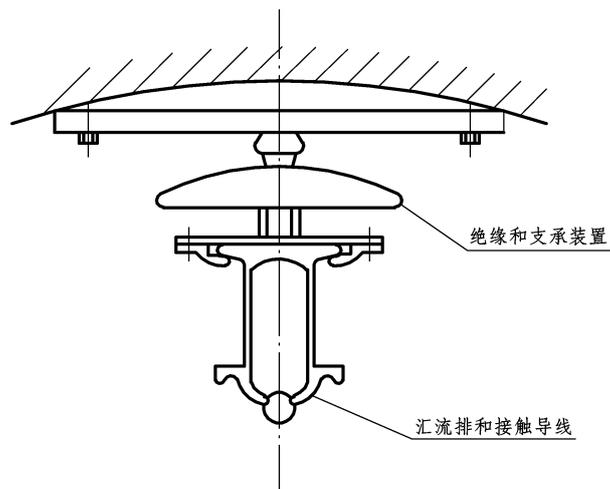


图 3.8 刚性悬挂示意图

架空刚性接触网利用汇流排的弹性将接触线固定在汇流排底部，列车受电弓通过与接触线滑行接触取电，接触线与汇流排均采用无张力架设。

接触线是铜或铜银合金线，汇流排则以铝合金为原料制造，他们均用于负载电流。为了防止接触线与汇流排之间产生铜铝异金属的电腐蚀，需在接触线安装到汇流排之前，涂覆一层导电脂，或在接触线制造时在其上热镀一层锡。

由于刚性悬挂接触网只能用于隧道内，故在露天地段仍需采用柔性接触网，为此要在隧道口设置一个刚性与柔性接触网的过渡段。

刚性悬挂所需要的隧道净空小，投资小，而且导电铜线无张力架设，不必设置下锚装置，也不会发生断线事故，零部件少、载流量大、安全可靠且维护量小，大大降低了维护成本，其优越性是柔性悬挂难以比拟的。1962 年日本东京营团地铁日比谷线首次采用刚性悬挂技术，到 20 世纪 80 年代逐渐在日本、韩国、法国、西班牙等国推广开来。我国第一条刚性接触网试验示范段是 1999 年 6 月开始运行的广州地铁一号线。作为一种成熟可靠的接触网悬挂方式，刚性悬挂在我国城市轨道交通领域有着良好的应用前景。

城市轨道交通接触网的基本特征见表 3.1。

表 3.1 城市轨道交通接触网的基本特征

| 接触网类型 | 结构组成 | 技术特征 | 发展趋势 |
|--------------|------------------|-------------------------------|--------------------|
| 架空柔性悬挂 | 受流导线 + 支持结构 | 悬挂结构较为复杂，适应速度高、安全性好，供电间距较大 | 传统模式，改进悬挂方式，使之更加紧凑 |
| 架空刚性悬挂 | 汇流排 + 接触线 + 支持结构 | 悬挂结构简单，可维护性高，适应速度较高，供电间距大 | 技术优势明显，发展空间大 |
| 接触轨 (第三轨) | 导电轨 + 支持体 | “面”受流，稳定性好，维护性好，适应速度有限，供电间距较小 | 采用钢铝复合导电轨技术 |

| | | | |
|---------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 接触轨 (正负极轨) | 汇流排 + 接触线 + 支持结构 | “面”受流，稳定性好，维护性好， 适应速度有限，防迷流效果好 | 采用钢铝复合导电轨 技术 |
| 侧面受流刚性 接触网 | | 结构简单，安装空间小，可维护 性好 | 在独轨交通和磁悬浮 线路上有应用前景 |

选择和确定接触网受流方式对城市轨道交通接触网建设至关重要。目前，我国内地城市轨道交通接触网的应用已初步形成三大类别：一是以北京地铁为代表的接触轨模式，相同的有武汉轻轨、天津地铁一号线和广州地铁四号线等；二是以上海、广州为代表的架空接触网模式，采用架空柔性悬挂和刚性悬挂，在建项目以架空刚性悬挂为主，如南京地铁、深圳地铁、天津津滨线、杭州地铁一号线、沈阳地铁一号线和苏州地铁一号线等；三是以重庆独轨交通为代表的侧面刚性受流正负极接触网模式。根据目前运营情况和建设规模，三种类型的接触网中，架空接触网、接触轨和正负极刚性接触网的比例约为 5:3:1。

我国内地主要城市轨道交通接触网应用情况见表 3.2。

表 3.2 我国内地主要城市轨道交通接触网应用情况

| 线路名称 | 供电制式 | 接触网形式 |
|-----------------------------------|------------|-----------------------|
| 北京地铁 1、2、4、5、10 号线， 北京城轨 13 号线 | DC 750 V | 接触轨（第三轨）正极供电 走行轨回流 |
| 天津地铁 1 号线 | DC 750 V | 接触轨（第三轨）正极供电 走行轨回流 |
| 天津地铁 2、3 号线，津滨线 | DC 1 00 V | 架空接触网正极供电 走行轨回流 |
| 上海城轨交通 1~10 号线 | DC 1 500 V | 架空接触网正极供电 走行轨回流 |
| 上海磁悬浮示范线 | DC 400 V | 接触轨正极供电 接触轨负极回流 |
| 广州地铁 1~3 号线 | DC 1 500 V | 架空接触网正极供电 走行轨回流 |
| 广州地铁 4 号线 | DC 1 500 V | 接触轨正极供电 |

| | | |
|------------------|------------|---------------------------|
| 深圳地铁 1~2 号线 | DC 1 500 V | 架空接触网正极供电 走行轨回流 |
| 南京地铁 1~2 号线 | DC 1 500 V | 架空接触网正极供电 走行轨回流 |
| 武汉轻轨 1~2 号线 | DC 750 V | 接触轨 (第三轨) 正极供电 走行轨回流 |
| 重庆轻轨 (独轨) 2 号线 | DC 1 500 V | 正极刚性接触网供电 负极刚性接触网回流 |
| 杭州地铁 1 号线 | DC 1 500 V | 正极刚性接触网供电 负极刚性接触网回流 |

三、牵引供电制式

城市轨道交通牵引供电制式主要是指电流制、电压等级和受流 (馈电) 方式等几方面。在世界范围内,城市轨道交通牵引供电均采用直流制,且正极为供电方 (接触轨或接触网), 负极为回流方 (走行轨或回流轨), 但采用的电压等级却是五花八门, 在 DC 600 ~ 3 000 V 范围内就不下 10 种。我国 GB50157—2003 《地铁设计规范》 14.1.14 条和 GB10411—89 《地铁直流牵引供电系统》 4.3 条均规定了“直流牵引供电系统的电压分为 DC 750 V 和 DC 1 500 V 两个电压等级”。选择哪一种电压等级则需根据车辆、线路结构、电器设备水平等来确定。从经济角度来看, 选用 DC 1 500 V 电压等级可延长牵引供电距离、减少牵引变电所数量、减少电能损失、节约投资和运行费用。

此外, 在列车采用再生制动的情况下, 对 DC 1 500 V 系统而言, 因其供电臂长, 供电区段内的列车数量相对较多, 再生能量被相邻列车吸收的效果要好一些。这样, 既改善了网压, 又减少了牵引损耗。

需要强调的是, 随着科学技术特别是材料制造技术及加工工艺的长足进步, 不仅架空接触网可以采用 DC 1 500 V 供电, 接触轨也可以采用这一电压等级供电 (如广州地铁 4 号线)。