

第 1 章 跨座式单轨交通供电系统概述

1.1 跨座式单轨交通概述

当今社会，随着城市经济的发展和人口的集中，城市交通问题愈来愈突出，交通拥堵严重影响了城市经济和社会活动的正常秩序和居民的出行，还带来了环境污染、能源浪费等诸多方面的问题。城市轨道交通具有运量大、速度快、安全准时、乘坐舒适、节约能源、能有效缓解地面交通拥挤以及有利于环境保护等多方面的优势。因此，采用立体化的快速轨道交通来解决日益严重的城市交通问题是城市交通发展的趋势。单轨交通在城市轨道交通的建设与发展中具有自身的特色和实用性。

城市轨道交通包括地铁、轻轨交通、单轨交通以及磁悬浮等交通系统。表 1-1 比较了几种形式轨道交通的特点。

表 1-1 几种形式轨道交通的特点

比较内容	地铁	轻轨	单轨	磁悬浮
地理环境条件	地下，可开挖性的市内线路	地面平坦的市内或市郊线路	地势起伏的市内或市郊线路	地面平坦的市郊线路
工程造价	较高	适中	适中	较高
高峰时段客流量	3~5 万人次/h	1~3 万人次/h	1~3 万人次/h	1.5 万人次/h
最大行车密度	20~40 列/h	20~40 列/h	20~30 列/h	15~25 列/h
最大坡度	40‰	30‰	60‰	10‰
最小半径	300 m	200 m	100 m	1 000 m
最高运行速度	80~100 km/h	80~100 km/h	70~80 km/h	350~500 km/h
噪声	80 dB 以上		低于 70 dB	

跨座式单轨铁路 (Straddle-beam Monorail)，就是通过单根轨道梁来支承、稳定和导向，车体骑跨在轨道梁上运行的铁路。它能有效利用城市道路空间，爬坡和曲线通过能力强，噪声和景观影响小，是一种独特的中等运量城市轨道交通系统。单轨铁路通常为高架，高架单轨具有成本低、工期短的优点。而相对于高架的钢轨地铁而言，高架单轨具有占地少、污染小、能有效利用道路中央隔离带，适于建筑物密度大的狭窄街区的优点。而且，单轨列车和轨道容易检查和维修养护。另外，单轨铁路对复杂起伏的地形有较强的适应性，土地占用量小，运输量适中，造价低。由于以上这些发展优势，因而单轨铁路成为中小城市、海滨城市 and 山域轨道交通首选型式之一。单轨铁路按照走行模式和结构，主要分成两类——悬挂式单轨和跨坐式单轨。悬挂式单轨铁路也称空中轨道列车，如图 1-1 所示，其列车悬挂在轨道之下。另一种较为常见的是跨座式单轨铁路如图 1-2 所示，其列车跨座在轨道梁之上。



图 1-1 悬挂式单轨



图 1-2 跨座式单轨

世界上第一条跨座式单轨铁路线诞生于 1888 年，是由法国人 Charle Larligue 设计，在爱尔兰铺设的，线路长约 15 km，由蒸汽机车牵引，这条线路一直运行到 1924 年 10 月。在第二次世界大战以后，随着科学技术的进步，跨座式单轨铁路技术才受到各方重视，逐渐完善和成熟起来。1952 年，德国工业家 Axellenard Wenner2Gren 在德国科隆附近的菲林根建造了一条单轨线进行实验研究。经过反复试验，于 1958 年得出这样的结论：采用跨座式、混凝土轨道和橡胶充气轮胎能达到最好的效果。这就是目前所称的 ALWEG 型跨座式独轨铁路。后来美国、日本和意大利等许多国家都修建了这种形式的独轨，其中尤以日本建成的线路最多。

我国首条跨座式单轨线路是在有“山城”之称的重庆修建的，即重庆轨道交通二号线（较新线，图 1-3），该线路一期工程于 2004 年建成，全线于 2006 年开通。随后，重庆修建并开通了目前世界上运营里程最长的跨座式单轨交通线路——重庆轨道交通三号线（图 1-4）。经过 10 多年的发展，重庆已建成并开通运营跨座式单轨交通线路 2 条，总运营里程约 88 km，最小发车间隔 2 min30 s，单向高峰小时断面客流达 3.34 万人次，日均运送乘客达 100 万人次（最高日客流 140 万人次），运营 12 年来无运营责任事故、无环保投诉，成为重庆市民最满意的公共交通。重庆已成为世界公认的跨座式单轨线网最长、运输效率最高、安全性最好的城市，获得了国家环保部“三高三低”的美誉（起点高、标准高、水平高，噪声低、辐射低、振动低）。目前重庆还在续建跨座式单轨项目，至 2016 年底运营里程达到 100 km 左右。重庆中远期跨座式单轨交通线路规划还有 160 多千米，未来将达到 260 多千米。



图 1-3 重庆轨道交通 2 号线

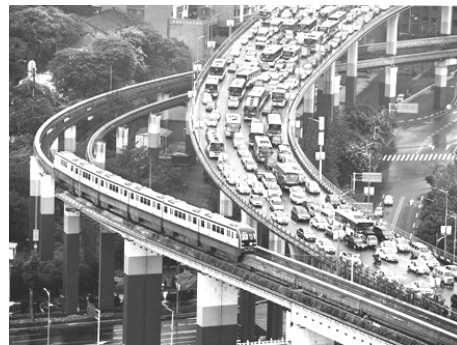


图 1-4 重庆轨道交通 3 号线

跨座式单轨交通主要特点：

(1) 投资省：跨座式单轨每千米投资约人民币 2~4 亿元，地铁每千米约 7~8 亿元。

- (2) 工期短：30 千米左右线路的建设工期跨座式单轨约 2~3 年，地铁 4~5 年。
- (3) 占地面积小：跨座式单轨沿公路中间隔离带架设。
- (4) 转弯半径小：正线跨座式单轨最小转弯半径 100 m，地铁最小转弯半径 300 m。
- (5) 爬坡能力强：跨座式单轨最大纵坡为 60‰，国内地铁一般为 35‰。
- (6) 噪声低：跨座式单轨低于 70 dB，地铁在 80 dB 以上。

跨座式单轨交通系统由线路系统（轨道梁桥等）、车辆系统、供电系统、信号系统、机电设备、车站、车辆段及综合维修基地等部分组成，其单轨轨道梁既是承重的桥梁结构，又是支承和导向的轨道。车辆采用橡胶轮胎，通过安装在转向架两侧的导向轮和稳定轮来导向和稳定车体。构造上的特点使得其走行机理、轮轨关系都与常规地铁、轻轨有很大差别。技术上的特点主要体现在车辆的转向架、轨道梁和线路道岔三方面，走行机理完全不同于钢轮钢轨系统，轨道梁承受较大的扭转荷载。

1.2 跨座式单轨交通供电系统的构成

跨座式单轨交通（以下简称“单轨”）供电系统通常按电压等级划分为高、中、低三大部分。高电压等级即城市电网电压，通常为 220 kV 或 110 kV，视城市变电站电源引入点电压等级而定；中电压等级即环网电压，通常为 35 kV 或 10 kV，视单轨交通供电环网系统而定，通常可将直流牵引系统（DC 1 500 V 或 DC 750 V）也纳入中压系统；低电压等级即动力与照明配电电压等级，采用我国标准的低压等级，AC 220/380 V，工频 50 Hz，含安全特低配电电压等级 AC 48 V、AC 36 V、AC 24 V 等。

高压系统含外线路及主变电所部分，与中压系统的分界点在主变电所 35 kV/10 kV 出线端；中压系统含环网、变电所（开闭所、牵引所、降压所、混合所、跟随所等）、接触网及其其中压控制的电力监控系统，与低压系统的分界点在变电所 400 V 开关柜的出线端；低压系统即动力与照明的配电系统，含设备的本体控制、建筑防雷与综合接地等。

1. 外部电源

单轨供电系统的外部电源就是为单轨供电系统主变电所供电而引入的城市电网的高压电源（110 kV）。重庆单轨供电系统采用集中供电模式，外部电源引入至主变电所的高压输电线路统一由电力公司施工、运行、维护和固定资产管理。

2. 主变电所

主变电所将来自于城市电力系统的高压电源（110 kV）降压为轨道交通系统使用的中压（35 kV、10 kV）交流电，并通过中压供电网络，向牵引供电系统和动力照明供电系统供电。

3. 中压供电网络

中压电缆纵向将上级主变电所和下级变电所连接起来、横向将全线各变电所连接起来，形成中压供电网络。中压供电网络的功能是向牵引供电系统和动力照明供电系统供电，是非常重要的一个供电纽带。中压供电网络按不同供电分区构成环网，每个分区有两路互为备用

的电缆贯通回路，当其中一路故障时，另一路担负整个分区的负荷用电，保障供电的连续性。

4. 牵引供电系统

牵引供电系统的功能是将来自主变电所或其他相邻变电所的 35 kV (10 kV) 电源，经中压网络分配给牵引变电所后，降压整流成直流 1 500 V 电源，通过接触网向单轨交通列车供电，以保证列车安全、可靠、快速的运行。所以，牵引供电系统主要包括两个部分：牵引变电所和接触网。

5. 动力照明供电系统

来自主变电所的 35 kV (10 kV) 电源，通过中压网络分配给降压变电所，降压为低压 380 V/220 V 电源，再经低压配电系统供给动力照明等设备使用，以保证车站设备和照明系统的正常运行。动力照明供电系统由降压变电所及动力照明配电系统组成。

6. 电力监控系统 (PSCADA)

电力监控系统又称为 PSCADA 系统，它对供电系统主变电所、牵引变电所、降压所等不同类别变电所内高压设备 (110 kV)、中压设备 (35 kV/10 kV)、直流 1 500 V 设备、低压 400 V 设备、交直流电源屏、排流柜等对象进行监控，实现对各种设备的控制、信息采集、数据分析处理、远方维护、统计报表、事故报警、画面调阅、历史数据查询等功能。

7. 防雷接地系统

供电系统在运行过程中会遭受暂态过电压、操作过电压、雷电过电压等的侵袭，使设备绝缘直接破坏或不断劣化，最终引发事故。供电系统应根据轨道交通沿线的气候情况和系统特点设置完善的防雷接地防护措施。

单轨交通供电系统的接地装置一般为综合接地装置，由人工接地体和自然接地体组成，接地电阻应小于 1 Ω ，接触电位差和跨步电位差应符合 (DL/T 621)《交流电气装置的接地》规程相应要求，确保人身安全和设备安全。

1.3 单轨供电系统与其他专业的关系

单轨交通是一个庞大而复杂的综合系统，包括线路系统、车辆系统、供电系统、信号系统、机电设备、车站、车辆段及综合维修基地等部分。供电系统作为单轨交通的能源补给线，与其他系统均存在密不可分的联系，本节主要介绍单轨供电系统与线路、车辆之间的关系。

1.3.1 供电系统与线路

单轨线路系统是其他专业系统的整体基础，对于供电系统来说，线路形式直接决定了供电系统接的安装方式、布置方式。

1. 轨道梁

单轨最显著的特点是车辆要骑跨在单线轨道梁上快速行驶（最高设计速度为 75 km/h），因此轨道梁既是承载的梁，又是轻轨列车运行的轨道。轨道梁通过极高的精度及严格的变形控制，在结构上满足承载的要求、在线形上满足列车快速运行的要求，是跨座式单轨交通关键技术之一。

标准跨度轨道采用预制预应力钢筋混凝土结构（PC 梁），轨道梁的标准梁跨一般使用 20 m 和 22 m，其跨中的标准断面尺寸（图 1-5）设为 1.5 m（高） \times 0.85 m（宽）。两片轨道梁之间的梁缝宽度采用 30 mm，梁缝中心至支座中心的距离采用 400 mm。两片梁缝之间通过安装指形板进行连接（图 1-6），以满足伸缩要求。标准预制轨道梁均采用跨座式轻轨专用 PC 轨道梁铸钢支座，按使用要求并兼顾标准化生产，分别按曲线半径 100 m、500 m 及直线共分 3 种类型。各类支座均有固定支座和活动支座之分。PC 轨道梁的预制精度要求：长度 \pm 10 mm，宽度 \pm 2 mm（端部）、 \pm 4 mm（中间）。

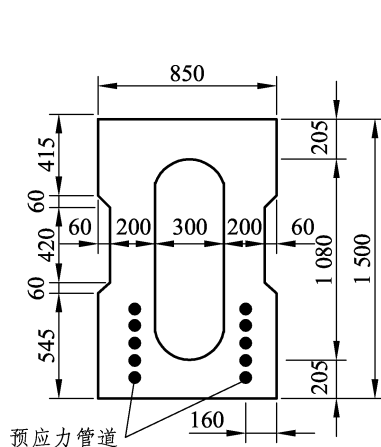


图 1-5 标准轨道梁跨中断面

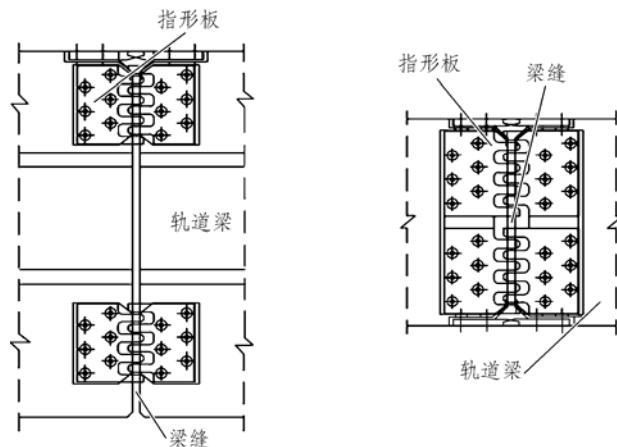


图 1-6 指形板与梁缝

检修通道（图 1-7）一般设在单轨线路高架区段两线间，当两线分开时，原则上仍设置在左右两线之间相对应的一侧。检修通道以检修为主，紧急情况下兼作乘客疏散，同时检修通道也是供电电缆的敷设通道。

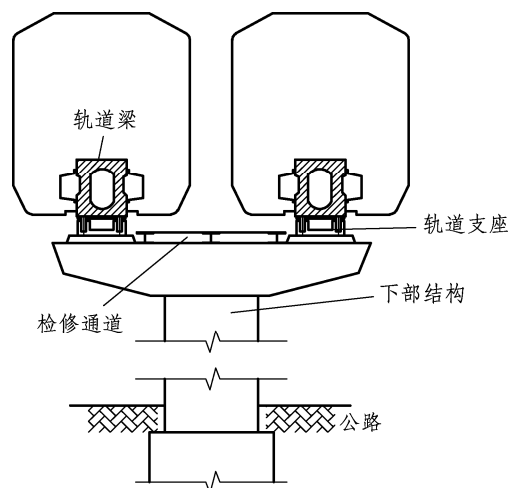


图 1-7 典型轨道横剖面图

2. 供电系统与单轨的关系

(1) 单轨线路独特的轨道梁形式，决定了接触网的安装形式。轨道梁中部凹槽为接触网安装位置，接触网通过绝缘子安装在轨道梁上。因此每榀轨道梁在预制设计时，必须考虑接触网系统相关设备安装件的预埋，包括绝缘子底座螺栓预埋件、车体接地板底座螺栓预埋件，同时要考虑敷设于轨道梁体上的电缆、内部管道等附属物的接口安装和维护条件(图 1-8、图 1-9)。

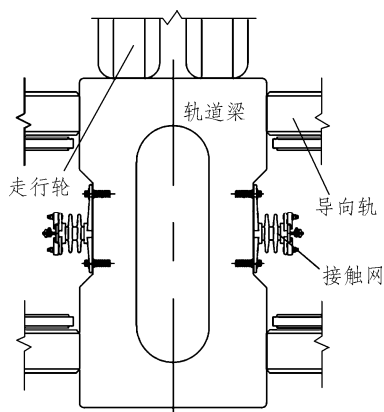


图 1-8 轨道梁截面示意图

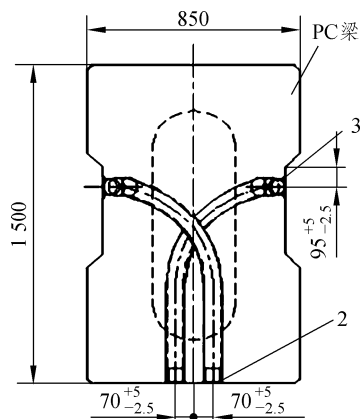


图 1-9 轨道梁电缆管道截面

(2) 单轨线路检修通道的设置为高架区间电缆敷设提供了通道，区间电缆敷设在平台盖板底下(图 1-10)，仅在停止运营时可打开检修。一般来说，弱电电缆敷设在检修通道的上行侧，强电在下行侧。弱电电缆槽的高度约为 260 mm，宽度根据检修通道宽度不同稍有差异，为 990 ~ 1 200 mm。在没有检修通道的高架区段，轨道梁下方需设置预埋件安装电缆悬架，区间电缆在轨道梁下方的电缆悬架上敷设(图 1-11)。

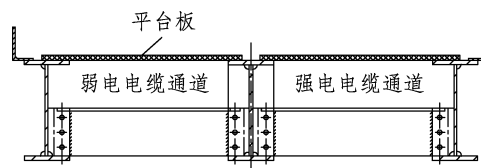
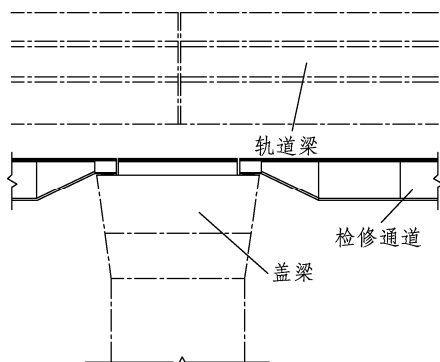


图 1-10 检修通道区间电缆敷设(重庆轨道三号线)

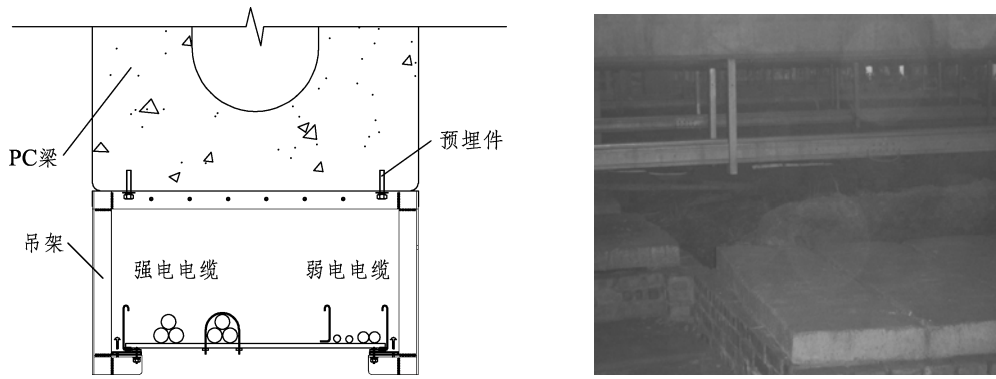


图 1-11 轨道梁下方吊架敷设 (重庆轨道二号线)

1.3.2 供电系统与车辆

1. 单轨列车概述

单轨车辆采用跨座式单轨车辆，每辆车车门数量为二门。列车构造速度 80 km/h，最高运行速度 75 km/h。在轨道梁两侧安装刚性接触网，机车采用直流供电方式，供电电压为 1 500 V。

1) 列车编组

跨座式单轨列车由 4 辆、6 辆、8 辆车组成，每辆均为动车，其中每列车动力转向架占转向架总数的 3/4。其编组型式：

4 辆编组： $*Mc1+M2+M1+Mc2*$

6 辆编组： $*Mc1+M2+M4+M5+M3+Mc2*$

8 辆编组： $*Mc1+M2+M4+M5+M4+M5+M3+Mc2*$

其中： $Mc1$ 、 $M2$ ， $Mc2$ 、 $M3$ ， $M4$ 、 $M5$ 各为一单元；

$Mc1$ 或 $Mc2$ ——带司机室动车（带有 1 个非动力转向架及 1 个动力转向架）；

$M2$ 或 $M3$ 或 $M4$ ——动车（带有 2 个动力转向架）；

$M5$ ——不带司机室的动车（带有 1 个动力转向架和一个非动力转向架）；

+ ——棒式车钩（图 1-12）。

* ——密接式车钩（图 1-13）；



图 1-12 棒式车钩

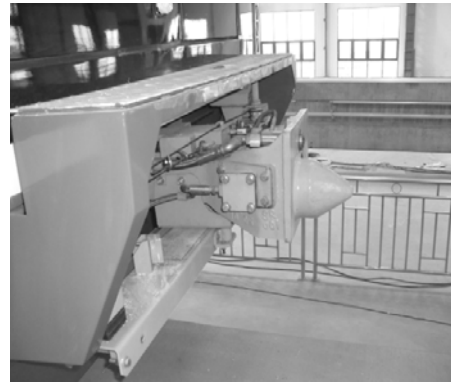


图 1-13 密接式车钩

2) 与供电系统相关参数

(1) 车辆动力设备布置 (表 1-2)

表 1-2 车辆动力设备布置

序号	设备名称	单位	各车配置数					
			Mc1	M2	M4	M5	M3	Mc2
1	动力转向架总成	套	1	2	2	1	2	1
2	主牵引电动机	台	2	4	4	2	4	2
3	VVVF 逆变器	套	1	2	2	1	2	1
4	受电弓 (+)	套		2	2		2	
5	受电弓 (-)	套	2			2		2
6	接地装置	套	1	1	1	1	1	1

(2) 主牵引电动机主要技术数据 (表 1-3)

电动机是专为单轨车辆设计的三相鼠笼式异步牵引电动机。

表 1-3 主牵引电动机主要技术数据

输出功率 P (小时定额)	105 kW
转矩 M	775 N·m
额定输入电压 U_1	三相 1 100 V
额定输入电流 I_1	75 A
额定转速 n	1 294 r/min
功率因数 $\cos\phi$	0.82
效率 η	90%
极对数	4
最高转速	3 439 r/min
绝缘等级	H 级
电机重量	≤ 620 kg
通风方式	自通风
齿轮箱传动比	6.55

齿轮传动效率	95%
--------	-----

(3) 受电弓主要技术数据。

受电弓分“+”极和“-”极两种，两种受电弓安装在转向架上，采用侧面滑动受电。在 Mc1、Mc2、M5 车上，每辆车安装 2 台负极受电弓；在 M2、M3、M4 车上，每辆车安装 2 台正极受电弓。

① “+”极受电弓：升弓采用弹簧装置，降弓时采用压缩空气，这时使下降风缸动作，折叠式受电装置在折叠位置，由锁钩装置将受电装置锁住，使其与接触网脱离。当需要受电弓升弓时，可使电磁线圈得电，解开锁钩装置，弹簧装置将受电弓升起与接触网接触受电。

② “-”极受电弓：与“+”受电弓相比，“-”极受电弓不设自动折叠装置，使“-”线受电装置经常与负线接触网接触连接。在需要时可用手压到折叠位置，由锁钩装置锁住，解锁时用手动压缩解锁。

③ 滑板：受电弓滑板为铜基粉末冶金制成。

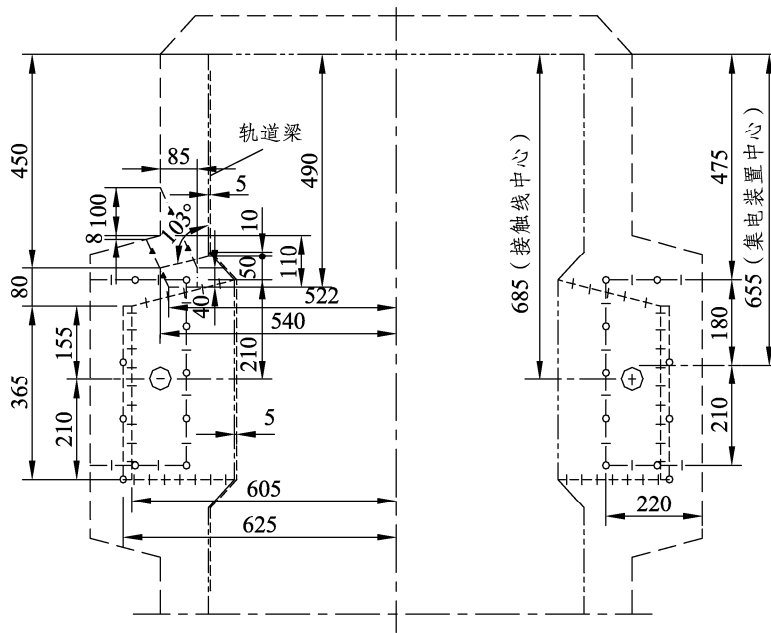
④ 技术规格：

额定电压	DC 1 500 V
电压范围	DC 1 000 ~ 1 800 V
额定电流	DC 400 A
最大电流	DC 800 A
标准静接触压力	58.8±9.8 N
静压力调节范围	44.1 ~ 78.4 N
速度	80 km/h

⑤ 受电装置主要尺寸：

带绝缘子的折叠高度	245±5 mm
最小工作高度	295 mm
最大工作高度	435 mm
最大升起高度	450 ⁺⁰ ₋₁₀ mm
标准工作高度	365 mm

2. 跨座式单轨列车与限界 (图 1-14)。



- | | | |
|----|---------------------|------------------|
| 图例 | ----- 车辆限界 | - ○ ○ 集电装置限界 |
| | ----- 建筑限界 | +++++ 接触线限界 |
| | - - - - - 客运站台建筑限界 | -○-○-○- 道岔部接触线限界 |
| | +++++ 安全栅建筑限界 | ▲-▲-▲-▲- 接地装置限界 |
| | ●-●-●-●- 道岔建筑限界 | ————— 接地板限界 |
| | ▲-▲-▲-▲- 基地内信号机建筑限界 | |

说明：本图尺寸以毫米计。

图 1-14 轨道梁周围的特殊限界图

3. 单轨列车与供电系统的关系

(1) 单轨列车牵引供电作为单轨供电系统的主要供给对象，供电系统需保持持续不间断地给列车供电，同时供电系统牵引网容量在设计初期必须考虑满足应满足远期高峰小时行车密度、车辆编组、车辆型式、车辆牵引特性、线路资料等基础条件的技术要求。

(2) 由于单轨列车独特的结构特点，接触网完全被车体所包络，接触网的安装空间很小，既要满足绝缘距离的要求，又要满足车辆限界的要求，对设备制造精度、安装精度要求很高。

(3) 单轨列车通过受电弓与接触网接触线滑动接触而取流，接触网安装需保证列车最高时速时的良好取流。同时接触网接触线材质的选取，应充分考虑接触线与受电弓滑块的匹配性，尽量提高接触线和受电弓滑块的使用寿命。

1.4 单轨供电系统总体设计原则

(1) 单轨交通应从城市公共电网取得电源，属一级负荷；外部电源供电方案应根据线网规划和城市电网进行规划设计，主变电所可采用 110 kV 集中供电方式，并尽量实现资源共享。

(2) 供电系统应满足供电安全可靠、环保节能、运行方式灵活、运营管理方便和投资经济的基本要求，供电系统的规模和设计容量按远期高峰小时的用电负荷要求进行设计。

(3) 用电负荷等级划分及供电原则。单轨牵引负荷为一级负荷；动力照明负荷按用电负荷性质可分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。

① 一级负荷应由双电源双回线路供电，当一个电源发生故障时，另一个电源应能正常供电。一级负荷中特别重要的负荷，除由双电源供电外，尚应增设应急电源。以下电源可作为应急电源：独立于正常电源的发电机组、供电网络中独立于正常电源的专用馈电线路、蓄电池。

② 二级负荷宜由双回线路供电；对电梯及其他距变电所不超过半个站台有效长度的负荷，可由双电源单回线路供电；对电梯及其他距变电所超过 200 m 长度的负荷，可由双电源双回线路供电。

③ 三级负荷可由单电源单回线路供电，当发生系统中只有一个电源工作或供电容量不足时，允许自动切除该负荷。

(4) 供电系统除满足正常运行方式下的高峰小时负荷和供电质量要求外，还应满足以下运行方式高峰小时负荷需要：

① 当主变电所一台主变压器解列时，由另一台主变压器负担该主变电所供电范围内的牵引和动力照明一、二级负荷。

② 当一座主变电所解列时，由相邻主变电所负担本所及故障主变电所供电范围内的牵引和动力照明一、二级负荷。

③ 当一座牵引变电所解列时，由相邻牵引变电所实行越区大双边供电，负担供电范围内的牵引负荷。

(5) 单轨交通中压环网供电网络的电压等级可采用 35 kV、20 kV 和 10 kV。对于集中式供电方案，中压网络的电压等级应根据用电容量、供电距离、城市电网现状及发展规划等因素，经技术经济综合比较确定。

(6) 在满足单轨交通各种用电负荷供电要求的情况下，同一车站内的各种功能变电所应尽量合建。供电系统中的各类变电所均应有两个可靠的电源，每个进线电源的容量应满足变电所负担的全部一、二级负荷供电的要求。这两个电源可来自不同变电所，也可来自同一变电所的不同母线；在正常运行方式下，它们同时供电且互为备用。主变电所应从城市电网至少接引两回电源进线，其中至少有一回为专线电源，并设两台有载调压主变压器。

(7) 单轨交通供电系统的中压环网供电网络接线应尽量简单、统一、便于运营管理及继电保护配置和减少系统电能损耗，并应采用牵引动力照明混合网络和按列车运行的远期通过能力设计；二回电源线路互为备用，即当任一变电所的一回进线故障时，由另一回进线负担其一、二级负荷的供电，中压网络末端的电压损失不宜超过 5%。

(8) 牵引负荷应根据线路资料、运营高峰小时的列车运行交路、行车密度、车辆编组和车辆性能等计算确定；牵引变电所的分布、数量和容量应满足高峰运营的需要。

(9) 正线牵引网可采用 DC 1 500 V 刚性接触网正极供电、刚性接触网负极回流，上下行分路双边供电的供电方式。牵引网最高、最低电压水平应满足 GB/T 10411—2005 规定，即：在任何运行方式下，牵引网最高电压不得高于 1 800 V；在任何运行方式下（含当一个牵引变电所在远期高峰小时解列时，其相邻牵引变电所越区供电时），牵引网任一点最低电压不得低于 1 000 V。

(10) 在每座牵引变电所中设两套整流机组，并采用等效 24 脉波整流方式。当一座牵引变电所解列时，由相邻牵引变电所实现越区供电。牵引变电所的布点和容量除应满足正常运行方式下远期高峰小时负荷要求外，应同时满足该所越区供电时远期高峰小时的负荷需要。牵引整流机组的负荷特性应满足下列规定：

100%额定负荷——连续；

150%额定负荷——2 h；

300%额定负荷——1 min。

(11) 直流牵引系统及非线性用电设备所产生的谐波引起的电网电压正弦波形畸变率应予以控制。

(12) 在单轨交通供电系统中应设置再生制动能量吸收装置，设计方案应通过技术经济综合比较后确定。

(13) 为保证人身和设备安全，在每座车站及车辆基地和各牵引变电所中分别设置车体安全接地装置和接地保护装置。

(14) 主变电所 110 kV 中性点接地方式根据地方电网运行状况，由电力系统确定；35 kV 系统宜采用小电阻接地系统；10 kV 系统宜采用消弧线圈接地系统；低压 400 V 配电系统采用 TN-S 供电方式。

(15) 供电系统继电保护应满足可靠性、选择性、速动性和灵敏性的要求。

(16) 在车辆基地应设置供电工区，以对供电设备进行管理与维护。

