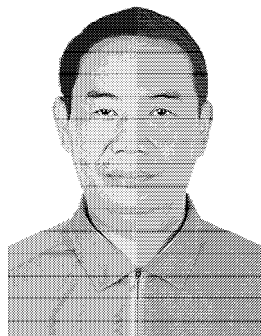


综
述
与
评
论

悬挂式单轨车的发展及其现状

李 芾, 许文超, 安 琪

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)



作者简介: 李 芾(1956-), 男, 国家特聘教授, 博导, 德国工学博士, 从事城市轨道交通车辆和高速列车的设计与理论研究。

摘 要: 简述了悬挂式单轨车的发展经历, 按走行部的型式分类介绍了悬挂式单轨车的现状, 叙述了悬挂式单轨车的技术特点, 对比跨座式单轨, 分析了悬挂式单轨的优缺点。展望了悬挂式单轨车在我国的应用前景。

关键词: 悬挂式单轨车; SAFEGE; 城轨交通; 发展历史; 应用前景

中图分类号: U232

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2014)02-0016-05

Development and Current Status of Suspended Monorail Vehicle

LI Fu, XU Wen-chao, AN Qi

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Development history of suspended monorail vehicle was introduced briefly, and the current status of suspended monorail vehicles classified by bogies style was introduced. Furthermore, the technical characteristics of suspended monorail vehicle were described and compared to straddle type monorail for analyzing the merits and demerits. At last, application prospect of suspended monorail in China was also given.

Keywords: suspended monorail vehicle; SAFEGE; urban rail transit; development history; application prospect

0 引言

单轨交通是一种轨道为单根带形梁体, 轨道梁由支撑柱支撑, 车辆跨坐于梁上或悬挂于梁下的交通模式, 其可分为跨座式和悬挂式2种。悬挂式单轨作为单轨交通的主要形式之一已经发展了一百余年, 具有造价低、占地面积小及对城市景观影响较小的特点。其走行部运行于轨道梁上, 车辆悬挂于走行部之下的基本原理一直沿用至今。

1 悬挂式单轨车的发展历史

悬挂式单轨车的发展大致经历了起源、探索以及完善的3个基本阶段。

1.1 悬挂式单轨车的起源

在世界上第1条商业化铁路开通前的3个月, 第1条客运悬挂式单轨交通于1825年6月25日在英国切森特(Cheshunt)开通, 该轨道采用木制, 由一匹马牵引。

这条单轨线是根据1821年英国人亨利·帕尔默(Henry Palmer)的专利设计而成^[1]。车轮在轨道上运行, 通过索链由马匹带动, 车轮轴左右伸出两个悬臂用于悬挂车厢。切森特铁路建设的初衷主要用于运输砖块及其他建筑材料, 却成为了客运单轨交通历史的起点。

1.2 探索阶段

1886年, 美国新泽西州格林维尔的达夫特电气公司建成了一条悬挂式单轨交通The Enos Electric Railway示范线, 并进行了样机试验演示。其轨道梁和支撑柱均采用轻型钢结构模式, 放弃了当时盛行的木制梁。在格林维尔建成的示范线以其特殊的设计吸引了新闻界的广泛关注。虽然该线路的主系统由于种种原因未能继续建设, 最终导致半途而废, 但是其设计思想对后来德国人浪琴(Eugen Langen)发明伍珀塔悬式单轨产生了重要的影响。

1901年, 德国科隆的工程师浪琴发明的悬挂式单轨列车在德国伍珀塔市(Wuppertal)开始运营, 其悬挂于伍珀尔河河面上, 沿着河流成功运行了近百年, 经历了两次世界大战, 至今仍在安全地运营。伍珀塔

尔单轨普遍被认为是动力式客运悬挂式单轨的开端。

1929年正处于两次世界大战之间,大量铁路工程停滞不前,而苏格兰工程师乔治本尼(George Bennie)却在此时设计建造了一条独特的悬挂式单轨测试线,其列车被称为火车飞机(Railplane)^[2]。该线路建造在苏格兰格拉斯哥附近的一条铁路线之上,车体前后装有2个螺旋桨,采用电力驱动,在加速过程中可提供180 kW的功率,最高速度达160 km/h。该项目本计划用于伦敦至巴黎的高速跨海线,最终因经济和技术原因而搁浅。

1956年,美国的Skyway单轨交通股份有限公司在德克萨斯州休斯顿市的箭头公园建造了1条悬挂式单轨的测试短线。2台转向架上各装有1个310 HP的汽车发动机,司机室设在其中一台转向架上,车厢悬挂在转向架之下。经过了8个月的测试,该线路被拆除,之后又在德克萨斯州的露天游乐场重建并运行了数年。

1958年,日本的第一条单轨在东京的上野动物园亮相。其借鉴了伍珀塔尔单轨系统的基本模式,并在其基础上进行了改进,采用了非对称悬挂和橡胶轮胎。之后日本的单轨交通发展迅速,至今已成为世界上单轨交通里程最长和种类最多的国家。

1960年2月,法国的雷诺、米西兰、里昂水电公司等十几家厂商,在法国国营铁路和巴黎交通公司的支持下,合作研制了一种新型的悬挂式单轨车,以其中几家主要公司的第一个字母命名为SAFEGE^[3]。该系统采用橡胶轮胎转向架,转向架隐藏在底部开口的箱形梁内部,车体悬挂在转向架下方。该测试线在巴黎南部运行了数年,但一直由于经济和技术上的原因未能将其商业化运行,取而代之的是日本和德国在此后成功建成的数条SAFEGE模式的单轨线。

1.3 完善阶段

随着技术的不断发展,悬挂式单轨技术逐渐完善并逐步被世界各大城市所认可。在之后的几十年里,悬挂式单轨被普遍运用于城市轻轨线、机场专用线、城市观光线以及大学校园内部等地方,型式以SAFEGE型居多,主要运行在日本和德国等国家。

1960~1965年是日本单轨交通研究和建设的飞跃时期。日本是世界上第1个应用SAFEGE型单轨的国家,早在1964年就在名古屋东山动物园建造了470 m长的游园路线。1964年6月,在运输省和建设省的共同督导下,日本成立了日本单轨协会,并统一了单轨类型,制定了设计标准,设计出了日本式的跨座式单轨,并对SAFEGE型悬挂式单轨进行了适当的技术改造,使之适合城市交通。1972年11月17日,经众、参两院审议通过后,日本公布了“关于促进城市单轨建设的法律案”。建设省还通过与大藏省的协商,建立了城市单轨交通建设的补贴制度。从此,日本城市单轨建设在技术上、舆论上、政策上和资金上都得到了支持,所以从20世纪70年代以来,悬挂式单轨在日本得到了很大发展^[3]。

德国于20世纪70年代开始研究自动化悬挂式单轨系统,在联邦政府2 200万马克的资助和前交通部长Hans Matthoefer的支持下,于1975年在杜塞尔多夫建立了180 m长的试验线并于第2年扩展到1.5 km。到了20世纪80年代,德国便发展出了自己的自动化悬挂式单轨系统,称为H-Bahn,德语意为悬挂的铁路。

2 悬挂式单轨车现状

目前世界上的悬挂式单轨车按走行部结构型式主要分为以下4种。

2.1 非对称悬挂钢轮、钢轨型

非对称悬挂钢轮、钢轨型单轨车由德国人浪琴设计,故也称为浪琴型。其主要特点是钢轨铺设在钢制桁架梁上,钢制车轮的转向架运行于钢轨上,车厢悬挂于桁架梁下,悬挂构件布置在轨道梁一侧。图1所示为属于这一类型的伍珀塔尔单轨线。它于1898年动工,坐落于德国伍珀塔尔市,从艾伯斐尔德巴门至沃哈文克尔,全长13.3 km,双轨并行,共有20个车站,列车由2节车厢编组而成,电力驱动,可坐乘客80人,日客运量为82 000人,最高速度为56 km/h^[4]。图2为其车顶上的转向架,前后2个U型踏面的车轮由1根轴桥联接后运行在单根钢轨上,其原理与自行车相似。



图1 伍珀塔尔悬挂式单轨线

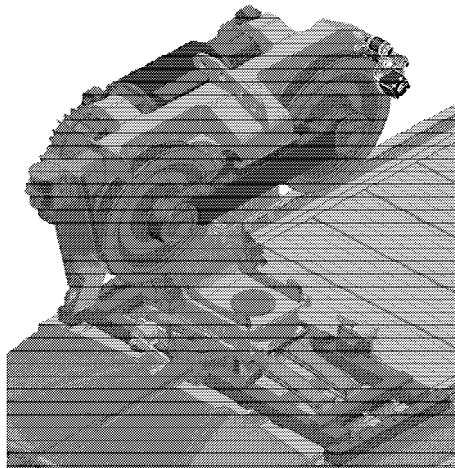


图2 伍珀塔尔悬挂式单轨车走行部

2.2 “工”字轨道梁悬挂型

在2009年末,巴西格拉玛多(Gramado)丘陵上的一

个圣诞主题公园(Aldeia do Papai Noel)内建起了一条小型的悬挂式单轨线,只有2站,如图3所示。线路的轨道梁为“工”字形截面梁,车轮嵌在梁上运行。车轮由特殊材料制成,用于承受自重和载重且由链传动电机驱动。这种型式的单轨车结构简单,许多国家的娱乐场所和旅游景区都有这类悬挂式单轨车,但其振动大,运量低,不适合城市轨道交通运输。

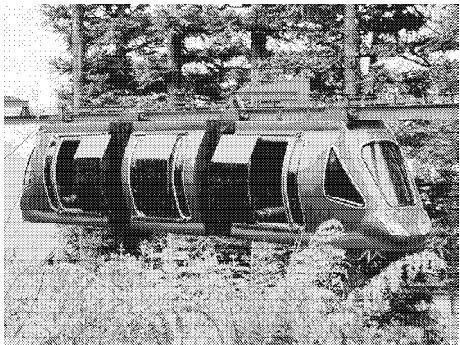


图3 巴西 Aldeia do Papai Noel 公园内的悬挂式单轨车

2.3 非对称悬挂胶轮型

非对称悬挂胶轮式单轨车是伍珀塔尔单轨车的升级型,采用非对称悬挂,即将悬挂构件安装于轨道梁一侧。它取消了转向架上的钢轮,取而代之的是橡胶轮胎。如日本东京上野动物园内的悬挂式单轨线,如图4所示。上野线于1958年12月17日正式开始运营,除了2001~2002年的暂停之外,一直营运至今。它一共有2站,总长0.3 km,采用直流600 V电压供电。列车由2节车厢编组而成,每节车厢上各有2个转向架。转向架上有走行轮和导向轮。位于轨道梁上在竖直平面内转动的是走行轮,负责承重、牵引以及制动。位于轨道梁两侧在水平面内转动的是导向轮,负责导向以及缓和横向振动。上野线发车间隔为7 min,旅行时间为90 s,在开通的第1年就超过了100万人次的运量。



图4 东京上野动物园的悬挂式单轨线

2.4 SAFEGE 型

SAFEGE型是目前最先进、应用最广泛的悬挂式单轨车,它采用对称式悬挂,最初由法国人设计。其特点是轨道梁为底部开口的钢制箱型梁,橡胶轮胎的两轴转向架运行于轨道梁内部,转向架上设走行轮和导向轮,沿着箱型梁内部的轨道运行。悬挂构件通过箱型梁底部开口将车体和转向架联接起来。道岔为箱型梁

内的可动轨,列车行驶方向的改变通过可动轨的水平移动来实现。

如图5所示为日本千葉市的SAFEGE型悬挂式单轨车。千葉单轨线由日本千葉都市单轨股份有限公司拥有并运营,共有2条线,总长15.2 km,共计18个站,是世界上最长的悬挂式单轨线。千葉单轨2号线的一部分首先于1988年3月28日开通,剩下部分于1999年3月24日开通。其以2节车厢为一编组,采用直流1 500 V电压供电,日客运量在4万人次以上。千葉单轨线至今仍在不断延伸,其影响力也在不断扩大,现已成为千葉市的象征之一^[5]。

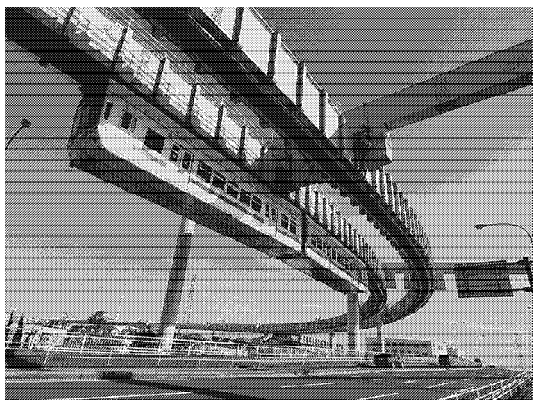


图5 日本千葉市的悬挂式单轨线

图6所示为千葉市单轨车的转向架。由转向架构架、橡胶轮胎、空气弹簧、摇枕、牵引装置以及制动装置等组成,自重4.5 t,轴重9.5 t。2根车轴上共装有4个橡胶走行轮胎,固定轴距1.55 m,走行轮直径1 050 mm,宽度312 mm,左右中心距880 mm。走行轮由纵向牵引电机驱动,采用盘形制动,制动盘安装在电机转轴上。构架4个角落上装有4个导向轮,走行轮、导向轮的作用与非对称悬挂胶轮式相同,且均配有备用轮以保证安全。二系悬挂为空气弹簧,摇枕横跨在两空气弹簧之上。车体悬挂构件贯穿构架中心的孔之后与摇枕联接。悬挂构件由悬挂杆、吊管和安全钢索组成,悬挂杆损坏时安全钢索会起到安全保障作用。图7所示为千葉单轨的走行原理和悬挂关系图,SAFEGE型单轨车很多都采用这一模式。

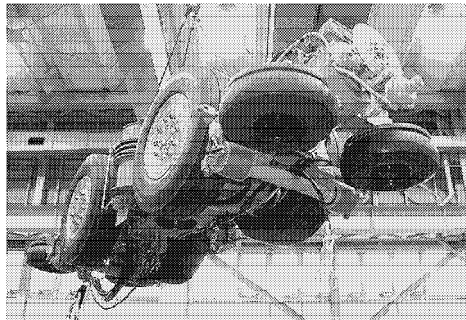


图6 日本千葉市单轨车的转向架

日本的另一条SAFEGE型悬挂式单轨线为湘南线,位于神奈川县境内,如图8所示。湘南线又称江之岛线,是湘南单轨电车股份有限公司所属的电车路线,

从大船站到湘南江之岛站, 共8站, 全长6.6 km, 开通于1970年, 日客运量为30 000人次^[6]。

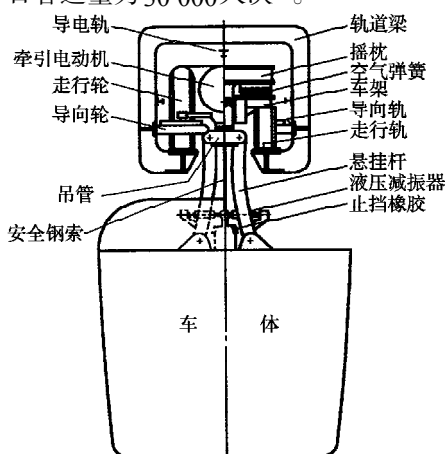


图7 千叶单轨的走行原理和悬挂关系图

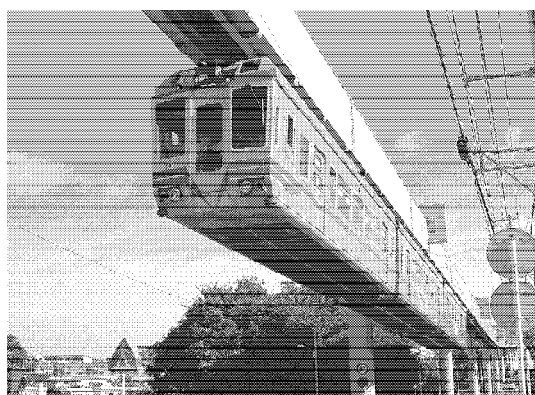


图8 日本湘南线悬挂式单轨车

德国的Siemens公司和DUEWAG公司自1972年以来就致力于自动化悬挂式单轨系统的研究。目前的悬挂式单轨线主要有多特蒙德大学线和杜塞尔多夫机场线, 属于SAFEGE型。这2条线均基于Siemens公司的SIPEM(Siemens People Mover)计划而开发。

图9所示为德国多特蒙德大学内的悬挂式单轨线, 1984年开通, 由于深受学生欢迎而不断扩建, 目前长度已达3 km, 共计5站, 最高速度为65 km/h, 日客运量5 000人次^[7]。图10所示为德国杜塞尔多夫机场线, 其采用了和多特蒙德大学线相同的技术, 均可实现自动化驾驶。该单轨线2002年开通, 将火车站和机场的2个终点站连在一起, 长2.5 km, 共4站, 最高速度为50 km/h, 从火车站到终点站大约花费5 min, 日客运量为11 000人次。



图9 多特蒙德大学悬挂式单轨线

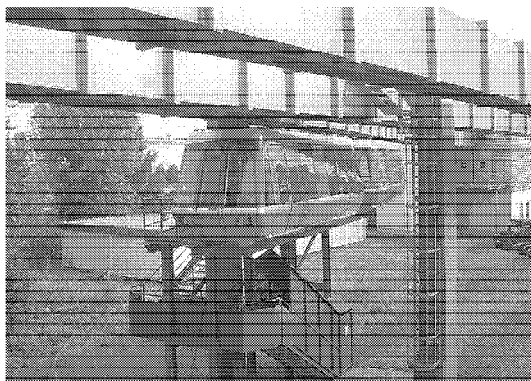


图10 杜塞尔多夫机场悬挂式单轨线

此外, 印度也在研究钢轮钢轨式的SAFEGE型单轨。2004年, 印度果阿地区建成了一条1.6 km长的悬挂式单轨试验线, 称为Sky Bus metro, 并开始测试。其在箱型轨道梁内铺设了标准轨距的钢轨, 其上运行钢制车轮转向架, 速度可达到100 km/h。由于2004年9月25日的一次人员伤亡事故, 该项目被终止。但之后, 设计者宣称事故可以避免并将在3个月后恢复测试。

3 悬挂式单轨的特点及应用前景

3.1 悬挂式单轨的特点

悬挂式单轨车有着所有单轨系统的共同优点:

①建设成本较低。例如地铁工程的建设成本估计为8 000万美元/km, 其可以达到的单向客运量为7万人次/h, 则地铁每公里每小时单位万人次运能的建设成本为1 143万美元。单轨铁路的建设成本估计为2 000万美元/km, 其可以达到的单向客运量为2万人次/h, 则单轨铁路每公里每小时单位万人次运能的建设成本为1 000万美元, 比地铁工程稍低。其次, 单轨铁路工期短, 施工较简单, 轨道梁为预制, 可以直接拼装, 不像地铁工程建设周期动辄需要4~5年。

②占用地面面积小, 空间适应性强。只占用地面支座的土地面积就可在空中建起一条运输线, 无需道床, 对地面建筑影响极小, 更不会影响地下管道。同时其轨道细长, 是目前地上高架交通设施中遮挡日光照射最小的。

③运输安全性好, 没有脱轨的危险, 且与路面交通互不干扰, 运行准点。

④爬坡能力强, 可通过的曲线半径小。其使用橡胶轮胎, 可通过100‰的坡道和半径30 m的曲线。由于大坡度和小曲线半径会增大能耗, 故坡度一般在60‰以下, 曲线半径在100 m以上^[8]。

⑤噪声小, 乘坐舒适。橡胶轮胎可以减小噪声和振动, 列车运行平稳。

悬挂式单轨车的缺点较明显, 由于使用橡胶轮胎, 故阻力较钢轮钢轨系统大, 能耗也较大, 并有一定的粉尘污染。运能较小, 道岔结构复杂, 且不能与其他轨道交通衔接。发生事故时的逃生、救援也较困难。同时

由于轨道梁是高架结构,车辆段内的存放线和列检线都要架高,库房也要相应增高,增加了车辆段工程的投资^[9]。

与跨座式单轨车比较,悬挂式单轨车有以下优缺点:

①悬挂式单轨车将导电轨和走行装置隐藏在箱型轨道梁内部,不易受外界天气条件影响,恶劣天气下依然畅行无阻,但是不方便检查维修。而跨座式单轨车跨坐于轨道梁上,将轨道梁、导电轨及道岔暴露在外,虽易检修,但为了预防大雪等恶劣天气需在轨道梁上安装加热装置或在列车端部安装除雪器,有时还需考虑防滑。

②悬挂式单轨车的轨道梁与跨座式的相比安装高度更高,这就要求更高的支撑柱。但在下部限界相同的情况下,悬挂式单轨车的站台可以建造得比跨座式的更低,更方便乘客登上站台乘车,如图11所示。

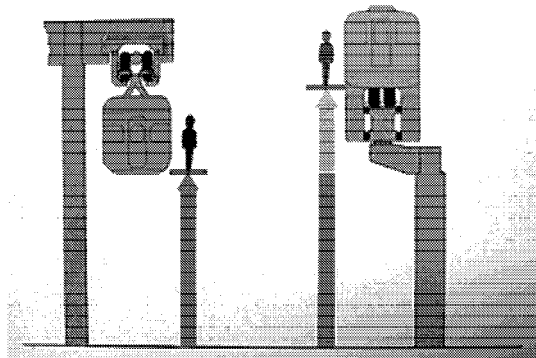


图 11 悬挂式、跨座式单轨站台高度比较

③悬挂式单轨车在强风的情况下没有跨座式单轨车稳定^[10]。

④悬挂式单轨车可通过的最小曲线半径极小,而跨座式车最小曲线半径有一定限制。

悬挂式单轨和跨座式单轨孰好孰坏的争论一直存在,无论怎样,两者都有不少成功运营的例子。

3.2 悬挂式单轨在我国的应用前景

我国幅员辽阔,各城市的地形及气候条件差异较大。对城市交通方式的选择,应根据城市近、远期的交通需求量,地理特征,工程技术经济等情况选择相应的交通系统。悬挂式单轨在我国研究得较少,其在城市轨道交通中目前尚无应用,但应具有一定的市场潜力。根据国外的运用经验,悬挂式单轨未来在我国的应用可有以下几方面:

①高峰单向断面客流量在5 000~20 000人次/h的短途交通干线上。

不同城市、不同干线上客流量是不同的,必须根据近、远期预测客流量选择相应运送能力的交通系统,使交通系统的运送能力略大于预测客流量,这样才是最经济合理的。悬挂式单轨交通的运能为5 500~21 000人次/h,适合于高峰单向断面客流量在5 000~20 000人次/h的交通干线上。由于使用橡胶轮胎能耗较大,随

着运量和距离的增大,其运营成本提高非常多,故悬挂式单轨一般用作15 km以内的短途交通运输工具。

②作为城区通往机场、码头、铁路干线等对外交通枢纽中心的客运交通干线。

通往这些对外交通枢纽的城市客运线具有客流性质单一,交通量集中的特点,一般远离市区,往往是两点间的运输,全天客流量一般为10万人次左右。为了给乘客提供快速、准点、安全、舒适的交通服务,悬挂式单轨是较理想的交通工具之一^[11]。

③大城市中心区与郊外大住宅区之间的交通线。

许多大城市市中心往往是经济、商业中心,人口以及建筑布局密集,房价高,发展余地不大。为了城市发展需要,在郊外建设大型住宅小区是为市民解决住房问题的有效办法,而只有提供了便捷的交通,才不会影响住宅区的发展与投资效益。若没有其他城轨交通经过这些住宅区的话,悬挂式单轨可以满足这些居民的交通需求^[11]。

④大城市中的环形线。

交通路网呈放射状的大城市,为了减少前往市中心区换乘到其他线上去的客流量,可以考虑建设悬挂式单轨环形线,使乘客免去或减少换乘从而快速到达目的地,提高城市交通服务水平^[11]。我国大城市的环形高架线较多,研究环形高架线和悬挂式单轨的组合交通体系是未来值得研究的课题。

⑤作为城市旅游景区的观光游览线。

很多旅游景区往往有许多景点,景点多而分散,身体不好的游客往往无法方便地在各景点之间参观,在缆车无法满足运量的情况下,可以考虑修建悬挂式单轨游览线。其在使游客饱览沿途风光的同时,不会破坏景区景观。城市在条件许可的情况下修建悬挂式单轨可以促进城市的旅游业发展^[11]。

⑥为适应地理环境的需要。

有些城市由于地理、气候等条件的原因不便修建轻轨、地铁等城轨系统。山地城市地势高低不平,对车辆的爬坡能力有一定的要求,传统的钢轮钢轨系统无法满足爬坡要求,故采用橡胶轮胎的悬挂式单轨车是主要选择之一。对于冰雪天气出现较多的城市,选择线路不易受这些天气影响的悬挂式单轨较为理想。

近年来我国轨道交通建设发展迅速,截至2012年,国务院批准建设轨道交通的城市已达31个,未来还将继续增加^[12]。“十二五”期间,全国城市轨道交通基础设施总投资规模预计达到1.3万亿元,市域/市郊城镇化发展将加速,作为城市总体规划的市域/市郊铁路将步入快速发展期,根据全国城市轨道交通的发展趋势,“十三五”、“十四五”将是建设的高峰期,投资规模也将进一步增大^[13]。目前,国际空列集团已经拥有H-Bahn单轨在中国的专利权^[14],并且与铁道第三勘察设计院集团、南车株洲特种装备技术(下转第76页)