

摘 要

随着我国城市社会经济的飞速发展，城市人口猛增，交通量迅速加大，城市交通问题已经成为我国大城市社会经济发展和城市各项功能建设的瓶颈。从世界各国大城市的轨道交通发展历程来看，修建城市轨道交通是解决大城市交通问题的最为有效的手段之一。而轨道交通制式的选择便成为各城市轨道交通研究的重要问题。

直线电机系统是一种新型的城市轨道交通系统，它以其爬坡能力强、转弯半径小、噪音低、服务水平高等一系列优点越来越受大家的关注。

本文从直线电机牵引轮轨系统的发展概况、直线电机系统的原理和特点、直线电机系统各关键技术分析、直线电机轮轨系统与其它轨道交通模式比较等方面进行详尽的论述，更进一步说明直线电机轮轨系统强大的优越性。并对我国北京、广州、重庆三个城市应用直线电机轮轨系统的适用性进行了多方面的分析和论证。说明直线电机技术在我国的应用前景是非常好的，对于降低造价、提高轨道交通技术水平有深远的意义。

同时，在应用发展中所存在的问题和遇到的困难也应正确地对待，对新引进的技术进行深入地分析、研究，并最终消化、吸收、改进和完善成为我国自身的技术。希望在不远的将来，我国成为继加拿大和日本之后，第三个拥有直线电机轮轨技术的国家，拥有自己的知识产权，使直线电机轮轨技术在我国得到广泛的应用。

关键词：城市轨道交通 直线电机系统 适用性分析

ABSTRACT

With the fast economic development of cities in China, the urban population and traffic increase rapidly. The urban traffic is becoming the bottleneck that blocks the economic development and other functional construction of the city. From the development of many big cities in the world, we can see that Urban Rail Transit construction is one of the most effective ways to solve the urban traffic problem. Then, how to select the Urban Rail Transit mode becomes an important topic in Urban Rail Transit research.

The Linear Metro System is a new type of Urban Rail Transit system, which attracts more and more attention because of its remarkable features: it can go through steep gradients and sharp curves safely, smoothly and quietly; it has better services.

In this paper, the history, the principle and features of the Linear Metro System are introduced. Some key technologies of the Linear Metro System are analyzed. Through the comparing with other traditional Urban Rail Transit systems, we know that Linear Metro System has more advantages. And then the applicability of the Linear Metro System in three cities of China is analyzed. It is concluded that the Linear Metro system will have good prospect in the application of China. It has profound significance to reduce the construction and operation cost and to enhance the level of urban transit system.

At the same time, we must face the problems and difficulties we will meet in the application with right measures. We must analyze and study deeply on the new introduced technologies, and change them to our own knowledge. It is expected that China will become the third country that owns the Linear Metro System technology and intellectual copyright after Japan and Canada. At the end, we wish that the Linear Metro technology is applied widely in our country.

Key words: Urban Transit System; Linear Metro; applicability analysis

1. 绪论

1.1 我国目前交通现状分析

随着我国城市社会经济的飞速发展，城镇化和机动化进程的加快，城市规模迅速扩大，城市人口猛增，交通量迅速加大，有限的地面道路的扩展已经满足不了机动车增长的需求。我国 113 座大城市普遍陷入难以摆脱的交通困境。城市交通问题已经成为我国大城市社会经济发展和城市各项功能建设的瓶颈。突出表现在以下几个方面：

1.1.1 城市交通拥堵严重，交通效率降低

近年来，虽然一些大城市加快了城市道路交通的建设，但交通供需矛盾依然十分尖锐，交通拥堵有进一步加剧的趋势，大城市中心区的行程车速平均不到 20 公里/小时。机动化水平发展领先的北京，交通拥堵在时间与空间上呈现蔓延扩展趋势，拥挤程度也在不断加剧。即使执行严格限制私人小汽车政策的上海市，交通堵塞状况依然日趋严重。

据有关经济研究机构测算，我国大城市因交通运输的制约，GDP 损失可能达到 1~2 个百分点。北京市调查和测算表明，公共汽车平均运营速度每下降 1 公里/小时，相当于损失 200 部公共汽车的运力，经济损失高达 1 亿元^[4]。交通拥堵导致的交通效率下降，已经增大了城市运营的成本，严重制约了城市经济社会的发展。

1.1.2 混合交通特征显著，通行效率低

我国大城市还有一个有别于一些发达国家大城市的显著特点，即自行车交通仍然占有较大的比重，自行车与机动车两种不同属性的交通工具混

合行驶的现象比较普遍。据二十世纪 80 年代调查, 9 个人口超过 200 万人的特大城市中, 居民采用自行车出行的比重达 36.2%, 公共交通的比重为 22.2%; 10 个 100~200 万人的特大城市中, 自行车出行比重达 42.4%, 公共交通的比重为 16.5%; 10 个 40~100 万人的城市中, 自行车出行比重高达 55%, 而采用公共交通出行的只占 4%^[4]。尽管近年来部分大城市的自行车使用量逐年减少, 但就总体规模而言, 自行车交通仍是城市交通的主要方式。据 1998~2001 年调查, 北京、上海、天津、南京、武汉、兰州、石家庄、乌鲁木齐、南宁等 9 个城市, 居民出行中自行车方式比例平均为 34.59%, 公共交通方式为 15.3%, 步行方式为 36.69%, 其它机动车为 13.42%^[4]。

长期以来, 由于城市客运交通市场的不健全, 居民的选择余地很小, 因而形成了以自行车交通为主的城市客运交通结构。在汽车数量较少的情况下, 交通问题并不突出, 随着城市机动化的发展, 如何处理自行车和汽车交通的矛盾已经成为城市交通的“怪圈”。多年来, 面对如此巨大的自行车交通, 城市中没有形成与此相适应的完善的“快”、“慢”分行道路网系统, 而仅仅在主要干道上提供了路段分行的“三块板”道路系统, 把混合交通的矛盾转移到路口, 更多的道路是汽车与自行车混合行驶, 降低了路口及路段的道路通行能力, 导致道路资源低效使用。

1.1.3 交通结构失衡, 道路资源利用不合理, 交通污染严重

当前, 我国城市交通结构仍处于无序发展阶段, 由于缺乏有效的引导政策和手段, 交通结构呈现向个体机动化演变的趋势, 私人轿车、出租车等占用道路资源比较多的交通方式在通勤交通中的比重逐渐加大, 不仅浪费了十分短缺的道路资源, 加剧交通拥堵, 而且也使得交通产生的大气和噪声污染在城市污染中的比重呈上升趋势。北京市与汽车排放相关的氮氧化物、一氧化碳分别为每立方米 0.127 毫克和 2.6 毫克, 三环至四环的平均等效声级达到 70.1 分贝, 广州市交通噪声超过 70 分贝的路段占主要道路的 26.7%。

1.1.4 停车供需矛盾激化

随着城市中机动车数量的增多，各大城市普遍存在停车难的问题。据多数发达国家的经验，平均每辆车要 1.2~1.5 个停车位才能满足需要，一般露天地面停车场为 25~30 平方米/车，室内停车库为 30~35 平方米/车。而我国绝大部分城市的居住区以及中心商业区、文化设施、车站等大型公共建筑，由于没有配建足够的停车设施，或配建停车设施挪作它用，百辆汽车停车位不足 35 辆，占路停车现象非常严重。在我国 10 多个特大城市中，市中心区现有的停车位很少，只能满足实际需求的 1/2，有些城市甚至只能满足 1/4~1/6 的需求。北京市机动车保有量有 200 多万辆，停车位数量不足 70 万个；广州市机动车保有量 80 万辆，停车位只有 18 万个；南京市 40 万辆机动车，停车位数量不足 7 万个^[4]。在这些停车位中，利用道路停车的数量占到了近 1/3。停车设施不足，不仅造成了停车难的问题，而且由于较多地利用道路停车，影响了道路的正常通行，破坏了城市的总体环境。

1.1.5 城市轨道交通规模不足，严重滞后于城市的发展

我国大部分大城市都属于用地高度集中的单中心城市，人口、城市功能高度集中，单靠地面的机动车交通已经不能承担目前的交通需求。从国外机动化高度发达的城市经验来看，必须建设足够规模的城市轨道交通，才能满足汽车化时代的交通要求。

目前我国通车运营的城市轨道交通线路总长约 257 公里。在总量上，还不如伦敦（408 公里）、东京（290 公里）、纽约（370 公里）等城市的地铁多。因此，在城市交通中，城市轨道交通难以发挥应有的作用。

1.2 修建城市轨道交通的必要性

从世界各国大城市的轨道交通发展历程来看，修建城市轨道交通是解决大城市交通问题的最为有效的手段之一。城市轨道交通以其低污染、低

能耗、高效率的运输方式成为大城市走出交通困境的重点战略，并成为许多大城市解决交通问题的首要选择。几乎所有发达国家都将建设轨道交通作为通过提高交通供给水平解决城市交通问题的根本手段，甚至在 1994 年 4 月新加坡召开的国际市长级会议上明确为现代化城市标志。我国早在 1985 年的《中国技术政策》蓝皮书中，基本确定了百万人以上大城市的综合交通运输系统以城市轨道交通为骨干的发展方向。在 1995 年实施的《城市道路交通规划设计规范》中也强调指出了“规划城市人口超过 200 万人的城市，应控制预留快速轨道交通用地”。

近年来随着我国经济的发展，城市化进程加快，我国城市建设同时也进入了飞速发展时代，城建面积不断扩大。区域性经济中心城市（如北京、上海、广州等）、特大型省会城市（如武汉、沈阳、南京等）、经济高度发达的城市（如深圳、青岛、苏州等），这三类城市的发展和变化更是日新月异。经济发展客观上要求交通必须同步发展，否则将会制约城市其它方面的发展，这些城市都开始进行城市轨道交通的前期准备和建设，许多城市已经将城市轨道交通建设确定为近期城市建设的重点。初步预测 2005-2010 年间至少要建设 500-600 公里，需要投资 3000 多亿元。我国城市轨道交通系统建设已进入了飞跃发展的阶段。

1.3 修建直线电机轮轨系统的必要性

我国目前运营的地铁线路基本都采用的是传统的轮轨模式，在实际的设计和施工应用中，遇到了一些问题。主要表现在以下方面：

1) 随着城市的高速的发展，在城市中心的人口密集地区修建地铁线路的条件愈来愈苛刻，地下空间状况越来越复杂，地下建筑、地下管线越来越多。有些地段的轨道交通走廊因为未得到有效控制，致使线路走向困难，经常遇到大的污水管线、雨水管线、建筑物桩基、桥梁桩基等。在这种状况下，线路就需要设计小的曲线半径或较大的坡度，以躲避这些地下的障碍物，否则线路就将穿越不过去。要不就得对大的管线进行改移或进行桩

基托换工作，这也是近年来地铁设计和施工中经常遇到的难题，往往给设计和施工带来极大的难度和巨额的费用。要解决这个问题只有做好两件事。

a. 尽快合理有效地规划和控制地下空间的开发，特别是有效控制住已规划的和有可能成为轨道交通客运走廊的区域，为城市轨道的建设提供有利的条件。

b. 采用新型的轨道交通模式，以适应目前遇到的苛刻线路，例如：引进目前较为先进的直线电机轨道交通系统。以东京地铁 12 号线为例，东京地铁 12 号线线路位于东京核心区，线路条件较为复杂。为了提高换乘的便捷性和服务水平，体现以人为本的设计理念，环线上 28 个车站中，有 21 个可与其它轨道交通线路形成直接换乘，而且大多设计为同站台换乘。由于是与已有的地铁线路进行换乘，大江户线的车站大都位于地下 3-4 层；部分位于地下 5-6 层；新宿站的站台则位于地下 7 层。为此，线路的最小曲线半径只有 100m，最大坡度设计为 50%。这对于常规地铁来说，是不可能实现的。因此，开发新型的轨道交通系统，以适用于城市中心人口稠密、建筑密集、地下状况复杂的建设条件，对于降低地铁造价、城市轨道交通的发展具有重大的意义。

2) 我国幅员辽阔，地形地貌千差万别。有些城市处于山区，地形高低起伏，极为复杂，例如，重庆；有些城市水道、河道密集，地下地质情况复杂，例如，广州。在这些城市修建城市轨道交通也具有一定的难度，同样遇到需要随着地势状况设计较大的爬坡，可避免较大和较长的埋深，降低建设投资；可躲避水道、河道，以避免其对地铁隧道的威胁。这些情况下，采用传统的地铁存在很大的问题。这也需要应用新型的地铁系统来适应特殊的线路状况。

3) 由于传统的旋转电机系统是利用轮轨黏着力前进和爬坡的，在雨雪天气下，轮轨黏着系数很低，极不安全，对传统轮轨系统的运营影响较大。因此，对于雨雪天较多、又采用高架线路的城市也需要引进新型的城市轨道交通系统。直线电机系统采用的是电磁力牵引的方式，与黏着系数无关，

对于雨雪天气的影响很小，在这种城市具有很大的发展空间。

4) 传统的轮轨系统在我国上海明珠一期地铁和北京城市地铁、八通线都采用的是高架或地面线路，但获得的评价较差。这是因为其高架或地面线路在经过居民区时，产生的噪音和振动都很大，严重地影响了沿线居民的正常的生活，使得紧邻地铁线路的房地产开发项目也受到了影响。直线电机系统在这方面也表现出了很大的优越性，在生活品质要求很高的加拿大城市温哥华，Skytrain系统的表现极为突出。其整个线路基本都采用的是高架形式，在城市中心区穿过人口较多的写字楼，车站就设在写字楼上，大大方便了在写字楼上班的乘客；在市郊则从高档的别墅区旁边经过，噪音极低，温哥华的居民都称其为最安静、安全、舒适的交通系统。

5) 传统轮轨系统要在线路沿线选取面积大约 30 公顷的土地作为车辆停放和维修的基地。在土地资源较为紧张的城市，以山城重庆为例，选取一片平坦的土地作为车辆停放和维修的基地相当困难。如果选用直线电机系统，维修量减少，将大大节省土地资源。据国外经验，只需十几公顷的土地即可满足要求。

直线电机运载系统在许多方面都表现出了强大的优越性，具有很强的生命力。在此背景下采用直线电机轨道交通系统这一新型系统以适应城市地形、地貌等城市自然特性，还可以适应密集、拥挤、狭窄的城市快速发展后果。同时，有利于促进城市轨道交通技术与产业的发展，带动或形成一批新产业的兴起，改造传统的产业结构，其社会、经济和科技意义是十分明显的。

1.4 我国研究直线电机轨道交通系统的基础

我国的许多城市，例如北京、上海、广州、重庆等城市都对直线电机系统进行了论证和研究。

1) 1987 年，北京市地铁公司组织了有关部门对原规划路网中的西颐线

(西直门至颐和园)所采用的制式进行了系统研究。因西颐线线路要经过中关村、北大、清华等高校地区,为了减小对沿线的影响,当时通过充分论证,第一次在工程中推荐采用直线电机系统。但由于种种原因工程并未建设,当时对直线电机系统耗能问题的也有不同的看法。

2) 北京市在首都机场线的交通制式的必选过程中,对直线电机系统在机场线的应用进行了深入探讨,交通发展研究中心委托北京交通大学城市轨道交通研究中心针对北京机场线进行了《直线电机系统在首都机场线的应用预可行性研究报告》的课题研究和编写工作。

3) 广州地铁在我国率先引入了直线电机牵引轮轨系统技术。目前广州大学城专线项目土建工作已全面展开,车辆已完成招标,将于2005年底通车运营。为了直线电机项目更好的运作,北京交通大学城市轨道交通研究中心结合广州项目可能遇到问题提出了11个课题的研究工作,希望能够为直线电机在我国城市轨道交通领域的发展做出贡献。

4) 重庆市也对直线电机牵引系统技术进行了深入地研究和论证。

5) 国家为了支持直线电机在城市轨道交通领域的应用研究工作,结合广州地铁四号线工程,国家发展与改革委员会正在对《城市直线电机轨道交通关键技术与设备研究开发》的研究课题进行积极的前期组织及准备工作。城市轨道交通研究中心、建设部地铁与轻轨研究中心、株洲电力机车研究所、永济电机厂等研究部门及厂家进行了多次的交流,为课题研究的顺利进行提供了可靠的保证。在国家为强大的后盾下,相信直线电机系统作为一项新型的轨道交通系统,将带动新的产业的发展,具有良好的发展前景。

1.5 研究的目标

直线电机轨道交通系统在我国应用前景分析与研究课题是在对国外直线电机牵引轨道交通系统进行全面调查研究的基础上,对其发展现状、技

术经济特性、适用范围等进行深入地分析、较为详尽的论述其在城市中应用的优势，得出直线电机轨道交通系统的发展对于降低造价、提高轨道交通技术水平有深远的意义，具有良好的发展前景。同时，阐述在应用发展中所存在的问题和遇到的困难。

2. 直线电机轮轨系统概述

2.1 直线电机技术在轨道交通系统中的发展与应用

大约在 100 年前，匈牙利就研制了 LIM（Linear Induction Motor，直线感应电机）传动方案，并申报了专利。但是由于当时还无大功率控制技术，很长一段时期内 LIM 传动没有能在交通运输系统中得到应用。直到上世纪 60 年代初，由于大功率半导体器件问世，LIM 传动出现了生机。直线电机系统开始广泛应用于各种领域，下面就直线电机技术在交通领域的应用进行简要地论述：

2.1.1 高速磁悬浮系统

高速铁路发展到一定程度，由于受到轮轨黏着的限制，制约了轮轨高速列车速度进一步提高。由此，德国快速运输财团和日本铁路研究所分别为高速磁悬浮铁路系统开发了不同类型的直线电机系统。

德国的磁悬浮铁路技术 TR（Trans Rapid，简称“运捷”），采用常导，长定子直线同步电机（LSM）及路轨驱动的磁悬浮铁路技术，最高试验速度为 450km/h（1993 年），适用于中长距离的超高速旅客运输，其技术基本成熟，目前已经建成的上海浦东机场磁悬浮铁路就是采用的该项技术。2003 年最高试验速度已达到 501km/h。

日本的超导磁悬浮铁路技术 ML（Magnetic Levitation，或称 Maglev），采用低温超导、长定子直线同步电机、路轨驱动的磁悬浮铁路技术，最高试验速度已达 581km/h（2003 年），适用于中长距离的超高速旅客运输，其技术也基本成熟。

2.1.2 中低速磁悬浮 HSST 系统

HSST(High Speed Surface Transport)系统是利用直线电机电磁力牵引前进；磁性悬浮模块吸引导轨产生悬浮力，支撑车体；气隙传感器监测磁体与导轨之间的间距，并随时进行间距调整，以避免车厢与导轨发生接触；悬浮磁体的侧向吸力同时用于 HSST 系统横向控制，被称为常导磁浮直线电机系统。由于采用非接触方式，其噪音和振动较小。

HSST 系统的开发始于 1972，1990 年在名古屋附近的大江建造了一条 1.64km 的 HSST 试验线，在经过一系列基础试验和实用化试验后，日方认为，作为新一代的城市交通工具，HSST-100 基本达到可以进行营业性运营阶段。1999 年日本名铁和爱知县决定采用 HSST 技术建设连接藤丘至八草间的地铁，线路总长约 8.9km。计划在爱知万国博览会之前的 2005 年通车，成为连接藤丘与名古屋东部丘陵地区的新的交通系统。

2.1.3 直线电机牵引轮轨系统

大约在 1970 年，英国工程师首次成功地将该技术应用于执行气垫船工程。此工程结束后，部分工程师移居加拿大，并为市郊运输设计了一种产品，作为安大略湖政府开发的中等容量运输系统的一部分，1985 年首先在多伦多市 kingston 建成了一条 6.4km 直线电机运载系统试验线。1986 年初在温哥华建成 28.9km 的 Skytrain 无人驾驶系统。2002 年又将其延伸至 51km，是目前世界上最长的直线电机牵引轮轨系统。

日本是在 1978 年开始研究将直线电机牵引技术应用于城市轨道交通系统的。1981 年到 1984 年为基础研究阶段，1985 年到 1987 年为使用开发阶段。1990 年日本的第一条直线电机牵引的地铁系统—大阪地铁 7 号线投入运营。1991 年日本东京地铁 12 号线开通运营。现在日本 7 个城市选用直线电机牵引系统来使用日趋紧张的地下空间资源，已经投入使用和计划建设中的线路总长将超过 120km。

至此目前世界上有两种制式的直线电机牵引的城市轨道交通轮轨系统——加拿大制式和日本制式。

由于本论文研究的是应用于城市的直线电机牵引的轮轨系统，故直线电机牵引的其它模式不作为此次研究的范围。以下文字所述的直线电机系统就指用于城市轨道交通的直线电机牵引轮轨系统。

2.2 直线电机轮轨系统的发展概况

直线电机技术作为一种较为成熟的技术，在世界上许多城市得到了越来越广泛的应用。

目前已运营的线路有加拿大多伦多 Scarborough 线、温哥华 Skytrain Expo 线和 Millennium 线、美国底特律 People mover 线、日本大阪地铁 7 号线（又称鹤见绿地线）、东京地铁 12 号线（又称大江户线）、马来西亚吉隆坡 PUTRA II 线、日本神户地铁海岸线、美国纽约 JFK（肯尼迪）国际机场线等。日本福冈市营地铁 3 号线即将投入运营，准备建设的还有日本横滨市营地铁 4 号线、大阪市营地铁 8 号线、仙台市营地铁东西线等。我国广州地铁 4 号线也采用了直线电机运输系统，目前正处在紧张的建设之中。

表 2-1 列举了目前已运营的、在建和准备建设的 16 个城市直线电机运输系统的主要指标。包括系统初始投入运营年度和目前运营的线路长度、车站数量、列车编组、车辆总数和客流高峰小时最小发车间隔。

表 2-1 直线电机运输系统主要指标

		线路名称	初始开通 年份 (年)	线路 长度 (km)	车站 数量 (座)	车辆 编组	车辆 总数 (辆)	高峰小时 最小发车 间隔(秒)
已 开 通 运 营 线 路	1	多伦多 Scarborough 线	1985	6.4	6	2	28	180
	2	温哥华 Skytrain Expo 线	1986	28.9	20	4	150	80
	3	温哥华 Skytrain Millennium 线	2002	20.3	12	2	60	80
	4	美国底特律 People mover	1987	4.8	13	2	12	180
	5	日本大阪地铁 7 号线	1990	15	17	4	100	180
	6	日本东京地铁 12 号线	1991	38.7	38	8	424	120
	7	马来西亚吉隆坡 Putra II 线	1998	29	24	2	70	80
	8	日本神户地铁海岸线	2001	7.9	10	4	40	-
	9	美国纽约肯尼迪机场线	2003	13.4	10	2	32	240
在 建	10	日本福冈市营地铁 3 号线	2005	12.7	16	6	126	-
	11	中国广州地铁 4 号线大学城专线	2005	14.11	5	4	40	240
准 备 建 设	12	中国广州地铁 4 号线南段	2006	21.4	4	4	-	-
	13	日本大阪市营地铁 8 号线	2006	12.1	11	4	60	-
	14	日本横滨市营地铁 4 号线	2007	13.1	10	6	636	-
	15	中国广州地铁 5 号线首期工程	2008	31.2	23	4	-	-
	16	日本仙台市营地铁东西线	2011	13.9	13	4	76	-

下面就对具有代表性的几个城市的直线电机系统的线路运营详细情况，最新技术发展情况作进一步介绍。其中包括加拿大温哥华的 Skytrain 系统、马来西亚吉隆坡 PUTRA II 系统、日本东京地铁 12 号线、美国纽约 JFK（肯尼迪）国际机场线。

2.2.1 加拿大温哥华 Skytrain 系统

加拿大温哥华 Skytrain 系统第一期工程以连接温哥华 1986 年世界交通博览会在市中心区内的两个场址为目标，线路全长 21.4km。1981 年 5 月开始修建，1986 年 1 月 2 日投入正式运营。第二阶段 2 个车站 3.1km 线路从 1986 年 1 月开始修建，于 1990 年 3 月投入运营。第三阶段 3 个车站 4.4km

的线路从1990年3月开始修建,于1994年3月投入运营,线路全长28.9 km, (隧道线路2.3km,地面线路3.1km,高架线路23.5km),共计20个车站。(地下站2座,地面站4座,高架车站14座),平均站间距为1.47km。此段线路称为Expo Line,从Waterfront至King George,详见图1.3-1,Expo Line为蓝线。

从1998年8月开始修建第四、五阶段20.3km长的延伸段线路(其中地下线1.8km,地面线0.9km,高架线17.6km),新建12座车站,已在2002年8月开通投入运营,称为新千年线Millennium Line,从Commercial Drive至Sapperton,在Columbia Station接入Expo Line,与Expo Line共线运营。详见图1.3-1,Millennium Line为黄线。目前Millennium Line的延伸线从Commercial Drive至Vancouver Community College(VCC)正在建设,计划在2005年开通,图中显示为空心的黄线。

温哥华还将采用Skytrain技术建设Richmond-Airport-Vancouver-Line,从市中心的Waterfront站延伸至温哥华国际机场和Richmond市中心,并计划于2010年冬季奥运会时建成通车运营。

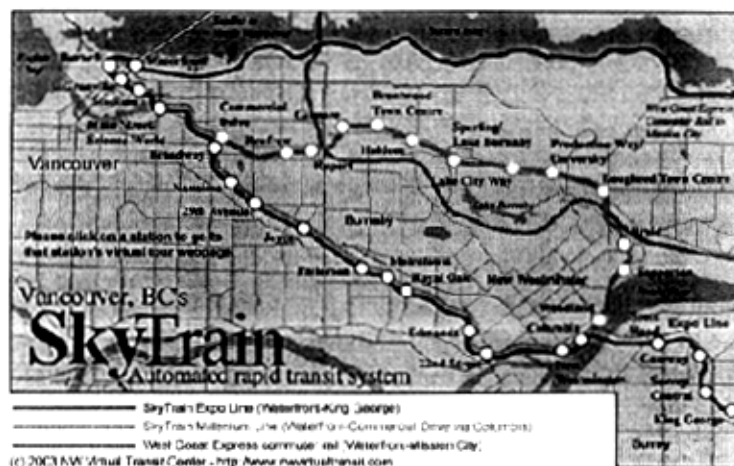


图 2-1 温哥华 Skytrain 线路图

两条线路成“Y”形交叉，实现两个交路的运行方式。Expo Line 与 Millennium Line 在 Waterfront 站至 Columbia 站共用相同的车站与轨道，Expo Line 延伸至 King George 站，Millennium Line 延伸至 Commercial 站。如果目的地不在 Waterfront 站至 Columbia 站之间，上车前就要认清标识，并听清广播，以免上错了车。

在 Millennium Line 的终点与 Expo Line 形成换乘，Millennium Line 的 Commercial 站与 Expo Line 的 Broadway 站设在一起。从 Millennium Line 的 Commercial 站下车，乘客可换乘 Expo Line 的 Skytrain 至 downtown。

共线运营是运营组织较为复杂，但服务水平较高，共线运营的部分行车间隔较小。行车间隔详见表 2-2。

表 2-2 Skytrain 系统行车间隔表

行车间隔	Expo Line (分钟)	Millennium Line (分钟)	共线部分 (分钟)
线路起点- 终点	Waterfront- King George	Waterfront- Commercial Dr.	Waterfront- Columbia
高峰	2-4	5-6	2-3
平时及晚上	6	6	3
夜里	8	8	4
节假日	6-8	6-8	3-4

Skytrain 系统目前有 32 座车站，线路从温哥华的 downtown 出发、连接了 Burnaby (本那比市)、New Westminster(新威斯敏斯特市)和靠美国边境的 Surrey (素里市) 四个城市。线路大多采用高架形式，沿地势起伏较大，最大坡度为 60%，最小转弯半径为 70 米。

Skytrain 系统由 TransLink 公司负责运营与管理。TransLink 公司成立于 1999 年，负责温哥华地区包括公共汽车、SeaBus(轮渡)、Skytrain 系统、西海岸通勤快速列车在内的公共交通、以及主要道路网的规划建设 and 智能交通系统等。无论您是乘坐公共汽车、SeaBus、Skytrain 或者是随意组合，都

可以一次性购票，使用同一张车票乘车。车票种类很多，我们可根据不同需求在自动售票机上购买车票。整个系统没有检票系统，工作人员在站台上，车上采用随时抽查方式，一旦逃票被抓将被重罚。

Skytrain 系统车辆由 Bombardier 公司制造，现配车共有 210 列，其中 MK I 型 150 列，MK II 型的车辆 60 列，MKII 型的车辆是在 MKI 型车辆的基础上开发的第二代产品，车厢内更为宽敞舒适。图 2-2、2-3 分别显示了温哥华 Skytrain 系统 MK I 型车辆和运行在多伦多 Scarborough 线上的 MK I 型车辆。图 2-4 为宽敞明亮的 MK II 型车辆车厢内部图片，图 2-5 为 MK II 型的车辆图。MK II 型车辆较 MK I 型载客量大大增加，使得营运所需列车数量大大减少，从而运营费用也得到降低。



图 2-2 温哥华 Skytrain MK I 型车辆图

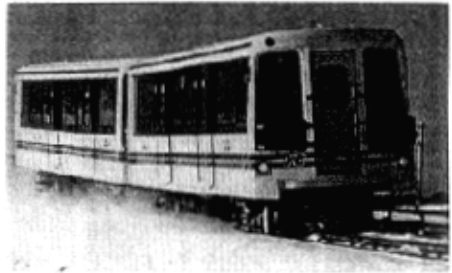


图 2-3 多伦多 Scarborough 线 MK I 型车辆



图 2-4 温哥华 Skytrain MK II 型车厢



图 2-5 温哥华 Skytrain MKII 型车辆

Skytrain 系统运营、车辆与轨旁设备维修和行政管理的基地，位于整条

线路的中部，占地 10 公顷。有 10 条自动存车轨道，提供夜间和非高峰期的列车存放。有两条车辆清洗与列车检查线，用于车辆每天的清洗与列车检查。有四条在车间内的线路，提供车辆的预防性维修与日常的检查，其中三条有地沟，允许车下设备的维修，一条安装有不落轮镗床。在车间内还有部件修理间和存货间。

温哥华 Skytrain 系统采用信号移动闭塞技术，已实现了列车运行与指挥自动化。此系统分为三级层次的管理和控制：管理层（系统控制中心 SMC）、操作层（车辆控制中心 VCC）和执行层（车载综合控制单元 VOBC）。SMC 主要完成列车运行的自动监控；VCC 主要负责对列车发出各种安全运行的间隔控制命令和列车运行的自动保护命令，并对前方的连锁设备进行遥控；VOBC 负责列车的安全驾驶，迫使列车运行受控于 VCC 发来的各种运行限制指标。

Skytrain 系统设置了一系列保证乘客安全的设施：

- a. 站台下轨道探测系统：在车站区域内，在站台下设置探测设施，当乘客或超过一定重量的物品掉到站台下时，及时将信息反馈给列车自动控制系统，该系统可控制进站列车实施紧急制动，保证乘客和物品的安全。
- b. 区间轨道侵入探测系统：提供列车行驶超出停靠车站而侵入轨道区间的探测。一旦列车行驶超出车站停站区域，该系统可通过一系列的红外线探测出来，并向控制中心报警。
- c. 在站台两端分别设置了请求帮助的红色紧急对讲机、列车紧急停车按钮，以及灭火器。
- d. 在每列车靠近门的位置处，设置了与控制中心联络的双向对讲机，可在紧急情况下寻求帮助。
- e. 在列车上的每个窗户的上面都设置有一条黄色的报警条。一旦发生安全问题，乘客可触及此黄色安全报警条，得到工作人员的及时帮助。

750V 直流第三轨供电。每辆车车长 33.7m，宽 2.65 米，2 辆编组。图 2-7 显示了吉隆坡 PUTRA II 系统运行的 MK II 型直线电机车辆。最大运行速度 70km/h，正常制动减速度为 1.07m/s^2 ，紧急制动减速度为 1.3m/s^2 ，平均车站时间为 18s，终点站为 30s，列车旅行速度 40km/h。



图 2-7 吉隆坡 PUTRA II 系统 MK II 型车辆

系统采用信号移动闭塞技术、全自动无人驾驶系统，最小发车间隔为 90s，最小安全距离为 30-100 米。

系统全天运行 18h，从 6:00-24:00，全天的发车间隔和配车数如下：

表 2-3 PUTRA II 系统全天发车间隔及配车状况

	早高峰前	早高峰	平时	晚高峰	晚高峰后
发车间隔	5min47s	2min52s	5min8s	3min19s	5min47s
配车数量(列)	16	32	18	28	16

高峰小时单向最大客运量为 33200 人，年客运量 3500 万。

PUTRA II 系统同样设有站台轨道侵入探测系统等安全保障措施，在车站区段内、在站台下设有红色的安全板，一旦有乘客或其他超过 7kg 的重物落下站台，将会有信号反应给中心控制室，将驶入车站的列车将会得到紧急刹车的信号，以保证车辆及乘客的安全。

塞、开发临海地域有着极其重要的作用。

由于是与已有的地铁线路进行换乘，东京地铁 12 号线的车站大都位于地下 3-4 层；部分位于地下 5-6 层；新宿站的站台则位于地下 7 层。因而采用了明挖、盾构、沉箱及基础托换等多种施工方法，以实现合理的换乘。相比之下，我国目前的换乘设计就没有很好地考虑以人为本的理念，设计得不够理想。

东京地铁 12 号线的运营时间为早上 5:00—晚上 11:00。晚上 11:00—早上 5:00 为检修时间。目前运营车辆为 424 列，高峰时间最小发车间隔为 2 分钟。

东京地铁 12 号线车辆为 1200 型车辆，4 辆编组，将来可增加至 8 辆编组。图 2-9 显示东京地铁 12 号线 1200 型车辆照片。直流 1500V 刚性接触网受电，直线电机牵引 120kW，自然风冷，直线电机与反应板间隙为 12mm，VVVF 逆变控制系统，ATC 自动列车控制系统。最高运行速度为 70km/h。



图 2-9 东京地铁 12 号线 1200 型车辆

东京地铁 12 号线设有木场车场和高松车辆段。两处均为地下两层，木场车场主要用于停车和月检、高松车辆段为大、架修段。架修为每 4 年或 60 万公里一修、大修为每 8 年一修。

2.2.4 美国纽约 JFK（肯尼迪）国际机场线

美国肯尼迪国际机场线(Airtrain JFK)于 2003 年 12 月 17 日建成通车,从此结束了纽约人对于不能乘地铁直达肯尼迪机场终点的抱怨。肯尼迪机场线线路全长 13.4km,耗资 19 亿美元,全程包括连接了 9 个候机楼的一条环状线路和两条支线。一条 Jamaica 支线沿着 Van Wyck 快速路至牙买加交通枢纽站(Jamaica station)。在这里可很容易的换乘至长岛铁路线(LIRR)、地铁 E.J.Z 线,以及许多的公交线路。一条支线延伸至霍华德海滩站(Howard Beach),在这里可与地铁 A 线换乘。沿线还在出租车停靠站、停车场设置了站点,极大方便了沿线的乘客。并将纽约地铁系统和长岛铁路线(LIRR)与肯尼迪机场极好地连接起来,形成航空、铁路、城市交通的有效衔接。该线建成后从市中心到机场旅行时间大约为 45min,初步设计每天吸引客流 3.4 万人次,这使该线成为美国通达机场的重要通道。

该线设置 10 座车站。其中 6 个服务于肯尼迪机场的九个候机楼,其他还设置了出租车停靠站、停车场站、霍华德海滩站和牙买加站。在牙买加和霍化德站为到达机场和来自长岛、曼哈顿和纽约市其它四个周边城镇的飞机乘客提供方便、快捷的换乘。在 Airtrain 的任何一个车站,乘客都能感受到机场的环境氛围,提供了有关乘客服务设施,如导向、航班信息和行李包装等。线路图详见图 2-10。

AirTrain 系统采用的是 Bombardier 公司提供的,与马来西亚吉隆坡 PUTRA II 线和温哥华千年线相类似的 MK II 相类似的最新的车型。采用了径向转向架等一系列的新技术,极好的适用于此条小曲线半径、大坡度的线路条件以及车辆精确停车定位的条件。3 米宽的车辆内部设计了舒适的座椅、宽体的车门,使带行李的旅客更方便的进出,设置了行李架和行李车存放的空间。图 2-11 显示了肯尼迪机场 MK II 型车辆。

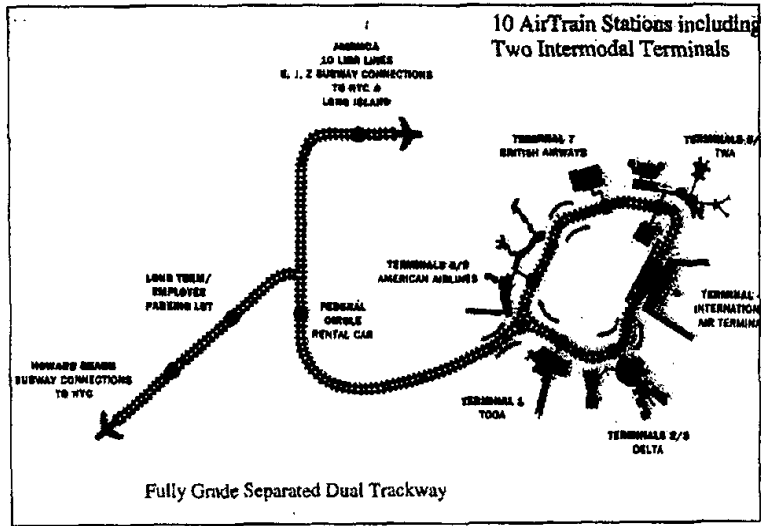


图 2-10 肯尼迪机场线线路示意图

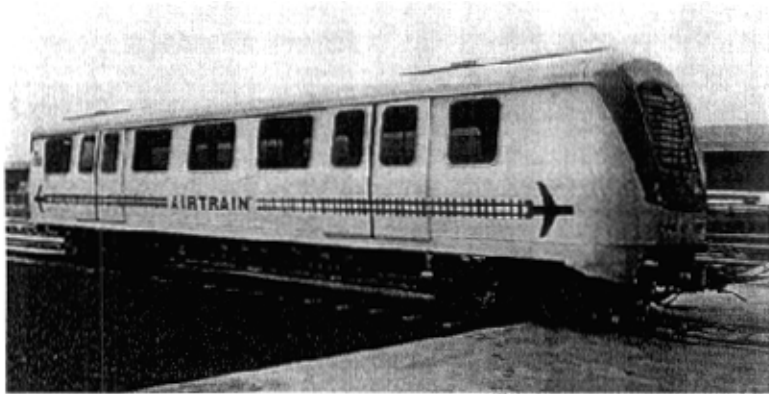


图 2-11 肯尼迪机场 MK II 型车辆

AirTrain 系统是一个全自动控制、无人驾驶的系统。无人驾驶的车辆是采用移动闭塞车辆控制系统的高度可靠的系统。全自动的车辆段为正线全自动运营作补充，减少了车辆人工驾驶的需要。

Airtrain 全天 24 小时开通，周末不休息。高峰时段往返牙买加和霍化德海滩站的列车运行间隔为 4 分钟。当乘客旅行需求较低时，列车的运行

时间间隔可以设为约 12 分钟。从牙买加（或霍化德海滩）到机场区中心航站楼旅行时间还不到 8 分钟。从机场区中心航站楼沿机场楼环线绕行一圈时间也不足 8 分钟；环形线上列车在高峰时段发车的时间间隔为 2 分钟。

2003 年开通后, Airtrain 起初就能吸引每天 34000 的乘客。其中 11000 人是下机乘客和机场员工, 23000 人将是环绕各航站楼的环线乘客、各航站楼、长期和临时停车场以及汽车租用设施等处的到离人员。预计有 40000 左右的机场员工会选择使用 Airtrain 上下班, 而不驾驶私人汽车。而且在今后十年随着机场乘客的增加, 该系统的客流量还将进一步加大。

基于当前的客流预测, 在去霍化德海滩与牙买加站的两线上早晚高峰采用两辆列车编组。在非高峰期和连接各航站楼的环线上一辆编组预计就能满足。为保证满足乘客和运输服务的需要, 以上三条线路都可以增加到四辆列车编组。

2.2.5 几种典型直线电机轮轨系统性能比较

在对国外已运行的几种典型的直线电机轮轨系统的建设运营情况进行了较为详细地介绍之后, 下面对几种典型的直线电机轮轨系统的技术参数和车辆的性能参数进行总结和比较。表 2-4 为典型直线电机轮轨系统及车辆性能参数比较表。

第二章 直线电机轮轨系统概述

表 2-4 典型直线电机轮轨系统及车辆性能参数比较

	加拿大温哥华 Expo 线	马来西亚吉隆坡 PutraII 线	加拿大温哥华 Millennium 线	美国纽约 JFK 线	日本大阪 7 号线	日本东京 都营 12 号线
开始运营时间	1986.1	1998.9	2002.8	2003.12	1990	1991
线路长度(km)	28.9	29	20.3	13	15	38.7
车站数量(座)	20	24	13	10	17	38
车辆型号	MKI 型	MKII 型	MKII 型	MKII 型	70 系列	12000 系列
配置列车数量(辆)	150	70	60	32	100	424
车辆编组(辆)	2 (2, 4, 6)	2 (2, 3, 4)	2 (2, 3, 4, 5)	2 (1, 2, 3, 4)	4	8
最小行车间隔(秒)	80	80	80	80	180	120
最大坡度(%)	6.25	5	6	5.35	-	5
牵引电压(v)	DC600; 三、四轨	DC750; 三、四轨	DC600; 三、四轨	DC750; 三轨	DC1500;架空 柔性接触网	DC1500;架空 刚性接触网
车辆净重(t)	14.37	22	22.3	24	24.5	25.5
超员轴重(t)	5.54	9.04	8.79	9.08	8.13	7.88
车辆尺寸	长(m)	12.7	17.35	17.6	15.8	16.5
	宽(m)	2.5	2.65	2.65	3.2	2.496
	高(m)	3.125	3.44	3.275	3.81	3.12
轨面至车地板高度(m)	0.79	0.825	0.8	1.118	-	-
门高*宽	1.93*1.22	1.91*1.6	1.91*1.6	1.91*1.83	-	-

第二章 直线电机轮轨系统概述

	加拿大温哥华 Expo 线	马来西亚吉隆坡 PutraII 线	加拿大温哥华 Millennium 线	美国纽约 IFK 线	日本大阪 7 号线	日本东京 都营 12 号线
轮径 (mm)	470	585	585	660	660	610
转向架轴距 (m)	1.7	1.9	1.9	1.9	-	-
转向架定距 (m)	7.94	12	12	12	-	-
车辆定员 (人)	4 人 / m ²	47+35=82	86+42=128	带行李: 71+26=97	90 (100)	90 (100)
	6 人 / m ²	71+35=106	129+42=171	不带行李: 179+26=205		
	9 人 / m ²	95+35=130	172+42=214			
牵引力 (KN)	650	650	650	890	-	-
平均旅行速度 (km/h)	41	38	41	41	-	-
最大设计速度 (km/h)	100	90	90	110	-	-
最大运营速度 (km/h)	90	80	80	100	70	70
加速度 (m/s ²)	1.21	1.0	1.0	1.34	0.69	0.83
制动减速度 (m/s ²)	1.0	1.0	1.0	1.0	0.97	0.97
紧急制动减速度 (m/s ²)	2.85	2.4	2.4	1.43	1.2	1.2
高峰小时单向最大客 流 (万)	2.25	3	2.6	-	2-3	-

2.3 直线电机轮轨系统制式的分类比较

目前世界上直线电机轨道交通系统设备主要由加拿大和日本的有关公司制造。两国在技术上各有侧重，我们在选用直线电机系统的时候还要对这两个系统进行充分的比较和研究。加拿大主要生产地上直线电机车辆，在高架桥、跨海大桥建设上有成功经验；日本则主要是地下直线电机轨道交通，在小断面隧道建设上成效显著；加拿大为无人驾驶，日本为单人驾驶。两国在直线感应电机（LIM）的设计中对各参数的选择也有不同。下面就几个关键的差异点进行简要比较：

2.3.1 加拿大制式

2.3.1.1 开发目的

加拿大温哥华和多伦多的直线电机系统是作为一项新交通系统发展而来的。总的来说，加拿大的人口密度较为稀疏，温哥华作为世界上最具吸引力和最宜居住的城市而著名。加拿大发展直线电机技术，是由于它的快捷、噪音低，景观好，安全、舒适尤其是作为可以推广的新型交通技术来发展的。多采用高架形式，在市中心和高档住宅区穿过，轻巧、美观是城市中的一道风景线。

2.3.1.2 技术特点：

- 以高架及地面线为主，只有少量的地下线；
- 车辆编组一般为 4 辆，客流量不大；
- 车辆尺寸：长度：12.7 米、宽度：2.5 米、高度：3.125 米；
- 重量：13.9 吨/辆；
- 车辆定员：106 人，其中 35 个座位，71 个站位；

- 受电方式：三轨受电，四轨回流，600Vdc；
- 转向架：迫导向径向转向架；
- 制动：以再生制动为主，配以液力盘式制动及紧急磁轨制动；
- 运行模式：移动闭塞信号系统实现无人全自动驾驶；
- 直线电机：采用强迫风冷，电机面积较日本的小。

综上所述，该系统以低噪音、低振动、大爬坡能力、小平面转弯半径、重量轻、小编组、高密度（发车间隔可达90秒）、无人全自动驾驶的特点，有利于实现以高架、地面为主，地下线为辅的运营模式。配以多项先进技术，实现能耗低、系统可靠性强，运营成本低的目的，成为城市轨道交通中的先进的、轻轨运量等级的运载系统。

2.3.2 日本制式

2.3.2.1 开发目的

日本与加拿大的情况相差较大，日本是一个面积极小的岛国，可居住的土地面积较为有限，尤其在东京、大阪等大城市，更是寸土寸金，人口密度极大。在东京的市中心区，地面上已经是高楼林立，地下的建筑物及桩基也已经是密密麻麻。因此，日本对地下空间的开发利用相当重视，早在上个世纪60年代开始，日本已大规模进行地下空间综合利用，目前已对城市地下50米的空间进行了详细规划。

日本的直线电机系统就是在这种背景下应运而生的，直线电机系统的隧道断面小、爬坡能力强、转弯半径小在日本的直线电机系统中得到了充分的体现。因此在日本许多新建的线路都选用了直线电机系统。

2.3.2.2 技术特点

- 以地下线为主，甚至车辆段及综合维修基地亦设置在地下；

- 车辆编组：一般采用 8 辆编组，客流量较大；
- 车辆尺寸：长度：16.5 米、宽度：2.49 米、高度：3.15 米；
- 重量：带司机室，头、尾车辆：24 吨，中间车辆：25 吨；
- 车辆定员：带司机室，头、尾车辆 90 人（32 个座位）；中间车辆 100 人（40 个座位）；
- 受电方式：1500VDC 上部受流
- 转向架：柔性径向转向架；
- 有司机自动驾驶系统，最短发车间隔 2.5 分；
- 直线电机：自然冷却；

综上所述，日本开发的直线电机运载系统的特点是，以经济实用不追求技术先进为特征，性能指标一般，致力于开发大运量，大编组、中等密度、小型化的直线电机运载系统，适合于地下线路运营使用。

2.4 小结

本章对直线电机技术在交通领域的应用进行简要地论述，对国外已运营的典型城市的直线电机轮轨系统—加拿大温哥华的 Skytrain 系统、马来西亚吉隆坡 PUTRA II 系统、日本东京地铁 12 号线、美国纽约 JFK（肯尼迪）国际机场线的建设、运营情况进行了较为详细地介绍，并对几条典型线路的线路和车辆等方面的特性和重要技术参数进行了总结和整理。最后，总结出加拿大和日本两大制式的开发目的和技术特点。这样我们对目前已运行的直线电机轮轨系统就有了一个总体的了解，希望对在建设新线的制式选择上有所帮助。

3. 直线电机轮轨系统原理及特点分析

3.1 直线电机牵引原理

直线电机是从旋转电机演变而来的。它的基本构成和作用原理与普通旋转电机类似，就如同将旋转电机沿半径方向切开展平而成。于是，其运动方式也就由旋转运动变为直线运动。直线感应电机 LIM 的原理示意图详见图 3-1。

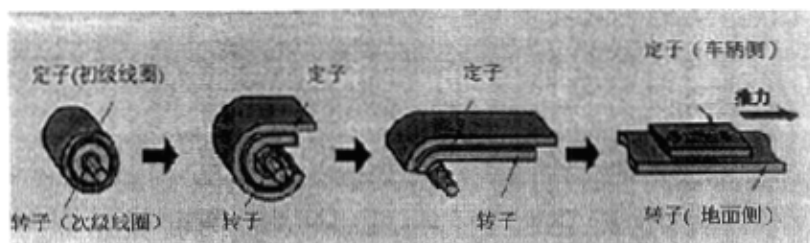


图 3-1 从旋转电机发展到直线电机

直线感应电机的工作原理类似于传统的旋转感应电机，可以理解为旋转感应电机的渐进线是线型的。即将旋转感应电机静止的定子（电磁铁和线圈）安装在车辆的转向架上、将旋转的转子（感应板）平铺设置在线路轨道的中间；当电流通过直线电机的电磁铁线圈时，会产生向前方向的磁场。通过与轨道感应板的相互作用产生牵引力，推动列车前进；改变磁场的方向，则使列车后退。改变电压与频率，可以控制磁场的变化，实现列车的启动加速与制动。为了保证一定的牵引力，直线电机车载电磁线圈与轨道感应板之间的距离应控制在一定范围内。直线电机的牵引原理见图 3-2。

这种牵引方式最大的特点就是驱动不再受到轮轨黏着的限制，而取决于该定子—转子系统的电磁性能，因而是一种非黏着的驱动方式，能在车

辆与导轨无接触情况下传递牵引/制动力。直线电机驱动同样可以利用VVVF 变流器控制定子磁场的变化，以产生相应的牵引/制动力，直线电机定子和转子间气隙必须要控制在一定的范围内。

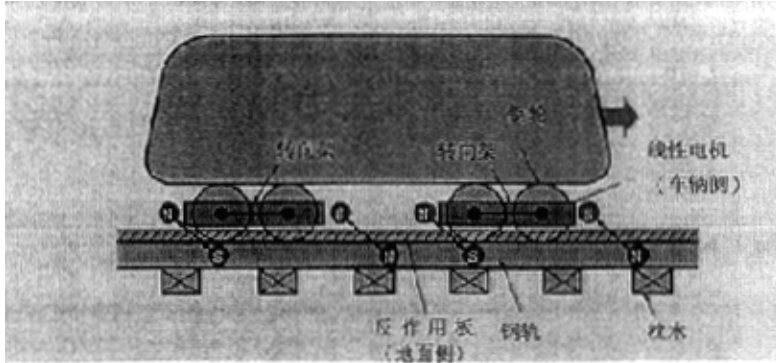


图 3-2 直线电机牵引原理

3.2 直线电机轮轨系统的特点

由于直线电机轮轨系统非黏着的特点，直线电机轮轨系统具有以下优越性和缺点：

3.2.1 直线电机轮轨系统的优越性

(1) 采用直线电机牵引技术，具有优良的动力性能和爬坡能力

直线电机系统的牵引力不受钢轮钢轨之间粘着条件的影响，钢轮仅起承载的作用，所以能获得很强的起动加速和制动性能，同时具有突出的爬坡能力，线路的最大坡度为 80%（传统地铁最大允许坡度为 30%），并能在恶劣的环境和轨面条件下保持良好的性能。这就有利于线路纵断面的合理设计，减少车站埋深、减少隧道及高架的过渡段长度等，从而减少拆迁工作量、降低地铁的土建工程造价。图 3-3 简要说明了由于爬坡能力强所带来的一系列选线优势。图 3-4 是直线电机 MK I 型车辆在恶劣的雪天环境中

运营的图片。

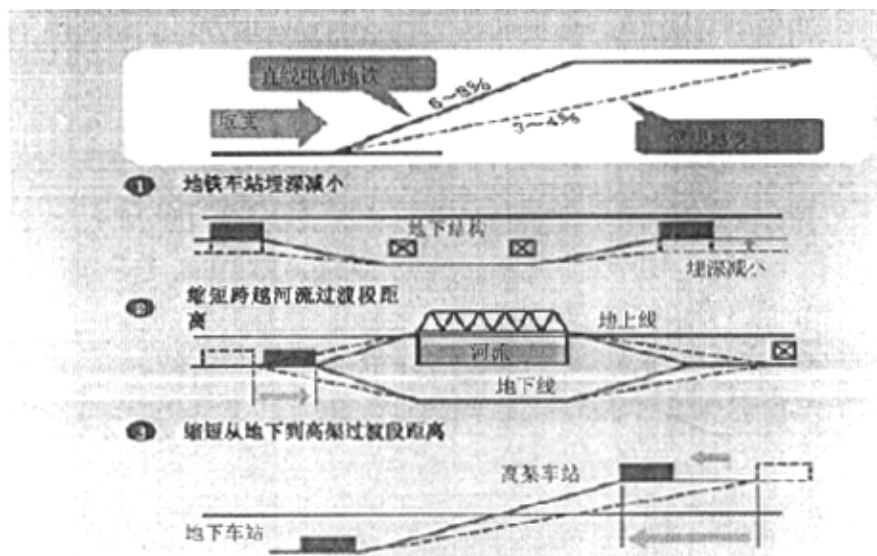


图 3-3 直线电机系统动力性能的选线优势



图 3-4 MK I 型车辆在恶劣的雪天环境中运营

(2) 采用径向转向架，使运行性能大大改善

由于采用直线电机驱动方式，车轮不再传递牵引/制动力，所以轴箱定位结构可以大大简化，尤其是轴向定位刚度不再因需传递力而要求设计得

很大，因此可以容易地实现较小的轴向定位纵、横向刚度，达到柔性定位。再加上轴间无传动装置和电机安装，所以转向架的轴距可以做到 1800mm 左右，（传统的地铁车辆为 2100mm 以上），这样就很容易实现结构简单的径向转向架，提高了车辆的曲线通过性能和运行平稳性。

由于转向架具有径向功能且轴距较小，使地铁运营线路的最小曲线半径可达到 80m（传统地铁车辆最小曲线半径为 250m），使线路的选择更容易避开已建或规划待建的建筑，以及建筑基础、地下管线和其他地下构筑物，可减少线路占地和拆迁工作量，也可大大降低土建工程造价。在狭窄路段可根据实际情况进行灵活的线路设计。示意图详见图 3-5。

同时，线路转弯半径的减小也使得车辆段及综合维修基地用地面积的减小。图 3-6 是温哥华 Skytrain 系统的车辆段鸟瞰图。

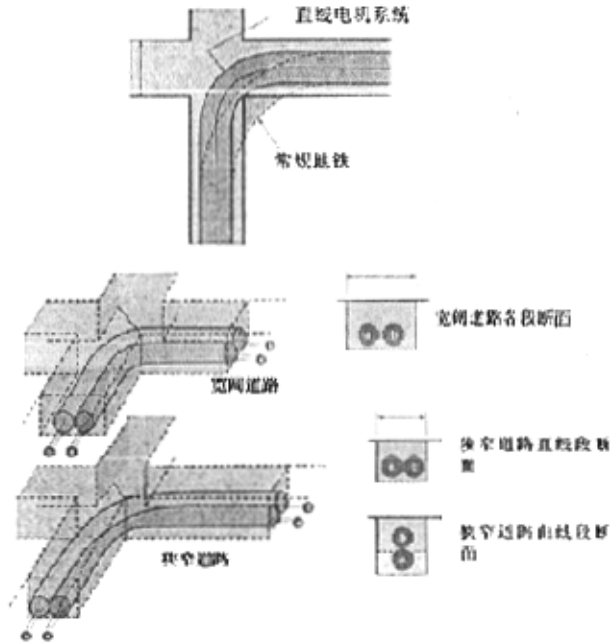


图 3-5 曲线半径小的选线优势



图 3-6 温哥华 Skytrain 系统的车辆段鸟瞰图

(3) 隧道横断面减小，大大降低工程投资

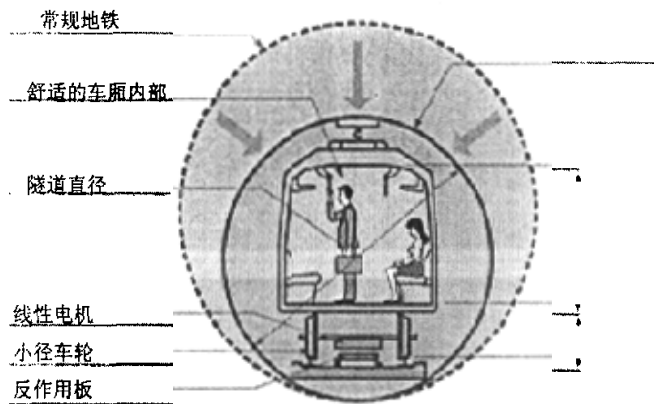


图 3-7 隧道直径的小型化

由于直线电机驱动方式不需要中间传动装置，车辆下部限界不构成对结构的约束，因此可以采用小的车轮 $\Phi 580$ （传统地铁车辆为 $\Phi 840$ ）。再

者,由于不需要旋转电机的悬挂安装空间,车辆地板面可降至距轨面 700mm, (传统地铁车辆地板面距轨面高为 1100mm)。综合各项小型化措施,使直线电机牵引车辆的横断面面积大大减小,与传统地铁车辆相比大约减少 40%, (据日本的相关资料记载)隧道断面示意图详见图 3-7。。这样对地铁隧道横断面的设计极为有利,可大大降低土建工程的造价。对于高架和地面线路,可减小对地面景观的影响。

(4) 降低振动和噪声

由于取消了齿轮传动机构,直线电机驱动的地铁车辆没有了齿轮啮合所产生的振动和噪声。

其次,车轮只起承重作用,没有了轮轨蠕滑滚动所产生的振动和噪声,轮轨磨损也大大降低,这使得轮轨之间会长期处于良好的状态,也使振动和噪声大大降低。

径向转向架良好的曲线通过性能,避免了过曲线时轮轨冲角带来的振动和噪声。所以直线电机牵引车辆具有振动小,噪声低的优点,有利于环境保护。

(5) 易于实现小编组、高密度、无人驾驶的运行模式

由于直线电机牵引地铁车辆具有比传统车辆更强的加减速性能,有更高的停车位置控制精度,与移动闭塞信号系统结合,较易实现小编组、高密度、无人驾驶的运行模式,易于实现再生制动,从而使系统高效、节能、低成本运营。

(6) 运行安全可靠提高、检修量大大降低

由于车辆采用直线电机非粘着式牵引,取消了旋转电机以及旋转电机驱动所必须的滚动轴承、传动齿轮和连接器等装置,因此,车辆结构简单、重量轻、磨损少,大大提高了车辆运行的安全性和可维修性,大部分部件属在线可更换单元。车辆经过 20 年或 500 万 km 运行后,仅需一些预

防性的检修工作。大大降低了维修工作量和维护成本。维修量的降低，使得车辆的利用率得到提高。在高峰运行时，车辆的利用率可达 93%-95%。

3.2.2 直线电机轮轨系统的缺点论述

(1) 直线电机效率较低，能耗较大

直线电机系统由于车载定子与地面转子是处在一个相对运动状态，不可避免地会造成相互之间气隙的变化，因此气隙设计得不能太小，否则会导致安全隐患的发生。目前的直线电机系统的间隙是 8-12mm。再加上直线电机是有端部的（旋转电机是闭环），因此漏磁场较大，机电能量转化率低，所以直线电机的效率较低。在等效滑差区内，LIM 系统电机效率大约是 75%，而旋转电机及变速箱效率大约为 85%。因此，直线电机系统每吨公里比旋转电机系统多消耗大约 20% 的能量。根据东京都营地铁 12 号线的经营经验，其主电路耗电量为 $1.54\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{车} \cdot \text{km})$ ，与最新的旋转电机 VVVF 驱动的地铁车辆相比，电耗要高出 10%-20%。

因此，能耗问题一直是各国研究直线电机系统所关注的问题，为了弥补这个不足，直线地铁车辆采用了一系列措施来弥补不足。

在耗能计算方面，日本地下铁协会在为重庆地铁在选用直线电机系统作咨询时，曾就直线电机和传统轮轨系统在同样的坡度区间上做过模拟理论计算。虽然是理论计算，忽略掉了某些参数，但结果可令我们参考。下面就简要说明一下其结论。

假设条件为：在相同线路条件的一公里的线路区间内，相同重量的两辆车，控制方式相同；行走状态相同。

理论计算结论：牵引所需电能差为：直线电机/旋转电机=1.07-1.2。因此，牵引用电量差为 10%-20%。

由于在平均一公里站间距条件下，从整个系统来看，车辆耗能占 50%，而车辆耗能又分为车辆牵引耗能与车辆设备耗能，其

各占 50%。因此，牵引耗能只占整个系统耗电量的 25%。

就目前的技术发展来看，随着车站服务水平和车辆舒适度的提高，车站设备耗能及车辆设备和信息系统耗能的比重都将不断提高；而且车辆由于采用了铝合金车体，重量也大大降低，使得牵引用电量在整个系统耗电量中的比例将会不断降低。所以对于整个系统来说，采用直线电机牵引对耗电量增加影响并不大。

而且整个系统科学的运营管理水平对于节省能耗也是非常重要的。

表 3-1 显示了北美地铁及轻轨系统能耗调查概况，温哥华空中列车 MK II 的能耗是最经济的系统之一。

表 3-1 北美地铁及轻轨系统能耗调查表

系统	列车走行单位公里能耗 (kWh/km)	每度电输送旅客距离 (km)
温哥华空中列车	2.45	9.45
圣地亚哥 LRT 系统	3.05	9.42
美国波特兰 LRT 系统	4.18	6.88
美国迈阿密地铁	4.98	4.05
PATCO (费城) 地铁	5.09	4.88
美国马里兰州巴尔的摩地铁	5.32	3.34
旧金山 LRT 系统	6.58	4.07
美国匹兹堡 LRT 系统	7.46	3.44

(2) . 直线电机气隙的控制、维护复杂

直线电机的气隙的控制技术是保证车辆安全运营的保障，同时也是能耗控制的关键问题。气隙控制的安装、气隙的动态精度检验和安全性检验是一特殊的技术，较为复杂。图 3-8 显示了直线电机的定子与转子的气隙关系。

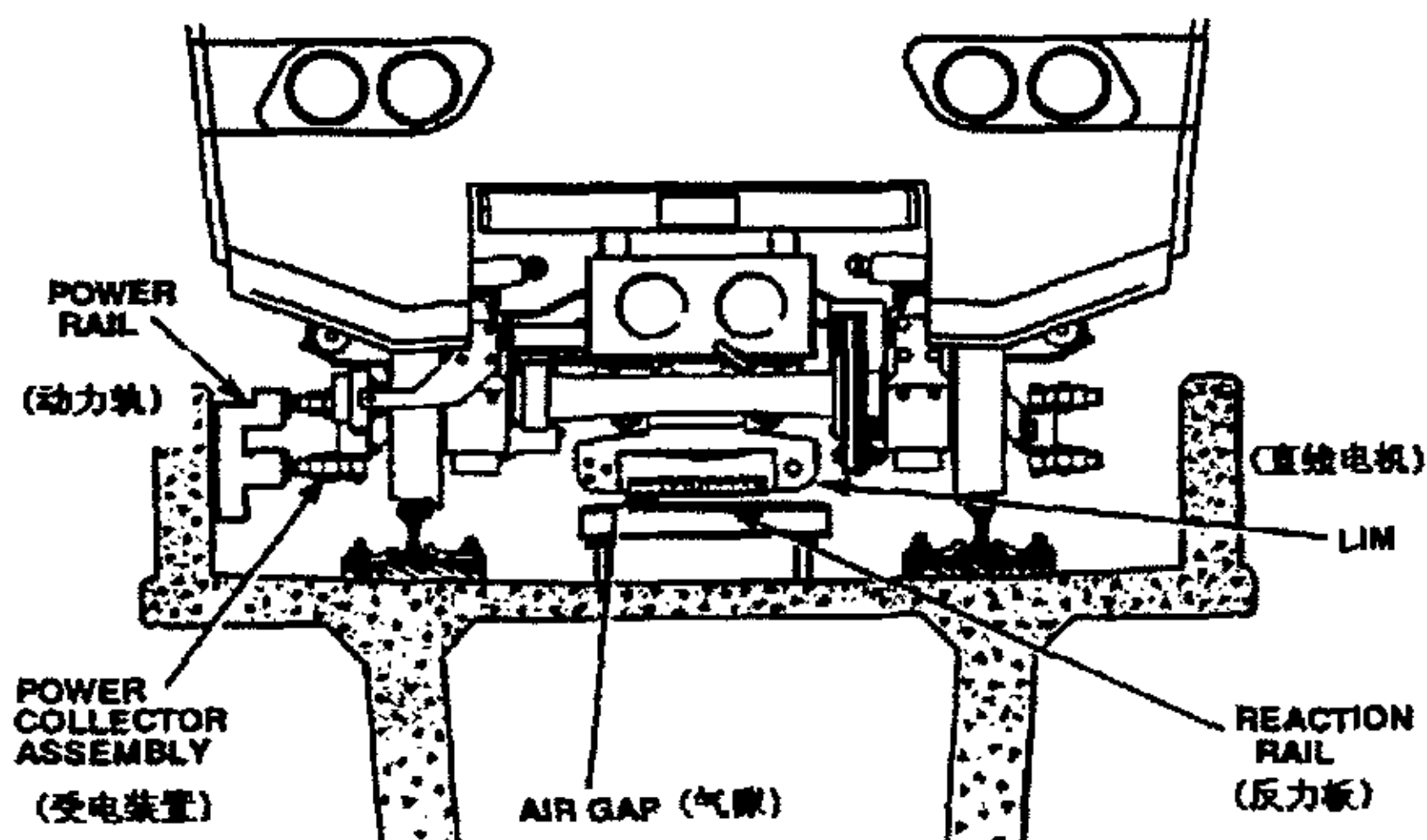


图 3-8 直线电机的定子与转子的气隙关系

(3) . 对于我国来说是一项新的技术

新技术的引进、吸收、改进和完善是需要一个过程，前期需要较大资金和技术力量的投入，一旦引进，还需要我们对这个系统不断地深入探讨和研究，使其成为更符合我国国情的轨道交通系统。

以我国上海已引进的德国磁悬浮技术来说，除了投入了巨额的资金，还投入了大量的全国最为精英的人才，历时近两年时间来吸收、引进这项磁悬浮技术并成功建设了上海磁悬浮线路，可以说是一项非常艰苦的工程。但是，德国人的磁悬浮控制等核心技术部分是绝对不转让的，这样我们就无法拥有自己的知识产权，今后运营所需要的大量关键部件也还要依赖进口。这些都说明，对于一项新技术的引进需要面临的困难是非常多的。但是，我国正处于一个快速跨越式发展的时期，引进新技术对于我国高新技术的跨越式发展是非常必要的。

目前我国广州地铁四号线已引进了直线电机牵引轮轨技术。为配合这项新技术在我国的发展和运用，国家发展与改革委员会、建设部、广州地铁总公司以及各相关厂家和西南交大、北京交大等大学已开展了对于直线

电机轮轨系统技术方面的研究。直线电机、转向架、制动系统、信号系统等关键技术已经过研究立项,1500v 三轨供电和道岔及配套转辙机等技术成果已经过鉴定。

在我国国家相关政策的支持下,大量资金和技术力量的投入使直线电机技术的引进和吸收正在顺利地进行之中,我们还要对其进行进一步的优化,使之成为适合我国国情的先进技术,并得到广泛的应用。也使我国成为继加拿大和日本之后拥有这项技术的又一个国家。

3.3 小结

本章阐述了直线电机的牵引原理及直线电机牵引轮轨系统的一系列优越性,包括:非黏着牵引所带来的优良的动力性能和爬坡能力;易于采用径向转向架以使运行性能得到大大改善;隧道横断面的减小带来工程投资的降低;振动及噪音较小;移动闭塞系统的采用使得易于实现小编组、高密度、无人驾驶的运行模式,运营服务水平大大提高;运行安全可靠、检修量大大降低等。同时也对直线电机牵引轮轨系统存在的直线电机效率较低、能耗较大、直线电机与反应板之间间隙控制技术复杂以及对于我国来说,从国外引进这项新技术所面临的一系列问题进行了阐述,也说明引进新技术是我国跨越式发展的必然选择,如何更好地引进、消化、吸收和优化,使之成为适合我国国情的先进技术,并得到广泛应用是关键问题。

4. 直线电机轮轨系统关键技术分析

直线电机轮轨系统之所以在城市轨道交通中具有很大的优越性，这是与直线电机、径向转向架、列车控制系统等关键技术及部件是密不可分的。下面就对直线电机、径向转向架、列车控制系统各自不同的特点加以论述和分析。

4.1 直线电机

直线电机是直线电机轮轨系统中最为关键的部件，直线电机的牵引原理是直线电机轮轨系统运行的核心思想，所以直线电机设计的好坏是直线电机轮轨系统是否能很好运行的关键。

直线电机的原理及发展概况已在前面加以论述，这里不再重复。下面只对直线电机的结构，维护及与旋转电机的性能对比加以阐述。

4.1.1 直线电机的构成

加拿大的直线电机与日本的直线电机的构成以及感应板的安装方式都有所不同，但直线电机的牵引基本原理基本相同，下面就以加拿大温哥华MK I型车辆的直线电机为例加以说明。

每台直线电机都是由安装在车辆上的一次侧和安装在导轨上的二次侧感应板组成。一次侧包括三相电机绕组线圈、支架部分、绝缘、冷却系统和温度传感器以及必要的电器连接件等。直线电机的迭片铁心和线圈、冷却系统、传感器均组装在一个外部框架内，此外部框架直接安装在车辆上。此框架的安装高度是可以调整的，从而使直线电机与感应板的间隙可以调整至规定范围。二次侧感应板由并排直立的铁板支撑上覆盖铝板组成。

电磁线圈采用传统的强迫风冷式三相6极电机，采用⁸/₁₀台独立的风机

安装在大量的薄型层叠式散热片上，列车运行时从电机头部吸入的风在电机尾部排出，从而达到电机冷却的效果。温度传感器可及时探测电机的温度，以免过热。（日本的直线电机采用的是自然风冷的电机冷却方式）。直线电机构造图详见图 4-1 所示。

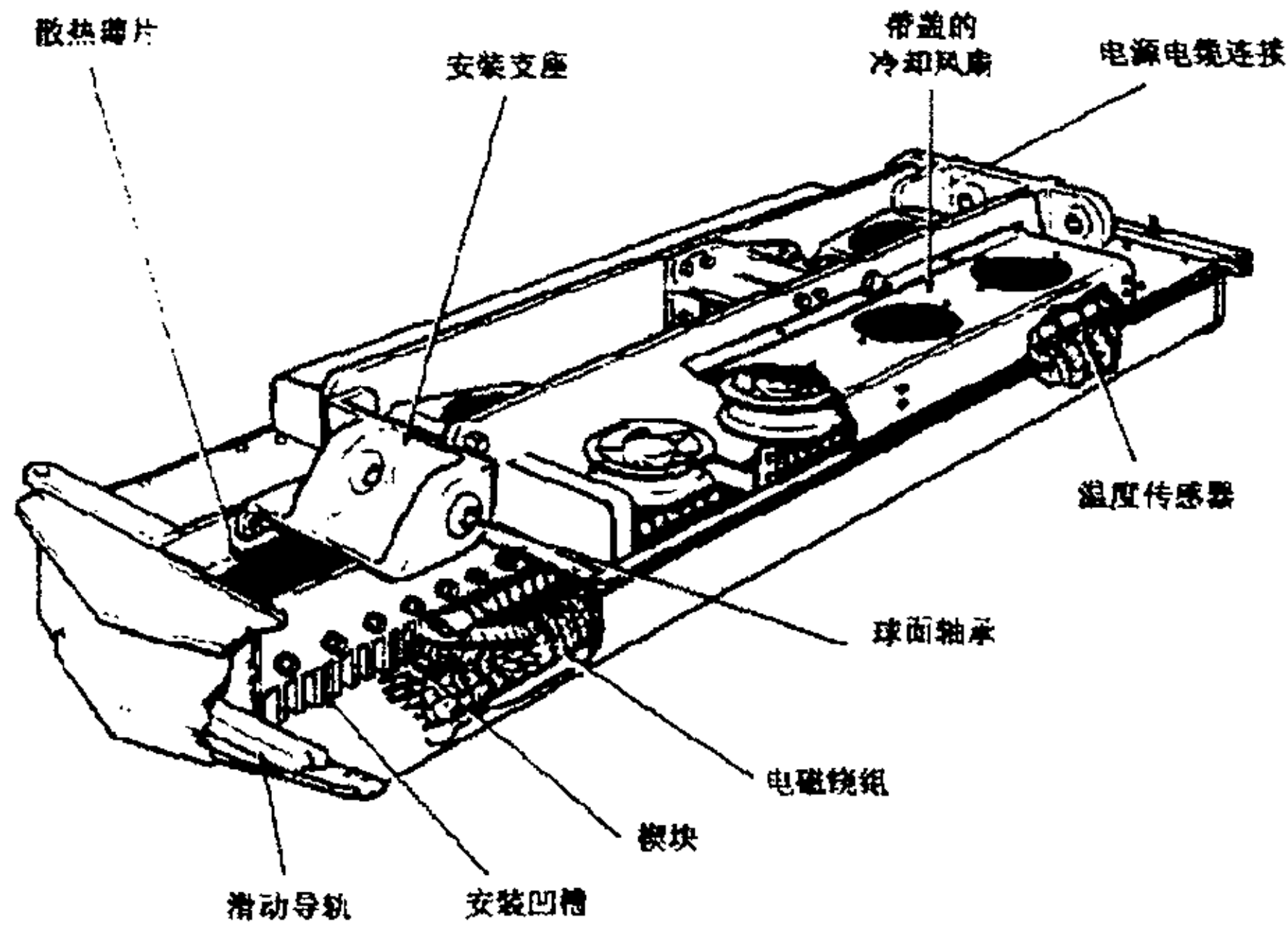


图 4-1 MKI 型直线电机构造图

感应板铺设在两铁轨中间，感应板上部边缘与轨顶面齐平，由并排直立的铁板支撑上覆盖铝板组成。感应板高度可调，日本的感应板就是不可调的，其结构设计可承受列车运行过程中产生的最大推力。Skytrain MKI 系统直线电机的轨道感应板结构组成及安装方式如图 4-2。MKII 型车辆的感应板安装方式与 MKI 性有所不同。轨道感应板的安装配合图详见图 4-3。

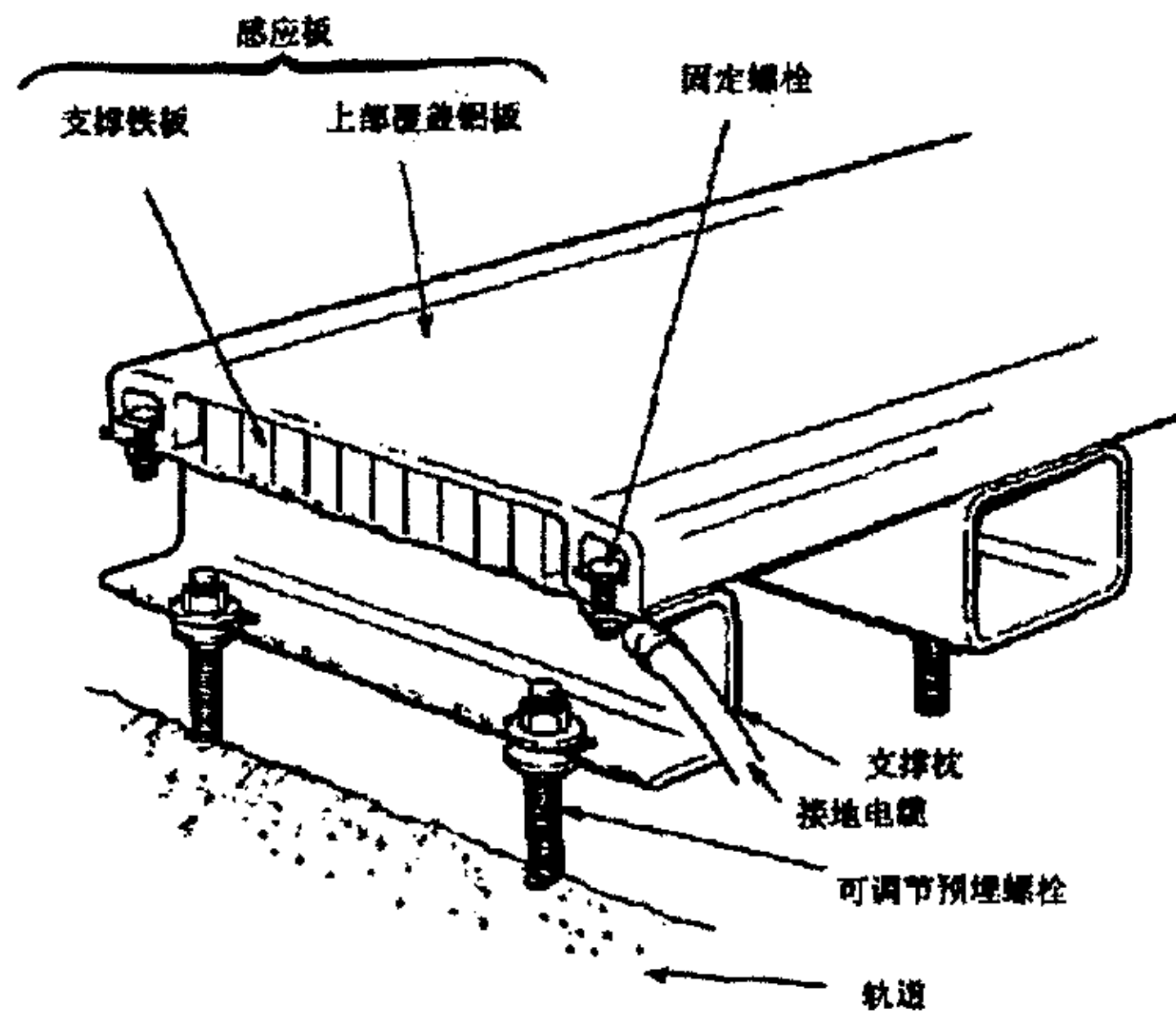


图 4-2 MKI 型直线电机轨道感应板

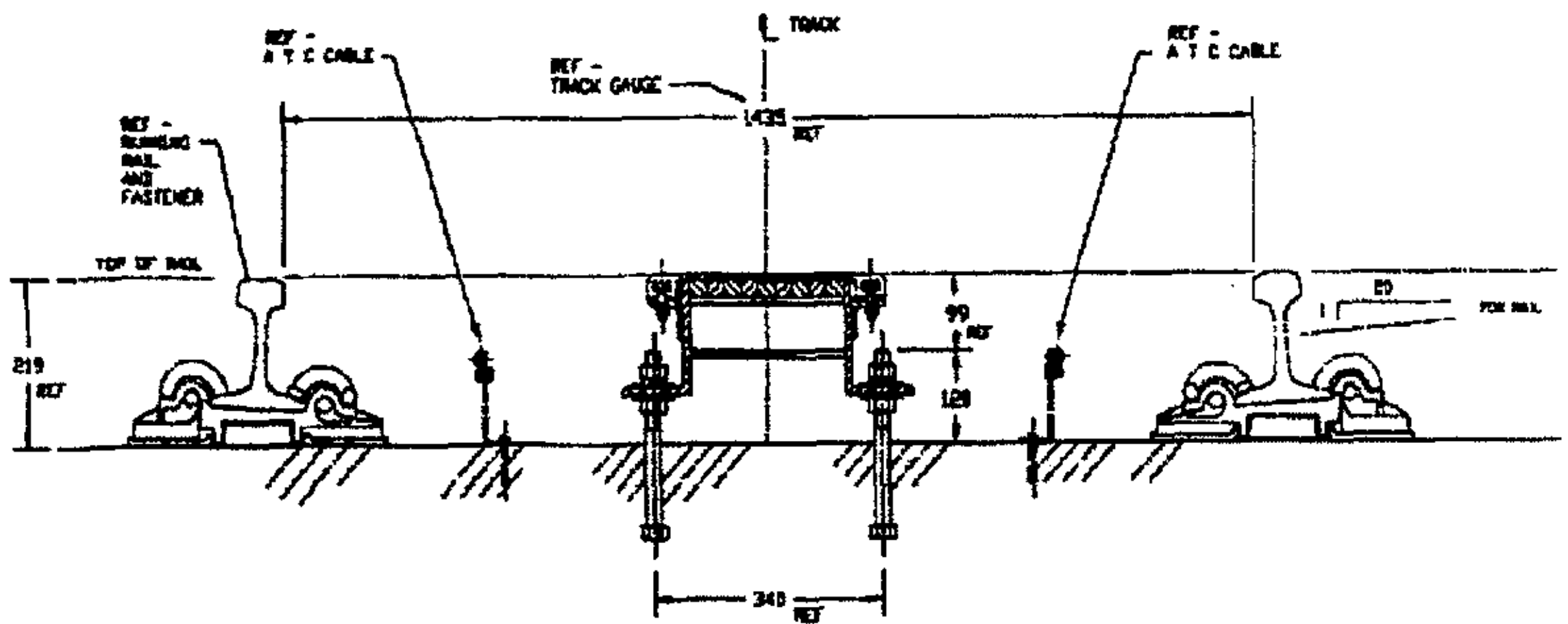


图 4-3 轨道感应板安装配合图

4.1.2 直线电机的技术特性比较

经过不断的改进, MK II型直线电机较 MK I型有了很大的改进, 其技术特性也有了很大的提高。日本的直线电机与加拿大的直线电机在构造和设计理念上也有很大的不同。下面对加拿大的 MK I型、MK II型以及日本东京 12 号线、大阪 7 号线的直线电机技术特性进行比较, 比较表详见表 4-1。

表 4-1 直线电机性能比较表

序号	项目	MK I 型	MK II 型	东京 12 号线	大阪 7 号线
1	电极数量	6		8	
2	电极相数	3		3	
3	额定电压/V	420	570	1100	
4	最大峰值电流/A	485	550	—	
5	持续电流/A	350	400	170	151
6	最大推进力/kN	12	18.6	13.2	
7	额定推进力/kN	12	18.3	13.2	
8	垂向力/kN	25		26	23.5
9	最大功率/kW	120	187	120	100
10	额定功率/kW	120	160	—	—
11	质量/kg	640		1400	1230
12	长度/m	2.2		—	—
13	铁心长度/m	1.95		2.476	2.465
14	宽度/m	0.67		—	—
15	铁心宽度/m	0.366		0.3	0.27
16	悬挂方式	轴箱悬挂		构架悬挂	
17	冷却方式	强迫风冷, 8 个风扇两侧排列		自然冷却	
18	气隙/mm	12		12	
19	制造商	Bombardier		日立	

4.1.3 直线电机的设计思路

在直线电机设计中，各种参数的选择依设计思想的不同而不同。例如，加拿大的直线电机是依据体积尽可能小的设计思想设计的，而日本的直线电机是以追求高效率为主要目标，虽然两者的输出功率基本相同，但日本直线电机长度比加拿大的直线电机大约长出 30%，有效面积比加拿大的直线电机大 80%。可以说，针对不同的设计目标，设计方法也是完全不同的。以下就以重视效率的东京都营 12 号线的直线电机为例，来说明一下直线电机设计的一般的思考方法。

地铁车辆驱动用直线电机的一次侧铁心长度受车辆转向架大小的制约，二次侧反作用板的宽度受轨距的制约。虽然一次侧和二次侧间的气隙越小效率越高，但这也受到机械结构等因素的制约。所以各参数值只能在这些制约条件内选择设计：图 4-4 显示了直线电机的结构图。

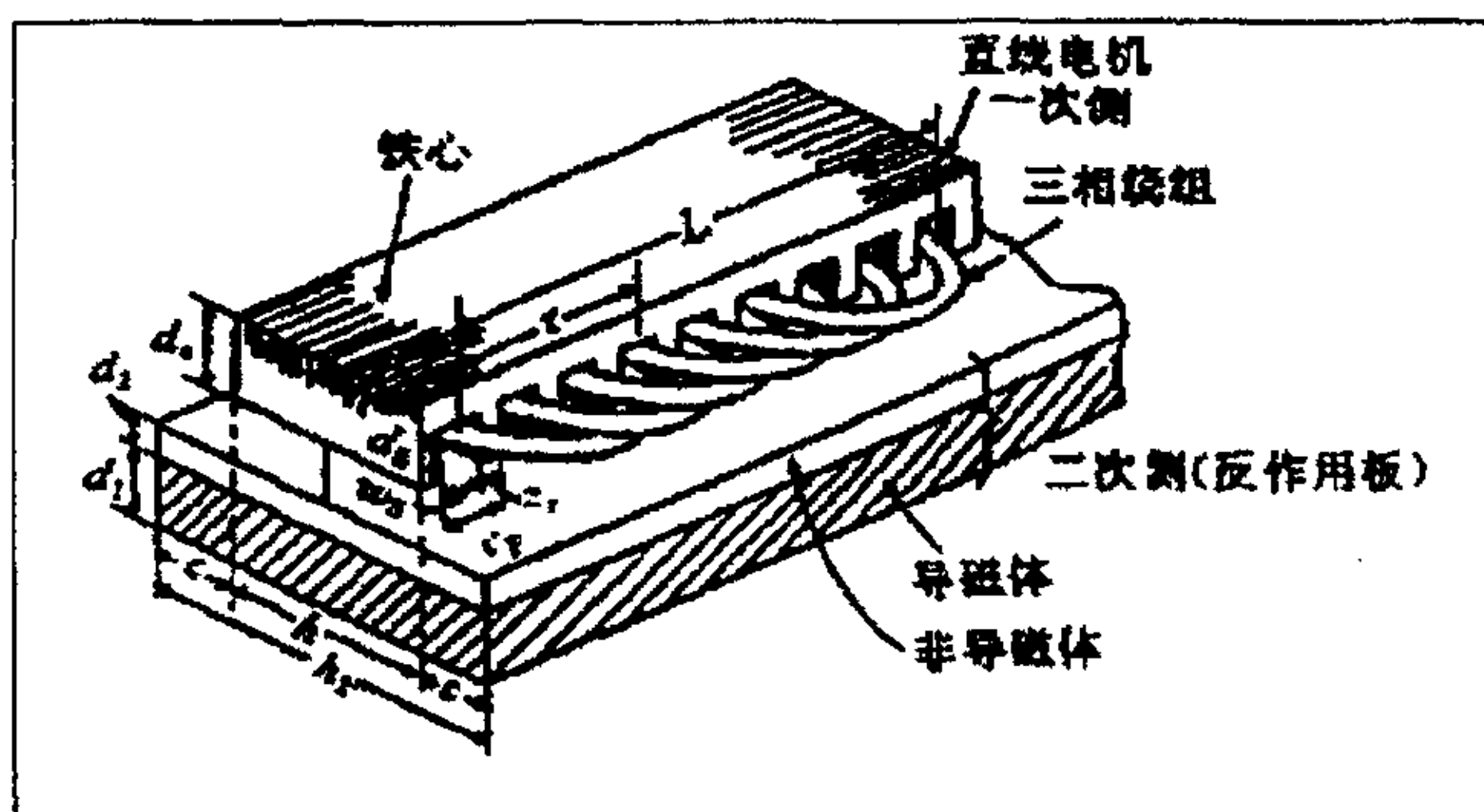


图 4-4 直线电机结构图

(1)极距(τ):如果取值大,一次侧绕组的端部就会长,这将因一次侧电阻、一次侧漏电抗的增加而使 LIM 特性变坏。应该按与一次侧铁心叠片厚度(h)一样或略小一点来设计。

(2)反作用板的厚度(d_1, d_2):反作用板是由导磁体(d_1 , 主要是铁)和非导磁体(d_2 , 铝或铜)两部分组成的。如果一次侧铁心叠片厚度(h)取值大, 非导磁体的厚度可以取薄一些, 这可使成本降低, 并可因等效气隙减少而使效率提高; 但取得太薄又会因热膨胀及一次侧的吸引力而变形, 所以也不可取得太薄。由于一次侧的感应电流受集肤效应的影响, 当导磁体的厚度超过 5mm 后 LIM 特性基本上没有什么变化; 但考虑到机械强度和施工的可行性, 导磁体厚度取大一些是必要的。

(3)反作用板的宽度(h_2):一旦一次侧铁心叠片厚度(h)定了就应该决定反作用板外伸部(c)的长度。外伸部提供一次侧电流的通路, 从确保 LIM 特性良好来讲外伸部取值大些为好; 但取值过大会使成本增加。

(4)一次侧铁心长度(L):为了减少 LIM 的端部效应, 一次侧铁心越长越好; 但其长度一方面受到车辆转向架大小的制约, 另一方面长度长了会使二次侧电阻、漏电抗增大, 从而使整体容量增加, 因而一次侧铁心长度应有所限制。

(5)一次侧铁心叠片厚度(h):因为 LIM 的推力与一次侧铁心叠片厚度成比例, 所以在制约条件允许的范围内应设计得尽可能大一些。

(6)气隙(g):从 LIM 的特性上看, 励磁无功功率与气隙成比例, LIM 的效率和功率因数也要比普通电机稍差些, 所以希望气隙能小一些; 但考虑到施工精度和运行中的变动, 气隙不可能太小, 一般多设定在 10mm~12mm。

(7)槽深(d_s)和槽宽(X_s):如果槽深浅些, d_s/X_s 的值小些, 则可使一次侧漏电抗变小, LIM 的性能提高。

4.1.4 直线电机的安装方式

从直线电机的安装悬挂方式来分, 分为抱轴式与架悬式。抱轴式是指直线电机安装悬挂于轮轴上, 而架悬式是指直线电机悬挂于转向架上。抱轴

式由于电机直接置于轮轴上，直线电机与感应板之间的间隙较易控制，但对轮轴的强度要求较高。架悬式由于直线电机悬挂于转向架上，置于一系弹簧之上，所以限制了一系弹簧的刚度。若一系弹簧刚度较大，则舒适性较差；如一系弹簧刚度较小，则气隙不能得到很好的保证。MK 型直线电机采用抱轴式，而日本的直线电机采用架悬式。因此，日本的直线电机轮轨系统比加拿大系统的舒适性要差一些。

4.2 径向转向架

由于采用直线电机驱动方式，使得很容易采用结构简单的径向转向架。径向转向架是直线电机轮轨系统中最为关键的技术之一。对于提高车辆的曲线通过性能和运行平稳性具有很关键的作用。

径向转向架理论是基于蠕滑机理产生的，其最大的优点就是轮对，特别是导向轮对能以最小的冲角通过曲线，较小轮缘力和磨损，同时也减少了噪声和脱轨的可能。径向转向架与普通转向架的区别在于曲线通过方式的不同，如图 4-5 所示。

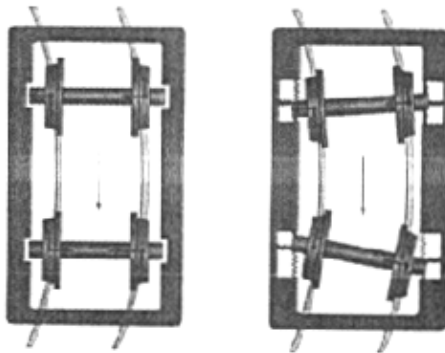


图 4-5 传统转向架和径向转向架

4.2.1 径向转向架的分类

径向转向架从结构原理上来分，一般包括柔性定位转向架、自导向和迫导向转向架三种。这三种转向架各有其特点，下面进行简要地介绍：

1. 柔性定位转向架

柔性定位转向架适当释放轮对与构架间的定位刚度，利用它们之间相对较软的弹性约束在轮轨蠕滑力作用下，使轮对趋于曲线径向位置。

这种转向架由于要兼顾曲线通过性能和直线运行稳定性，其轮对定位刚度不可能取得很小，所以径向调节能力较弱。但其结构简单，开发难度小，比较适合于在一些曲线半径较大的线路上运行。

2. 自导向径向转向架

自导向径向转向架也是利用轮轨蠕滑力导向，但前后轮对用杆系连接起来，将前轮对通过曲线时趋于曲线径向位置的作用反向传递给后轮对，使前后轮对在曲线上有趋于曲线径向位置的作用。

由于自导向转向架仍然是蠕滑力的导向，不可能使轮对达到完全径向位置，同时，为了增加后轮对的导向功能，不可避免地要影响前轮对的导向能力。但自导向转向架由于有杆系作用于前后轮对之间，在直线上导向杆可提供较大的轮对定位刚度，其运行稳定性容易得到满足。所以，自导向转向架轴箱悬挂的纵向刚度可以取得较小。自导向转向架的杆系不和车体联系，结构较为简单。图 4-6 为自导向径向转向架示意图。

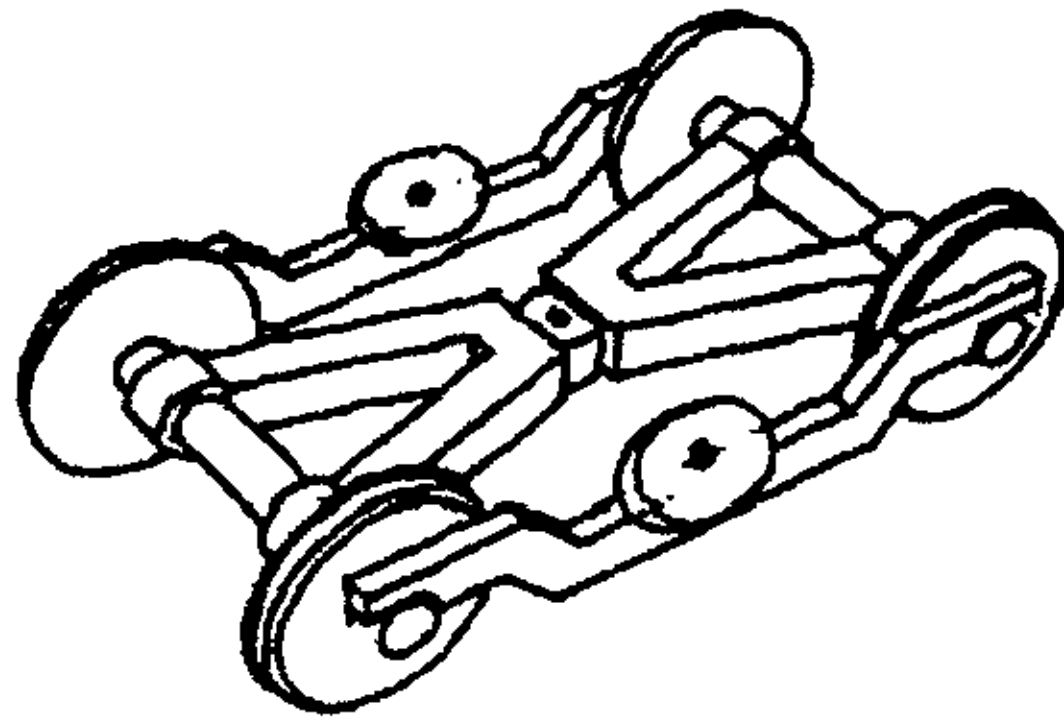


图 4-6 自导式径向转向架

3. 迫导向径向转向架

迫导向径向转向架的基本原理是，通过导向机构将车体和转向架连起来，过曲线时利用车体和转向架之间的相对转动位移，强迫前后轮对反向回转而趋于曲线的径向位置。其径向功能较自导向转向架好，适用范围较广，但机构较为复杂。示意图详见图 4-7 所示。

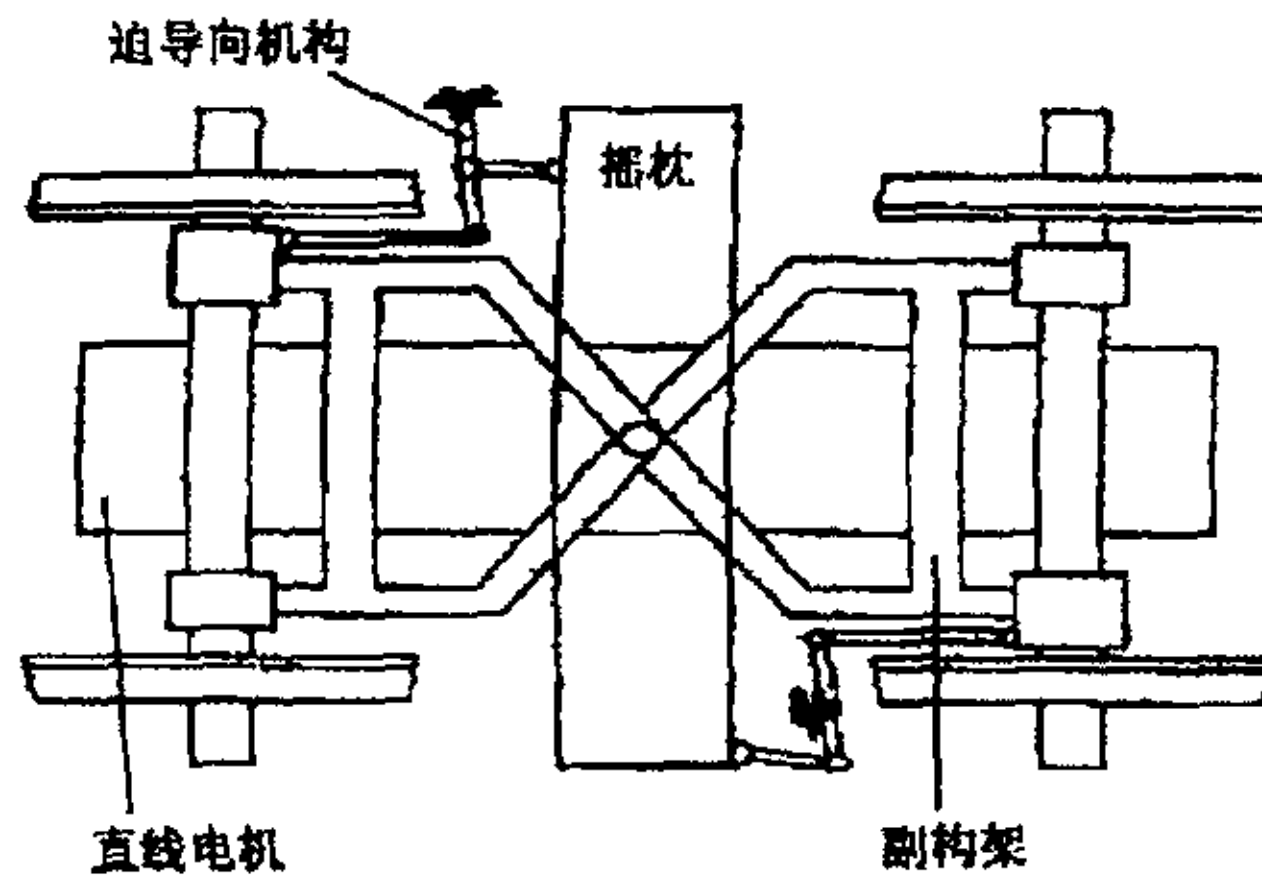


图 4-7 迫导式径向转向架

4.2.2 两种制式采用的径向转向架

加拿大和日本两种制式所采用的转向架各有其特色，构造原理完全不同，加拿大采用的是迫导式转向架，而日本采用的是柔性定位转向架。下面就两种不同制式所采用的径向转向架的构造原理进行简要说明。

4.2.2.1 加拿大的迫导式转向架

加拿大开发的直线电机 MKI 和 MKII 型车辆均采用三大件转向架的结构型式，并在此基础上采用迫导向机构。具体结构型式示意图详见图 4-8。

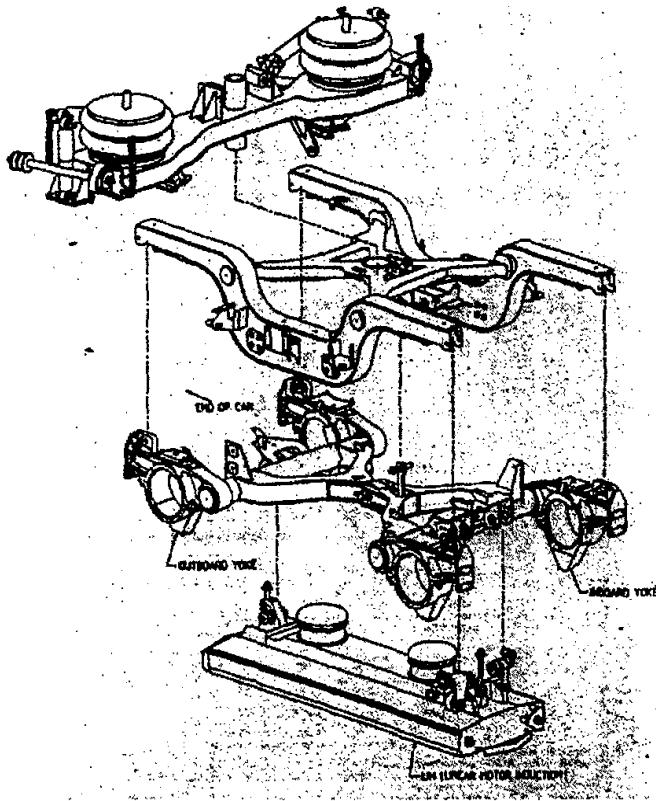


图 4-8 MK 型三大件转向架的组装结构图

如图所示，转向架前后轮对通过两副构架连接起来，副构架呈 V 字形，一端与轮对固结，一端与另一副构架铰接，铰接点用垂向吊杆将两副构架的一端悬挂于摇枕上，铰接点两侧通过水平拉杆将副构架与摇枕相连，以传递转向架与车体之间的纵向力。两侧架通过橡胶弹性垫置于轴箱上，一侧铰接，另一侧可以在橡胶弹性垫上沿轴箱滑动，这样在通过曲线时，轮对可以向径向自由移动。

迫导向机构的原理是在构架上设置迫导向拉杆，拉杆一端与轮对连接，一端连接到摇枕上，摇枕通过连杆与车体相连。当车体转动时，摇枕也随之转动，这样通过摇枕和导向连杆，将车体相对转向架的转动传递到两轮对上，推动轮对趋于径向。

MKI 型车辆转向架与 MKII 型不同之处在于 MKI 转向架单侧设迫导向机构，而 MKII 型车辆为了获得更为良好的曲线通过能力在转向架两侧都设置了迫导向机构。

4.2.2.2 日本的柔性定位转向架

日本直线电机地铁车辆则以柔性定位转向架为主。

日本直线电机车辆上安装的直线电机由转向架横梁的 3 根吊环上下支撑，同时由两侧纵梁的 2 根吊环左右支撑，称为转向架框架方式。转向架框架采用外框(out frame)形式，借助于在侧梁连接处橡胶垫的压缩作用，即使在竖曲线半径很小的变坡点，车轮与钢轨也能很好接触，很少失去接触，因此它属于柔性转向架。

直线电机的驱动力、制动力通过设在直线电机的牵引杆传递到枕梁，再由摇枕拉杆传递到车体。

图 4-9 是东京大江户线转向架的示意图。

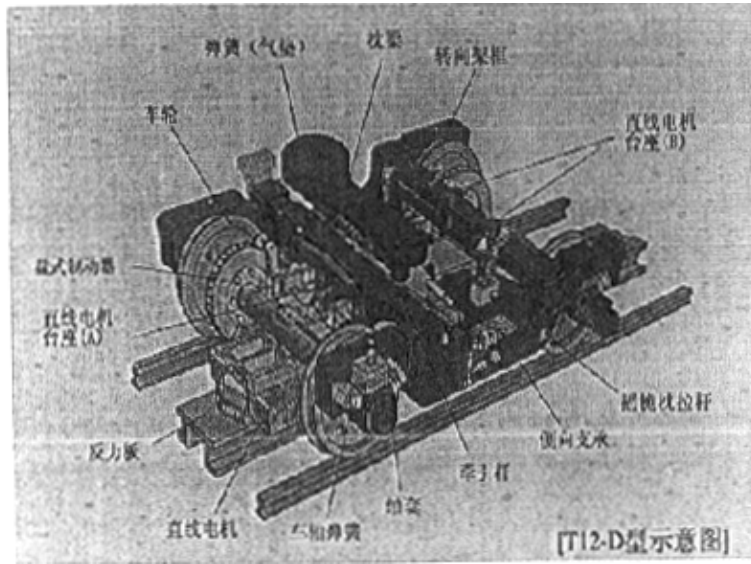


图 4-9 东京大江户线转向架

加拿大和日本两种制式所采用的转向架构造原理完全不同，但运行性能在长期运营实践中都表现出很好的优越性。

4.3 列车控制系统

列车控制系统是轨道交通系统中保障运营安全和反应系统服务水平的关键。下面就加拿大温哥华的直线电机系统所采用的列车控制系统进行简要论述。

加拿大温哥华 Skytrain 系统采用了阿尔卡特的 SELTRAC ATC 移动闭塞信号系统，实现了列车运行自动化和指挥自动化，以及无人驾驶技术。

移动闭塞原理是根据实际运行速度、制动曲线和进路上列车的位置，动态计算相邻列车之间的安全距离。由于定位报告分辨率很高，根据当前的运行速度，后续列车可以安全地接近前一列车尾部最后一次被证实的位置，直至两者之间的距离不小于安全制动距离。而传统信号系统的主要设

计方法是通过线路旁信号机显示，车站停车和司机告警等来确保后续列车不能进入被前一列车所占用的闭塞区间，从而保证了一定的列车安全间隔。

移动闭塞系统的主要特点是通过列车的精确定位来提高安全性和列车运行密度。即由移动闭塞系统中车载设备控制器(VOBC)和轨旁设备(设备位于轨旁或控制中心)之间的快速连续双向数据通信来实现的。一套移动闭塞系统可安全地允许多列车同时占用同一闭塞分区而此区间对于固定闭塞而言只能被一列车安全占用，从而能提高发车间隔和增加旅客运能。

SELTRAC ATC 系统包含以下一些主要的子系统:

- 系统管理中心 (SMC);
- 车辆控制中心 (VCC);
- 车站设备控制器子系统 (STC);
- 车载设备控制器或监控器 (VOBC);
- 感应环数据通信。

移动闭塞系统的采用使得车辆运营有条件实现“小编组，高密度”的新型行车组织模式，从而快速、高效地实现最大化的客流周转量；并可以轻松地实现低于 60 秒的行车间隔。

从初期投资的角度来看，移动闭塞与传统的固定闭塞有较强的可比性。移动闭塞核心技术是采用软件实现，使得其在硬件设备数量方面大大低于传统的固定闭塞系统，也就是说选用移动闭塞能在建设初期以最大的性能价格比得到当今世界最先进的技术，综合造价低。此外，由于系统多由软件构成，易于扩容，还能为以后的扩容、改造以及设备升级节省大量的资金。由于整个移动闭塞系统可以做到在室外除感应环线电缆外没有任何室外硬件设备，该系统的日常维护费用和工作量方面都显著减少。

由此可见，移动闭塞列车控制系统在整个系统中起到了举足轻重的地位。

4.4 小结

本章对直线电机系统中直线电机、径向转向架和列车控制信号系统这三种在系统中起到重要作用的关键技术和部件的构造原理、技术特性、设计思路及安装方式进行了简要地介绍和分析。并对加拿大系统和日本系统在这几个关键技术上的不同之处进行了简要地概括。

直线电机轮轨系统由于采用了这些关键技术而显示出强大的优越性，同样，这几项关键技术也可用于其他的交通系统之中。例如：移动闭塞的列车控制系统也可用于其他的轨道交通系统。所以对关键技术的研究是非常重要的，只有对关键技术不断的优化和完善，轨道交通事业才能可持续的发展。

一个成功的系统是由许多关键的技术和部件组成的，每一个部件不但要体现出自身的优越性，还要做到相互协调配合，才能使整个系统良好的运营。所以研究关键技术之间的接口和协调关系也是我们研究的重点所在。

5. 直线电机轮轨系统与其它交通模式比较

5.1 几种城市轨道交通模式简介

我们在修建一条新的轨道交通线路之前，首先要确定的就是这条线路将采用何种轨道交通模式，而目前世界上已运行的轨道交通模式是非常多的，如何选择一种适合这个城市的轨道交通模式对于这条线的建设是非常重要的。所以我们先要对目前已运行的轨道交通制式有一个初步的认识。下面就对几个典型的轨道交通模式做一个简要地介绍。

城市轨道交通有传统轮轨、直线电机交通、HSST 中低速磁悬浮、胶轮运载、新交通系统等多种模式。每种方式都有其优点，也有其不足之处。

5.1.1 常规地铁系统

地铁是城市中大容量的快速轨道交通系统，是解决城市中心区道路拥堵问题最有效的交通工具，运能较大，一般在 3 万-5 万人次/小时，是目前世界上应用最为广泛和最成熟的城市轨道交通模式，技术成熟、可靠、经济、实用，并在不断地完善。

地铁系统也在不断引进新的技术，发展日趋完善，因此在各个时期也有不同的特点。90 年代以来，交流传动车已成为主导车型，普遍采用了微机控制的 VVVF 调速交流传动、微机控制的直通式模拟制动、铝合金车体、低噪声弹性车轮等先进技术。这些新技术的采用使车辆的整体性能大大提高，主要表现在以下方面：

1. VVVF 逆变控制方式的采用使车辆的粘着性能提高，动拖车的比率从 1: 1 提高到 2: 3；
2. 主电动机采用交流电机，无需换向器和电刷，提高了可靠性和输出

扭矩性能，维修量也大大降低；

3. 主回路采用 IGBT 元件，使控制装置实现了小型化、低噪音化和省力化；
4. 变电站实现再生电流的逆变回馈，制动性能和节电效果大大提高；
5. 铝合金车体、转向架和电机控制装置达到了轻量化、小型化和低噪音化。

但传统的轮轨系统仍存在一些未能解决的问题，例如：

1. 电机及传动装置噪声、振动较大。随着人们生活水平的提高，这个问题将越来越受到重视。
2. 线路纵断面设计受到最大纵坡度值（3%）以及连续坡长的限制，从地下段过渡至地面及高架的过渡段较长，占用城市道路空间较大，影响了城市的景观。

5.1.2 HSST 中低速磁悬浮系统

日本的 HSST 中低速磁悬浮，其速度在 100km/h 左右，适用于城市轨道交通。磁悬浮铁路具有技术先进、快捷、环保、舒适等特点。

HSST(High Speed Surface Transit)系统是利用直线电机电磁力牵引前进；磁性悬浮模块吸引导轨产生悬浮力，支撑车体；气隙传感器监测磁体与导轨之间的间距，并随时进行间距调整，以避免车厢与导轨发生接触；悬浮磁体的侧向吸力同时用于 HSST 系统横向控制。

HSST 系统具有以下优点：

1. 安全舒适：悬浮模块紧吸导轨，较为可靠；车辆安装备用电源设备，即使断电也可保证悬浮。磁场集中于导轨和悬浮磁体间，对乘客无伤害；
2. 环保：无轮轨磨损所产生的铁质或橡胶颗粒；
3. 噪音、振动较小；

4. 爬坡能力强，转弯半径小；
5. 不受天气等环境影响，适应性较好；
6. 车辆与导轨不发生实质性接触，轨道和车辆维修量及维修成本降低；

但磁悬浮 HSST 系统目前没有一条线路正在进行商业运营，有一定的技术问题尚需进一步研究和论证，故在应用上还存在较大风险。并且，HSST 系统由于牵引与悬浮均需耗能，还存在能耗高和安全等方面有待解决的技术问题。

5.1.3 胶轮系统

胶轮系统是一种轻型的轨道交通模式，运量较地铁系统小，高峰小时最大运量可达到 3 万人次，多采用胶轮和混凝土梁支撑。在法国巴黎、马赛、里尔以及加拿大蒙特利尔、墨西哥墨西哥城、中国台北(捷运线)等城市的轨道交通系统中应用。在日本东京、美国奥兰多、澳大利亚悉尼、马来西亚吉隆坡、中国重庆所采用的单轨系统(monorail system)也都属于这种驱动方式。

这种交通模式具有如下优点：

1. 粘着系数可达 0.25，(而传统的钢轨与钢轮粘着驱动方式一般为 0.18)，因此，最大坡度可达 70%，有利于线路由地下至地面和高架的过渡。
2. 较大的加、减速度(加速度可达 1.2 米/秒²，减速度可达 1.4 米/秒²)，下坡度时可采用较高的速度。
3. 噪音、振动大幅度降低。
4. 实现无人驾驶，较为安全可靠。法国里尔市 Val 系统、巴黎 14 号线都成功在胶轮运载系统上实现了安全可靠的无人驾驶。

同时也存在以下缺点：

1. 工程造价较高。

2. 系统复杂(胶轮气压控制、驱动-差动桥方式等)。
3. 能耗高, 胶轮磨损大、需要经常更换, 造成运营成本高。
4. 胶轮大量磨损产生胶粒粉尘, 污染系统的轨行区。

5.2 直线电机系统与其它模式的比较

为了更好的了解直线电机系统, 现把它与目前使用较为广泛的传统轮轨技术、日本 HSST 中低速磁悬浮技术和胶轮运载系统进行简要比较。

5.2.1 直线电机系统与常规地铁系统的比较

在传统城市轨道交通中, 轨道对车辆的运动起驱动、支承及导向作用, 车辆上电动机的旋转运动通过齿轮及轮轨间的相互作用转变为车辆在轨道上的运动。车辆牵引力必须克服轮轨间的摩擦力, 速度受到轮轨间相互作用的限制。车辆行驶过程中产生较大的振动, 轮轨间粘着系数较低, 导致启动、制动性能较差。此外, 地铁建设中修建隧道的费用较大, 而隧道的工程造价很大程度上取决于隧道断面的大小, 所以在保证载客量不变的情况下, 为降低工程造价, 修建小断面地铁是非常必要。

传统轮轨系统与直线电机系统相关技术指标比较详见表 2。

表 5-1 传统地铁与直线电机系统比较

	传统轮轨系统	直线电机系统
运输能力(高峰小时单向客流)	小于 8 万/h	小于 5 万/h
牵引形式	旋转电机牵引	直线电机磁力牵引
最大坡度	3%—5%	6%—8%, 短距离可用 10%
最小曲线半径	300 米	80 米, 车辆段内 35 米
轨道	常规设计	需对感应轨进行设计, 在轨道交叉处, 感应轨需被断开。

最高速度 (km/h)	80	90
车辆段布置	规模较大	小曲线半径使得布局紧凑。
车辆维修工艺及其它功能设计	维修量较大	由于没有了旋转电机及传动机构, 检修量降低。
噪音	电机旋转噪声较大	只有轮轨噪音

5.2.2 直线电机系统与 HSST 中低速磁悬浮系统的比较

目前, 技术较为成熟, 还有日本开发的 HSST-100 型中低速磁悬浮系统。

从 1991 年开始, 在日本名古屋的一条 1.64km 试验线上, HSST-100 已成功进行了试验性运行。在经过一系列基础试验和实用化试验后, 日方认为, 作为时速 100km 的城市交通工具, HSST-100 基本达到可以进行营业性运营阶段。应用其技术的名古屋东部丘陵线(8.9km)已经开工, 计划 2004 年建成, 2005 年名古屋世博会前将投入运营。

HSST-100L 型低速磁悬浮系统具有舒适、安全、爬坡能力强、曲线半径小、选线灵活、噪音小等一系列优点。下面就相关指标对两种系统进行比较。

表 5-3. 直线电机系统与 HSST 系统的比较

	HSST 低速磁悬浮系统	直线电机系统
牵引形式	直线电机磁力牵引	相似
支承形式	利用吸附式磁力悬浮, 通过控制元件控制磁浮间隙。控制程序较为复杂。	轮子支承, 轨道安装时控制直线电机与感应板之间的间隙, 平时不需调整。
导向	用于悬浮的电磁铁同时具备导向作用, 是悬浮力的分力, 曲线段设计尤为复杂。	径向转向架导向
最小曲线半径	50m	80 米

轨道	轨道梁加工精度要求高、制造、架设和安装精度有严格要求。较为复杂。	轨道同传统地铁，只是感应轨的设计和安装较为特殊，但并不复杂。
道岔	道岔是随轨道梁整体移动和转向。是一种结构复杂、造价高、实施难度较大的轨道结构部件。每付道岔估价 870 万。	普通道岔，同传统地铁，结构简单、造价低，每付道岔只需 7 万，感应轨只需在此处断开。
噪声	距轨道中心 10m 处，100km/h 时速，噪音值为 65dB。(据日方提供资料)	距线路中心 15m 处，100km/h 时速，噪音值为 65dB—73.5dB
安全与救援措施	线路高架，轨道梁无法设置应急通道，救援较为困难。	与传统地铁相同，可在路侧设置应急走行道。安全疏散有保障。
实施情况	目前没有投入商业运营。	有四个国家、九条线路投入运营，温哥华 18 年运行五亿公里，无大修。

5.2.3 直线电机系统与胶轮运载系统的比较

为了克服传统钢轮与钢轨粘着驱动方式所存在的缺点，法国巴黎多条线路采用了非传统的胶轮、混凝土（水平导向、垂直支撑）的粘着驱动方式，之后推广应用到法国多个城市、加拿大、墨西哥和中国台北等城市。跨座式单轨交通也属于这种类型。下面就胶轮运载系统与直线电机系统进行比较。

表 5-4. 直线电机系统与胶轮运载系统的比较

	胶轮运载系统	线性电机系统
牵引方式	胶轮、混凝土粘着驱动	直线电机牵引、非粘着驱动
运行阻力	大，能耗较大	小
运行性能	雨雪天较差	无粘着驱动；雨雪天性能较好
最大坡度	5%—6%	6%—8%，短距离可用 10%

运营维护	胶轮更换较为频繁： 转向架维护复杂： 旋转电机及传动装置的维护量大；	轮缘磨损较低： 没有旋转电机及传动装置， 维护检修量较低；
转弯性能	转向机构复杂	径向转向架较容易通过弯道： 轴距和轮径较小
噪声	低速和中速时，噪音很低	噪音较低
环境污染	胶轮破损产生胶粒粉尘， 污染较大	污染较小

5.3 小结

在经过对目前采用的较多的几种城市轨道交通模式的简要说明，以及分别和直线电机轮轨系统进行比较之后，我们可以得出如下结论：

(1) 传统轮轨地铁作为城市中大容量的快速轨道交通系统，运能大、技术成熟、可靠、经济实用、是目前世界上应用最广泛的城市轨道交通系统。但在实际应用中也存在一些还未解决的问题，例如：电机及传动机构噪音大；由于受到轮轨黏着力的限制，爬坡能力受到一定限制；转弯半径较大等一系列问题还有待解决。

传统轮轨系统在我国的应用最为广泛，目前除了重庆采用的跨座式单轨系统和广州即将采用的直线电机轮轨系统外，均采用的是传统的轮轨技术，大多数关键部件在我国都能生产，国产化水平平均已达到了90%以上。这些都说明了传统轮轨技术具有较为广泛的实用性。但还需进一步挖掘传统电机系统的潜力和在某些关键部件上的研究和试验，例如：采用弹性车轮和轨道涂油技术以减少轮轨的噪音和振动；采用全动车已提高列车的爬坡能力；对转向架进行改进、对车辆的长度进行优化以提高车辆的转弯性能等等。此外，随着传统轮轨以及其他相关技术的提高，也应对我国的地铁设计规范中某些规定过于保守的设计参数进行修正和改进，以提供我国轨道交通事业的进步和发展。

(2) HSST 中低速磁悬浮系统采用直线电机磁力牵引和支承, 完全摆脱了列车与导轨的接触, 维修量及维修成本降低, 爬坡能力强、转弯半径小、安全舒适、噪音和振动较小, 是新型的轨道交通系统。从理论上, 可以说 HSST 系统是一个非常先进的系统, 但由于这种系统还未进行过正式的商业运行, 很多在正式商业运行中会暴露出来的问题我们可以说还不知道。只有在实际运营中遇到了问题, 并在不断解决问题的过程中, 这项技术才能不断的发展、进步和完善。所以可以说, HSST 系统在未经过时间和实践检验之前, 我们还不能对其进行较为客观的评价。

(3) 胶轮系统是一种轻型的轨道交通系统, 运量较小, 爬坡能力强、噪音、振动较小、安全可靠。但系统较为复杂、运营和维护成本较高。

以最近开通观光运营的重庆 2 号线跨座式单轨为例, 轨道梁上的一粒小石子让正在高速行驶中的轻轨车紧急减速、运营调试中车辆的轮胎曾被轨道梁上的一颗钉子划破等一系列影响安全的事故发生。为此, 重庆轨道公司安排工作人员必须每天清扫轨道梁, 并且在巡检车上装备瓦数很大的探照灯, 同时安装磁铁, 来吸附在轨道梁上的金属钝器等一系列措施。这些都是维护工作量大大增加。但山城重庆特殊的地理环境——沿江的地势险峻和较好的观光效果也决定了这种跨座式单轨技术的采用。

对这些典型的城市轨道交通系统的建设、运营和维护等特点进行了全面了解对我们选择一个适合本城市发展的城市轨道交通制式时非常重要的。同时经过全面的分析和比较, 也反映出直线电机轮轨交通系统在建设、运营和维护的各方面都显示出强大的优越性, 在我国城市轨道交通领域将会有很出色的表现, 得到广泛的应用。

6. 直线电机轮轨系统在我国适用性研究

为了解决日益严重的交通拥堵问题，我国各大城市都在大力发展大运量的轨道交通事业，目前，我国已建成运营的城市轨道交通共计约 257 公里。其中，北京^{114.1}~~94.2~~公里、上海 64.89 公里、广州 36.8 公里、长春轨道交通环线一期 14 公里、大连三号线 46.7 公里。8 个城市有在建工程 13 条线，线路总长约 438.67km、总投资共需 1970 亿元。已有 30 多个城市开展了城市轨道交通的建设或前期工作。珠江三角洲，长江三角洲正在酝酿城际轨道交通。初步预测 2005-2010 年间至少要建设 500-600 公里，需要投资 3000 多亿元。

在这种形势下，更有效的做好前期的线网规划工作是非常重要的，而前期的轨道交通线网规划，很重要的一部分工作就是做好轨道交通制式的选择问题。一个城市的线网需要根据自身的地形地质条件、客流情况、出行特点、资源共享等一系列条件来进行实际的分析和研究，最终确定出最适合自身条件的轨道交通制式。

直线电机系统是众多轨道交通制式中的一种，在我国发展有其一定的优势，但也有一定的局限性。

我们下面就我国最具特点的几个城市，北京、广州和重庆的特点来分析一下，目前采用直线电机系统是否合适。

6.1 北京

6.1.1 北京市城市概述

北京是我国的首都，全国的政治、文化、经济中心。北京城市规划区即北京市行政辖区，包括规划市区和远郊区县，总面积为 16800 平方公里。

其中规划市区的范围，东起定福庄、西到石景山、北起清河、南至南苑，方圆 1040 平方公里，规划城市建设用地 610 平方公里左右。市区中心地区的范围大体在四环路内外，面积近 300 平方公里。

北京市的综合经济实力保持在全国的前列，是全国重要的综合性产业城市。地方财政收入持续高速增长。

随着经济的快速发展，城市发生日新月异的变化。城市规模扩大，城市化水平不断提高，居民出行需求总量持续增长，机动化水平也不断提高。截止到 2002 年，北京市常住人口已达到 1423 万，目前还在急剧的不断增长。这些变化都使北京市的城市交通问题越加突出。

6.1.2 北京市轨道交通线网规划

北京是我国最早修建地铁的城市，1969 年根据战备需要修建了我国第一条地铁，随后建成了地铁 1 号线和 2 号线（环线），在城市交通中发挥了重要的作用。但在很长一段时间里，地铁建设都处于半停顿状态，直至 2000 年才逐步进入了大规模的建设阶段。而目前的建设更是处于飞速发展之中，其建设速度在世界上也是从未有过的。

在 1993 年北京有关部门编制完成了北京市轨道交通远景线网规划，1999 年和 2002 年分别对其进行过两次修编，最近又在进行新一轮的修编工作，初步的修编结果如下：

北京市远景规划的城市轨道交通线网（2050 年）共由 16 条地铁线路以及 6 条轻轨线路组成。市区轨道交通规划线网长度为 701.4 公里，其中在四环路以内规划线路长度为 338.6 公里，线网密度为 1.08 公里/平方公里；二环路之内规划线路长度为 101.5 公里，线网密度为 1.64 公里/平方公里。北京市远景规划线网（2050 年）详见图 6-1。

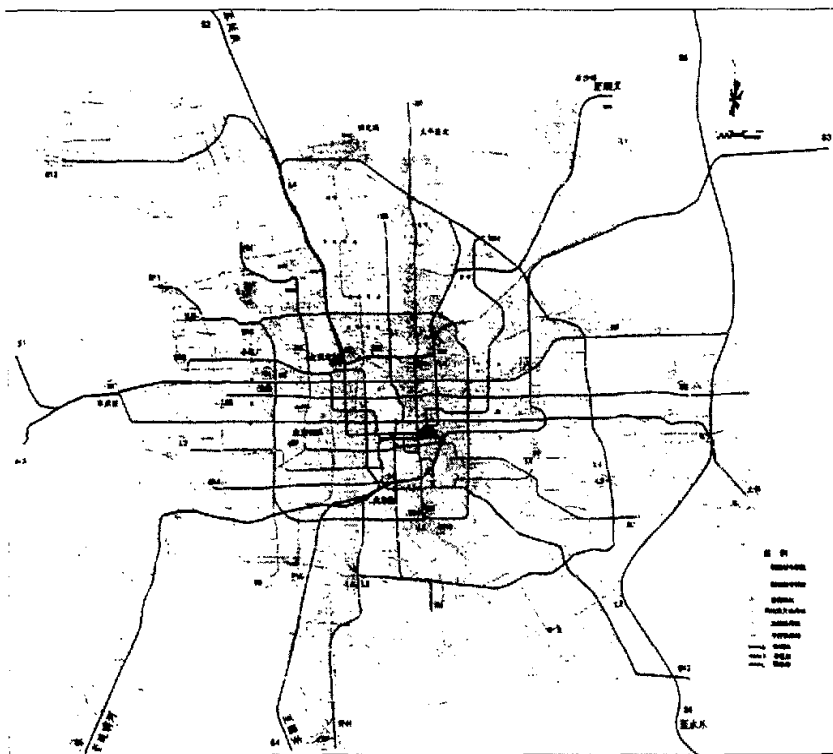


图 6-1 北京市远景规划线网图（2050 年）

在这个远景规划图的基础上，我们需要做一个较为详细的建设计划，按计划先建设最需要建设的、能解决城市交通问题的线路，既要考虑建设的需要，还要对投资问题、建设施工对现有道路及扰民问题进行充分的研究和分析。使其对目前城市居民的正常生产生活不会造成很大的影响。由于北京在 2008 年即将举行奥运盛会，奥运期间的交通问题也是目前各相关部门需要考虑的重点问题，北京市也针对这一特殊盛会制定了相应的近期建设规划。

目前，北京市已投入运营的城市轨道交通线路有 1 号线、2 号线（环线）、13 号线、八通线，运营线路总里程 114.1km。

目前正在建设的轨道交通线路有 4 号线、5 号线和 10 号线，即将开工

建设的有奥运支线、9号线、亦庄线、机场线等。此外，还将建设昌平、良乡、顺义3条郊区铁路。到2008年奥运会召开前夕，北京市区将新增轨道交通线路约143km，城市轨道交通总里程达到256km，包括郊区铁路将超过300km。这将对奥运期间的交通疏散问题起到很大的作用。北京市城市轨道交通近期建设线网规划图（2008年）详见图6-2。

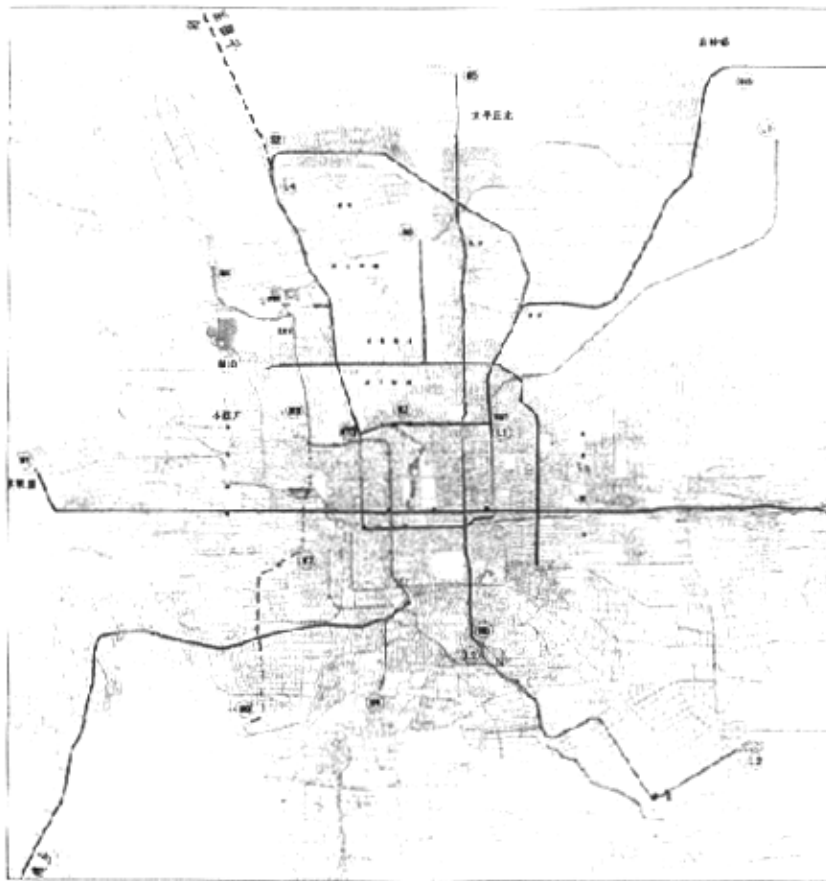


图 6-2 北京城市轨道交通近期建设线网规划图（2008年）

6.1.3 目前建设中遇到的问题

目前,北京市已投入运营的城市轨道交通线路有1号线、2号线(环线)、13号线、八通线,运营线路总里程114.1km。均采用传统的B型车。

目前正在施工建设的轨道交通线路有4号线、5号线、10号线及奥运支线,线路总长超过80km,总投资超过400亿元,而且计划在2008年奥运会召开之前,4、5号线将全线开通运营,10号线北段和东段及奥运支线将正式开通运营。4号线、5号线、10号线及奥运支线线路图详见图6-3。

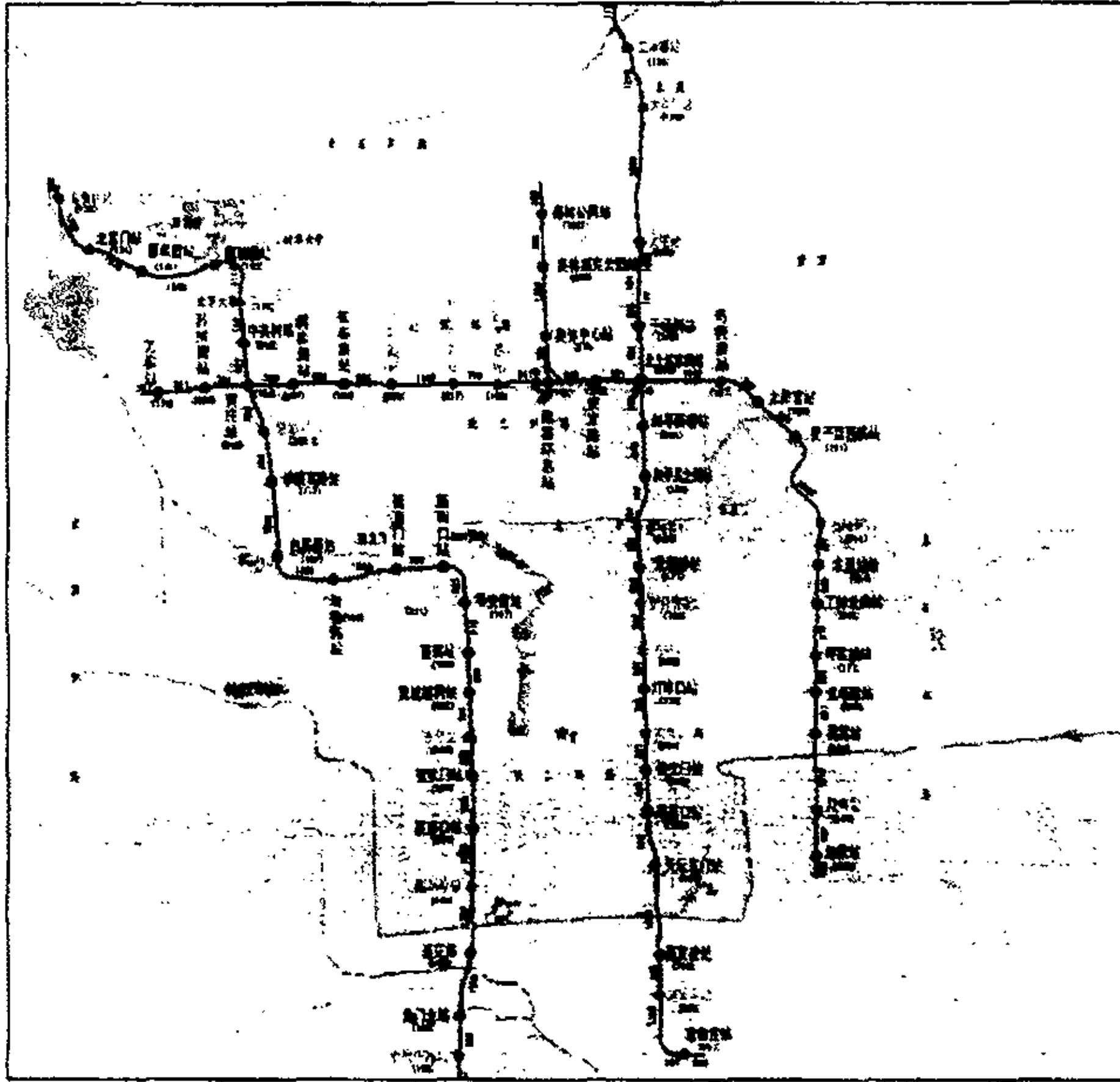


图6-3 4号线、5号线、10号线及奥运支线线路图

在这种建设规模大、施工难度大、建设工期短,并且是多条线路在城

市中心区同时建设施工情况下，遇到了许多复杂的问题，例如：

1) 4 号线、5 号线、10 号线都是穿越城市中心繁华地区的地下线路，大多数都属于隧道区间和地下车站，而且由于市中心区地面施工较为困难，必须采取暗挖的形式，给施工带来了很大的难度和风险。以 4 号线为例，4 号线全线线路长度为 28.16km，车站 24 座。其中地下站 22 座，暗挖车站 2 座，明暗结合车站 8 座，明挖车站 12 座。

2) 4 号线、5 号线、10 号线沿线的经过许多桥梁、建筑、地下管线和构筑物等，线路由于受坡度和转弯半径的限制，不可避免地要从这些高架桥、人行天桥、高层建筑的桩基侧面或下方穿过，在接近既有构筑物的情况下施工。在建的 4、5、10 号线共 7 次穿越既有地铁线；8 次下穿铁路；几十次下穿立交桥或匝道桥；13 次下穿河道；穿越桥桩 80 多处（最近的地铁结构距桥梁基础仅为 0.19m）；穿越老旧民房和各类高层建筑几百处；所有的车站和区间均须穿越大量的管线，有些车站为了躲避管线，将车站出入口设计得极为不便。如何在如此的条件下保证施工安全已经成为北京市交通系统必须面对的一个难题。

3) 线路由于受到车辆曲线半径和限制，致使只能采取通道换乘的形式，给乘客带来了很大的不便和严重影响了运营服务水平。

4) 4、5、10 号线的地下线路大多穿越城市中心区，沿途有许多重要的文物古迹、医院、学校和居民住宅，高架区段也通过多处开发区。因此这几条线路运营后的振动很可能对附近建筑和居民产生长期的影响。目前已运营复八线、城铁 13 号线、八通线已出现噪声、振动扰民的情况，由于早期建设的线路多设置在道路的下方，影响不大。但随着城市建设的快速发展，线路选线条件的日益苛刻，不可避免的要将线路设置在建筑附近，势必对附近的居民产生影响。如何解决噪音和振动问题也是摆在交通部门面前的一项难题。

5) 由于城市中心区的用地紧张，车辆段选址较为困难，最终只能将车辆段置于线路端部，不利于运营调度。

以上是目在北京在建线路中遇到的很难解决的难题，也是我们以后的几条将穿越城市中心区线路同样将遇到难题。

6.1.4 直线电机轮轨系统适用性分析

以上诸多问题的出现，需要我们对北京地铁交通模式选择重新进行思考，如果我们选择直线电机轮轨交通模式是不是部分解决或缓解一些矛盾呢？下面假设一下如果选用直线电机轮轨系统，我们将得到如何的改善：

1) 直线电机轮轨系统的转弯半径较小，正线上的曲线半径为 80m，比传统的轮轨系统规定的 300m 曲线半径要小得多；直线电机轮轨系统的最大坡度为 6%，比传统轮轨的 3%要大的多，这些系统特性使得选择线路路由走向和车站设置方面具有很好的适应性。如果我们在 4、5、10 号线中选择了直线电机轮轨系统，就会有效的避开线路沿线的许多高架桥梁桩基、高层建筑的桩基、以及众多的大型地下管线和构筑物，避开老旧民房、学校和文物保护单位，减少了地面拆迁和对地下构筑物的影响，从而大大降低工程设计难度和施工风险，减少了拆迁费用、施工费用等。这对于施工建设是至关重要的。

施工建设风险是我们近期施工建设中最为热门的话题，近来地铁施工中的事故发生率很高，而且一旦出现事故将不但会产生巨大的经济和财产损失，也会对居民正常的生产、生活产生巨大的影响。例如：2004 年 9 月 27 日，正在修建的地铁 5 号线 10 号标段(和平里西街附近)，地铁距这些房子的距离有 10 多米远，施工引起的地面沉降值致使旁边约有近 10 户居民的住宅不同程度出现开裂下沉。2004 年 12 月 1 日晚，位于广州地铁 3 号线线路上方的一栋楼房的地面由于地铁施工，地质松动，地面产生裂缝，水泥浆顺着裂缝上涌拱开地面进入居民家中，目前地铁停工，正在研究可行性施工方案。2004 年 12 月 5 日台北地铁（捷运）工地，因沿线的大口径的供水管线断裂大量出水，造成路面严重下陷，一辆出租车差一点掉进塌陷洞内，双向主干道封闭抢修，影响交通将近一星期，幸好没有人员受伤。

这些事故的发生无疑都警示我们，地铁施工、建设中一定要严密防范施工过程中出现地表沉降、开挖引起地层变形失稳等险情，尽量降低施工风险。而降低施工风险不但要在施工的过程中，更重要的是在前期的规划和设计中，就要考虑到将风险降到最低。在前期规划中，合理选择轨道交通模式、合理选择线路走向、尽量避免与地下管线、构筑物等距离太近，降低施工难度，同时降低投资，在规划线路确定后，严格控制规划用地，以免其它建筑物的侵入，增加施工难度。

可以说，直线电机轮轨系统在合理选线、降低施工风险方面具有很大的优越性。在这方面，日本东京地铁的建设为提供了很好的实例，东京也是寸土寸金的国际型大都市，城市中心区高楼林立，土地资源极为匮乏，致使其极力地开发地下空间资源，地下 50 米的空间已经过合理的规划和控制。作为地下重要基础设施的地铁更使四通八达，几条地铁线路交汇的枢纽站最多已达到地下 7 层。在这种地下空间越来越紧张情况下，日本开发的适应性极强的小断面直线电机轮轨系统，其爬坡能力强和转弯半径小的特点使其有效避开了地下构筑物和管线，轻松穿梭于密集的城市中心区地下。

2) 直线电机轮轨系统爬坡能力强和转弯半径小的选线特性同样有利于合理快捷的换乘方式的设计。

在城市轨道交通事业不断发展到一定程度，城市轨道交通再不只是线的概念，而是网的概念。网上就会有越来越多的节点产生，这就是我们所说的换乘车站的概念，如果三条以上的线路相交或和其他交通方式，例如铁路、机场、公交形成换乘，我们就称其为枢纽。如何合理设计换乘车站和枢纽，对于节省投资和提高运营服务水平具有很重要的意义。

目前北京现有的城市轨道交通的换乘站有西直门站（2 号线和 13 号线的换乘）、东直门站（2 号线和 13 号线的换乘）、建国门站（1 号线和 2 号线的换乘）。其中由于没有合理的规划，在西直门站和东直门站换乘，乘客不但要走出付费区，重新购票，还要从地下站台走出地面再上高架，换乘

极为不便，换乘客流还给地面交通造成极大的干扰。

在 2008 年近期建设规划规划中新建的 4、5、10 号线、奥运支线、9 号线、机场线等线路的建设中，将产生许多换乘节点，例如：西单（1 号线和 4 号线换乘）、东单（1 号线和 5 号线换乘）、宣武门（2 号线和 4 号线换乘）、西直门站（2 号线和 4 号线的换乘）、白石桥站（4 号线和 9 号线的换乘）等。2008 年近期建设规划线网示意图详见图 6-4。

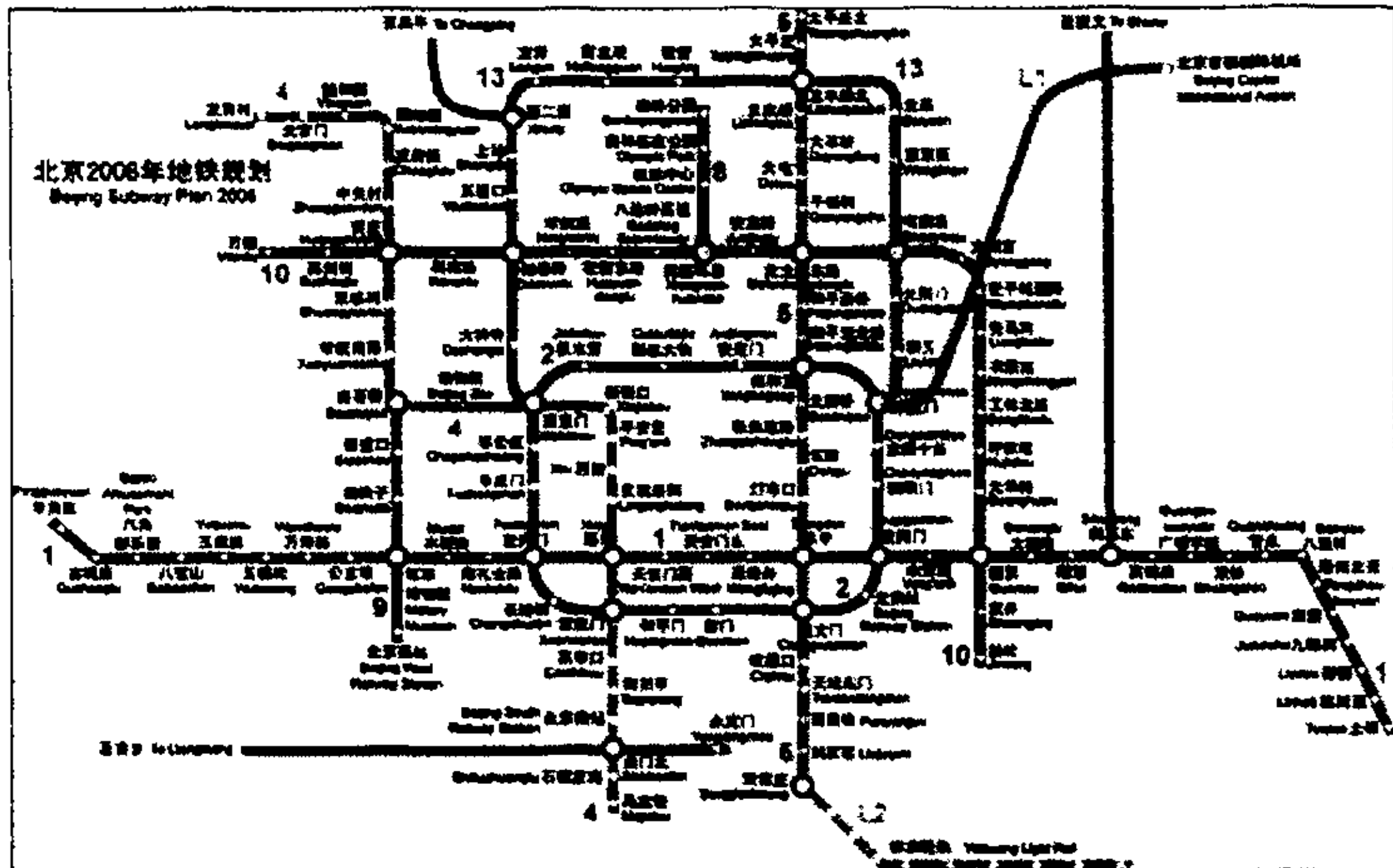


图 6-4 2008 年近期建设规划线网示意图

目前大多数换乘节点的方式都采用通道换乘的方式，虽然基本避免了非付费区的换乘，但换乘通道距离过长，有的竟超过一百米，这样的换乘对于每天都要换乘的乘客来说是极为不方便的。这种设计结果的造成一部分是由于各条线路的建设时序的不同，管理体制造成无法协调配合，以及规划等方面的不确定性。但也有线路条件限制的原因。

例如在 4 号线和 9 号线的换乘节点—白石桥站，本来是有条件设计一个较为合理的同站台换乘节点，但由于白石桥路口的高架桥的建设，以及路口周边的建筑物密集的原因，而 4 号线和 9 号线所采用的传统轮轨制式

300m 曲线半径的限制,使得两条线无论如何也不能在最佳的地点相汇。就这样我们只好采用了长通道换乘的形式,放弃了这个极好的换乘方案。但如果这两条线中的其中一条采用的是直线电机轮轨系统,我们完全可以在白石桥站实现同站台换乘的方案。

日本东京的直线电机轮轨系统一大江户线,环线上 28 个车站中,有 21 个与其它轨道交通线路形成直接的同站台换乘,由于是与已有的地铁线路进行换乘,大江户线的车站大都位于地下 3-4 层;部分位于地下 5-6 层;新宿站的站台则位于地下 7 层。这样的换乘设计大大提高了换乘的便捷性和服务水平,体现了以人为本的设计理念,也体现了轨道交通设计的先进性。

一个城市的城市轨道交通网的换乘节点的设计是衡量一个城市轨道交通的建设水平和运营服务水平最直接的标准。

经过以上的论述,我认为北京市在城市轨道建设方面对新技术引进和吸收缺乏有效的支持。新技术的引进和吸收对于城市轨道交通在提高整体技术和服务水平的同时,有效降低系统造价是非常重要的,对于城市轨道交通乃至整个城市的可持续发展和市场竞争力也是极为关键的。

虽然北京目前未能将直线电机系统作为轨道交通制式纳入北京的轨道交通线网中来,但其对于北京城市中心区的线路选线的优势是不容忽视的。例如,目前规划的 6、7、8、12、14、16 号线,也都是穿过市中心的地下线路,将来的地下空间将更为紧张,施工难度和风险也更大,希望在下一次轨道交通线网规划修编的时候,直线电机轮轨系统能作为北京线网中又一新的制式提出来进行论证,并根据沿线实际将遇到的情况进行深入地研究,最终确定出最符合线路等状况的轨道交通模式,使其优良的选线特性能在北京的城市轨道交通建设中得到体现。由于目前我没有这几条线详细的地质及沿线的资料,在这里就不加以论述了。

6.2 广州

6.2.1 广州市城市概述

广州市是广东省的政治、经济和文化中心，是我国历史文化名城和华南地区的中心城市，是我国重要的经济、文化中心和对外交往中心之一。2002 年底，全市户籍总人口 720.62 万人，外来人口约 320 万人，户籍非农业人口 502.30 万人。2002 年，实现国内生产总值 3002 亿元，人均国内生产总值达到 4.19 万元，地方财政收入 269 亿元。到 2010 年，全市总人口 1155 万人，市区人口 965 万人。

6.2.2 广州市轨道交通线网概述

目前，广州市轨道交通经过十年建设已有 2 条线路 36.7 公里投入运营，初步显示了快速和大运量的优势，对带动沿线开发，促进经济和社会发展起到了明显作用。

为了迎接未来经济和人口增长的需要，广州市相继开展了包括《广州市轨道交通线网规划》、《广州市轨道交通 2003 年至 2010 年建设规划》在内的一系列规划研究工作。《广州市轨道交通线网规划》和《广州市轨道交通 2003 年至 2010 年建设规划》作为重要的专项规划，对现状条件、分阶段应达到的目标、建设的必要性以及线路敷设方式、车辆制式选择、换乘枢纽、共享资源等都进行了充分的分析和论证，最终确定了广州市的远景规划和近期的建设规划。

广州市轨道交通线网规划由市区、城际、铁路三个层次组成。其中，广州市区轨道交通线 15 条，610km。城际轨道线（广州段）40 公里，市郊列车线 67 公里，合计 717 公里。

广州市 2003 年至 2010 年建设规划中确定：2010 年的建设目标是 7 条轨道交通线路全线或部分路段开通运营，开通的线网长度达到 181.9km，

车站 105 座，另有 21.5 公里线路及 17 座车站在建。另外，广佛城际轨道线也将建成通车，在广州市内的轨道线路为 17.4km。图 6-5 是广州市轨道交通 2003 年至 2010 年建设规划示意图。这种建设速度在广州也是从未有过的。



图 6-5 广州市轨道交通 2003 年至 2010 年建设规划示意图

在近期建设规划中，还根据广州市线路沿线地形、地质、线路及资源

共享等条件,对各条线路所选用的轨道交通制式进行分析和论证。1号线、2号线和8号线选用的是传统A型车;3号线选用传统B型车,但最高运行速度采用120km/h;4、5、6、7号线均选用的是直线电机牵引轮轨系统车辆。下面列表简要说明一下广州所选用的轨道交通制式的主要技术参数。详见表6-1。

表6-1 广州轨道交通制式的主要技术参数

序号	名称	传统电机牵引系统车辆		直线电机牵引轮轨系统车辆
		A型车	B型车	
1	最小平面曲线半径(m)	正线/辅助线/车场线 300/200/150	正线/辅助线/车场线 300/200/150	正线/辅助线/车场线 150/100/60
2	最大爬坡能力	35‰	35‰	60‰
3	最高运行速度	80km/h	120km/h	90km/h
4	车辆长度	T _C : 23.9m T、M: 22.8m	19m	M _C : 17.2m M: 16.8m
5	车辆宽度(m)	3	2.8	2.8
6	车辆高度(m)	3.8	3.8	3.6
7	转向架轴距(m)	2.5	2.2	2
8	转向架中心距(m)	15.7	12.6	11.14
9	轮径(mm)	840	840	730
10	车辆定员(平均)	310	230	230

以下就选用直线电机轮轨系统的必要性进行简要论述。

6.2.3 直线电机轮轨系统适用性分析

广州地铁已经决定在广州地铁4、5、6、7号线上采用直线电机轮轨系统,4号线的大学城专线已经开工,并计划于2005年底建成通车,到那时,将拥有我国第一条直线电机轮轨系统线路。直线电机轮轨系统在广州的应用具有很强的适用性和必要性,下面就从如下几个方面进行论述:

(1) 广州市位于珠江三角洲的中心地区,水资源较为丰富,珠江将

广州市分割成许多小型区块，广州区域水文地质与工程地质情况复杂，岩面起伏变化大，多条断裂带交错分布。大部分线路要穿越四大地质难点（石灰岩溶洞、断层、软土和砂层、花岗岩残积层），过江段还需避开河床下的透水软弱地层。从盾构工法角度希望线路埋深浅一些，尽量避开穿越大量坚硬的混合岩，而从穿越珠江主航道（新造海）则希望避开透水砂层，线路要适当加大埋深。广州地铁 1、2、3 号线建设中都不同程度因选线需要穿越这些不良地质构造地区，给工程实施造成很大困难。如果选用直线电机系统就可以减少工程风险，尽量避免地质灾害的发生。

从广州市轨道交通线网规划图中可以看出，15 条规划的轨道交通线路将 50 次穿越珠江水系，其中近期建设的几条线路需 32 次穿越珠江水系，目前正在建设的 5 条线路也将 18 次穿越珠江水系。工程既要保证施工的顺利进行和将来运营的安全性，又要考虑到方便乘客乘车，车站站点的设置需要距江边较近，这样的线路条件也要求我们必须选择一种爬坡能力强的轨道交通制式，以适应这种线路条件。由于传统的钢轮钢轨系统难以满足线路纵断面设计需要，所以选用直线电机轮轨系统是非常必要的。

以目前正在建设的广州地铁 4 号线试验依托工程—大学城专线为例，4 号线的中部线路需要三次穿越珠江主航道，大学城小谷围岛和新造地区属于丘陵地带，往南又穿越多个农田生态隔离带，部分线路为高架或地面线路。大学城中两个车站，即大学城、小谷围站均设在中环路上，路面标高较高（地面标高分别规划为 12.5 和 21.5 米），而其北面官洲海和南面新造海最低河床标高较低（分别约为-7.5 和-10.0 米），如果采用传统的粘着驱动方式运载系统必然会造成官洲、大学城、小谷围三站埋深太深，不利于将来的运营使用，也存在一定的安全问题。新造站以南为丘陵地带，设在兴业大道（东西向）南的车辆段及综合维修基地标高较高，与该站轨面高差较大，采用传统系统也无法设置合理的出入段线路。由于如上一系列原因，最终选定直线电机轮轨系统作为广州地铁 4 号线的最终选定制式。图 6-7 显示了小谷围至新造区间穿越新造海的隧道纵断面图，这是大学城专线中坡度最大的一段区间隧道，其最大坡度达到 50%。这对于传统的旋转电机

牵引的轨道交通系统来说是很难实现的。

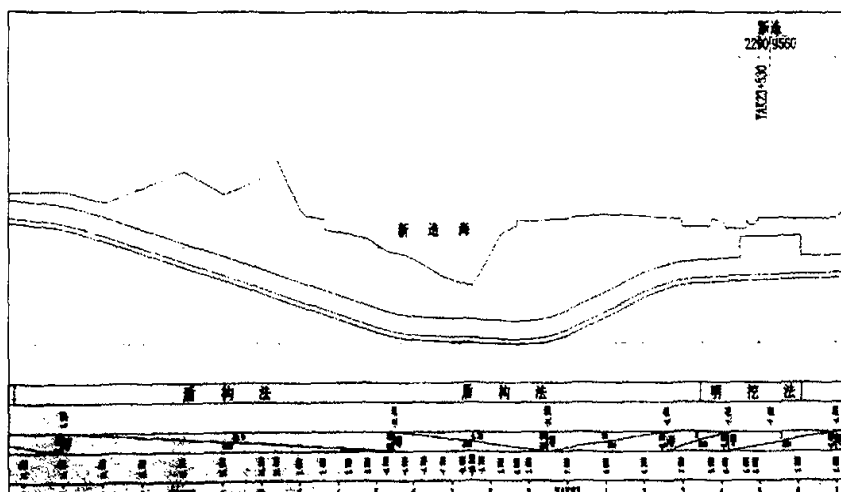


图 6-7 广州地铁 4 号线小新区间纵断面图

(2) 广州作为我国经济最为发达的城市之一，广州西部以及东山、天河一带的城市规划建成区，高楼林立、高架快速路层叠、人口居住密度高、人流、车流密集。而广州 2010 年的建设规划中需要建设的广州地铁 5、6、8、9 号线都必须要从这里穿过，因此在选线时遇到了很大困难。高层建筑、高架桥的桩基、大型的地下管线和已有的地下基础设施的存在大大限制了轨道交通线路穿过。在地铁选线设计中，有的地方线路可以有效的避开已有障碍物、有的地方可以对地下管线进行改移，但对于实在躲不开又移不动的地方，可采用桩基托换的先进的施工技术。广州地铁在 1 号线的建设中曾进行桩基托换约 143 根；2 号线托换桩基约 18 根；3 号线托换桩基约 237 根。而桩基托换的风险极大、费用也是极其昂贵的。在 1 号线施工时，地铁隧道需在五栋六~九层的楼房下方的桩基群中穿过，图 6-6 显示了当时一栋九层楼房的基础托换示意图。从图上可以看出，其施工工程是非常复杂的，由于还有许多军民在楼中居住，为了保障居民正常的工作和生活，其工程施工风险也是非常大的。如果广州地铁 5、6 号线选用传统轮轨系统，预计在将来工程建设中将需托换更大数量的桩基。因此，广州地

一定的规模，能够实现资源共享。从经济和技术力量方面，广州市对于地铁建设给予了很大的支持，雄厚的经济实力和广州地铁多年积累的技术力量是广州成为国内第一个采用直线电机系统的城市。

广州正在进行广州4号线大学城段的建设，计划2005年底建成通车。目前土建工程正在紧张的施工。5号线施工前期的准备工作也在紧张地进行着，近期将开工建设。

6.3 重庆

6.3.1 重庆市城市概述

重庆市是一座具有3000多年悠久历史的文化名城，是全国重要的工业城市、交通通信枢纽和贸易口岸；是我国西南地区和长江上游最大的经济中心城市，现辖40个区、县（自治县、市），面积8.24万平方公里，东西长470公里，南北长450公里。重庆市境内以长江干流为轴线，众多支流汇入，主城区坐落在长江、嘉陵江汇合处，被两江分割成为倚望的三大部分，形成“分散的、多中心”组团式城市结构。地势沿河流、山脉起伏，构成以山地、丘陵为主的地形状态，且地形高低悬殊，地貌结构分明，南部最高处为南桐矿区鸡公岭，海拔1973m，东北部最低处是长寿大江水面，海拔仅154m。山地占幅员面积的75%以上；丘陵面积占18%以上；平坝面积仅占2.4%。故重庆市区和城镇都沿河两岸，依山而建，因此，重庆成为著名的“山城”。

重庆市城区人口主要集中在市域中心城市即都市圈范围内，主城区面积占全市的3.17%，而人口占全市的15.6%，由于受大山、江河的阻隔，城镇的可建面积小，从可建面积来看，人口密度达27228人/平方公里，随着重庆直辖市的建立，城市流动人口不断增加。

随着经济和道路的发展也促进了城市规模的加大和城市人口的增加，造成城市交通需求的急剧上升，主城区道路交通矛盾日益突出，主要表现在以下几方面：

(1) 道路结构的失衡，城市路网次干道系统严重不足。路网受两江桥梁和两山地形的限制，使路网交通分布极不均匀，少数路线流量集中，负荷过重。组团之间、组团与周边区域之间的联系十分困难。

(2) 道路容量不足，交通阻塞点多，相应的道路设施缺乏。重庆主城区一边是山，一边是江，同时由于主城区人口密度高，建筑密度大，道路比较狭窄，造成交通不畅，人行过街道、公共停车场等道路设施缺乏，也造成交通阻塞。

(3) 道路坡度普遍偏大。受地形和用地开发的影响，道路极限坡度较普遍，直接影响车辆运行的舒适度、安全性。

(4) 主城区干线公路网络系统不完善，路网密度较低、公路标准偏低、适应性较差、等级水平和服务水平不高。

6.3.2 重庆市轨道交通线网概述

2004 年为适应重庆城市发展战略的需要，改善核心城区交通状况和环境质量，促进城镇化进程，引导和促进周边组团的同步发展，调整形成了一环六线，总长 354 公里的轨道交通线网规划方案。图 6-3 是重庆市城市轨道交通线网规划图。

重庆市线网规划为：轨道交通 1 号线由朝天门至璧山，线路长 49 公里；2 号线由较场口至鱼洞，线路长 39 公里；3 号线由鱼洞至江北机场，线路长 60 公里；4 号线由七星岗至鱼嘴，线路长 36 公里；5 号线由冉家坝至江津，线路长 63 公里。环线线路长 47 公里。轨道交通线网密度为每平方公里 0.56 公里。规划建设 16 个换乘枢纽车站，7 个车辆段，6 个停车场。

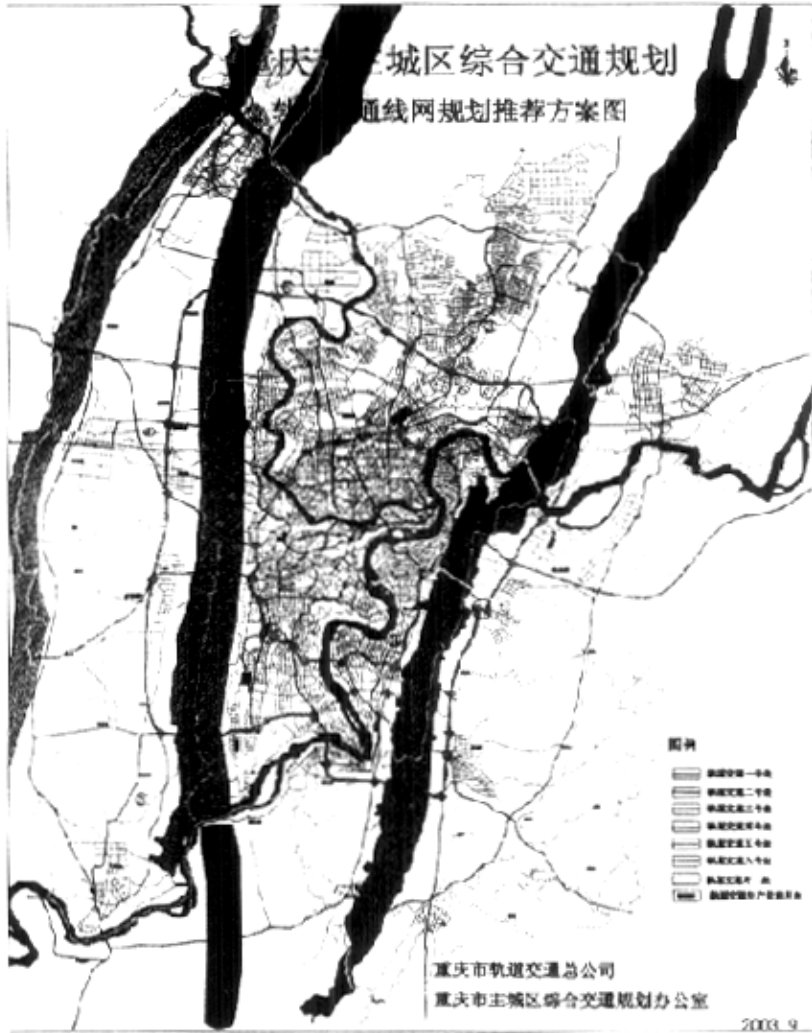


图 6-7 重庆市线网规划图

目前，东西方向的轨道交通 2 号线（较新线）已于 2000 年开工建设，采用的是跨座式单轨系统，计划于 2005 年投入正式运营，现已进入试运营阶段。跨座式单轨爬坡能力强、噪音小等优点较适宜重庆山城的特色，试运营以来，获得了各界的好评，但跨座式单轨交通也存在运营维护费用高

等不足。南北方向的轨道交通 3 号线计划于 2004 年动工，也计划采用跨座式单轨系统，2008 年建成通车，形成“十”字型轨道交通骨架。2007 年开工建设轨道交通 1 号线，2012 年建成通车，形成“大”字型轨道交通骨架，实现轨道交通近期建设规划。

6.3.3 直线电机系统适用性分析

重庆轨道交通线网中 2 号线和 3 号线都计划采用跨座式单轨系统制式，而其它几条线路的制式还未最后确定，需要对几条线路具体的线路情况进行分析和比较。由于 1 号线计划 2007 年开工建设，我们就先针对一号线的线路情况，分别对备选的传统轮轨 B 型车制式和直线电机制式进行了分析比较。

6.3.3.1 重庆轨道交通 1 号线概述

重庆轨道交通 1 号线贯通渝中区、沙坪坝区经过双碑、大学城至璧山，全线长约为 49.0km。贯穿了市中心的主要交通干道和商业网点，是路网中人口集中、商业繁荣、交通密集，客流量最大的一条线路，预测远期高峰小时最大断面客流量可达 3.31 万人次。是城市中心区东西向主要交通走廊，对城市规划和建设起到极其重要的推进作用。

在设定相同的工程线路走向和车站布置情况下，对传统轮轨 B 型车制式和直线电机系统制式进行比较。线路起点位于长江与嘉陵江交汇处的朝天门，线路沿信义街向南，沿新华路至较场口，而后沿和平路向西，经兴隆街、民生路交叉口处的七星岗，穿过枇杷山公园至两路口，穿越鹅岭公园、佛图关公园至大坪，再沿大坪正街、石油路、渝州路至石桥铺，然后，线路偏离道路穿越部分楼房后转向石小路，沿石小路向北至小龙坎，线路再穿过部分楼房至沙坪坝核心区三峡广场，穿过重庆师范学院、建筑专科学校校园，在建专学校附近线路由地下转到高架，跨过渝长高速公路后转向渝碚路，沿渝碚路向北穿过特钢厂区至双碑，尔后线路转向西，穿过歌乐山后至“西部新城”，沿着规划的科技大道至本工程的终点大学城站，预

留远期向璧山方向延伸的条件。图 6-8 为重庆轨道交通 1 号线线路图。

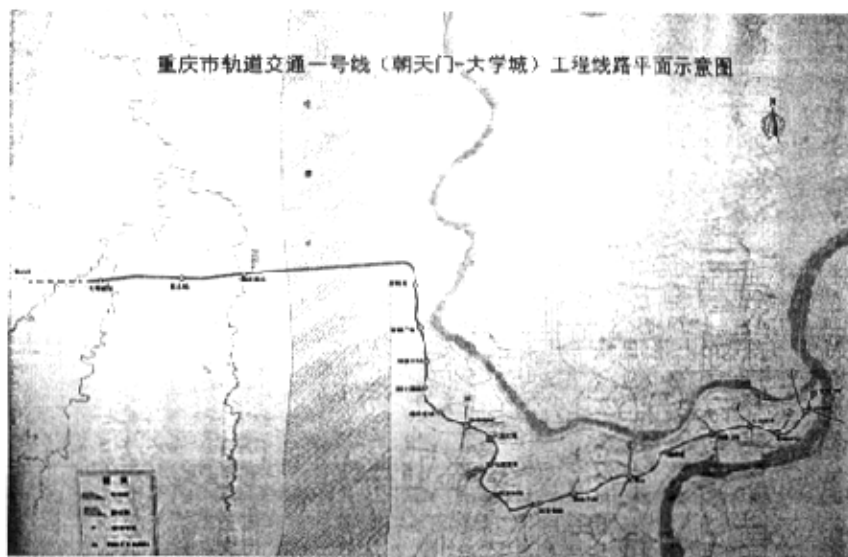


图 6-8 重庆轨道交通 1 号线线路图

在此段线路中，所经大部分地区地势变化较大，地形高低起伏不平，线路经过地段属丘陵、低山地貌区，地层岩性以侏罗系沙溪庙组的砂岩、泥岩为主，约占岩层的 93%；白云岩和灰岩为辅，约占岩层的 7%，各地层及岩性现由新到老。区域稳定，无大型不良地质现象，施工难度不大。

线路在小什字和七星岗燕喜洞段，利用了一段既有的 2.87km 的人防隧道作为轨道交通正线使用，因此这段线路没有比较，成为限定条件。

按规范规定：在常规轨道交通（轮轨系统）中，列车牵引依靠轮轨粘着力，如在大坡道启动，受基本阻力和启动阻力影响，最大坡度一般规定为 30%，困难条件下允许采用 35%。而直线电机牵引系统牵引列车不依靠粘着力，最大坡度可达到 60%。

重庆是山城，线路经过的地区多为丘陵地区，道路转弯多，曲线半径小，因此线路的路由大部分没有设在道路下面，经常要穿越地面建筑物，

甚至是高层建筑物，地下线路和车站的埋深较深，但也可以在设计上根据现场的特点将出入口设在距地面较浅的一侧。

6.3.3.2 直线电机轮轨系统在重庆轨道交通 1 号线应用分析

在对重庆的地质情况、线路情况进行充分分析，对传统轮轨系统和直线电机轮轨系统各自的特点充分了解的情况下，我们最终得出以下结论：

由于重庆地形起伏大，变化复杂，在采用传统轮轨系统进行设计时，导致线路有三处用足 35% 斜坡，累计坡段长度为 2.9km，最长的一段达 1.18km，最小曲线半径为 250m。三座车站拱顶埋深超过 30m，给安全运营、维修管理、扶梯设置造成一定困难。

由于采用了直线电机系统，线路和车站条件都得到了很大的改善，具体比较结果如下：鹅岭车站的埋深由 45 米提升至 22 米；高庙村车站的埋深由 46 米提升至 19 米，并且由双层暗挖车站变成了三层明挖车站，车站站位由十字路口一侧移到了十字路口底下；马家岩车站的埋深由 65 米提升至 35 米，站位由路侧移到了路中；高架站烈士墓站、磁器口站的站台层由路侧移到了路中，车站附属用房置于道路两侧，通过天桥与站台相连。其它车站基本没有变化。

直线电机系统的技术优势，适应重庆山城的特色——坡陡、转弯半径小。线路可采用大坡度，以减小车站埋深，降低自动扶梯提升高度，降低长期运营费；线路可采用小半径，可以减少拆迁，减少地下线路在高层建筑物下穿越，降低施工难度。

经过以上的比较，我们可以认为从技术上，直线电机系统在重庆 1 号线比传统轮轨具备很大的优势。考虑到资源共享问题，我们可以把直线电机系统作为继跨座式单轨制式后，重庆引进的又一轨道交通制式。而传统轮轨系统在国内的技术成熟、已达到了国产化要求，投资省。如果对传统轮轨系统进行优化，采用全动车的编组形式，虽然在 1 号线的线路设计上，就规范来说，已用到了苛刻的条件，但总的来说是可行的。

在确定轨道交通制式时，不仅要考虑到技术条件，还应结合城市当前的经济实力和技术力量。在建设重庆轨道交通 2 号线跨座式单轨系统时就体现得较为明显，技术谈判和商务谈判都进行得较为艰难。可以说在经过 2 号线的建设之后，重庆地铁已积累了一定的轨道交通建设经验，重庆轨道交通 2 号线已经开通，并进入试运营阶段。目前广州已先行引进了直线电机系统，重庆地铁 1 号线计划 2007 年开工，广州引进的经验对重庆地铁有很好的借鉴作用。所以说，直线电机技术引进到重庆轨道交通上来，应该说比当初引进跨座式单轨技术要容易了许多。

如果把直线电机系统与传统的轮轨系统比较，在重庆市这种起伏较大的山地地形地貌特征的城市中应用直线电机系统，更能够充分体现其拐弯半径小、爬坡能力强的特点。

6.4 小结

上面分别从北京、广州和重庆三个城市的城市概况、轨道交通线网规划和直线电机适用性上进行了介绍和分析。

总的来说，我认为北京的城市中心区地下空间较为紧张，建设、施工难度越来越大，可以借鉴日本的轨道交通经验，采用小断面、转弯半径小、爬坡能力强、噪音小的直线电机系统较为适宜。从经济上来说，减少了拆迁和管线的改移，节省了投资。北京也有多年的建设经验和运营经验。对于引进直线电机系统，具备各方面的条件。

广州丰富的水系、地质情况复杂、城市密集区高楼林立，地下构筑物较多等一系列的特点是广州市下决心引进直线电机轨道交通技术，应用于 4、5、6、7 号线上。广州在经过地铁 1 号线的全面技术引进和 2 号线的全面地技术吸收国产化的过程，以培养出一批强有力的技术力量，而且广州有充足的资金支持，使其对直线电机技术的引进成功有很强的自信。目前 4 号线大学城专线土建工程已接近尾声，2005 年底将通车运营。广州地铁 300 辆车的采购合同已经签订，并组织了大量的技术力量对直线电机系统进行

全面的研究。

重庆市“山城”的特点更为适用直线电机系统，在经过对直线电机与传统轮轨车进行比较后，可以认为，直线电机系统在山城的优势体现得非常明显。但目前直线电机系统造价相对较高，对于重庆的经济实力来讲，有一些困难。等到广州大学城专线运营之后，我国将会引进和掌握直线电机系统的核心技术，关键设备（如直线电机车辆）也可以在国内生产，造价会大幅度降低，我相信直线电机会在山城重庆会得到广泛地应用。

7. 结论及展望

通过对直线电机牵引轨道交通系统的发展概况、直线电机系统的原理和特点、直线电机系统各关键部件的概述、直线电机系统与其它轨道交通系统的比较,以及对目前世界上两大类型直线电机系统的特点介绍以及对我国北京、广州、重庆等三个城市在采用直线电机系统时的适用性分析几个方面进行分析和论证。得出如下结论:

(1) 可以认为以爬坡能力强、转弯半径小、噪音低、环境影响小等一系列优点著称的直线电机轨道交通系统在我国的应用前景将是非常美好的。对于轨道交通建设事业的合理选择最优线路、有效降低工程建设难度和风险、降低工程造价、降低轨道交通在施工和运营期间对周边的影响以及提高轨道交通的服务水平具有深远的意义。

(2) 发展直线电机轨道交通系统也符合我国目前要建设低耗资、高效益的轨道交通系统的政策。由于土地资源和能源都属于不可再生能源,如何合理有效的利用土地资源和节省有限的能源已经成为我们需要考虑的重要问题。直线电机系统作为一项新型轨道交通系统对于节约有限的土地资源和能源有着重要的意义。

(3) 目前直线电机系统的关键技术掌握在少数国家手中,我国对直线电机技术的研究处于起步阶段,对直线电机的关键技术以及建设和运营中的关键问题还缺乏深入地了解。因此建设前期需要大量资金和技术力量的投入进行设备和技术的引进,工程造价相对较高。

(4) 在目前阶段必须抓紧时间组织联合国内有关单位,对新引进的直线电机轮轨技术进行深入地分析、研究和消化吸收,尽快掌握直线电机轮轨系统关键技术,并进行国产化研究,尽快将直线电机轮轨系统的工程造价降下来,这样便更有利于直线电机轮轨系统在我国的发展与应用。

希望在不远的将来，我国将成为继加拿大和日本之后，第三个拥有直线电机技术自主知识产权的国家，使直线电机轮轨系统更为适合我国的国情，最终在我国得到广泛的应用。

也希望本文能对直线电机轮轨技术在我国的发展及应用提供参考。

参考文献

- [1] 城市轨道交通研究中心.直线电机系统在首都机场线的应用研究报告.2003.5.
- [2] 城市轨道交通研究中心.降低地铁造价及工程建设管理等若干问题的研究—高级技术论坛.2003.4.
- [3] 施仲衡, 张弥等.地下铁道设计与施工.陕西科学技术出版社.
- [4] 施仲衡等.大城市综合交通发展战略与关键技术研究.2003.10.
- [5] 魏庆朝, 孔永健.磁悬浮铁路系统与技术.北京: 中国科学技术出版社.2003.11.
- [6] 毛保华, 姜帆, 刘迁等.城市轨道交通.北京: 科学出版社.2001.4.
- [7] Bombardier 公司.温哥华、纽约、吉隆坡等城市的直线电机系统介绍.
- [8] Airtrain JFK- Airport Access Program Overview.2003.11
- [9] A Faster Way to JFK-Airtrain.2003.11
- [10] Japan Subway Association.Linear Metro—Proposed Urban Transportation Systems for the 21st Century.
- [11] Japan Subway Association.Linear Metro System.
- [12] Japan Subway Association.Toward the Linear Metro System Age.1996.8
- [13] 日本地下铁协会.日本的地下铁.2002 年
- [14] 施翊, 魏庆朝.新型城市轨道交通模式—直线电机地铁系统.地铁与轻轨, 2003 年第 4 期.
- [15] 施翊, 魏庆朝.日本轨道交通模式.都市快轨道交通, 2004 年第 5 期.
- [16] 魏庆朝, 冯紫薇, 施翊.直线电机交通模式及技术经济特性, 都市快轨道交通, 2004 年第 1 期.
- [17] 刘友梅、杨颖.城轨交通的一种新模式—直线电机驱动地铁车辆.电力机车与城轨车辆, 2003.7.
- [18] 张全福, 翁梦熊.采用线性电机车辆的温哥华空中列车系统综合评价, 铁道车辆, 1996.7.
- [19] 金新民, 直线感应电机在地铁车辆上的应用, 机车电传动, 1998.10.
- [20] 广州市地下铁道设计研究院.广州轨道交通四号线应用线性电机运载系统研究论证

- 报告.2003.4
- [21] 陈韶章, 吴俊泉, 刘智成.直线电机运载系统技术在广州市轨道交通中的应用.地铁与轻轨.2003 年第 6 期.
- [22] 吴俊泉.温哥华 Skytrain 快速轨道交通系统.广州: 地铁科技, 2002.1.
- [23] 吴俊泉.直线电机在温哥华 Skytrain 系统中的应用及发展.机车电传动, 2003.10.
- [24] 张振生.直线电机城市轨道交通车辆综述.变流技术与电力牵引.2003.4.
- [25] 杨利军.直线电机径向转向架车辆结构及性能分析.上海铁道大学学报.2000.2.
- [26] 胡引娥.线性电机的特点及其在广州地铁 4 号线的应用考虑.机车电传动.2003.10.
- [27] 马沂文, 日本东京营团地铁新型车辆.国外铁道车辆, 1999 年第 4 期.
- [28] Nobuyuki Kamiko, 在东江中心区开通第二条环状轨道系统的影响.城市轨道交通研究, 2001 年第二期
- [29] 徐安、胡飞凰, 东京大江户线建设的启示.城市轨道交通研究, 2001 年第 4 期
- [30] 俞展猷, 城市单轨交通系统.机车电传动, 2002 年第 5 期
- [31] 徐曙, 日本的城市新交通系统—AGT.城市轨道交通研究, 1998 年第 2 期
- [32] 范瑜, 李国国, 吴命利, 自动导轨交通系统的发展现状.都市快轨交通, 2004 年第 2 期
- [33] 冈田 宏, 东京城市轨道交通系统的规划、建设和管理.城市轨道交通研究, 2003 年第 3 期
- [34] 手岛雄一, 安藤直树.2005 年日本国际博览会交通通道将正式启用 HSST.世界轨道交通, 2004.3
- [35] 袁克力.SELTRAC 控制系统在轨道交通中的应用.都市快轨交通, 2004 年第 4 期
- [36] 广州地铁总公司, 城市直线电机轨道交通技术与设备研究开发可行性报告, 2004.3
- [37] 广州地铁总公司, 直线电机运载系统科技攻关可行性研究报告, 2003.6
- [38] 日本地下铁道协会, 关于耗电量分析报告, 2004.10
- [39] 张成满, 罗富荣.北京市轨道交通建设尚需深入研究的课题.2004.10
- [40] 北京城建设计研究总院.重庆市轨道交通一号线(朝天门-大学城)工程可行性研究报告.2004.11

硕士期间发表论文及科研项目

攻读硕士期间发表论文

1. 施翊, 曾学贵.城市轨道交通线网规划设计的探讨.地铁与轻轨. 2003 年第 3 期.
2. 施翊, 魏庆朝.新型城市轨道交通模式—直线电机地铁系统.地铁与轻轨. 2003 年第 4 期.
3. 魏庆朝, 冯雅薇, 施翊. 直线电机交通模式及技术经济特性, 都市快轨交通.2004 年第 1 期.
4. 施翊, 魏庆朝.日本轨道交通应用系统模式.都市快轨交通.2004 年第 5 期.
5. 施翊, 魏庆朝.日本轨道交通模式. 第二届中青年专家论文集. 2004 年 10 月.

科研情况

1. 交通与发展研究中心: 直线电机系统在首都机场线的应用预可行性研究报告; 主研, 2003.5;
2. 国务院: 国家中长期科学和技术发展规划战略研究; 参与, 2003.11;
3. 国家发展与改革委员会: 城市直线电机轨道交通关键技术与设备研究开发; 参与, 2004.3;
4. 广州市地铁总公司: 广州直线电机轨道交通—轨行系统集成研究; 参与, 2004.6;
5. 重庆市轨道交通总公司: 重庆市轨道交通一号线(朝天门-大学城)工程可行性研究报告; 主研, 2004.10;

致谢

回顾研究生期间的学习，我的导师魏庆朝教授、曾学贵教授在各个方面给予了我很大的帮助和悉心的指导，对于我顺利地完成论文和学业起到了很大的作用，倾注了大量的心血。两位导师高深的理论水平、严谨的治学态度、渊博的学识和诲人不倦的作风使我受益匪浅、终身难忘，再次对魏庆朝教授表示衷心的感谢，同时对已故的导师曾学贵教授献上深深的敬意与哀悼。

同时还要感谢北京交通大学的梁青槐教授、高亮教授、范瑜教授、刘金玲、杨丽明、冯雅薇等帮助过我的老师和学友。

感谢北京城建设计研究院的沈景炎教授、沈子均教授、冯爱军教授等帮助过我的领导和同事。

感谢与我一起学习的路云军、王菁等同学。

还要感谢给我帮助很大的广州地铁、重庆地铁、加拿大 Bombardier 公司、日本地下铁道协会的领导和同仁们。

最后我还要感谢我的家人，特别是我的父亲施仲衡院士在我学习期间给予了我很大的支持和帮助，没有他们的帮助，我也是无法顺利完成论文的。

对所有给与我关怀、帮助、鼓励的老师、亲人和朋友表示衷心的感谢！