

# 日本直线电机地铁系统的发展与改进

曾根悟<sup>1,2</sup>

(1. 日本东京大学 东京; 2. 北京交通大学 北京 100044)

万传风 编译

(北京交通大学 北京 100044)

**摘要** 较为系统地介绍日本直线电机地铁的发展情况,指出日本直线电机地铁具有车辆断面小、建设成本低、爬坡能力强、转弯半径小、振动噪声低等特点,提出在满足安全舒适性要求、提高小半径曲线通过速度、提高直线电机地铁效率、减少或避免钢轨波磨方面需要继续改进的目标,最后总结了直线电机地铁的适用条件,并展望了直线电机地铁在中国重庆的应用前景。

**关键词** 日本地铁;直线电机;适用条件;改进目标;应用前景;重庆

**中图分类号** TM359.4 U12 **文献标志码** A

**文章编号** 1672-6073(2012)01-0019-04

1902年,德国的A. Zehden提出了把直线电机定子安装在车辆上进行驱动的方案,而英国的H. Wilson建议将直线电动机定子分段安装在地面驱动车辆。1908年,美国的Johnson提出用直线电机驱动单轨列车的设想。20世纪50年代,英国的Eric Laithwaite在曼彻斯特大学首次制成直线感应电机轨道车辆模型,并做了载人试验。当时的直线电机调速性能以及经济性、可靠性等与旋转电机相比还没有竞争力,因此很长时间内未得到实际应用。

20世纪60年代以来,随着电力电子技术、计算机控制技术的进步,采用交流调速技术、直线电机驱动的高速磁浮列车应运而生,列车不再通过黏着力牵引,而且爬坡能力更强。直线电机用于轮轨列车当然也具有

类似的优点。经过多年的不断完善,已经形成了较为成熟的直线电机轨道交通技术。目前,世界上采用直线电机轨道交通的城市和地区有日本的东京、大阪、神户、福冈、横滨和仙台,加拿大的温哥华、多伦多,马来西亚的吉隆坡,美国的底特律、纽约,韩国的龙仁以及中国的北京和广州。

## 1 日本直线电机地铁

日本是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—1984年为基础研究阶段;1985—1987年为使用开发阶段。1990年,日本第1条直线电机地铁大阪7号线投入运营,轨面到车厢地板高度为850 mm;1991年,第2条直线电机地铁东京12号线开通运营,这次地板高度稍作改进,距离轨面800 mm,但仍然比目标值700 mm差100 mm。

在早期应用中,地铁的运营方、建设方和JSA(日本地铁协会)等所有参与者认为:直线电机地铁实现了小断面隧道就是成功的,关于系统性能和舒适性的改善就不再认真考虑。2001年,日本神户第3次应用直线电机系统时,采用了大阪技术规范。事实上,多年来该规范被默认为业界标准,只是最近几年,才由福冈来主导寻求系统性能的改善,其成果被应用到仙台。表1是日本早期采用直线电机地铁系统的主要技术参数和实例。

## 2 日本直线电机地铁系统的优势

### 2.1 车辆断面小

由于直线电机车辆不需要一系列传动机构,设备少,轴重轻,所以可使用小直径车轮、较小的转向架构架,车辆地板高度比原来可低60 cm,在不损失车内空

收稿日期:2011-12-13 修回日期:2011-12-27

作者简介:曾根悟,男,日本东京大学荣誉教授,北京交通大学客座教授,长期从事直线电机地铁系统相关研究,sones0423@yahoo.co.jp

表1 日本直线电机地铁早期发展的主要技术参数和实例

项目	12 m 模型	16 m 模型	20 m 模型	大阪的 7 000 系	东京的 12 000 系	福岡的 3 000 系
车重/t	15.6	25.5	33.0	25.5	24.6	26.2
载客量/人	96~ 111	147~ 162	229~ 247	90~100	90~100	89~100
车长/m	12.6	16.5	20.0	15.6+	16.5	16.5+
车宽/mm	2 500	2 500	2 850	2 490	2 500	2 490
车高/mm	3 050	3 150	3 280	3 120	3 150	3 145
车厢地板 高度/mm	700	800	930	850	800	830
顶板高度/mm	2 050	2 100	2 100	2 115	2 100	2 090
车轮直径/mm	520	610	760	660	610	650
转向架轴距/mm	1 700	1 900	2 100	1 900	1 900	1 900
转向架定距/mm	8 600	11 000	13 800	10 500	11 000	11 000
直线电机/kW	65	120	150	100	120	150
最高车速 (km/h)	70	90	110	70	70	70
列车编组/辆	2~6	4~10	6~10	4	8	4
隧道直径/m	4.0	4.3	4.6	4.3	4.3	4.74

间的前提下,车辆缩小到传统地铁车辆的70%左右。由于车辆重心低,在小曲线或陡坡线路上高速运行时,平稳性好,左右摆动幅度小,大大提高了乘客的舒适度。

## 2.2 建设成本低

由于车辆断面小,隧道建筑限界也相应减小,能更好地利用日趋紧张的地下空间资源,城市中心区的地下管线纵横密布,小的隧道断面还可减少对地下管线的影响和破坏,降低工程施工难度。轴重轻使得高架桥和高架车站结构体量小。整个系统实现了小型化和轻量化,系统土建工程造价能降低20%~30%,线路交点处换乘方便,具有良好的经济技术特性和社会效益,在降低工程造价方面具有突出的优越性。

无论在隧道内还是高架结构上,直线电机地铁的小断面,尤其是隧道限界小,可能会优于连接多条大运量放射线的中等运量环线,这将有助于降低建设成本。

## 2.3 爬坡能力强(大坡度)

直线电机地铁利用设置在车辆上的直线电机定子与设置在轨道侧的感应板之间的磁力推进车辆,不依赖轮轨之间的黏着力;因此,线路的最大纵坡可达60‰~80‰,远大于传统轮轨系统的最大坡度,有利于线路纵断面设计。表现为过渡段短,车站埋深浅,节省

工程投资。

## 2.4 转弯半径小(小半径)

直线电机地铁采用径向转向架,一般线路的最小曲线半径能达到100 m,若采用更大踏面坡度和(或)独立回转轮,配备纵向不打滑车轮的转向架,则可通过最小半径为50 m的曲线。与普通地铁相比,线路途经的私有土地征收、障碍建筑的必要迁移量少。特别在山区城市,要求车辆必须具备较强的通过小曲线半径能力,以适应地形特点。采用直线电机地铁可最大限度地避开建筑物及基础、地下管线和其他地下构筑物,车辆段占地面积也小,适应山区城市已无大面积平地可供利用的现状。

## 2.5 振动噪声低

由于直线电机地铁没有齿轮传动机构的啮合振动和噪声,没有动力轮对与钢轨蠕滑滚动产生的振动和噪声,加上径向转向架良好的曲线通过性能,直线电机地铁车辆具有振动小、噪声低的优点,有利于环境保护;因此,其可以近距离通过建筑物,甚至直接穿过既有建筑物。

## 2.6 其他优势

直线电机地铁的非黏着驱动更适合列车自动运行(ATO)或列车自动停站控制(TASC)运行方式,不但能提高列车运行的正点率和定点停车水平,还可以实现列车的最佳节能运行;同时意味着列车在固定时间到达准确位置,不受天气状况的影响。

即使直线电机牵引系统的电机效率较差,依靠电制动到完全停止也很容易实现,这意味着加速和减速的非黏着牵引是可行的。

## 3 日本直线电机地铁系统的改进目标

为了更好地发展日本的直线电机地铁系统,依据成本更低、更人性化、环境更友好的原则,制定了以下的目标。

### 3.1 提高安全舒适性

即使隧道断面小,车体宽度和高度也可以合理地设计,以充分满足载客量和舒适性要求,利用低地板高度、小半径曲线和大坡度拉近换乘站站台与既有站台的距离,使换乘距离缩短。

牵引系统采用DC 1.5 kV的接触网供电而不是DC 750 V的三轨供电会更经济高效。出于安全的考虑,日本禁止采用DC 1.5 kV的三轨供电系统。

### 3.2 提高小半径曲线的通过速度

由于小半径曲线导致运营时间的增加,可以通过



采用较大坡度缩短线路长度来补偿。设置更为灵活的站台位置也可以缩短通道长度,从而缩短换乘时间,减少乘客的总旅行时间。转弯时,采用更大踏面坡度、改良的圆锥形踏面车轮和独立回转轮,配备纵向不打滑车轮的转向架,这样可以通过最小半径为 50 m 的曲线。如果采用超高更大和更长的缓和曲线,加上隧道内无横通风,车体重心低,则在给定曲线半径的轨道上,车辆可以实现更高的安全运行速度。笔者预计中国地铁能实现这一点,因为长缓和曲线在中国有长期的成功实践。

### 3.3 如何补偿牵引能耗的增加

与旋转电机相比,直线电机的效率较低是必然的,牵引能耗额外增加 30%。但其效率的进一步提高是可以预见的:过小半径曲线速度更快,车站能耗更小,总能耗与普通轮轨地铁相当甚至更小;修建埋深更浅、体量(高度小、长度短)更小的车站,出入口到站台的距离和换乘距离能缩短,相应减少照明、通风、空调、电动扶梯、直梯和自动人行道的能耗。但更小、更便捷的换乘车站在日本还没有实现,主要是因为管理障碍,比如东京 Metro's 线和东京市地铁线之间的换乘。

### 3.4 提高直线电机地铁效率

感应板,即短定子直线电机的转子,至少能从以下 3 个途径提高性能:1)缩短气隙;2)采用叠片式导磁铁芯;3)采用更好的次级感应板断面形式与材质,次级导体板间联系更好,使次级电流能流过感应板端部。

在得到更短气隙测试的实验数据时,最初被误导了。数据显示:缩短车站间运行时间和延长车站停站时间的能耗大概相同。数据应该被理解为:气隙缩短后,相同能耗、运行更快与相同车速、更少能耗两者间是可以选择的。

### 3.5 减少或避免钢轨波磨

直线电机地铁车轮仅仅起支撑和导向作用,除了紧急制动外很少使用轮对传递制动力,同时径向自导向转向架减小了轮轨间的打滑和接触力,加上轴重较轻,使得轮缘和轨道的磨耗大大减少;但直线电机地铁存在大量的小曲线半径,小曲线段的轮轨磨耗不可避免。

通过精细的钢轨润滑,采用昂贵的摩擦控制材料和(或)在钢轨出现波磨的早期阶段打磨频繁,是可以尽量保持静音运行的。加拿大直线电机地铁系统就较好地解决了钢轨波磨和小直径车轮通过道岔的问题。一些人(包括笔者)仍然坚信:如果采用非黏着牵引系统,则应审慎设计轮对和转向架,如采用纵向不打滑车轮和强迫导向转向架,就可以避免钢轨波磨。

## 4 直线电机地铁的适用条件

如果地铁系统的结构高度不必降低、不采用小半径曲线和大坡度,直线电机地铁可能还不如普通的旋转电机地铁。表 2 是直线电机地铁与普通轮轨地铁的技术指标对比。

表 2 普通轮轨系统与直线电机系统技术指标比较

比较指标	直线电机系统	普通轮轨系统
运输能力(高峰小时单向客流)/(人次/h)	小于 5 万	小于 8 万
牵引动力	直线电机	旋转电机
驱动形式	电磁力	轮轨黏着驱动
支承形式	钢轮支承(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)	钢轮支承
目前最高运营速度/km/h	70~100	70~120
运行性能	无黏着驱动,雨雪天性能较好	雨雪天较差
最大坡度/‰	60~80	30~50
最小曲线半径/m	80,车辆段可取 35	300,困难时 250
轨道	需对感应板进行设计,设计安装不复杂	常规设计
道岔	普通道岔,同普通轮轨,结构简单、造价低。感应板需在此处断开	常规设计
驱动能耗	较大	小
养护维修	没有旋转电机和传动机构,轮缘磨损减小,检修量小	维修量较大
环境影响	只有电机和轮轨噪声。噪声振动较小,距线路中心 15 m 处,100 km/h 时速噪声值为 65~73.5 dB,环境污染较小,景观效果好	有电机、传动机构噪声和轮轨噪声。噪声振动较大,环境污染较小,景观效果较差
安全救援	与普通轮轨相同,可在路侧设置紧急疏散通道,安全疏散有保障	可在路侧设置应急走行道,安全疏散有保障
车辆段	维修量小,小曲线半径使线路灵活,布局紧凑,占地较少	占地较多



直线电机具有造价低、振动小、噪声低、爬坡能力强、牵引能力优越、通过曲线半径小、污染小、安全性能好等诸多优点,但也存在电机效率较低、感应板养护维修要求较高等不足。总体来说,它非常适合大中城市中等运量交通发展的要求,值得在中国广泛推广采用。直线电机的普遍适用情况如下:

- 1) 综合造价比较低,可以在很多想要建设地铁而又资金不足的城市进行推广;
- 2) 中运量、小编组,适用于中等城市;
- 3) 良好的选线性能,非常适用于地形条件比较复杂的城市;
- 4) 可以穿越既有线路,避开城市建筑物,可作为线网中的支线或加密线;
- 5) 低噪声、低振动,可以修建在一些城市中心区,既疏散客流又作为城市景观线;
- 6) 在不良天气条件下可以安全行驶,适合在雨雪较多的城市修建高架轨道交通系统。

## 5 直线电机地铁在重庆的应用展望

通过对直线电机地铁的综合分析可以看出,综合考虑其建设成本、能耗和舒适性,直线电机地铁可能是解决城市交通系统的最好方式;爬坡能力强、通过曲线半径小的特点,使得直线电机地铁特别适用于地形较复杂或线网较为成熟的大城市。对于重庆这种地理条件特殊、地下空间受限、人口又比较密集的城市,尤其适合修建直线电机地铁。如果新建线与普通地铁线有多个换乘站,选择直线电机地铁可能是性价比最好的交通方式,因此亟需对直线电机地铁系统做进一步的可行性研究。

日本直线电机地铁也是近些年才日趋完善的,广州、北京的直线电机地铁存在的问题会得到妥善解决,真诚地希望重庆能够成为第1个直线电机地铁系统应用成功的城市。不久的将来,在北京、上海等大城市也会得到广泛的应用。

### 参考文献

- [1] 山中忠義,北岸彰,澤田久夫.大阪市地下鉄第7号线70系直线电机驱动车辆[J].车辆技术,1990(189):66-76.
- [2] 福田貴也,張仁浩.东京都营地下鉄12号线12-000形3次車[J].车辆技术,1997(213):26-46.
- [3] 蓮尾俊郎,平島稔,松岡洋一.福岡市高速鉄道3号线(七隈线)3000系电车[J].车辆技术,2005(229):41-55.
- [4] 杨中平.日本直线电机地铁的发展[J].都市轨道交通,2006,19(1):11-15.

- [5] 顾赞,杨中平.牵引直线器应电机推力优化控制的研究[J].铁道学报,2011,33(4):46-52.

(编辑:曹雪明)

## Development and Improvement of Linear Metro Systems in Japan and Expectation of Their Application to Chongqing City

Satoru Sone<sup>1,2</sup>

(1. Tokyo University, Tokyo; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract:** The author systematically introduces the development of linear metro systems in Japan. Linear metro systems have the advantages of small vehicle section, low construction cost, high climbing ability, small turning radius, low vibration and noise, etc. Goals to be continuously improved are pointed out in aspects of meeting the safety and comfort requirements, increasing the speed passing through small radius curves, enhancing the efficiency of systems and reducing or avoiding rail corrugation. The author summarizes the applicable conditions of linear metro systems and cherishes the expectation of its application to Chongqing in China.

**Key words:** metro in Japan; linear motor; applicable conditions; improvement goals; application foreground; Chongqing

## 北京出台地铁噪声与振动控制规范 4月起实施

北京在地铁噪声与振动污染控制方面的首个标准《地铁噪声与振动控制规范》日前获批并发布,将从2012年4月1日起实施。该标准也是我国在该领域中的首个地方标准,主要用于指导北京市地铁建设项目噪声与振动环境影响评价工作,具体措施的设计及既有线路的降噪隔振的治理也可参照执行。

该标准规定了地铁建设项目环境影响评价中,地铁列车运行引起的环境噪声与振动控制的原则与方法,首次提出了地铁噪声与振动控制应以保证地铁运营安全为首要前提,遵循优先距离(埋深)控制、稳定达标、经济安全的原则,优先选用产生噪声与振动小的车辆、桥梁、隧道及轨道结构等措施等基本要求。同时根据地铁地下段振动扰民的特点,特别提出了建设单位要按照振动超标量分级选用减振措施。该地方标准是为适应目前北京市大规模开展地铁建设的要求,应对可能出现的地铁噪声与振动污染而制定的,将会对北京市地铁新建项目环评和既有项目的建设验收提供依据。

摘编自 www.chinametro.net 2012-01-04