

# 都市圈快速轨道交通信号系统制式方案选择

李 晶<sup>1</sup> 王 鹏<sup>2</sup> 杨艳锋<sup>3</sup> 刘振宇<sup>1</sup> 侯佳丽<sup>4</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100045, 北京; 2. 河北雄安轨道快线有限责任公司, 071700, 雄安新区;

3. 上海铁路通信有限公司, 200071, 上海; 4. 石家庄市轨道交通集团有限责任公司, 050011,

石家庄//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 基于都市圈轨道交通快速化、通勤化、多元化的特点, 匹配能够满足高速度等级 (160 ~ 200 km/h) 及公交化运营的信号系统制式尤为关键。对巴黎、东京、纽约等 3 个典型都市圈的轨道交通信号系统建设模式进行了对比, 在此基础上分析了我国都市圈快速轨道交通线路的运营需求, 并从都市圈快速轨道交通运营需求的匹配度及系统功能适应性等角度对我国既有轨道交通信号制式的适应性进行了分析。研究结论如下: 都市圈快速轨道交通线路信号制式的选择应立足于本线的功能定位, 并应在本线与外部连接线的关系上给予更多的关注。

**关键词** 都市圈快速轨道交通; 信号制式; 适应性分析; 多制式兼容; 运营需求匹配

**中图分类号** U284

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.11.006

## Standard Schemes Selection of Rapid Rail Transit Signaling System in Metropolitan Area

LI Jing, WANG Peng, YANG Yanfeng, LIU Zhenyu, HOU Jiali

**Abstract** Based on the rapid, commuting and diversified characteristics of metropolitan rail transit, the selection of signaling system to match the high-speed (160 ~ 200 km/h) and public transportation operation is especially crucial. The construction modes of urban rail transit signaling system in Pairs, Tokyo and New York three typical metropolitan areas are compared. On this basis, the operational requirements of rapid rail transit in China's metropolitan areas are analyzed, the adaptability of existing rail transit signal systems in China is studied from the aspects of rapid rail transit operation demand matching and system function adaptability. It is concluded that the selection of rapid rail transit signal system in metropolitan areas should be based on the functionality positioning of the original line, and more attention should be paid to the relationship between this line and external connecting lines.

**Key words** rapid rail transit in metropolitan area; signal sys-

tem; adaptability analysis; multi system compatibility; operation demand matching

**First-author's address** Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100045, Beijing, China

中共中央在《关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中提出, 要加快城市群和都市圈的轨道交通网络化。2019 年 2 月, 国家发展和改革委员会在《关于培育发展现代化都市圈的指导意见》中明确指出: 要打造“轨道上的都市圈”, 统筹考虑都市圈轨道交通网络布局, 构建以轨道交通为骨干的通勤圈。2019 年 9 月, 中共中央国务院印发的《交通强国建设纲要》提出: 要依托京津冀、长三角、粤港澳大湾区等世界级城市群, 提高换乘换装水平, 完善集疏运体系。在这些国家政策的导向作用下, 都市圈轨道交通迎来了前所未有的大发展。为构筑多层次、一体化的综合交通枢纽, 推动轨道交通“四网”融合, 适应都市圈快速轨道交通高速度、高密度、高自动化水平的要求, 信号专业需要深耕制式选型和系统融合问题。

## 1 国外典型都市圈概况及轨道交通信号制式选择

纵观国外典型都市圈可知, 这些都市圈都是根据各自圈层内的城市规划、地理条件、人口分布等情况充分布局各层级的轨道交通线路, 这些轨道交通线路在都市圈的公共交通体系中发挥着重要作用。信号制式决定了轨道交通线路的运输组织能力、发车间隔和服务便捷性, 以及线路间是否可互联互通, 并对轨道交通线路相关技术标准的选择有着深刻的影响<sup>[1]</sup>。

1.1 巴黎都市圈

如表 1 所示,巴黎都市圈内轨道交通包括地铁、RER (Réseau express régional, 区域快速网络) 和 Transilien(法兰西岛区域铁路)。其中,RER 包括 5

条主线、22 条支线,由地下穿城而过,经由市区连接郊区,并在主要站点与地铁线换乘。RER 未覆盖的都市圈外围区域,其公共交通功能由 Transilien 承担。

表 1 巴黎都市圈轨道交通概况  
Tab.1 Overview of rail transit in Paris metropolitan area

类型	名称	线路数/条	速度等级/(km/h)	线网长度/km	信号系统	运营单位
市郊线	RER	5	120 ~ 140	616.4	SACEM/NExTEO	RATP/SNCF
	Transilien	8	160 ~ 300	1 098.0	ETCS	SNCF
地铁线		16	80	215.0	1 号线、14 号线为 CBTC,其余线路为固定闭塞	RATP

注:RATP——巴黎运输公司;SNCF——法国国家铁路公司;CBTC——基于通信的列车控制;SACEM、NExTEO 为 RER 信号系统的型号;ETCS——欧洲列车控制系统。

巴黎都市圈轨道交通采用“贯穿式 + 放射式”的线网结构,因此在线路交叉区域存在客流量大、运能要求高的特点。另外,在市区存在多处共线运营区段,在郊区存在客货混运区段。基于以上特点,巴黎都市圈轨道交通线路的信号系统存在着多种制式并存的情况:地铁线路集中在城市中心,大多采用 CBTC 系统;远郊区快线和需跨越城市的 Transilien 采用国家铁路标准的 ETCS;连接城市和近郊的 RER 多采用兼容的信号系统(如 SACEM 系统<sup>[2]</sup>等)。兼容的信号系统具有双模制式,能够同

时实现与 CBTC 系统和 ETCS 的跨线运营,在提高列车运行速度和运营效率的同时,也确保了中心城市轨道交通线与干线铁路之间的连接关系,使 RER 成为都市圈层中重要的交通纽带。

1.2 东京都市圈

东京都市圈一般定义为以东京站为中心、半径 70 km 范围内的区域<sup>[3]</sup>,圈内各圈层间的交通联系紧密。如表 2 所示,东京都市圈轨道交通主要包括地铁线和市域铁路,市域铁路又可分为 JR(日本铁路,Japanese Railway)和私营铁路。

表 2 东京都市圈轨道交通概况  
Tab.2 Overview of rail transit in Tokyo metropolitan area

类型	名称	线路数/条	线网长度/km	覆盖范围	运营单位
市域铁路	JR	31	1 491.0	东京都	JR 东日本旅客铁道公司
	私营铁路	66	1 213.0	东京近郊	私营轨道企业
地铁线	东京市内地铁	13	304.0	东京市中心 23 区	东京地铁股份有限公司、都营地下铁(由东京都交通局管辖)
	横滨市内地铁	2	53.4	横滨市	横滨市交通局

东京都市圈轨道交通采用“环形 + 放射式”结构,各层级间的轨道交通有机衔接,并根据实际需要设置车站,确定列车运行速度等级<sup>[4]</sup>。日本轨道交通信号系统的各类控制系统被分为 4 个标准(0 级至 4 级),并根据不同的闭塞制式加以区分。不同标准的信号系统根据线路的实际需求被安装在合适的线路上<sup>[5]</sup>。正因为整个东京都市圈轨道交通的信号系统是一脉相承且不断升级的,因此各标准级别之间能够较好地兼容,这为线路间的直通运营带来了天然的优势,也使得东京都市圈轨道交通的运营组织模式一直被业内人士推崇。

1.3 纽约都市圈

纽约都市圈由 5 个城市组成,其轨道交通包含

地铁线(含 4 条捷运线)和市郊线,如表 3 所示。纽约地铁线路多、平均站间距小<sup>[6]</sup>,其年客运量高达 15 亿人次,日运营时间最高达到了 24 h。为了适应高强度的运输需求,自 1997 年起纽约地铁线路的信号系统陆续进行了 CBTC 升级改造。市郊线主要包括长岛铁路、大都会北方铁路和新泽西铁路,其中,长岛铁路是美国最忙碌的通勤铁路线,采用 CBTC 系统;其余 2 条市郊线采用美国国家铁路标准的 PTC(精确列车控制)系统。

纽约都市圈轨道交通采用“主线 + 支线”结构,呈典型的“树枝状”,市郊线与地铁线均为独立通道,不存在不同层次间轨道交通线路共用通道或共线的情况,各线均独立运行<sup>[7]</sup>。所以,纽约都市圈

表 3 纽约都市圈轨道交通发展概况

Tab.3 Overview of rail transit development in New York metropolitan area

类型	名称	线路数/条	线网长度/km	速度等级/(km/h)	覆盖范围	运营单位
市郊线	长岛铁路	11	1 100	80 ~ 160	纽约市区与长岛地区	MAT
	大都会北方铁路	5	1 247	80 ~ 160	纽约市区与康涅狄格州	MAT
	新泽西铁路	11	850	80 ~ 160	纽约的曼哈顿区、泽西市及霍博肯市	新泽西运输公司
地铁线		26	394	80	纽约的曼哈顿、布朗克斯、布鲁克林、皇后区	MAT

注:MAT——纽约大都会运输署。

轨道交通信号系统的制式选择只需与线路的运能需求和列车运行速度匹配即可。

1.4 3 个都市圈轨道交通信号系统建设模式分析

通过对上述 3 个国外典型都市圈轨道交通的分析可发现,其共同的特点为轨道交通线路的信号系统制式均是基于线网布局和列车运行需求来匹配,主要表现为:①将城市中心通道留给地铁,选择 CBTC 系统来保证地铁线路的行车间隔,满足地铁公交化的运营需求,其典型案例是纽约地铁;②在连接近郊与城市中心的中间圈层,为实现列车速度等级的提升及与地铁线间的跨线运行,该区域内轨道交通线路应能提供适应互联互通需求的信号系统或能满足跨线运行需求的可兼容的信号系统,其典型案例是巴黎 RER;③在远郊与近郊的边缘通道,考虑较高的通达时间要求和与铁路线间相互衔接的需求,3 个都市圈轨道交通的信号系统都选择了按照各自的国家铁路标准进行建设。

2 我国都市圈快速轨道交通线路运营需求分析

分析都市圈快速轨道交通线路的运营需求,是信号系统制式选型的基础。我国都市圈快速轨道交通线路主要有 4 个方面的运营需求。

1) 高速度、通勤化。根据都市圈的辐射范围,为满足“一小时交通圈”的通勤要求,都市圈快速轨道交通线路的旅行速度必须在 80 km/h 左右,因此可推算得到线路的最高运行速度为 160 ~ 200 km/h,这必然要求线路具有站间距大的特点。同时,为满足乘客快上快下的通勤需求,还需具备站台候车的条件。

2) 高密度、公交化。由于客流的不平衡特征,都市圈快速轨道交通线路应具有灵活的运营组织方式。乘客出行时大多关注候车时间、乘坐时间、换乘时间及列车发车间隔等服务要素,因此,都市圈快速轨道交通线路的信号系统需要满足最小行

车间隔 2.5 min 的要求,部分线路甚至需要更短的行车间隔。

3) 高自动化等级。为更好地实现公交化运营,都市圈快速轨道交通线路的信号系统还需具备较高的自动化等级,以尽量减少人为误操作,提升系统的可靠性和可用性。

4) 网络化、智能化。都市圈轨道交通往往不是单一的、独立的,城市人口逐渐向郊区转移的过程中具有从点状分布向区块分布聚拢的特点,分批建设、成网规划是都市圈轨道交通整体的建设趋势。这些同类型线路的构建,存在联通联运的可能。因此,网络化调度指挥、列车运行的自动调整、列车的灵活编组和解编、不同速度等级列车的混跑、列车自动折返、智能运维等功能将被越来越多地应用到有实际需求的轨道交通线路中。

3 我国既有轨道交通信号制式的适应性分析

3.1 国家铁路的信号系统制式

适用于 160 ~ 200 km/h 速度等级的国家铁路列车控制(以下简称“列控”)系统主要是 CTCS-2(中国列车运行控制系统 2 级)。根据铁总科技[2013]79 号《城际铁路 CTCS-2 + ATO 列控系统暂行总体技术方案》的要求(ATO 为列车自动运行),目前已建成的城际铁路均采用 CTCS-2 + ATO 系统。CTCS-2 + ATO 是 CTCS-2 体系的扩充,即在 CTCS-2 级的 ATP(列车自动防护)功能基础上增加了 ATO 功能。CTCS-2 + ATO 系统采用 GSM-R(铁路数字移动通信系统)技术,通过网络交换数据业务来实现车地双向通信,其实质属于固定闭塞范畴。

3.2 城市轨道交通的信号系统制式

目前城市轨道交通信号系统应用最广的是 CBTC 系统。CBTC 系统采用车地双向通信,将前方列车的移动定位信息经由车地通信环节传送给后续列车,将移动的前车尾部轮廓线作为速度-距离

控制的追踪目标点。当列车的运行速度超过允许的速度控制曲线时,CBTC 系统将对列车实施安全制动,同时随着前方列车的行进,列车控制信息可连续地或周期性做出响应。CBTC 系统实质上属于移动闭塞范畴。

3.3 信号制式的适应性对比

本文从列车最小追踪间隔、控制方式、应用情况等 9 个方面对比分析了 CBTC 和 CTCS-2 + ATO 两种信号制式在都市圈快速轨道交通中的适应性,如表 4 所示。

表 4 城市轨道交通信号 CBTC 系统和国家铁路列控系统的适应性对比

Tab.4 Adaptability comparison between urban rail transit signaling CBTC system and national railway train control system		
项目	城市轨道交通信号制式(CBTC)	国家铁路信号制式(CTCS-2 + ATO)
列车最小追踪间隔	2.5 min	3.0 ~4.0 min
控制方式	移动闭塞	固定闭塞
应用情况	160 km/h 速度等级线路已有应用案例,但 160 ~200 km/h 速度等级尚无应用业绩	城际铁路中已多次应用
通信技术	采用 LTE(长期演进),需向地方无线电部门申请专用频段	采用 GSM-R,需向铁路部门申请专用频段
交流供电的适应性	良好	良好
需求适应性	功能完全满足,应根据需要增加列车自动过分相功能	具备 ATO 功能,不具备全自动运行功能;运行调整能力较弱
互联互通	可实现与其他 CBTC 线路的互联互通	可实现与其他 CTCS 线路的互联互通
工程造价	较高	较低
运维工作量	较少	较大

1) 从功能需求上分析,CBTC 具有完善的系统功能,能够支持公交化运营和全自动运行;CTCS-2 + ATO 不具备自动折返功能,其 CTC(调度集中)系统不具备列车扣车、跳停、目的地码触发等功能,无法实现全自动运行。

2) 从运营需求上分析,CTCS-2 + ATO 理论的列车最小追踪间隔为 3.0 min,而在实际线路应用时列车最小追踪间隔一般在 4.0 min 以上,且进一步压缩列车运行间隔比较困难;CBTC 的列车最小追踪间隔为 2.5 min,能够满足高密度的需求。

3) 从应用情况上分析,CTCS-2 + ATO 和 CBTC 均能适应 160 ~200 km/h 的最高设计速度,但 CBTC 目前的应用案例(北京地铁大兴机场线、广州地铁 18 号线等)中最高速度等级为 160 km/h,160 ~200 km/h 速度等级尚无应用业绩。

4) 从运营维护上分析,采用 CTCS-2 + ATO 系统时轨道电路的维护工作量较大;采用 CBTC 系统时线路区间的设备数量较少,维护工作量较少。

5) 从互联互通层面上分析,CTCS-2 + ATO 和 CBTC 都只能与自身相同制式的线路互联互通。

4 结语

目前,我国已经确立了 19 个城市群,这些城市

群的中心城市内部已经具备了较为完善的城市轨道交通线网建设体系,但在中心城市外围的快速轨道交通领域采用哪种轨道交通及其信号制式,目前仍存在着不同的意见。本文在对国外 3 个典型都市圈轨道交通信号系统建设情况调研的基础上,结合我国都市圈轨道交通的运营需求,认为在选择都市圈快速轨道交通线路信号制式时,应遵循以下原则:①独立运行的都市圈快速轨道交通线路,其信号系统宜采用 CBTC 制式;②与城市轨道交通跨线运行的都市圈快速轨道交通线路,其信号系统应采用 CBTC 制式;③与干线铁路、城际铁路跨线运行的都市圈快速轨道交通线路,其信号系统宜采用 CTCS 制式或多制式兼容方式,配置或者局部配置多制式兼容设备;④与干线铁路、城际铁路和城市轨道交通均有跨线运行需求的都市圈快速轨道交通线路,其信号系统宜采用多制式兼容方式,配置或局部配置多制式的兼容设备。

综上,都市圈快速轨道交通信号制式的选择应从线路定位、运营需求、服务标准等角度予以综合考虑,尤其是要更多地关注本线与外部连接线间的关系。此外,都市圈快速轨道交通信号系统应融合铁路的高速度、城市轨道交通的高密度等技术优

(下转第 31 页)