

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.05.017

INNOVIA 300 跨座式单轨系统在 芜湖单轨交通的折返性能分析

李辉光

(中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 安徽芜湖 241000)

摘要: 介绍 INNOVIA 300 跨座式单轨系统车辆、道岔和信号的主要特点和性能参数。针对芜湖单轨交通 2 号线万春湖路站至梦溪路站区段线路, 建立多质点列车模型进行列车牵引仿真计算。在列车牵引仿真计算的基础上, 根据站前、站后折返的作业流程进行基于通信的列车控制(communication based train control, CBTC)下的折返运行分析。结果表明, 采用 R100 m 渡线和 R69 m 渡线的站前折返发车间隔分别为 128.7 s 和 132.6 s, 站后折返发车间隔分别为 80.4 s 和 83.5 s; 停车时间直接影响发车间隔, 当停车时间不超过 65 s 时, 站后折返时间均满足远期 2 min 的发车间隔要求。利用 INNOVIA 300 跨座式单轨系统良好的折返性能可以有效提高系统运能, 缩短乘客等待时间, 并为线路的运营组织和优化奠定基础。

关键词: 跨座式单轨; 折返时间; 牵引计算; 基于通信的列车控制(CBTC)

中图分类号: U232

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)05-0101-05

Turn-back Performance Analysis of INNOVIA 300 on Wuhu

LI Huiguang

(CRRC Puzhen Bombardier Transportation System Ltd., Wuhu 241000)

Abstract: This study introduces the main characteristics and performance parameters of the vehicle, switch, and signaling of the INNOVIA 300 straddle monorail system. A train traction simulation calculation is carried out for the section between Wanchunhu Road and Mengxi Road Stations of the Wuhu Monorail Transit Line 2, by using multiple mass points train model. A turn-back analysis under communication based train control (CBTC) system operation is carried out based on the train traction simulation calculation, according to the operating process of station-front and station-rear turn-back. The results show that the station-front turn-back headway is 128.7 s and 132.6 s, and the station-rear turn-back headway is 80.4 s and 83.5 s for R100m and R69m crossovers, respectively. Stop time directly affects the departure headway. When the stop time is less than 65 s, the station-rear turn-back time for both the R100m and R69m crossover can fully meet the departure headway requirement of 2 min in the future. Using the good turn-back performance of the INNOVIA 300 straddle monorail system can effectively improve system operation capacity, shorten passenger waiting time, and lay the foundation for further operation organization and optimization.

Keywords: straddle monorail; turn-back time; traction calculation; communication based train control (CBTC)

跨座式单轨作为典型的中运量交通系统, 具有线路适应性强、噪声低、景观效果好、建设周期短、建设成本低等特点, 在全球得到广泛应用^[1-2]。在中国,

除已投入运营的重庆单轨外, 还有多个城市在规划建设单轨, 选用 INNOVIA 300 跨座式单轨系统的芜湖单轨正在建设中。

列车折返能力是保证系统运输及发车密度的重要指标, 也是线网规划和运营组织的重要考虑因素, GB 50458—2008《跨座式单轨交通设计规范》要求跨座式单轨列车的折返能力不小于 24 对/h。列车折返能力与

收稿日期: 2019-05-05 修回日期: 2019-09-23

作者简介: 李辉光, 男, 博士, 主要从事胶轮轨道交通系统集成和动力学分析的研究, lhg0506@163.com

列车性能、列车长度、停站时间、过岔速度、道岔动作时间、信号处理时间和联锁等密切相关，一直是研究的热点。文献[3-5]分别对轨道交通双股道站后折返和多股道站前折返的折返能力进行了分析。文献[6-7]研究表明，采用多质点列车模型能够更加精确地进行列车牵引计算和建立列车安全制动模型。文献[8]、[9]分别对单轨车辆的运行阻力和列车牵引计算进行了研究，可以作为单轨列车折返性能分析的基础。

基于 INNOVIA 300 跨座式单轨系统车辆、道岔和信号的特点，对芜湖单轨交通 2 号线线路端部万春湖路站的折返设计进行分析，采用多质点列车模型，在牵引仿真计算的基础上进行了 CBTC 系统下列车的站前和站后折返能力计算，显示其具有良好的折返能力。

1 车辆

INNOVIA 300 跨座式单轨系统(以下简称 INNOVIA 300 系统)列车为全自动无人驾驶列车，车辆采用单轴转向架，采用永磁电机驱动、液体冷却。车辆质量轻，噪声小，地板面距离走行面高度低，便于紧急疏散。车辆主要技术参数如表 1 所示。

表 1 车辆主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of vehicle

参数名称	参数值
车辆长度(车钩连挂面)/mm	头车 13 032 中间车 11 845
车辆宽度/mm	3 142
车辆高度/mm	4 053
地板面距走行面高度/mm	450
空车质量/t	约 14.5
轴重/t	14
最高运行速度/(km/h)	80
启动加速度/(m/s ²)	1.1
常用制动减速度/(m/s ²)	1.2
出站启动加速度/(m/s ²)	1.0
进站制动减速度/(m/s ²)	1.0
紧急制动减速度/(m/s ²)	1.5
冲击率极限/(m/s ²)	0.75
轨道梁宽度/mm	690

INNOVIA 300 系统单轨车辆为全动车，每辆车两个牵引电机，每个电机的牵引制动力特性曲线如图 1 所示。不同速度下的牵引和制动力可以根据特性曲线，利用线性插值法求得。

$$F_{tx} = F_{t1} + \frac{(v_x - v_1)(F_{t2} - F_{t1})}{v_2 - v_1} \quad (1)$$

式中： F_{tx} 为所求点 A 处电机的牵引力； v_x 为所求点 A 处的速度。

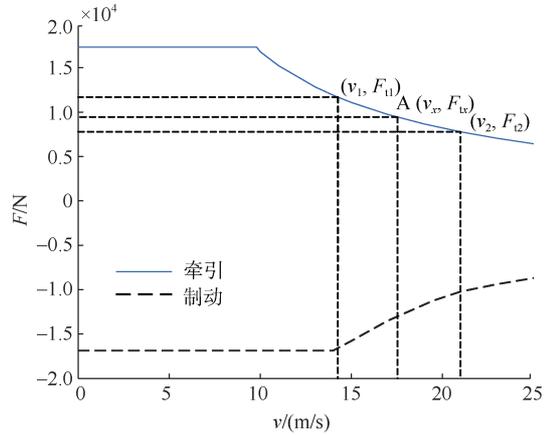


图 1 电机的牵引/制动特性曲线

Fig. 1 Traction/braking characteristic curve of motor

2 道岔

INNOVIA 300 系统有枢轴型和换梁型两类道岔，均由可转动的钢制梁构成，其基本特点是通过道岔控制柜及单个驱动电机控制整根道岔梁的转动和锁定，利用梁简单的动作实现不同线路的连接。用于正线折返的渡线由两组换梁型道岔组成，有 R69 m 带缓和曲线渡线及 R100 m 不带缓和曲线渡线两种。带缓和曲线渡线具有较好的乘坐舒适性，可以用于正线任何渡线特别是载客通过的渡线；不带缓和曲线渡线一般用于站后折返或故障条件下偶尔载客通过的渡线。渡线的结构形式和主要参数分别如图 2、图 3 和表 2 所示。



图 2 单轨渡线结构

Fig. 2 Crossover structure of monorail

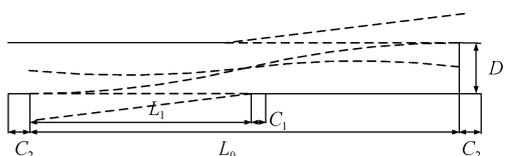


图 3 单轨渡线参数

Fig. 3 Crossover parameter diagram of monorail

表 2 渡线主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of crossover

参数名称及单位	R69 m	R100 m
L_1/mm	24 990	23 600
L_0/mm	48 760	45 782
C_1/mm	1 550	1 550
C_2/mm	2 300	2 300
D/mm	5 600	5 300
道岔区进路办理时间/s	16	16
允许列车侧向通过的最高速度(载客)/(km/h)	21	25
允许列车侧向通过的最高速度(不载客)/(km/h)	26.5	32
允许列车正向通过的最高速度/(km/h)	77	77

注：道岔区进路办理时间包含道岔动作时间和指令信息传送时间；列车速度为ATO控制下的行车速度。

3 信号

INNOVIA 300 系统和 APM300 等中小运量轨道交通系统信号的标配为采用基于通信的列车控制系统(CBTC)CityFlo650 核心版,采用移动闭塞方式控制列车实现全自动无人驾驶,该信号系统主要包括中央控制系统(ATS)、轨旁设备 RATC(RATP、RATO、目标控制器 OCS 等)和车载设备 VATC(VATP、VATO 等),无单独的联锁设备,联锁功能由 RATP 设备实现。列车进路控制不以联锁表为依据,而是由 RATP 检查进路条件,并生成移动授权,道岔的控制也通过 RATP 实现与道岔控制柜接口。该信号系统在巴西圣保罗单轨和上海浦江线等多个项目得到了充分的验证。

系统设置后面列车的追踪目标点为前行列车的尾部,追踪目标随着前行列车的运行而移动,大大缩短了追踪间隔时间。图 4 列出了采用的 CBTC 系统的安全制动计算模型。

安全制动距离为列车常用制动距离和列车在最恶劣情况下制动距离的较大值。常用制动距离根据列车当前运行速度和常用制动率计算。最恶劣情况下制动距离根据列车当前运行速度、线路条件、ATP 系统测速误差、牵引切除时间、紧急制动建立时间、紧急制动率等条件计算。计算模型中 CBTC 系统速度误差取 3 km/h。

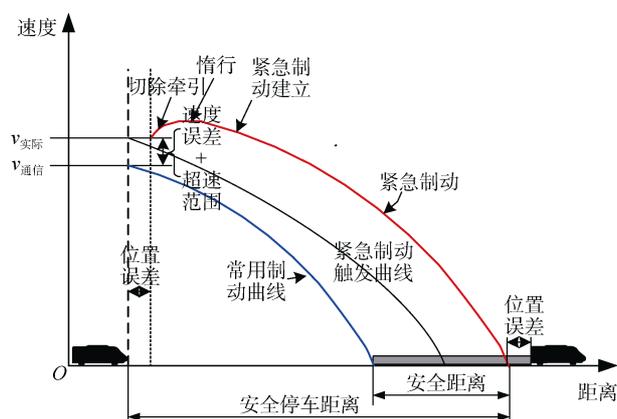


图 4 安全制动计算模型

Fig. 4 Calculation model of safety brake

4 折返性能分析

4.1 折返线路

万春湖路站为芜湖单轨交通 2 号线的终点站,根据线路设计方案设有站前和站后折返渡线,正常运营情况下采用站后折返,站前折返用于降级运营。折返能力与列车性能、道岔设置、线路条件、停站时间、信号控制方式等多种因素密切相关。现针对万春湖路至梦溪路相邻两站间区段线路进行分析,考虑远期列车采用 6 节编组设计,万春湖路站台长度为 82 m,渡线端部距离站台 12 m,计算选用 R100 m 不带缓和曲线的渡线和 R69 m 带缓和曲线的渡线。计算时取站前折返站台停车 60 s,站后折返站台停车 35 s,站后折返时渡线端部距离站后折返虚拟站台 5 m,考虑道岔区进路办理时间为 16 s,设置虚拟站台停车 17 s。

折返运行线路如图 5 所示,图中 C 和 F 分别为追踪目标点进入站前道岔联锁区和 S 站台防护区时列车的位置。在站后折返性能计算时,设置站前渡线在进出站方向处于正向开通状态,站前折返时才对其发出动作控制指令。

4.2 折返性能计算

采用多质点列车模型,在列车牵引仿真计算的基础上,进行基于 CBTC 的线路运行仿真计算^[10-11],分析采用 R69 m 和 R100 m 渡线时的站后和站前折返能力。

站后折返发车能力由接车作业时间、折返作业时间和发车作业时间的较大值决定。万春湖路车站后折返接车作业时间、折返作业时间和发车作业时间的组成分别如表 3~表 5 所示,发车能力示意如图 6 所示。

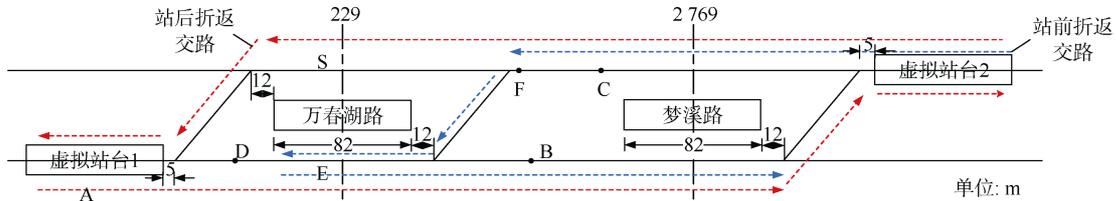


图 5 折返运行线路

Fig. 5 Route diagram of turn-back operation

表 3 接车作业时间组成

Tab. 3 Time composition of vehicle arrival s

作业项目	R69 m	R100 m
列车从 F 到 S	25.3	25.3
在 S 站台停车	35	35
同时办理进路	16	16
列车离开 S 并清空站台	19	19
总接车时间	79.3	79.3

表 4 站后折返作业时间组成

Tab. 4 Time composition of station-rear turn-back s

作业项目	R69 m	R100 m
列车从 S 到 A	31.5	28.4
在 A 站台停车	17	17
同时办理进路	16	16
列车离开 A 并清空连锁 D	19	19
办理进路	16	16
总折返时间	83.5	80.4

表 5 发车作业时间组成

Tab. 5 Time composition of vehicle departure s

作业项目	R69 m	R100 m
列车从 A 到 E	26.3	25.4
在 E 站台停车	35	35
同时办理进路	16	16
列车离开 E 并清空站台	15.5	15.5
总发车时间	76.8	75.9

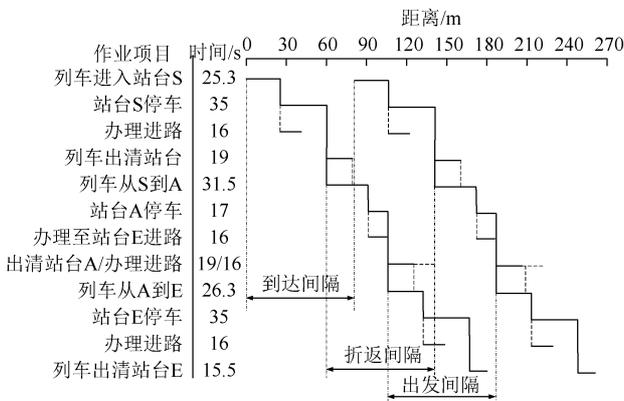


图 6 站后折返发车示意

Fig. 6 Departure diagram of station-rear turn-back

仿真结果表明，追踪目标点 F 进入站台 S 防护区时，列车距离站台进站防护区右侧 299.7 m，此时列车速度为 76.8 km/h，紧急制动距离为 176.2 m，采用 R100 m 渡线和 R69 m 渡线的接车作业时间均为 79.3 s，折返作业时间分别为 80.4 s 和 83.5 s，发车作业时间分别为 75.9 s 和 76.8 s，发车能力由折返作业时间决定。采用 R100 m 渡线折返作业时间减小 3.1 s，但两种渡线的折返作业时间均小于 90 s，完全满足远期每小时发车 30 对的要求。

当停站时间增至 40 s 时，接车作业时间变为 84.3 s，发车能力将由接车作业时间决定。为满足远期 2 min 的发车间隔要求，并考虑约 10% 的调节余量，允许的站后折返最大停站时间为 65 s。

根据列车牵引仿真计算，采用 R69 m 道岔进行两站间站后折返交路运行的时间为 672.8 s。图 7 显示了 7 列车以 96 s 发车间隔从站台 A 逐一发车，上线运行 1 h 的时间内列车在站台 S 的停站时间示意图。仿真结果表明，由于 96 s 大于所需要的最小发车间隔，在计算过程中列车能够等间隔正常运行，未发生列车间的相互干涉影响，进一步证明发车间隔满足远期每小时发车 30 对的要求。

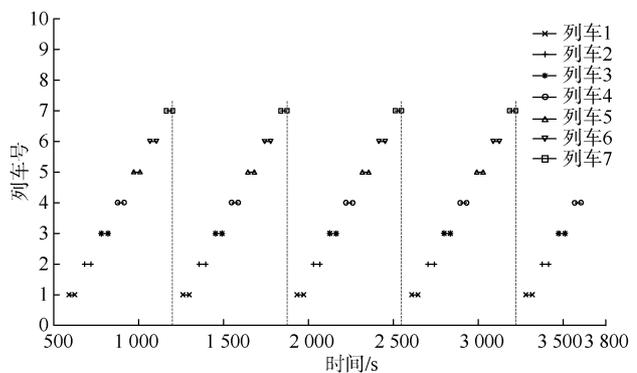


图 7 列车在站台 S 停站时间示意图

Fig. 7 Dwell time diagram of train stopping at station S

站前折返发车间隔一般由站前折返作业时间决定。站前折返作业时间组成如表 6 所示。仿真结果表明，

追踪目标点 C 进入站前折返道岔联锁区时, 列车距离道岔联锁区右侧 299.5 m, 此时列车速度为 76.7 km/h, 紧急制动距离为 176.1 m, 采用 R100 m 渡线和 R69 m 渡线的折返作业时间分别为 128.7 s 和 132.6 s, 采用 R100 m 渡线折返作业时间减小 3.9 s, 但两种道岔设置的折返时间均小于 138.5 s, 满足每小时发车 26 对的要求。

表 6 站前折返作业时间组成

Tab. 6 Time composition of station-front turn-back

作业项目	R69 m	R100 m
列车从 C 到 E	38.6	34.7
在 E 站台停车	60	60
-同时办理进路	16	16
列车离开 E 并清空连锁 B	18	18
办理进路	16	16
总折返时间/s	132.6	128.7

5 结论

介绍 INNOVIA 300 跨座式单轨系统车辆、道岔和信号的主要特点和性能参数。针对芜湖单轨交通 2 号线万春湖路站至梦溪路车站区段线路, 在列车牵引仿真计算的基础上, 进行了基于 CBTC 的线路运行仿真计算。结果表明, 采用 R100 m 渡线和 R69 m 渡线的站前折返作业时间分别为 128.7 s 和 132.6 s, 站后折返作业时间分别为 80.4 s 和 83.5 s。万春湖路站的站后折返发车间隔由折返作业时间决定, 均小于 90 s, 完全满足远期 2 min 的发车间隔要求。当站后折返停站时间增至 40 s 时, 发车能力将由接车作业时间决定。为满足 2 min 的发车间隔要求, 并考虑约 10% 的调节余量, 允许的站后折返最大停站时间为 65 s。

利用 INNOVIA 300 跨座式单轨良好的折返能力, 可以通过小编组、高密度开行列车提高运能, 缩短乘客的等待时间, 缩小车站规模和降低土建成本; 或者在同等运力情况下, 加速车辆的周转, 提高列车使用效率, 减少列车配置数量。

参考文献

[1] 武农, 雷慧峰, 郭锴. 跨座式单轨作为中等规模城市轨道交通模式的适应性分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(7): 623-628.
WU Nong, LEI Hui Feng, GUO Kai. Analysis on adaptability of straddle monorail system to medium scale cities in China[J]. Tunnel construction, 2015, 35(7): 623-628.

[2] 韩宝明, 金天凤, 方恒堃, 等. 中国城市轨道交通系统多制式发展综述[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(1): 45-50.
HAN Baoming, JIN Tianfeng, FANG Hengkun, et al. Review of the multi-standard development of urban rail

transit in China[J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(1): 45-50.

[3] 张增勇, 毛保华, 蒋玉琨, 等. 基于牵引计算的城市轨道交通站后折返站能力计算方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(2): 450-455.
ZHANG Zengyong, MAO Baohua, JIANG Yukun, et al. Calculation method for station-end turn-back capacity of urban rail transit based on train traction[J]. System engineering- theory & practice, 2013, 33(2): 450-455.

[4] 陈焱, 毛保华, 李明高, 等. 基于安全区段的站后双折返线折返能力分析[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(5): 55-59.
CHEN Yao, MAO Baohua, LI Minggao, et al. Capacity analysis of station-behind double turn-back line with overlap[J]. Urban rapid rail transit, 2014, 27(5): 55-59.

[5] 江志彬, 饶娅. 多股道城市轨道交通车站站前折返能力分析[J]. 同济大学学报, 2017, 45(9): 1328-1335.
JIANG Zhibin, RAO Ya. Turnback capacity assessment at rail transit stub-end terminal with multi-tracks[J]. Journal of Tongji University, 2017, 45(9): 1328-1335.

[6] 孟建军, 陈晓强, 胥如迅, 等. 基于多质点的城轨列车牵引计算分析与仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(3): 603-608.
MENG Jianjun, CHEN Xiaoqiang, XU Ruxun, et al. Traction calculation analysis and simulation of urban rail train on multi-particle model[J]. Journal of system simulation, 2015, 27(3): 603-608.

[7] 吴赞, 汪领领. 基于车长的 CBTC 车载 ATP 安全制动曲线模型的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(4): 47-50.
WU Yun, WANG Lingling. Safe braking curve model of on-board ATP in CBTC system based on train length[J]. Urban mass transit, 2015, 18(4): 47-50.

[8] 杜子学, 张俊峰. 单轨车辆运行阻力计算方法[J]. 铁道车辆, 2009, 47(8): 7-10.
DU Zixue, ZHANG Junfeng. Calculation method for resistance in operation of monorail vehicle[J]. Rolling stock, 2009, 47(8): 7-10.

[9] 张俊峰, 邓磷, 杜子学. 单轨车辆牵引计算方法与仿真电算[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(8): 36-41.
ZHANG Junfeng, DENG Lin, DU Zixue. Traction calculation of the straddle-type monorail car and electronic simulation calculation[J]. Urban mass transit, 2011, 14(8): 36-41.

[10] 康随武. CBTC 列车追踪间隔的研究与优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
KANG Suiwu. Research and optimization of train headway in CBTC system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.

[11] 胡海虹, 苏思琦. 城市轨道交通折返站折返能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(2): 30-34.
HU Haihong, SU Siqi. Analysis of the turn-back capacity at urban rail transit turn-back station[J]. Urban mass transit, 2015, 18(2): 30-34.

(编辑: 郝京红)