

城轨信号系统混合编组技术应用研究

张天赋

中国铁路设计集团有限公司, 中国·天津 300308

摘要: 深圳地铁 8 号线与既有 2 号线贯通运营。8 号线工程自开通以来, 客流一直无较大增长, 受疫情影响一度出现客流下降情况。当前运营面临多种问题, 如线路较长导致单程运行时间长, 司机工作强度大, 首末班车运行时间长, 天窗时间短, 运能浪费严重, 运营效益差等问题。结合 8 号线延伸线工程设计方案, 对混合编组技术在既有线和延伸线工程的信号系统进行应用研究, 主要包含轨旁设备的布置以及控制电路的设计, 并对研究成果进行仿真验证, 结果显示混合编组技术的应用满足 8 号线及延伸线的运输需求, 同时降低运营成本, 提升系统的智能化服务水平, 实现运能和客流的精确匹配。

关键词: 地铁; 混合编组; 信号系统; 智能化

Research on the Application of Mixed Grouping Technology in Urban Rail Signal System

Tianfu Zhang

China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin, 300308, China

Abstract: Shenzhen Metro Line 8 is connected to the existing Line 2 for operation. Since the opening of the Line 8 project, there has been no significant increase in passenger flow, and there has been a decline in passenger flow due to the impact of the epidemic. The current operation is facing various problems, such as long one-way travel time due to long routes, high driver workload, long running time of first and last trains, short skylight time, serious waste of transportation capacity, and poor operational efficiency. Based on the design scheme of the extension line project of Line 8, the application research of mixed grouping technology in the signal system of existing and extension line projects is carried out, mainly including the layout of trackside equipment and the design of control circuits. The research results are simulated and verified, and the results show that the application of mixed grouping technology meets the transportation needs of Line 8 and extension lines, while reducing operating costs, improving the intelligent service level of the system, and achieving accurate matching of transportation capacity and passenger flow.

Keywords: subway; mixed grouping; signalling system; intelligent

0 前言

当前城市轨道交通运营线路多采用固定编组列车, 没有通过调配列车的编组数量以满足不同运力的需求。混合编组作为一种先进的轨道交通运营组织模式, 各地城市轨道交通运营单位正在开展相关研究和试点。论文根据既有线的现状, 提出支持混合编组的信号系统设计方案, 应用于深圳地铁 8 号线既有车站及其延伸线工程。

1 运输能力与客流能力的矛盾

1.1 既有客流概况

1.1.1 工作日断面情况

工作日早高峰断面 3.1 万人次/小时, 位于黄贝岭 - 湖贝区间, 主要高峰集中在福田中心商务区与罗湖居住区间, 第二高峰 1.5 万人次/小时, 为南山科技园与安托山间, 相对平缓。晚高峰断面 2.0 万人次/小时, 位于湖贝 - 黄贝岭区间, 高峰区段与早高峰相同。工作日以通勤客流为主, 2 号线主要高峰出行是福田中心商务区与周边的通勤交流

产生。

1.1.2 休息日断面情况

休息日早高峰断面 0.52 万人次/小时, 位于湖贝 - 大剧院区间, 其他平峰时期为 0.45 万人次/小时左右, 早高峰与平峰差别较小。晚高峰断面 0.73 万人次/小时, 位于新秀 - 黄贝岭区间。休息日整体断面客流相对较小, 且全线路断面形态较为扁平, 无较为明显的区段高峰客流。

1.1.3 节假日断面情况

节假日早高峰断面 1.0 万人次/h, 位于湖贝 - 大剧院区间, 其他平峰时期为 0.75 万人次/小时左右。晚高峰断面 1.0 万人次/小时, 位于新秀 - 黄贝岭区间。最大断面区段位于福田 - 盐田区段, 呈现早晚高峰相反的形态, 在仙湖路梧桐山、盐田港西公交接驳梅沙时断面变化较多, 盐田区旅游资源吸引了较多市区内居民前往。

1.1.4 现状客流特征

①高峰时段客流断面分布极不均匀: 黄贝岭至湖贝和湖贝至大剧院两个区间断面量是其他区间的 1.5 倍以上。

②高峰时段上下行客流断面量差别较大：早高峰下行方向最大断面是上行方向的两倍多。

③早晚高峰客流差别较大：早高峰最大客流断面是晚高峰最大客流断面的 1.5 倍。

④ 2、8 号线工作日时段分布差距明显，早晚高峰 2 个小时的客流约占全日客流的 28%。

⑤节假日与休息日时段分布较为均衡，晚高峰最高系数不超过 10%。

1.2 行车组织方案

在 8 号线延伸线工程的设计过程中，根据工作日和周末客流特征差异较大的特点，结合现状行车组织方案，研究年度在工作日和周末给出两种不同的行车组织交路。工作日高峰时段按照大小交路套跑，大交路为赤湾 - 溪涌，小交路

为湾厦 - 莲塘，大小交路的比例为 2 : 1；平峰时段按照单一大交路组织列车运营。节假日高峰时段按照大小交路组织运营，大交路为赤湾 - 溪涌，小交路为湾厦至溪涌，大小交路开行比例为 1 : 1；平峰时段按照单一交路组织列车运营。基础设计行车组织交路图见图 1。

工作日交路：

周末（节假日）交路见图 2。

目前，既有线采用固定 6A 编组列车，无法通过灵活调配列车的编组数量以满足不同运力的需求。固定编组列车无法根据客流变化适时调整运力，低峰期产生的空载列车会造成资源浪费；而高峰期又不能灵活进行运力匹配，无法有效缩短行车间隔。



图 1 工作日高峰时段列车运行图

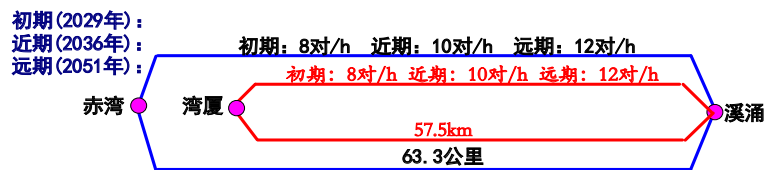


图 2 周末高峰时段列车运行图

2 混合编组方案研究

根据规划，远期溪涌站站后会继续延伸至葵冲东站建设 32 号线工程。既有线的客流预测概况及分析如下。

2.1 预测客流概况

预测年度：初期 2027 年、近期 2034 年、远期 2049 年。

工作日 2 号线远期工作日全日客流 100.3 万人次 / 日，最大断面量 4.17 万人次 / h，非工作日全日客流 87.8 万人次 / 日。

8 号线远期工作日全日客流 20.8 万人次 / 日，非工作日全日客流 23.8 万人次 / 日，非工作日客流较工作日客流上涨 14.4%。最大断面量 1.92 万人次 / h（节假日 2.32 万人次 / h），出现在晚高峰。8 号线远期客运强度为 0.92 万人次 / 公里，仅约为 2 号线的 1/3。

2.2 客流特征

2.2.1 工作日断面情况

①东西段客流差异大，工作日早高峰最高断面客流为 4.2 万人次 / 小时，位于 2 号线黄贝岭 - 湖贝区段，最大断面主要客流为莲塘地区与盐田地区前往福田商务区的通勤客流。8 号线高峰盐田食街站以东段客流断面不足 1 万人次 / 小时。

②上下行客流量差异较大，上行方向最大断面客流为 2.6 万人次，位于岗厦北至华强北区间。

③早晚高峰客流较大，平峰较小，客流早晚高峰特征明显。

2.2.2 非工作日断面情况

东西段客流差异大，晚高峰最大断面客流约为 2.9 万人次 / 小时，位于黄贝岭 - 新秀区间。东段客流较小，大梅沙至小梅沙区段密度为 1.3 万人次 / 小时。非工作日以旅游客流为主。全日客流各时段客流较为均匀，晚高峰相对较大。

2.2.3 客流区段分布特征

8 号线平均运距较大，与市区间交流较为紧密。工作日东部旅游组团在盐田区内交流量占比约 1/3，与罗湖、福田间交流量，占比约 2/3，与南山交流量仅约 1%。休息日盐田区内交流量进一步降低，占比约 1/4，与罗湖、福田间交流量较为紧密，占比约 3/4。

2.3 混合编组的目标

2021 年 12 月，根据深圳市交通基础设施项目指挥部第十四次会议纪要要求，结合 8 号线客流需求，进一步研究完善了地铁 2 号线、8 号线贯通运营优化方案。

因深圳地铁 2、8 号线客流特征差异较大，东段客流较小，满载率低，存在运能浪费严重，运营效益差的问题，需保证发车间隔和满足运能要求的前提下，组织长短编组列车混跑，以提高运营经济性。

2.4 行车组织方案

根据既有线的客流特点分析成果，结合 8 号线的建设规划，制定 4/6 编组嵌套分段运营方案列车开行交路见图 3。本方案需要增加海山至盐田路 4 辆编组列车上线运营，故信号系统改造成可支持海山至盐田路线路范围内的 4/6 编组列车混跑。由于海山站无折返条件，列车要利用沙头角折返线实现折返，并且，海山至盐田路四站需要区分 4/6 编组列车对应站台门的不同开门方式。

采用该方案运能适应性更好，运营经济性较高；东西两个交路嵌套运营，乘客通达性也更好。但东边交路在高峰时段上下行方向采用不同编组列车运营，运输组织较为复杂。同时高峰时段转换为平峰时段单一交路所需时间较长。

3 信号系统设计方案

3.1 既有线信号系统概况

深圳地铁 2 号线和 8 号线一、二期工程由卡斯柯公司负责信号设备集成采购，采用基于 WLAN 的 CBTC 系统，利用车载速度传感器结合定位无源应答器实现列车精确定位，通过计轴实现轨道区段划分。CBTC 系统由 ATS、联锁、ATP/ATO、DCS 和维护子系统构成。2/8 号线贯通运营，均接入深云控制中心 ATS 系统。

既有信号系统中，ATS 系统负责设备和列车的监控、制定运行图。联锁系统负责信号机、转辙机和计轴之间联锁逻辑运算，通过与站台门接口电路，实现对站台门状态采集和命令输出。ATP/ATO 子系统实现对列车安全、精准、自动化控制。DCS 子系统由无线网和有线网组成，实现各子系统之间数据传输。维护子系统采集、接收各子系统重要数据和故障报警信息。

ATS 子系统由中心级 ATS 和车站级 ATS 设备构成，在控制中心设置 ATS 主机，设备集中站设置 ATS 分机。ATS 设备分层布置，可实现分散自律控制。在设备集中站设置联锁主机，通过继电器接口电路实现对其控制管辖范围内的信号机、转辙机和机轴之间的联锁逻辑关系及对站台门的控制。ATP/ATO 子系统由地面 ZC、DSU、应答器和车载 VOBC 设备组成。DCS 子系统在中心、车站、场段和轨旁设置有线网络和无线网络通信设备。维护子系统在设备集中站、控制中心、场段等信号设备室设置维护子系统分机，在维修中心设置维护子系统主机。

3.2 信号系统的设计方案关键

针对运能与运力精准匹配的要求，既有站信号系统针对 4A/6A 编组列车混跑运营方案需求在以下三方面进行适应性改造。新建车站的信号系统可参照改造车站的设备布置方式，进行设计。

3.2.1 4A/6A 编组列车在站台和折返线精确停车方案

卡斯柯信号系统利用车载速度传感器，结合站台或折返线布置的定位无源应答器实现精确停车。既有站台应答器布置仅考虑 6 辆编组列车，既有车站的改造应在原应答器布置方案的基础上增加必要的 4 编组列车配套的无源应答器。4/6A 编组列车混跑方案，采用列车头端对齐的运营组织方式。基于对精确停车应答器布置要求，BTM 系统在车辆两端冗余配置，应答器布置分别满足车辆头、尾 BTM 传输要求，故 4A 编组列车可与 6A 编组列车共用头端应答器，但需要新增 3 个尾端定位应答器。若站台或折返线有双端精确停车需求，应考虑反向运行列车尾段的应答器布置。图 4 以股道为例示意新增应答器方式。



图 3 混合编组方案列车开行交路

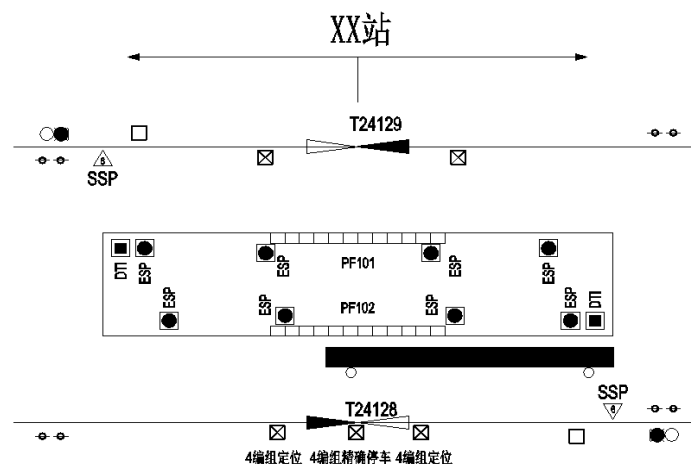


图 4 股道新增无源应答器示意图

3.2.2 4A/6A 编组列车与站台门接口方案

既有车站的信号系统需要改造与站台门接口，支持长短编组不同的开关门方式。在与原 6 编组站台门接口的基础上，增加 4 编组站台门接口，具体增加上行、下行 4 编组开门、关门驱动等相关电路，增加上行、下行 4 编组开门、关门、门关闭和门旁路采集等相关电路，联锁软件同步升级。以下行侧为例，电路如图 5 所示。

3.2.3 信号各子系统软件升级改造方案

因增加精确定位应答器和增加 4 编组站台门接口电路，主要信号子系统均产生变化，需要软件升级调整。主要包括以下几方面调整：

- ①修改 ATS 软件，支持编制 4/6 编组列车混跑运行图的功能，区分 4/6 编组列车不同显示。
- ②升级 VOBC、DSU、ZC 数据信息（电子地图），新版电子地图包括新增应答器和短编组列车信息，VOBC 增加 4 辆编组的控车软件。
- ③升级联锁软件，增加与 4 编组列车站台门接口相关的驱采信息，功能上新增对 4 编组站台门开关控制。
- ④升级维护子

系统软件，监测 4 编组站台门接口电路状况。

3.3 改造工程实施及调试注意事项

改造工程实施及调试从两个维度考虑，一方面需要进行系统调试（需要在静态调试完成后方可进行动态调试）；另一方面考虑本线线路较长，应按营业线施工有关管理办法执行，可考虑分段进行施工和调试。

利用天窗时间，针对信号新增与 4 编组站台门接口电路静态调试，调试后回退之前软件，并申请联锁认证。在获得联锁认证后，组织动态调试，ATS、VOBC、DSU、ZC、联锁、维护子系统均加载新版测试软件，记录动态调试结果，调试后回退之前软件，并申请 CBTC 认证。在获得 CBTC 认证后，正式换装新版软件，次日实现 4/6 编组列车混跑运营。

3.4 改造后系统能力检测

嵌套运营对折返站的折返能力要求较高，需对嵌套交路折返站的折返能力进行测算。沙头角站、盐田港西站、深外高中站、盐田路站、溪涌站的折返能力计算示意图见图 6。

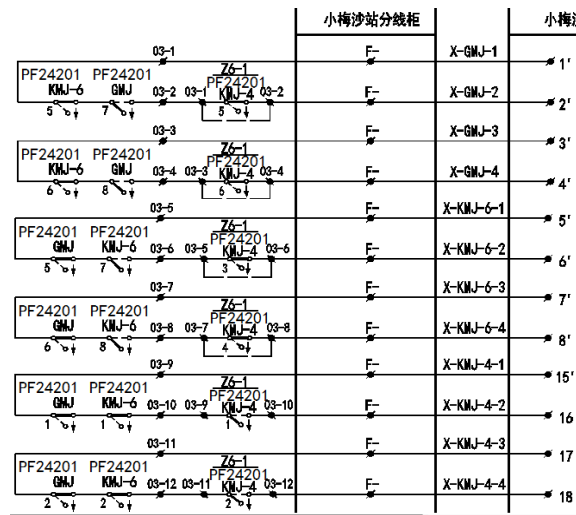


图 5 混合编组站台门控制电路图

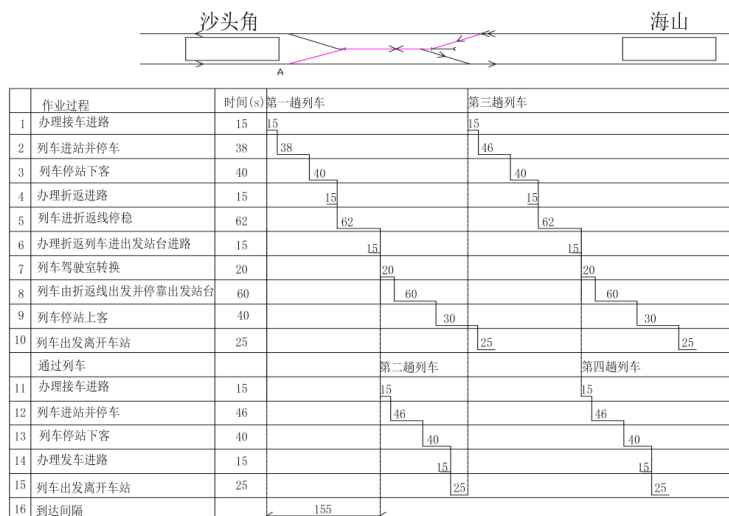


图 6 沙头角站后折返能力示意图

经计算，沙头角站的接车能力、发车能力为 2min，折返能力约 3min，能力满足要求（见图 7）。

盐田港西站的接、发车能力及折返能力均为 2.5min，能力仅满足初期运营要求（见图 8）。

深外高中站的接、发车能力，折返能力约为 2.5min，

能力仅满足初期运营要求（见图 9）。

盐田路站接车能力、发车能力小于 2min，折返能力约为 3.5min，折返能力满足运输需求。

溪涌站为交路折返站，其折返能力是限制全线追踪间隔的因素，该站的折返能力示意图如图 10 所示。

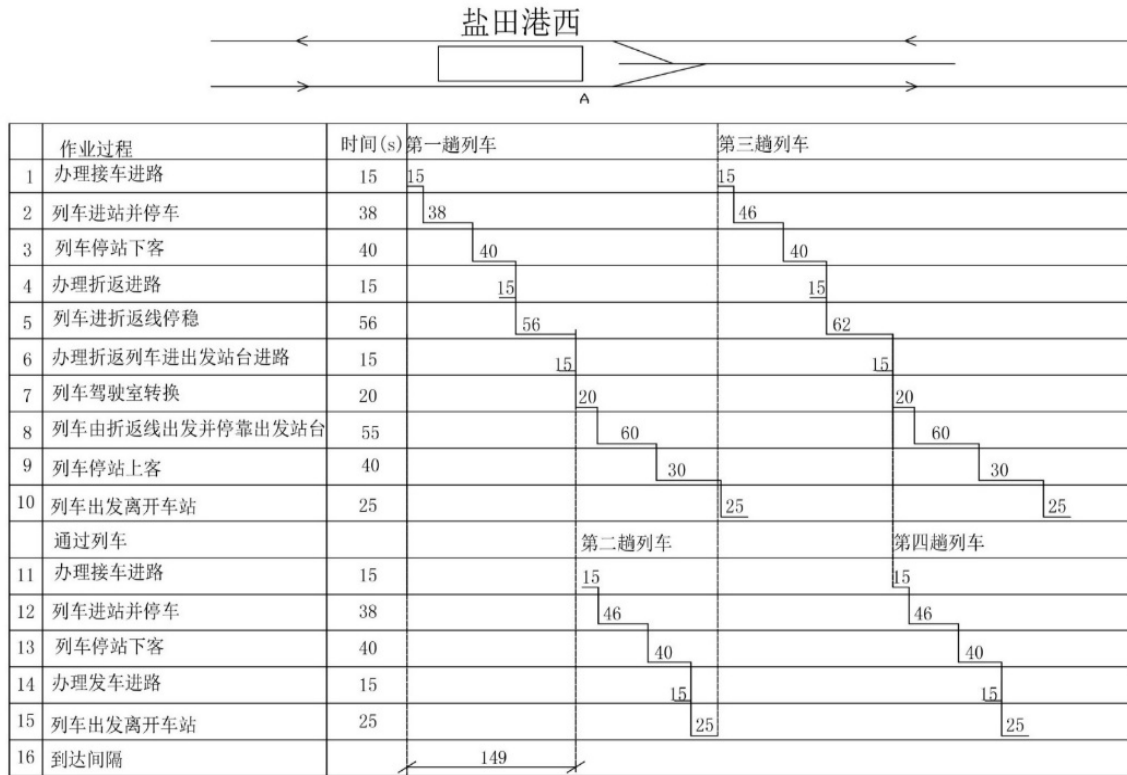


图 7 盐田港西站后折返能力示意图

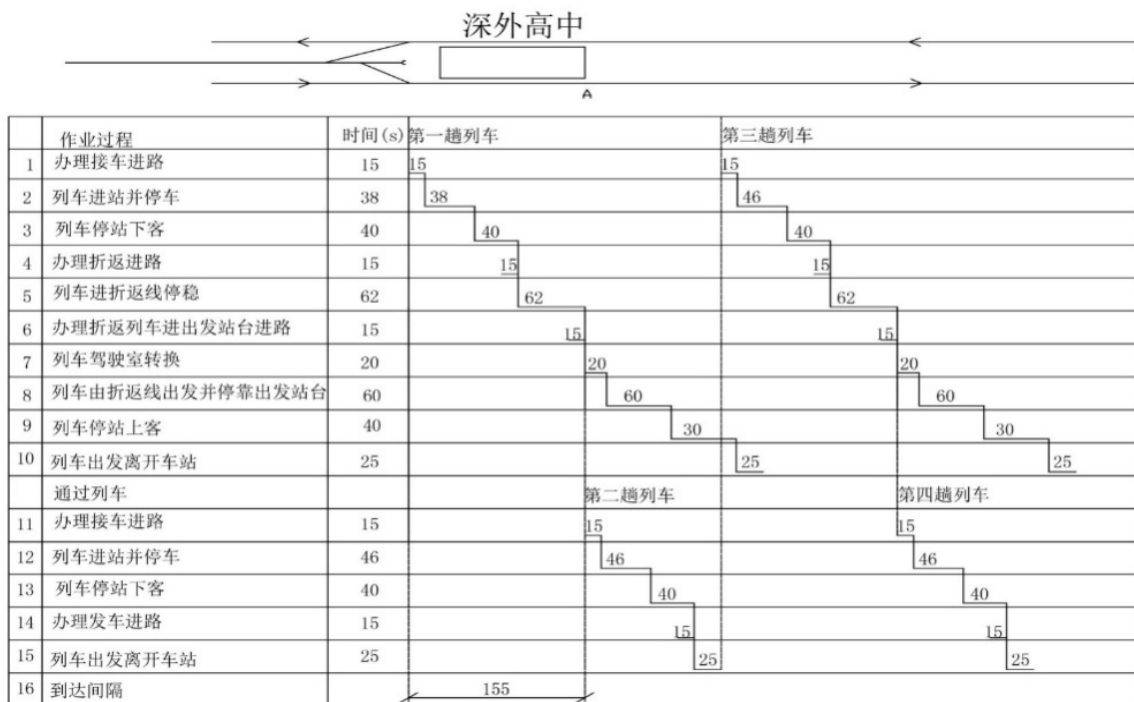


图 8 深外高中站折返能力计算示意图

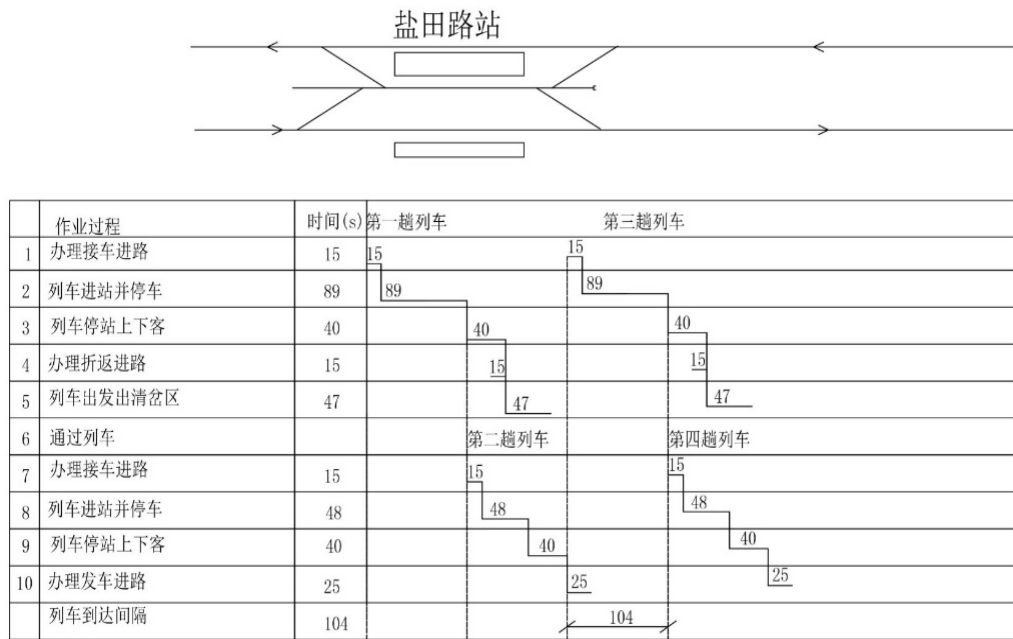


图 9 盐田路站折返能力计算示意图

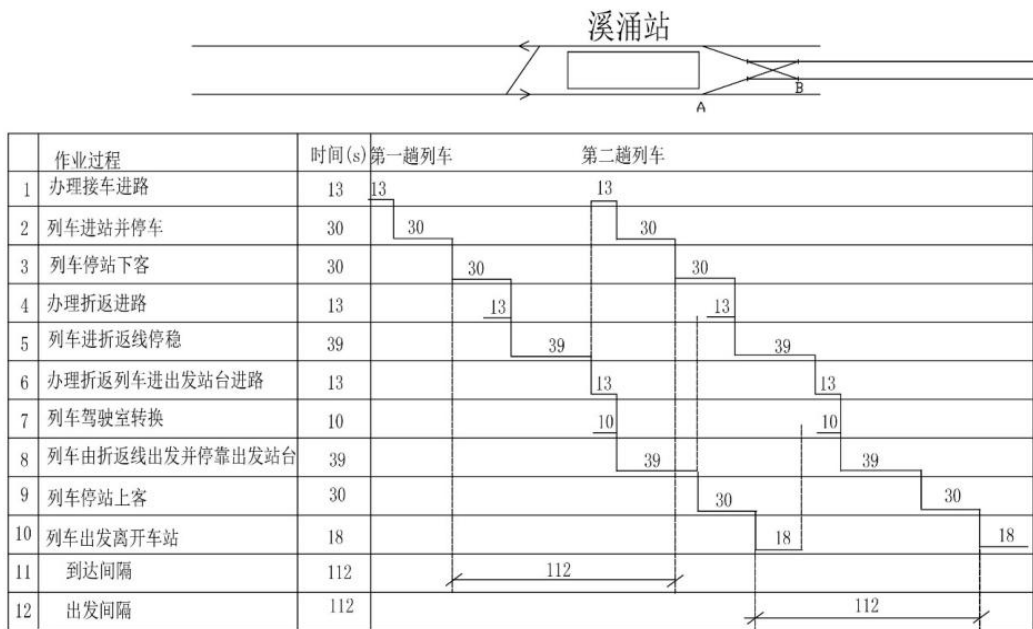


图 10 溪涌站折返能力示意图

溪涌站的最小到达间隔为 112s，满足远期 30 对/h 的折返要求，并留一定的富余量。全线的系统能力要求 30 对/h，车站折返能力满足该要求。

4 方案分析

经过仿真计算，在 8 号线及其延伸线范围内的信号系统设计满足混合编组运输需求，且具有以下优点：

- ① 8 号线及其延伸线开行 4 编组列车，满足运输需求。
- ② 对 2 号线既有段影响较小，无需对 2 号线段落进行改造。

③ 不改变 2 号线及 8 号线一期部分交路列车编组，保持其 6A 编组服务水平。

④ 将 2/8 号线进行软拆解，有利于远期 8 号线继续延伸，缩小东延段土建规模。

混合编组的运输方案，有以下缺点：

① 东西段客流间的交流必须换乘，与客流需求匹配性较差。

② 换乘客流较大，对运营组织有较高的要求。

经济效益分析：

① 8 号线二期工程原方案计划采购 7 列 6 编组列车，

在同等的运输需求下,混合编组方案只需要采购 9 列 4 编组列车,故可以节省 6 节列车的车辆采购投资,同时也减少了车辆维护成本。综上由 4/6 编组混跑运输可以节约投资约为 4260 万元。

②采用 4A 型车的编组,实现了运力和需求的匹配,降低了能耗 8 号线三期开通使用 4A 列车代替 6A,减少运能浪费。由于 4A 车型的运营电量消耗较少,每年能节省电能费用约 205 万元。

5 结语

采用混合编组运营模式可以在平衡运营能力的同时,降低运营成本,符合运营部门的客观需求。增加混合编组功能的信号系统是实现混合编组的关键。此外,信号系统设计还可与全自动运行技术相结合,在正线混编运营、列车联挂救援等运营场景下将得到更多的应用。

参考文献:

- [1] 刘思楠.城市轨道交通列车多编组方案优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
- [2] 戚婷婷,奚笑冬,余强.上海轨道交通车辆“6改8”项目的分析[J].城市轨道交通研究,2008(10):40.
- [3] 王冬海,黄荣光.列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J].城市轨道交通研究,2019,22(S2):102-105.
- [4] 范海宁,何勇浩.城市轨道交通列车灵活编组方案及功能实现[J].城市轨道交通研究,2021,24(9):200-203.

作者简介:张天赋(1989-),男,满族,中国辽宁沈阳人,硕士,从事信号研究。

课题项目:城市轨道交通信号系统运能运量精确匹配控制技术研究及应用(项目编号:2022B03512004)。