

西安地铁2号线运输能力提升方案研究

强士盎^{1,2}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//高级工程师)

摘要 国内一些特大城市部分早期开通运营的城市轨道交通线路客流增长迅猛,客流需求远超原设计的线路运输能力,提高其运输能力、缓解运营压力已迫在眉睫。以西安地铁2号线为例,提出增加列车开行密度、压缩行车间隔的扩能方案;并对控制列车运输能力的折返能力、场段规模、供电容量、区间风井的设置等主要因素进行了系统研究。根据方案检算结果,2号线行车密度为33对/h时,工程改造量较低、投资较小,且运输能力可比原设计提高10%,具有一定的抗风险能力。

关键词 地铁;运输能力;发车频率;提升措施

中图分类号 U292.12

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.022

Research on Improvement Scheme of Xi'an Metro Line 2 Transport Capacity

QIANG Shiang

Abstract Urban rail transit lines launched at early phases in some major cities in China are seeing drastic growth of passenger flow. Passenger flow demand has far exceeded the originally designed line transport capacity. To improve the transport capacity and to ease operational pressure is imminent. Taking Xi'an Metro Line 2 as an example, the capacity expansion scheme of increasing train frequency and compressing operation interval is proposed, and a systematic study of the main factors controlling train transport capacity, including return capacity, scale of depot, power supply capacity, setting of the interval wind well, is carried out. The scheme examination calculation results show that when train frequency is 33 pairs/h, the reconstruction volume and investment are lower, while transport capacity can improve by 10%, equipped with certain level of anti-risk ability.

Key words metro; transport capacity; train frequency; improvement measures

Author's address China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

城市人口急速膨胀,部分早期开通运营的城市轨道交通线路客流增长迅猛,客流需求远超原设计的线路运输能力,运营部门压力日益凸显。北京、上海、广州、西安等城市的部分轨道交通线路在高峰期不得不采取限流措施来缓解运营组织压力,确保运营安全。这给市民出行带来不便,且客室拥挤严重,乘车体验较差。因此,如何提高城市轨道交通既有线路的运输能力、缓解运营压力的工作已迫在眉睫。

通过提升行车密度来提升线路运输能力是目前通常采取的措施,并取得了良好的社会和经济效益。例如,上海轨道交通1号线通过大交路运输的方式在满足客运需求的同时合理运用运能,提高行车效率;北京地铁提升了繁忙线路的行车密度,部分线路将行车间隔压缩到了105 s(约34对/h);广州地铁3号线组织跨线运输,增加空车投放,提升行车密度^[1-3]。目前,西安地铁日均客流量已达250万人次,2号线日均客流量突破了90万人次。为缓解客流拥堵、更好地服务旅客,本文以西安地铁2号线为例,分析行车密度影响因素,进而确定西安地铁2号线最终的系统规模(即高峰小时最大开行密度),以满足客流增长的需求。

1 西安地铁2号线现状

1.1 线路基本情况

西安地铁2号线是贯通西安市的南北主轴线,目前已建成并运营一期工程(北客站—韦曲南站)。线路全长26.7 km,共设21座地下站,平均站间距1.31 km,设置一段一场,分别为渭河车辆段和浐河停车场。2号线二期工程分南延段及北延段,南延段串联常宁新区,北延段串联北客站北部片区,二期线路总长6.945 km,全为地下线,共设4座车站,利用并改(扩)建既有渭河车辆段和浐河停车场。

1.2 线路运营概况

西安地铁2号线于2011年9月16日开通运

随着城市的不断发展,城市化进程不断加快,

营。目前,2 号线日均客流量达到了 94 万人次,客流强度平均达到 3.5 万人次/km,高峰小时最大断面客流在 3.0~3.2 万人次之间;节假日客流量最高达 121.7 万人次/d,已超出原预测的远期客流 114.44 万人次/d。从 2 号线现状运营效果来看,客流效益良好,现状运营客流各项指标均已远远超过原预测近期指标(75.49 万人次/d、2.60 万人次/h)^[4],且随着城市的发展,2 号线客流还在稳步增长中。

1.3 存在问题

1) 运量增长与运力不足的矛盾:目前,城市轨道交通车辆的通用车型主要有 A 型车、B 型车和 L 型车 3 种,车辆满员载客量分别是 2 592 人/辆、1 950 人/辆、2 018 人/辆^[5]。西安地铁 2 号线受客流预测影响,在开通运营时采用 B 型车担任运输任务,而随着周边地区的不断发展,1 号线、3 号线的开通,网络化运营带来的客流增长效应凸显,西安地铁 2 号线先天载客能力不足的问题逐渐暴露,致使站台客流数量过多,乘客无法正常上下车,影响正常运营。此外,西安地铁 2 号线二期的建设已提上日程(可行性研究、初步设计已获批)。根据 2 号线二期工程可行性研究客流预测报告,2 号线至远期 2047 年,日均客流量达到 129.46 万人次,最高断面客流量达到 4.09 万人次/h,届时 2 号线客流将进一步激增,运力与运量矛盾将进一步加剧,产生客流量与运能不匹配的情况将致使 2 号线列车运行周期延长、行车效率降低。

2) 扩能受限与乘客舒适度的矛盾:通过扩大列车编组或增加列车定员可有效提升线路运输能力。目前,西安地铁 2 号线列车采用 6 节编组(B 型车)承担运输任务,扩大列车的编组可实现运输能力的提升,但是既有线路的土建结构改造困难^[6-7],此种方案基本不可实现;而增加列车定员方案会引起服务水平的降低,高满载率情况下乘客乘车及候车的舒适度将大大降低。

2 西安地铁 2 号线扩能方案及影响因素分析

通过前文分析得知,扩编及增加列车定员均不可实施,因此本次提出的扩能方案,是在不改变既有列车编组方案及车辆定员条件下,通过提高高峰

小时线路通过能力,即提高高峰小时列车开行密度来提升运输能力。

控制高峰小时列车开行密度的因素主要有折返能力、车辆段及停车场的停车及检修能力、供电容量、区间风井的设置^[8]等。下文重点对这 4 大控制列车开行密度的主要因素进行研究。

1) 折返能力:是制约行车密度的关键环节,折返时间长短直接影响到整个线路的行车间隔和运营效率,并最终体现在列车的追踪间隔上^[9]。从列车整个折返过程的时间顺序上分析,折返过程包含上行站台接车作业、进出折返线作业、下行站台发车作业 3 个阶段。折返能力主要取决于折返线配线布置型式、列车进站时间、列车在车站停车上下客时间、列车进入折返线时间、信号系统转换确认时间以及相邻两列列车之间的作业关系等^[10]。

2) 场段规模:是影响停车及检修能力的主要因素。行车密度的提高会使得线路中开行的列车数量上升,相应地对场段规模也会提出更高的要求,因此需进行场段规模检算。

3) 供电容量:在同一个供电区段内,牵引供电系统双机组双边供电,能够驱动的电机组是有限的^[10],因此,如果提高行车密度,还需要对供电容量进行检算。

4) 区间风井设置:在长大区间内,最不利情况下发生火灾造成严重影响事故虽然是小概率事件,但一旦发生,造成的危害和影响极大,因此在扩能时需要对相关风井设置进行检算。目前,在实际工程中通常判断是否设置中间风井的原则为:判断区间隧道端头活塞风井间的纯运行时间 t 与行车间隔的关系。若 $t >$ 行车间隔,则需考虑设置中间风井;若 $t <$ 行车间隔,则可不设置中间风井。其中,行车间隔为系统远期高峰小时行车间隔,一般为 120 s^[11]。对于该原则,笔者并不认可。本文暂按区间隧道两端站中心至站中心间的纯运行时间与行车间隔的关系进行判断。

3 西安地铁 2 号线扩能方案检算

3.1 折返能力检算

1) 参数取值:折返能力检算的相关参数及其取值见表 1。

表 1 折返能力检算的相关参数及其取值

| 参数 | 取值 |
|---------------------------|--|
| 列车进站速度/(km/h) | 75 |
| 车站有效长度/m | 118 |
| 列车编组 | 3M3T |
| 道岔类型 | 9 号 |
| 侧向过岔速度/(km/h) | 35(能力检算时取 30) |
| 道岔解锁及办理进路时间/s | 13 |
| 列车 ATO 响应时间/s | 2 |
| 列车停站时间/s | 35 |
| 平均加速度 | 0.83(列车时速 0~40 km 时); 0.5(列车时速 0~80 km 时) |
| 制动减速度/(m/s ²) | 1.0(载客时采用 0.9) |

注:ATO——列车自动运行。

2) 折返能力分析:选取传统岛式车站和侧式站后双折返线车站配线型式进行分析计算。

岛式车站:岛式车站配线布置型式及信号机、计轴点布置情况如图 1 所示。岛式车站折返能力计算表如图 2 所示。

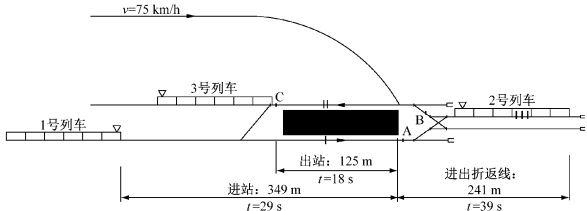
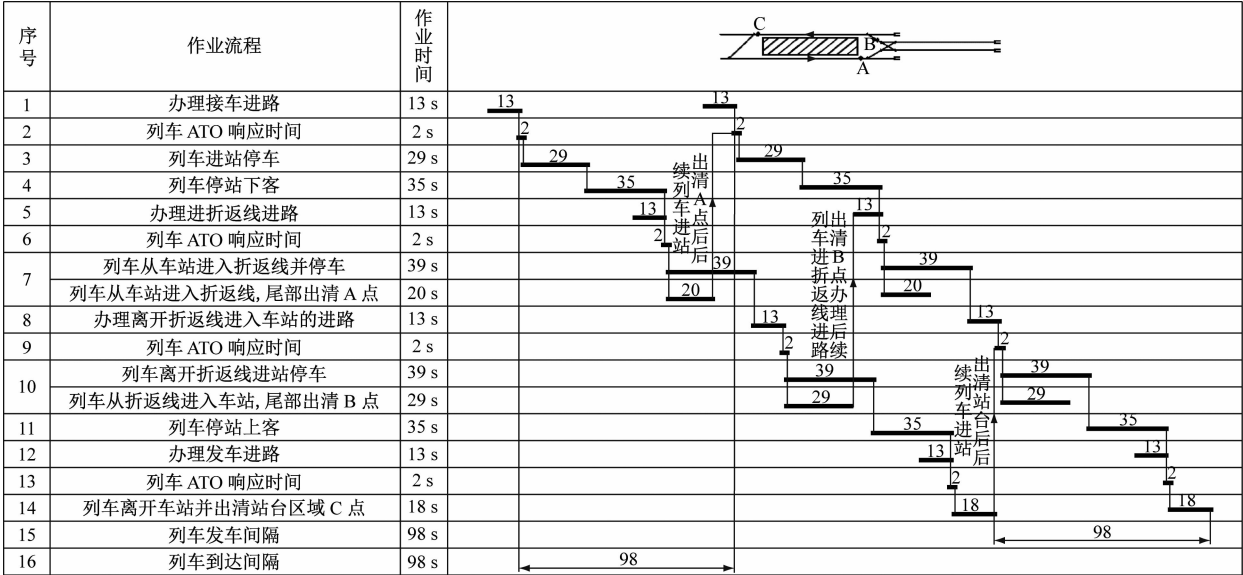


图 1 岛式车站信号机与计轴点布置示意图

列车折返作业过程为:正常情况下,上行到达列车进车站 I 道停车;在 I 道办理完下客作业后,由 ATO 自动驾驶进 III 道折返,再进入车站 II 道办理上客作业;转换车号为下行列车并发车。

相邻两列列车之间重要控制点为:①当前车尾部出清 A 点后,后续列车进行进站停车作业;②当前车尾部出清 B 点后,可以开始办理后续列车进入折返线 III 道的进路;③当前车出清站台区域 C 点后,后续折返线上的列车进行进站停车作业。

如图 2 所示的岛式车站 9 号道岔连续折返间隔为 98 s,行车密度可以达到 36 对/h。



时间单位:s

图 2 岛式车站折返能力计算表

侧式车站:侧式车站配线布置型式及信号机、计轴点布置情况如图 3 所示。侧式车站折返能力计算表如图 4 所示。

列车折返作业过程为:正常情况下,上行到达列车进车站 I 道停车;在 I 道办理完下客作业后,由 ATO 自动驾驶进 III 道折返,再进入车站 II 道办理上客作业;转换车号为下行列车并发车。

相邻两列列车之间重要控制点如下:①当前车尾部出清 A 点后,后续列车进行进站停车作业;②当前车尾部出清 B 点后,可以开始办理后续列车进入折返线 III 道的进路;③当前车出清站台区域 C 点后,后续折返线上的列车进行进站停车作业。

如图 4 所示的侧式车站 9 号道岔连续折返间隔为 90 s,行车密度可以达到 40 对/h。

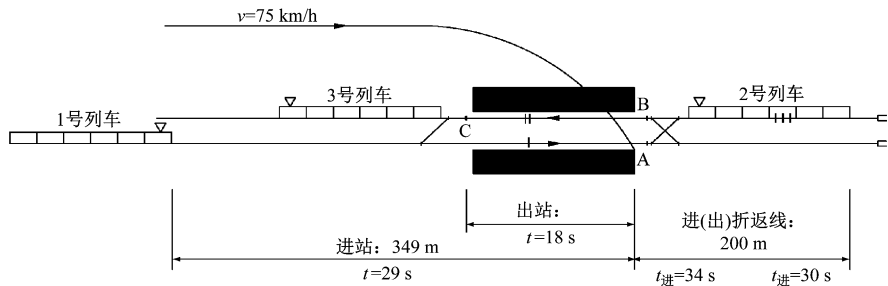


图3 侧式车站信号机与计轴点布置示意图

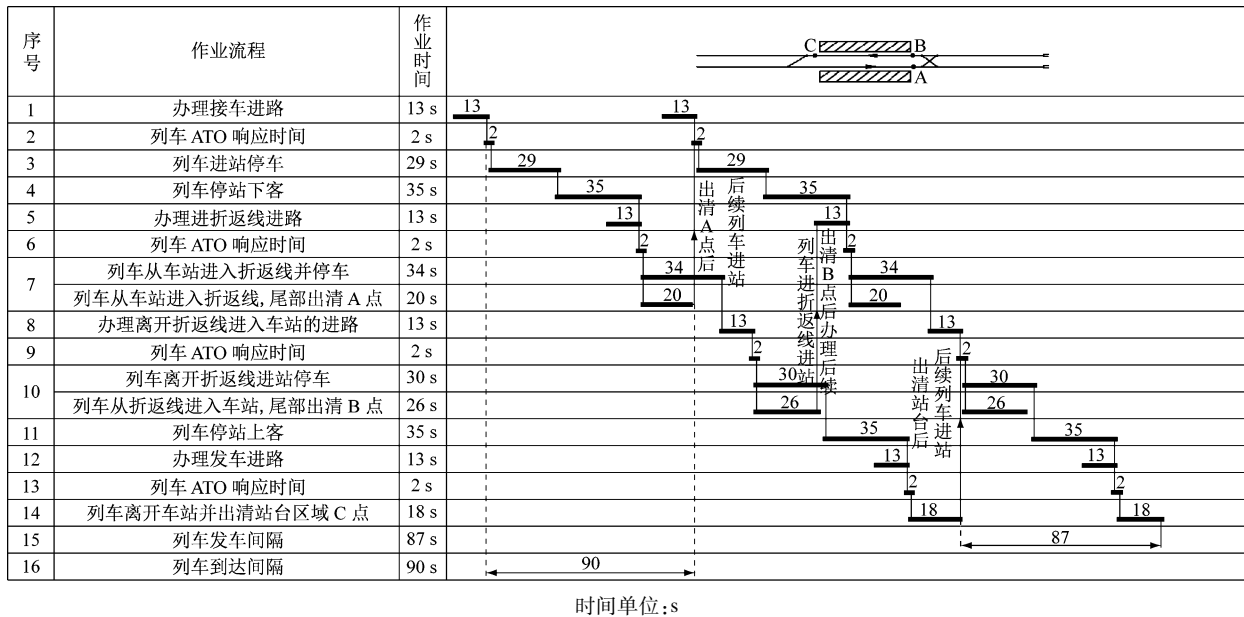


图4 侧式车站折返能力计算表

本次折返能力理论计算值大幅提升的主要原因是:实际运营中,2 号线信号系统办理接车进路的“13 s”与图2、图4 中第7 步可实现平行作业。即接车进路可早早办理好,在前车尾部出清 A 点后再响应。

由上述核算结果可见,岛式车站与侧式车站的理论折返能力均大于 35 对/h。但根据国内实际运营经验,行车密度能突破 30 对/h、实现 33 对/h 的已属不易。故场段规模、供电容量、区间风井设置均按行车密度 33 对/h、35 对/h 进行核算。

3.2 场段规模核算

西安地铁 2 号线场段运用及检修能力如表 2 所示。

1) 停车规模:目前 2 号线二期场段扩建,由于受浐河停车场用地规模、渭河车辆段扩建条件限制,段场最多停车 75 列。除去大架修待修及修竣车存放线 3 条之外,最多可以停放 72 列运用车,恰好可以满足行车密度为 35 对/h 的停车规模需求。根

表2 西安地铁2号线场段运用及检修能力表

| 行车密度 /(对/h) | 场段规模 | 停车规模/列 | 周月检规模/列位 | 定修规模/列位 | 大架修规模/列位 |
|----------------|------|--------|----------|---------|----------|
| 30 | 计算规模 | 68 | 4.68 | 1.10 | 1.44 |
| | 设计规模 | 68 | 5.00 | 1.00 | 1.44 |
| 35 | 计算规模 | 75 | 4.75 | 1.12 | 1.46 |
| | 设计规模 | 75 | 5.00 | 1.00 | 1.46 |
| 36 | 计算规模 | 78 | 4.78 | 1.13 | 1.47 |
| | 设计规模 | 75 | 5.00 | 1.00 | 1.47 |
| 40 | 计算规模 | 85 | 5.03 | 1.16 | 1.54 |
| | 设计规模 | 75 | 5.00 | 1.00 | 1.54 |

据场段停车极限,建议行车密度不超过 35 对/h。

2) 检修规模:当行车密度为 35 对/h 时,定修规模超出了 0.12 列位,周月检规模富余 0.25 列位。目前西安地铁运营部门正在实行均衡修,部分定修任务(如拆卸空调滤网等)由周月检的列位承担,因此超出的定修列位可由周月检列位补充;2 号线二期行车密度由 30 对/h 增加至 35 对/h 后,增加了

0.02 个大架修列位。当行车密度为 30 对/h 时,2 号线的大架修列位富余 0.5 列位,可满足行车密度增加至 35 对/h 的停车规模需求。

根据上述分析,建议行车密度不超过 35 对/h。

3.3 供电容量检算

西安地铁 2 号线不同行车密度下的整流机组容量如表 3 所示。

| 表 3 不同行车密度下牵引变电所整流机组容量对比表 | | | | | |
|---------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 行车密度 /(对/h) | 设备 | 牵引变电所 | | | |
| | | 草滩 北站 | 正阳 大道站 | 何家 营站 | 常宁站 |
| 33 | 整流器安装 容量/kW | 2 × 3 300 | 2 × 3 300 | 2 × 3 300 | 2 × 3 300 |
| | 整流变安装 容量/kVA | 2 × 3 600 | 2 × 3 600 | 2 × 3 600 | 2 × 3 600 |
| 35 | 整流器安装 容量/kW | 2 × 3 600 | 2 × 3 600 | 2 × 3 600 | 2 × 3 600 |
| | 整流变安装 容量/kVA | 2 × 4 000 | 2 × 4 000 | 2 × 4 000 | 2 × 4 000 |

1) 行车密度为 33 对/h 时的供电容量:接触网(目前的刚性悬挂方式和线材选择,汇流排 + 1 根接触线 + 1 根架空地线“Π”型汇流排 + CTAH150 + JT120)、两座主变电站行政中心主变和会展中心主变容量均可满足要求,整流机组容量仅能满足行车密度为 33 对/h 的需求,故当行车密度为 33 对/h 时,对供电容量无影响。

2) 行车密度为 35 对/h 时的供电容量:接触网和两座主变电站行政中心主变和会展中心主变容量均能够满足要求,整流机组容量仅能满足行车密度 33 对/h 的供电需求,不能满足行车密度为 35 对/h 的供电需求,因此需对 2 号线二期工程的牵引变电所进行增容,对 2 号线一期工程的供电无影响。

3.4 区间风井设置检算

本文暂按设置中间风井进行检算。

1) 行车密度为 33 对/h 时的区间风井设置:当行车密度为 33 对/h 时,两列列车之间行车间隔约为 109 s。根据行车计算结果,2 号线全线有 3 座区间存在 2 列列车的情况,详见表 4。

其中何家营站至韦曲南站区间行车时间仅超过行车间隔(109 s)1 ~ 2 s,暂认为可以通过调整站端风井位置满足相关规范要求,因此该区间无需设置中间风井。现阶段的区间风井设置方案如表 5 所示。

| 表 4 西安地铁 2 号线有 2 列列车同时存在的区间的列车运行时分表(行车密度为 33 对/h 时) | | | |
|---|------------|----------------|----------------|
| 区间 | 区间 距离/m | 上行列车 运行时间/s | 下行列车 运行时间/s |
| 何家营站— 韦曲南站(二期) | 1 735 | 111 | 110 |
| 三爻站— 会展中心站(一期) | 1 823 | 117 | 121 |
| 北客站站— 正阳大道站(二期) | 2 156 | 131 | 133 |

| 表 5 西安地铁 2 号线有 2 列列车同时存在的区间的风井设置方案(行车密度为 33 对/h 时) | | | |
|--|--------|--------|--------|
| 区间 | 区间距离/m | 采取措施 | 投资估算 |
| 三爻站—会展中心站 (一期) | 1 823 | 增设区间风井 | 300 万元 |
| 北客站— 正阳大道站(二期) | 2 156 | 中间风井 | 初设已设置 |

综上所述,当行车密度为 33 对/h 时,需在正在运营的 2 号线一期工程(既有线)增设 1 处区间风井,通风空调设备投资约 300 万元。

2) 行车密度为 35 对/h 时的区间风井设置:行车密度为 35 对/h 时,两列列车之间行车间隔约为 103 s。根据行车计算结果,2 号线全线有 9 座区间存在两列列车的情况,详见表 6。

| 表 6 西安地铁 2 号线有 2 列列车同时存在的区间的列车运行时分表(行车密度为 35 对/h 时) | | | |
|---|------------|----------------|----------------|
| 区间 | 区间 距离/m | 上行列车 运行时间/s | 下行列车 运行时间/s |
| 常宁站—何家营站(二期) | 1 656 | 107 | 108 |
| 何家营站—韦曲南站(二期) | 1 735 | 111 | 110 |
| 航天城站—风栖原站(一期) | 1 621 | 103 | 110 |
| 风栖原站—三爻站(一期) | 1 513 | 105 | 106 |
| 三爻站—会展中心站(一期) | 1 823 | 117 | 121 |
| 会展中心站—纬一街站(一期) | 1 610 | 108 | 103 |
| 北苑站—北客站站(一期) | 1 607 | 107 | 106 |
| 北客站站—正阳大道站(二期) | 2 156 | 131 | 133 |
| 正阳大道站—草滩北站(二期) | 1 621 | 105 | 105 |

现阶段的区间风井设置方案为:在表 6 所示的 9 个区间中,除北客站站—正阳大道站(二期)已设置有中间风井以外,其余 8 个区间各增设 1 个区间风井。每个区间风井的投资估算为 300 万元。

综上所述,当行车密度为 35 对/h 时,需在全线 9 个区间设置中间风井,通风空调设备投资在行车密度为 30 对/h 的基础上增加约 2 400 万元。其中

正在运营的一期工程(既有线)需增设 5 处区间风井,投资较高且影响正线运营程度较高。

4 结论

1) 通过对折返站的折返能力、车辆段及停车场的停车列检能力、供电容量、区间风井的设置这 4 大控制列车开行密度的主要因素进行研究,建议西安地铁 2 号线行车密度按 33 对/h 考虑。在客室站席定员采用 6 人/m² 条件下,运输能力可达 4.82 万人次/h,比原设计 4.38 万人次/h 提高约 10%,具有一定的抗风险能力。此处要说明的是,运输能力可达 4.82 万人次/h 仅仅是基于行车密度为 33 对/h 的一个理论计算结果,而当行车密度超过 30 对/h 后,实际列车定员是否仍然能够保持满载需要通过进一步调查分析后才能判断。

2) 笔者认为折返能力不是限制西安地铁 2 号线能力提升的绝对控制因素。若折返站折返能力不足,则只要列车配属数量、场段停车规模充足,则可在渭河车辆段和浐河停车场间组织部分列车对开,避免折返作业。相较而言,场段规模和区间风井是控制性因素,在新线建设尤其是有大客流风险的特大城市骨干线建设时应做好预留。

3) 在既有线区间增设中间风井的前提是不能影响既有线正常运营,且必须确保既有线运营安全,因此实施难度较大。针对既有线改造增设区间风井,目前国内尚无实际应用案例。北京地铁 4 号线、5 号线、10 号线等线路的行车密度均已突破 30 对/h,达到 34 对/h,但并未在既有线增设区间风井。

(上接第 102 页)

2) 站位设计距离适中,站间距合理;
3) 因地制宜,在不同功能区采取不同的敷设方式,既满足城市发展需要又节约投资;

4) 市域快线与其他城市轨道交通线网实现多点换乘,甚至贯通运营,并设置了越行站,充分体现“快”的特点。

4 结语

我国市域快线正处在大力发展阶段。在市域快线工程设计中,线路专业是前期龙头专业,与其他专业衔接紧密、相互关联。为体现市域快线“快”的特点,本文在线路设计中侧重从总体思路、线路布局、线路长度、敷设方式、与城区线网的关系、越

根据相关环控专家的建议,可采取特殊应急处理措施(例如前车火灾时,后车后退),来避免因提高行车密度而在既有线增设区间风井的情况。若此种模式被业内接受,则将大大降低既有线运能提升改造成本及难度。

参考文献

- [1] 黄可强. 分阶段建设的城市轨道交通换乘站运营组织研究[J]. 中国新技术新产品, 2017(5):127.
- [2] 王媛媛. 城市轨道交通列车运行图编制理论与方法[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2015.
- [3] 唐寿成,廖书林. 提升城市轨道交通行车效率的探讨[J]. 铁道运输与经济, 2017(8):94.
- [4] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 西安地铁 2 号线二期工程(常宁—韦曲南段、北客站—草滩北段)初步设计总说明[R]. 西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2019.
- [5] 杨永平,赵东,边颜东. 我国中等城市轨道交通发展存在的问题及建议[J]. 都市快轨交通, 2019(6):1.
- [6] 潘晓军. 北京地铁 1 号线运输能力挖掘研究[C]//中国土木工程学会. 2013 中国城市轨道交通关键技术论坛文集. 北京:中国科学技术出版社, 2013:247.
- [7] 汪波,韩宝明,战明辉,等. 城市轨道交通运输能力计算及加强研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013(4):38.
- [8] 孙思南. 轨道交通折返站列车折返时间优化方法[J]. 城市轨道交通研究, 2019(7):133.
- [9] 李莉. 城市轨道交通列车折返能力综合优化分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018(5):47.
- [10] 曹宏丽. 城市轨道交通站后折返能力影响分析及优化[J]. 铁道通信信号, 2018(3):93.
- [11] 李琼. 地铁长大区间中间风井设置探讨[J]. 都市快轨交通, 2020(4):113.

(收稿日期:2020-09-27)

行站设置等方面进行研究,为市域快线线路设计工作提供借鉴。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于推动都市圈市域(郊)铁路加快发展意见的通知[S]. 北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2020.
- [2] 张健. 城市轨道交通工程线路设计内容及方法[J]. 工程技术(全文版), 2017(36):141.
- [3] 张文正. 城市轨道交通工程线路设计内容及方案[J]. 隧道建设, 2016(9):425.
- [4] 屠念浔. 城市轨道交通工程线路设计方法研究[J]. 交通世界, 2017(36):160.
- [5] 丁丹丹,李志强. 市域轨道引入城市轨道交通线网衔接研究[J]. 都市快轨交通, 2018(4):11.

(收稿日期:2021-02-04)