

有轨电车网络化运营设计方法

杨志成¹ 黄宗志²

(1. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 430056, 武汉;

2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//第一作者, 高级工程师)

摘要 网络化运营有助于促进线路间的列车互相调剂补充, 满足线路客流量需求, 因此对有轨电车的网络化运营研究具有现实意义。首先, 介绍了有轨电车的运营历史及研究现状; 然后, 基于有轨电车断面客流量、车站负荷、换乘条件及运营资源共享等条件, 研究了组织网络化运营方案的技术及其适用性; 最后, 提出一种网络化运营设计方法, 以云南省保山市有轨电车线网为例, 结合其客流特征, 规划了不同时期的有轨电车运行交路。此外, 通过分析目前有轨电车网络化运营存在的问题, 对网络化运营的操控性、安全性, 以及共享数据方面提出了相应的建议。

关键词 有轨电车; 网络化运营; 断面客流量

中图分类号 U292.4; U482.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.05.023

Design Method of Tram Networking Operation

YANG Zhicheng, HUANG Zhongzhi

Abstract Networking operation is complementary to train coordination between lines, meeting line passenger flow volume demand, thus there's practical significance for tram networking operation research. First, the tram operation history and current research status are introduced; then, based on conditions such as tram sectional passenger flow volume, station load, interchange conditions and operation resource sharing, the technology and its adaptability of networking operation organizational scheme are studied; finally, a networking operation design method is proposed based on Yunnan Province Baoshan City tram line network. Considering its passenger flow characteristics, the tram operation routings for different periods are planned. In addition, by analyzing the existing problems in current tram networking operation, corresponding suggestions are proposed for controllability, safety and data sharing of networking operation.

Key words tram; networking operation; sectional passenger flow volume

First-author's address China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., 430056,

Wuhan, China

截至2020年1月, 我国已有16座城市开通有轨电车线路30条, 线路总长度约为366.9 km。有轨电车网络化运营已经成为有轨电车设计和运营阶段的研究重点。有轨电车网络一般分期建设、分步实施, 其具有建设成本较高、建成后不易更改等特点。有轨电车的运营规划一般是基于城市客流需求确定的, 但由于城市用地规划的调整导致了客流需求也在不断改变^[1], 可能引起有轨电车规划的客流适应性有所降低。随着有轨电车规模的扩大, 城市活动分布更加分散, 客流需求的空间不均衡性更强, 城市客流的相关特征也更为复杂^[2]。传统有轨电车的单线运营模式具有组织简单、资源共享性差等特点, 难以适应不同时期的客流需求。网络化运营能够促进线路间的列车互相调剂补充, 既能更好地适应客流量的需求, 又能提高各线路车辆的满载率^[3]。因此, 对有轨电车网络化运营规划的研究是十分有必要的。本文介绍了有轨电车网络化运营的技术与方法, 并结合工程实例提出一种有轨电车网络化运营的设计方法。本研究可为有轨电车网络化运营提供工程经验与理论指导。

1 有轨电车网络化运营历史及研究现状

自19世纪80年代以来, 欧洲有轨电车经历了兴起、衰落和复兴的过程。到了20世纪80年代, 法国各大城市已经采用了新型的有轨电车技术, 并积累了丰富的有轨电车网络化运营经验。

斯特拉斯堡是法国第一个逐步实现有轨电车网络化运营的城市。斯特拉斯堡有轨电车网络的所有线路互有衔接, 6条线路呈中心环+放射结构。其中: A线北段与D线共线, A线南段与E线共线; B线北段与E线共线, B线中段与C线共线, B线南段与F线共线; C线60%的线路与其他线路共线; D线90%

线路与其他线路共线;E 线 70%的线路与其他线路共线;F 线全部与其他线路共线。斯特拉斯堡 10 年内乘坐有轨电车的乘客数量成倍增长,其有轨电车的网络化运营管理成功案例被许多城市相继效仿。

米卢斯市是法国第一个引进 Tram-Train(有轨电车和铁路)双模式的城市。米卢斯市共有 3 条传统的有轨电车线路,线路总长约为 15.7 km;另有 1 条 Tram-Train 双模式线路,线路总长约为 22.4 km。其中:1 号线的 Porte Jeune 站—Gare Centrale 站区间与 3 号线、Tram-Train 双模式线路共线;2 号线的 Daguerre 站—Porte Jeune 站区间与 3 号线、Tram-Train 双模式线路共线;3 号线全线与 Tram-Train 双模式线路共线。

目前,虽然我国有轨电车发展迅速,但其有轨电车网络化运营研究大多停留在理论阶段,缺乏网络化运营的设计与管理经验,对有轨电车实际网络化运营的实践指导性较差。因此,研究有轨电车网络化运营具有较大的现实意义。

2 有轨电车网络化运营技术与方法

2.1 网络化运营面临的问题

1) 断面客流量不均衡。断面客流量的不均衡同时体现在空间和时间上。有轨电车站点将线路划分为多个区段,同一时间、不同区段的断面客流量存在差异,通常沿线路呈凸曲线形分布。同一区段、不同时间的客流量可以分为非高峰客流量和高峰客流量,仅高峰小时客流量可占全日客流量的 10%~14%。

2) 车站负荷不均衡。有轨电车车站多采用开放式站台,车站难以进行限流管理,尤其当换乘客流过大且交织严重时,易引发乘客人身安全及交叉口拥堵等问题。

3) 换乘衔接问题。减少乘客走行距离和换乘次数是提高有轨电车服务水平的重要内容。许多城市致力于优化其换乘组织方案,包括组织列车跨线运行以提高直达乘客的比例或改善换乘站列车时刻表衔接以降低乘客的换乘等待时间等^[4]。

4) 运营资源共享问题。有轨电车运营资源共享能够统筹电力资源、设备资源及空间资源的合理利用,以达到综合配置、高效使用和保护环境的目,可极大地节省有轨电车的建设和运营成本。但由于有轨电车自身的运营特性,组织运营资源共享的管理难度较大。

2.2 网络化运营技术

有轨电车的网络化运营打破了各线路之间的物理屏障,为有轨电车的灵活调剂创造了有利条件。

1) 单线多交路运营。有轨电车的单线多交路运营需要在线路上增加中间折返站,这对有轨电车线路的通过能力有着一定的影响,单线多交路运营可能会导致部分长距离乘客的换乘次数有所增加,降低长距离乘客的出行体验感^[4]。一般来说,有轨电车的线路站点较短,折返配线占用的道路资源较多,因此对有轨电车单线多交路运营的应用需较为慎重。

2) 多节编组。目前,国内外有轨电车的多节编组技术均有较好的应用,如:法国蒙彼利埃有轨电车 2 号线同时运行长、短模块的有轨电车;法国里昂 5 条有轨电车线路共用 73 列 5 模块和 12 列 7 模块的列车;北京西郊线平时开行 5 模块列车,在旅游高峰期开行 5+5 重联列车。

3) 跨线运营。虽然跨线运营增加了有轨电车线路和车站的管理难度,但其具有能有效拓展运营里程、快速适应客流变化和提高线网直达运输等优点。目前,武汉光谷有轨电车 T1 线和 T2 线、沈阳浑南 6 条有轨电车线路均取得了较好的跨线运营效果。

4) 快慢车运营。有轨电车的设计速度为 70 km/h,越行能力较差,且其车站多设置在道路路口,设置配线条件较差。此外,有轨电车一般采用目视人工驾驶,对列车交会、运营时分的精准控制较难实现。因此,有轨电车较少采用快慢车运营模式。

2.3 网络化运营设计方法

有轨电车网络化运营设计的前提是建设与运营一体化的物理架构,即有轨电车的运营网和轨道网分离。有轨电车网络化运营设计的评判标准为线网断面客流量负荷均衡,即各个区段断面客流量与开行对数匹配,降低列车空载率。有轨电车网络化运营的设计目标是实现有轨电车的运营资源共享。根据以往设计经验,有轨电车网络化运营设计流程图如图 1 所示。

有轨电车从线路确定到开行网络化运营的 4 个步骤为:

1) 以城市线网规划中的线路走向、站点布置和联络线方案为依据,从客观上实现车辆共用及跨线运营的物理条件。

2) 以客流预测成果为依据,满足预测期单向高

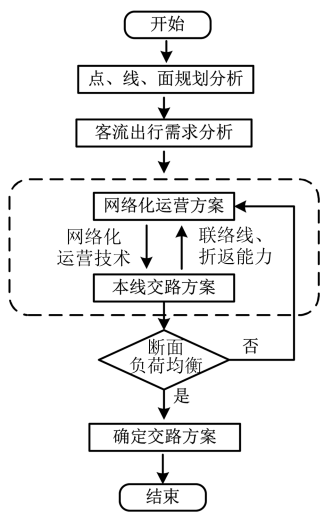


图 1 有轨电网络化运营设计流程图

Fig. 1 Flow chart of tram networking operation design

峰小时最大断面客流量的需求,实施跨线运营并实现断面客流负荷均衡,尽可能保持客流增长的延续性。

3) 设计网络化运营方案用以指导本线交路,并实现线网客流匹配整体最优。本线交路可以结合有轨电车区间通行能力、折返站能力、联络线设置条件,反馈并调整网络化运营方案。

4) 设计人员对有轨电车的断面客流负荷均衡及共线段通过能力进行综合评价,进一步挖掘设计优化空间,尽量节省列车购置费用,降低运营成本。

3 案例分析

以云南省保山市有轨电车线网为例,对其有轨电车线网规划及各年度开通运营线路进行分析。目前,保山市共规划了 5 条有轨电车线路(T1—T5),铺轨里程为 81.7 km,共设车站 107 座。有轨电车 T2 线为线网中里程最长、换乘站点最多的骨

干线路,线路全长约 29.3 km,共设车站 30 座。T2 线共分为三段——T2A 线、T2B 线和 T2C 线。其中,T2A 线全长约为 2.8 km,其与有轨电车 T1 线先期实施。

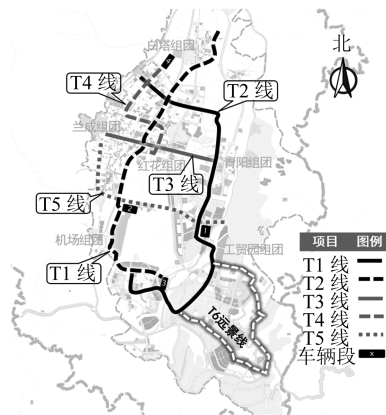
T2 线为单线运营模式,其客流适应性较差。T2 线通过网络化运营实现了轨道网与运营网分离,达到了节约投资成本、提高服务水平的目的。

3.1 线网规划及客流特征

3.1.1 线网规划

保山市有轨电车线网布局呈“三主两辅”网络构架,形成“一环一横”主干线,“L+Z”辅助线的公共交通骨干网络构架。保山市有轨电车线网规划图如图 2 所示,保山市有轨电车建设时序表如表 1 所示。

T2 线呈南北分布,与其他 4 条线路均有换乘站,其青堡车辆段为厂架修基地。因此,T2 线除与 T5 线车辆段共址、段内设置联络线外,与其他线路均有跨线需求,在 4 处设置了联络线,为网络化运营提供物理条件。



注: T6 为远景线,不在现有线网规划中。

图 2 保山市有轨电车线网规划图

Fig. 2 Planning diagram of Baoshan City tram line network

表 1 保山市有轨电车建设时序表

Tab. 1 Time sequence of Baoshan City tram construction

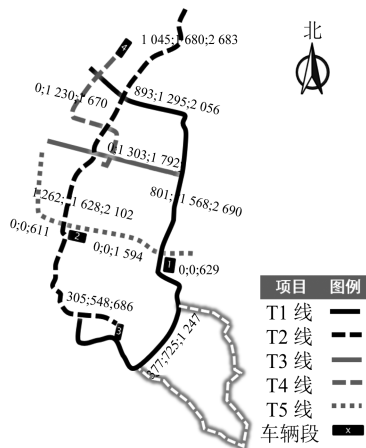
建设内容分期	涉及线路	拟建时间及周期	拟建总长度/km	涉及道路
近期	T1	2022 年已开工,2024 年建成通车	21.10	梅花大道、永昌路、大保快速路、云瑞大道
	T2A	2022 年已开工,2024 年建成通车	2.80	拱北路
	T2B	2022 年已开工,2024 年建成通车	19.60	拱北路东段、青阳路、龙盛路
中期	T2C	2022 年已开工,2024 年建成通车	6.90	南环路、9 号路
	T3	预计 2027 年开工,2030 年建成通车	8.00	保岫路
	T4	预计 2027 年开工,2030 年建成通车	9.80	正阳北路、升阳路、龙陵路、龙泉路、同丰街
远期	T5	预计 2033 年开工,2035 年建成通车	13.50	小栗园路、沙丙路

注: 5 条线路铺轨总长约为 81.7 km。

3.1.2 客流特征

保山市有轨电车线网规划分为近期、中期和远期规划,T2A 线与 T2B 线、T2C 线分两期实施。不同时期的线网规模存在差异且客流分布也不尽相同,所设计的线网列车运行交路应既能充分保障前期的施工工程,又能在后期施工工程中获得充分利用,同时为后期工程的建设创造有利条件。

保山市有轨电车线网客流以中、短途运输为主,有轨电车线网不同区段的断面客流量差异较大。有轨电车的网络化运营能够更好地适应线网客流,实现断面客流负荷均衡。保山市有轨电车各线路高峰小时断面客流量示意图如图3所示。



注：图中数字分别为各线路的初期、近期、远期高峰小时断面客流量，单位人次。

图3 保山市有轨电车各线路高峰小时断面客流量示意图

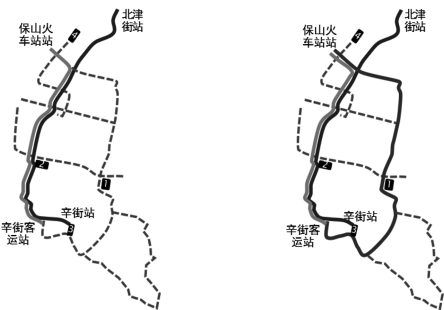
Fig. 3 Section passenger flow diagram of Baoshan City tram
each line

3.2 各设计年度开通线路规划及运行交路

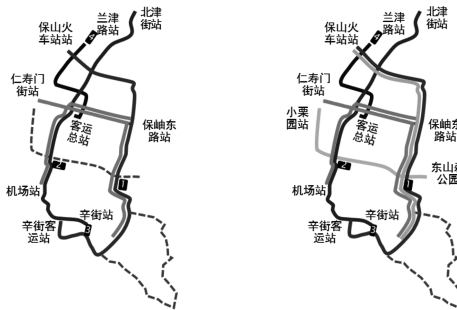
3.2.1 开通线路规划

T2A 线、T2B 线和 T2C 线分两期实施,拟采用 T2B 线和 T2C 线开通前、T2 线初期、T2 线近期、T2 线远期 4 个设计年度。T2 线客流规模较小,初期、近期、远期采用 3 模块列车即可满足远期客流需求。本次设计主要采用多交路、跨线运营技术。

2024 年在 T2B 线、T2C 线开通运营前,先建设 T1 线和 T2A 线,应考虑到 T1 线与 T2A 线跨线运营。随着 T2B 线、T2C 线的开通运营,初期 2 条线路开行 3 条运行交路。近期,除 T5 线、T6 线外建成其余全部线路,4 条线路开行 5 条运行交路。远期,5 条线路共开行 7 条运行交路,实现公交化、网络化运营。各设计年度保山有轨电车开通列车运行线路如图 4 所示,远期线网列车运行交路统计表如表 2 所示。



a) 到 2024 年运营线网规划 b) 到 2027 年(初期)运营线网规划



c) 到 2034 年(近期)
运营线网规划

注：实线和虚线分别为该设计年度已开通运营线路和未开通运营线路。

图4 各设计年度保山市有轨电车开通运营线路

Fig. 4 Operating Baoshan City tram lines in each design year

表 2 远期线网列车运行交路统计表

Tab. 2 Statistics of long-term line network train operation

列车运行交路	交路长度/km	开行对数/(对/h)
北津街站—辛街东站	21.1	15
云瑞机场站站—保岫东路站	14.1	3
保山火车站站—保岫东路站—辛街站	29.5	9
仁寿门街站—工贸园站	18.0	6
兰津路站—客运总站	9.8	9
保山火车站站—工贸园站	19.6	3
小栗园站—东山森林公园站	13.5	9

3.2.2 本线运行交路

各设计年度保山市有轨电车运行交路规划如图 5 所示。根据网络化运营方案,T2 线初期、近期、远期开行交路分别为:①T2 线全线开通运营前,保山城市有轨电车先期建成 T1 线、T2A 线,由于 T2A 线规模较小,不宜组织本线交路,其应与 T1 线组织跨线运营,如图 5 a) 所示。②初期,保山市有轨电车将形成“一环”有轨电车网络。结合初期有轨电车线网客流较小、环网距离较大的特点,T2 线组织本线运营,以及 T2A 线与 T1 线跨线交路,开行 2 条运行交路,如图 5 b) 所示。③近期,保山市有轨电车除 T5 线、T6 线外建成其余全部线路,有轨电车线

网基本成型,T2 线组织本线运营、与 T3 线跨线交
路,开行 2 条运行交路,如图 5 c)所示。④远期,保
山市有轨电车建成线网规划的全部 5 条线路,考虑
网络公交化运营管理,根据远期有轨电车线网客流
需求,组织 T2 线本线大、小交路运营,以及与 T3 线
跨线运营,开行 3 条运行交路,如图 5 d)所示。

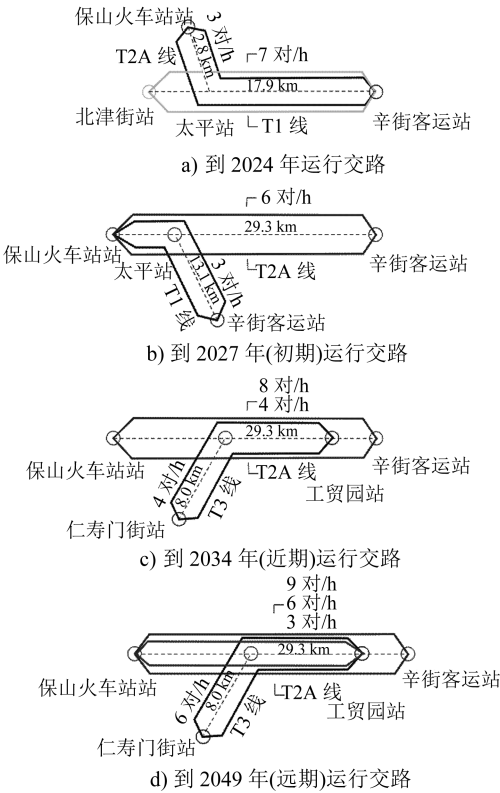


图 5 各设计年度保山市有轨电车运行交路规划
Fig. 5 Planning of Baoshan City tram operation routing in each design year

综上所述,T2A 线先期实施,在 T2 线全线开通
前,其高峰小时开行对数为 3 对;T2 线初期、近期、
远期高峰小时开行对数分别为 6 对、12 对和 18 对,
能够较好地满足客流需求。保山市有轨电车系统
不同时期的运输能力如表 3 所示。由表 3 可知,T2
线远期最大开行对数为 18 对/h,低于系统最大设计
能力 24 对/h。结合 T2 线断面客流负荷均衡评价,
其各区段客流匹配较好且留有适当的运能储备,
网络化运行交路不但优化了运用车配置,还节约了车
辆运营成本。

规划 T3 线连接北城片区和青阳片区,其线路
较短且沿线用地困难,缺乏停车场设置条件。基于
网络化运营设计方法,建议取消 T3 线本线交路,分
别组织 T1 线、T2 线与 T3 线跨线交路,按开行比例

表 3 保山市有轨电车系统不同时期的运输能力
Tab. 3 Transportation capacity of Baoshan tram system for different periods

设计年度	单向高峰小时最大断面客流量/人次	高峰小时列车对数/对	系统输送能力/(人次/h)	运能储备/%
初期	801	6	1 218	52.1
近期	1 586	12	2 436	53.6
远期	2 690	18	3 654	35.8

将 T3 线配备列车分别停放于 T1 线汉营车辆段与
T2 线青堡车辆段。该设计方法不仅能够实现车辆
段的资源共享、减少列车空驶,还延伸了网络化运
营里程,增强了有轨电车的客流吸引力。

4 结语

目前,国内大多城市的有轨电车尚未形成网
络,对有轨电车的网络化运营经验、管理技术的研
究仍停留在理论阶段。网络化运营有助于促进线
路间的列车互相调剂补充,满足线路客流量需求,
具有较大的现实意义。本文基于有轨电车断面客
流量、车站负荷、换乘条件及运营资源共享等条件,
研究了组织网络化运营方案的技术,并提出一种网
络化运营设计方法,以云南省保山市有轨电车线网
为例,结合其客流特征,规划了不同时期的有轨电
车运行交路。结合我国有轨电车的发展特点,提出
以下两点改进建议:

1) 加强有轨电车网络化运营的精确操控性和
安全性方面的研究。一方面,网络化运营导致行车
组织难度有所加大,尤其是对列车的交汇、时分控
制等方面的要求相对严格;另一方面,有轨电车线
路开放的特点决定了外部环境极易对其运营产生
影响,且由于有轨电车线网系统庞大、关联面多,导
致事故容易蔓延。因此,研究有轨电车网络化运营
的精确操控性和安全性具有较大的现实意义。

2) 建议构建行业运营数据平台,强化行业内部
交流。我国有轨电车虽然发展迅速,但发展时间较
短,且各城市有轨电车自成体系,有轨电车运营数
据不够透明。通过建立共享运营数据平台,能够及
时发现问题并总结经验,进而快速提高城市有轨电
车行业的管理水平。

参考文献

[1] 李岩辉,陈宽民,马静,等. 考虑交通需求特征的有轨电车运营网络优化[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 64.

(下转第 127 页)