

基于列车满载率的城市轨道交通进站客流量控制^{*}

孙 方 孙 琦 高彦宇

(北京轨道交通线网管理有限公司, 100101, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 基于新冠肺炎疫情的防控要求,2020 年初北京轨道交通将列车满载率作为客流控制指标,严格控制城市轨道交通的进站客流量。为此,亟需量化各车站的进站客流控制阈值,用以作为现场客流管控的依据。提出了基于列车满载率的进站客流控制模型及相关客流控制方案。首先根据线网的客流特征对客流 OD(起讫点)信息进行预测,再结合列车运行图精确推演出乘客进站—上车—换乘—下车的全过程出行链信息,计算得到乘客出行所乘坐的各计划运行车次的列车满载率数据;然后结合列车满载率控制指标进行逆向推演及反算,得到该计划列车在各站上车客流控制阈值,再根据车站客流分布特征计算得到各站 10 min 粒度的进站客流控制阈值;最后,举例说明了该客流控制模型在北京轨道交通线网进站客流控制管理中的科学性及其有效性。

关键词 城市轨道交通;列车满载率;进站客流量;客流控制模型

中图分类号 U293.13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.009

Inbound Passenger Flow Volume Control of Urban Rail Transit Station Based on Train Load Factor

SUN Fang, SUN Qi, GAO Yanyu

Abstract To comply with the COVID-19 pandemic prevention and control requirements, Beijing rail transit adopted the train load factor as passenger flow control index to strictly manage the urban rail transit inbound passenger flow volume at the beginning of 2020. In this case, the threshold for controlling inbound passenger flow at each station requires quantification urgently as the basis for on-site management. An inbound passenger flow control model and relevant passenger flow control schemes based on train load factor are proposed. First, according to the passenger flow characteristics of line network, the OD (origin-destination) information of passenger flow on flow control day is predicted, the information of full passenger travel chain of entering-boarding-interchange-disembarking is ac-

curately deduced from train diagram, and the load factor data of each train on diagram for passenger traveling is calculated. Then, the boarding passenger flow thresholds of each train at each passing station are obtained by reverse deduction and calculation with the load factor control index. The inbound passenger flow control threshold of each station at 10-min granularity level is calculated according to station passenger flow distribution characteristics. Finally, the scientificity and effectiveness of applying passenger flow control model to Beijing rail transit line network stations is expounded with examples.

Key words urban rail transit; train load factor; inbound passenger flow volume; passenger flow control model

Author's address Beijing Subway Network Administration Co., Ltd., 100101, Beijing, China

2020 年初,随着新冠肺炎疫情(以下简称“疫情”)防控形势的好转,企业陆续复工复产,北京市城市轨道交通(以下简称“北京轨道交通”)的日客流量持续回升。为严防疫情通过城市轨道交通传播扩散,保证运营平稳有序,北京轨道交通将列车满载率作为客流控制的关键指标。本文将列车满载率定义为某运营车次途经线路各断面时的实际载客量与列车额定载客量之比,列车最大满载率则为该运营车次在各断面上列车满载率的最大值。

在疫情爆发前,北京轨道交通依据 DB11/T 647—2009《北京市城市轨道交通运营服务管理规范》规定的“当车站承载客流量达到或超过客流警戒线,即车站承载能力的 70% 时,须适时采取限流、封站等措施”进行车站客流控制,但该规范的指标过于宽泛,且主要考虑车站承载能力,并不适用于疫情下精确的列车满载率控制。相关研究也多从单站客流控制和多站客流协同控制 2 个方面控制城市轨道交通高峰客流:文献[1]提出了城市轨道交通高峰时段单线多站协同限流策略,但文章仅从单

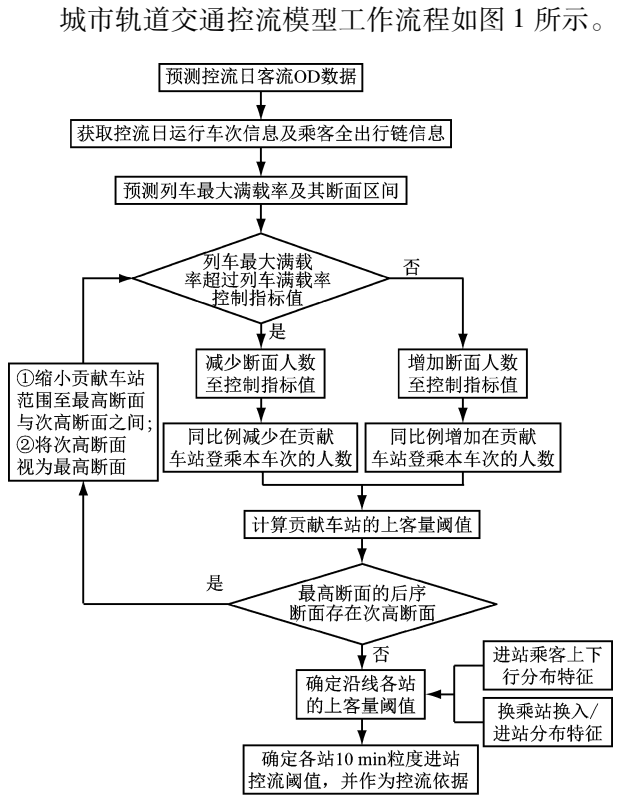
^{*}北京市基础设施投资有限公司科研项目(2020-ZH-05)

线角度建模,线网客流协同控制并没有得以实现;文献[2]采用数学规划方法,分别针对线路层和网络层建立了客流流入协同控制模型;文献[3]提出了基于滚动时域的多站协同客流控制方案,但文献[2-3]所提模型的限定条件较多,且均局限在试验仿真层面。为此,本文基于疫情防控要求,提出了以列车满载率为控制对象、基于乘客城市轨道交通全出行链信息的客流流入协同控制方案。

1 列车满载率控制方案

为了能够精准控制进站客流(以下简称“控流”),使列车最大满载率不超过控制指标值,本文建立了基于列车满载率的城市轨道交通车站进站客流控制模型(以下简称“控流模型”),并提出与之相匹配的控流方案。

1.1 控流模型的工作流程及步骤



注:OD——起讫点;最高断面——列车最大满载率所在的区间断面;前序断面——沿列车行进方向至当前断面已驶过的断面;后序断面——沿列车行进方向从当前断面开始即将途经的断面;贡献车站——将最高断面列车上的乘客逆向追溯其上车的车站;10 min 粒度——每 10 min 对数据进行一次统计。

图 1 城市轨道交通进站客流控制模型工作流程
Fig. 1 Workflow of urban rail transit inbound passenger flow control model

基于图 1 的控流模型,城市轨道交通控流模型的工作过程可分为以下 8 个步骤:

步骤 1 根据客流的历史数据找出客流特征,建立控流模型;选取控流日客流预测 OD 信息,利用列车计划运行图对乘客出行路径进行清分,得到控流日线网各线路上各运行车次的载客信息,进而推演出所有乘客进站—乘车—换乘—下车—出站的全出行链信息;计算所有车次的列车满载率预测数据,以此作为控流的基础数据。

步骤 2 计算每条线路上各运行车次在途经车站的上下车人数及列车在各途经断面上的乘客数,得到每列车次的最高断面。

步骤 3 将最高断面内所有乘客的 OD 信息进行逆向推演,获得最高断面的贡献车站及贡献人数。

步骤 4 根据列车最大满载率与列车满载率控制指标值的差值,确定调减(即减少列车满载率)或调增(即增加列车满载率)贡献车站上客量控制策略,即如果列车最大满载率大于列车满载率控制指标值,则采取调减措施,减少该车次在最高断面上的列车乘客数,使其满足控制指标值的要求,并同比例减少贡献车站的上车人数。反之亦然。调减或调增后的贡献车站上客量即为该站的上客量阈值。

步骤 5 在该车次最高断面的后序断面搜索次高断面,将贡献车站范围限定在最高断面与次高断面之间,并将次高断面视为最高断面,重复步骤 3 和步骤 4,计算最高断面与次高断面之间各贡献车站的上客量阈值。

步骤 6 重复步骤 5,直到完成该车次终点前一个车站上客量阈值的计算。

步骤 7 统计各车站刷卡进站乘客的上、下行分布特征,将本线路各车次在沿途各站的上客量阈值进行推演,并汇总成 10 min 粒度的进站客流控制阈值;换乘站还需综合考虑本线进站客流及他线换入客流的分布特征,进而得出该换乘站的进站控制阈值。

步骤 8 将 10 min 粒度的进站客流控制阈值通过控流系统下发至全线网各车站,以供城市轨道交通运营单位在制定控流措施时参考。

1.2 列车最大满载率的调整计算方法

由于列车最大满载率的调增和调减控流处理逻辑相同,本文仅以调增为例进行说明。设 N_s 为某线路的车站总数。对于每个计划运行车次,设 α 表

示最高断面起始站的序号, S_α 表示最高断面起始站, $S_{\alpha+1}$ 表示最高断面终了站, 则该车次的最高断面区间为 $S_\alpha - S_{\alpha+1}$ 。设该车次在该最高断面上的乘客数为 γ 人, 该最高断面前序车站 $S_i (i \leq \alpha)$ 上车的乘客对该最高断面客流人数的贡献度为 R_i , U_i 为最高断面乘客中从车站 i 上车的人数。则 R_i 的计算式为:

$$R_i = U_i / \gamma \quad (1)$$

已知该车次的额定载客人数为 C_t , 设列车满载率控制指标值为 $P_t (0 \leq P_t \leq 100\%)$ 。因以调增为例说明本计算过程, 则 $\gamma < C_t P_t$, 由此可计算得到该最高断面可调增的上车人数 I_{on} 为:

$$I_{on} = C_t P_t - \gamma \quad (2)$$

将 I_{on} 按照最高断面前方各车站的 R_i 进行分配, 则可得到 S_i 对于该车次可调增的上车人数 $I_{on,i}$, 其计算式为:

$$I_{on,i} = I_{on} R_i \quad (3)$$

进一步统计原预测数据中在最高断面前序车站上车且在最高断面后序车站下车的客流分布概率, 据此将最高断面前序各车站可调增的上车人数 $I_{on,i}$ 分配到最高断面后序相应的车站下车。考虑四舍五入带来的误差, 该车次途经最后 1 个车站的下车人数采用取余法计算。根据该车次在最高断面前序各车站调增后的上车人数, 以及在最高断面后序各车站的下车人数, 重新计算该车次在沿途每个断面的乘客数。

将 $S_\alpha - S_{\alpha+1}$ 后序线路区段的次高断面 $S_\beta - S_{\beta+1}$ (S_β 为次高断面的起始站, $S_{\beta+1}$ 为次高断面的终了站, β 为次高断面起始站的序号, $\beta \geq \alpha + 1$) 作为新一轮计算的最高断面。依照上述方法, 调增 $S_{\alpha+1} - S_\beta$ 间各车站的上车人数, 以及 $S_\beta - S_{\beta+1}$ 后序各站相应的下车人数。

循环上述过程, 直至该线路最后 1 个线路区间完成客流调增。统计汇总调增后各站 10 min 粒度的上车乘客数及下车乘客数。

1.3 确定车站进站客流阈值

非换乘站的上车人数和进站人数相同, 调增后的上车人数可看作调增后的进站人数; 换乘站需要将调增后的上车人数按比例分为进站人数和本线换入人数。将调增后车站 i 的 10 min 粒度的上车乘客数设为 $E_{su,i}$, 下车乘客数设为 $E_{sd,i}$ 。设车站 i 分时进站客流去往上、下行的比例分别为 $\xi_{u,i}$ 、 $\xi_{d,i}$, 则有 $\xi_{u,i} + \xi_{d,i} = 100\%$ 。由此可以反推得到在车站 i

上行站台上车的进站客流量 $E_{u,i}$ 及在车站 i 下行站台上车的进站客流量 $E_{d,i}$:

$$E_{u,i} = E_{su,i} / \xi_{u,i} \quad (4)$$

$$E_{d,i} = E_{sd,i} / \xi_{d,i} \quad (5)$$

为保证上下行车次的列车满载率均能在控制指标值范围内, 将 $E_{u,i}$ 和 $E_{d,i}$ 的较小值作为车站 i 的 10 min 粒度进站控流阈值 C_i , 即:

$$C_i = \min(E_{u,i}, E_{d,i}), \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (6)$$

设车站 j 为换乘站, 则该站的上车乘客由进站乘客和换入乘客两部分组成, 需要在式(6)的基础上, 根据换乘站这两部分客流的比例再进行一次换算, 方可得到该换乘站的进站控制阈值。换乘站 j 分时进站比例 $\lambda_{e,j}$ 的计算式为:

$$\lambda_{e,j} = \omega_{e,j} / (\omega_{e,j} + \omega_{s,j}) \quad (7)$$

式中:

$\omega_{e,j}$ ——换乘站 j 的分时进站客流量;

$\omega_{s,j}$ ——换乘站 j 的分时换入客流量。

由此可得到换乘站 j 的 10 min 粒度进站控流阈值 C_j 的计算式为:

$$C_j = \lambda_{e,j} \min(E_{u,i}, E_{d,i}) \quad (8)$$

2 基于列车满载率的控流案例分析

2.1 列车满载率计算分析

以 2020 年 4 月 15 日(星期三)的北京轨道交通 5 号线(以下简称“5 号线”)为例对控流过程进行分析。当日北京城市轨道交通的列车满载率控制指标值为 50%。

1) 以 2020 年 4 月 13 日(星期一)作为相似日对 5 号线的客流 OD 进行预测, 然后利用综合清分模型对各预测客流 OD 的出行链进行推演。采用本文提出的控流模型计算该线各车站的分时进站控制阈值, 并将该阈值作为 4 月 15 日控流的参考阈值。

2) 采集得到 2020 年 4 月 15 日早高峰 07:40—08:30 时段内 5 号线部分车站的预测进站量及实际进站量, 并与 10 min 粒度控流阈值进行对比, 其结果如图 2 所示。

因 5 号线早高峰时段下行的列车拥挤度较高, 故选取与图 2 车站进站时段相对应的各下行运行车次的列车最大满载率进行计算, 其结果如图 3 所示。

由图 2 及图 3 可知: 5 号线早高峰时段 07:40—08:30 内各站的预测进站量均未超过控制阈值, 但天通苑北站、立水桥南站、大屯路东站 3 个车站的实

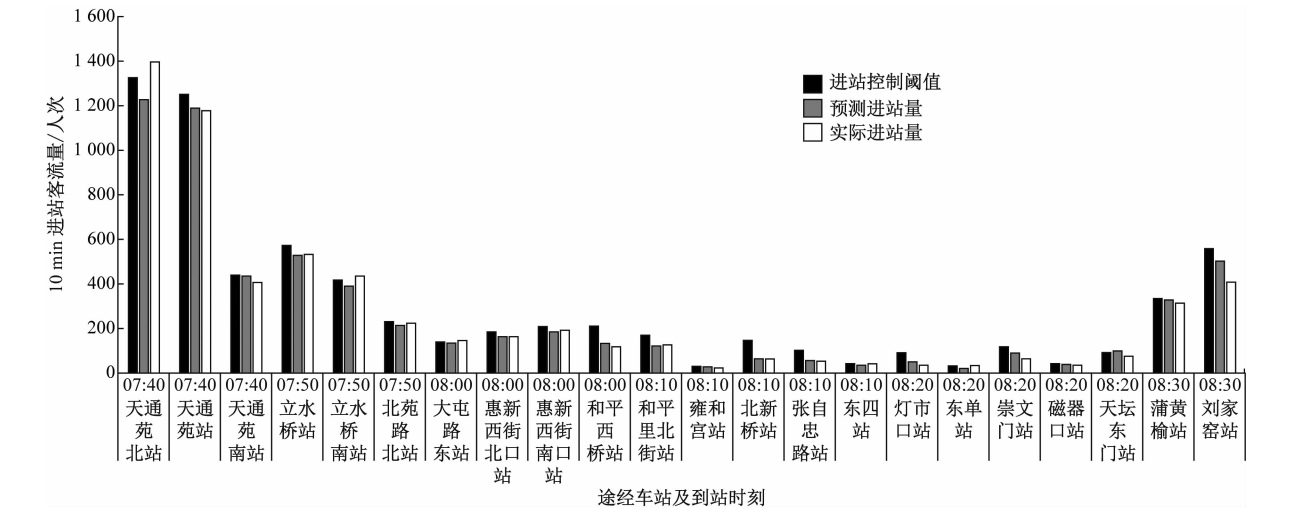


图2 早高峰5号线部分车站10 min粒度控流阈值与预测进站量、实际进站量的对比(2020年4月15日数据)

Fig. 2 Comparison of 10-min granularity level control threshold, predicted and actual inbound volumes during the morning peak at some stations on Line 5 (data of April 15, 2020)

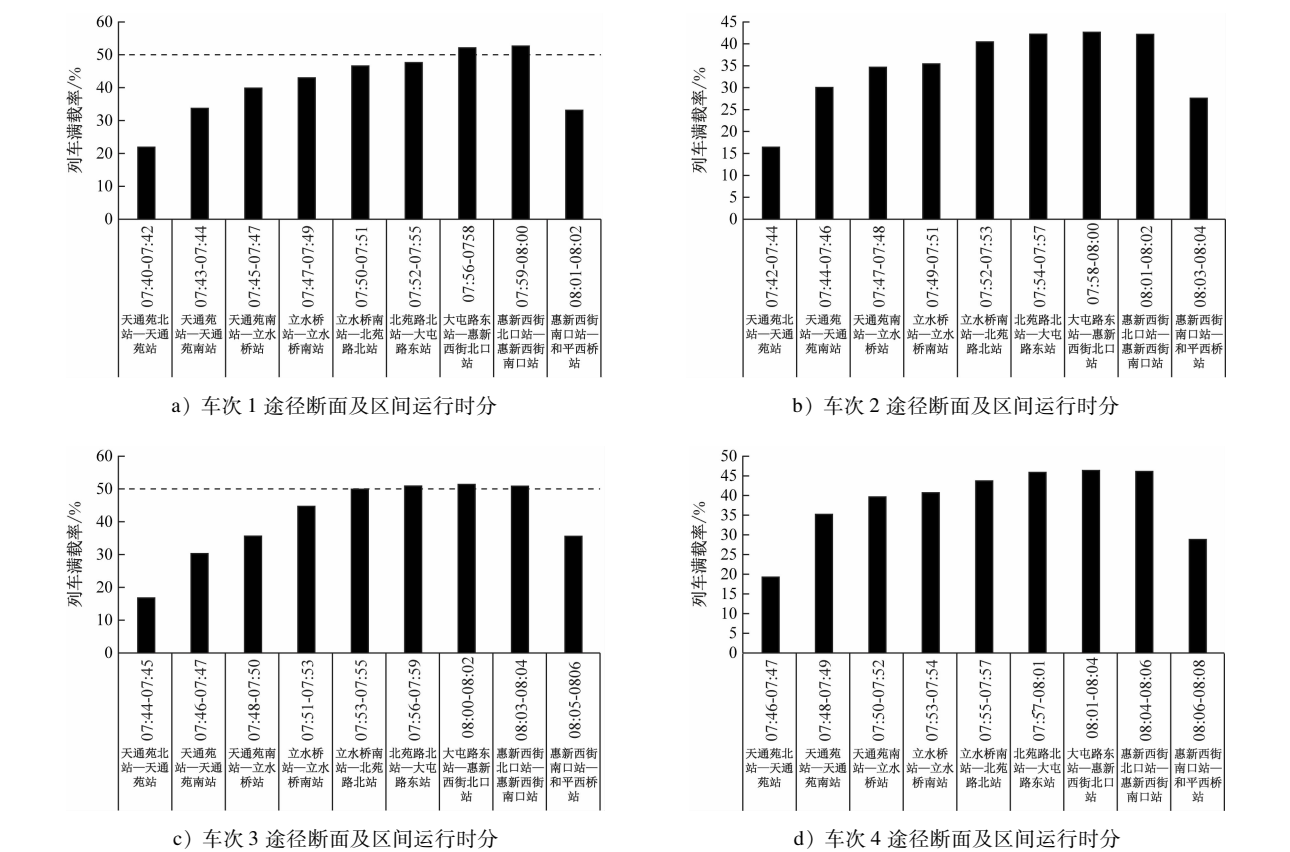


图3 早高峰5号线下行部分车次的列车满载率(2020年4月15日数据)

Fig. 3 Load factor of some down line trains during the morning peak on Line 5 (data of April 15, 2020)

际进站量大于预测进站量,且超过了控制阈值;除5个车次的列车最大满载率超过控制指标值(50%)外,其余车次的列车满载率均低于50%。这5个车次的列车最大满载率也均低于55%,总体上满足5

号线控流目标的要求。

2.2 控制指标值调整对进站控流阈值的影响

为对比不同控制指标值对进站控流阈值的影响,本文采用40%的控制指标值,重新计算了5号

线该控流日的进站控流阈值。以 5 号线天通苑站为例,将 40% 和 50% 两个控制指标值下计算得到的车站全运营时段的 10 min 进站控制阈值进行对比,其结果如图 4 所示。

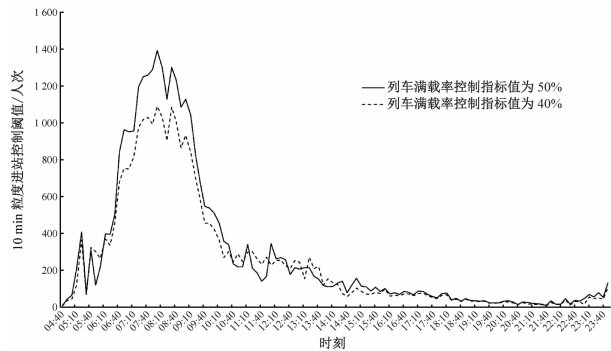


图 4 两个控制指标值下 5 号线天通苑站的 10 min 粒度进站控流阈值对比(2020 年 4 月 15 日数据)

Fig. 4 Comparison of 10-min inbound granularity level control threshold of Tiantongyuan Station on Line 5 under two control index values (data of April 15 2020)

由图 4 可知:相比 50% 的控制指标值,依据 40% 控制指标值计算得到的控流阈值在高峰时段更低,但非高峰时段二者的差别不大。究其原因,是因为该控流日 5 号线天通苑站非高峰时段的进站客流不多,各车次的列车满载率基本不超过 20%,进站控制阈值仅在高峰时段起作用。

3 结语

本文提出了基于列车满载率的进站客流控制模型,设置车站进站量控制阈值时将非换乘站和换

乘站分别考虑,可在源头上有效控制进站客流量,进而实现线网的客流协同控制。该模型以线路的列车计划运行车次的列车满载率为控制指标,可对进站客流进行增加或减少双向调节,从而在疫情防控要求下最大限度满足乘客的出行需求。

基于列车满载率的进站客流控制模型对分时预测精度要求较高,本文采用 10 min 粒度控制进站客流量,符合运营生产的实际要求。因此,该控流模型具有普适性,在疫情的实践中已证明其科学性及其有效性。该模型还可应用于各类需要量化的客流分析控制场景,如疫情恢复后常态化大客流车站的精准控流、线网运力运量匹配分析等。

参考文献

[1] 许心越. 城市轨道交通车站服务能力计算与能力适应性评估 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
XU Xinyue. Calculation of station service capacity and adaptability in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
[2] 姚向明. 城市轨道交通网络动态客流分布及协同流入控制理论与方法 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
YAO Xiangming. Theory and method of dynamic passenger flow distribution and coordinated inflow control for urban rail transit network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
[3] 谢丽平. 城市轨道交通线网多站协同客流控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
XIE Liping. Research on passenger flow control with multi-station coordination in subway networks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

(收稿日期:2021-01-21)

(上接第 45 页)

WU Chuanhui, QING Yun, WU Chen, et al. Design of on-line detection system of the hard point of catenary for metro vehicle [J]. China Measurement & Test, 2020, 46(1): 77.
[5] 别致, 余志斌. 基于 LBP 和 HOG 决策融合的高速列车受电弓检测 [J]. 电气化铁道, 2018, 29(5): 68.
BIE Zhi, YU Zhibin. LBP and HOG decision fusion based high speed train pantograph inspection [J]. Electric Railway, 2018, 29(5): 68.
[6] BARMADA S, TUCCI M, MENCI M, et al. Clustering techniques applied to a high-speed train pantograph-catenary subsystem for electric arc detection and classification [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(1): 85.
[7] DE SAXE C, CEBON D. Measurement of articulation angle by image template matching [J]. Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(14): 3801.
[8] 伍川辉, 吴琛, 杨恒, 等. 基于 LabVIEW 图像处理的动态拉出值检测方法 [J]. 中国测试, 2018, 44(6): 95.
WU Chuanhui, WU Chen, YANG Heng, et al. The dynamic stagger value detection method based on image processing technology of LabVIEW [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(6): 95.
[9] HUANG S. Arc detection and recognition in pantograph-catenary system based on convolutional neural network [J]. Information Sciences, 2019, 501: 363.
[10] 刘中, 陈伟海, 吴星明. 基于物体信息的图像显著性区域检测 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35): 286.
LIU Zhong, CHEN Weihai, WU Xingming. Salient region detection based on objectness cue [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(35): 286.

(收稿日期:2020-10-27)