doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.02.024

地铁站水冷空调机组 IPLV 计算方法讨论

王怡臻,李晓锋

(清华大学建筑学院,北京 100084)

摘 要:大量测试数据表明,在现行地铁环控系统中,冷机大部分时间处于部分负荷状态,因此用于评判地铁站 冷水机组部分负荷综合性能的 IPLV 值的计算方法值得研究。使用了一种逐时计算地铁车站负荷的方法,计算得 出北京市、上海市、广州市典型地铁标准站全年的逐时负荷曲线。根据全年逐时负荷曲线统计了 3 个城市地铁车 站不同负荷率区间占比情况,从而得出地铁车站水冷空调机组 IPLV 的计算办法。计算结果显示,地铁站空调季 部分负荷情况占比很高,低于 25%负荷率的情况占空调季运行时间的接近 1/3,低于 50%负荷率占比超过运行时 间的 50%。考虑到地铁车站通常设立两台冷水机组的情况,对使用两台机组的情况进行了讨论,使用两台冷水机 组的情况下,低于 25%负荷率的情况变为 15%,但是还是高于团体标准值 1.5%;50%以上负荷率区间从 40%增 加到 77%,与团体标准值接近。研究结果对于地铁空调系统设备选型和运行节能具有一定的指导价值。 关键词:地铁;环控系统;冷机;综合部分负荷性能系数;负荷预测 中图分类号:U231 文献标志码:A 文章编号:1672-6073(2022)02-0155-07

IPLV of Water Chillers Capacity in Underground Railway Stations

WANG Yizhen, LI Xiaofeng

(School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Chillers in the current subway environment control system are under partial load most of the time from a large amount of test data. This study aims to revise the formula of the integrated part load value (IPLV) used to judge the comprehensive performance of a subway station chiller under partial load. This study used a method of calculating hourly the load of subway stations throughout the year to obtain the hourly load curves in Beijing, Shanghai, and Guangzhou. The load rate sections in the three cities were counted from the load duration curve. The results show that partial load accounts for a high proportion of the subway station air-conditioning season. A load rate below 25% accounts for nearly 1/3 of the operating time, and a load rate below 50% accounts for more than 50%. If two chillers are used, the proportion of low load rate decreases, but is still higher than the group standard value. The results are instructive for subway air-conditioning system equipment selection and energy saving.

Keywords: metro; ventilation and air-conditioning system; underground railway station; water chiller; integrated part load value; cooling load prediction

地铁通风空调系统,也称为地铁环控系统,是地 铁车站内营造乘客正常乘车舒适环境和保证地铁系统 正常运行的必不可少的一部分^[1]。地铁车站负荷大、 能耗高,环控系统能耗占比高^[2]。《中国建筑节能发展

WANG Yizhen, LI Xiaofeng. IPLV of water chillers capacity in underground railway stations[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 155–161.

收稿日期: 2021-04-19 修回日期: 2021-06-21

第一作者: 王怡臻, 女, 硕士研究生, 从事地铁环控系统能耗研究, wangyizh19@mails.tsinghua.edu.cn

基金项目:"十三五"国家重点研发计划课题(2018YFC0705006)

引用格式:王怡臻,李晓锋.地铁站水冷空调机组 IPLV 计算方法讨论[J].都市快轨交通,2022,35(2):155-161.

报告》指出,中国北方地区,地铁站通风空调系统占 地铁系统总能耗的约30%,而这一数字在南方地区达 到了 50%^[3]。中国地铁车站环控系统通常使用水冷式 冷水机组进行制冷,其中冷机能耗在环控系统总体能 耗中占比较大。对北京市地铁线路的调研显示,北京 市地铁环控系统冷机能耗达到 40%^[4]。根据《冷水机 组能效限定值及能源效率等级》国家标准规定,地铁站 通常使用的水冷式机组的一级能效值需要达到 5.6^[5], 而在实际运行过程中,很多地铁站冷机的 COP 难以达 到甚至远低于这一水平^[4]。因此,提高地铁站冷机的 能效比在环控系统节能控制中显得尤为重要。

地铁建筑处于地下,出入口开放,列车运行导致的 活寒风从出入口和隧道引入了大量无组织渗风负荷[2], 其中出入口渗风负荷受外界环境参数影响较为显著, 不同季节室外环境的变换将对车站公区空调负荷产生 巨大影响,同时一天内不同时段的发车对数变化也会 严重影响渗风负荷的大小^[6]。

测试数据表现出,地铁站运行时环控系统长期处 于部分负荷状态[7]。其原因是地铁公区空调负荷受到 发车对数、室外环境参数、地铁车站设计参数、活塞 风模式等因素的影响,相较普通商业建筑负荷变动更 大。大量冷机性能测试实测表明,螺杆冷水机组在低 于 50%负荷率时, COP 显著下降。因此在对地铁站冷 机进行选型时,应着重评判其部分负荷性能,不能仅 比较额定能效比。

地铁建筑负荷特点与典型办公建筑的负荷特点^[8] 有很大区别,目前通常采用 IPLV(综合部分性能负荷 系数)值来评判水冷式冷水机组部分负荷性能。中国目 前使用的 IPLV 计算方法是某一区域内典型建筑类型 的平均,并不适用于具有独特能耗特点的地铁车站水 冷机组^[9]。文献[9]通过计算并分析地铁车站空调季逐 时负荷,首次提出了针对地铁水冷机组计算 IPLV 的 方法,并应用于《水冷直接制冷式地铁车站用空调机 组性能检测方法》中。但是其计算过程较为简化,首 先固定发热量取值偏大,例如照明功率密度取值偏大, 电梯计算使用额定功率;其次是无组织渗风量取为定 值,而实际上无组织渗风量会随着发车对数而变化。 这两点都造成了逐时负荷曲线趋于平稳, 波动较小, 与实际情况有一定出入。

现采用一种依据建筑参数、发车对数和车站活塞 风形式等设计参数计算地铁标准站空调季逐时负荷的 计算方法、计算寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖

1 地铁站公区空调季逐时负荷模拟

研究对象为地下两层岛式标准站,使用屏蔽门系 统,其中站厅建筑面积为1842 m²,站台建筑面积为 $1\ 210\ {\rm m}^2$.

1.1 计算方法介绍

地铁环控系统分为大系统和小系统,分别负责站 厅站台等公共区域环境控制和设备管理用房的环境控 制^[8]。计算的地铁车站冷机只负责大系统负荷,因此 以大系统为研究对象计算。

地铁车站公区逐时总负荷可由如下公式算出[6]:

$$Q_{\rm SH} = Q_{\rm person} + Q_{\rm infiltration} + Q_{\rm PSD} + Q_{\rm enve} + Q_{\rm fan} + Q_{\rm eq} + Q_{\rm mech-air}$$
(1)

其中 Q_{person}, Q_{infiltration}, Q_{PSD}, Q_{enve}, Q_{fan}, Q_{eq}分别为 人员热湿负荷、无组织渗风负荷、屏蔽门传热量、外 围护结构得热、风机温升负荷、照明设备散热量、机 械新风负荷。

1.1.1 人员热湿负荷

人员热湿负荷的计算公式为

 \mathbf{O}

$$Q_{\text{person}} = q_{\text{person}} * (G_{\text{c}} + G_{\text{P}}) v$$

$$G_{\text{c}} = A_{\text{in}} \frac{a_{1}}{60} + A_{\text{out}} \frac{b_{1}}{60}$$

$$G_{\text{p}} = A_{\text{in}} \frac{a_{2}}{60} + A_{\text{out}} \frac{b_{2}}{60}$$
(2)

式中 Q_{person} 为人员散热量, q_{person} 为一个正常成年男子 的全热散热, $G_c 和 G_p 分别为站厅和站台的人数, A_m$ 、 A_{out} 为地铁站逐时进出站人数, a_1 、 a_2 为进站时台平 均停留时间, b1、b2 为出站时站厅站台平均停留时 间, min。

a1、a2为乘客进站时在站厅站台的平均停留时间, a_1 一般为 2 min, a_2 取列车发车间隔时间的 1/2, min; b_1 、 b_2 一般可以取 1.5 min。 q_{person} 的取值可以根据《实用 供热空调设计手册》确定,这里将其定为0.182 kW/人^[11]。 Ain、Aout 的值通过以往测试过的地铁站的实测数据中 获得,远期的逐时客流量取值如表1所示。

1.1.2 无组织渗风带来的冷负荷

与其他建筑不同,地铁站有直接与外界环境连接的

围护结构	勾传热面积,	m^2 ; t_0 ,	ta代表的	室外和	站内温	l度,
℃;∂代	表隧道内壁	对流传热	热系数,	$W/(m^2)$	·℃);	δ_1
δ_2 代表随	遂道混凝土厚	夏度和土	壤层厚度	£, m; .	λ_1, λ_2	为导
热系数,	λ1代表混凑	社的导	热系数,	λ2 代表	長土壤	的导
执系数,	$W/(m^2 \cdot C)$:					

表 2 远期渗风量取值

Table 2 Long-term unorganized infiltration air volume				
发车对数/对	出入口渗风量/(万 m ³ ·h ⁻¹)	屏蔽门渗风量/(万 $m^3 \cdot h^{-1}$)		
12	1.41	1.77		
14	1.56	1.97		
21	1.77	2.50		
23	1.83	2.55		
25	1.99	2.53		
26	2.14	2.49		

$$Q_{\rm PSD} = \frac{1}{1000} K_{\rm PSD} F_{\rm PSD} \left(t_{\rm tune} - t_{\rm a} \right) \tag{5}$$

式中, Q_{PSD} 代表屏蔽门传热量,kW; F_{PSD} 代表围护结构传热面积,m²; t_{tune} 代表隧道空气温度, \mathbb{C} ; K_{PSD} 代表屏蔽门传热系数,这里我们认为屏蔽门为玻璃材质,W/(m²· \mathbb{C})。

获得了上海市和广州市全年隧道温度模拟结果,以及北京市近期和远期空调季隧道温度的取值^[13], 在计算逐时负荷时对隧道温度的取值如图 1、图 2 所示。





北京市地铁隧道温度根据工程经验取值为近期隧 道空气温度 22℃,远期隧道空气温度 28℃。

1.1.4 站内照明、电梯设备发热量

照明系统逐时能耗为

$$Q_{\text{light}} = P_{\text{light}} \times F \times \frac{\tau_{\text{light}}}{1\,000} \tag{6}$$

式中, Q_{light} 为照明系统逐时能耗,kWh; P_{light} 是照明

表 1 远期逐时客流量取值 Table 1 Long-term hourly passenger number

人次

出入口,由于列车运行导致的无组织新风大量进入车站,外界热湿空气进入站厅、站台成为系统冷负荷。 其值可以用如下公式进行计算:

$$Q_{\text{infiltration}} = \rho \cdot (G_1 \Delta h_1 + G_2 \Delta h_2)$$
(3)

式中, $Q_{infiltration}$ 为车站出入口无组织渗风得热量,kW; G_1 为出入口到站厅无组织渗风量,m³/h; G_2 为经过屏 蔽门进入站台区域的无组织渗风量。 Δh_1 、 Δh_2 分别为 室外空气和站厅、隧道空气和站台的焓差。 ρ 为空气 密度,kg/m³。

*G*₁取值根据实际地铁线路运行远期实测数据给出、*G*₂的值通过 STESS 软件模拟确定,随发车对数的变化而变化,计算案例中排热风机关闭,远期发车对数下出入口渗风量和屏蔽门渗风量的取值如表 2 所示。

1.1.3 围护结构传热和屏蔽门系统传热

围护结构传热量可由下式计算得出

$$Q_{\text{envelop}} = \frac{1}{1000} F_{\text{envelop}} \left(t_0 - t_a \right) / \left(\frac{1}{\partial} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) \quad (4)$$

式中, $Q_{envelop}$ 代表围护结构传热量, kW; $F_{envelop}$ 代表

功率密度, W/m²; *F* 是照明面积, m²; *τ*_{light}是日照明时间, h。



Figure 2 Tunnel air temperature in Guangzhou

*P*light 的取值从 GB50034-2013《建筑照明设计标 准》中获得,高档地铁站的现行值 9 W/m²,目标值 8 W/m²;普通地铁站的现行值 5 W/m²,目标值 4.5 W/m^{2[11]}。

垂直交通能耗的计算方法采用了文献[14]中的方 法,其他设备的发热量使用其功率近似计算。

1.1.5 机械新风负荷

机械新风负荷为

 $Q_{\text{mech} \text{ air}} = \rho \times G_{\text{mech} \text{ air}} \times \Delta h_1 / 3\ 600 \tag{7}$

式中, $G_{\text{mech}_{air}}$ 为机械新风量, m^3/h , Δh_1 为新风与室 内空气的焓差。

机械新风是为了保证站内人员健康需求引入的新风,为尽可能减少新风引入带来的能耗增加,地铁公区通风空调系统在小新风模式下的机械新风量 G_{mech_air}取值由总新风需求量与无组织渗风量的差值确定。 全新风和通风模式下的机械新风量根据室内冷负荷确定。

1.2 逐时负荷模拟结果

选取夏热冬暖、夏热冬冷地区、寒冷地区的3个 代表城市:广州、上海、北京,根据3地地铁运营方 提供的数据,3个城市空调季的具体时间如表3所示。

	表 3	不同城市空调季时间
Table 3	Refrig	geration season in different cities

城市	空调季时间
北京	6.1-10.10
上海	6.1-10.15
广州	4.15-11.15

利用逐时能耗计算模型分别计算了 3 个城市远期 空调季的逐时冷负荷。图 3、图 4、图 5 为北京、上海、 广州运行远期的逐时负荷计算结果。通过逐时空调负

158 URBAN RAPID RAIL TRANSIT

荷模拟,计算出北京市远期逐时负荷的最大值 162 kW; 上海市远期逐时负荷的最大值为 175 kW;广州市远期 逐时负荷的最大值为 215 kW。由于客流量和发车对数 规律变化,3 个城市的远期逐时负荷均表现出以天或 星期为周期的周期性变化,同时也有随着室外气象参 数导致的变化。













1.3 部分负荷情况计算

根据上述计算结果,绘制出将3个城市远期逐时 负荷按大小顺序排序的柱状图,如图6、图7、图8, 并以不保证50h的逐时负荷最大值作为100%负荷, 分别统计0~25%,25%~50%,50%~75%,75%~

32.4

28.6

28.3

313



100%负荷的小时数以计算不同负荷率占比情况,见表4。

Figure 8 Load duration curve in Guangzhou

2 IPLV 计算

2.1 IPLV 系数计算结果

文献[9]通过计算得到的《水冷直接制冷式地铁 车站用空调机组性能检测方法》中规定的寒冷地区、 夏热冬冷地区、夏热冬暖地区的 IPLV 计算公式分 别为:

 $IPLV_1 = 8.4\% \times A + 46.0\% \times B + 40.5\% \times C + 5.1\% \times D(8)$

$$\begin{split} IPLV_2 &= 10.7\% \times A + 53.0\% \times B + 31.8\% \times C + 4.5\% \times D \ (9) \\ IPLV_3 &= 18.2\% \times A + 59.2\% \times B + 21.2\% \times C + 1.5\% \times D \ (10) \end{split}$$

表 4 负荷率区间占比统计					
Table 4 Load rate section in three cities					
负荷率	北京市	上海市	广州市		
75%~100%	10.9	12.4	10.4		
50%~75%	24.4	26.6	29.9		

26.4

38.3

 $25\% \sim 50\%$

 $0 \sim 25\%$

将计算结果与文献[9]进行对比。绘制图 9。根据 图表可以看出, 文献虽然考虑到了冷机实际运行中的 部分负荷工况, 计算了空调季逐时负荷, 但是由于负 荷计算取值较为简化,计算结果与实际情况有所出入。 标准计算结果中 0~25%负荷率区间占比计算结果过 小,3个气候区的计算结果均不到10%,而本文计算 值接近或超过30%。分析其原因,首先,在进行负荷 计算时, 文献计算的固定发热量取值过大, 例如单位 面积照明功率取值偏大、认为电梯时刻处于满负荷运 行状态等,因此文献计算结果中 0~25%负荷率区间 占比计算结果很小。其次,在计算渗风负荷和新风负 荷时,取渗风量为固定值,而实际上车站出入口渗风 量与屏蔽门渗风量是跟发车对数有相关关系的,一天 中发车对数是逐时变化的,取定值会减少负荷的波动, 从而使处于25%~75%负荷率区间的情况增加,除了早 晚高峰之外,其他时刻发车对数较小,渗风量较小,因 此除早晚高峰之外大部分时间车站公区负荷很小。这两 个原因导致地铁车站空调季低负荷情况占比很大。





2.2 同时开启多台冷机情况

现有的 IPLV 计算方法通常默认建筑物的负荷由 单一冷机承担,实际情况下,普通公共建筑冷机配置 情况较为复杂,冷机群控方式也没有统一规定,IPLV 计算法则不适用于多台冷水机组同时承担系统冷负荷的情况^[15]。地铁站的公区负荷通常使用 2 台冷量相同的冷机承担。针对 2 台冷机共同承担公区负荷的情况,选取两台相同冷量的冷机,冷量为峰值负荷的 1/2,定义如下运行模式:

当系统负荷率<50%时,开启1台冷机,此时机组 负荷率为系统负荷率的两倍;系统负荷率>50%时,开 启2台冷机,各负责一半系统负荷,2台冷机的机组 负荷率相同,此时均与系统负荷率相等。根据以上运 行模式,以广州市远期负荷计算结果为例,统计机组 负荷率,结果如表5,将结果绘制成图10。

表 5 不同冷机台数下负荷率占比统计 Table 5 Load rate section under the condition of using





使用两台冷机的情况下,低于 25%负荷率的情况 变为 15%,但是还是高于团体标准值 1.5%;50%以上 负荷率区间从 40%增加到 77%,与团体标准值接近。

3 结论

采用了一种依据建筑参数、发车对数和车站活塞 风形式等设计参数计算地铁标准站全年逐时负荷的计 算方法,计算了寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖 地区的典型城市全年(空调季)的逐时空调负荷,并计 算不同负荷率的小时数占比与《水冷直接直冷式地铁 车站用空调机组性能检测方法》中规定的 IPLV 计算 公式进行比较。 计算结果与团体标准《水冷直接制冷式地铁车站 用空调机组性能检测方法》的规定值有一定不同,主 要原因在于负荷计算方法的以下几点不同:①在计算 地铁车站负荷时,固定发热量的取值对负荷率区间占 比的计算结果有较大影响,应采用更为精确的垂直交 通计算模型和符合实际的照明功率密度;②计算出入 口渗风负荷和屏蔽门渗风负荷时,应考虑由于逐时发 车对数变化而导致的渗风量变化,机械新风量的确定 应考虑两种情况,当室外焓值高于室内焓值时,应由 总新风需求量与无组织渗风量的差值确定,当室外焓 值低于室内焓值时,应开启全新风模式。

计算结果显示,地铁站空调季部分负荷情况占比 很高,低于 25%负荷率的情况占空调季运行时间的接 近 1/3,低于 50%负荷率占比超过运行时间的 50%。 即使考虑实际使用 2 台冷机的情况,低负荷率占比有 所降低,但是仍高于团体标准值,因此在地铁用水冷 机组选型时要格外重视冷机的部分负荷性能。

参考文献

 罗佳. 地铁通风空调系统节能运行策略研究[D]. 广州: 广州大学, 2015.

LUO Jia. Study on operation strategy of energy-saving in ventilation and air conditioning system of metro[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015.

[2] 杨乐. 地铁站用能特征与节能策略研究[D]. 北京:清 华大学, 2017.

YANG Le. Research on the energy use characteristics and energy saving strategies of metro stations[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

- [3] 中国建筑节能年度发展研究报告 2018[M]. 北京: 中国 建筑工业出版社, 2018.
- [4] 张浩. 地铁车站通风空调大系统节能控制的设计与实践[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2015.
 ZHANG Hao. The subway station ventilation air conditioning system design and practice of energy saving control[D].
 Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 冷水机组能效限定值及能效等级: GB 19577-2015[S]. 2015.
- [6] 李俊. 基于现场实测的地铁车站空调负荷计算方法研究[D]. 北京:清华大学,2009.
 LI Jun. Subway station air-conditioning load calculation method research based on field measurement[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [7] 张金花, 檀姊静, 檀妹静, 等. 地铁通风空调系统运行

现状及能耗调研分析[J]. 安装, 2020(4): 52-55.

[8] 王碧玲, 邹瑜, 孙德宇, 等. 冷水机组综合部分负荷性 能系数(IPLV)计算公式的更新[J]. 暖通空调, 2015, 45(10): 23-29.

WANG Biling, ZOU Yu, SUN Dening, et al. Revision of integrated part-load value (IPLV) formula for a chiller[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2015, 45(10): 23-29.

- [9] 曲凯阳, 曹阳, 郭旭, 等. 地铁车站水冷直接制冷空调 机组 IPLV 计算方法[J]. 建筑节能, 2019, 47(11): 52-57. QU Kaiyang, CAO Yang, GUO Xu, et al. Methodology of calculating IPLV for air handling unit combined with water cooled direct-type refrigerating system for subway stations[J]. Building energy efficiency, 2019, 47(11): 52-57.
- [10] 赵杰. 地铁通风空调系统能耗分析与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
 ZHAO Jie. Study and analysis of subway ventilation and air conditioning system energy consumption[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

[11] 建筑照明设计标准(附条文说明): GB 50034-2013[S].

2013.

- [12] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑 工业出版社, 2008.
- [13] ZHANG Y, LI X F. Monitoring and analysis of subway tunnel thermal environment: a case study in Guangzhou, China[J]. Sustainable cities and society, 2020, 55.
- [14] SU Z Y, LI X F. Sub-system energy model based on actual operation data for subway stations[J]. Sustainable cities and society, 2020: 52.
- [15] 贾晶,赵锡晶,李杰.用 IPLV/NPLV 值评估冷水机组 全年能耗的局限性[J].暖通空调,2010,40(3):19-22.
 JIA Jing, ZHAO Xijing, LI Jie. Limitation of estimating the annual energy consumption of water chiller units by IPLV/NPLV[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2010, 40(3): 19-22.

(编辑: 王艳菊)

(上接第154页)

参考文献

 潘昭宇.都市園轨道交通规划建设关键问题研究[J].都 市快轨交通, 2020, 33(6): 7-14.
 PAN Zhaoyu. Key issues in rail transit planning and construction in metropolitan areas[1]. Urban ranid rail transit

struction in metropolitan areas[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(6): 7-14.

- [2] 潘昭宇,唐怀海,王亚洁,等.加快构建都市圈多层次 轨道交通体系[J]. 宏观经济管理,2020(11): 33-38.
- [3] 张鹏,余乐,陈园园.城市轨道交通AFC系统移动支付 互联互通探讨[J].电子技术与软件工程,2019(18):4-5.
- [4] 郑丽杰.都市圈轨道交通互联互通实施条件及开行方案研究[D].北京:北京交通大学,2020.
 ZHENG Lijie. Study on the implementaion conditions and operation plan for rail transit based on interoperability in metropolitan areas[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [5] 贾凤娇,陈震寰.跨区域城际交通一体化政策研究及建 议:以长三角城际铁路建设为例[J].交通与港航,2019, 6(6):43-49.

JIA Fengjiao, CHEN Zhenhuan. Cross-regional intercity traffic integration policy study and suggestions: taking the Yangtze River delta inter-cityrailway as an example[J]. Communication & shipping, 2019, 6(6): 43-49.

[6] 张鹏, 王健, 吴娟, 等. 南京地铁移动支付关键技术的 研究及应用[J]. 都市快轨交通, 2020, 33 (6): 146-150. ZHANG Peng, WANG Jian, WU Juan, et al. Research and application of key mobile payment technologies in the Nanjing metro[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(6): 146-150.

- [7] 孙瑞燕, 吴金洪, 谢美丽, 等. 城市轨道交通票制与票 价研究[J]. 城市公共交通, 2021(3): 53-56.
 SUN Ruiyan, WU Jinhong, XIE Meili, et al. Research on ticket system and fare of urban rail transit[J]. Urban public transport, 2021(3): 53-56.
- [8] 杨承东, 刘洋. 智慧城轨自动售检票系统的技术发展趋势[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(1): 52-56.
 YANG Chengdong, LIU Yang. Technical development trend of AFC system of smart urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(1): 52-56.
- [9] 石文静,陈昕,丰顶胜,等. 杭州与绍兴城轨线网自动 售检票系统换乘方案[J]. 铁道通信信号,2019,55(5): 88-90.
- [10] 刘鹏. 城市群区域城际轨道交通网络运营系统递阶协 调优化研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2017, 15(3): 109-115.

LIU Peng. Hierarchical coordination optimization of an intercity rail transit network system in urban regions[J]. Journal of transportation engineering and information, 2017, 15(3): 109-115.

(编辑: 王艳菊)