

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2021.01.010

城市轨道交通车站 闸机通过能力影响因素研究

耿一凡, 陈宽民, 马超群, 孙杏芳

(长安大学运输工程学院, 西安 710064)

摘要: 为研究地铁站闸机使用不均衡对闸机通过能力的影响, 以西安地铁2号线刷卡数据与车站周边土地利用结构为基础, 对地铁车站乘客的闸机选择行为进行研究, 使用最优尺度回归模型, 定量分析影响闸机通过能力的因素。结果显示, 闸机布置方向、用户数量、闸机编组数量、车站周边用地属性对闸机通过能力有显著影响。平均修正系数, 平行式闸机组比垂直式闸机组高 0.301; 随着编组数量增加, 闸机组通过能力折损程度呈现阶梯式上升; 垂直式闸机组通过能力, 对外交通枢纽、居住区、开发区车站明显高于商业区、混合区车站。据此给出不同情况下闸机组通过能力的修正系数及计算公式, 并提出闸机布置建议供新线站厅建设参考。

关键词: 城市轨道交通; 自动检票闸机; 通过能力折损; 最优尺度回归

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2021)01-0057-06

Factors Affecting the Capacity of an Automatic Gate Machine in Urban Rail Station

GENG Yifan, CHEN Kuanmin, MA Chaoqun, SUN Xingfang

(Transportation Engineering College, Chang'an University, Xi'an 710064)

Abstract: To analyze the influence of gate imbalance on the passing capacity of gates, this study analyzes the gate selection behavior of passengers. Based on land use structure and data on the entry and exit station of Xi'an Metro Line 2, an optimal scale regression model is adopted to explore the significant determinants influencing the unbalanced utilization of automatic ticket gates. The result indicates that the positional relationships between gates and passenger walking direction, passenger flow intensity, gate configuration quantities, and land use structure have significant effects on the unbalanced utilization of automatic gates and indicate that the capacity reduction of the gate has a stepwise rise with an increase in configuration quantity. Furthermore, this paper provides the gate group capacity adjustment coefficient for each case, as well as some suggestions regarding gate group configurations to improve automatic gate capacity.

Keywords: urban rail transit; automatic gate machine; capacity reduction; optimal scale regression

1 研究背景

在城市轨道交通系统中, 车站是服务乘客的基本

单元, 随着车站自动售检票系统的广泛运用, 轨道交通车站的服务更加趋向于自动化。但是在《地铁设计规范》^[1]中, 仅给出了自动检票闸机通过能力的理论

收稿日期: 2019-10-15 修回日期: 2019-11-01

第一作者: 耿一凡, 男, 硕士研究生, 主要从事城市轨道交通线网规划及管理方面的研究, 382123868@qq.com

导师简介: 陈宽民, 男, 教授, 博士生导师

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871027)

引用格式: 耿一凡, 陈宽民, 马超群, 等. 城市轨道交通车站闸机通过能力影响因素研究[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(1): 57-62.

GENG Yifan, CHEN Kuanmin, MA Chaoqun, et al. Factors affecting the capacity of an automatic gate machine in urban rail station[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(1): 57-62.

参考值。国内外很多学者针对闸机的服务效率进行了研究:熊英男、徐婵枝等使用排队论,对闸机排队现象进行了分析^[2-3];吴娇蓉等研究了票质对乘客通过闸机速度的影响^[4];Tsang等研究了进出站闸机布局与车站客流量的关系,并提出Petri网的概念^[5]。另外,张晓天将城市规划学的空间句法引入车站设计^[6]。随着计算机仿真理论的发展,也有许多学者使用Anylogic、Witness、Viswalk等软件对乘客通过闸机的步行特性进行仿真研究^[7-9]。

在地铁车站中,通常将3~8个闸机进行编组后布置,乘客进出站时会优先选择闸机组内距离出入口更近的闸机^[7],当近端闸机排队长度超出其心理承受限度后才会选择远端闸机。这种现象会导致组内闸机利用不均衡,使闸机组的通过能力小于理论值。下面列出闸机与乘客流线的空间关系,用户数量、车站周边用地、编组数量、闸机前乘客通道宽度等影响闸机组通过能力的因素,构建最优尺度回归模型进行研究,寻求可提高闸机利用均衡度的布置及编组方案。

2 研究方法

2.1 闸机组布置形式划分

本研究将闸机组布置形式按闸机通行方向与乘客输入流线的空间关系分为两类:垂直式闸机组的通行方向与乘客流线垂直,组内各闸机距乘客输入点的距离差异大,乘客选择时博弈过程明显;平行式闸机组的通行方向与乘客流线平行,各闸机距乘客输入点的距离差异小。将全体样本数据分为垂直式闸机组与平行式闸机组进行独立样本 t 检验,结果显示两组样本方差齐性,在0.05的显著性水平下均值差异显著,因此对两组样本分别建模,两类闸机组布置形式(进站、出站闸机中均有这两类闸机形式)如图1、图2所示。

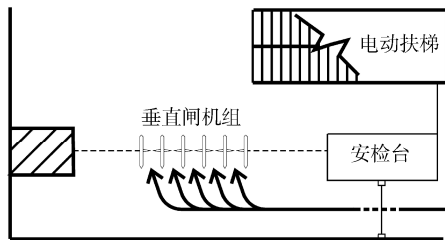


图1 垂直式闸机组布置形式
Fig. 1 Vertical gate group layout

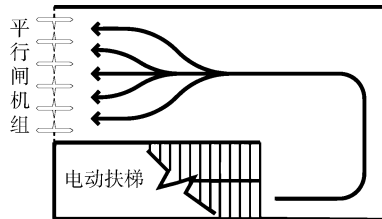


图2 平行式闸机组布置形式
Fig. 2 Parallel gate group layout

2.2 通过能力折损评价指标构建

为衡量闸机组通过能力的折损程度,本研究构建了一个修正系数作为评价指标,将该系数与闸机组理论通过能力相乘可计算其实际通过能力。该系数的表达式如下:

$$\beta_R = \sum X_i / (N \times X_{\max}) \quad (1)$$

式中, β_R 为闸机组通过能力修正系数, N 为闸机编组数量, $\sum X_i$ 为闸机组该小时通过人数总和, $X_{\max}$ 为组内单个闸机该小时最大通过人数。

该修正系数可以反映在不同客流水平下闸机组使用的均衡度,数值越大表示闸机组使用越均衡,通过能力折损越小。

2.3 通过能力影响因素分析

1) 闸机编组数量 N 。随着闸机编组数量增加,组内各闸机距乘客输入点的距离差异会增大,在编组数量较大时会增加乘客选择远端闸机造成的时间损失,降低闸机使用均衡度,因此将闸机编组数量 N 纳入模型。

2) 用户数量 $\bar{X}_i$ 。已有研究表明,组内各闸机均有大量乘客排队时,排队耗时将明显大于乘客选择远端闸机造成的额外步行耗时,乘客将优先选择队长更短的闸机,使组内闸机的使用率趋于均衡^[7, 10]。因此,将用户数量纳入模型,以组内闸机平均小时通过人数 $\bar{X}_i$ 表示。

3) 闸机前通道宽度 W 。根据实地调查,西安地铁2号线部分车站因行人过街需求,通过护栏隔离出如图3所示的非付费区过街通道。这一措施会导致垂直式闸机组前乘客通道的宽度存在差异,大客流情况下会压缩乘客步行及排队空间,对乘客的闸机选择行为产生影响^[11]。

4) 车站周边土地利用结构 T 。城市轨道交通网络中各车站周边的用地结构不同,客流时变特点也有差异。居住、工业用地周边车站早晚高峰明显,高峰期以通勤出行为主,乘客时间价值较高。商业、文化用

地周边车站仅有晚高峰或无明显高峰,乘客出行中非强制性出行比例较大,时间价值较低。对外交通枢纽站乘客出行有明确的目标,趋向于用最短时间通过闸机前往目的地,且部分乘客携带行李,排队及通过闸机时对空间的需求较大。时间价值的差异会对乘客的闸机选择行为产生影响。本研究以车站周边 5 km² 范围内土地利用结构为依据,通过二阶段聚类法对车站进行分类,各类车站周边的用地结构如图 4 所示。

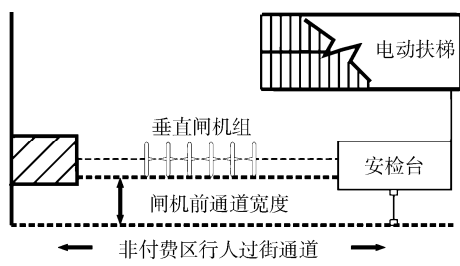


图 3 闸机前通道宽度

Fig. 3 Channel width in front of the gate group

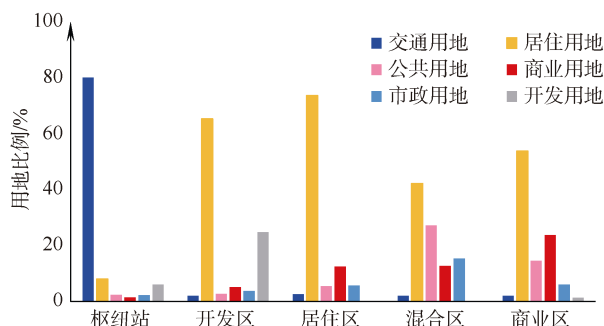


图 4 轨道交通车站二阶段聚类结果

Fig. 4 Two-step cluster result of the subway station

聚类后车站分为 5 类: 开发区车站周边, 以居住、开发用地为主, 如韦曲南站; 居住区车站周边, 以居住用地为主, 如航天城站; 混合区车站周边, 居住、商业、公共、市政用地均有一定比例, 如市图书馆站; 商业区车站周边, 以居住、商业用地为主, 如小寨站; 对外交通枢纽站周边, 以交通设施用地为主, 如北客站。分析车站刷卡数据得出, 上述各类车站的客流时变特点存在差异, 开发区、居住区车站有明显的通勤高峰, 且早高峰客流量大于晚高峰客流量; 混合区、商业区车站仅有晚高峰, 平峰客流量较大; 对外交通枢纽站客流量变化平缓, 全日客流总量较大。据此, 将基于周边用地结构的车站类型 T 纳入模型。

2.4 模型选取及数据获取

上述所列的车站类型、闸机编组数量等影响因素为类别变量, 无法使用常规多元线性回归模型进行分

析, 因此本研究选用最优尺度回归模型, 在统计建模时对该类变量进行量化。

本研究以西安地铁 2 号线 2018 年 4 月 18、20、22 日的闸机刷卡数据为基础, 通过实地调查得到车站的闸机编组数量、闸机前通道宽度、站厅层布局、周边用地结构, 在数据整理后得到 921 个闸机组样本, 数据结构如表 1 所示。

表 1 研究样本统计

Tab. 1 Sample statistics

变量名称	范围	频数/个	占比/%
组内闸机平均小时通过数量 $\bar{X}_i$	0 ~ 150/人	447	48.5
	151 ~ 300/人	218	23.7
	301 ~ 450/人	116	12.6
	451 ~ 600/人	76	8.3
	>600/人	64	6.9
闸机布置形式	平行式	424	46.0
	垂直式	497	54.0
闸机编组数量 N	小编组(3 个)	419	45.5
	中编组(4 ~ 5 个)	239	26.0
	大编组(≥ 6 个)	263	28.5
闸机前通道宽度 W	窄通道(<3.5 m)	126	13.7
	中通道(3.5 ~ 5 m)	254	27.6
	宽通道(5 ~ 10 m)	117	12.7
	平行闸机组(>10 m)	424	46.0
各类车站内闸机样本量 T	开发区车站	143	15.5
	居住区车站	159	17.3
	混合区车站	230	25.0
	商业区车站	252	27.4
	交通枢纽站	137	14.8

3 模型求解

3.1 回归参数估计

以闸机编组数量 N 、用户数量 $\bar{X}_i$ 、闸机前通道宽度 W 、车站类型 T 为自变量, 闸机通过能力修正系数 β_R 为因变量, 对表 1 所示的两类闸机样本分别进行最优尺度回归建模, 模型输出的各变量回归系数如表 2 所示。

结果显示, 两组样本的回归模型整体显著性较强 ($P < 0.01$), 垂直组、平行组的模型调整后 R^2 分别为 0.721 与 0.546。由表 2 中各变量的显著性, 可得出这次纳入模型的变量均有统计学意义, 两类闸机组通过能力修正系数的回归公式(其中的变量需通过表 4 转换后使用)如下:

$$\beta_{\text{垂直}} = 0.565\bar{X}_i - 0.383N + 0.449T + 0.185W \quad (2)$$

$$\beta_{\text{平行}} = 0.407\bar{X}_i - 0.389N + 0.227T \quad (3)$$

表2 回归模型参数估计及检验结果

Tab. 2 Estimation and F-test of each variable coefficient

布置形式	变量名称	标准化系数	自由度	F 值	显著性
垂直式闸机组	用户数量	0.565	1	280.947	0.001
	车站类型	0.449	4	69.874	0.001
	通道宽度	0.185	1	8.487	0.004
	编组数量	-0.383	2	53.314	0.001
平行式闸机组	用户数量	0.407	1	351.586	0.001
	编组数量	-0.389	2	133.570	0.001
	车站类型	0.227	4	55.171	0.001

3.2 模型因子影响强度分析

在确定模型使用的自变量均有统计学意义后，需对各变量的影响强度和变量之间的共线性进行分析。模型输出的偏相关性、重要度及容差如表3所示。

偏相关性是指在忽略其他自变量时，该自变量对因变量变异的解释程度，其平方代表解释因变量变异的比列。例如，垂直闸机模型中用户数量的偏相关性为0.695，代表其解释了因变量48.3%的变异。变量的容差是指该变量对因变量的影响中，不能被其他自变

量所解释的比例，该值越大变量间多重共线性越小。

表3 变量相关性及容差

Tab. 3 Variable correlation and tolerance

布置形式	变量名称	偏相关性	重要度	容差	
				转换后	转换前
垂直式闸机组	用户数量	0.695	0.377	0.896	0.895
	车站类型	0.402	0.337	0.603	0.589
	通道宽度	0.160	0.029	0.517	0.593
	编组数量	-0.392	0.257	0.548	0.532
平行式闸机组	用户数量	0.445	0.501	0.930	0.951
	编组数量	-0.426	0.453	0.912	0.861
	车站类型	0.268	0.047	0.941	0.901

由表3可知，垂直组中通道宽度W的重要度为0.029，偏相关性为0.160，解释了2.6%的差异，参考价值较低，在实际设计中可不予考虑；其余自变量均解释了因变量5%以上的差异，存在研究价值。所有自变量转换后容差均大于0.5，变量间无明显的多重共线性。

3.3 变量的最优尺度转换

最优尺度回归模型在建模时，会采用一定的非线性变换方法进行反复迭代，为原始分类变量的每一类别找到最佳的标准化评分，模型给出的变量转换关系如表4所示。

表4 变量转换关系

Tab. 4 Variable conversion relation

布置形式	变量名称		分类						
垂直式闸机组	修正系数	转换前	≤0.359	0.359~0.450	0.451~0.517	0.518~0.584	0.585~0.652	0.653~0.733	≥0.733
		转换后	-1.971 3	-1.319 6	-0.667 9	-0.016 2	0.635 5	1.287 2	1.938 9
	用户数量	转换前	<55	55~138	139~218	219~303	304~407	>407	
		转换后	-1.398 7	-0.649 3	0.100 2	0.849 4	1.598 7	2.348 1	
	编组数量	转换前	3	4	5	6	7	≥8	
		转换后	-0.805 5	0.816 5	0.819 3	1.821 3	1.823 2	1.824 6	
	通道宽度	转换前	≤3 m	3~4 m	4~5 m	5~6 m	6~7 m	≥8 m	
		转换后	-1.183 7	-0.570 4	-0.043 0	0.613 4	1.269 8	1.883 1	
	车站类型	转换前	开发区车站	居住区车站	混合区车站	商业区车站	交通枢纽站	—	
		转换后	0.325 7	0.078 8	-0.598 0	-1.112 0	1.716 3	—	
平行式闸机组	修正系数	转换前	≤0.719	0.720~0.780	0.781~0.829	0.830~0.876	0.877~0.923	≥0.923	
		转换后	-1.942 5	-1.303 6	-0.664 7	-0.025 9	0.613 0	1.251 9	
	用户数量	转换前	<56	57~132	133~204	205~281	282~372	>372	
		转换后	-1.347 1	-0.628 3	0.090 5	0.809 3	1.528 1	2.246 9	
	编组数量	转换前	3	4	5	6	7	≥8	
		转换后	-1.264 0	-0.137 1	-0.135 8	1.267 5	1.268 3	1.268 3	
	车站类型	转换前	开发区车站	居住区车站	混合区车站	商业区车站	交通枢纽站	—	
		转换后	1.935 8	-0.179 0	-0.754 9	-0.215 1	-0.199 7	—	

在垂直闸机模型中，修正系数与用户数量呈显著的线性正相关。对外交通枢纽站闸机的通过能力折损最小，其次为开发区、居住区车站，混合区、商业区车站闸机的通过能力折损最大。闸机前通道宽度越大，通过能力折损越小。闸机编组数量由 3 个上升至 6 个时，折损程度显著上升；编组数量由 6 个继续增加时，折损程度上升缓慢。

在平行闸机模型中，修正系数与用户数量呈显著的线性正相关。混合区、居住区、商业区车站和对外交通枢纽站的闸机通过能力折损程度基本一致，开发区车站闸机的折损最小。编组数量增加会导致闸机通过能力的折损程度呈阶梯性上升，3 个闸机编组时折损最小，4~5 个闸机编组时折损明显升高，5 个以上闸机编组时折损严重。

3.4 闸机组通过能力修正系数

从站厅设计角度出发，依据式(2)、(3)给出大客流时部分闸机组通过能力的修正系数，如表 5 所示。其中，垂直式闸机组前通道宽度按 3~4 m 计算，用户数量取大于 407 人/闸机·h；平行式闸机组用户数量取

大于 372 人/闸机·h，计算时仅区分开发区车站与其他车站。其余情况下的修正系数可经表 4 转换，然后按式(2)、(3)计算。

4 研究结论

经过上述分析，对地铁车站闸机布置给出如下结论与建议：

1) 平行式闸机组的通过能力明显优于垂直式闸机组的通过能力，其平均修正系数比垂直式闸机组高 0.301。在站厅设计时，应尽量避免乘客在进入闸机前进行大角度转向，在进出站瓶颈方向应尽量使用平行式闸机组。

2) 以开发区车站为基准，居住区车站的平行式闸机组与垂直式闸机组的修正系数分别下降 0.031、0.011，混合区车站两类闸机的修正系数分别下降 0.039、0.040，商业区车站两类闸机的修正系数分别下降 0.031、0.062，对外交通枢纽站两类闸机的修正系数分别下降 0.031 和上升 0.060。在开发区、居住区车站和对外交通枢纽站中，垂直式闸机组的通过能力折损程度明显小于以休闲出行乘客为主的商业区、混合区车站的折损程度。此结果与本文第 2.3 节中提出的分析基本一致，即因用地属性导致乘客出行目的的差异，导致乘客时间价值的差异，进而影响闸机使用的均衡度。

3) 垂直式闸机组前乘客通道的宽度对通过能力的影响极小，当通道宽度由 3 m 升至 6 m 时，修正系数平均上升 0.020。在车站设计与管理时，该通道宽度满足高峰期乘客通行需求即可。

4) 对于垂直式闸机组，3 个闸机编组时通行效率最高。以 3 个闸机的编组为基准，4 个闸机编组时修正系数下降 0.059，5 个闸机编组时修正系数下降 0.060，6~8 个闸机编组时修正系数平均下降 0.096。

5) 对于平行式闸机组，3 个闸机编组时通行效率最高。以 3 个闸机的编组为基准，4 个闸机编组时修正系数下降 0.028，5 个闸机编组时修正系数下降 0.028，6~8 个闸机编组时修正系数平均下降 0.063。

编组数量对两类闸机的通过能力均存在阶梯性影响。为提高闸机组通过能力，在需要分散布置多个闸机组时，应选用 3 个或 5 个闸机的编组；需要集中布置闸机时，应选用 8 个闸机以上的编组。

参考文献

[1] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工

表 5 闸机组修正系数			
Tab. 5 Adjustment coefficient of the gate group			
布置形式	车站类型	编组数量/个	修正系数
垂直式 闸机组	开发区车站	小编组 (3)	0.708
		中编组(4~5)	0.649
		大编组(>6)	0.612
	居住区车站	小编组 (3)	0.697
		中编组(4~5)	0.638
		大编组(>6)	0.601
	混合区车站	小编组 (3)	0.668
		中编组(4~5)	0.609
		大编组(>6)	0.572
	商业区车站	小编组 (3)	0.646
		中编组(4~5)	0.587
		大编组(>6)	0.550
平形式 闸机组	交通枢纽车站	小编组 (3)	0.768
		中编组(4~5)	0.708
		大编组(>6)	0.671
	开发区车站	小编组 (3)	0.961
		中编组(4~5)	0.933
		大编组(>6)	0.898
	其他车站	小编组 (3)	0.928
		中编组(4~5)	0.900
		大编组(>6)	0.865

- 业出版社, 2014.
- Metro design specification: GB50157—2013[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2014.
- [2] 熊英男. 城市轨道交通车站自动检票闸机通过能力分析与配置数量研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- XIONG Yingnan. Research on traffic capacity analysis and configuration quantity of automatic ticket gates in subway stations[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [3] 徐婵枝. 地铁车站售票检票设施乘客服务时间间隔规律及排队模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- XU Chanzhi. Research on passenger service time interval and queuing model of subway station ticketing facilities[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [4] 吴娇蓉, 冯建栋, 叶建红. 磁卡和 IC 卡并用检票闸机通过能力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 85-91.
- WU Jiaorong, FENG Jiandong, YE Jianhong. Analysis of the capacity of magnetic cards and IC cards using check tickets[J]. Journal of Tongji University (Natural science), 2010, 38(1): 85-91.
- [5] Chi-Wai Tsang, Tin-Kin Ho. A prioritized fuzzy constraint satisfaction approach to model agent negotiation for railway scheduling[C]. Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004 International Conference on, 2004.
- [6] 张晓天. 地铁车站检票闸机配置优化方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- ZHANG Xiaotian. Research on optimization method of ticket gate configuration in metro station[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [7] 柳泽原, 彭宏勤. 基于 Anylogic 的地铁车站闸机口通过能力仿真研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(S1): 110-114.
- LIU Zeyuan, PENG Hongqin. Simulation research on passing capacity of metro station gate based on anylogic[J]. Transportation systems engineering and information, 2018, 18(S1): 110-114.
- [8] SHI Guichen, XI Zhang. Optimized simulation of automatic gate system of Beijing Tianjin intercity line on Beijing South Railway Station[J]. Applied mechanics and materials, 2014, 3365.
- [9] 曹昌衡, 于琛. VISWALK 在地铁站行人仿真中的应用[J]. 交通与港航, 2017, 4(3): 34-36.
- CAO Changheng, YU Chen. Application of VISWALK in pedestrian simulation of subway station[J]. Traffic and port, 2017, 4(3): 34-36.
- [10] 冯建栋, 吴娇蓉, 金昱, 等. 轨道交通自动检票闸机组利用不均衡度研究[J]. 城市轨道交通, 2010, 8(3): 28-35.
- FENG Jiandong, WU Jiaorong, JIN Yu, et al. Research on unbalanced utilization of automatic check-in gate units for rail transit[J]. Urban transport, 2010, 8(3): 28-35.
- [11] 莫逆, 周冠宇, 杨露. 基于客流流线的地铁站检票闸机布设研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(5): 17-21.
- MO Ni, ZHOU Guanyu, YANG Lu. Research on the arrangement of ticket gates in subway stations based on passenger flow lines[J]. Urban mass transit, 2014, 17(5): 17-21.

(编辑: 王艳菊)

京津冀轨道交通有望实现“一码通行”

目前, 北京地铁公司积极推进京津冀轨道交通“一码通行”, 力争在明年实现乘车二维码互联互通。

北京地铁公司表示, 在“一码通行”的基础上, 推进研究北京、天津和石家庄三地轨道交通应用互联网技术实现乘车二维码互联互通, 力争 2021 年内全部实施。

目前, 北京已与天津地铁完成互联网 APP 票务业务规则、技术方案互相确认工作, 进入实质性技术研发阶段, 2021 年 1 月进行双方实验室测试、APP 升级等工作, 2 月初可具备开通条件。同时与石家庄地铁正在加快推进互联网 APP 票务前期业务规则、技术对接工作, 2021 年年内实现“一码通行”。

据了解, 三地轨道交通乘车二维码互联互通后, 不仅方便三地市民跨城交通, 有力促进城市间绿色出行, 也将助力京津冀相互融合, 打造轨道上的京津冀, 有效提升三地通勤便捷度。

摘编自 <http://www.chinametro.net/2020-12-24>