

# 城市轨道交通无人干预列车模式下关键行车岗位人员应急处置作业复杂度量化方法<sup>\*</sup>

赵晏群 朱海燕 刘志钢

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海)

**摘要** [目的] 随着城市轨道交通自动化等级的不断提升, GOA2(半自动化列车运行)模式下负责驾驶的司机在 GOA4(无人干预列车运行)模式下转变为负责监控和巡视车厢的多职能人员, 同时应急处置作业流程也发生了改变。为了实现 GOA4 模式下城市轨道交通行车作业更加精细化的分析和评估, 需对该模式下关键行车岗位人员应急处置作业的复杂度量化方法进行深入研究。[方法] 以标准化作业指导书为基础, 使用 WDA(工作域分析)法建立关键行车岗位人员信息结构图, 对两种模式下关键行车岗位人员应急处置作业的复杂性进行分析, 从信息数量、操作逻辑、操作规模及综合复杂性等四个方面对关键行车岗位人员的作业复杂度进行了量化。以车门故障应急处置作业为例, 计算两种模式下关键行车岗位人员应急处置作业复杂度, 并采用 Pearson 双尾对现场标准化作业评分的得分率进行相关性检验。[结果及结论] 相关性检验结果表明: 车门故障应急处置作业的相关性系数为 -0.827, 显著性水平为 0.042, 该作业的复杂度与得分率呈负相关, 验证了 SC(步骤复杂度)模型的有效性。

**关键词** 城市轨道交通; 无人干预列车运行模式; 关键行车岗位人员; 应急处置作业复杂度

**中图分类号** U292.19

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.08.020

## Quantitative Assessment Method of Emergency Disposal Operation Complexity for Urban Rail Transit Key Driving Post Personnel in Unattended Train Operation Mode

ZHAO Yanqun, ZHU Haiyan, LIU Zhigang

(College of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] With the increasing automation levels in urban rail transit, drivers responsible for operation in GOA2 (semi-automated train operation) mode become the multitasking personnel responsible for monitoring and inspecting compartments in GOA4 (unattended train operation) mode. The e-

mergency disposal operation procedure has changed as a result. To achieve a more refined analysis and evaluation of urban rail transit train operations in the GOA4 mode, it is necessary to conduct an in-depth study on the quantitative assessment method for the emergency disposal operation complexity in terms of key driving post personnel. [Method] Based on standardized operating procedures, the WDA (work domain analysis) method is used to establish an information structure diagram for key driving post personnel. The emergency disposal operation complexity in terms of key driving post personnel under both GOA2 and GOA4 modes is analyzed from four aspects of information quantity, operation logic, operational scale, and overall complexity. Using door malfunction emergency disposal operations as example, the emergency disposal operation complexity for key driving post personnel in both modes is calculated, and two-tailed Pearson test is carried out for site standardized operational score rate correlation verification. [Result & Conclusion] The correlation test results show that the correlation coefficient of vehicle door fault emergency disposal operations is -0.827, significance level is 0.042, the complexity of the operation and the score rate is negatively correlated, validating the effectiveness of the SC (step complexity) model.

**Key words** urban rail transit; unattended train operation mode; key driving post personnel; emergency disposal operation complexity

随着城市轨道交通(以下简称“城轨”)自动化等级的不断提升, GOA2(半自动化列车运行)模式下负责驾驶的司机在 GOA4(无人干预列车运行)模式下转变为负责监控和巡视车厢的多职能人员, 同时应急处置作业流程相较于 GOA2 模式也发生了改变。在城轨应急处置作业评价方面, 文献[1]提供了一种基于 TC(任务复杂度)算法的团队任务复杂度度量方法, 用于评价城轨 FAO(全自动运行)模

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(52072235)

式下调度团队应急处置作业的复杂程度。文献[2]基于图熵理论量化应急处置作业的复杂度,并对不同自动化等级下同类应急处置作业的复杂度进行对比。

从现阶段研究进展来看,针对城轨应急处置作业的研究主要集中在以作业项为主体的评价指标量化上,但尚未细化到执行应急处置操作的个体层面。本文从标准化作业指导书出发,提出一种城轨关键行车岗位人员应急处置作业复杂度量化方法,以研究城轨运营线路自动化等级提升对关键行车

岗位人员应急处置作业复杂度所带来的影响。通过构建城轨关键行车岗位人员的应急处置作业信息结构图和操作流程圖,并对作业关键环节进行定量分析,可以形成关键行车岗位必备知识图谱,这有助于实现对城轨行车作业更加精细化的分析和评估。

## 1 关键行车岗位人员应急处置作业分析

城轨 GOA4 模式和 GOA2 模式下关键行车岗位人员应急处置作业如表 1 所示。

表 1 两种模式下城轨关键行车岗位人员的应急处置作业

Tab. 1 Emergency disposal operations of urban rail key driving post personnel under two operating modes

模式	关键行车岗位人员	应急处置作业
GOA4 模式	行车调度员	及时发现故障并进行远程排除故障,视情况通知多职能列控员和多职能站控员进行现场处置
	多职能列控员	接到行车调度员处置故障命令后及时进行现场处置
	多职能站控员	接到行车调度员命令后,安排作业人员协助多职能列控员进行现场处置
	站台监护	接到行车调度员命令后,协助多职能列控员进行现场处置
GOA2 模式	行车调度员	发现故障后,协调行车值班员和列车驾驶员进行现场排除故障
	列车驾驶员	及时发现故障并通知行车调度员,迅速进行现场处置
	行车值班员	接到行车调度员命令后,安排作业人员协助列车驾驶员进行现场处置
	站务员	接到行车值班员命令后,协助列车驾驶员进行现场处置

GOA2 模式下的应急处置作业主要围绕列车驾驶员展开。而在 GOA4 模式下,行车调度员借助相关行车设备行使了列车驾驶员的部分职能,其余关键行车岗位人员需围绕行车调度员的具体需求进行操作。由此可见,两种不同模式下关键行车岗位人员应急处置作业的响应方式和操作流程均发生了变化。

## 2 关键行车岗位人员应急处置作业复杂度量化方法

既有研究证明,针对复杂度量化的方法中,SC(步骤复杂度)算法、TS(任务规模)算法及 TC 算法在应急处置作业复杂度量化方面有着良好的效果<sup>[3]</sup>。经文献调研,本文采用了 SC 算法。

文献[4]认为对应急处置作业复杂度产生影响的因素主要有 3 个:作业人员所获取的信息数量、作业人员所执行操作的逻辑结构及作业人员所执行操作的规模大小。以此为基础,提出 SC 算法。

SC 算法需在构建信息结构图和操作流程圖的基础上,使用图熵理论进行 4 个复杂度指标的计算,分别是:SIC(步骤信息复杂度)、SLC(步骤逻辑复

杂度)、SSC(步骤规模复杂度)及综合 SC。

### 2.1 图形构建

信息结构图和操作流程圖的构建是 SC 算法的基础。其中:作业人员执行操作时的标准化流程在轨道交通领域泛指应急处置作业流程,操作流程圖即应急处置作业流程图;信息结构圖在 Park J 提出的 SC 模型中尚未考虑认知层面。本文在增加对关键行车岗位人员应急处置作业时认知信息复杂性考量的基础上,结合 WDA(工作域分析)法对 SC 模型进行进一步优化。

文献[5]认为人在认知的过程中一共涉及到了 5 个层面,分别为功能与目的、价值和优先级考虑、和目的相关的功能、物理功能以及物理对象。认知过程 5 个层级的基本含义如表 2 所示。Naikar 以此为基础提出了 WDA 法。WDA 法从 5 个层面出发,构建人员-环境信息结构圖。该结构圖可以反映出人员为完成工作任务所需的所有信息。

### 2.2 复杂度指标的计算

在构建信息结构圖和操作流程圖的基础上,结合图熵理论计算 4 项复杂度指标。

在图熵理论中,二阶熵可以表示图像中的信息

数量复杂度  $H$ , 其计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^h \left( P(A_i) \log_2 P(A_i) \right) \quad (1)$$

式中:

$A_i$ ——图像中已识别的类别,  $i$  为类别的数量;

$P(A_i)$ —— $A_i$  的估计概率,  $P(A_i) = \frac{N_{A_i}}{N_{\text{all}}}$ ,  $N_{A_i}$  为

$A_i$  中的节点数,  $N_{\text{all}}$  为图像中所有的节点。

表2 认知过程5个层级的基本含义

Tab.2 Basic meanings of five cognitive process levels

工作域	定义
功能与目的	作业的最高级目标
价值和优先级考虑	实现目标而必须保持的优先事项和价值观
和目的相关的功能	实现目标而必须执行和协调的、与目的相关的职能
物理功能	工作中物理设备所提供的功能
物理对象	工作中所包含的设施设备

通过计算信息结构图的二阶熵, 可以得到作业人员的步骤信息复杂度  $C_{\text{SI}}$ , 即:

$$C_{\text{SI}} = - \sum_{i=1}^h \left( P(A_{i,\text{is}}) \log_2 P(A_i) \right) \quad (2)$$

式中:

$A_{i,\text{is}}$ ——信息结构图中已识别的类别。

通过计算操作流程图的二阶熵, 可以得到作业人员的步骤规模复杂度  $C_{\text{SS}}$ :

$$C_{\text{SS}} = - \sum_{i=1}^h \left( P(A_{i,\text{op}}) \log_2 P(A_i) \right) \quad (3)$$

式中:

$A_{i,\text{op}}$ ——操作流程图中已识别的类别。

一阶熵可以用来评估操作流程图中的逻辑复杂性, 通过计算流程图的一阶熵可得到人员操作逻辑复杂度。不同行车岗位需进行信息交互对象的数量不同。交互对象可以分为人员间的交互以及人员与设备间的交互, 作业人员在进行操作时交互对象越多, 复杂度越高, 对操作逻辑产生的影响越大<sup>[6]</sup>。因此, 本文在考虑多对象交互的情况下给出了步骤逻辑复杂度  $C_{\text{SL}}$  的计算公式:

$$C_{\text{SL}} = \log_2 (C_k H_k) = \log_2 \left( C_k \left( - \sum_{i=1}^h \left( P(A_i) \log_2 P(A_i) \right) \right) \right) \quad (4)$$

式中:

$C_k$ ——岗位  $k$  交互对象的数量;

$H_k$ ——岗位  $k$  操作流程图的一阶熵。

采用加权欧几里得范数来体现这3种复杂度的叠加效应, 进而得到综合步骤复杂度  $C_{\text{S}}$ :

$$C_{\text{S}} = \sqrt{(\alpha C_{\text{SI}})^2 + (\beta C_{\text{SL}})^2 + (\gamma C_{\text{SS}})^2} \quad (5)$$

式中:

$\alpha, \beta, \gamma$ ——权重因子。

### 3 案例分析

城轨车门频繁开启与关闭, 导致其容易产生故障, 对列车运营安全产生较大影响。本研究以车门故障作业为例, 对 GOA4 和 GOA2 模式下关键行车岗位人员应急处置作业的复杂度进行量化。

#### 3.1 信息结构图和操作流程图的构建

查阅某城市 GOA4 和 GOA2 模式下的城轨行车调度员作业指导书, 同时对 10 名 GOA4 模式下的行车调度员以及 10 名 GOA2 模式下的行车调度员进行访谈。访谈问题主要包括岗位的最终目标, 实现这些目标所需的职能, 工作过程中应优先考虑的事宜, 以及在工作过程中所使用的设施设备及其功能。

通过以上数据收集, 建立了两种模式下行车调度员应急处置作业信息结构图<sup>[7]</sup>, 如图1所示。在 GOA2 和 GOA4 模式下, 行车调度员在前4个认知层级的认知信息相同, 他们的最高级目标都是在职能权限范围内指挥并配合其他行车岗位人员快速解决问题, 保证运营作业安全。为了实现此目标, 两种模式下行车调度员需借助设施设备的各项功能来完成岗位职能。不同之处在于 GOA4 模式下行车调度员配备了列车及其相关设备控制系统和故障报警系统, 为其提供了远程操控车辆设备的能力。

由此可见, GOA2 和 GOA4 模式下的行车调度员在本质职能上并未发生变化, GOA4 模式下的设备为行车调度员提供了更大的操作权限, 也使其在物理对象层面上的信息变得更为复杂。

《轨道交通列车车门故障作业指导书(行车调度员(行车))》和《轨道交通全自动准无人驾驶模式列车车门故障作业指导书(行车调度员(行车))》给出两种模式下行车调度员的车门故障操作流程, 如图2所示。

#### 3.2 $C_{\text{SI}}$ 计算

结合图1进行GOA4模式下行车调度员  $C_{\text{SI}}$  计

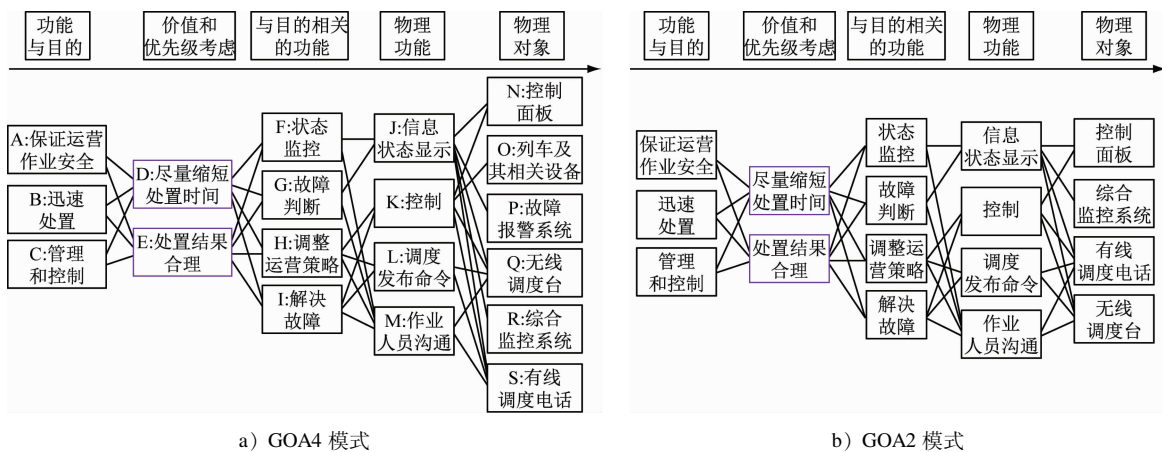
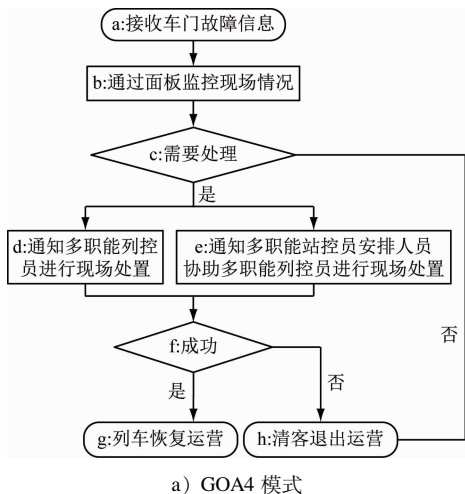
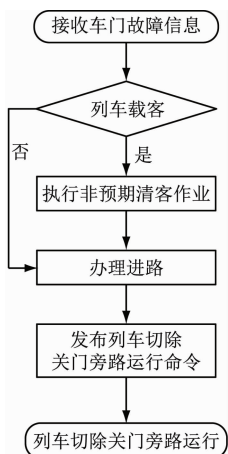


图1 两种模式下行车调度员应急处置作业信息结构图

Fig. 1 Information structure diagram of traffic dispatcher emergency disposal operations under two modes



a) GOA4 模式



b) GOA2 模式

图2 两种模式下行车调度员车门故障操作流程

Fig. 2 Train door fault operation flow chart of traffic dispatcher under two modes

算,建立其信息结构图二阶熵识别类别,如表3所示。

表3 GOA4 模式下行车调度员信息结构图二阶熵识别类别

Tab.3 Second order entropy identification classification of traffic dispatcher information structure diagram in GOA4 mode

节点	相邻节点	类别	节点	相邻节点	类别
A、B、C	D、E	1	L	H、I、Q、S	7
D、E	A、B、C、F、G、H、I	2	M	F、G、H、I、Q、S	8
F、G	D、E、J、M	3	N	J、K	9
H、I	D、E、K、L、M	4	O	K	10
J	F、G、N、P、Q、R、S	5	P、R	J	11
K	H、I、N、O、Q、S	6	Q、S	J、K、L、M	12

注:A—S见图1a)。

根据式(2)计算得到  $C_{SI} \approx 3.695$ 。

### 3.3 $C_{SL}$ 计算

依据式(4)确定 GOA4 模式下行车调度员的交互对象数目。从图1中可以看到与之交互的设施设备有控制面板、列车及其相关设备、故障报警系统、无线调度台、综合监控系统及有线调度电话共6项;图2中,GOA4 模式下行车调度员负责与多职能列控员和多职能站控员进行直接联络,其和人员的交互数量为2。

在确定交互对象数量后,计算 GOA4 模式下行车调度员车门故障操作流程图的二阶熵。结合图2建立 GOA4 模式下行车调度员车门故障操作流程图中一阶熵识别类别,如表4所示。

根据式(4)计算得到  $C_{SL} = 7.217$ 。

### 3.4 $C_{SS}$ 计算

通过计算 GOA4 模式下行车调度员车门故障操作流程图的二阶熵,即可得到  $C_{SS} = 2.750$ 。

表 4 GOA4 模式下行车调度员车门故障操作流程熵一阶熵识别类别

Tab. 4 First order entropy identification classification of traffic dispatcher train door fault operation flow chart in GOA4 mode

输入	输出	节点	类别
0	1	a	1
1	0	g	2
1	1	b、d、e	3
1	3	c	4
2	0	h	5
2	2	f	6

注: a—h 见图 2 a)。

### 3.5 综合 $C_s$ 计算

采用 DEMATEL 方法<sup>[8]</sup>确定式(5)中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  等 3 个权重因子。参考系统化行为影响因子分类法, 确定了 37 项城轨关键行车岗位作业人员行为影响因子。邀请某市城轨 GOA4 线路和 GOA2 线路共计 40 名关键行车岗位作业人员进行行为影响因子问卷调查, 共筛选出 7 项关键因子。按照信息数量、操作逻辑及工作量对 7 项关键因子进行分类和两两对比, 得到影响信息数量的因子为安全责任意识、班组合作沟通及工作经验, 影响操作逻辑的因子为

岗前培训、作业指导书规范性及安全责任意识, 影响工作量的因子为班组合作沟通、工作经验及处置时间。对行为影响因子的中心度进行排序, 结果如表 5 所示。

表 5 行为影响因子中心度排序

Tab. 5 Centrality ranking of behavioral influencing factors

行为影响因子	$R_j$	$D_j$	中心度
岗前培训	15.837 6	15.499 3	31.336 9
作业指导书规范性	16.950 7	15.987 7	32.938 4
安全责任意识	17.663 0	17.245 2	34.908 1
班组合作沟通	17.385 7	18.355 1	35.740 8
工作经验	16.421 1	16.598 3	33.019 5
作业压力	16.137 6	16.440 9	32.578 6
处置时间	17.374 6	17.643 7	35.018 2

注:  $R_j$  为影响度;  $D_j$  为被影响度; 中心度为  $R_j$  和  $D_j$  之和。

表 5 中: 行为影响因子中心度代表第  $j$  个因子在 7 个因子中的地位, 该值越大, 表明该因子的作用越重要。对三类影响因子的中心度进行求和并量纲一化, 得到  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为 0.34、0.32、0.34, 因此 GOA4 模式下的  $C_s \approx 2.790$ 。

通过上述计算方法, 可以得到 GOA4 和 GOA2 模式下关键行车岗位人员针对车门故障作业的 4 项复杂度指标, 如表 6 所示。

表 6 车门故障作业复杂度指标计算结果

Tab. 6 Calculation results of train door fault operation complexity indicators

岗位	$C_{SI}$		$C_{SL}$		$C_{SS}$		$C_s$	
	GOA4 模式	GOA2 模式	GOA4 模式	GOA2 模式	GOA4 模式	GOA2 模式	GOA4 模式	GOA2 模式
行车调度员	3.695	3.337	7.217	6.682	2.750	2.585	2.790 ↑	2.575
多职能列控员	2.722		4.472		2.522		1.908 ↓	
站台监护	3.252		3.000		2.000		1.615 ↓	
多职能站控员	3.455		3.877		2.000		1.839 ↓	
列车驾驶员						3.239		4.244
站务员		3.252		3.500		3.000		1.876
行车值班员		3.455		4.524		3.000		2.125

注: 箭头代表 GOA4 模式下的关键行车岗位人员作业复杂度相较于 GOA2 模式的变化趋势。

### 3.6 模型验证

基于城轨关键行车岗位人员车门故障作业指导书编制安全检查表, 通过口头问答形式, 检查作业人员对相关作业要求和规范的掌握程度, 并根据回答的具体情况进行评分。对得分汇总后获得关键行车岗位人员车门故障作业总得分率。安全检查对象包括某市 GOA4 线路 14 座车站的多职能列

控员和站台监护, GOA2 线路 23 座车站的行车值班员和站务员, 以及 4 种 FAO 模式下的乘务班组和 GOA2 模式下的 14 个乘务班组。采用车门故障作业项的得分率与作业复杂度做相关性分析, 采用 Pearson 双尾相关性进行检验, 得到相关性系数为 -0.827, 显著性水平为 0.042。结果表明: 车门故障应急处置作业的复杂度与得分率呈负相关, 验证

了 SC 模型的有效性。

## 4 结语

1) 本文基于 WDA 法和 SC 算法,建立了 SC 模型用以量化城轨关键行车岗位人员应急处置作业复杂度。以车门故障作业为例,计算了两种模式下关键行车岗位人员应急处置作业的复杂度。使用安全检查得分率进行相关性分析,验证了该模型的有效性。

2) 在车门故障处置作业中,GOA4 模式下行车设备的增加给予了行车调度员判断车门故障是否需要进行现场处置的职责,且 4 项复杂度指标相较于 GOA2 模式下的行车调度员都有所提升。多职能列控员相较于列车驾驶员 SLC 提升,其余复杂度指标有所减少,究其原因因为在 GOA4 模式下,多职能列控员会存在两种发现车门故障的情况,一种是多职能列控员接到行车调度员命令到达指定车门进行故障处置,另一种是多职能列控员先行发现车门故障,立即汇报行车调度员后再进行现场处置。GOA2 模式下的列车驾驶员在司机室端头门处可以第一时间监测到车门故障并及时进行处置。站台监护、多职能列控员相较于站务员和行车值班员有所降低,原因为 GOA4 模式取消了站务员登乘列车跟车的操作。

## 参考文献

- [1] NIU K, FANG W, GUO B. A team task complexity measure for emergency procedures in fully automatic metro[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2019, 31(10): e4753.1.
  - [2] 赵波波. FAO 控制中心应急决策认知建模与评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.  
ZHAO Bobo. The research on cognition modelling and evaluation for emergency decision of operating control center in fully automatic operation (FAO) system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
  - [3] LIU P, LI Z. Comparison of task complexity measures for emergency operating procedures: convergent validity and predictive validity[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 121: 289.
  - [4] PARK J, JEONG K, JUNG W. Identifying cognitive complexity factors affecting the complexity of procedural steps in emergency operating procedures of a nuclear power plant[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 89(2): 121.
  - [5] NAIKAR N, HOPCROFT R, MOYLAN A. Work domain analysis: theoretical concepts and methodology[R]. Victoria, Australia: Defence Science and Technology Organisation, Air Operations Division, 2005.
  - [6] ZHENG Y, LU Y, WANG Z, et al. Developing a measurement for task complexity in flight[J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2015, 86(8): 698.
  - [7] SANDERSON P. Cognitive work analysis across the system life-cycle: achievements, challenges and prospects in aviation[G]. Aldershot: Ashgate Publishing, 2003: 73-85.
  - [8] 廖斌, 冯海芹, 罗俊浩, 等. 基于 DEMATEL 的人机交互型 VDT 持续作业人员行为形成关键因子分析[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(6): 84.  
LIAO Bin, FENG Haiqin, LUO Junhao, et al. Study on key performance shaping factors of human-computer interaction VDT continuous operator based on DEMATEL[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(6): 84.
- 收稿日期:2022-02-24 修回日期:2022-04-04 出版日期:2024-08-10  
Received:2022-02-24 Revised:2022-04-04 Published:2024-08-10  
· 第一作者:赵晏群,助理工程师,1793976625@qq.com  
通信作者:朱海燕,副教授,zhuhaiyan0827@sina.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 2024 年 6 月份我国城市轨道交通运营数据

2024 年 6 月,31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团共有 54 个城市开通运营城市轨道交通线路 311 条,实际开行列车 335 万列次,完成客运量 26.2 亿人次,进站量 15.7 亿人次。6 月份,客运量环比减少 1.6 亿人次,降低 5.8%;同比增加 1.9 亿人次,增长 7.6%。6 月份全国总运营里程的平均客运强度为 0.849 万人次/(km·d),环比降低 2.9%,同比增长 1.5%。其中,地铁、轻轨、市域快轨等大运量线路共 271 条,运营里程 9 642.1 km,完成客运量 25.8 亿人次,进站量 15.4 亿人次。单轨、磁浮等中运量线路共 7 条,运营里程 202.5 km,完成客运量 3 644 万人次,进站量 2 641 万人次。有轨电车、自动导向轨道等低运量线路共 33 条,运营里程 494.8 km,完成客运量 1 031 万人次,进站量 979 万人次。本月新增运营里程 53.2 km,新增运营线路 1 条,为苏州地铁 6 号线;新增运营区段 2 个,为长沙地铁 1 号线北延一期和宁波地铁 3 号线二期。

(来源:交通运输部)