文章编号：1003-1421(2025)12-0070-10
引用格式：陶思宇，杨寒冰，张如，等.城市轨道交通乘务组运用态势评估研究[J].铁道运输与经济，2025，47(12)：70-79，90.
TAO Siyu，YANG Hanbing，ZHANG Ru，et al. Study on Situation Assessment of Crew Operations in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(12)：70-79，90.

城市轨道交通乘务组运用态势评估研究

陶思宇[1,2,3]，杨寒冰[4]，张　如[1,2,3]，冯　涛[1,2,3]，彭其渊[1,2,3]，罗　雪[5]

(1.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都　611756；2.西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室，四川 成都　611756；3.西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室，四川 成都　611756；4.中国铁路广州局集团有限公司 广州车务段，广东 广州　510000；5.中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司，重庆　401120)

摘　要：随着城市轨道交通规模的迅速增长，轨道交通运营企业对乘务系统的实时动态管理需求日益增强。为更好地对城市轨道交通乘务组运用态势进行评估，深入分析了城市轨道交通乘务组运用的影响因素，并以环境风险、计划偏离、时间偏离、成本费用为准则构建了城市轨道交通乘务组运用态势评估指标体系，构建基于组合权重-VIKOR方法的城市轨道交通乘务组运用态势评估模型，给出指标的量化方法和等级划分标准，将乘务组的运用态势细分为好、较好、一般、较差、差5个等级，最后以成都地铁乘务运用的相关数据为例验证模型的可行性。研究结果表明组合权重-VIKOR方法切实可行，能够得到比较合理的成都地铁乘务组一日不同时刻的运用态势，与传统VIKOR方法相比能够更稳健地反映乘务运用态势，从而为乘务运营调度决策提供参考。

关键词：铁路运输；态势评估；组合赋权；乘务组运用；VIKOR
中图分类号：U293.5　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20240829002

Study on Situation Assessment of Crew Operations in Urban Rail Transit

TAO Siyu[1,2,3]，YANG Hanbing[4]，ZHANG Ru[1,2,3]，FENG Tao[1,2,3]，PENG Qiyuan[1,2,3]，LUO Xue[5]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 4. Guangzhou Train Operation Depot, China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China; 5. China Chongqing Survey and Design Research Institute Co., Ltd., China Railway Eryuan Engineering Group, Chongqing 401120, China)

Abstract: The rapid expansion of urban rail transit has increased the demand for real-time dynamic management of crew systems by rail transit enterprises. To improve the situation evaluation of crew operations in urban rail transit, this study analyzed the factors influencing crew operations in urban rail transit. A situation evaluation index system for crew operations in urban rail transit was established based on environmental risk, plan deviation, time deviation, and cost criteria. A situation evaluation model for crew operations based on the combined weight-VIKOR method was then constructed. The study also defined quantitative methods and grading standards,

收稿日期：2024-08-29　　**修订日期**：2025-09-22
通信作者：杨寒冰(2001—)，女，河南南阳人，中国铁路广州局集团有限公司广州车务段助理值班员。
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300502-3)

which categorized the operation situation into five levels: good, relatively good, average, relatively poor, and poor. The model's feasibility was verified with crew operation data of Chengdu Metro as an example. The results indicate that the combined weight-VIKOR method is practical and enables a reasonable assessment of the operation situation of the Chengdu Metro at different times of the day. Compared to the traditional VIKOR method, the proposed method reflects the crew operation situation more robustly, providing a valuable reference for crew scheduling decisions.

Keywords: Railway Transportation; Situation Assessment; Combined Weight; Crew Operation; VIKOR

0　引言

城市轨道交通运营部门面对城市人口上升、交通需求持续增长，逐渐开始重视城市轨道交通网络化运营环境下的运营管理模式、运营组织技术等。城市轨道交通运营管理涵盖城市轨道交通的客运组织、行车组织、乘务组运用等多个方面。其中，乘务计划是轨道交通运营调度的基础，乘务组在列车运行中扮演着确保安全、维持秩序和提供服务的关键角色。因此，制定合理且高效的乘务计划对于提高城市轨道交通运营效率和经济效益有着重大意义。

态势评估(Situation Assessment，SA)是指对当前状态和环境进行评估与分析，以反映整体态势，目前主要运用在军事突发事件和应急管理等领域，在铁路运输方面的使用较少。

在铁路运输态势研究领域，陈雅欣等[1]通过到、解、集、编、发5个子系统的态势对编组站运输态势进行研究，建立SPA-TOPSIS态势评估模型，对成都北编组站的运输态势进行了评估。李栋[2]将区域铁路重空车流分布态势细分为车流构成、车流输送、车站作业、分界口作业等4项子态势，构建基于组合权重-物元可拓法的区域铁路重空车流分布态势评估模型。刘杰鑫[3]对高速铁路运输组织态势展开研究，通过列车运行状况、设施设备状况、列车运行环境状况3个维度创建态势评价指标体系，李璐瑶[4]从运用状态、检修状态、备用状态3个方面，构建了高速铁路动车组运用态势评估体系，并利用基于组合权重-模糊集对法的态势评估模型对实例进行计算。闫旭等[5-6]建立了铁路运输安全态势评价指标体系，构建了组合权重-改进TOPSIS-余弦相似度的评估模型。朱国栋[7]采用集对分析法和G1赋权法构建了评估指标体系。胡勇宾[8]则采用事故发生次数、事故联动系数和月均事故率3个指标来评估高速铁路的运营安全态势。以上研究虽然各有侧重，但共同点在于通过不同的模型方法来获取态势。然而研究对象主要集中在列车运行、动车组运用以及编组站等方面，对于乘务组运用态势的研究相对较少，尤其是缺乏对实时风险和外界环境影响下的态势全面评估。

在乘务研究方面，已有成果主要集中在乘务计划的优化与评价。其中，李沁洋等[9]基于调整后列车运行图，利用列生成算法为高速铁路动车组司机的乘务计划进行调整优化。李献忠等[10]在深入研究了制约城市轨道交通乘务值乘方式的各种因素的基础上，运用模糊综合评估技术对城市轨道交通的乘务值乘方式做出评估。金华等[11]从班次间的均衡程度、标准的执行程度与方案的费用多少3个角度，综合评价了城市轨道交通乘务排班计划方案。苏铭等[12]基于TSP问题思想，将乘务工作班的生成转化为类TSP问题，并设计蚁群算法求解。赵彦忠[13]从安全评价入手，从人为因素和社会因素考虑，分析了铁路机车乘务员作业影响因素，为研究乘务员安全作业奠定了理论基础。田玲玲[14]综合考虑乘务员疲劳的多种潜在因素，建立包含工作负荷、管理因素、生理条件、心理状态和环境因素5个维度的乘务员疲劳风险状态评估体系，构建了多级评价模型。张在龙等[15]分析了地铁乘务计划编制要素，总结了地铁乘务计划编制的流程及影响因素，指出轮班制度、用餐地点、轮换车站和出退勤地点为关键影响因素。尽管现有研究在乘务计划优化与评价方法方面取得了一定进展，但主要集中在特定的对象层面，缺乏对乘务整体态势评估的系统性分析。

乘务组运用态势对于系统正常运行有着重要影响，城市轨道交通乘务组运用态势能够描述城市轨道交通乘务组在外界环境和内部运行条件下不同时

刻的运用状态；可以帮助了解城市轨道交通乘务系统的实时工作情况，宏观、全面地把控并预判乘务组运用的状态。因此，研究将态势评估应用到城市轨道交通乘务组运用问题中，根据乘务组运用的影响因素，确定城市轨道交通乘务组运用态势评估指标并建立态势评估指标体系，基于组合权重-VIKOR评估模型，评估城市轨道交通乘务组的运用态势。

1　乘务组运用态势表征与量化

1.1　乘务组运用影响因素分析

（1）列车运行图。列车运行图作为列车运行的时空联系的图解，以图表形式展示了列车在轨道线网上的运行计划，是乘务组制订排班计划的基础，运行图的调整改变会直接造成乘务组的工作安排与任务分配的变动。

（2）车底运用计划。车底运用计划，决定了列车的运行时间、路线、编组、检修、回库等信息。车底运用计划由乘务人员执行，因此，车底运用计划会对乘务组的调度和轮班产生影响。

（3）劳动法规与工作时间规定。国家和地方对劳动时间、休息时间等的规定，约束了乘务组的排班方式和工作强度，对乘务员的工作状态和乘务组的整体运行有直接影响。城市轨道交通运营企业在制定乘务组排班计划时必须严格遵守工作时间规定(连续工作时间、最长工作时间、间休时间、就餐时间)。

（4）外部环境风险。外部环境风险主要包括事故风险及天气风险2部分。参考学者对国内事故统计分析，发生事故原因主要包括设备故障以及大客流情况。列车或车站设备故障可能会导致运营中断或列车延误，继而调整列车运行计划与乘务计划；节假日、大型活动期间会出现大客流情况，高密度的人流会增加站台和车厢内的安全隐患，可能涉及到乘务工作时间的延长和紧急班次的调整。同时，极端天气的发生会严重影响列车运行安全，乘务组可能面临班次取消或延迟等现象。

（5）乘务运用成本。乘务运用成本是各个班次乘务运用成本之和，主要包括乘务员的工资福利、培训费用、社会保险、加班补贴等人力成本。乘务运用成本不仅关乎到城市轨道交通运营的经济效益，也直接影响着乘务组的日常管理和未来发展规划。

1.2　乘务组运用态势指标体系构建

基于城市轨道交通乘务组运用态势的影响因素，在确定城市轨道交通乘务组运用态势评估指标体系时，可将其分为外部环境和内部运行2类指标。外部环境指标可根据环境风险如天气、事故等确定；内部运行指标可根据列车运行情况、劳动法规与工作时间规定、乘务运行成本确定。由于乘务组的运用离不开列车运行，两者息息相关，互相影响，因此在设置指标时，可通过乘务计划的偏离来描述乘务实际驾驶列车运行与计划运行的偏离情况。在劳动法规与工作时间规定下，乘务运行情况可根据乘务规则中规定的相关时间标准(间休、就餐、连续工作及最长工作时间)进行评估。成本费用可通过乘务员工作费用及工作人员数量确定。因此，分别从环境风险、任务偏离、时间偏离、成本费用4个角度提取了相关指标来对城市轨道交通乘务组运用态势进行评估。城市轨道交通乘务组运用态势评估指标体系如图1所示。

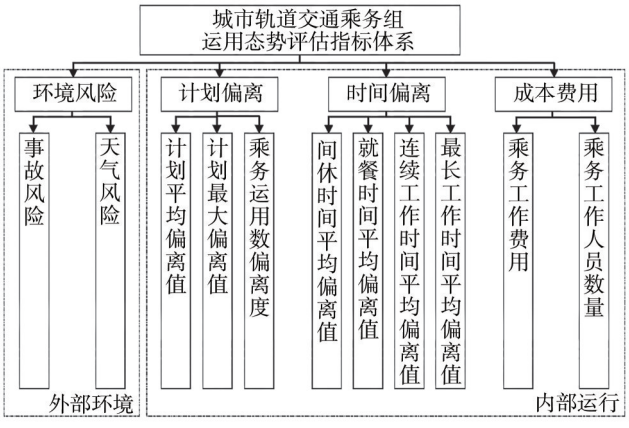

图1　城市轨道交通乘务组运用态势评估指标体系

Fig.1　Situation assessment index system for crew operations in urban railway transit

1.3　态势指标量化

1.3.1　环境风险

（1）事故风险。根据国内事故统计分析[16]，北京地铁运营有限公司将运营时间延误超过5 min的事件定义为运营事故。事故发生的主要原因是设备故障和大客流情况等。考虑到易于量化原则，研究通过计算设备故障情况和大客流事件在统计时段内

的发生频率来描述事故风险Q_1。其计算公式为

$$Q_1 = \beta_s \frac{S}{t} + (1 - \beta_s) \frac{K}{t} \tag{1}$$

式中：β_s为设备故障情况的权重；S为在统计时段t内发生设备故障的次数，次；K为大客流事件在统计时段t内发生的次数，次。

（2）天气风险。根据中国对极端天气事件的分类标准，同时考虑其对轨道交通运营产生的影响情况[3]，极端天气标准下限如表1所示。研究以极端天气事件在某一时间区间内的发生频率来描述天气风险Q_2，其计算公式如下。

$$Q_2 = \sum_{p=1}^{P} \sigma_p \frac{W_p}{t} \tag{2}$$

式中：σ_p为第p个极端天气的权重；W_p为第p种极端天气在统计时间t中出现的次数，次。由于地理存在差异，不同地铁公司的实际情况会有所不同，第p个极端天气的权重应结合历史数据，并考虑不同地区的天气情况及其造成的影响来决定。

表1　极端天气标准下限

Tab.1　Lower limit of extreme weather criteria

极端天气	标准下限
暴雨	30~69.9 mm/12 h
大风	17.2~20.7 m/s
暴雪	10.0~19.9 mm/d
浓雾	50~200 m

1.3.2　计划偏离

描述乘务运用计划偏离的态势指标包括了计划的平均偏离值与计划最大偏离值以及乘务运用数量的偏离度，下面对这些指标进行量化分析。

（1）计划平均偏离值。计划平均偏离值是将每个乘务员执行任务早/晚点的偏离值进行统计并计算，算出整体乘务组运用任务平均偏离情况，偏离值越高，说明乘务运用任务偏离程度越大。计划平均偏离值Q_3的计算公式如下。

$$Q_3 = \frac{\sum_{l}^{L} \delta_y^l}{L_y} \tag{3}$$

式中：δ_y^l为第l个乘务员的运用任务偏离值，是乘务员l实际到达或离开某个站点的时间与计划时间的差值，min；L_y为乘务运用任务发生偏离的乘务员总数，人。

（2）计划最大偏离值。计划最大偏离值Q_4是一个统计值，反映了一段时间内，乘务员驾驶任务发生偏离的最大值，min。其计算公式如下。

$$Q_4 = \max \delta_y^l \tag{4}$$

（3）乘务运用数偏离度。在实际操作中，受制于运行过程中的不确定因素，诸如设施设备故障或大客流冲击等变故，往往导致乘务实际运用数与计划运用数之间产生出入。乘务运用数偏离度Q_5以实际运用数与计划运用数之差相对于计划运用数的比例表示，计算公式如下。

$$Q_5 = \frac{r_s - r_j}{r_j} \times 100\% \tag{5}$$

式中：r_s为实际运用数，人；r_j为计划运用数，人。

1.3.3　时间偏离

（1）间休时间平均偏离值。间休时间平均偏离值Q_6能够反映乘务组实际运行与计划的偏离情况，通过乘务员间休时间发生偏离时间之和与间休时间发生偏离的乘务员总数之比计算，其计算公式如下。

$$Q_6 = \frac{\sum_{l=1}^{L_j} \delta_j^l}{L_j} \tag{6}$$

式中：L_j为间休时间发生偏离的乘务员总数，人；δ_j^l为第l个乘务员的间休时间偏离值，min。

（2）就餐时间平均偏离值。城市轨道交通的乘务排班计划需要考虑乘务员的午、晚餐供应时段，在进行乘务工作过程中，乘务员不仅有就餐时长要求，还有就餐时段要求。就餐时间平均偏离值Q_7通过乘务员就餐时间发生偏离时间之和与就餐时间发生偏离的乘务员总数之比计算，其计算公式如下。

$$Q_7 = \frac{\sum_{l=1}^{L_c} \delta_c^l}{L_c} \tag{7}$$

式中：L_c为就餐时间发生偏离的乘务员总数，人；δ_c^l为第l个乘务员的就餐时间偏离值，min。

（3）连续工作时间平均偏离值。连续工作时间平均偏离值Q_8通过乘务员连续工作时间发生偏离时间之和与连续工作时间发生偏离的乘务员总数之比计算，其计算公式如下。

$$Q_8 = \frac{\sum_{l=1}^{L_x} \delta_x^l}{L_x} \tag{8}$$

式中：L_x为连续工作时间发生偏离的乘务员总数，人；δ_x^l为第l个乘务员的连续工作时间偏离值，min。

（4）最长工作时间平均偏离值。最长工作时间平均偏离值Q_9通过乘务员最长工作时间发生偏离时间之和与最长工作时间发生偏离的乘务员总数之比计算，其计算公式如下。

$$Q_9 = \frac{\sum_{l=1}^{L_z}\delta_z^l}{L_z} \tag{9}$$

式中：L_z为最长工作时间发生偏离的乘务员总数，人；δ_z^l为第l个乘务员的最长工作时间偏离值，min。

1.3.4　成本费用

（1）乘务工作费用。研究采用乘务员所在班种的工作时间乘以该班种的工作基本费率，计算所有乘务员的工作费用Q_{10}。其计算方式如下。

$$Q_{10} = \sum_{r=1}^{R} c_z t_{zr} + c_b t_{br} + c_w t_{wr} \tag{10}$$

式中：c_z为早班的工作基本费率；c_b为白班的工作基本费率；c_w为晚班的工作基本费率；t_{zr}为早班的工作时间，h；t_{br}为白班的工作时间，h；t_{wr}为晚班的工作时间，h。

（2）乘务工作人员数量Q_{11}。过少的乘务人员可能导致其过度工作和疲劳，对服务质量和乘客安全产生负面影响，而过多的乘务人员可能导致人力资源浪费和成本增加。因此需要运用乘务工作人员数量指标对乘务组的运用态势进行研究。

2　城市轨道交通乘务组运用态势评估

2.1　权重的赋值

在评估城市轨道交通乘务组的运用态势时，权重选取应兼顾主观经验与客观数据，研究通过融合主观赋权法与客观赋权方法的优点，采用组合赋权法来确定权重系数，以期提升评估结果的精确性与公正性。

（1）确定主观权重。序关系分析法(G1法)是一种基于决策者主观判断的赋权方法，G1法能够直接反映决策者的主观判断，操作流程相对简洁，仅需决策者对指标进行两两比较并构建序关系，且对非量化因素具有一定的包容性，方法步骤如下。

步骤1：确定指标间的序关系。根据所构建的乘务组运用态势评估指标体系，创建指标集$\{Q_1, Q_2, \cdots, Q_n\}$，其中$n$为指标的个数，专家结合经验知识和评估准则在指标集中选出重要的1个指标，记为P_1，在余下的$n-1$个指标中，决策者根据自身判断，将指标按照重要性程度从高到低依次排序，得到序关系$P_1 > P_2 > \cdots > P_n$。

步骤2：确定序关系相邻属性间的重要程度。对于任意2个相邻属性P_j和P_{j-1}，决策者赋予的相对重要程度可表示为m_j，m_j越大，则证明P_{j-1}相比P_j指标的重要性越大。研究通过参考文献[17]对m_j的取值标准进行了定义，m_j取值参考如表2所示，m_j计算公式如下。

$$m_j = \frac{r_{j-1}}{r_j} \qquad j = n, n-1, \cdots, 2 \tag{11}$$

式中：r_j为指标P_j的主观权重。

表2　m_j取值参考

Tab.2　Reference values for m_j

m_j取值	含义
1.0	P_{j-1}与P_j同等重要
1.2	P_{j-1}比P_j稍显重要
1.4	P_{j-1}比P_j明显重要
1.6	P_{j-1}比P_j非常重要
1.8	P_{j-1}比P_j极其重要

步骤3：计算各指标权重。根据决策者给定的m_j值，可以根据公式(12)—(13)计算各属性的主观权重。

$$w_j^1 = r_j = \left(1 + \sum_{j=2}^{n}\prod_{z=j}^{n} m_z\right)^{-1} \tag{12}$$

$$r_{j-1} = m_j r_j \qquad j = n, n-1, \cdots, 2 \tag{13}$$

（2）确定客观权重。CRITIC方法作为一种客观的权重确定技术，其依据评价指标之间的对比强度与冲突程度来评估各指标的权重。这种方法综合考虑了指标变异性大小和指标之间的相关性关系。CRITIC方法确定客观指标权重的步骤如下。

步骤1：构建评价指标矩阵。对I个时段的城市轨道交通乘务组运用态势进行评估，指标体系中共包含J项指标，则相应的第i个时段关于第j项指标的样本值为x_{ij}，其中$i=1, 2, \cdots, I$，$j=1, 2, \cdots, J$构成评价指标矩阵X，如公式(14)所示。

$$X = \left[x_{ij}\right]_{I\times J} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1J} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{I1} & \cdots & x_{IJ} \end{pmatrix} \tag{14}$$

步骤2：指标无量纲化处理。由于不同量纲会对评价结果造成较大影响，应该无量纲化处理各指标，如公式(15)所示。

$$x'_{ij}=\frac{x_{\max}-x_j}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{15}$$

步骤3：指标变异性计算。在该方法中利用标准差来表示各指标值的差异波动情况，标准差值越大表明指标的分散程度较高，从而能够揭示更多的细节，也就是指标本身的评价能力也就越好，该指标分配权重就要越多。指标变异性计算公式如下。

$$\begin{cases}\bar{x}_j=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}x_{ij}\\ S_j=\sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_j)^2}{n-1}}\end{cases} \tag{16}$$

步骤4：指标冲突性计算。通过相关系数来展示指标间的冲突程度，当一个指标与其他指标展现出较高的相关性时，表明它与其他指标的冲突性较低，也就是该指标与其他指标提供的信息重叠度较高，该指标的评价能力也就越弱，该指标分配的权重应该越少。相关系数计算公式如下。

$$R_j=\sum_{i=1}^{I}(1-r_{ij}) \tag{17}$$

步骤5：指标信息量计算。C_j的值越大，说明第j个指标在整体评价指标体系的重要性越显著，因此应考虑为其分配较高的权重，指标信息量计算公式如下。

$$C_j=S_j\sum_{i=1}^{I}(1-r_{ij})=S_j\times R_j \tag{18}$$

步骤6：计算权重。第j个指标的客观权重计算公式如下。

$$w_j{}^2=\frac{C_j}{\sum\limits_{j=1}^{I}C_j} \tag{19}$$

（3）确定组合权重。上文利用G1法和CRITIC法得到了主客观权重向量，分别为$w^1=(w_1{}^1,\ w_2{}^1,\ \cdots,\ w_J{}^1)$和$w^2=(w_1{}^2,\ w_2{}^2,\ \cdots,\ w_J{}^2)$，用二者的线性组合表示组合权重向量$W$，如公式(20)所示。

$$W=\beta_1w^1+\beta_2w^2 \tag{20}$$

式中：β_1和β_2分别为主客观权重的线性组合系数。

在博弈论中，离差极小化方法通常指的是在合作博弈的背景下，寻找一种分配方案(如收益分配、资源分配等)，使得所有参与者对该方案的不满意程度(离差)最小化，这种不满意程度通常由离差函数来度量。依据博弈论的思想，采用最优策略离差极小化处理这2种权重，以满足最优化问题的一阶导数的条件。为得到最优组合权重，对线性组合β_1和β_2进行优化，以最小化W和w^1，w^2的离差值为目标，求得最优的综合权重，目标函数如公式(21)所示。

$$\begin{cases}\min\ \|\beta_1w^{1\mathrm{T}}+\beta_2w^{2\mathrm{T}}-w^{1\mathrm{T}}\|\\ \min\ \|\beta_1w^{2\mathrm{T}}+\beta_2w^{2\mathrm{T}}-w^{2\mathrm{T}}\|\end{cases} \tag{21}$$

利用矩阵微分特性，得出最优导数条件下的线性方程组如公式(22)所示。

$$\begin{cases}\beta_1w^1w^{1\mathrm{T}}+\beta_2w^1w^{2\mathrm{T}}=w^1w^{1\mathrm{T}}\\ \beta_1w^2w^{1\mathrm{T}}+\beta_2w^2w^{2\mathrm{T}}=w^2w^{2\mathrm{T}}\end{cases} \tag{22}$$

归一化处理如公式(23)所示。

$$\begin{cases}\beta'_1=\dfrac{\beta_1}{\beta_1+\beta_2}\\ \beta'_2=\dfrac{\beta_2}{\beta_1+\beta_2}\end{cases} \tag{23}$$

综上，经过优化得到的组合权重如公式(24)所示。

$$w'=\beta'_1w^1+\beta'_2w^2 \tag{24}$$

2.2　基于组合权重-VIKOR方法的乘务组运用态势评估模型

城市轨道交通乘务组的运用态势评估涉及诸多方面，VIKOR作为一种多属性决策(MADM)方法，适合处理这类包含多个可能相互冲突的评价标准的问题。同时，城市轨道交通运营环境往往伴随着数据不完全、信息模糊、不确定性高等特点，VIKOR方法可通过与模糊集理论、直觉模糊集理论等不确定性处理方法相结合，可以更好地处理涉及模糊与不确定信息的态势评估问题。基于组合权重-VIKOR方法的城市轨道交通乘务组运用态势评估模型如图2所示。

步骤1：构建决策矩阵。对I个时段的城市轨道交通乘务组运用态势进行评估，指标体系中共包含J项指标，则相应的第i个时段关于第j项指标的样本值为x_{ij}，其中$i=1,\ 2,\ \cdots,\ I$，$j=1,\ 2,\ \cdots,\ J$构成决策矩阵$\boldsymbol{X}$如公式(25)所示。

$$\boldsymbol{X}=\left[x_{ij}\right]_{I\times J}=\begin{pmatrix}x_{11}&\cdots&x_{1J}\\ \vdots&&\vdots\\ x_{I1}&\cdots&x_{IJ}\end{pmatrix} \tag{25}$$

步骤2：决策矩阵规范化处理。通过对决策矩阵进行规范化处理以消除因量纲不同而造成评价结果的差异影响。

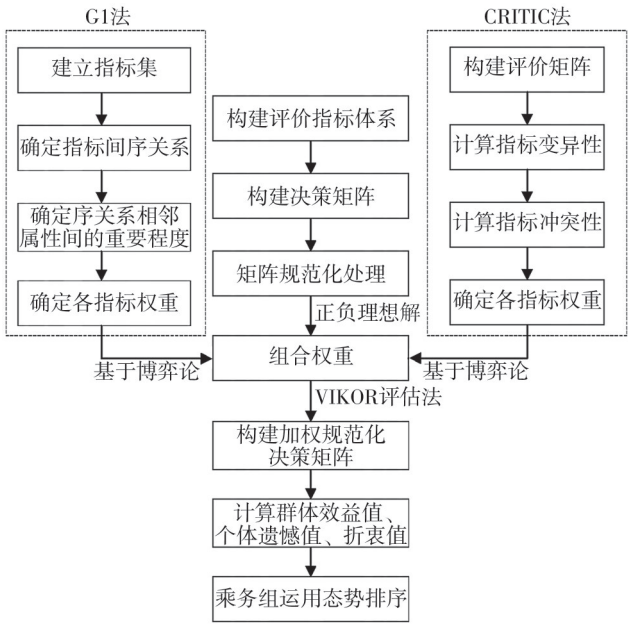

图2　基于组合权重-VIKOR方法的城市轨道交通乘务组运用态势评估模型

Fig.2　Situation assessment model for crew operations in urban railway transit based on combined weight-VIKOR method

效益型指标计算如公式(26)所示。

$$x'_{ij}=\frac{x_j-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{26}$$

成本型指标计算如公式(27)所示。

$$x'_{ij}=\frac{x_{\max}-x_j}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{27}$$

步骤3：确定正负理想解。根据规范化矩阵$\boldsymbol{X}'=\left[x'_{ij}\right]_{I\times J}$确定正理想解$x^+$和负理想解$x^-$，其计算如公式(28)—(29)所示。

$$x^+=(x_1^+,\ x_2^+,\ \cdots,\ x_J^+) \tag{28}$$

$$x^-=(x_1^-,\ x_2^-,\ \cdots,\ x_J^-) \tag{29}$$

其中，$x_j^+=\max_i(x'_{ij})$，$x_j^-=\min_i(x'_{ij})$。

步骤4：组合赋权法求权重。利用组合权重的方法来确定指标权重w_j。

步骤5：计算群体效益值S_i、个体遗憾值R_i与折衷值Q_i，如公式(30)—(32)所示。

$$S_i=\sum_{j=1}^{J}w_j\left[\frac{x_j^+-x_{ij}}{x_j^+-x_j^-}\right] \tag{30}$$

$$R_i=\max_j w_j\left[\frac{x_j^+-x_{ij}}{x_j^+-x_j^-}\right] \tag{31}$$

$$Q_i=v\frac{S_i-S^+}{S^--S^+}+(1-v)\frac{R_i-R^+}{R^--R^+} \tag{32}$$

其中，S_i为最大群体效应，$S^+=\min_i(S_i)$，$S^-=\max_i(S_i)$；R_i为小个体遗憾，$R^+=\min_i(R_i)$，$R^-=\max_i(R_i)$；v为决策机制系数，$v\in[0,1]$，在对城市轨道交通乘务组进行评估时，为了更多关注群体效益，同时尽量减少个别指标的大幅波动，选择$v=0.7$。

步骤6：对各方案进行排序。各备选方案的排序应按S_i，R_i，Q_i的值进行，数值越小的备选方案就越优。

2.3　态势等级划分

根据上文构建的乘务组运用态势评估体系及相关专家学者的建议，把城市轨道交通乘务组运用态势评估结果细分为5个等级，乘务组运用态势等级定义如表3所示。

表3　乘务组运用态势等级定义

Tab.3　Definition of situation grading for crew operations

态势等级	定义
Ⅰ级(好)	乘务组实际运行与预定计划基本一致，任务完成度高，极少或无驾驶列车晚点情况发生，即使偶有延误，影响甚微
Ⅱ级(较好)	乘务组总体运行顺畅，虽有个别驾驶列车晚点现象，但程度较轻，且对乘务组整体运用计划的偏离可控，通过微调或利用预留时间，能较快恢复良好态势
Ⅲ级(一般)	乘务组运行受到一定干扰，导致部分乘务任务有一定偏离，影响列车接续，但尚处于可接受范围
Ⅳ级(较差)	乘务组遭遇较大程度干扰，驾驶列车晚点情况较为严重，对乘务组运用计划造成显著影响，但通过有效干预措施，尚能一定程度上缓解问题
Ⅴ级(差)	乘务组任务偏离陷入严重困境，驾驶列车大面积晚点乃至线路运营受阻，乘务组运用计划几乎无法按计划执行，对后续乘务组运用造成极大困扰

在充分考虑乘务组运用态势评估体系中各指标的基础上，结合乘务组运用的研究数据、相关文献，确定以折衷值Q_i作为乘务组运用态势评价指标的标准。乘务组运用态势评价指标标准如表4所示。

表4　乘务组运用态势评价指标标准

Tab.4　Situation assessment index standard for crew operations

等级	好	较好	一般	较差	差
折衷值Q_i	0~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~1

3　案例分析

3.1　数据预处理

收集成都地铁某线路某日乘务运营数据，具体包括当日的乘务排班计划、各个乘务驾驶列车晚点时间、不同时刻乘务实际在岗工作人员数量、乘务组就餐及休息时间偏离时间等，对数据进行处理，

以1 h为单位统计时段，将一日运营时间划分为20个时段，计算评估20个时段的乘务组运用态势。依据指标量化的计算方法，得出成都地铁乘务组的运用情况指标值，并据此建立初始的评价矩阵。成都地铁某日乘务组运用态势表征指标初始值如表5所示。

3.2　模型计算

将初始值无量纲化、标准化后采用G1法、CRITIC法确定各指标权重系数，后根据博弈论将其组合，根据研究构建的基于组合权重-VIKOR方法的乘务组运用态势评估模型进行测算，根据G1法、CRITIC法以及博弈论组合方法，得到各表征指标权重系数。态势表征指标权重系数如表6所示。为验证方法的有效性，使用普通VIKOR方法与研究构建的组合权重-VIKOR模型对案例评估结果进行对比，乘务组运用态势评估结果及对比如表7所示。

3.3　结果分析

根据权重的计算结果，发现乘务组运用态势表征指标的权重系数接近相等，权重系数较为均衡，证明指标在决策过程中具有相似的重要性，其中，计划偏离与乘务运用数偏离的权重相对较高，表明在决策过程中需要重点考虑这2个指标。

表5　成都地铁某日乘务组运用态势表征指标初始值

Tab.5　Initial values of situation characterization indices of Chengdu Metro crew operations on a day

时段	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}	Q_{11}
5:00—6:00	2.50	0	0	0	0	0.1	1.25	2.57	2	6.0	20
6:00—7:00	1.40	0	0	0	0	0	1.03	1.77	0	14.4	51
7:00—8:00	1.33	0	1.65	0	0.1	0.1	1.10	1.87	0	22.4	73
8:00—9:00	1.55	0	2.35	0	0.3	0	1.80	3.25	0	26.6	84
9:00—10:00	1.17	0	0	0	0.1	0	2.30	3.77	0	25.2	79
10:00—11:00	1.67	0	0	0	0	0	1.83	2.33	0	23.0	67
11:00—12:00	0	0.92	0	0	0	0	0	0	0	15.9	42
12:00—13:00	0	0.75	0	0	0	0	0	0	0	20.0	50
13:00—14:00	0	0	0	1.10	0	0	0	0	0	19.2	48
14:00—15:00	0	0	0	1.26	0	0	0	0	0	20.5	52
15:00—16:00	0	0	0	0.94	0	0	0	0	0	19.6	50
16:00—17:00	0	0	0	2.56	0.1	0.2	1.15	1.62	0	23.3	50
17:00—18:00	1.26	1.26	1.06	2.98	0.3	0.1	1.55	2.22	0	27.1	79
18:00—19:00	2.64	1.80	2.10	2.61	0.5	0.2	4.95	6.72	2	29.1	89
19:00—20:00	6.25	0	6.84	5.33	0.2	0	6.26	10.10	2	25.8	82
20:00—21:00	7.21	0	8.86	2.04	0.1	0	6.48	10.35	2	19.8	66
21:00—22:00	5.25	0	0	2.65	0	0	4.58	7.35	0	17.7	59
22:00—23:00	1.39	0	0	1.69	0	0	1.39	2.62	2	15.6	52
23:00—0:00	3.20	0	2.19	2.03	0.2	0	2.08	5.22	1	10.5	35
0:00—1:00	1.73	0	0	2.55	0	0	2.53	3.32	1	4.8	16

表6　态势表征指标权重系数

Tab.6　Weighting coefficients of situation characterization indices

表征指标	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
G1	0.080 8	0.080 8	0.080 8	0.080 8	0.096 9
CRITIC	0.084 8	0.116 2	0.080 5	0.088 3	0.078 1
组合权重	0.083 2	0.102 0	0.080 6	0.085 3	0.085 6
表征指标	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}
G1	0.080 8	0.162 8	0.096 9	0.116 3	0.067 3
CRITIC	0.118 0	0.069 0	0.072 2	0.098 0	0.091 0
组合权重	0.103 1	0.106 5	0.082 1	0.105 3	0.081 5

表7　乘务组运用态势评估结果及对比

Tab.7　Situation evaluation results and comparisons of crew operations

t	组合权重-VIKOR				传统VIKOR			
	R_i	S_i	Q_i	排序	R_i	S_i	Q_i	排序
5:00—6:00	0.235 3	0.105 3	0.587 3	15	0.217 5	0.090 9	0.579 4	13
6:00—7:00	0.119 7	0.039 1	0.011 8	1	0.127 2	0.043 6	0.011 1	1
7:00—8:00	0.256 9	0.063 7	0.294 2	10	0.266 0	0.071 0	0.405 6	10
8:00—9:00	0.297 9	0.076 0	0.415 3	12	0.318 2	0.084 7	0.589 9	14
9:00—10:00	0.239 8	0.071 1	0.336 7	11	0.253 1	0.078 5	0.474 8	12
10:00—11:00	0.188 2	0.063 4	0.242 2	9	0.198 8	0.068 1	0.324 2	9
11:00—12:00	0.119 9	0.052 2	0.108 8	4	0.120 4	0.046 5	0.036 4	2
12:00—13:00	0.133 4	0.053 0	0.124 7	6	0.137 1	0.056 9	0.158 9	6
13:00—14:00	0.103 5	0.050 2	0.082 2	2	0.112 5	0.053 9	0.108 7	4
14:00—15:00	0.115 1	0.054 7	0.124 2	5	0.125 1	0.058 7	0.169 6	8
15:00—16:00	0.104 6	0.051 6	0.093 3	3	0.113 7	0.055 4	0.125 4	5
16:00—17:00	0.295 4	0.103 1	0.614 9	17	0.294 7	0.090 9	0.637 9	16
17:00—18:00	0.437 4	0.077 7	0.530 0	14	0.444 4	0.083 4	0.672 1	17
18:00—19:00	0.788 3	0.105 3	0.991 1	20	0.773 3	0.090 9	1.000 0	20
19:00—20:00	0.689 1	0.105 3	0.918 7	19	0.704 5	0.090 9	0.947 9	19
20:00—21:00	0.615 6	0.106 5	0.873 9	18	0.625 9	0.090 9	0.888 5	18
21:00—22:00	0.329 5	0.075 3	0.433 5	13	0.342 0	0.066 2	0.412 6	11
22:00—23:00	0.269 9	0.105 3	0.612 6	16	0.265 0	0.090 9	0.615 4	15
23:00—0:00	0.292 9	0.052 7	0.239 0	8	0.299 3	0.045 8	0.165 3	7
0:00—1:00	0.181 4	0.052 7	0.157 5	7	0.175 4	0.045 5	0.067 4	3

乘务组运用态势评估折衷值结果对比如图3所示，乘务组运用态势评估等级结果对比如图4所示。总的来看，折衷值Q_i均伴随有突增突减情况，存在一定波动性，2种方法均呈现出2个峰值，第1个峰值是8:00—9:00，第2个峰值是18:00—19:00，2个时段处于早高峰与晚高峰时段，计算结果表明早高峰、晚高峰时段乘务运用态势等级变差，且晚高峰相比早高峰的态势更差。高峰时段由于客流增加，乘务实际运用与计划产生了一定偏离，导致乘务运用态势较差，且研究日期处于周五，当日成都地铁晚高峰客流激增，并产生大面积晚点，Q_i值符合现场实际运营情况，晚高峰的折衷值较早高峰的折衷值高，这表明使用VIKOR方法进行态势评估研究，具有一定合理性，乘务组运用态势等级统计如表8所示。通过对比分析使用组合权重-VIKOR方法及传统VIKOR方法的求解结果，不难发现在使用这2种方法求解时得出的排序结果基本相同，但在对态势较好的样本进行评估时，组合权重-VIKOR方法得出的评估结果更好，如7:00—16:00，组合权重-VIKOR方法得到的折衷值Q_i相比于传统VIKOR方法更低，态势等级较好。

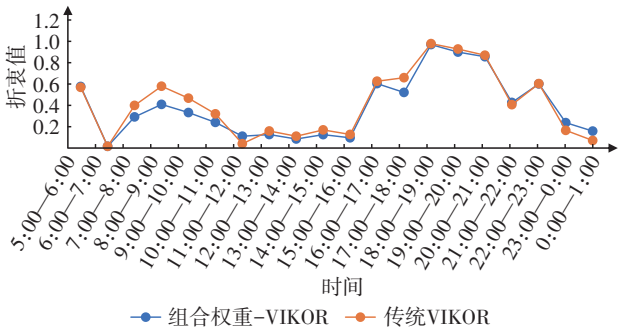

图3　乘务组运用态势评估折衷值结果对比

Fig.3　Result comparison of compromise values for crew operation situation assessment

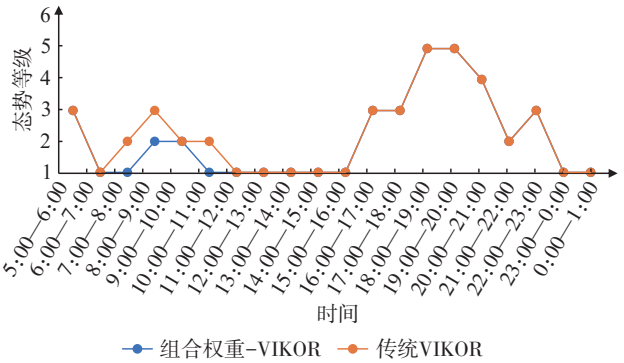

图4　乘务组运用态势评估等级结果对比

Fig.4　Result comparison of levels for crew operation situation assessment

表8　乘务组运用态势等级统计

Tab.8　Statistics of levels for crew operation situation

时段	5:00—6:00	6:00—7:00	7:00—8:00	9:00—10:00	10:00—11:00
等级	一般	好	好	较好	较好
时段	12:00—13:00	13:00—14:00	14:00—15:00	15:00—16:00	16:00—17:00
等级	好	好	好	好	一般
时段	17:00—18:00	18:00—19:00	19:00—20:00	20:00—21:00	21:00—22:00
等级	一般	差	差	较差	较好
时段	22:00—23:00	23:00—0:00	0:00—1:00		
等级	一般	好	好		

4　结束语

研究基于城市轨道交通乘务组运用的影响因素，建立了城市轨道交通乘务组运用态势评估指标体系，选出事故风险、天气风险、间休时间平均偏离值、计划平均偏离值等评估指标并对指标的量化和等级划分进行了说明。建立了基于组合权重-VIKOR方法的城市轨道交通乘务组运用态势评估模型，最后以成都地铁乘务运用相关数据进行案例分析，结果表明组合权重-VIKOR方法切实可行，能够合理反映乘务运用态势。研究成果可为乘务计划相关决策提供依据，有助于轨道交通运营企业提高运营效率。

参考文献：

[1] 陈雅欣，彭其渊，刘晓薇，等. 基于SPA-TOPSIS方法的编组站运输态势表征与评估[J]. 铁道运输与经济，2023，45(6)：15-23.
CHEN Yaxin，PENG Qiyuan，LIU Xiaowei，et al. Characterization and Assessment of Transportation Situation in Marshalling Stations Based on SPA-TOPSIS Method[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(6)：15-23.

[2] 李　栋. 区域铁路重空车流分布态势评估及推演方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2022.

[3] 刘杰鑫. 基于多源信息融合的高速铁路运输组织态势表征与评估[D]. 成都：西南交通大学，2021.

[4] 李璐瑶. 高速铁路动车组运用态势的分析与评估[D]. 成都：西南交通大学，2021.

[5] 闫　旭，彭其渊，殷　勇，等. 区域铁路运输安全态势表征与评估方法[J]. 中国安全科学学报，2020，30(4)：33-40.
YAN Xu，PENG Qiyuan，YIN Yong，et al. Characterization and Assessment of Safety Situation for Regional Railway Transportation[J]. China Safety Science Journal，2020，30(4)：33-40.

[6] YAN X，PENG Q Y，YIN Y，et al. Evaluating Railway Operation Safety Situation in China Based on an Improved TOPSIS Method：A Regional Perspective[J]. Journal of Advanced Transportation，2020，2020：1-18.

[7] 朱国栋. 高速铁路综合维修作业态势的表征与评估[D]. 成都：西南交通大学，2021.

[8] 胡勇宾. 基于聚类分析的高速铁路安全态势预测方法研究[J]. 中国水运，2016(4)：54-55.

[9] 李沁洋，彭其渊，张永祥，等. 基于列生成算法的高速铁路动车组司机乘务计划调整优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(6)：56-66.
LI Qinyang，PENG Qiyuan，ZHANG Yongxiang，et al. Crew Schedule Optimization for Rolling Stock Drivers of High Speed Railway via Column Generation Algorithm[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(6)：56-66.

[10] 李献忠，徐瑞华. 城市轨道交通乘务值乘方式的模糊综合评价法[J]. 城市轨道交通研究，2006(9)：41-43.
LI Xianzhong，XU Ruihua. Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Urban Rail Transit Crew Duty Modes[J]. Urban Mass Transit，2006，9(9)：41-43.

[11] 金　华，陈绍宽，彭小波，等. 城市轨道交通乘务排班计划方案评价方法[J]. 城市轨道交通研究，2017，20(3)：109-112.
JIN Hua，CHEN Shaokuan，PENG Xiaobo，et al. Evaluation Method for Crew Scheduling of Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit，2017，20(3)：109-112.

[12] 苏　铭，刘兰芬，杨信丰，等. 基于TSP问题思想的城市轨道交通乘务排班计划研究[J]. 铁道运输与经济，2022，44(2)：131-138.
SU Ming，LIU Lanfen，YANG Xinfeng，et al. Research on

（下转第90页）