DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250305

基于层次分析法和熵权法的有轨电车综合评估体系研究

肖博华,陈雷进
(上海浦东建筑设计研究院有限公司,上海市 201206)

摘 要:为提升公交服务水平和缓解交通拥堵,近年来国内许多城市陆续开通现代有轨电车系统,亟须构建一套科学的有轨电车综合评估体系。通过从运营水平、客流水平、经济水平和服务水平4个维度构建有轨电车综合评估体系,利用层次分析法和熵权法组合赋权,加强了评估的客观性,并给出指标获取和计算方法。基于该评估体系,以上海市张江有轨电车线路为例,对评估体系进行验证,并结合评估结论提出合理化建议,为有轨电车的优化和调整提供依据。

关键词:层次分析法;熵权法;有轨电车;评价指标体系
中图分类号:U491.1+7;U482.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-7716(2026)01-0347-04

Research on Comprehensive Evaluation System of Tram Based on Analytic Hierarchy Process and Entropy Weight Method

XIAO Bohua, CHEN Leijin
(Shanghai Pudong Architectural Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: In order to improve the level of public transportation services and alleviate the traffic congestion, the modern tram systems have been gradually opened in many cities of China in recent years. There is an urgent need to build a scientific comprehensive evaluation system for trams. A comprehensive evaluation system for trams is established from four dimensions of operational level, passenger flow level, economic level and service level. By combining the analytic hierarchy process (AHP) and the entropy weight method for weighting, the objectivity of the evaluation is enhanced, and the methods for obtaining and calculating the indicators are provided. Based on this evaluation system, taking the tram line in Zhangjiang of Shanghai as an example, the evaluation system is validated, and the reasonable suggestions are proposed in combination with the evaluation conclusions, providing a basis for the optimization and adjustment of the tram.

Keywords: analytic hierarchy process; entropy weight method; tram; evaluation index system

0 引 言

近年来,随着机动车保有量的快速增长,交通拥堵问题日益突出,国内许多城市均提出要大力发展公共交通,有轨电车迎来了发展黄金期。特大型和大型城市在新一轮的城市总体规划中将有轨电车作为大容量快速轨道交通的补充和接驳或服务外围新城的普通客流走廊;中小城市由于政策限制,将现代有轨电车作为建设轨道交通的主要选择。

但由于历史和技术等原因,部分城市有轨电车的建设和运营存在困境,实际运营远未达到项目预期。因此,构建科学的有轨电车综合评估体系,对有轨电车的建设、运营和优化至关重要。目前国内已陆续开展对有轨电车评估的研究工作,包括运营评估[1]、后评估[2]、服务质量评估[3]。现有的评估方法主要包括层次分析法、模糊综合评价法、灰色关联系数法、熵权法、理想解法等[4-6],评估内容主要集中在客流、运营、安全、服务、财务、交通影响、环境影响等方面[7-9]。

综上所述,本文综合考虑运营水平、客流水平、经济水平和服务水平4个方面,利用层次分析法和熵权法构建有轨电车综合评估模型,减少评价的主观判断。同时,以上海市张江有轨电车线路为例,对

收稿日期:2025-03-24
作者简介:肖博华(1992—),男,硕士,工程师,从事交通规划、工程咨询和工程设计工作。

评估体系进行验证，根据评估结论提出合理化建议，为有轨电车的优化和调整提供依据。

1 评估方法

1.1 层次分析法

层次分析法（AHP）是指将与决策有关的元素分解成目标、准则、指标等层次，在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。层次分析法的本质是通过层次结构将人对指标重要性的判断转化为指标的相对重要度，属于主观权重法，简洁实用，需要数据少。

层次分析法的计算步骤如下：

（1）确定层次结构模型。按决策的目标和考虑的因素之间的相互关系，分为目标层、准则层、指标层，并绘出层次结构图。

（2）构造判断矩阵。将所有因素进行两两比较，按重要性程度评定等级。使用数量化的相对权重 a_{ij} 来描述第 i 个元素与第 j 个元素的重要性。

（3）计算单层次指标权重及一致性检验。计算某一层次所有因素对于上一层的相对重要性权值。计算一致性指标CI，并与随机一致性指RI进行比较，得出检验系数CR，当CR＜0.1时，可认为层次排序通过一致性检验，权重分配合理。

（4）计算组合权重。计算某一层次所有因素对于最高层的相对重要性权值。

1.2 熵权法

信息是系统有序程度的一个度量，熵是系统无序程度的一个度量。根据该定义，可以用熵值来判断指标的离散程度。指标的信息熵越小，其离散程度越大，对综合评价的影响就越大；指标的信息熵越大，其离散程度越小，对综合评价的影响就越小。熵权法是根据各指标的变异程度确定各权重，属于客观权重法，可避免主观判断导致的偏差。

熵权法的计算步骤如下：

（1）数据标准化。将各个指标的数值根据其性质采用极差法进行无量纲化处理。

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \tag{1}$$

$$Y_{ij} = \frac{\max(X_i) - X_{ij}}{\max(X_i) - \min(X_i)} \tag{2}$$

式中，X_{ij} 为第 i 个单位的第 j 个指标的原始值；Y_{ij} 为第 i 个单位的第 j 个指标的标准化值。

（2）求各指标的信息熵。根据信息熵在信息论中的定义，计算一组数据的信息熵 E_j 为：

$$E_j = -1/\ln(n)\sum_{i=1}^{n} P_{ij}\ln P_{ij} \tag{3}$$

$$P_{ij} = Y_{ij}/\sum_{i=1}^{n} Y_{ij} \tag{4}$$

式中，n 为评价对象个数；E_j 为第 j 个指标的信息熵。

（3）确定各指标权重。根据各指标的信息熵求出权重，权重 W_j 计算公式为：

$$W_j = \frac{1 - E_j}{k - \sum E_j}\ (j=1,2,\cdots,k) \tag{5}$$

式中，k 为指标个数；W_j 为第 j 个指标的熵权。

1.3 组合权重法

综合考虑层次分析法和熵权法的特点，将主观权重法和客观权重法相结合，采用加权平均的方法利用熵权法对层次分析法的结论进行修正，减少主观判断的影响。其组合权重计算公式如下：

$$W = \alpha W_1 + (1-\alpha)W_2 \tag{6}$$

式中，α 为加权系数，且 $\alpha \in [0,1]$。

2 评估体系构建

2.1 评价指标体系

现代有轨电车的综合评估涉及交通、运营、财务、城市发展、乘客体验等多个因素，需从多个层面去考察其综合效益。综合考虑指标客观性、数据可采集性、指标可比较性、评估可持续性等原则，借鉴《城市轨道交通运营指标体系》和《城市轨道交通服务质量评价规范》，构建包括运营水平、客流水平、经济水平和服务水平4方面14个指标的综合评估指标体系，具体内容详见表1。

表1　有轨电车综合评估指标体系

影响因素	具体指标	单位
运营水平	运营速度	km/h
	高峰发车间隔	min
	事故率	次/年
客流水平	日均客运量	人次/d
	客运强度	万人次/(km·d)
	百公里人次	人次/100 km
经济水平	运营收入	万元
	运营成本	万元
	人均运营成本	元
服务水平	城市形象	分
	乘客满意度	分
	候车时间	分
	到站时间	分
	乘客直达率	分

（1）运营水平指标。

运营速度：评价年有轨电车运营时段内列车运行的平均行程车速（含停站时间）。

高峰发车间隔：评价年高峰时段同一线路相邻两辆有轨电车发车的平均时间间隔。

事故率：评价年有轨电车发生的交通事故件数。

（2）客流水平指标。

日均客运量：评价年线路日客运量的平均值。

客运强度：评价年运营线路中单位运营里程上平均每日承担的客运量。

百公里人次：评价年有轨电车每运行一百公里所运载的客流量。

（3）经济水平指标。

运营收入：评价年有轨电车运营单位各类业务所得的货币金额之和。

运营成本：评价年有轨电车运营服务产生的所有费用。

人均运营成本：评价年运营成本与客运量的比值，表示每完成一位乘客服务产生的平均运营成本。

（4）服务水平指标。

乘客满意度：将乘客对有轨电车的满意程度分为非常满意、满意、一般、不满意四个级别。

候车时间：到达有轨电车车站后，需要等候的时间。

到站时间：从出发地或目的地到最近的有轨电车站点所需时间。

乘客直达率：乘坐有轨电车出行需要再接驳/换乘公交的次数。

2.2　指标获取和评分方法

现有的评估指标包括定量和定性两类。定量指标包括运营水平指标、客流水平指标和经济水平指标，通过获取有轨电车的统计数据，汇总计算得到。根据工可数据、规范要求及相关经验，确定评价指标的标准值和下限值，若评价值优于标准值，则为100分；差于下限值，则为0分；中间数值采用差值法计算，具体评分标准见表2。定性指标主要为服务水平指标，通过问卷调查获取，具体的评分标准见表3。

表2　定量指标评分标准

具体指标	标准值
运营速度	规范及经验
高峰发车间隔	工可数据
事故率	规范及经验
日均客运量	工可数据
客运强度	规范及经验
百公里人次	规范及经验
运营收入	工可数据
运营成本	工可数据
人均运营成本	工可数据

表3　定性指标评分标准

评分	城市形象	乘客满意度	候车时间	步行到站时间	乘客直达率
90	有很强提升作用	很满意	5 min内	5 min内	直达目的地
70	提升作用一般	满意	5~10 min	5~10 min	换乘1次公交
50	提升作用较弱	一般	10~15 min	10~15 min	换乘2次公交
20	无作用	不满意	15 min以上	15 min以上	换乘3次以上公交

3　案例分析

上海市开通现代有轨电车已有一定年限，其中张江有轨电车线路近年来受轨道交通、小汽车、共享单车等出行方式的冲击，客流量较开通初期下降明显，急需进行综合评估[10]。

3.1　评估指标权重确定

（1）层次分析法确定指标权重。根据层次分析法原理，通过向专家发放调查问卷，分别对准则层、指标层构建判断矩阵，计算各评估指标的权重值，并进行一致性检验，保障权重分配合理，计算结果见表4和表5。

表4　准则层的判断矩阵及权重

影响因素	运营水平	客流水平	经济水平	服务水平	权重
运营水平	1	1	2	2	0.34
客流水平	1	1	2	1	0.29
经济水平	1/2	1/2	1	1	0.17
服务水平	1/2	1	1	1	0.20
CR=0.021 4<0.1					

（2）熵权法确定指标权重。基于熵权法原理，将张江有轨电车线路历年各项指标数据进行标准化、计算熵值，得到各项指标的客观权重，计算结果见表6。

（3）组合权重。将层次分析法得到的权重和熵权法得到的权重，通过线性加权平均的方法得到各项指标的组合权重，计算结果见表7。

3.2　评估指标分值计算

选取2019年张江有轨电车线路的各项数据作为

表5　层次分析法指标权重

影响因素	权重	具体指标	指标权重
运营水平	0.34	运营速度	0.10
		高峰发车间隔	0.06
		事故率	0.18
客流水平	0.29	日均客运量	0.11
		客运强度	0.11
		百公里人次	0.07
经济水平	0.17	运营收入	0.03
		运营成本	0.05
		人均运营成本	0.09
服务水平	0.20	城市形象	0.06
		乘客满意度	0.06
		候车时间	0.03
		到站时间	0.03
		乘客直达率	0.02

表6　熵权法指标权重

指标	事故率	日均客运量	客运强度	百公里人次	运营收入	运营成本	人均运营成本
权重	0.13	0.14	0.14	0.15	0.12	0.12	0.20

表7　指标组合权重

指标	层次分析法	熵权法	组合权重
运营速度	0.10	—	0.10
高峰发车间隔	0.06	—	0.06
事故率	0.18	0.13	0.13
日均客运量	0.11	0.14	0.10
客运强度	0.11	0.14	0.10
百公里人次	0.07	0.15	0.09
运营收入	0.03	0.12	0.05
运营成本	0.05	0.12	0.06
人均运营成本	0.09	0.2	0.11
城市形象	0.06	—	0.06
乘客满意度	0.06	—	0.06
候车时间	0.03	—	0.03
到站时间	0.03	—	0.03
乘客直达率	0.02	—	0.02

评估数据。根据表2和表3的评分标准，计算各项指标的评分值。

3.3　综合评估

将各项指标的评分值加权汇总，张江有轨电车的综合评估得分为42.9，根据表8的评估分级标准，处于中等水平。其中，客流和经济水平急需进行优化和改善。

表8　评估分级标准

得分	[80，100]	[60，80）	[40，60）	[0，40）
等级	优秀	良好	中等	差

3.4　合理化建议

（1）功能转型，调整为科技文化特色线。张江有轨电车最早的定位是轨道交通之外快速公交系统，轨道交通网络的有益补充。随着张江区域轨道网络的完善，尤其是轨道2号线东延伸、13号线通车，轨道交通网络补充的功能有所减弱；共享单车、企业班车等新兴出行方式又对快速公交功能形成直接竞争。

张江有轨电车沿线既有上海光源、张江药谷等科技元素，又有上海电影艺术学院、张江戏剧谷、张江科学城书房、昊美术馆等文化元素。在中国共产党建党100周年之际，张江有轨电车举办红色专列活动，化身移动党史馆，取得过较好的反响。随着都市慢生活的兴起，建议将张江有轨电车的功能调整为科技文化特色线，使之成为上海科技文化的网红打卡点，吸引旅游客流，提升经济水平。

（2）复线运营，降低运营成本。随着运营年限的增加，张江有轨电车车辆老化，需要保养和更换的零部件比例增加，运营成本尤其是维修成本居高不下。

建议张江有轨电车优先保障旅游观光功能，同步开通常规公交线路，采用公交+有轨的复线运营模式，降低运营成本。

4　结　语

本文采用层次分析法和熵权法相结合的方法，构建有轨电车综合评估体系。该方法将两种权重计算结果汇总，加强指标权重的客观性。同时，评估体系涵盖运营水平、客流水平、经济水平和服务水平4个方面，并以上海市张江有轨电车线路为例，给出各项指标获取和评分方法。最后，基于综合评估的结论，提出合理化改善建议，对后续其他城市有轨电车的评估和优化具有一定的参考和借鉴意义。

参考文献：

[1] 黄晓斌．淮安有轨电车运营服务评估[J]．城市轨道交通研究，2020，23（增刊1）：123-127.
[2] 李文斌，张云地，李鹏凯，等．深圳龙华现代有轨电车后评价研究及思考[J]．交通与港航，2021，8（5）：55-61.
[3] 苏浚．城市轨道交通网络运营服务质量评估方法研究与实践[J]．城市轨道交通研究，2017，20（8）：88-91.
[4] 章玉蓉，周溪召．上海市71路公交服务水平综合评价研究[J]．物流科技，2019，42（2）：123-128.
[5] 刘丰，徐帅．基于SEM-熵权的现代有轨电车运营指标权重分析[J]．综合运输，2020，42（10）：55-59.
[6] 殷勇，张越．基于熵权TOPSIS方法的现代有轨电车线路优选研究——以宜宾市现代有轨电车线路为例[J]．交通运输工程与信息学报，2016，14（1）：7-12.
[7] 张玉．现代有轨电车经济效益分析[J]．城市轨道交通研究，2019，

（下转第355页）