

特大城市中心城区快速路网更新方案决策研究

徐弯弯^{1,2,3}, 郑晓光^{1,2,3}, 陈亚杰^{1,2,3}

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 低碳道路多源固废资源化利用技术创新中心, 上海市 200092; 3. 基础设施韧性设计平台, 上海市 200092]

摘要: 为解决城市快速路网更新过程中路段选择难、目标统筹难等问题, 选取上海中心城区高架快速路网为分析对象, 通过国内外更新案例、路网运行现状特征及城市更新相关政策的调查分析, 提出中心城区快速路网更新目标, 建立“更新路线研判—更新路段筛选—实施顺序评估”三级递进式更新决策体系和配套判定准则, 并依托灰色聚类 and 层次分析理论, 构建路段更新时序量化评估模型, 可辅助特大城市中心城区快速路网更新规划方案的科学编制。

关键词: 快速路网; 城市更新; 方案决策; 灰色聚类

中图分类号: U412.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0024-05

Research on Decision Model of Expressway Network Renewal in Central Urban Areas of Megacities

XU Wanwan^{1,2,3}, ZHENG Xiaoguang^{1,2,3}, CHEN Yajie^{1,2,3}

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Low-Carbon Roads Multi-Source Solid Waste Resource Utilization Technology Innovation Center, Shanghai 200092, China; 3. Infrastructure Resilience Design Platform, Shanghai 200092, China]

Abstract: To address the challenges of section selection and objective coordination in the process of urban expressway network renewal, this study takes the elevated expressway network in Shanghai's central urban area as the research object. Through a systematic investigation of domestic and international renewal case studies, operational characteristics of the existing expressway network, and policies related to urban renewal, the renewal objectives for the central urban expressway network are proposed. A three-stage progressive decision-making system covering route assessment, candidate segment screening and construction sequencing together with corresponding evaluation criteria is formulated. Furthermore, a quantitative evaluation model for section renewal sequencing is developed based on grey clustering theory and the analytic hierarchy process (AHP). The proposed methodology can support the scientific formulation of renewal planning schemes for expressway networks in mega-city central urban areas.

Keywords: expressway network; urban renewal; scheme decision; grey clustering

0 引言

目前我国的城市化率已达到65%以上^[1], 上海则已突破89%^[2], 建设用地进入存量时代, 城市更新是顺应城市提质增效发展新格局的必然建设方向。上海作为我国最早开始城市更新探索的特大城市, 自2015年起陆续出台了一系列城市更新政策文件, 均强调了“加强基础设施和公共设施更新”。快速路

作为特大城市最重要的基础设施, 其服务质量直接影响城市交通的正常运行。上海中心城区快速路建设年代早, 截至2025年, 已投入使用15年以上的路段里程占比高达78%, 总长度约为166.5 km。目前中心城区快速路普遍存在设施老化、交通阻塞、韧性建设不足、智能水平落后等问题, 大量路段亟待进行更新改造。然而, 现有快速路网更新决策大多依靠设施使用年限、运行情况并结合经验判断, 缺少量化模型作为技术支撑。

目前城市更新决策相关研究, 大多以既有建筑为研究对象。部分发达国家基于关联度分析、模糊分析等方法, 针对城市更新搭建了体系完善的决策架构^[3]、模型方法^[4]与计算程序^[5], 但这些模型的指

收稿日期: 2026-05-23

基金项目: 上海市科委项目(23DZ1202902); 上海市科委项目(23DZ1202805)

作者简介: 徐弯弯(1994—), 女, 硕士, 工程师, 从事道路设计、交通安全分析工作。

标设定、分级标准难以适用于我国城市特征。国内相关研究自2010年后逐步增多,研究方向主要涵盖更新决策机制、指标体系、评估模型、辅助软件开发等。例如李子超等^[6]提出在工业用地更新项目规划阶段采用评价模型,但未提出具体评价方法;黄礼杰^[7]构建了针对城市更新的目标决策体系,评价指标涵盖了社会、经济、环境、物理条件;Z.Yi等^[8]为实现城市更新项目中方案评价、工期安排、工程组织等的统筹协调,研发了城市更新决策平台,但不适用于快速路网更新。现路网更新决策相关研究成果有限,日本于2014年发布的高速道路更新概要报告中提出了更新路段选定流程,但筛选指标仅考虑了结构安全与交通效率,且未明确综合量化算法。上海市于2020年启动内环“年轻化”改造,至今已顺利完成三期工程^[9],但主要成果聚焦于更新技术,路段选择以交通拥堵和病害情况为依据,未形成系统的路网更新决策方法。

综上,本文针对存量规模庞大、改造诉求突出的高架快速路,在系统梳理国内外类似工程实例、调研分析上海快速路网现状运行问题的基础上,提出中心城区快速路网更新目标,构建由路网到路段的递进式更新决策架构,并综合灰色聚类算法与层次分析理论,搭建路段更新顺序评估模型,可实现更新路段的精准识别与更新紧迫性的量化评价。

1 国内外高快速路更新案例分析

1.1 案例调研

现国内外快速路更新无明确定义,通过快速路更新、renewal、rehabilitation等关键词搜索,得到快速路更新案例主要为高架快速路改造为干道、高架或地面快速路改造为隧道、原道路拓宽、老旧设施更换维修等,如表1所示。

1.2 案例启示

结合调研的国内外更新改造案例,分析得到如下启示。

(1)对于高架拆除并改造为地面干道工程,实施路段多为滨河道路,且存在政策和病害方面的促发条件,不适用于上海用地紧张、机动车交通需求量大的城市特征,且现快速路服役年限均未达到设计使用寿命,结构整体病害仍处于可控阶段,粗暴拆除不满足经济、绿色要求。

(2)对于高架拆除并改造隧道工程,实施路段为重要交通通道,承担大量快速通行需求,通常配合城

表1 国内外高快速路更新案例调研

更新工程	更新原因	更新方案
美国纽约西侧高速公路拆除改造为干道	建成于1931年,线形不满足现设计标准,缺乏维护部分路段倒塌	更新于2001年,拆除现沿河高架,新建双向6~8车道地面主干道,并新增慢行通道和海滨公共空间
韩国清溪川高架拆除改造为干道	建成于1968年,设施老化严重,交通拥堵严重,空气污染、清溪川水污染问题严峻,桥下空间品质恶化	更新于2003年,拆除高架,新建地面干道,修复河道和新建桥梁,并增设景观休闲设施
美国波士顿中央大道地下化改造	建成于1950年,交通拥堵严重,交通事故高发,隔绝水域和城市中心,影响城市环境	更新启动于1982年,于2006年完工,拆除高架并新建隧道,修建相邻道路共同完善路网,同时高架拆除后地面空间改造为休闲绿道
北京东六环入地工程	建成于1998年,为双向4车道高架+地面式快速路,交通拥堵严重、事故频发,并影响周边景观、环境	更新于2021年,实施道路加宽2车道与入地改造,配合改造部分立交,并建设六环公园,消除现状六环路的两侧用地割裂效应
日本首都高速道路网更新	始建于1959年,为总长约327 km的快速路网,老龄化严重,服役超30年的设施占比达67%,且桥隧结构多,安全问题突出,运营环境恶劣	于2013年发布路网大规模更新与修缮计划,提出5段道路的改造新建方案,约55 km路段的修缮方案,并制定实施时序计划,总经费约306.8亿元
广州人民路高架拆除争议	建成于1987年,设施老化严重,并紧邻周边建筑物,噪声和空气污染对居民影响严峻	于2004年起逐渐开始研讨拆除方案,最终被“大中修”工程替代

市用地开发实施。上海中心城区快速路近92%为高架桥,对道路两侧用地分割影响小,高架桥地下化改造工程涉及大规模拆除新建会造成大量资源浪费。

(3)原设施改造升级符合我国现阶段城市更新“以既有设施保留利用提升为主”的工作思路,日本针对首都高快速路网制定了大规模更新和修缮计划,但其更新工程中80%仍为拆除新建工程,修缮工程则主要针对设施病害,未考虑道路品质、智慧等功能的升级,且未形成定量评估方法。故对于上海快速路网更新,可参照日本高快速路网更新工作思路,结合我国城市更新要求,确定快速路更新定义,制定快速路更新策略,提出快速路更新决策方法。

2 快速路更新需求分析

2.1 上海中心城区快速路现状问题

2.1.1 交通拥堵严重

上海中心城区快速路网交通拥堵严重,中心城区快速路网容量接近饱和,据统计,2024年浦西快速路高峰时段平均饱和度分别达0.81^[10],工作日高峰

时段平均车速为44.5 km/h,其中内环高架、南北高架、延安高架部分路段等日均拥堵累计时长达5.8~13.8 h^[11]。

2.1.2 设施老龄化严重

上海中心城区快速路网设施老龄化严重,截至2025年,运营年限超15年的高架快速路里程占中心城区快速路网的78%。对各路段技术状况调研得到,运营超30年的内环高架浦西段病害最严重,总体技术状况为B级的联跨占比达59%,防撞护栏等设施已无法满足现状需求,存在安全隐患且影响行车舒适性。

2.1.3 环境污染突出

上海中心城区高架快速路毗邻大量住宅小区,受伸缩缝构件老化、路面坑槽、支座脱空等病害影响,沿线噪声扰民问题不断恶化。另外,高架路为大型混凝土结构,会给城市公共空间带来沉闷感与分割感,现桥上花篮景观改善效果有限且存在维护不便问题,同时桥下尚存大量闲置空间未开发。

2.1.4 信息化建设落后

上海中心城区智能化设备于21世纪初陆续建成,目前诱导设备主要为匝道控制器、可变信息标志、交通播报设施等,部分设备因硬件老旧导致交通数据采集有效性和完整性降低。另外,现存管控手段侧重交通数据采集与片区车流诱导,已无法适配现阶段智慧路网精细化运维的发展要求,对交通拥堵缓解、交通安全提升效果有限。

2.1.5 防灾韧性不足

近年来极端天气事件频发,早期建成高架快速路在灾害抵御能力上的短板愈发明显。设计风速与排水系统规模无法满足极端工况要求,台风天极易造成大面积的积水或设施破坏,存在安全隐患。

2.2 快速路网更新目标

结合我国城市更新相关政策文件与快速路网现状问题,提出快速路网更新目标为:采用低影响、低污染技术,以存量设施的保留复用、提质增效为原则,在快速路既有结构基础上进行优化升级,综合实现路网服务水平提升、结构安全补强、环境质量改善、智慧运维系统迭代和防灾韧性能力升级。

3 快速路网三阶递进更新决策框架

针对快速路网更新面临的存量设施量大、待提升目标多、建设资金有限等现实难题,建立“更新路线研判—更新路段筛选—实施顺序评估”三阶递进

更新决策框架,如图1所示。通过逐级推进的决策思路,完成更新项目的精准识别与统筹管控。

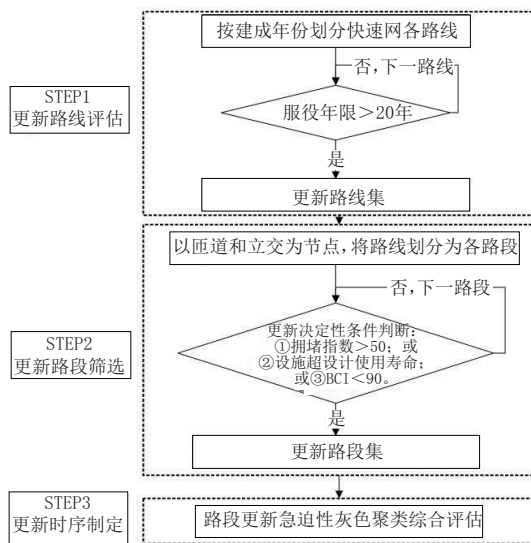


图1 更新决策路线图

3.1 更新路线研判

本阶段旨在从全域快速路网中初选亟需更新的路线。结合上海快速路建成时间,考虑累计近60%的路段运营年限超20年,本文将路线初选条件设定为“运营年限超20年”,实际操作过程中可根据专家意见进行调整,通过初步筛选形成更新路线集。

3.2 更新路段筛选

本阶段旨在从更新路线集中识别出亟需更新的具体路段。因上海中心城区快速路更新动因集中于交通堵塞、结构老化、原有设计滞后于现行规范要求3类问题,故基于上海交通指挥中心发布的拥堵数据和城市道路、桥梁的相关养护技术规范,围绕拥堵水平、运营年限、技术状况等级提出筛选条件:(1)交通处于拥挤或阻塞水平,即拥堵指数大于50,按式(1)计算;(2)设施服役超设计使用年限;(3)桥梁技术状况为合格及以下,即桥梁状况指数(BCI)小于80。以互通立交与匝道作为分界点拆分路段单元,当评价单元满足上述任意1条时,即纳入更新路段清单。

$$\text{拥堵指数} = \frac{\sum_{i=1}^I k_i l_i \left[\frac{(v_f - v_i)}{v_f} \right]}{\sum_{i=1}^I k_i l_i} \times 100 \quad (1)$$

式中: k_i 为路段*i*的车道数; l_i 为路段*i*的长度,m; v_f 为路段*i*的自由流车速,km/h; v_i 为路段*i*的行程车速,km/h。

3.3 更新时序确定

路网更新决策受多重因素共同作用,存在影响因素繁杂、数据采集难度大、信息完整性不足、因素

间关联关系模糊等特点,属于典型的灰色系统,采用灰色聚类评估能有效处理该类系统的不确定性问题,因此本文结合灰色聚类和层次分析法,建立待更新路段的急迫性量化评价模型。

3 基于灰色聚类-AHP的更新时序决策模型

3.1 灰色聚类模型构建

将更新急迫程度划分为1~3级,级别越高代表更新需求越紧迫。通过设定灰类白化权函数、构建决策指标体系、划分指标阈值、确定指标权重,完成灰色聚类评价模型的构建。各分段改造先后次序依照下述准则判定。

(1)综合评价结果为3级,或有任何一级指标评级为3级的路段,更新优先级最高。

(2)综合评价结果为2级,或有任何一级指标评级为2级的路段,更新优先级次之。

(3)综合评价结果为1级,且所有一级指标评级均为1级的路段,更新优先级最小。

(4)评级结果一致的路段,以灰色聚类系数作为排序依据,系数数值越大,改造优先级越高。

更新等级判定依托各评价单元 X_i 对应第 k 灰色的聚类系数求解,按式(2)计算,选取聚类系数最大值对应的灰类,即为该路段单元最终更新等级。

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(X_{ij}) \times \eta_j \tag{2}$$

式中: i 为路段单元编号; k 为灰类等级,与更新急迫程度等级对应,即 k 取值为1~3; j 为决策指标编号; m 为决策指标总数; $f_j^k O$ 为指标 j 在第 k 灰类下的白化权函数,本研究选取梯形白化权函数,如表2所示; X_{ij} 为路段单元 X_i 对决策指标 j 的分值; η_j 为指标 j 的权重。

3.2 决策指标体系建立

基于中心城区快速路网运营现状与更新目标分析,提出表3所示的指标体系,其中定性指标按表4规则量化评分。

二级指标灰类区间转折点取值如表5所示。

3.3 决策指标权重分配

各指标权重由层次分析法(AHP)确定,计算过程从略,表6为基于专家打分和AHP得到的指标权重。

3.5 更新路段时序决策过程

更新路段实施顺序决策的具体步骤如下。

(1)根据分段原则,将评估路段划分为 n 个独立

表2 三分类梯形白化权函数

等级	白化权函数
I级	$f_j^1(X_{ij}) = \begin{cases} 1, & X_{ij} < X_j(1) \\ \frac{X_j(2) - X_{ij}}{X_j(2) - X_j(1)}, & X_{ij} \in [X_j(1), X_j(2)] \\ 0, & X_{ij} > X_j(2) \end{cases}$
II级	$f_j^2(X_{ij}) = \begin{cases} 0, & X_{ij} \notin [X_j(1), X_j(3)] \\ \frac{X_{ij} - X_j(1)}{\lambda_j^2 - X_j(1)}, & X_{ij} \in [X_j(1), \lambda_j^2] \\ \frac{X_j(3) - X_{ij}}{X_j(3) - \lambda_j^2}, & X_{ij} \in [\lambda_j^2, X_j(3)] \end{cases}$ $\lambda_j^2 = \frac{1}{2} \times [X_j(1) + X_j(3)]$
III级	$f_j^3(X_{ij}) = \begin{cases} 0, & X_{ij} < X_j(2) \\ \frac{X_j(3) - X_{ij}}{X_j(3) - X_j(2)}, & X_{ij} \in [X_j(2), X_j(3)] \\ 1, & X_{ij} > X_j(3) \end{cases}$

注: $X_j(1), X_j(2), X_j(3)$ 分别为1级、2级、3级灰类区间的分界点。

表3 更新路段时序决策指标体系

一级指标	二级指标	指标类型和计算方法
交通效率	拥堵水平	定量,按式1计算
	饱和度	定量,取“实际交通量/最大通行能力”
	匝道分布	定性
结构安全	下部结构技术状况	定量,取“100-桥梁下部结构技术状况指数BCIx”
	上部结构技术状况	定量,取“100-桥梁上部结构技术状况指数BCIs”
	桥面系技术状况	定量,取“100-桥面技术状况指数BCIm”
	附属设施技术状况	定性指标
环境景观	交通噪声	定量,采用环境噪声检测值
	景观水平	定性
智慧水平	设备布设完整率	定性
	感知信息利用率	
	智能管理系统水平	
韧性建设	抗台风设计	定性
	抗震设计	

的评价单元。

(2)根据各单元的交通流量、拥堵指数、匝道分布、设施技术状况、声污染情况、景观设计、智慧水平、韧性建设等调研资料,逐项确定各单元各项指标的量化取值 X_{ij} 。

(3) X_{ij} 带入预设白化权函数,求解单元各项指标在不同灰类下的白化权函数值 $f_j^k(X_{ij})$ 。

(4)结合各指标权重系数 η_j ,根据式(3)计算各单元的灰色聚类矩阵。

表4 定性指标量化评分表

分值	[100, 70)	[70, 35)	[35, 0]
匝道布局	匝道组合为入一出、入一入,且间距不符合标准值,或车道不匹配	匝道组合为出一出、出一入,且间距不符合标准值	匝道间距符合标准值
附属设施技术状况	达设计使用寿命,且不符合现行标准,存在严重病害	达设计使用寿命,但符合现行标准,存在部分病害	未达设计使用寿命,符合现行标准且技术状况良好
景观水平	绿植管养状态差,无配套景观工程	绿植管养状态一般,设有外立面涂装或景观照明	绿植管养状态良好,护栏外立面涂装、景观照明与周边环境协调
设备布设完整率	交通监控设施、环境感知设施、信息发布设施2类及以上缺失	布设基础交通监控和信息发布设施	交通监测、环境传感、信息播报3类设备配置齐全
感知信息利用率	有效数据完整度不足80%,不具备对外信息发布功能	有效数据完整度不足90%,可开展简易信息推送与安全预警工作	有效数据完整度高于90%,可落地动态车流诱导、结构健康监测与安全预警功能
智能管控系统水平	缺少综合管控平台,现有平台功能残缺、实用性不足	建有智能管控平台,但功能配置不完善	搭建全周期一体化管控平台
抗台风设计	抗风或排水设计不符合现行标准,存在附属构件松动、管网淤堵等重大病害	抗风和排水设计符合现行标准,但附属构件、排水管网存在中度病害	抗风和排水设计符合极端天气设防标准,且附属构件与排水管网运维状况完好
抗震设计	抗震设计不符合现行标准,或墩柱、支座病害直接削弱结构抗震性能	抗震设计符合现行标准,且墩柱与支座构件存在中度破损病害	抗震设计符合现行标准,且墩柱、支座等关键构件工况完好

表5 各指标灰类区间转折点取值

二级指标	$X_j(1)$	$X_j(1)$	$X_j(1)$
拥堵水平	50	60	70
饱和度	设计速度100 km/h	0.91	0.96
	设计速度80 km/h	0.83	0.92
	设计速度60 km/h	0.77	0.89
匝道分布	匝道分布	30	60
	下部结构	20	27
	上部结构	20	27
	桥面系	20	27
	附属设施	30	60
交通噪声	昼间	75	80
	夜间	60	65
景观水平	景观水平	30	60
	设备布设完整率	30	60
	感知信息利用率	30	60
	智能管理系统水平	30	60
	抗震设计	30	60

表6 指标权重值

一级指标	二级指标	一级权重	二级权重
交通效率	拥堵水平	0.38	0.23
	饱和度		0.08
	匝道分布		0.08
结构安全	下部结构	0.43	0.20
	上部结构		0.14
	桥面系		0.04
	附属设施		0.03
环境景观	交通噪声	0.03	0.03
	景观水平		0.01
智慧水平	设备布设完整率	0.07	0.02
	感知信息利用率		0.02
	智能管理系统水平		0.02
韧性建设	抗台风设计	0.09	0.05
	抗震设计		0.05

$$\sigma_{ij}^k = \begin{pmatrix} f_1^1(x_{i1}) \cdot \eta_1 & f_1^2(x_{i1}) \cdot \eta_1 & f_1^3(x_{i1}) \cdot \eta_1 \\ f_2^1(x_{i2}) \cdot \eta_2 & f_2^2(x_{i2}) \cdot \eta_2 & f_2^3(x_{i2}) \cdot \eta_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ f_{14}^1(x_{i14}) \cdot \eta_{14} & f_{14}^2(x_{i14}) \cdot \eta_{14} & f_{14}^3(x_{i14}) \cdot \eta_{14} \end{pmatrix} \quad (3)$$

(5)矩阵按列累加得到单元*i*的聚类系数向量 $\sigma_i=(\sigma_i^1,\sigma_i^2,\sigma_i^3)$,选取向量内最大值对应的灰类作为该路段最终更新等级,即 $\sigma_i^{k^*}=\max_{1\leq k\leq 3}\{\sigma_i^k\}$,*k**为单元*i*的更新等级, σ_i^k 为等级*k**的隶属度。

(6)依托既定优先级排序准则,确定各单元的更新顺序,同时路段单元中判定为3级的指标为更新改造的重点提升方向。

4 结 语

本文针对上海中心城区快速路网,通过国内外高快速路更新案例、路网运营现状和城市更新政策分析,提出了中心城区快速路网更新目标,构建了三级递进式更新决策体系和路段更新时序评估模型,主要研究结论如下。

(1)明确上海快速路网更新以存量设施保留、高效利用、提质升级为核心思路,通过精细化、低影响更新改造,实现路网交通效率、安全水平、景观品质、智慧运行的全面升级。

(2)建立由“更新路线研判—更新路段筛选—实施顺序评估”组成的三级递进式更新决策体系,并构建基于灰色聚类-AHP的更新时序决策模型,可精准识别具备更新需求的路网单元,实现不同路段更新紧迫性的量化评估与科学排序,可为特大城市中心城区快速路网更新规划编制提供技术支撑。

(下转第34页)