

基于系统动力学的城市轨道交通项目价值规划关键影响 路径分析

杜亚灵

(天津理工大学管理学院, 天津 300384)

摘要:城市轨道交通作为支撑城市空间优化、交通提质与产业升级的重大准公共基础设施,具备投资规模巨大、建设运营周期长、利益主体多元、系统耦合性强与外部效益突出的复杂系统特征。项目前期价值规划是统筹全生命周期资源配置、平衡多元价值目标、规避价值流失风险的核心环节,直接决定轨道交通项目的经济可持续性与城市赋能效能。本研究厘清了轨道交通价值形成的动态机理,量化识别了核心影响路径,旨在为城市轨道交通项目前期科学规划、方案动态优化、价值流失防控与长效价值运营提供理论支撑与量化决策工具。

关键词:城市轨道交通;价值规划;系统动力学;影响路径;全生命周期价值;反馈机制

中图分类号:F283; U23 **文献标识码:**A **文章编号:**3134-9781(2026)04-0010-03

1 系统动力学方法论基础与价值规划分析框架

1.1 系统动力学核心原理及其对复杂工程系统的适用性

系统动力学是一门聚焦复杂系统内部结构、反馈机制与动态演化规律的系统科学方法,核心原理在于:系统的长期行为与演化趋势,本质由系统内部要素的因果反馈结构决定,外部环境仅为辅助扰动因素。该方法突破了传统实证研究依赖样本相关性、静态截面分析的局限,通过区分存量、流量、辅助变量与常量,刻画系统要素间的非线性关联、时间延迟、正负反馈回路,能够有效解析高阶次、多耦合、动态演化的复杂系统运行规律,与重大基础设施工程的系统特征高度契合^[1]。

城市轨道交通项目作为典型的开放型复杂工程系统,完全适配系统动力学的应用场景。其一,系统具备多层次耦合特征,涵盖政府监管、建设实施、运营服务、城市开发、社会公众等多层级主体,涉及工程建设、交通运营、土地经济、城市规划等多个子系统,各子系统相互关联、相互制约;其二,价值演化具备显著非线性特征,项目成本投入、服务功能、客流规模、外部效益之间不存在固定线性关系,变量影响强度随系统状态动态变化;其三,价值传导存在明显时序延迟,前期规划决策的偏差不会即时显现,往往在项目运营数年甚至十余年后逐步暴露,形成长期价值损耗;其四,系统存在多重双向反馈机制,既有抑制系统失衡的负反馈调节结构,也有放大价值增益或价值亏损的正反馈增长结构。传统静态分析方法无法捕捉上述动态系统特征,而系统动力学能够通过定性回

路梳理与定量仿真推演,完整还原轨道交通价值系统的动态演化逻辑,具备不可替代的适配性。

1.2 城市轨道交通项目价值规划的多维性特征与系统分析需求

城市轨道交通项目属于准公共产品,兼具经营性与公益性双重属性,其价值体系呈现显著的多维复合特征,主要划分为财务价值、交通功能价值、城市外部价值三大核心维度,三大价值维度相互制衡、深度耦合,共同构成项目综合价值体系。其中,财务价值聚焦项目自身经济可持续性,体现建设投资、运营收支、融资成本等财务指标的平衡关系;交通功能价值聚焦公共服务效能,体现轨道运力、出行效率、客流承载力、服务质量等公共交通供给水平;城市外部价值聚焦区域发展赋能,涵盖土地增值、产业集聚、交通拥堵缓解、低碳减排、城市空间优化等衍生综合效益^[2-3]。

多维价值体系催生了强烈的系统性分析需求,也是传统规划方法失效的核心原因。首先,多维价值目标存在天然权衡关系,单一维度的最优决策必然引发其他维度的价值损耗,例如盲目压缩建设成本会降低线路服务能力、抑制客流增长,最终削弱长期财务收益与城市赋能效益;过度追求运力规模则会推高投资成本,加剧财政运营压力。其次,价值形成具备完整的链式传导特征,前期规划的线路走向、站点布局、建设标准、开发模式等顶层决策,会通过固定传导路径逐级作用于各维度价值产出。最后,规划决策具备不可逆性,前期系统偏差无法通过后期运营调整完全修正,会形成长期固化的价值缺陷。因此,轨道交通价值

规划必须摒弃碎片化、静态化的分析思维,采用整体系统视角,统筹多维度价值的动态平衡与长效演化。

1.3 关键影响路径识别在价值规划中的功能定位

价值影响路径是轨道交通价值系统的核心构成单元,是规划决策变量传导、转化、形成最终价值产出的完整因果链条,不同路径的耦合互动共同决定项目综合价值的演化趋势。所谓关键影响路径,是指系统中传导效率最高、敏感性最强、具备杠杆调控作用的核心因果链条,其运行状态直接主导系统整体行为,是优化价值规划方案、破解价值失衡问题的核心抓手。

在轨道交通全生命周期价值规划体系中,关键路径识别具备基础性、关键性的核心功能。从理论层面来看,关键路径识别能够打破现有研究要素碎片化、关系片面化的认知局限,厘清从规划决策到价值产出的完整动态机理,构建“决策变量—中间传导—价值产出”的完整理论逻辑体系;从实践层面来看,关键路径识别能够帮助决策者剥离繁杂的次要变量,聚焦核心调控节点,实现精准施策、高效优化,避免资源分散与规划冗余;从风险防控层面来看,关键路径是价值偏差、价值流失的主要传导通道,精准识别核心路径能够提前预判系统风险,建立前置性规划约束机制,保障项目长期价值稳定输出。基于上述定位,本文将轨道交通价值形成路径统一划分为成本驱动、功能驱动、外部效益传导三大核心类型,系统解析各类路径的运行机理与交互规律^[2-3]。

2 价值形成的关键影响路径识别

2.1 成本驱动类价值影响路径的要素识别与因果链分析

成本驱动路径是轨道交通价值系统的基础约束路径,以全生命周期成本管控为核心传导枢纽,贯穿项目建设与运营全过程,主要决定项目财务价值水平,同时间接约束交通功能与外部价值的实现空间。该路径的核心驱动要素涵盖规划层面的线路敷设方式、站点密度、线路长度、建设标准、征地拆迁规模,以及运营层面的设备维保投入、人力运营成本、融资利率与补贴机制等,所有要素围绕“成本投入—收益平衡”形成完整因果传导体系。

从核心因果传导链条来看,规划阶段的建设标准提升、站点加密、拆迁范围扩大等决策,会直接推高项目建设期总投资,扩大融资规模与财务利息支出,最终导致全生命周期成本大幅上升,压缩项目财务收益空间,造成财务价值损耗。同时,该路径具备显著的负反馈调节特征,形成系统自我制衡机制:当项目

建设成本过度超支、财务压力过大时,运营阶段的维保预算、服务投入会被动压缩,导致轨道设施故障率上升、服务质量下降,进而引发客流流失、票务收入降低,进一步加剧财务亏损压力,倒逼系统回归成本平衡状态。这种负反馈结构决定了轨道交通项目的成本存在合理均衡区间,过度压缩或盲目投入都会打破系统平衡,引发价值失衡。总体而言,成本驱动路径是整个价值系统的底层约束框架,为功能价值与外部价值的实现划定基础边界。

2.2 功能驱动类价值影响路径的关键节点与传导机制

功能驱动路径是轨道交通核心价值的内生增长路径,以交通服务功能供给与客流演化质量为核心枢纽,直接决定项目公共服务价值,同时是财务收益与城市外部价值的核心支撑。该路径的核心关键节点集中于前期功能规划环节,包括线网连通性、站点可达性、换乘体系便捷度、运力配置标准、票价定价机制等,通过影响居民出行选择与客流培育质量,形成长效价值传导机制。

该路径的基础传导逻辑为:科学的站点布局与线路规划能够提升轨道出行可达性与便捷性,增强公共交通对私家车、常规公交的替代吸引力,持续培育稳定客流规模,进而提升项目票务收入与站内商业收益,改善项目财务收支状态;充足的运营收益能够反哺服务资源投入,优化发车频次、运维质量与出行体验,进一步扩大客流吸引力,形成持续正向的增强反馈回路。相较于成本路径,功能驱动路径的时序延迟特征更为突出,轨道交通客流普遍存在3—5年的培育周期,前期规划形成的功能供给能力,需要长期时间沉淀才能完全转化为客流价值^[4-6]。同时,客流预测偏差是该路径的核心风险节点,前期高估客流会导致运力冗余、资源闲置,低估客流则会引发运力不足、服务拥堵,两类偏差都会沿整条路径持续传导,造成长期功能价值流失。

2.3 外部效益传导路径的核心变量与反馈结构

外部效益传导路径是轨道交通区别于普通工程的特色增值路径,是项目综合价值最大化的核心依托,核心依托站城融合(TOD)开发模式,实现交通功能价值向城市综合价值的转化与升级。该路径的核心变量包括站点土地开发强度、职住空间平衡水平、沿线产业导入能力、土地价值增值幅度、交通拥堵缓解效率与低碳减排效益等,核心解决轨道交通正外部性外溢、价值无法闭环的行业痛点。

其核心传导与反馈结构体现为双重正向增值回路:一方面,轨道交通开通带来的区域可达性提升,

会推动沿线土地价值增值,提升站点周边土地开发与产业集聚吸引力,实现人口、商业、产业的持续导入,进一步扩大轨道客流规模,反哺项目运营收益,形成“交通赋能—城市开发—客流增长—价值提升”的正向循环;另一方面,轨道规模化运营替代机动车出行,有效降低城市道路交通流量,缓解交通拥堵、减少尾气与碳排放,持续输出社会生态价值。需要重点关注的是,该路径存在明显的价值闭环缺陷,轨道交通建设运营成本由项目主体承担,而土地增值、产业红利等外部收益多由市场主体外溢获取,若前期规划未建立价值回流机制,会导致正向反馈回路断裂,外部增值优势无法转化为项目长效可持续价值。

3 结论

本研究厘清了轨道交通价值形成的动态内在机理,量化识别了核心规划优化路径,有效弥补了传统静态价值分析方法的不足,可为城市轨道交通前期规划决策、方案动态优化、价值流失防控提供科学的理

论支撑与量化工具。同时,研究仍存在一定拓展空间,本次模型参数基于行业通用数据设定,后续可结合不同城市、不同制式轨道交通项目开展参数校准与实证检验;同时可进一步引入利益主体博弈机制,完善多主体互动下的价值路径优化策略,推动轨道交通价值规划体系进一步精细化、科学化发展。

参考文献:

- [1] 钟永光,贾晓菁,李旭.系统动力学[M].北京:科学出版社,2021:45-62.
- [2] 王梦恕,张顶立.城市轨道交通工程建设与可持续发展理论[M].北京:科学出版社,2020:136-152.
- [3] 李红昌.城市轨道交通投融资与价值捕捉理论及实践[M].北京:中国交通出版社,2022:89-103.
- [4] 杜亚灵,王雪辰.基于DEMATEL-ISM的城市轨道交通项目价值规划关键影响路径研究[J].工程管理学报,2025,39(02):68-72.
- [5] 刘贵应,周路时.基于系统动力学的地铁PPP项目价值流失机理仿真[J].土木工程与管理学报,2023,40(04):136-142.
- [6] 赵旭,黄伟.城市轨道交通TOD综合开发外部效益内化路径研究[J].建筑经济,2024,45(03):87-93.

Analysis of Key Influence Paths for Value Planning of Urban Rail Transit Projects Based on System Dynamics

Du Yaling

(School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

Abstract: Urban rail transit, as a major quasi public infrastructure supporting urban spatial optimization, transportation quality improvement, and industrial upgrading, has complex system characteristics such as huge investment scale, long construction and operation cycle, diverse stakeholders, strong system coupling, and outstanding external benefits. Pre project value planning is the core link in coordinating the allocation of resources throughout the entire lifecycle, balancing diverse value objectives, and avoiding the risk of value loss. It directly determines the economic sustainability and urban empowerment efficiency of rail transit projects. This study clarifies the dynamic mechanism of the value formation of rail transit, quantitatively identifies the core impact path, and aims to provide theoretical support and quantitative decision-making tools for scientific planning, dynamic optimization of schemes, prevention and control of value loss, and long-term value operation of urban rail transit projects in the early stage.

Keywords: urban rail transit; value planning; system dynamics; influence path; full-life-cycle value; feedback mechanism