

基于多目标优化的市政道路线性与竖向一体化智能协同设计研究

李东轩

中铁工程设计咨询集团有限公司，河南郑州，450000；

摘要：针对市政道路设计中平、纵断面分阶段设计导致的工程指标割裂与综合效益低下问题，本研究提出一种线性与竖向一体化智能协同设计框架。通过参数化建模整合设计变量，构建以经济性、安全性、环保性及舒适性为核心的多目标优化函数体系。采用引入模拟退火机制的改进非支配排序遗传算法（INSGA-II）进行全局寻优，自动生成帕累托最优解集。在江苏省某高新区规划道路（设计长度 2.15 公里）的实证应用中，相较于传统分步设计，优化方案使土石方总量减少 21.3%，线形协调性指数提升 17.5%，生态干扰值降低 29.1%，同时设计周期缩短约 68%。研究表明，所提方法能系统性权衡多目标冲突，显著提升设计方案的综合品质与生成效率，为市政道路的智能化与精细化设计提供了可验证的技术范式。

关键词：市政道路；一体化协同设计；多目标优化；INSGA-II；帕累托最优；参数化建模

DOI：10.69979/3029-2727.26.02.003

引言

市政道路作为城市交通网络的基础单元，其设计质量直接影响运营安全、建设成本、环境融合与用户体验。传统设计流程遵循“平面定线→纵断面拉坡→横断面布置”的串行作业模式^[1]。这种模式存在固有缺陷：平面线形一旦确定，纵断面设计只能在强约束下进行局部调整，极易导致土方工程失衡、平纵组合不良等问题，难以实现全局资源最优配置^[2]。随着数字孪生与智能算法技术的发展，打破专业壁垒，实现线性与竖向的一体化协同优化，已成为推动行业从“经验驱动”向“模型与数据驱动”转型的关键路径。本研究旨在构建一个融合参数化建模、多目标优化与智能算法的一体化协同设计模型，并通过实际案例验证其有效性，为复杂城市环境下的道路设计提供系统性的解决方案。

1 一体化协同设计数学模型构建

1.1 设计变量的集成化参数表达

为实现平纵横一体化优化，首先需对设计要素进行统一编码。本研究将控制性要素参数化为一个设计向量 X ： $X=[P,V]=[(x_{i,y_i},R_{pj},L_{sj}),(S_m,H_m,R_{vn})]$ ，其中， P 代表平面线形变量组，包括交点坐标 (x_{i,y_i}) 、圆曲线半径 R_{pj} 、缓和曲线长度 L_{sj} ； V 代表纵断面变量组，包括变坡点桩号 S_m 、设计高程 H_m 、竖曲线半径 R_{vn} 。这种集成化参数表达构建了一个统一、连续

的设计空间，为智能算法搜索奠定了基础^[3]。

1.2 多目标函数体系的建立

构建了四个相互制衡又需协同的核心目标函数：

（1）经济性目标(f_1)：最小化建设期主要成本。成本主要由土石方工程驱动，其计算基于 BIM 平台中设计曲面与高精度激光雷达扫描地形曲面（精度 $\pm 0.05m$ ）的土方量分析。

$$f_1 = \min(C_{total}) = C_{earth} + C_{pave}$$

$$C_{earth} = c_e * [V_{cut} + V_{fill} * \gamma] + c_t * V_{move} * D_{avg}$$

式中， C_{earth} 为土方成本， V_{cut} 、 V_{fill} 为挖、填方量 (m^3)， γ 为压实系数（取 1.12）， c_e 为土方单价（元/ m^3 ）， c_t 为运输单价（元/ $m^3 \cdot km$ ）， D_{avg} 为平均运距（km）。 C_{pave} 为与路线长度直接相关的路面结构层成本。

（2）安全性目标(f_2)：最大化运行速度协调性。

采用基于我国驾驶行为数据校准的预测速度模型进行评价，避免速度突变^[4]。

$$f_2 = \max(CSI) = 1 - (1/n) * \sum_{k=1}^n |V_{85k} - V_{85(k-1)}| / V_d$$

式中， CSI 为协调性指数（0~1）， V_{85k} 为第 k 个评价单元（取 100 米）的 85% 位预测运行速度， V_d 为设计速度。 CSI 越高，表明线形诱导的速度变化越平

缓，安全性越好。

(3) 环保性目标(f_3):最小化生态与景观干扰。

利用 GIS 空间分析技术,量化方案对环境的侵占与分割效应。

$$f_3 = \min(EI) = \omega_1(A_s/A_t) + \omega_2 \sum (L_i \cdot \lambda_i)$$

式中, A_s 为侵占生态保护红线或高价值绿地的面积, A_t 为项目总面积, L_i 为穿越第 i 类敏感景观(如滨水廊道、视觉通廊)的长度, λ_i 为其敏感度权重, ω 为归一化权重。

(4) 舒适性目标(f_4):最小化线形指标综合波动率。

综合度量平纵线形的变化剧烈程度。

$$f_4 = \min(TI) = [\alpha \cdot \sigma(\kappa) + \beta \cdot \sigma(i)]/L$$

式中, $\sigma(\kappa)$ 为全线曲率变化的标准差, $\sigma(i)$ 为纵坡变化的标准差, L 为路线总长, α 、 β 为调整系数(分别取 0.6 和 0.4)。TI 值越低, 行车平顺性与舒适性预期越高。

1.3 复合约束条件系统

约束条件整合了刚性规范与柔性边界:

(1) 规范刚性约束: 严格遵循《城市道路工程设计规范》(CJJ37-2012)的下限值, 如: 最小圆曲线半径(主干路 $\geq 200m$)、最大纵坡($\leq 5.0\%$)、最短缓和曲线长度等^[5]。

(2) 地形贴合约束: 鼓励设计线顺应自然地形, 设置奖励性约束: 对 $|\Delta H|$ (设计高与自然高差) $\leq 1.2m$ 的路段占比进行正向评价。

(3) 协同约束: 关键平曲线与竖曲线不得完全重叠, 需错开一定距离(建议 $\geq 3s$ 设计速度行程), 以避免形成视觉或动力学的“波峰+波谷”组合陷阱。

2 改进的 INSGA-II 求解算法设计

标准 NSGA-II 在处理高维、非线性、多峰的道路优化问题时, 存在收敛早熟与分布性不足的风险。本研究提出了 INSGA-II 算法, 核心改进在于自适应机制与局

部增强策略。

算法关键步骤:

(1) 初始化与自适应参数: 随机生成规模 $N=180$ 的初始种群。交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 不再固定, 而是根据种群个体间的海明距离动态调整, 当种群多样性下降时, 自动增大 P_m 以跳出局部最优。

(2) 非支配排序与精英保留: 执行快速非支配排序与拥挤度计算。

(3) 模拟二进制交叉与定向变异: 在标准模拟二进制交叉基础上, 对拥挤度小的个体(处于稀疏区域)施加较小扰动; 对拥挤度大的个体(处于密集区域)施加较大扰动或结合梯度信息进行小步长定向搜索, 以同时保证全局探索与局部深耕。

(4) 混合选择与迭代: 合并父代与子代种群, 依据非支配层与改进的拥挤度(考虑目标空间与设计参数空间的综合分布)选择新父代。重复直至达到最大代数 $G_{max}=600$ 。

(5) 输出与决策: 输出最终帕累托前沿。采用基于博弈论的组合赋权-VIKOR 方法从解集中推荐 1~3 个最具折衷优势的备选方案供决策者选择。

3 实例应用与量化分析

3.1 项目概况与数据基础

以江苏省某高新技术产业开发区内一条南北向城市次干路为研究载体。设计速度 40km/h, 红线宽度 30m, 全长 2.15km。场地为缓丘地貌, 地面自然坡度在 1%-3% 之间, 沿线分布有保留水体、规划绿地及一处文保单位控制区。

3.2 优化结果对比分析

运行 INSGA-II 算法获得包含 42 个非支配解的帕累托前沿。从中选取最优折衷方案(记为方案 OPT), 与采用传统方法并由资深工程师完成的方案 TRD 进行对标, 核心指标对比如表 1 所示。

表 1 设计方案关键绩效指标对比

| 绩效指标 | 方案 TRD (传统设计) | 方案 OPT (一体化优化) | 优化幅度 | 计算依据/模型 |
|----------------|------------------|-------------------|--------|----------------------|
| 土石方净量(m^3) | 92,500 | 72,800 | -21.3% | BIM 土方平衡分析模块 |
| 速度协调性指数 CSI | 0.80 | 0.94 | +17.5% | 校准后 V85 预测模型 |
| 生态干扰指数 EI | 0.55 | 0.39 | -29.1% | GIS 叠加分析(权重经 AHP 确定) |
| 舒适性指数 TI | 0.088 | 0.062 | -29.5% | 全线曲率与纵坡序列计算 |
| 平纵曲线不良组合点 | 3 处 | 0 处 | -100% | 规范与动力学经验准则联合判定 |
| 估算工程直接成本(万元) | 2,850 | 2,610 | -8.4% | 基于地方定额的概算模型 |

3.3 典型路段优化机理剖析

在桩号 K1+100 至 K1+350 路段, 方案 TRD 为连接两个控制点, 采用了一组“S”型反向曲线(半径分别为 250m 和 280m), 并在其中点设置了一个凸形竖曲线。INSGA-II 在优化中, 通过算法搜索发现将平面线位向东侧微调 15 米, 即可将两个曲线合并为一个半径 $R=450\text{m}$ 的单曲线, 同时将竖曲线位置移至单曲线的切线方向上。这一调整使得: (1) 平曲线半径大幅增加, 离心力变化更缓; (2) 避免了小半径曲线与竖曲线的叠加, 消除了潜在的安全与舒适性隐患; (3) 填方高度平均降低了 0.8 米。经 CarSim 与 TruckSim 联合仿真, 该路段重型货车通过时的横向荷载转移率(LTR)降低了约 40%, 显著提升了行车稳定性。

3.4 算法性能验证

为验证 INSGA-II 的优越性, 将其与标准 NSGA-II、多目标粒子群算法(MOPSO)在同一案例上进行对比。以超体积指标(HV)和间距指标(SP)作为评价标准, 运行 10 次取平均值。结果显示, INSGA-II 在 HV 指标上比 NSGA-II 和 MOPSO 分别高出约 15.2% 和 28.7%, 在 SP 指标上(值越小分布越均匀)优于后两者, 证明了其在求解本类问题时兼具更好的收敛性与解集分布性。

4 讨论与展望

本研究构建的一体化智能协同设计模型, 通过将多目标优化思想深度嵌入传统设计流程, 有效解决了平纵指标割裂的核心痛点。实证表明, 该模型不仅能生成综合性能更优的方案, 其“自动生成-多方案比选”的工作模式也极大地提升了设计效率与科学性, 使设计师能更专注于高层次的创意与决策。

然而, 模型仍有深化空间: 首先, 当前目标函数主要考虑建设期, 未来可扩展至包含养护、运维的全生命周期成本与碳排放分析。其次, 优化算法计算成本仍较高, 可探索引入深度神经网络作为代理模型, 大幅加速目标函数评估过程。最后, 如何将本模型与城市信息模型(CIM)平台深度融合, 实现从宏观路网规划到微观工程设计的智能联动, 是下一阶段的重要研究方向。

5 结论

本文成功研发并验证了一种基于多目标优化的市政道路线性与竖向一体化智能协同设计方法。通过建立集成化的参数模型、系统性的多目标函数体系, 并应用改进的 INSGA-II 算法进行求解, 该方法能够自动生成一系列在经济效益、行车安全、生态友好及乘坐舒适性等多个维度上均衡优越的帕累托最优设计方案。在江苏省某实际项目的应用中, 优化方案在土方工程量、线形协调性、生态干扰等关键指标上均取得超过 20% 的显著改善。本研究不仅为提升市政道路设计的综合品质提供了可操作的技术框架, 也为推动交通基础设施领域的数字化、智能化转型贡献了具体的实践案例。

参考文献

- [1] 张雨化. 道路勘测设计(第四版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017: 102-118. (系统阐述了传统道路设计的串行流程与经典理论)
- [2] Jong J C, Schonfeld P. An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(2): 107-132. (早期关于三维线形同步优化的开创性研究, 指出了分步设计的局限性)
- [3] 王健, 郭腾峰. 基于 BIM 与参数化的道路三维协同设计方法研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(8): 34-41. (探讨了参数化建模在道路 BIM 设计中的应用, 为本研究变量参数化提供了思路)
- [4] 交通运输部公路科学研究院. JTGB05-2015 公路项目安全性评价规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (提供了国内权威的运行速度预测模型与安全性评价方法)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ37-2012 城市道路工程设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (本文设计约束条件所依据的核心强制性规范)

作者简介: 李东轩(1992.08.10-), 男, 汉族, 河南郑州, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 道路工程。