

智能环保铁路选线优化模型的应用与实证研究

金柏祥

兰州博文科技学院, 中国·甘肃 兰州 730000

摘要: 智能环保选线优化模型的应用与实证研究聚焦于铁路选线过程中环保与成本效益的平衡问题。本研究引入了一种集成遗传算法和多目标优化的模型, 有效地评估和优化铁路选线方案, 以最小化环境影响同时考虑经济成本。实证研究通过应用该模型于具体铁路建设项目, 展示了其在实际操作中的可行性和效果。结果表明, 该模型能够生成一系列 Pareto 最优解, 帮助决策者在环境保护和成本控制之间做出科学决策。该研究不仅为铁路选线提供了新的技术手段, 也为其他基础设施项目的环保选线提供了参考。

关键词: 环保选线; 优化模型; 实证研究

Application and Empirical Study of Intelligent Environmental Protection Railway Route Selection Optimization Model

Baixiang Jin

Lanzhou Bowen College of Science and Technology, Lanzhou, Gansu, 730000, China

Abstract: The application and empirical research of intelligent environmental protection line selection optimization model focuses on the balance between environmental protection and cost-effectiveness in the process of railway line selection. This study introduces an integrated genetic algorithm and multi-objective optimization model to effectively evaluate and optimize railway route selection schemes, minimizing environmental impact while considering economic costs. Empirical research has demonstrated the feasibility and effectiveness of applying this model to specific railway construction projects in practical operations. The results indicate that the model can generate a series of Pareto optimal solutions, helping decision-makers make scientific decisions between environmental protection and cost control. This study not only provides new technological means for railway route selection, but also serves as a reference for environmentally friendly route selection in other infrastructure projects.

Keywords: environmental protection route selection; optimize the model; empirical research

0 前言

在全球生态环境不断恶化和资源日益紧缺的背景下, 环境保护已成为各国发展的重要战略目标。铁路作为一种绿色交通方式, 因其高效、低能耗和较低的污染排放, 在现代交通体系中占据着重要地位。然而, 随着铁路网络的不断扩展, 传统的铁路选线方法往往仅考虑工程和经济因素, 忽视了对生态环境和社会效益的综合考量, 导致生态破坏和社会冲突的现象时有发生。

智能化技术的发展为铁路选线中的环境保护问题提供了新的解决途径。借助大数据、人工智能、遥感技术和地理信息系统 (GIS) 等先进技术, 铁路选线不仅可以更加精确和高效, 还能实时评估并优化选线过程中的环境和社会影响。因此, 结合智能化技术和环保理念, 对铁路选线进行多目标优化研究, 已成为提升铁路选线科学性和可持续性的关键。

当前, 多目标优化在铁路选线中的应用已取得一定成果, 但面临的挑战依然严峻。第一, 不同目标间存在较强的冲突, 尤其在环境保护与经济效益之间, 难以平衡各方需求。第二, 智能技术的应用尚未系统化, 缺乏成熟的模型与算法

支持。如何在智能环保理念的指导下, 利用多目标优化方法, 在实现铁路选线经济效益的同时, 最大限度地减少对环境的破坏, 成为亟待解决的重要课题。

本研究的主要目的是在智能环保理念下, 通过构建和优化多目标模型, 实现铁路选线过程中经济效益、环境保护和社会影响等多个目标的有效平衡。具体而言, 研究将探讨如何结合智能化技术, 充分利用多目标优化方法, 综合考虑地理、生态、经济、社会等多方面因素, 提出一套科学合理的铁路选线优化策略。最终, 研究旨在提供理论支持和实践指导, 为推动铁路建设的可持续发展贡献力量。

1 智能环保理念在铁路选线中的应用

1.1 智能环保理念的内涵

智能环保理念是指在环保活动中运用智能化技术, 以达到更高效、精准和可持续的环境管理。在铁路选线中, 这一理念的实现涉及两个主要方面: 智能化技术的应用和环保理念的融入。

智能化技术在铁路选线中的应用主要包括利用遥感技术、GIS、大数据分析和人工智能等工具, 对选线过程进行

科学管理和决策支持。这些技术能够帮助决策者实时获取地形、地质、生态和社会经济等多维度数据,通过智能分析和处理,优化铁路路径设计,减少对环境的负面影响^[1]。

环保理念在铁路工程中的重要性则体现在通过系统的环境评估和管理,确保铁路建设和运营不仅符合经济发展目标,同时也符合可持续发展和生态保护的要求。这要求铁路选线在规划和建设过程中,充分考虑生态保护、土地利用、水资源保护等因素,最小化生态环境干扰和污染。

1.2 铁路选线中的智能环保因素

地形与环境的智能化数据采集与分析在智能环保铁路选线中占据核心位置。通过使用高分辨率的卫星图像和无人机进行地形测绘,结合 GIS 和遥感技术对这些数据进行详细分析,可以详尽地理解地形地貌、植被覆盖和水文条件等关键环境因素。这些智能化工具帮助识别出最适合铁路建设的路径,同时规避生态敏感区和自然保护区,最大限度地减少生态扰动。

生态环境保护与铁路选线的协调性强调在铁路规划和建设过程中,必须保持对生物多样性的尊重和保护。智能系统可以评估铁路建设对生态环境的潜在影响,如对野生动物栖息地的破坏和对自然景观的改变。在此基础上,通过建立生态廊道、采用生态渗透性良好的材料和施工技术等措施,来实现铁路建设与环境保护的和谐共生。

社会经济影响因素的智能评估涉及铁路选线对当地社区的影响,包括噪声、振动和可能的土地征用等问题。利用智能化技术,可以对这些社会经济影响进行预测和量化,以确保铁路选线在带来交通便利的同时,最大程度地减少对当地居民生活的干扰。此外,智能系统还可以帮助评估和优化铁路建设的经济效益,通过成本效益分析确保项目的经济可行性。

2 多目标优化理论与方法

2.1 多目标优化的基本概念

2.1.1 定义

多目标优化问题可以定义为同时优化多个互相冲突的目标函数的问题:

$$\text{Minimize / Maximize } F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]$$

其中, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为决策变量向量, $f_i(x)$ 为第 i 个目标函数, m 为目标函数的数量。

2.1.2 特点

冲突与权衡: 在多目标优化中,目标函数之间通常存在冲突,例如成本与质量的冲突。决策者需要在多个目标之间进行权衡。

Pareto 最优解: 一个解 x^* 被称为 Pareto 最优解,如果不存在其他解 x 使得 $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ 对所有 $i=1,2,\dots,m$ 成立,且对至少一个目标函数有严格不等式 $f_j(x) < f_j(x^*)$ 成立。

Pareto 前沿: 所有 Pareto 最优解的集合构成 Pareto 前沿,为决策者提供了最佳的折中方案。

在工程实践中,许多决策问题都涉及多目标优化。下面以铁路选线为例,探讨多目标优化在具体应用中的模型构建。

2.2 铁路选线中的多目标优化模型

①成本目标: 设铁路选线的总建设成本为 $C(x)$, 则成本目标函数可以表示为:

$$f_1(x) = C(x)$$

②效益目标: 铁路的运营效益可以用预期收益函数 $B(x)$ 表示, 则效益目标函数为:

$$f_2(x) = -B(x)$$

这里取负号是因为我们通常希望最大化效益,而多目标优化问题通常以最小化形式表达。

③环境影响: 环境影响可以通过一系列环境损害指标 $E(x)$ 来量化:

$$f_3(x) = E(x)$$

④社会影响: 社会影响的量化较为复杂,可以结合社会福利损益函数 $S(x)$ 进行建模:

$$f_4(x) = S(x)$$

在铁路选线中,降低成本往往会增加环境损害或减少社会福利,而提高运营效益则可能需要更高的初始投资。各个目标函数之间的关系可以通过协方差矩阵或冲突矩阵进行分析,并通过计算其主成分来识别主要冲突源。

2.3 常见的多目标优化算法

2.3.1 基于数学规划的优化算法

①线性加权法。

线性加权法是一种将多目标问题转化为单目标问题的方法。设 ω_i 为每个目标函数的权重,则多目标优化问题可以转化为以下形式:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^m \omega_i f_i(x)$$

在这个模型中,通过调整权重 ω_i 可以得到不同的 Pareto 最优解。

② ϵ -约束法。

在 ϵ -约束法中,选择一个主要目标函数进行优化,并将其他目标函数转化为约束条件:

$$\text{Minimize } f_1(x)$$

$$\text{Subject to } f_i(x) \leq \epsilon_i, \quad i=1,2,\dots,m$$

通过调整约束条件 ϵ_i 的取值,可以生成不同的 Pareto 最优解。

2.3.2 智能优化算法

①遗传算法。

遗传算法通过模拟生物的自然进化过程来进行优化。具体的多目标遗传算法流程如下:

种群初始化: 随机生成初始种群,包含多个可能的解。

适应度评估: 根据目标函数计算每个个体的适应度值。

选择、交叉与变异: 根据适应度值选择优良个体进行

交叉和变异,生成新种群。

Pareto 排序: 根据 Pareto 优劣关系对种群进行排序,保留非劣解。

终止条件: 当满足终止条件时输出 Pareto 前沿解集。

②多目标粒子群优化算法。

粒子群优化算法通过模拟群体行为来优化问题。将多目标问题的求解视为在搜索空间中寻找一组 Pareto 最优解的过程。

初始化: 随机初始化粒子的位置和速度。

速度与位置更新: 根据全局最优解和个体历史最优解更新粒子的速度和位置。

Pareto 前沿更新: 将粒子的位置与当前 Pareto 前沿进行比较,更新 Pareto 前沿。

拥挤距离排序: 对粒子进行拥挤距离排序,保留多样性。

终止条件: 当达到迭代次数或满足收敛标准时,输出 Pareto 前沿解集。

在铁路选线问题中,可以结合遗传算法与优化算法对多目标进行优化。通过将铁路的建设成本、运营效益、环境影响和社会影响作为目标函数进行建模,并利用上述智能算法进行求解,可以得到一组 Pareto 最优的铁路选线方案。这些方案为决策者提供了权衡多个目标的最佳选择^[2]。

3 铁路选线多目标优化模型的构建

3.1 目标函数的构建

3.1.1 成本最小化目标函数

成本最小化的目标函数旨在降低建设和运营成本,可以表示为:

$$\min C(x) = c_1 \sum_{i=1}^n l_i + c_2 \sum_{j=1}^m t_j$$

其中, l_i 为第 i 段铁路的长度, c_1 为单位长度的成本, t_j 为第 j 个隧道或桥梁的造价, c_2 为其单位成本。

3.1.2 环境影响最小化目标函数

环境影响最小化目标函数评估铁路建设对生态和环境的破坏,形式如下:

$$\min E(x) = \sum_{i=1}^n e_i a_i$$

其中, e_i 为第 i 段铁路通过敏感区域的环境影响系数, a_i 为该段长度。

3.1.3 社会效益最大化目标函数

社会效益最大化反映铁路对周围社区的正面影响,包括就业增加、交通便捷等:

$$\max S(x) = s_1 \sum_{k=1}^p p_k - s_2 \sum_{q=1}^r d_q$$

其中, S_1 和 S_2 分别是正面和负面社会影响的权重, p_k 为正面影响的人口数量, d_q 为负面影响的人口数量。

3.2 约束条件的设定

3.2.1 地形、地质等自然条件约束

$$x_i \in \{0,1\}, \forall i \in \text{可行区域}$$

$$x_i = 0, \forall i \in \text{不可行区域}$$

3.2.2 环保法律法规约束

$$\sum_{i=1}^n e_i a_i \leq E_{\max}$$

其中, E_{\max} 是允许的最大环境影响限值。

3.2.3 社会经济条件约束

$$s_1 \sum_{k=1}^p p_k - s_2 \sum_{q=1}^r d_q \geq S_{\min}$$

S_{\min} 为预期的最小社会效益值。

3.3 模型的求解

①初始化: 随机生成一定数量的候选解作为初始种群。

②评估: 计算每个个体的成本、环境影响和社会效益。

③选择: 采用轮盘赌选择或锦标赛选择方法选出适应度较高的个体。

④交叉与变异: 通过交叉和变异操作生成新一代种群。

⑤替换: 选择最优个体替换旧个体,继续迭代。

⑥终止条件: 达到迭代次数或解的改进小于阈值时停止。

粒子群优化强于探索解空间,但可能在多峰值问题上收敛到局部最优。模拟退火适用于大规模搜索空间,但冷却计划和参数选择复杂。优化结果应根据实际成本、环境和社会数据进行解释,以确定最佳铁路选线。实际应用中需要与政府规划、环保部门和地方政府协作,确保铁路选线符合所有政策和利益相关者的需求。通过上述模型和方法,可以确保铁路选线在经济、环境和社会三个方面的最优或接近最优解,实现综合的可持续发展目标。

4 多目标优化中的权衡问题

4.1 多目标优化的权衡分析

在多目标优化中,往往存在多个相互冲突的目标,这些目标之间的权衡是优化过程中需要重点考虑的问题。通常,在成本、环境影响和社会效益之间进行优化时,这些目标之间并不能同时达到各自的最优解,因此需要通过权衡来找到一个折中方案。

4.1.1 不同目标之间的冲突与权衡方法

在铁路选线中,降低成本往往意味着选择更短、更直接的线路,但这可能会对环境造成较大的破坏,增加环境影响。同时,提高社会效益可能需要通过人口密集区,导致成本和环境影响增加。因此,这些目标之间存在内在的冲突。权衡方法有以下几种。

①加权和法。

通过为每个目标赋予一个权重,将多个目标函数线性组合为一个单一的目标函数:

$$MinF(x) = \omega_1 C(x) + \omega_2 E(x) - \omega_3 S(x)$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为成本、环境影响和社会效益的权重, 满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

② ϵ -约束法。

选择一个目标函数作为主优化目标, 将其他目标作为约束条件:

$$\begin{aligned} &MinC(x) \\ &s.t. E(x) \leq \epsilon_E \in E, S(x) \geq \epsilon_S \end{aligned}$$

其中, ϵ_E 和 ϵ_S 分别为环境影响和社会效益的允许阈值。

4.1.2 目标权重的确定方法

专家打分法: 邀请领域专家对各目标的重要性进行评分, 结合打分结果确定权重。

熵权法: 根据目标数据的离散程度自动计算权重, 较为客观。

层次分析法 (AHP): 构建目标之间的两两比较矩阵, 通过计算一致性比例 (CR) 确定各目标的相对权重。

4.2 Pareto 最优解与选择策略

4.2.1 Pareto 前沿的概念与计算方法

在多目标优化中, Pareto 前沿是指在多个目标函数的值域中, 不存在其他解能够在不使任何其他目标恶化的情况下改进一个目标的解集。这些解被称为 Pareto 最优解。

在求解多目标优化问题时, 首先需要计算每个候选解的目标函数值, 然后通过支配关系确定哪些解是 Pareto 最优的。具体计算步骤如下:

- ①初步计算: 计算每个解的所有目标函数值。
- ②支配判断: 对于解 x_i 和 x_j , 若对所有目标函数 $f_k(x)$ 有 $f_k(x_i) \leq f_k(x_j)$ 且至少有一个目标函数 $f_k(x_i) < f_k(x_j)$, 则认为解 x_i 支配解 x_j 。
- ③筛选 Pareto 解: 将所有不被其他解支配的解列入 Pareto 最优解集中。

4.2.2 Pareto 解集中的选择策略

均匀性策略: 选择位于 Pareto 前沿上均匀分布的解, 以获得多样化的选择。

加权选择法: 根据决策者的偏好, 对 Pareto 前沿上的解进行加权评分, 选择总评分最高的解。

聚类法: 对 Pareto 解集进行聚类分析, 从每个类中选取代表性的解。

在实际应用中, 需要综合考虑各个 Pareto 最优解的优劣, 根据实际需求和偏好进行最终决策。常用的决策方法包括多准则决策分析 (MCDA)、德尔菲法等。这些方法通过对 Pareto 解集中的不同方案进行综合评价, 最终选择出最适合的铁路选线方案。

4.3 案例分析

假设某条铁路需要经过三个区域, 分别为 A 区 (环境敏感区)、B 区 (人口密集区) 和 C 区 (低成本区)。在

此选线问题中, 三个目标分别是最小化成本、最小化环境影响和最大化社会效益。

4.3.1 目标函数构建

$$成本函数: C(x) = c_A l_A + c_B l_B + c_C l_C$$

$$环境影响函数: E(x) = e_A l_A + e_B l_B + e_C l_C$$

$$社会效益函数: S(x) = s_A p_A + s_B p_B + s_C p_C$$

其中, l_A, l_B, l_C 分别为各区域的线路长度, c, e, s 分别为对应区域的单位成本、环境影响系数和社会效益系数, p 为人口数量。

4.3.2 Pareto 前沿分析

通过遗传算法等优化方法, 得到了不同权重组合下的 Pareto 解集。例如, 解 1 在成本 and 环境影响上较优, 但社会效益较低; 解 2 在社会效益上较优, 但成本较高。

在决策过程中, 若地方政府更加重视社会效益, 则可能倾向于选择解 2, 即使它的成本较高。而若环保部门的约束更为严格, 则解 1 可能成为优选。综合来看, 多目标优化中的权衡问题是一个复杂而关键的过程, 必须通过科学合理的方法对不同目标进行平衡, 从而找到一个最优的决策方案。这一过程不仅涉及技术算法, 还需要结合政策、法规、社会需求等多方面的考虑。

5 智能环保选线优化模型的应用与实证研究

5.1 案例背景

某山区铁路建设项目。该区域地形复杂, 包含山地、河流和森林覆盖区。该地区的社会经济发展较为落后, 依赖于农业和少量矿业开发。与此同时, 保护当地环境生态系统也是一个重要的考虑因素。因此, 如何在满足经济需求的同时, 减少环境破坏, 是该铁路选线优化的主要挑战^[1]。随着环保意识的提升, 传统的选线方法已无法满足现代环保要求, 因此需要引入智能环保选线优化模型。此模型不仅考虑了工程成本, 还综合考虑了环境影响和社会效益, 以达到可持续发展的目标。

5.2 多目标优化模型在案例中的应用

5.2.1 数据收集与预处理

地理数据: 包括地形、地质、土壤类型、河流分布等。

环境数据: 包括植被覆盖率、野生动物栖息地分布、保护区范围等。

社会经济数据: 包括人口密度、经济发展水平、基础设施现状等。

成本数据: 各区域的工程建设成本、维护成本等。

这些数据经过处理后, 将作为模型的输入参数。数据预处理包括将地理数据栅格化, 将环境数据标准化处理, 以及对社会经济数据进行聚类分析, 以确定关键影响因素。

5.2.2 模型构建与求解过程

在本案例中, 采用多目标遗传算法 (MOGA) 来进行选线优化。模型的主要目标函数如下:

①成本目标函数:

$$C(x) = \sum_{i=1}^n c_i l_i$$

②环境影响目标函数:

$$E(x) = \sum_{i=1}^n e_i a_i$$

③社会效益目标函数:

$$S(x) = \sum_{i=1}^n s_i p_i$$

目标函数之间存在冲突,特别是成本与环境影响的冲突,因此采用多目标遗传算法来求解 Pareto 最优解集。算法的步骤如下:

- 初始种群生成: 随机生成多个初始选线方案。
- 适应度评价: 根据目标函数计算每个方案的适应度。
- 选择、交叉与变异: 通过选择、交叉和变异操作生成新的候选方案。
- Pareto 前沿计算: 筛选出当前种群中的 Pareto 最优解。
- 迭代更新: 重复上述步骤,直至算法收敛。

6.2.3 优化结果与选线方案的比较分析

通过模型求解,得到一组 Pareto 最优解。选择三个典型的解进行分析:

- 方案 1: 成本最低,但环境影响较大,社会效益中等。
- 方案 2: 环境影响最小,但成本较高,社会效益中等。
- 方案 3: 社会效益最大,但成本和环境影响均较高。

5.3 结果讨论与改进建议

对各选线方案的环境影响进行评估,如对森林破坏程度、对野生动物栖息地的影响等。同时,对经济影响进行分析,特别是建设成本与运营成本的比较。最后,评估各方案对社会经济发展的促进作用,如提高交通便捷性、带动区域经济增长等。

结合实际地形和已有基础设施,对各选线方案的可行性进行评估。例如,某方案可能在技术上难以实施,或某方案可能在政策上受到限制。此外,评估各方案的长期可持续性,确保其在未来的维护和运营中不产生过高的成本或环境负担。

尽管现有模型在优化选线方面提供了多种方案,但在实际应用中仍有改进空间。建议如下:

①引入动态环境因素: 当前模型假设环境影响是静态的,但实际情况中,环境可能随着时间发生变化,建议将时间因素纳入模型。②增强数据精度: 提高地理、环境和社会经济数据的精度,特别是在关键区域(如生态敏感区)的数据细化上。③结合多尺度分析: 模型可以结合不同尺度的分析,如宏观尺度下的总体选线和微观尺度下的具体路段优化,以提高整体方案的适用性。

综上所述,智能环保选线优化模型在铁路选线过程中具有重要应用价值,通过优化算法可以有效平衡成本、环境影响和社会效益,为可持续交通基础设施建设提供科学依据。

6 结论及展望

本研究通过实证案例分析展示了多目标优化在铁路选线中的应用,证明了智能环保理念在现代基础设施规划中的有效性^[9]。主要结论包括以下几点:①多目标优化的有效性: 通过引入成本、环境影响和社会效益等多重目标,我们能够全面评估不同选线方案的综合性能。这种方法能够揭示不同目标之间的内在权衡,为决策者提供科学、平衡的决策依据。②多目标权衡的重要性: 在铁路建设项目中,各种利益相关方的需求和环保要求常常存在冲突。多目标优化模型能有效地平衡这些利益,通过生成 Pareto 最优解,帮助决策者在成本、环保和社会效益之间找到最佳折中方案。③智能技术的应用前景: 本研究证明,智能算法(如遗传算法)能有效处理复杂的优化问题。在铁路选线这类涉及广泛地理信息和多方面评价指标的任务中,智能算法展现出高效解决问题的能力。

未来的研究可以在以下方向进一步深化:①动态优化模型: 考虑到环境和社会经济因素的动态变化,未来的研究应发展能够实时更新数据和预测未来趋势的动态优化模型。这种模型可以更好地适应环境变化,提高选线方案的长期可持续性。②引入更多目标因素: 除了传统的成本、环境和社会效益外,还可以考虑引入更多的目标因素,如文化保护、地方意愿、政策支持等,使得模型更加全面和精确。③融合先进智能技术: 随着人工智能和大数据技术的快速发展,将这些技术更广泛地应用于铁路选线的研究中,可能会极大地提升处理复杂数据的能力和决策的精度。④跨学科研究的深化: 铁路选线优化是一个多学科交叉的问题领域,未来的研究可以更深入地结合地理学、生态学、社会学和经济学等多个学科的理论和方法,以形成更加系统和综合的研究框架。

综上所述,多目标优化在铁路选线中的应用展现了智能环保理念在实际工程项目中的巨大潜力。通过进一步的技术创新和方法优化,未来的铁路选线能够更有效地促进经济发展,同时最大限度地减少对环境的影响,为实现可持续发展目标做出贡献。

参考文献:

- 徐倩.基于环保理念背景下的轨道交通节能技术优化[J].中国战略新兴产业,2024(11):122-124.
- 王凌.西安至十堰高速铁路环保选线研究[J].铁道勘察,2024,50(2):85-90+97.
- 孙捷,吴展波,郑光玉.铁路建设项目环保选线案例分析——以贵南铁路项目涉及贵州荔波世界自然遗产地缓冲区为例[J].铁路节能环保与安全卫生,2017,7(1):5-8.

作者简介: 金柏祥(1987-),男,藏族,中国甘肃陇南人,本科,高级工程师,从事道路与铁道工程设计与施工研究。

课题项目: 甘肃省教育科学“十四五”规划 2023 年度一般课题。题目: 课程思政背景下《铁路选线设计》课程教学改革研究(项目编号: GS[2023]GHB1363)。