文章编号：1001-4632（2025）06-0019-15
引用格式：冉杨，李伟，王佳琪，等. 铁路线路智能优化理论与方法研究综述[J]. 中国铁道科学，2025，46(6)：19-33.
Citation：RAN Yang，LI Wei，WANG Jiaqi，et al. A Research Review on Theories and Methods for Intelligent Optimization of Railway Alignment [J]. China Railway Science，2025，46 (6)：19-33.

铁路线路智能优化理论与方法研究综述*

冉 杨[1,2]，李 伟[1,2]，王佳琪[1,2]，万昕洁[1,2]，蒲 浩[1,2]，宋陶然[1,2]

（1. 中南大学 土木工程学院，湖南 长沙 410075；
2. 高速铁路建造技术国家工程研究中心，湖南 长沙 410075）

摘 要：铁路选线设计是从源头上保证线路安全、经济、舒适、环保的先决条件，深入剖析其核心环节—线路智能优化问题，对提高线路方案的质量和搜索效率具有重要意义。线路智能优化的本质为在多维多因素环境下，构建多目标优化模型，并定制智能搜索算法求解最优线路方案。为此，从多维环境建模、线路优化模型、搜索算法3个方面对国内外线路智能优化研究进行系统的分类与梳理。结果表明：在多维环境下，从最初的数字地面模型、数字地质模型，发展为包含多维环境因素的综合地理信息模型；在优化模型方面，由线路平、纵面单独优化发展为平纵面整体优化，线路方案的评价也在工程经济的基础上不断增加安全、绿色、低碳等多目标；求解算法由早期的解析式方法过渡到启发式方法，现有研究则开始更加注重与知识探索、人工智能等领域的深度融合，向智能化程度更高的方向发展。未来，线路智能优化将在地理服务上更全面主动、评价目标上更多元综合、搜索方法上更智能高效。

关键词：铁路选线设计；线路优化；优化模型；综述
中图分类号：U212.3 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.03

铁路选线作为铁路建设的先行工作与总揽全局的核心环节，是决定项目投资、运营、社会和环境保护合理性的先决条件，也是控制这些因素的关键所在。科学合理的线路方案可从根本上保障安全舒适、控制工程投资、减少环境影响、降低碳排放，带来显著的经济社会效益；而一旦设计失误，将造成铁路工程的先天缺陷，给后期的建设与运营带来难以弥补的损失。

铁路选线的主要任务是在复杂的自然与人文环境下，综合权衡安全、经济、环保等多元目标体系，同时满足各类规范、禁区绕避及施工技术等多维约束，最终设计出综合最优的线路方案，该问题规模庞大、约束复杂、目标多样，被国际公认为1个典型的NP-Hard问题。传统的人工选线方法通常需要投入大量的人力、物力进行线路方案的设计决策。然而，在有限的时间和精力下，工程师只能根据经验对少数方案进行详细研究，难以保证线路方案的最优化，且易遗漏有价值的方案。

智能选线技术为破解上述难题提供了有效办法，自20世纪90年代以来，随着人工智能方法的应用，智能选线逐渐成为国际前沿热点问题，国内外研究人员对此开展了大量研究，其基本思路是将选线问题转化为智能优化问题。首先综合考虑地形、地质与生态等多维环境因素，进而构建1个多目标优化模型，该模型以空间控制点位信息为决策变量，以安全、经济及环保等指标为目标函数，并以设计规范和环境因素为约束条件，最终应用解析数学、启发式搜索和人工智能等方法求解该优化模型，从而生成综合优化的线路方案。因此，多维选线环境模型的构建、线路多目标优化模型的设计、

收稿日期：2025-07-28；修订日期：2025-11-10 * 本刊“中国科技期刊提能拓展计划项目”特约稿
基金项目：中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目（2022-重大-20）；国家自然科学基金资助项目（52078497）；湖南省研究生科研创新项目（CX20250295，CX20250292）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2025ZZTS0334）
第一作者：冉 杨（1999—），男，重庆人，博士研究生。E-mail：yangranw@csu.edu.cn
通讯作者：李 伟（1984—），男，江西进贤人，副教授，博士。E-mail：leewei@csu.edu.cn

线路智能搜索方法的实现通常被认为是线路智能优化的3大关键问题。

智能选线历经几十余年的研究，上述3大关键模块的总体发展脉络为：①选线环境模型从最开始的数字地面模型、地质模型，发展为融合地形、地质、地物等多维环境因素的综合地理信息系统；②线路优化模型的决策变量从早期的平纵面分离优化，发展为三维线路整体优化，优化目标从主要考虑经济的单目标，不断丰富为综合安全、经济、环保的多目标优化，约束条件也从传统的单一线形规范约束，发展到线路、结构物和环境之间的多维耦合约束；③线路搜索方法经历了从解析式寻优到仿生进化算法的演变，现如今更注重与知识探索、人工智能等领域深度融合，向智能化程度更高的方向发展，智能选线总体发展脉络如图1所示。

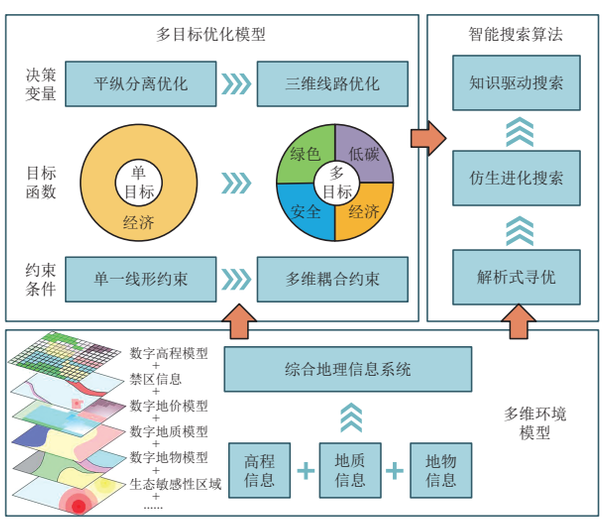

图1 智能选线总体发展脉络

1 选线多维环境建模

在线路智能设计过程中，需要实时获取沿线的地形、地质、地物、生态等多维环境信息。如何将这些规模庞大、种类繁多、形式多样的环境信息完全数字化，并实现高效提取是线路智能优化首先需要解决的基础问题。

1.1 数字地面模型

20世纪50年代中期，美国麻省理工学院摄影测量室主任Miller[1]提出数字地面模型（Digital Terrain Models，DTM），用于描述地面的各种特性空间分布，将计算机与摄影测量技术结合在一起，首次解决了铁（公）路工程计算机辅助设计中的地形数字表达问题。此后，大量学者对其进行研究。目前，线路设计中采用的DTM主要包括规则格网（Regular Square Grid，RSG）和不规则三角网（Triangulated Irregular Net，TIN）2类。

RSG[2−3]的优点是数据量小，高程内插速度快，但对于地形变化较大的区域，其精度不足以表达地形起伏，在地形平坦区域会存在大量数据冗余。与之相比，TIN更适用于表达起伏的地形，其主要用于在线路走廊内进行线路的精细化设计。在所有针对TIN的构网原则中，Delaunay三角网效果最好[3]。此后，国内外学者对Delaunay三角网的生成算法不断改进[4−5]。在线路设计领域，文献[6−7]基于约束Delaunay三角网理论构建铁（公）路三维模型，TIN三角网的构网速度也随之不断提升[8]。目前，Delaunay三角网快速构建算法已在线路设计中广泛应用以提升数字地面模型的实用性。

1.2 数字地质模型

随着建设环境日趋复杂，选线设计面临的核心问题是沿线分布的大量不良地质区域。地质条件对线路的影响日益显著，构建数字地质模型并实现沿线地质信息的快速自动提取已成为线路智能优化的必要前提。

加拿大学者Houlding[9]首次提出三维地质建模与可视化的概念，随后学者们针对复杂的地质条件和多样化的地质资料提出了不同的三维地质建模方法[10−12]。但是，这些研究以小范围区域为主，主要适合桥梁、隧道和车站等局部工点，而选线设计则需要建立大范围的地质模型。

因此，面对大范围内的地质建模问题，文献[13−14]将复杂的地质信息统一栅格化建立了全线地质模型，但矢量数据的栅格化会使得精度降低，而且栅格过小会导致数据量增大，难以处理。为平衡模型范围、精度与效率，文献[15−17]对线路三维地质建模开展了长期深入研究，基于遥感技术解译不良地质信息，提出矢栅一体化三维地质环境建模方法，使设计人员可直观地感知线路与地质体的复杂空间关系，调整空间线位。为进一步考虑地质安全，Pu等[18]考虑了地灾风险，将线路可达区域分为爆发区、缓冲区和模糊区3级以评估线路通过该区域的危险性。Song等[19]考虑了包含落石、滑坡、泥石流在内的地灾风险并将之融入综合地理信息模型中用于选线设计，但目前仍局限于二维地灾建模。

随着计算能力的增强和数据采集技术的进步，

现代地质模型能够提供更高分辨率的地质数据和更精确的地质风险分析，但在智能选线领域，搜索线路方案时还缺乏自动提取地质信息及评价地质安全的方法。因此，基于三维地灾实体建模的智能化和自动化选线成为亟待研究的课题。

1.3　数字地物模型

除上述的地面和地质数据外，铁路沿线常常还有大量自然保护区、油气危险源、密集建成区、河流沟渠、既有地面运输工程等对线路位置有重要影响的地物。在选线设计过程中处理好铁路与地物间的空间关系具有重要意义，例如绕避自然保护区和危险源，尽量与河流正交，跨越既有公路时交角与高差需要满足要求。因此，建立数字化的地物模型是实现线路智能优化的基础。

由于影响铁路选线的地物多达数十种，要建立数字化的地物模型应当先对其进行聚类，优先建立地物模型的基类，再根据每种地物的特点进行相应的拓展。根据地物的形态特征及其在选线设计中的处治原则差异，可将地物大体分为点状、线（带）状、面状 3 大类，每种类别需要存储不同的数据，并提供相应的线路处置算法，以保证线路安全[20]。

点状地物用于描述具有明确位置且空间占用范围较小的地物，如高层建筑物、指挥塔等。在选线设计过程中，点状地物的关键计算包括线路与地物之间的最小距离和相对高差，需保证线路与该点状地物不发生冲突或干扰[21]。线（带）状地物模型用于描述沿特定方向延展的地物，主要包括线性地物和带状地物，如高压线、断裂带、河流、公路、铁路、电力线和管道等。对于线（带）状地物的关键计算包括线路与地物的交叉点、交叉角度以及高差，以判断是否可以直接通过或需要绕避[22]。面状地物表示需要完全绕避的各种区域和附着于地表的各种地物。因此，需计算线路到面状地物的最小距离，以判断是否满足对应的约束条件[23]。

1.4　综合地理信息模型

选线过程不仅需要考虑地形、地质、地物因素，也需考量其他重要环境信息数据，如地表覆盖、控制因素、经济指标、设计标准等。

20 世纪末，易思蓉团队提出了“虚拟环境选线设计系统”的理念，研发了适用于铁路规划及前期研究阶段的虚拟环境选线设计原型系统[24]。并提出数字地价模型用于辅助计算土地征用费[25]。21 世纪初，国外学者将公路线路优化模型与地理信息系统（GIS）结合起来用于公路线路设计[26]，可同时考虑复杂的土地和环境特征。除基本的地形数据外，还需考虑地质条件和禁区，于是 Li 等[27]设计了 1 个综合地理信息模型，该模型基于规则矩形格网，将地形、土壤条件、禁区、桥梁、隧道等所需地理信息离散化存储于单元格中，考虑的数据比 GIS 更为详尽。

上述针对选线定制的综合地理信息模型主要包含地形、地质等环境因素，尚未考虑生态因素。为进一步完善模型信息，Song 等[28]开发了 1 个基于 GIS 的多标准决策模型，融入了环境保护区、水资源保护区、动物栖息地等生态因素，增加了对生态环境的建模处理。

在地理信息提取方面，此前综合地理信息模型根据线路通行网格的行列号检索获取线路通行的环境信息。该方法针对约束种类与数量有限、分布稀疏的地区可顺利获取某个格网的地理信息进行计算，最后产出线路方案。但对于存在大量不可行区域的约束稠密地区，模型需不停地检索相关网格并进行约束检测，此举将大量计算时间和资源耗费于线路不可行区域的盲目探索中，从而大幅降低智能选线的搜索效率和优化质量，甚至无法生成满足约束的可行解。为提前“避开”不良区域，Pu 等[29]提出基于铁路环境适宜度分析的综合地理信息模型，该模型在三维空间中划分体素，在线路可行域范围内，通过考虑地形与地质风险因素，生成三维空间适宜度场，用于指导后续的线路搜索，提高了搜索效率。

总体而言，现有综合地理信息模型可解决大部分线路搜索时的地理信息获取问题。但在广度上，还可拓展并融入更多地质和生态因素。在深度上，针对稠密约束地区，如何高效快速生成满足约束线路方案的地理信息模型也是当前亟待研究的问题。

2　线路优化模型

完成综合地理信息模型构建后，需进一步建立线路的优化模型，对不同变量、不同目标进行优化。优化模型通常采用数学计算式等手段来描述和刻画实际的工程问题。在智能选线领域，线路优化模型包括决策变量、目标函数和约束条件 3 个部分。

2.1　决策变量

决策变量是决定铁路线路空间位置的基本参

数。根据线路优化决策变量的不同，可将线路优化分为平面优化、纵断面优化和平纵面整体优化3个方面。研究早期，受限于计算能力和搜索效率，主要对线路二维平面[30−35]和纵断面[36−39]分别优化。平面优化一般是以平面交点坐标（X，Y）和圆曲线半径R作为决策变量，生成能绕避障碍物且满足线路约束条件的平面方案；纵断面优化是在固定线路平面方案的基础上，以变坡点里程K和高程H作为决策变量，通过调整变量来降低土方和桥隧数量。当仅进行平面优化时，线路纵断面可能出现高桥、长隧或超限的纵坡，导致整个线路方案较差甚至不可行；而优化纵断面生成的纵面方案仅代表当前平面下的最优解，如平面方案已将线路布置于地形复杂区域，纵断面优化可能面临无优化空间的困境。若对平面方案适当调整，可使整个三维线路得到显著优化。因此，随着计算机科学技术的快速发展，以及线路优化方法研究的不断深入，平面或纵断面的单独优化已不再满足线路优化需求。线路优化逐渐从二维优化发展为三维空间的整体优化[40−43]，决策变量也由平面或纵断面的二维变量演变为三维变量，即X，Y，R，K和H，这一转变的核心目标，是寻求线路在三维空间中的综合最优解，从而更直接地找到符合要求的三维线路方案。

2.2 目标函数

目标函数是决策变量对优化目标的函数表征，可用于指导和评价线路方案。在智能选线中需考虑三维空间线路的安全、经济、舒适、环保等目标，如何量化评价这些优化目标来指导选线过程，是需要解决的关键问题之一。

早期，线路优化领域主要以经济作为目标函数。经济目标包括工程费和运营费。初始的优化模型重点考虑土方工程费[44]，后来以桥隧造价[45]、路基造价[46]为主的工程费和以能耗费用[47]、维护费用[48]为主的运营费也逐步纳入经济目标。近年来，乘客安全、生态环境保护等方面受到广泛的重视，铁路建设不再仅考虑经济效益，协调好经济、安全及生态等目标之间的冲突也极为重要。

在安全方面，对于地形起伏较小地区，Sadesk等[49]重点考虑了路基边坡稳定性，用以评估线路通行安全性；对于复杂艰险山区，Song等[19, 50]提出了泥石流、滑坡和落石3种典型地质灾害的量化模型，建立了地灾风险-成本双目标优化模型。对于线路中的结构物因素，隧道安全[51]等也被建立相应的量化指标与优化目标。

在环境影响方面，Maji[52]和Jha[53]将环境敏感地区、洪泛区和湿地区对线路的影响面积作为指标，把环境保护目标纳入优化模型。Davey等[54]建立了基于动物迁徙动力学的线路优化模型，在线路优化过程中量化考虑动物死亡率。Zhang等[22]提出了1种综合考虑植被破坏、土壤侵蚀和成本的铁路线路多目标优化模型。为更好保护动植物栖息地，Karlson等[55]将生态保护和资源效率目标整合进交通基础设施规划中。空气污染、噪音敏感和水资源污染[56]也被作为影响环境的重要因素被纳入考虑。近年来，随着绿色低碳发展理念的深入，Pu等[57]考虑了施工、运营、维护阶段的碳排放量，建立了碳排放-成本的双目标优化模型。详细优化目标的分类见表1。

表1 优化目标分类

优化目标类型	具体目标	参考文献
经济类	工程费	文献[45−46]、文献[58]
	运营费	文献[47−48]
安全类	隧道安全	文献[51]
	结构物稳定性(路基边坡)	文献[49]、文献[55]
	落石、滑坡、泥石流	文献[19]、文献[50]
环境影响类	洪泛区和湿地区	文献[53]
	动物死亡率	文献[54]
	植被损失、水土流失	文献[22]、文献[59]
	动植物栖息地	文献[55]
	空气污染物、噪音量、水资源污染物	文献[56]
	碳排放	文献[57]、文献[60]

总体而言，优化目标在广度上，可继续增加线路评价指标的种类，融入更多社会因素，如乘车舒适度、人口密度、城市规划等，也可继续拓展自然因素，如气候变化、地质活动等；在深度上，还需继续深化研究多目标决策的评价体系。

2.3 约束条件

在线路优化中常见的约束类型有几何约束[61]、位置约束[62]和结构物约束[63]等。几何约束通常和线形规范相关，如最小曲线半径、最小夹直线长、最小圆曲线长、最大坡度、最小坡段长、最大坡度代数差等；位置约束是指线路必须绕避的禁区或者线路与既有道路、河流等相交时必要的净空以及特定的交角等；结构物约束一般指最大桥梁高度和最大隧道长度等。

随着智能选线的发展和进步，约束条件也在传统的几何约束、位置约束、结构物约束等基础之

上，进一步融入施工可行性[64]、减灾选线原则[65]等多维限制性因素。约束处置也由传统的先生成再检测的遍历试错法[49]，拓展为更高效、智能的动态处置方法。例如：避免遗漏可行解的预筛-修复机制[42]、动态选择权重的ε-分析[66]、将结构物约束处理为软约束的鲁棒优化[67]等。

3　搜索算法

在建立优化模型后，需用搜索算法求解该模型以生成优化方案。搜索算法从早期的解析数学算法，逐渐发展成为以粒子群、遗传算法等为突出代表的智能启发式搜索算法，近年来知识模型驱动的方法开始出现，求解线路模型的智能搜索算法在不断推陈出新[68]。现有线路优化方法的分类体系如图2所示。

3.1　解析法

早期的线路优化研究主要采用传统的解析数学算法表达模型的目标函数、约束条件，然后通过数学理论构建下降方向，求解目标函数的极小值。代表性方法有变分计算[69]、梯度投影[70−71]和数值搜索[72]等。

这类方法通常要求目标函数连续、可微或可导，而实际铁路线路工程中难以符合。因此在使用这些方法时，都需引入一系列假设和近似，忽略部分因素，结果难以实用。

正是由于解析法在处理复杂工程约束时的这些固有局限性，研究人员开始将目光转向对求解过程要求更低，寻优能力更强的启发式算法，从而推动线路优化研究进入“智能化”的新阶段。

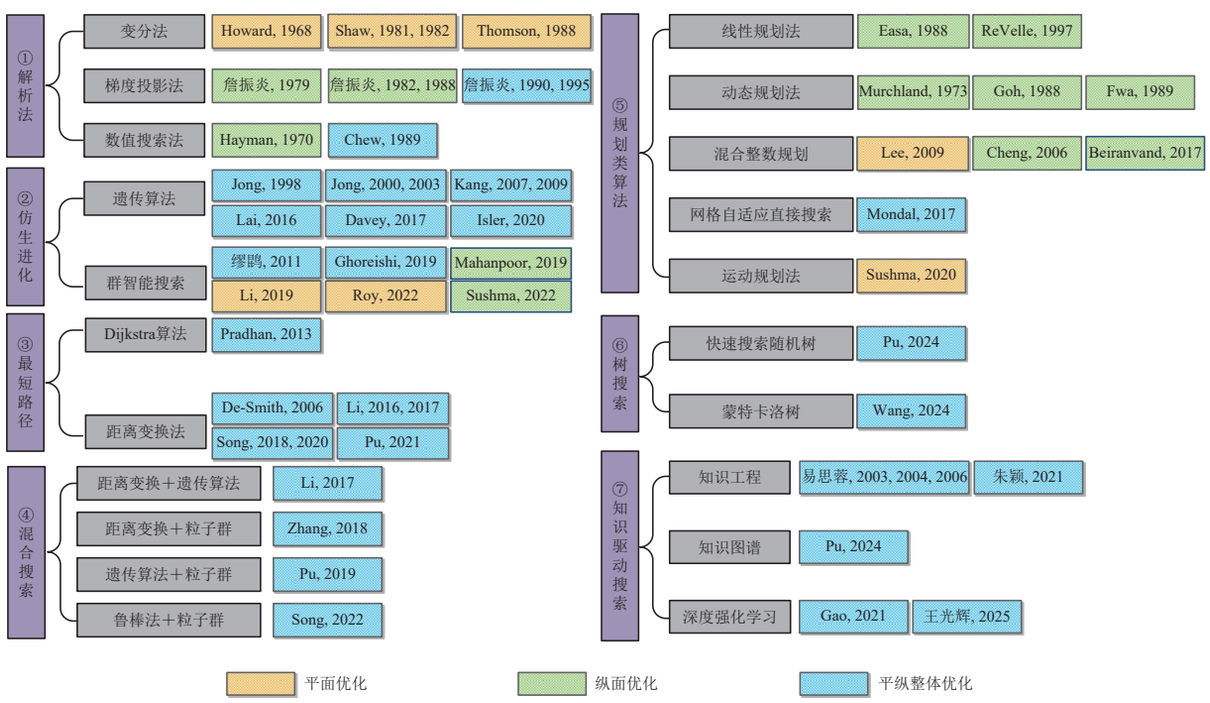

图2　现有线路优化方法的分类体系

3.2　启发式算法

启发式算法是通过经验规则或直观策略快速寻找解的有效方法，其搜索策略有助于更加真实、有效地进行智能选线问题的建模与求解，主要包括遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等智能仿生算法，其共同点是首先生成初始解，然后基于对周围环境的适应度反复迭代调整线路方案。

遗传算法（Genetic Algorithm，GA）是1种基于自然选择和适者生存的启发式算法，是线路优化领域[73−76]最具代表性的方法之一。其原理是首先通过预先划分切割面并以线路控制点在切割面上的位置为基因实现线路染色体编码，然后，由特定的遗传算子（包括选择、交叉、变异算子）通过迭代进化实现线路优化。GA被广泛应用于线路优化[77−79]，研究人员也对其方法进行了多方面的改进，例如接入地理信息系统数据库[19]、提出逐步优化策略[80−81]、引入多目标线路优化模型[77]。然而，在复杂山区，为克服剧烈起伏的地形高差，线路方案通常需要进行迂回展线，其交点位置难以在一系列固定的切割面上进行搜索，会影响局部搜索

结果，一定程度上制约了GA的应用。

粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法是另1种常见的切割面法，其基本思想是通过模拟粒子群中个体间的信息交换行为来寻找最优解。与GA相比，PSO可通过调整惯性权重值，在迭代初始阶段充分搜索解空间，避免遗漏可行解，在迭代后期，增强局部搜索能力，有助于获得更优的方案。PSO最初被引入公路线路优化领域[82]时其考虑的线形约束条件不足。后来Shafahi等[83]针对决策变量多、搜索空间大的问题，提出1种具有代表性的PSO方法，用于三维公路线路的优化，但初始线路方案被限制在一系列切割面上，极端情况下甚至无法生成可行解。因此Pu等[84]提出基于平面蝶形区域和纵断面信封区域的线路粒子初始化方法，来提升初始粒子群的自由度。

蚁群优化（Ant Colony Optimization，ACO）算法的原理启发自蚁群在觅食过程中寻找最短路径的行为。通常用于线路纵断面优化[85−86]、轨道交通站点优化[87]等方面。

上述启发式算法理论上可以找到全局最优解，但智能选线的自变量维度大，在实际应用中存在三大局限：其一，当初始种群偏离优化方案较远的时候，很难收敛到全局最优方案，可能陷入局部最优[88]，导致最终得到的方案缺乏多样性；其二，这类方法需要较好的初代种群线路方案，并且初代线路方案对最终的优化结果影响较大；其三，此类方法一开始就预设了线路平纵断面交点数量和分布特征，而在实际选线的过程中，平纵断面交点数量的选择相对而言更加灵活。

3.3 最短路径算法

最短路径算法的基本思想是将研究区域离散化为网格或图结构，通过代价函数在节点之间进行搜索，从而得到连接起终点的最小代价路径。在铁路线路优化中，由于搜索得到的路径通常呈折线形式，还需进一步拟合才能生成满足工程约束的线路方案。

在线路优化领域，Dijkstra算法[89]和距离变换（Distance Transform，DT）算法也得到了广泛应用。为解决山区铁路线路设计中的复杂约束问题，Li等[62]改进了DT算法，提出1种具有双向扫描策略的距离变换（2D-DT）方法。然而，由于山区地形的复杂性，该方法仍无法最大化地搜索出所有满足约束的路线，于是Pu等[44]将2D-DT扩展到三维搜索空间，形成了三维距离变换（3D-DT），使得可行搜索空间显著增加，但同时也增加了计算时长。为解决该问题，Song等[90]在此基础上利用OpenMP库进行并行计算加快了线路方案的搜索速度。

实际上，DT搜索出的路径群为一系列多段线，可以生成连接起终点的路径，这些路径需要进一步拟合方可形成圆顺的线路方案。但是拟合过程可能会使线路方案与DT路径偏离，尤其在复杂艰险山区，微小的偏离甚至会导致线路方案不可行。且DT搜索对网格精度有一定要求，随着网格精度的提高，DT的搜索时间也显著增加。因此，在使用DT方法进行线路搜索时，需要在网格精度和搜索时间之间进行权衡。

3.4 混合搜索

尽管启发式算法、最短路径搜索算法在智能选线设计中能够适用且效果良好，但单一方法的运用受到多种限制条件的制约，在实际应用中存在很大困难，于是学者们将不同搜索算法进行结合。

PSO+GA[91]的混合搜索方法，可用于优化森林道路纵断面，降低道路工程造价。但由于山区选线的复杂性，一般在整个研究区域采用网格搜索算法得到有价值的线路走廊带，然后基于走廊带采用仿生进化等算法搜索出线路方案，从而实现“由面到带”“由带到线”的精细化线位搜索。

目前，DT+GA[62]，DT+PSO[84]，DT+GA+PSO[19, 22]和鲁棒法+PSO[67]等混合搜索算法均已应用于山区线路优化。

3.5 树搜索

虽然混合搜索方法能在一定程度上解决复杂山区线路优化问题，但由于网格搜索的局限性，在“由面到带”搜索阶段的效率和方案质量会受到格网精度的影响。为保证线路优化的精度，选线设计需要选取尽可能精细的格网。而精细化的格网会显著增加格网数量，导致计算时间增加，甚至可能导致计算资源不足、难以完成线路搜索。

近年来，基于树的搜索方法已广泛应用于线路优化的网格扫描，并且其搜索效率不会受到网格精度的限制。搜索方式从基于网格的离散空间搜索过渡到连续空间的搜索。

快速搜索随机树（Rapidly Exploring Random Tree，RRT）是1种快速搜索式算法，通过在线路起点以“枝”的形式随机生长扩张，探索线路的终点。在智能选线领域，Sushma等[35]提出了1种改进的RRT*算法，用于搜索成本最优的平面线路方

案。Yang等[92]采用快速搜索随机树来确定平面交点的数量和水平分布，以此搜索线路平面方案并降低造价。然而，在该领域中，现有的RRT方法仅限于平原地区的平面线形优化，尚未拓展至复杂艰险山区三维空间线路的优化问题。为此，Pu等[93]提出1种3D-RRT*算法，用于地形更加复杂的山区铁路平纵面整体优化。

尽管搜索效率有所提高，但基于RRT的网格扫描方法通常在局部树生长过程中采用贪婪模式，缺乏对全局搜索空间的考虑，可能会陷入局部最优导致算法收敛困难，并且线路方案的质量具有一定的随机性。

为平衡线路优化中局部与全局的关系，研究者将目光着眼于蒙特卡洛树（Monte Carlo Tree Search，MCTS）。在线路优化领域，Zhang等[94]采用基于MCTS搜索的改进地形驱动贪婪算法，优化了山区铁路线路纵断面，但该纵断面优化方法是在确定的线路平面方案的基础上进行单独优化，未能实现平纵面整体优化，具有一定局限性。针对平纵面整体优化的巨大搜索空间问题，Wang等[95]提出1种三维蒙特卡洛树搜索（3D-MCTS）的线路优化方法。通过选择、拓展、回溯3个步骤平衡局部和全局策略，提高线路搜索效率。未来可探索将强化学习与3D-MCTS相结合，或研究3D-MCTS的并行化方法，提高复杂艰险山区的线路搜索效率。

3.6　知识驱动

实际上，上述搜索过程是缺乏知识引领的。知识驱动对于线路方案的搜索十分关键。根据知识的获取方式不同，可分为以知识工程、知识图谱为主的显式经验和以深度强化学习为主的隐式经验。

3.6.1　显式知识驱动

1）知识工程

国内各大铁路设计单位经过数十年的工程实践，总结提炼了大量的设计经验和原则，涵盖了各种环境：平原微丘区[96]、山岭重丘区[97]、环境敏感区[98]、崩滑流等多地灾区[99]、岩溶区[100]、断裂带[101]和大风沙区[102]等，但这些都是文字形式的经验总结，难以实现计算机的自动识别。为了将这些经验转换为计算机可用的知识模型，易思蓉教授团队[103−104]提出了面向对象类规则知识表达模式，建立“提案-验证”通用推理模型。朱颖[105]等基于本体实现了智能选线区域内各种地形、地质、水文和人文地理等文字资料的快速获取与利用，并研发了铁路智能选线辅助设计系统。

选线领域的“知识”错综复杂，并且“知识”的构建程度会影响实际应用效果，这些方法只能实现部分选线知识的数字化表征，难以涵盖选线知识的各个要素。

2）知识图谱

近年来，谷歌知识图谱（KG）的问世为解决上述问题提供了1种创新方法。知识图谱具有很强的可拓展性，可以与计算机视觉和自然语言处理相结合，为结构化知识表示提供了有价值的思路。在铁路选线设计中，知识的应用往往是非结构化、碎片化的，这限制了知识的修改、扩展和更新。为了使铁路线路优化知识实现系统化、结构化的表达，Pu等[106]对铁路选线知识图谱（RAD-KG）进行建模，并提出1种快速索引方法，将知识图谱引入铁路选线优化研究中，提高了搜索效率。

在未来的研究中，可将知识图谱拓展应用于典型地质灾害环境的处理、复杂山区重大建设项目的选址等其他场景中。也可研究知识自动提取技术、知识推理技术，以更新铁路选线设计知识库。这些方法只能表达显式的经验，对于还未挖掘的“隐式”选线经验，还需要进行探索。

3.6.2　隐式知识驱动

选线中还存在大量难以量化与明确定义的专家经验以及目前尚未完全发掘的定线规律，这使得选线知识的建模和表征更为困难。深度强化学习是1种机器学习方法，其核心优势在于智能体能够通过与环境的自主交互来学习决策策略，从而选择出更加优化的路径。

文献［107−108］采用深度强化学习方法来优化三维铁路线路，该方法不需要预先确定交点的数量和分布，可降低山区铁路选线的成本。王天玺[109]实现了基于深度强化学习的铁路智能选线方法，能够在复杂地理环境的仿真栅格模型中自动生成经济高效、避免不良地质和环境敏感区的初步路径方法。王光辉等[110]提出1种强化学习与蒙特卡洛树搜索的融合方法，提升了在线路搜索过程中对后续未知状态及全局态势的感知能力，从而更有效地权衡线路全局与局部利益。但该方法对计算机的硬件和算力要求较高，需要配置高性能的硬件设备来满足网络复杂度和模型收敛的需求。

总体而言，智能选线在多维环境模型、优化模型和搜索算法方面均已取得显著进展，智能选线整体框架如图3所示。

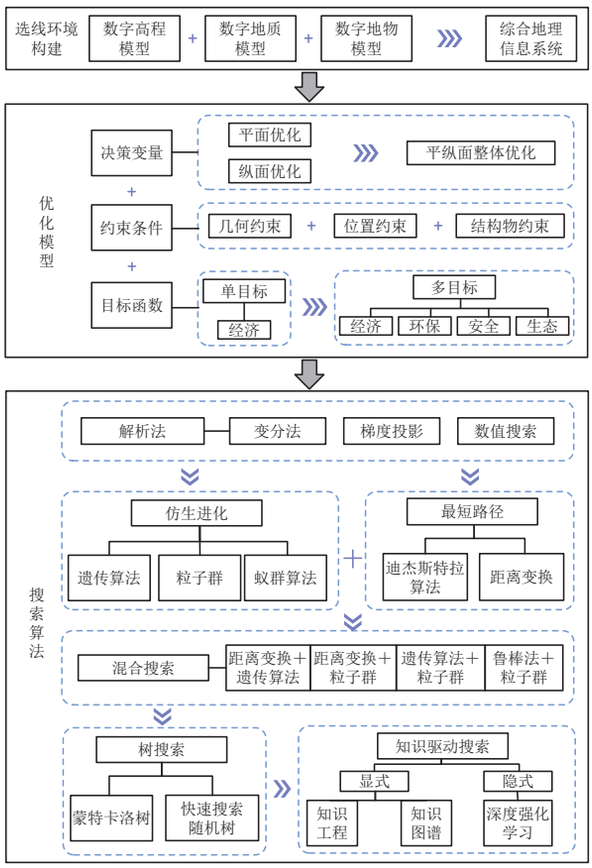

图3 智能选线整体框架

4 结语及展望

本研究从多维环境构建、优化模型与求解算法3个方面综述了智能选线的研究进展，并指出当前存在的不足。在多维环境构建方面，研究已从早期的数字地面模型、数字地质模型演进为融合多维环境因素的综合地理信息模型；在优化模型方面，则从二维平纵线路独立优化发展至三维空间中的平纵面整体优化，同时，线路方案的评价目标函数亦日趋完善；在求解算法方面，经历了从早期解析式方法到启发式算法的转变，现已迈入知识驱动阶段，并已在众多实际工程中成功应用，选线设计的效率和质量也在不断进步。

为使计算机选线更具人类智慧，未来研究仍需在3个方面深化探索。

一是地理服务全面主动。虽然现有研究已实现从地形、地质到综合地理信息模型的构建，但影响选线的控制因素繁多，少考虑任一项控制因素都可能导致智能生成的方案不可行。所以，在未来的研究中，在深度方面，需要构建更加精细的地理信息模型；在广度方面，需要包含更多的控制因素，如环境敏感点、有害危险源、重大管线、地上地下建构筑物等因素，可基于综合地理信息模型加入更多控制因素信息；在功能上，需要实现线路搜索时从“被动”提取环境因素到“主动”进行环境适宜度分析的过渡，也可基于环境适宜性分析模型，将雪崩、岩溶等地质因素和气候、碳排放、洪泛平原、湿地等生态因素一并纳入，进行综合评估。

二是评价目标多元综合。虽然现有研究可以对经济、安全、环境影响等多目标进行线路方案决策，但是优化模型的目标函数还可继续拓展。在深度上需要研究更加精确的目标函数计算方法；在广度上可进一步丰富目标函数类别，将如政治、文化、设备等因素引入优化模型进行方案评价，同时协调不同目标之间的冲突，完善方案推荐机制，或拓展优化目标的应用范围，如铁路站场等。

三是搜索方法智能高效。目前显式的知识建模方法需要拓宽覆盖范围，引入更加全面的选线经验。通过将铁路选线知识图谱的覆盖应用场景拓宽至典型地质灾害处理、复杂山区重大建设项目选址及岩溶区选线等领域，可构建选线工程知识库，实现人类选线经验的传承、拓展、更新。

在隐式知识探索方面，研究尚处于起步阶段。当前，无论是构建大规模的铁路选线案例库，还是基于有限案例通过数据挖掘揭示多维环境下的定线规律，其能力均未达到人类专家水平。因此，如何结合前沿的人工智能模型进行深度强化学习，真正实现复杂艰险山区的计算机自主探索式方案推荐，是未来值得深度研究的关键方向。

参 考 文 献

[1] MILLER C L. The Theory and Application of the Digital Terrain Model [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1958.

[2] 易思蓉.规则格网覆盖的非规则布点数字地形模型[J].西南交通大学学报,1989(3):72-76.
(YI Sirong. Irregular Grid Digital Terrain Model Neted by Regular Net [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1989 (3): 72-76. in Chinese)

[3] LINGUS A. The Greedy and Delauney Triangulations are not Bad in the Average Case [J]. Information Processing Letters, 1986, 22 (1): 25-31.

[4] 武晓波,王世新,肖春生.Delaunay三角网的生成算法研究[J].测绘学报,1999,28(1):28-35.
(WU Xiaobo, WANG Shixin, XIAO Chunsheng. A New Study of Delaunay Triangulation Creation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28 (1): 28-35. in Chinese)

[5] 王星.快速构建Delaunay三角网算法研究及OpenGL下三维可视化[J].科学技术与工程,2011,11(9):2070-2074.
(WANG Xing. Study on an Algorithm for Fast Constructing Delaunay Triangulation and 3D Visualization in OpenGL Environment [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11 (9): 2070-2074. in Chinese)

[6] 宋占峰.道路线路实时动态三维可视化设计理论和方法的研究[D].长沙:中南大学,2003.
(SONG Zhanfeng. Study on the Theory and Method of Road Route Real-Time 3D Visualization Design [D]. Changsha: Central South University, 2003. in Chinese)

[7] 蒲浩,宋占峰,詹振炎.铁路线路设计中三维实时交互式仿真研究[J].中国铁道科学,2003,24(5):56-60.
(PU Hao, SONG Zhanfeng, ZHAN Zhenyan. Study on 3D Real-Time Interactive Simulation of Railway Alignment Design [J]. China Railway Science, 2003, 24 (5): 56-60. in Chinese)

[8] 刘凯.三维道路表面建模的TIN算法[D].成都:西南交通大学,2007.
(LIU Kai. TIN Algorithm of 3D Road Surface Modeling [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. in Chinese)

[9] HOULDING S W. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization [M] Heidelberg: Springer, 1994: 309.

[10] LEMON A M, JONES N L. Building Solid Models from Boreholes and User-Defined Cross-Sections [J]. Computers & Geosciences, 2003, 29 (5): 547-555.

[11] 屈红刚,潘懋,明镜,等.基于交叉折剖面的高精度三维地质模型快速构建方法研究[J].北京大学学报:自然科学版,2008,44(6):915-920.
(QU Honggang, PAN Mao, MING Jing, et al. An Efficient Method for High-Precision 3D Geological Modeling from Intersected Folded Cross-Section [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44 (6): 915-920. in Chinese)

[12] 潘懋,方裕,屈红刚.三维地质建模若干基本问题探讨[J].地理与地理信息科学,2007,23(3):1-5.
(PAN Mao, FANG Yu, QU Honggang. Discussion on Several Foundational Issues in Three-Dimensional Geological Modeling [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23 (3): 1-5. in Chinese)

[13] 高山.铁路工程地质选线三维可视化技术与评价方法研究[J].铁道工程学报,2011,28(2):27-31,36.
(GAO Shan. Study on 3D Visualization Technology and Evaluation Method for Railway Engineering Geological Alignment [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28 (2): 27-31, 36. in Chinese)

[14] 高山.长大隧道三维可视化遥感地质解译技术应用[J].铁道工程学报,2011,28(11):13-18,62.
(GAO Shan. Application of 3D Visualization Remote Sensing Interpretation Technology in Geological Survey of Xiang-Pu Railway Long Tunnels [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28 (11): 13-18, 62. in Chinese)

[15] 吕希奎.基于遥感信息的选线系统地理环境建模方法及应用研究[D].成都:西南交通大学,2008.
(LÜ Xikui. Research on Modeling Method and Application of Railway Location System' Geographical Environment Based on Remote Information [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. in Chinese)

[16] 吕希奎,陈进杰.铁路数字化选线三维地质环境建模方法[J].铁道学报,2015,37(8):91-97.
(LÜ Xikui, CHEN Jinjie. Three-Dimensional Geological Environment Modeling Method for Digital Railway Alignment [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37 (8): 91-97. in Chinese)

[17] 吕希奎,白娇娇,庄建杰,等.铁路大范围复杂地质区域环境三维建模方法研究[J].铁道学报,2024,46(2):105-113.
(LÜ Xikui, BAI Jiaojiao, ZHUANG Jianjie, et al. Study on 3D Modeling Method for Railway Large Range Complex Geological Regional Environment [J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46 (2): 105-113. in Chinese)

[18] PU H, XIE J, SCHONFELD P, et al. Railway Alignment Optimization in Mountain Regions Considering Spatial Geological Hazards: a Sustainable Safety Perspective [J]. Sustainability, 2021, 13 (4): 1661.

[19] SONG T R, PU H, SCHONFELD P, et al. Mountain Railway Alignment Optimization Considering Geological Impacts: a Cost-Hazard Bi-Objective Model [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35 (12): 1365-1386.

[20] VAZQUEZ-MENDEZ M E, CASAL G, CASTRO A, et al. Optimization of an Urban Railway Bypass. A Case Study in a Coruña-Lugo Line, Northwest of Spain [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 151: 106935.

[21] ZHANG T L, GAO Y, XU S T, et al. A Bidirectional Bi-Objective Graph Search Model for Sustainable Urban Railway Alignment Optimization [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 153: 110943.

[22] ZHANG H, PU H, SCHONFELD P, et al. Multi-Objective Railway Alignment Optimization Considering Costs and Environmental Impacts [J]. Applied Soft Computing, 2020, 89: 106105.

[23] WAN X J, PU H, SCHONFELD P, et al. Tunnel Location Optimization for Railway Alignment Design in Complex Mountainous Regions [J]. Automation in Construction, 2025, 174: 106132.

[24] 易思蓉.虚拟环境铁路选线设计系统的理论与方法研究[D].成都:西南交通大学,2000.
(YI Sirong. Study on the Theories and Methods of Virtual Environment Railway Location System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000. in Chinese)

[25] 易思蓉.数字地价模型与铁路土地征用费计算[J].西南交通大学学报,1992(4):91-96.
(YI Sirong. Digital Model of Land Price and the Cost of Railway Right of Way [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1992 (4): 91-96. in Chinese)

[26] JHA M K, SCHONFELD P. A Highway Alignment Optimization Model Using Geographic Information Systems [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2004, 38 (6): 455-481.

[27] LI W, PU H, SCHONFELD P, et al. Methodology for Optimizing Constrained 3-Dimensional Railway Alignments in Mountainous Terrain [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 549-565.

[28] SONG T R, PU H, SCHONFELD P, et al. GIS-Based Multi-Criteria Railway Design with Spatial Environmental Considerations [J]. Applied Geography, 2021, 131: 102449.

[29] PU H, WAN X J, SONG T R, et al. A Geographic Information Model for 3-D Environmental Suitability Analysis in Railway Alignment Optimization [J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2023, 30 (1): 67-88.

[30] JONG J C, JHA M K, SCHONFELD P. Preliminary Highway Design with Genetic Algorithms and Geographic Information Systems [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15 (4): 261-271.

[31] AUDET C, DENNIS J E. Mesh Adaptive Direct Search Algorithms for Constrained Optimization [J]. SIAM Journal on Optimization, 2006, 17 (1): 188-217.

[32] MONDAL S, LUCET Y, HARE W. Optimizing Horizontal Alignment of Roads in a Specified Corridor [J]. Computers and Operations Research, 2015, 64: 130-138.

[33] CASAL G, SANTAMARINA D, VÁZQUEZ-MÉNDEZ M E. Optimization of Horizontal Alignment Geometry in Road Design and Reconstruction [J]. Transportation Research Part C: Engineering Technologies, 2017, 74: 261-274.

[34] LEE Y, TSOU Y R, LIU H L. Optimization Method for Highway Horizontal Alignment Design [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135 (4): 217-224.

[35] SUSHMA M B, MAJI A. A Modified Motion Planning Algorithm for Horizontal Highway Alignment Development [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35 (8): 818-831.

[36] 詹振炎,宋治伦.铁路纵断面的优化设计[J].铁道学报,1982(4):78-88.
(ZHAN Zhenyan, SONG Zhilun. Optimization Design of Railway Profile [J]. Journal of the China Railway Society, 1982 (4): 78-88. in Chinese)

[37] HARE W, HOSSAIN S, LUCET Y, et al. Models and Strategies for Efficiently Determining an Optimal Vertical Alignment of Roads [J]. Computers & Operations Research, 2014, 44: 161-173.

[38] BEIRANVAND V, HARE W, LUCET Y, et al. Multi-Haul Quasi Network Flow Model for Vertical Alignment Optimization [J]. Engineering Optimization, 2017, 49 (10): 1777-1795.

[39] GHANIZADEH A R, HEIDARABADIZADEH N, MAHMOODABADI M J. Effect of Objective Function on the Optimization of Highway Vertical Alignment by Means of Metaheuristic Algorithms [J]. Civil Engineering Infrastructures Journal (CEIJ), 2020, 53 (1): 115-136.

[40] 邓域才,易思蓉.铁路新线平面纵断面同时优化设计方法[J].西南交通大学学报,1988(2):1-7.
(DENG Yucai, YI Sirong. A Method for Optimizing the Horizontal and Vertical Alignment of a New Railway Simultaneously [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1988 (2): 1-7. in Chinese)

[41] 常新生,詹振炎.铁路线路平纵面整体优化设计的理论与方法[J].铁道学报,1995,17(4):75-81.

(CHANG Xinsheng, ZHAN Zhenyan. Theory and Study Method of Overall Optimization Design for Railway Horizontal and Vertical Alignment [J]. Journal of the China Railway Society, 1995, 17 (4): 75-81. in Chinese)

[42] KANG M W, SCHONFELD P, YANG N. Prescreening and Repairing in a Genetic Algorithm for Highway Alignment Optimization [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009, 24 (2): 109-119.

[43] JONG J C, SCHONFELD P. An Evolutionary Model for Simultaneously Optimizing Three-Dimensional Highway Alignments [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37 (2): 107-128.

[44] PU H, SONG T R, SCHONFELD P, et al. A Three-Dimensional Distance Transform for Optimizing Constrained Mountain Railway Alignments [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2019, 34 (11): 972-990.

[45] KIM E, JHA M K, SCHONFELD P, et al. Highway Alignment Optimization Incorporating Bridges and Tunnels [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133 (2): 71-81.

[46] ARUGA K. Tabu Search Optimization of Horizontal and Vertical Alignments of Forest Roads [J]. Journal of Forest Research, 2005, 10 (4): 275-284.

[47] LI D W, DONG X L, CAO J M, et al. Energy-Efficient Rail Transit Vertical Alignment Optimization: Gaussian Pseudospectral Method [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2022, 148 (1): 04021100.

[48] ZHANG H, PU H, SCHONFELD P, et al. Railway Alignment Optimization Considering Lifecycle Costs [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2022, 14 (5): 22-40.

[49] SADEK S, BEDRAN M, KAYSI I. GIS Platform for Multi Criteria Evaluation of Route Alignments [J]. Journal of Transportation Engineering, 1999, 125 (2): 144-151.

[50] SONG T R, PU H, SCHONFELD P, et al. Bi-Objective Mountain Railway Alignment Optimization Incorporating Seismic Risk Assessment [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36 (2): 143-163.

[51] ZHANG Z Y, LU L J, ZHU L, et al. Preference Information Incorporation for Decision Making in the Biobjective Alignment Optimization Problem of River-Crossing Tunnels [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146 (10): 04020121.

[52] MAJI A, JHA M K. A Multiobjective Analysis of Impacted Area of Environmentally Preserved Land and Alignment Cost for Sustainable Highway Infrastructure Design [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011, 20: 966-972.

[53] JHA M K, MAJI A. A Multi-Objective Genetic Algorithm for Optimizing Highway Alignments [C]// 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision Making. New York: IEEE Press, 2007: 261-266.

[54] DAVEY N, DUNSTALL S, HALGAMUGE S. Optimal Road Design through Ecologically Sensitive Areas Considering Animal Migration Dynamics [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 77: 478-494.

[55] KARLSON M, KARLSSON C S J, MÖRTBERG U, et al. Design and Evaluation of Railway Corridors Based on Spatial Ecological and Geological Criteria [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 46: 207-228.

[56] MISHRA S, KANG M W, JHA M K. Empirical Model with Environmental Considerations in Highway Alignment Optimization [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2014, 20 (4): 04014017.

[57] PU H, CAI L, SONG T R, et al. Minimizing Costs and Carbon Emissions in Railway Alignment Optimization: a Bi-Objective Model [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 116: 103615.

[58] EASA S M. Selection of Roadway Grades that Minimize Earthwork Cost Using Linear Programming [J]. Transportation Research Part A: General, 1988, 22 (2): 121-136.

[59] 张洪.复杂山区铁路线-站协同多目标优化研究[D].长沙:中南大学,2020.
(ZHANG Hong. Multi-Objective Concurrent Optimization of Railway Alignments and Station Locations in Complex Mountainous Regions [D]. Changsha: Central South University, 2020. in Chinese)

[60] GAO Y, GAO T C, WU Y C, et al. Low-Construction-Emission Cross-Section Optimization for Mountainous Highway Alignment Designs [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 105: 103249.

[61] MONNET D, HARE W, LUCET Y. A Successive Relaxation Algorithm to Solve a MILP Involving Piecewise Linear Functions with Application to Road Design [J]. Computational Optimization and Applications, 2022, 81 (3): 741-767.

[62] LI W, PU H, SCHONFELD P, et al. Mountain Railway Alignment Optimization with Bidirectional Distance Transform and Genetic Algorithm [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32 (8): 691-709.

[63] LEE Y, CHENG J F. A Model for Calculating Optimal Vertical Alignments of Interchanges [J]. Transportation Research

Part B: Methodological, 2001, 35 (5): 423-445.

[64] 但鹏飞,李远富,邱钰峻,等.考虑确定型偏好行为的艰险山区铁路选线决策方法研究[J].铁道标准设计,2019,63(9):23-27.
(DAN Pengfei, LI Yuanfu, QIU Yujun, et al. Research on Decision-Making Method of Difficult Mountain Railway Route Selection Considering Deterministic Preference Behavior [J]. Railway Standard Design, 2019, 63 (9): 23-27. in Chinese)

[65] YAN S X, HE S M, DENG Y, et al. A Reliability-Based Approach for the Impact Vulnerability Assessment of Bridge Piers Subjected to Debris Flows [J]. Engineering Geology, 2020, 269: 105567.

[66] AKHMET A, HARE W, LUCET Y. Bi-Objective Optimization for Road Vertical Alignment Design [J]. Computers & Operations Research, 2022, 143: 105764.

[67] SONG T R, PU H, SCHONFELD P, et al. Railway Alignment Optimization under Uncertainty with a Minimax Robust Method [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 15 (1): 333-346.

[68] 薛新功,李伟,蒲浩.铁路线路智能优化方法研究综述[J].铁道学报,2018,40(3):6-15.
(XUE Xingong, LI Wei, PU Hao. Review on Intelligent Optimization Methods for Railway Alignment [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40 (3): 6-15. in Chinese)

[69] HOWARD B E, BRAMNICK Z, SHAW J F B. Optimum Curvature Principle in Highway Routing [J]. Journal of the Highway Division, 1968, 94 (1): 61-82.

[70] 詹振炎.梯度投影法及其在铁路纵断面设计中的应用[J].长沙铁道学院学报,1979(4):83-88.
(ZHAN Zhenyan. Gradient Projection Method and Its Application in Longitudinal Section Design of Railroads [J]. Journal of Changsha Railway University, 1979 (4): 83-88. in Chinese)

[71] 易思蓉.铁路纵断面自动设计[J].西南交通大学学报,1985(1):35-43.
(YI Sirong. Automatic Design of Railway Profile [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1985 (1): 35-43. in Chinese)

[72] CHEW E P, GOH C J, FWA T F. Simultaneous Optimization of Horizontal and Vertical Alignments for Highways [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1989, 23 (5): 315-329.

[73] ADELI H, CHENG N T. Integrated Genetic Algorithm for Optimization of Space Structures [J]. Journal of Aerospace Engineering, 1993, 6 (4): 315-328.

[74] ADELI H, CHENG N T. Concurrent Genetic Algorithms for Optimization of Large Structures [J]. Journal of Aerospace Engineering, 1994, 7 (3): 276-296.

[75] ADELI H, KUMAR S. Distributed Genetic Algorithm for Structural Optimization [J]. Journal of Aerospace Engineering, 1995, 8 (3): 156-163.

[76] ADELI H, KUMAR S. Concurrent Structural Optimization on Massively Parallel Supercomputer [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121 (11): 1588-1597.

[77] YANG N, KANG M W, SCHONFELD P, et al. Multi-Objective Highway Alignment Optimization Incorporating Preference Information [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 40: 36-48.

[78] JHA M K, MCCALL C, SCHONFELD P. Using GIS, Genetic Algorithms, and Visualization in Highway Development [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2001, 16 (6): 399-414.

[79] 许金良,王海君,杨少伟.基于遗传算法的公路纵断面优化[J].交通运输工程学报,2003,3(2):48-52.
(XU Jinliang, WANG Haijun, YANG Shaowei. Optimization of Highway Profile Based on Genetic Algorithms [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3 (2): 48-52. in Chinese)

[80] KIM E, JHA M K, SON B. Improving the Computational Efficiency of Highway Alignment Optimization Models through a Stepwise Genetic Algorithms Approach [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39 (4): 339-360.

[81] SAMANTA S, JHA M K. Modeling a Rail Transit Alignment Considering Different Objectives [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45 (1): 31-45.

[82] TU S W, GUO X C, TU S W. Optimizing Highway Alignments Based on Improved Particle Swarm Optimization and ArcGIS [C]// Transportation and Development Innovative Best Practices 2008. USA: American Society of Civil Engineers, 2008.

[83] SHAFAHI Y, BAGHERIAN M. A Customized Particle Swarm Method to Solve Highway Alignment Optimization Problem [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2013, 28 (1): 52-67.

[84] PU H, SONG T R, SCHONFELD P, et al. Mountain Railway Alignment Optimization Using Stepwise & Hybrid Particle Swarm Optimization Incorporating Genetic Operators [J]. Applied Soft Computing, 2019, 78: 41-57.

[85] 缪鹍.公(铁)工程三维选线的群智能算法研究[D].长沙:中南大学,2011.
(MIAO Kun. Swarm Intelligent Algorithms for the 3D Route Location in Highway (Railway) Engineering Structures [D]. Changsha: Central South University, 2011. in Chinese)

[86] SUSHMA M B, ROY S, MAJI A. Exploring and Exploiting Ant Colony Optimization Algorithm for Vertical Highway Alignment Development [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37 (12): 1582-1601.

[87] SAMANTA S, JHA M K. Applicability of Genetic and Ant Algorithms in Highway Alignment and Rail Transit Station Location Optimization [J]. International Journal of Operations Research and Information Systems, 2012, 3 (1): 13-36.

[88] 于振中,李强,樊启高.智能仿生算法在移动机器人路径规划优化中的应用综述[J].计算机应用研究,2019,36(11):3210-3219.
(YU Zhenzhong, LI Qiang, FAN Qigao. Survey on Application of Bioinspired Intelligent Algorithms in Path Planning Optimization of Mobile Robots [J]. Application Research of Computers, 2019, 36 (11): 3210-3219. in Chinese)

[89] PRADHAN A, MAHINTHAKUMAR G K. Finding All-Pairs Shortest Path for a Large-Scale Transportation Network Using Parallel Floyd-Warshall and Parallel Dijkstra Algorithms [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2013, 27 (3): 263-273.

[90] SONG T R, PU H, SCHONFELD P, et al. Parallel Three-Dimensional Distance Transform for Railway Alignment Optimization Using OpenMP [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146 (5): 04020029.

[91] BABAPOUR R, NAGHDI R, GHAJAR I, et al. Forest Road Profile Optimization Using Meta-Heuristic Techniques [J]. Applied Soft Computing, 2018, 64 (1): 126-137.

[92] YANG D Y, HE Q, YI S R. Underground Metro Interstation Horizontal-Alignment Optimization with an Augmented Rapidly Exploring Random-Tree Connect Algorithm [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146 (11): 04020129.

[93] PU H, WAN X J, SONG T R, et al. A 3D-RRT-Star Algorithm for Optimizing Constrained Mountain Railway Alignments [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 130: 107770.

[94] ZHANG H, SONG T R, SCHONFELD P, et al. Vertical Alignment Optimization of Mountain Railways with Terrain-Driven Greedy Algorithm Improved by Monte Carlo Tree Search [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 38 (7): 873-891.

[95] WANG G H, PU H, SONG T R, et al. A 3D Monte Carlo Tree Search Method for Railway Alignment Optimization [J]. Applied Soft Computing, 2024, 151: 111158.

[96] 卓建成.低山浅丘地形高铁选线设计研究[J].铁道工程学报,2019,36(12):1-4.
(ZHUO Jiancheng. Research on the Design of High-Speed Railway Route Selection in Low Mountains and Shallow Hills [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36 (12): 1-4. in Chinese)

[97] 牟瀚林.复杂山区铁路选线设计思路研究[J].铁道工程学报,2020,37(12):6-10.
(MU Hanlin. Research on the Design Thinking of Railway Route Selection in Complex Mountainous Areas [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37 (12): 6-10. in Chinese)

[98] 张明.高速铁路环保选线的研究与建议[J].铁道标准设计,2020,64(9):1-5,27.
(ZHANG Ming. Research and Suggestions for Route Selection of High Speed Railway with Environmentally Protection [J]. Railway Standard Design, 2020, 64 (9): 1-5, 27. in Chinese)

[99] 朱颖,姚令侃,魏永幸.复杂艰险山区铁路减灾选线理论与技术[M].北京:科学出版社,2016.
(ZHU Ying, YAO Lingkan, WEI Yongxing. Theory and Technology of Railroad Line Selection for Disaster Reduction in Complex and Arduous Mountainous Areas [M]. Beijing: Science Press, 2016. in Chinese)

[100] 张羽军,陈建发,岳志勤.成贵铁路岩溶特征及线路选线[J].铁道工程学报,2020,37(4):38-42.
(ZHANG Yujun, CHEN Jianfa, YUE Zhiqin. Research on the Karst Characteristics and Route Selection of Chengdu-Guiyang Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37 (4): 38-42. in Chinese)

[101] 刘桂卫,陈则连,储文静,等.包银铁路断裂构造遥感勘察与地质选线[J].铁道工程学报,2018,35(8):11-15.

(LIU Guiwei, CHEN Zelian, CHU Wenjing, et al. Remote Sensing Interpretation on the Fault Structure and Geological Route Selection of Baotou-Yinchuan Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35 (8): 11-15. in Chinese)

[102] 王争鸣.兰新高铁穿越大风区线路选线及防风措施设计[J].铁道工程学报,2015,32(1):1-6,60.
(WANG Zhengming. Design of Route Selection and Windproof Measures for Strong Wind-Hit Section of Second Double Line of Lanzhou-Urumqi Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32 (1): 1-6, 60. in Chinese)

[103] 易思蓉.面向对象类谓词逻辑知识表达模式及其在选线系统中的应用[J].中国铁道科学,2003,24(6):31-35.
(YI Sirong. A Class-Predicate Logic Knowledge Expression Model and Its Application to Railway Alignment System [J]. China Railway Science, 2003, 24 (6): 31-35. in Chinese)

[104] 韩春华,易思蓉,吕希奎.提案-验证通用推理及在铁路选线中的应用[J].西南交通大学学报,2009,44(1):89-95.
(HAN Chunhua, YI Sirong, LÜ Xikui. Proposing-Testing Generic Reasoning and Its Application in Railway Location [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44 (1): 89-95. in Chinese)

[105] 朱颖,罗圆.基于知识工程的铁路智能选线设计理论、方法及应用[J].铁道科学与工程学报,2021,18(7):1671-1678.
(ZHU Ying, LUO Yuan. Theory, Method and Application of Intelligent Railway Alignment Design Based on Knowledge Engineering [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18 (7): 1671-1678. in Chinese)

[106] PU H, HU T, SONG T R, et al. Modeling and Application of a Customized Knowledge Graph for Railway Alignment Optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 244: 122999.

[107] 袁泉,曾文驱,李子涵,等.基于改进型D3QN深度强化学习的铁路智能选线方法[J].铁道科学与工程学报,2022,19(2):344-350.
(YUAN Quan, ZENG Wenqu, LI Zihan, et al. Intelligent Railway Location Design Approach Based on Enhanced D3QN Deep Reinforcement Learning [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19 (2): 344-350. in Chinese)

[108] GAO T C, LI Z H, GAO Y, et al. A Deep Reinforcement Learning Approach to Mountain Railway Alignment Optimization [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37 (1): 73-92.

[109] 王天玺.基于深度强化学习的铁路智能选线方法研究[D].兰州:兰州交通大学,2024.
(WANG Tianxi. Enhanced Railway Intelligent Route Selection Scheme Using Deep Reinforcement Learning [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024. in Chinese)

[110] 王光辉,蒲浩,宋陶然,等.基于强化学习-蒙特卡洛树搜索的铁路线路优化[J].铁道学报,2025,47(5):102-110.
(WANG Guanghui, PU Hao, SONG Taoran, et al. Integrated Method Based on Reinforcement Learning and Monte Carlo Tree Search for Railway Alignment Optimization [J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47 (5): 102-110. in Chinese)

A Research Review on Theories and Methods for Intelligent Optimization of Railway Alignment

RAN Yang[1,2], LI Wei[1,2], WANG Jiaqi[1,2], WAN Xinjie[1,2], PU Hao[1,2], SONG Taoran[1,2]

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;
2. National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Changsha Hunan 410075, China)

Abstract: Railway route selection design is a fundamental prerequisite for ensuring the safety, economy, comfort, and environmental sustainability of railway alignment. A thorough investigation into intelligent alignment optimization, the core link of the design, is therefore of great significance to improve the quality and search efficiency of alignment schemes. The essence of intelligent alignment optimization lies in constructing multi-objective optimization models under multi-dimensional and multi-factor environments, and developing intelligent search algorithms to obtain optimized alignment solutions. Accordingly, the domestic and international

research on intelligent railway alignment optimization are systematically classified and reviewed from 3 aspects: multi-dimensional environmental modeling, alignment optimization modeling, and search algorithms. The results show that, under multi-dimensional enviroment, research have evolved from early digital terrain model and digital geological model to comprehensive geographic information models that integrate multi-dimensional environmental factors. In terms of model optimization, the focus has shifted from independent optimization of horizontal and vertical alignments to integrated horizontal-vertical optimization, and evaluation indicators have gradually expanded from engineering economics to include multiple objectives such as safety, sustainability, and low-carbon performance. The solution algorithm has evolved from early analytical approaches to heuristic algorithms, and more recent studies have emphasized deep integration with fields of knowledge-based reasoning and artificial intelligence, leading to a higher degree of intelligence. In the future, the intelligent optimization of alignment will be more proactive and comprehensive in geographic information services, more diversified and integrated in evaluation objectives, and more intelligent and efficient in search methods.

Key words: Railway route selection design; Alignment optimization; Optimization model; Review

（责任编辑　杨婧婕）