复杂地形条件下互通立交线形优化与土石方平衡算法研究

裘鹏立

（浙江数智交院科技股份有限公司，浙江 杭州 310012）

摘 要 本研究针对复杂山区互通立交线形和土石方高度耦合问题，提出地形、线形、工程量、调配、施工闭环协同框架。线形优化以运行连续性、视距、平纵组合和构造物风险为约束，土石方平衡在料源、填筑区、借弃料区和运输网络下统筹料类匹配、运距、时序和跨标段调配。建立可行域生成、最小费用流粗解、混合整数非线性改进和安全仿真校验的分层算法。结果表明，山区互通应依靠构型选取、纵坡把控和集约化调配来达成安全、工程量和环境扰动的综合协调。

关键词 复杂地形；互通立交；线形优化；土石方平衡

中图分类号：U412.35+2 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.042

0 引言

复杂山区互通立交属于地形、构造物、交通流以及施工组织高度耦合的工程单元，沟谷高差、横向陡坡和生态敏感性使得线形和土石方问题互相制约。已有研究大多集中于几何线形、土石方调配或者施工时序等单个方面，不能解决填挖、桥梁、填料和运输之间的整体协调问题[1]。基于此，本研究以纵坡受控、走廊狭窄、填挖高差大的山区互通为研究对象，提出了“安全—工程量—调配—时序”闭环协同的方法框架，为方案决策和数字化设计提供参考。

1 复杂地形条件下的工程约束

1.1 空间冲突构成山区互通的主要约束

山区互通的典型地形有V形或者U形沟谷、横向陡坡、山脊鞍部、冲沟台地。暴雨汇流、崩塌、滑坡、岩堆、软弱夹层还会限制墩台、边坡和弃渣场的位置。与平原枢纽相比，山区互通不能只用占地规模或者孤立的几何指标来判断方案的好坏，桥墩基础处在陡坡稳定影响范围内，高填方会侵占沟谷行洪空间，深路堑会切断坡体地下水排泄通道。如果前期没有发现这些空间冲突，那么后续仅仅依靠纵坡微调或者土方再平衡来改善方案是很难达到根本目的的。因此，在复杂的地形条件下，首先应该找出不能让位的红线约束，然后在位置、构造物和工程量之间做出有代价的选择。地形模型除了高程之外还要叠加地质风险、汇水路径、用地边界、生态敏感区、既有设施和施工可达性等约束图层，从而形成一个面向方案搜索的约束图层。只有把不可建区、不适宜填方区、桥位可行带和运输瓶颈前置表达出来，算法搜索才不会生成大量无法实施的“理论最优”方案[2]。

1.2 互通线形必须服从运行连续性

互通线形优化目标要达到半径、纵坡、超高、视距等规范要求，同时保证分流、减速、合流、加速等运行连续性。匝道曲线、纵坡、超高、视距一起影响，如果分流鼻端前方有纵坡或者平曲线突变，驾驶人速度适应的过程会被压缩，几何合规并不一定意味着运行安全。山区下这个问题更加明显。连续曲线、紧致交织、桥隧衔接都会加大驾驶负荷，匝道出口前的纵坡突变也会引起速度偏差。因此线形评价要兼顾速度协调性、视距满足率、横向力系数、平纵组合以及交通冲突。

1.3 高填深挖是土石方问题的方案分岔点

高填方、深路堑都会加大边坡防护、排水、桥隧界面、施工便道和填料利用的复杂性。路基设计不得出现高填深挖情况；填方高度或者挖方深度达到某一个值的时候，应该和桥梁、隧道等方案一起综合考虑。该原则并不是简单地用构造物代替路基，而是在纵断面问题上不能误以为是边坡高度问题。互通区高填深挖风险可以通过四个途径放大，即增大边坡防护和排

作者简介：裘鹏立（1994-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：路线互通。

水工程的规模，形成桥隧和路基之间不均匀沉降界面，施工便道不足导致运输路线绕行，表土、普通土、软岩和硬岩的分类利用更难。

2 互通立交线形优化方法

2.1 构型选择决定方案的整体边界

喇叭形、苜蓿叶形、菱形、T 形以及它们的变体均有着各自的应用场合。在地形狭窄、转向交通集中的节点上可以使用变异构型压缩占地，在跨沟条件受限的地方可以采用桥隧组合减少横坡填挖，在主线间距受控的地方要综合考虑分层交叉、半直连匝道和变速车道布置的关系。构型选择实际上就决定着匝道的长度、桥梁的大小、填挖量以及施工组织的大致范围，应该先于局部平纵参数的改善。已有山区互通的案例显示，采用立体叠合、曲线分级、桥隧协同等集约化的手段可以改善线形、工程规模、环境影响以及安全性等各方面的情况[3]。

2.2 分层优化兼顾工程逻辑与算法自由度

山区互通线形空间复杂，直接进行全局连续搜索很容易产生很多不符合桥梁、边坡、排水、用地等约束条件的方案。本研究使用了三阶段的方法，即生成、筛选、改进，根据地形、地质和红线的限制来产生候选构型以及可行走的廊道；在既定拓扑中对平曲线、竖曲线、横断面和边坡台阶进行优化；最后用离散智能算法调整关键控制点、跨线方式和桥梁孔跨[4]。该方法可以避免遗传算法在巨大的搜索空间里产生很多不切实际的方案，但是又保留了它对于非凸、多峰问题的适应性，三个阶段的划分、主要方法以及关键约束见表 1。

表 1 互通立交线形分层优化方法

阶段	主要方法	核心作用	关键约束
初始可行域生成	地形栅格、约束图与工程规则	将不可建区、不良地质区、用地红线和桥位可行带转化为搜索边界	净空、排水、构造物边界、用地红线
连续变量优化	梯度或序列二次规划	快速确定平曲线主点、竖曲线变坡点和纵坡	平纵指标、坡向、视距、工程量
离散变量改进	遗传算法或变邻域搜索	调整构型、跨线方式、桥梁孔跨和填料路径	工程逻辑、施工进度、料类与时序

第一层要先控制总体构型、主线节点、跨线桥位置和填挖分区，第二层在已有的拓扑基础上优化匝道的平纵组合，第三层再对局部控制点做精细化调整。约束条件除了平纵指标外，还要包含净空、边坡稳定、排水坡向、填料适用性、施工便道可达性以及生态红线等。如果只把约束当作罚函数后置处理，那么算法就会把高风险边坡或者不可达料场误判成低成本方案。所以工程规则要真正进入初始可行域。

2.3 安全校验应回到运行速度与驾驶负荷

线形优化输出不能直接等于施工图。每个候选方案都要进行运行速度预测、视距检验、横向力系数校核、交通仿真；对于分流前信息识别、合流加减速、连续曲线和桥隧过渡等高风险场景，需要接入驾驶模拟。安全评价的价值就在于发现几何指标以外的隐性危险，防止出现“每个单元都符合要求，但组合起来就不连续”的情况。这里不能用单一的造价或者单行速度来作为最终评价指标，应该采用多目标评价思路，即安全目标为运行速度突变最小化、视距满足率最大化，工程目标为土石方、桥梁、隧道、边坡防护、调运成本，生态目标为高填深挖、敏感区扰动、弃渣、借方占地。三类目标之间经常出现冲突，必须经由帕累托排序才能找到综合最优的方案，之后再依照投资边界、风险偏好的地方状况做出最后决定。

3 土石方平衡算法设计

3.1 土石方平衡应转化为受约束的调配网络

土石方平衡的本质不是找到静态的填挖相等，而是在网络调运的情况下实现可用材料的最大化。将互通及相邻标段的挖方节点、填方节点、中转料场、借料场、弃料场和可行运输边等离散出来。决策内容为不同的料类、不同的时间窗从源点到终点的体积，成本包含装卸、运距、道路使用、弃渣处置、借方采购、工期延误等，并且要考虑到土石类别转换、最大运距、边坡分层、桥隧界面、便道承载力和弃渣场容量等约束[5]。

传统的调配方法是先横向平衡，后纵向调配，并且还要考虑桥涵、陡坡和大沟对运输可行性的限制。在互通区由于桥墩、深路堑、匝道环抱，横向调运一般会穿越边坡、构造物影响区，二维、三维路径的重要性明显增大。因此不能把复杂的立交看作是一条线路上桩号的简单调配问题。对山区分区明显且需进行跨区运输的项目，应先按自然台地、沟谷、施工便道等划分出子区，再建立子区间的跨区运输关系。

3.2 最小费用流提供经济基准，但不能替代工程判断

当忽略料类、时间窗、弃料优先级等复杂约束的时候，单料土石方调配可以看作是满足节点供需平衡、边容量限制的最小费用流问题。该模型计算稳定，可以用来作为基准层，快速判断某一个纵断面、横断面方案能否用较低的运输成本完成调配。但是它的边界也非常清晰，如果直接用最小费用流的结果作为施工方案，就会得到跨河绕行、先弃后借、软土填入路床等纸面上的最优路径。因此，最小费用流应该产生初始可行流，然后用工程规则进行修正。特别是将料类兼容性、压实质量、含水率处理、施工窗口、弃渣容量等作为硬约束，把不合理的料流、不可行的路径直接排除掉[6]。

3.3 料类、时序和质量共同决定平衡的可实施性

在实际工程中，开挖料的利用价值不仅仅只看数量，还要考虑它与填筑位置、层位、质量要求是否相适应。普通土、软岩、硬岩以及特殊土应按类别开挖、分类堆放、分类利用，路床、路堤、边坡平台、反滤层和临时工程对填料要求也不相同。把料类差别当作单个的“土石方体积”，即便调配成本低，也会引发质量不合格或者后期沉降隐患。

施工时序也不能忽视。填方高峰和挖方高峰错位的时候，即使总体挖方能满足填方需求，也需要设置中转料场或者借用外部料源；桥隧界面、雨季施工、弃渣场库容、便道通行能力都会影响调配的可行性。因此，本文使用分层求解的方法，第一层用总费用、弃方、环境扰动加权最小化为目标，得到初始调配方案；第二层检验料类兼容、压实质量、施工窗口、弃渣容量；第三层将不可行路径和不合格料流置零，对纵坡、通道、构造物方案进行反馈修正。

4 线形与土石方协同优化框架

4.1 “并行搜索—双向校验”优于完全串行设计

复杂山区互通立交设计，抛弃传统的串行设计模式和全变量无差别耦合的方式，用并行搜索、双向校验相结合的思路进行协同优化。依靠高精度地形、地质、用地和施工组织等基础数据创建出各种各样的数字约束图层，从而得到多种类型的互通候选构型。利用线形优化和土石方调配两个模块并行计算，同时对方案的行车安全指标、工程量指标进行校核，提前保存可行构型。该模式可以很好地避免串行设计过早锁定局部最优解、全局适配性差的问题，为后面方案收敛优化打下基础，兼顾算法搜索效率和工程方案的合理性。

4.2 工程量映射与约束反馈驱动方案收敛

本文主要研究工程量动态映射和双向约束反馈，从而达到线形和土石方方案的迭代收敛。将互通匝道、跨线桥等构造物断面转为填挖工程量需求，结合高填深挖、取弃土场、桥隧替换工程，实时更新土方供需和运输边界。对线形合规但是土石方调配成本高、料源时序不匹配的问题，创建惩罚反馈机制，反向微调纵坡、通道、构造物的设计方案。同时，打破单一互通内部平衡的局限，依靠跨标段土石方调配模式，把隧道洞渣、区间填方等可以利用的资源盘活起来，在合规的前提下达到工程量和调配方案的动态最优适配[7]。

4.3 工程否决机制保障算法落地

为了克服算法理论最优方案与工程实际相脱离的情况，创建七步闭环优化流程，并且实行刚性的工程否决制度。全过程边坡稳定、排水系统、弃渣场库容、填料质量、施工仿真等各方面进行多方面校验，把视距不足的、地质灾害风险超标的、料源不合格的、施工路径无法闭合的设为否决项。算法只是挑选出效率高的优化方案，不会削减工程的安全界限。

5 结束语

针对复杂山区互通立交线形和土石方相互脱节的问题，本研究建立了一个以地形、线形、工程量、调配、施工为协同优化的框架。研究结果表明，互通线形优化要以运行连续性校验为主，把速度协调性、视距和驾驶负荷当作构型否决条件；土石方平衡要依照料类、时间窗、网络容量综合安排，用最小费用流为基础，再联系施工次序、填料品质和跨标段协作加以修正。构型集约化和调配协同，在保证安全的基础上可以兼顾工程规模、施工可行性以及环境扰动。研究成果能为山区互通方案选取、数字化设计提供支撑。

参考文献：

[1] 桂兆可，周娟，张健. 复杂地形条件下互通立交设计关键技术与安全性评价 [J]. 公路，2026,71(06):353-357.
[2] 范佳. 山区不良地形条件下互通立交方案研究 [J]. 城市道桥与防洪，2026(05):170-174.
[3] 张驰，刘锴，王世法，等. 高速公路互通式立体交叉出入口安全性研究综述 [J]. 交通信息与安全，2023,41(02):1-17.
[4] 钟烈. 复杂地形地质条件下互通式立交方案设计与造价控制 [J]. 交通世界，2023(Z1):214-216.
[5] 丁虎成. 互通立交平面线形自动化设计研究 [D]. 南京：东南大学，2023.
[6] 熊丽. 山区高速公路互通立交与服务区合并设置方案及控制指标 [J]. 工程技术研究，2026,11(02):190-192.
[7] 陈泽，刘建国，王晓玉，等. 高速公路互通立交与服务区合建交通标志设计 [J]. 山东交通科技，2024(01):62-64.