

文章编号: 1674—8247(2023)05—0051—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.05.010

# 基于 TRIZ 理论的某高原铁路陡坡路基方案设计

成启航 程云 郑六益

(中铁二院贵阳勘察设计研究院有限责任公司, 贵阳 550002)

**摘要:**随着国家西部大开发战略的推进,高原铁路设计逐渐成为当前重要的研究课题。高原铁路设计不仅需要考虑到陡峭的地形条件和地震动等不利因素,还需兼顾严格的位移控制要求,常规的陡坡路基设计方案已不能满足设计需求。鉴于实际工程需要和某高原铁路陡坡路基设计的复杂性,基于 TRIZ 理论分析设计参数间的相互关系,采用技术矛盾矩阵的方法获得陡坡路基的设计方案,并采用有限差分软件 FLAC3D 对设计方案进行了验证。结果表明,基于 TRIZ 理论得到的设计方案在一般工况和地震工况下均能满足设计要求,基于 TRIZ 理论的高原铁路陡坡路基方案设计是可行的。

**关键词:**高原铁路;陡坡路基;TRIZ 理论;方案设计;数值模拟

中图分类号:U213.1

文献标志码:A

## Scheme Design of Steep Slope Subgrade for a Plateau Railway Based on TRIZ Theory

CHENG Qihang CHENG Yun ZHENG Liuyi

(Guiyang Branch of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

**Abstract:** With the advancement of the national strategy for the development of the western region, the design of plateau railways has gradually become an important research topic. The design of plateau railways needs to consider not only steep terrain and factors such as seismic activity but also strict requirements for displacement control. Conventional design solutions for steep slope subgrade are no longer able to meet the design requirements. Considering the practical engineering needs and the complexity of designing a steep slope subgrade for a certain plateau railway, this study analyzed the relationships between design parameters based on TRIZ theory and obtained the design solution for the steep slope subgrade using the method of technical contradiction matrix. The design solution was validated using finite difference software FLAC3D. The results show that the design solution obtained based on TRIZ theory can meet the design requirements under normal working conditions and seismic conditions. Therefore, the plateau railway steep slope subgrade design based on TRIZ theory is feasible.

**Key words:** plateau railway; steep slope subgrade; TRIZ theory; scheme design; numerical simulation

随着国家经济的发展和西部大开发战略的推进,西南高原地区现有的公路运输通道已不能满足当前经济及社会发展的需求,建设高原铁路势在必行。因

此,高原铁路的设计逐渐成为当下重要的研究课题之一。

在高原铁路的设计中,复杂的地质条件常给铁路

收稿日期:2022-11-16

作者简介:成启航(1995-),男,工程师。

引文格式:成启航,程云,郑六益. 基于 TRIZ 理论的某高原铁路陡坡路基方案设计[J]. 高速铁路技术,2023,14(5):51-55.

CHENG Qihang, CHENG Yun, ZHENG Liuyi. Scheme Design of Steep Slope Subgrade for a Plateau Railway Based on TRIZ Theory [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5):51-55.

路基的设计带来许多困难,陡坡路基便是其中之一。高原陡坡路基的设计不仅需要考虑复杂的地形、地貌条件和地震等不利因素,还需兼顾严格的位移控制要求,常规的陡坡路基方案已不能满足其设计需求。鉴于实际工程的需要及设计的复杂性,亟需引入一种新的方法来优化高原铁路陡坡路基的设计方案。

作为一种技术和管理创新的方法,TRIZ 理论已被广泛应用于社会生产、生活和科研的各种问题<sup>[1-3]</sup>。本文将 TRIZ 理论应用于某高原铁路陡坡路基的方案设计中,在解决工程实际的同时,验证该理论在陡坡路基设计领域应用的可行性。

1 TRIZ 理论及技术矛盾矩阵

TRIZ 理论又被称为“发明问题解决理论”,意为通过识别并解决复杂问题来实现技术或管理上的创新。根据技术系统的问题属性,TRIZ 理论可将实际的问题转化为理论的问题模型,并利用不同的解题工具得到解决方案模型,最后将解决方案模型应用于实际问题中,从而实现创新。

技术系统中的问题往往呈现出多样化的表现形式,这些问题的影响因素也存在着相互影响、相互制约的技术矛盾,即在提高技术系统中某一个参数时,导致了另一个参数的恶化而产生的矛盾。作为一种 TRIZ 理论中的常用的解题工具,技术矛盾矩阵可用于解决影响因素间相互制约的问题<sup>[4]</sup>。在技术矛盾矩阵中,将实际问题转化为技术矛盾,利用技术矛盾找到创新原理,并以创新原理作为启发,推导出针对实际问题的可行方案,最后实现对现有技术的优化创新。在陡坡路基的设计中,同样存在着相互影响、相互制约的因素,例如加大结构尺寸虽能提高其承载能力及抗变形能力,但会增加现场施工难度及工程造价。因

此,需要使用 TRIZ 理论中的技术矛盾矩阵解决这些影响因素间相互制约的问题,从而得到合理的陡坡路基设计方案。

2 基于矛盾矩阵的路基方案设计

2.1 技术矛盾矩阵在设计中的应用

在陡坡路基的设计中,问题的根源主要在于路基填筑材料的物理力学性质、结构与填筑材料之间复杂的相互作用、施工的可行性与路基的整体稳定性之间的矛盾,上述不同的设计参数间存在着相互制约的关系,属于技术矛盾问题。因此,可采用 TRIZ 理论中的技术矛盾矩阵工具进行解决方案模型的求解。

根据技术矛盾矩阵工具,上述影响因素可一般化表达为“静止物体的重量”“结构的稳定性”“系统的复杂性”等恶化的通用参数和改善的通用参数。通过查阅矛盾矩阵<sup>[5]</sup>,得到在陡坡路基方案设计中的矛盾矩阵表,如表 1 所示。由表 1 可知,可使用的创新原理中排名前三位的编号依次为:1 号分割原理(出现 10 次)、35 号物理或化学参数改变原理(出现 10 次)、10 号预先作用原理(出现 9 次)。因此,可基于上述创新原理进行陡坡路基的方案设计。

2.2 创新原理的应用

2.2.1 分割原理

分割原理的思路在于将复杂的系统分为相互独立的部分,提高其可分性,以实现系统的改造。在陡坡路基的设计中,不仅需要保证路基本体的稳定性,还需要确保相邻陡坡的稳定性。因此,可将路基本体与相邻陡坡分为 2 个相互独立部分,然后分别采用不同的工程措施确保各独立部分的稳定性。在工程设计领域,可采用桩板墙对陡坡路基进行支挡,采用低预应力锚杆框架梁对路基下部陡坡进行防护。

表 1 陡坡路基设计中的技术矛盾矩阵表

恶化的 通用参数 改善的 通用参数	13. 结构的稳定性	14. 强度	26. 物质或事物的量	32. 可制造性	34. 系统的复杂性
2. 静止物体的重量	26; 39; 01; 40	28; 02; 10; 27	19; 06; 18; 26	28; 01; 09	01; 10; 26; 39
11. 压力或应力	35; 33; 02; 40	09; 18; 03; 40	10; 14; 36	01; 35; 16	19; 01; 35
13. 结构的稳定性	-	17; 09; 15	15; 32; 35	35; 19	02; 35; 22; 26
14. 强度	13; 17; 35	-	29; 10; 27	11; 03; 10; 32	02; 13; 28; 25
26. 物质或事物的量	15; 02; 17; 40	14; 35; 34; 10	-	29; 01; 35; 27	03; 23; 27; 10
32. 可制造性	11; 13; 01	11; 03; 10; 32	35; 23; 01; 24	-	27; 26; 01
36. 系统的复杂性	02; 22; 17; 19	02; 13; 28	13; 03; 27; 10	27; 26; 01; 13	-

2.2.2 物理或化学参数改变原理

物理或化学参数改变原理是指通过改变系统的聚集态、浓度、密度或温度等物理或化学参数,以达到创新改造的目的。在陡坡路基的设计中,路基填料的

物理力学性质是影响其稳定性的重要因素,常采用回填碎块石土与满铺土工格栅的方法来提高路基抗剪强度等物理力学参数,从而达到提高路基稳定性的作用。

### 2.2.3 预先作用原理

预先作用原理的思路在于预先对部分或全部系统施加必要的改变,从而达到预期的功能。在工程设计领域,该原理常被以预应力锚索的形式应用于高陡边坡危岩落石的加固设计中。对于陡坡路基的设计,也可以通过在锚固桩上添加预应力锚索的方式,达到对陡坡路基的预加固作用,减弱地震等不利工况对陡坡路基的破坏。

### 2.3 最终方案选择

通过综合利用以上3种创新原理,得到了最终的陡坡路基设计方案。

针对路基本体,采用回填级配碎块石土作为填料、竖向满铺土工格栅的方法提高路基本体的抗剪强度,同时采用桩板结构对路基本体进行支挡,确保其稳定性。针对相邻陡坡,根据实际地质情况,可采用多排低预应力锚杆框架梁进行防护。针对高原地区可能存在的地震动因素,采用锚固桩上添加多束预应力锚索的方式进行预加固,从而减弱地震工况对路基的破坏作用,提高支挡结构的安全性。

## 3 设计方案验证

### 3.1 工程概况

该高原铁路车站陡坡路基位于川西高原的高山区,区内河谷深切,地形陡峻。车站范围内微地貌主要表现为低中山构造剥蚀、河流阶地地貌,地形呈“鱼脊背”状,起伏较大,绝对高程2 582~2 798 m,相对高差60~215 m。车站位于山体脊背处,两侧为斜坡,其下为河流阶地。车站上覆0~2 m细角砾土层,下伏基岩主要为三叠系上统两河口组二段含炭板岩与砂岩不等厚互层,岩芯整体较完整,呈柱状、长柱状,岩层以中厚层为主。车站范围内特殊岩土主要为季节性冻土,边坡未见拉裂缝及其他变形迹象,无明显不利节理,整体上坡体稳定。

车站为削山设站,车站平均设计高程约为2 740 m。因此,在施工过程中,不可避免地产生了许多陡坡路基,本文选取了其中较为典型的剖面进行设计方案的验证。结合现场实际情况,基于TRIZ理论的陡坡路基方案设计,陡坡路基左侧设置桩板墙收坡,锚固桩尺寸为2.75 m×3.5 m,桩长40 m,桩间距6 m,采用C35级混凝土。锚固桩桩顶以下2 m、4 m和6 m位置分别布置6束15.2 mm的1860级钢绞线,锚索长度分别为40 m、35 m和30 m,锚固段长10 m,最终预加应力均为720 kN。路堤下部坡面共设置6排低预应力锚杆框架梁护坡,锚杆长10 m,节点间距4 m。路堤填

料采用级配碎块石土,同时竖向间隔0.6 m满铺土工格栅。

### 3.2 计算模型建立

为验证最终陡坡路基设计方案的合理性,采用有限差分软件FLAC3D建立计算模型,对该铁路车站的陡坡路基工点进行计算。

计算模型尺寸为192 m×100 m(宽×高),厚度根据锚固桩桩间距取为6 m。模型中陡坡路基及地层岩土体采用Mohr-Coulomb弹塑性本构模型,支挡结构采用线弹性本构模型<sup>[6-7]</sup>。

路堤锚固桩采用FLAC3D内置的Pile单元模拟,锚固桩重度 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量 $E = 35 \text{ GPa}$ ,泊松比 $\nu = 0.2$ 。桩上锚索采用Cable单元模拟,其中锚索锚固段弹性模量 $E = 36 \text{ GPa}$ ,锚索自由段弹性模量 $E = 183.1 \text{ GPa}$ <sup>[8]</sup>。路堤填土部分满铺土工格栅,采用Geogrid单元模拟,重度 $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量 $E = 21 \text{ GPa}$ <sup>[9-10]</sup>。路堤下部低预应力锚杆采用Cable单元模拟,弹性模量取值为 $E = 15.7 \text{ GPa}$ <sup>[11]</sup>。陡坡路基表面设置70 kPa的均布荷载,用以模拟铁路车辆荷载<sup>[12]</sup>。各地层的物理力学参数如表2所示。

表2 地层物理力学参数表

地层	天然重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	黏聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	弹性模量 $E / \text{MPa}$	泊松比 $\nu$
路堤碎块石土填料	21	0	40	100	0.26
18-5-W3强风化变质岩屑石英砂岩与粉砂质板岩互层	22	0	40	400	0.3
18-5-W2中风风化变质岩屑石英砂岩与粉砂质板岩互层	24	0	45	700	0.2

### 3.3 计算结果分析

采用有限差分软件FLAC3D对在一般工况和地震工况下的陡坡路基模型进行数值计算。考虑到该陡坡路基位移控制要求较为严格,因此主要对路堤的变形进行分析,分析内容主要包括路堤土体和锚固桩的位移。

#### 3.3.1 一般工况

陡坡路基土体最大水平及竖向位移均位于路基面顶部,最大水平位移9.5 mm,最大竖向位移25.3 mm,路基相邻陡坡水平位移不足1 mm,锚固桩桩顶最大水平位移7.2 mm。一般工况下土体水平及竖向位移如图1所示,锚固桩水平位移如图2所示。

根据TB 10001-2016《铁路路基设计规范》及



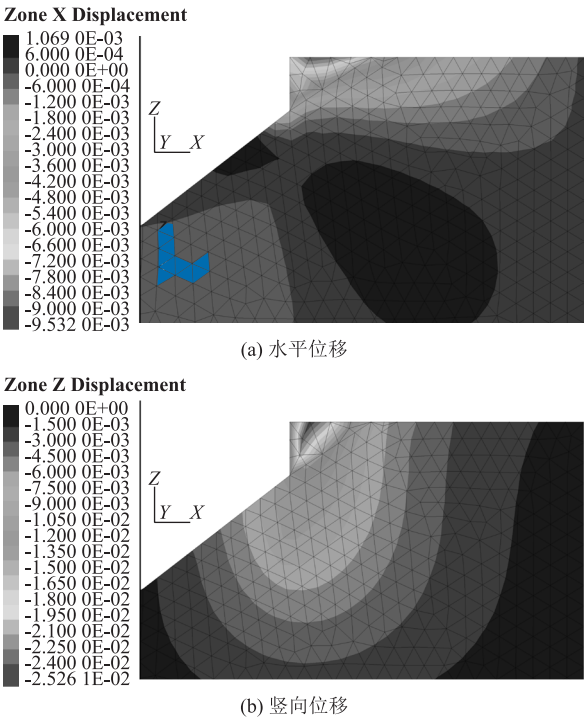


图 1 一般工况土体位移云图

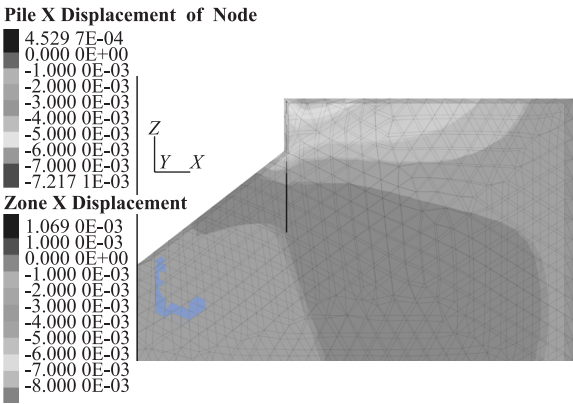


图 2 一般工况锚固桩水平位移云图

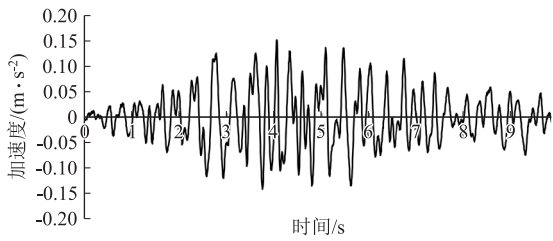


图 3 地震波加速度时程曲线图

地震工况下土体水平及竖向位移如图 4 所示,锚固桩水平位移如图 5 所示。

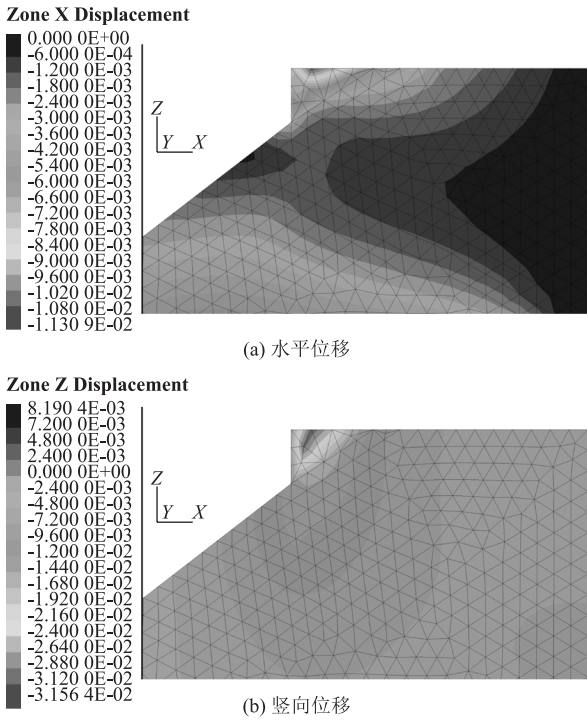


图 4 地震工况土体位移云图

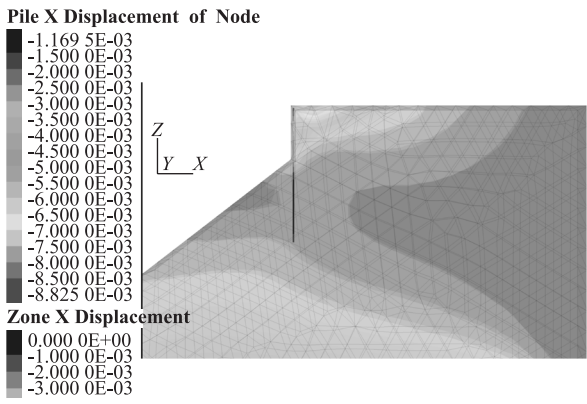


图 5 地震工况锚固桩水平位移云图

TB 10025 – 2019《铁路路基支挡结构设计规范》,路基土体工后沉降应小于 150 mm,锚固桩桩顶水平位移应小于悬臂段长度的 1/100 且不大于 100 mm。根据计算结果,一般工况中路基土体及锚固桩的位移均满足设计要求。

3.3.2 地震工况

在模型底部施加水平向的地震应力波模拟地震工况,地震波为 EL CENTRO 波(N-S),滤波及基线校正后加速度幅值为 0.15 g,模型计算取其主频段 0 ~ 10 s 进行计算,地震波时程曲线如图 3 所示。

陡坡路基土体最大水平位移 11.3 mm,最大竖向位移 31.6 mm;锚固桩桩顶最大水平位移 8.8 mm;地震工况中路基土体及锚固桩的位移均满足设计要求。

3.3.3 计算结果分析

基于 TRIZ 理论的陡坡路基设计方案在一般工况

及地震工况下均能满足设计要求,因此,基于TRIZ理论的陡坡路基方案设计是可行的。

## 4 结论

本文采用TRIZ理论对某高原铁路车站的陡坡路基方案进行了设计,并采用有限差分软件FLAC3D验证了设计方案的合理性。数值计算结果表明,基于TRIZ理论的陡坡路基设计方案在一般工况及地震工况下均能满足设计要求,可以认为TRIZ理论在陡坡路基方案设计领域的应用是可行的。

本文有待改进的地方包括:(1)未能结合实际监测资料来验证计算结果的准确性;(2)模型厚度仅根据桩间距取值为6 m,未能考虑三维空间效应,有待后续开展深入研究。

## 参考文献:

- [1] 薛晓滨. 创新实践呼唤创新理论: 发明问题解决理论(TRIZ)综述[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(7): 96-101.  
XUE Xiaobin. Innovation Practices Calling for Innovation Theory-A Summarization on TRIZ [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(7): 96-101.
- [2] 杨泉,徐骏. 基于TRIZ理论的高海拔严寒地区重力式挡土墙方案研究[J]. 路基工程, 2019(5): 99-104.  
YANG Quan, XU Jun. Research on Scheme of Assembled Gravity Retaining Wall in High-altitude and Extremely Cold Area Based on TRIZ Theory [J]. Subgrade Engineering, 2019(5): 99-104.
- [3] 杨吉忠,颜华,魏永幸,等. 基于TRIZ理论的低频减振轨道结构研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(4): 60-64.  
YANG Jizhong, YAN Hua, WEI Yongxing, et al. Research on the Low Frequency Vibration Attenuation in Track Structure Based on TRIZ Theory [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(4): 60-64.
- [4] 赵敏,史晓凌,段海波. TRIZ入门及实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
ZHAO Min, SHI Xiaoling, DUAN Haibo. TRIZ Introduction and Practice [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [5] 向科,罗凤. 分层铺设土工格栅高填方路堤的稳定性验算[J]. 铁道勘察, 2005, 31(2): 47-49.  
XIANG Ke, LUO Feng. Stability Analysis of Geogrids-Reinforced High Embankments [J]. Railway Investigation and Surveying, 2005, 31(2): 47-49.
- [6] 刘波,韩彦辉. FLAC原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
LIU Bo, HAN Yanhui. FLAC Principle, Examples and Application Guide [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [7] 戚德印,余蓓. FLAC3D二次开发实体结构单元在基坑支护中的应用[J]. 土工基础, 2018, 32(4): 415-418.  
QI Deyin, YU Bei. Application of FLAC3D Secondary Development Entity Structural Unit in Foundation Pit Support [J]. Soil Engineering and Foundation, 2018, 32(4): 415-418.
- [8] 曹净,左怀西,王小勇,等. 预应力锚索钢绞线的工程等效弹性模量试验研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2014, 39(2): 34-38.  
CAO Jing, ZUO Huaixi, WANG Xiaoyong, et al. Test Research on Engineering Equivalent Elastic Modulus of Prestressed Cable [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2014, 39(2): 34-38.
- [9] 李文勇,陈征宙,罗常青,等. 基于FLAC的土工格栅在边坡中的受力变形机理研究[J]. 中国水运(下半月), 2008, 8(10): 176-178.  
LI Wenyong, CHEN Zhengzhou, LUO Changqing, et al. Study on Stress and Deformation Mechanism of Geogrid in Slope Based on FLAC [J]. China Water Transport, 2008, 8(10): 176-178.
- [10] 刘华北, Ling H I. 土工格栅加筋土挡土墙设计参数的弹塑性有限元研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 668-673.  
LIU Huabei, LING H I. Elasto-plastic Finite Element Study for Parameters of Geogrid-reinforced Soil Retaining Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 668-673.
- [11] 张伟,刘泉声. 基于剪切试验的预应力锚杆变形性能分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2231-2240.  
ZHANG Wei, LIU Quansheng. Analysis of Deformation Characteristics of Prestressed Anchor Bolt Based on Shear Test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2231-2240.
- [12] TB 10001-2016 铁路路基设计规范[S].  
TB 10001-2016 Code for Design of Railway Subgrade [S].