

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2023.03.014

基于 TRIZ 的矿用三维激光扫描测量系统的优化设计

乔 莎^{1,2,3} 卢烁十^{1,2} 刘冠洲⁴ 杨小聪¹

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 矿冶集团创新方法工作室, 北京 100160;

3. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016;

4. 北京北矿智能科技有限公司, 北京 100160)

摘 要: 针对矿用三维激光扫描测量系统中支撑系统由于长度过长, 导致在自身重量作用下引起构件变形, 进而影响构件的整体强度和正常使用; 同时扫描主机在工作状态下的转动会传递至相关构件, 进而对测量精度产生影响的问题。运用 TRIZ 理论中的功能分析、因果分析、三轴分析、矛盾分析、40 个发明原理、分离原理、物场模型和 76 个标准解等探索矿用三维激光扫描测量系统中支撑系统的若干解决方案。经过方案评估, 最终选择了 4 个可靠有效的解决方案, 为三维激光扫描技术在金属矿山采空区测量的应用提供高可靠性解决方案。

关键词: TRIZ; 三维激光扫描测量; 强度

中图分类号: TD41

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2023)03-0101-07

Optimization design of mining 3D laser scanning measurement system based on TRIZ

QIAO Sha^{1,2,3} LU Shuo-shi^{1,2} LIU Guan-zhou⁴ YANG Xiao-cong¹

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. BGRIMM Innovation Method Studio, Beijing 100160, China;

3. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

4. Mining Engineering Institute of BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: The support system in the mining 3D laser scanning measurement system, due to its long length, causes component deformation under its own weight, thereby affecting the overall strength and normal use of the component. At the same time, the rotation of the scanning host in working state will be transmitted to the relevant components, which will affect the measurement accuracy. In this paper, functional analysis, causal analysis, triaxial analysis, contradiction analysis, 40 invention principles, separation principles, field models and 76 standard solutions in TRIZ theory are used to explore several solutions for the support system in the three-dimensional laser scanning measurement system for mining. After scheme evaluation, four reliable and effective solutions were ultimately selected, providing a highly reliable solution for the application of 3D laser scanning technology in metal mine goaf measurement.

Key words: TRIZ; three-dimensional laser scanning measurement; strength

收稿日期: 2023-05-18

基金项目: 创新方法工作专项(2020IM020300, 2017IM060200)

第一作者: 乔莎, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为“灰色系统理论”、“TRIZ 理论”和“复杂装备研制管理”等。E-mail: qiaosha@bgrimm.com

通信作者: 卢烁十, 博士, 正高级工程师; E-mail: lushuoshi@bgrimm.com

在矿山井下作业中,由于井下操作空间狭小,且高温、高湿、高尘,环境恶劣,工作人员无法进入也不宜进入采空区,使用传统的监测手段根本无法实施测量。从近几年的研究结果来看,采用三维激光扫描测量系统进行三维探测获取采空区的精确形态,是目前来说较为先进和有效的方法。通过三维激光扫描测量,获取高精度的井下三维空间信息,对于采矿作业的矿山采空区调查与安全分析、采矿溜井及井巷工程治理、超爆欠爆评价、井巷工程及采场验收、矿石资源的损失贫化分析、保有资源计算、矿山工程数字化建设等具有十分重要的意义^[1]。

矿冶科技集团有限公司针对国内矿山的实际需求和应用条件研制出适用于矿山采空区、巷道、溜井等工况环境的矿用三维激光扫描测量系统,该系统可快速有效地获取空间三维形态,为后续矿山采矿设计及具体安全处理措施提供直观、准确的数据基础^[2]。矿用三维激光扫描测量系统的测量方法是在矿山采空区、巷道、溜井内,通过将一套延长杆系统连接到三维激光扫描测量系统上,再将仪器伸入采空区进行测量。但是该方法存在延长杆长度长、体积大、重量大、不易携带等问题,无法通过飞机、小车或矿井电梯运输。由于长度过长,延长杆的变形大,整体强度变弱,前端扫描主机在工作状态下,由于转动过程产生振动传递效应,进而对测量精度产生影响。针对上述问题,本文借助 TRIZ 理论相关方法,对矿冶科技集团有限公司研发的矿用三维激光扫描测量系统中支撑系统进行优化,为三维激光扫描技术在金属矿山采空区测量中的应用提供了高效可靠的解决方案。

1 问题描述及分析

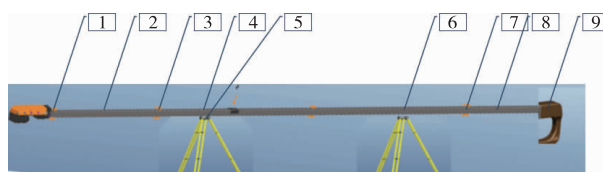
1.1 当前系统功能及组成

功能:测量采空区三维形态,满足矿山数字建模需求^[3]。组成:扫描主机(三维激光扫描头)、控制器、三脚支架、延长杆等,如图 1 所示。其中三脚支撑架、延长杆和连接件等构成扫描测量系统的支撑系统,如图 2 所示。



图 1 原矿用三维激光扫描测量系统

Fig. 1 Original 3D laser scanning measurement system for mining



1—前端连接件; 2—前端延长杆; 3—中端连接件;
4—中端延长杆; 5—前端三脚架; 6—后端三脚架;
7—后端连接件; 8—后端延长杆; 9—配重装置

图 2 原矿用三维激光扫描测量系统中支撑系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the support system in the original 3D laser scanning measurement system for mining

1.2 当前系统工作原理

三维激光扫描头通过支撑系统运输到扫描空区,最后到达指定扫描点,支撑和固定扫描主机完成扫描作业,其工作状态如图 3 所示。



图 3 原矿用三维激光扫描测量系统中支撑系统工作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the support system in the original 3D laser scanning measurement system for mining

1.3 当前系统主要问题

原测量系统很大程度上实现了采空区的精确探测，但是该系统中存在延长杆长度长、体积大、重量大、不易携带等问题，无法通过飞机、小车或矿井电梯运输。由于长度过长，延长杆的变形大，整体强度变弱，前端扫描主机在工作状态下，因转动产生振动传递效应，进而对测量精度产生影响。

2 使用 TRIZ 工具分析

2.1 TRIZ 理论

TRIZ 理论是由前苏联发明家根里奇·阿奇舒勒提出的一种解决发明问题的方法。该理论引导发明者通过发明原理创造性地解决问题，提高研究开发的效率^[4-6]。TRIZ 是一套系统的、完善的、科学的、可复制的、有规律可循的理论方法，可帮我们总结归纳出发明问题背后的普遍规律，进而指导广大工程技术人员更加快速有效地寻求解决方案^[7]。运用 TRIZ 理论方法对系统进行功能分析，有助于厘清和加深我们对系统的理解并找出其核心问题所在^[8,9]。通过功能分析，明确功能对象，掌握组成部分的各种功能，明确各项功能之间的相互作用关系^[10-12]。

2.2 功能模型分析

我们运用 TRIZ 语言描述这一问题，建立该系统的功能模型，如图 4 所示。对整个矿用三维激光扫描测量系统进行组件分析，该技术系统包括了前端延长杆、中端延长杆、后端延长杆、前端连接件、中端连接件、后端连接件、前端三脚架、配重装置和扫描主机，其中，超系统组件包括了地貌和人(图 4)。

由图 4 可知，通过对系统进行功能分析，可得出各组件之间的利害关系，对其中不足作用及有害作用进行分析，可总结出以下四点问题：

- 1) 扫描主机自扫描过程对延长杆系统支撑功能有害(会引起振动)；
- 2) 三脚架对延长杆支撑功能不足；
- 3) 配重对延长杆施加压力不足；
- 4) 操作者对延长杆施加压力不足。

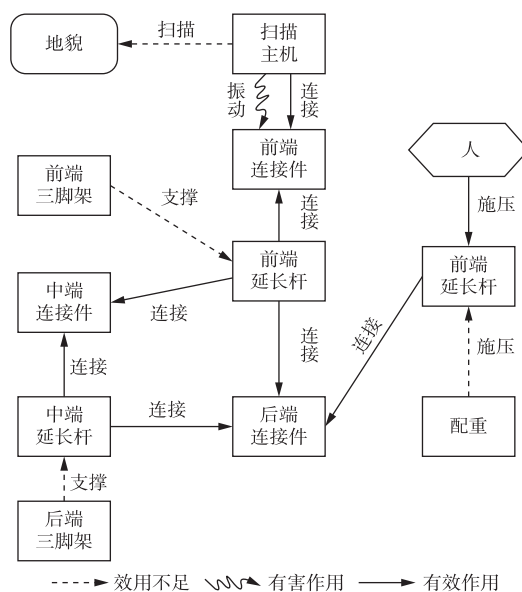


图 4 原矿用三维激光扫描测量系统功能模型分析图

Fig. 4 Functional model analysis of the original 3D laser scanning measurement system for mining

3 运用 TRIZ 工具解决

3.1 三轴分析

三轴分析包括系统轴、因果轴、操作轴三个轴，任何一个技术系统都可以从这三个纬度进行更加深入的分析，寻求新的解决问题的入手点和途径，防止只解决“表象问题”而导致问题再次发生。针对该系统存在的问题，运用三轴分析和求解过程产生求解方案。

3.1.1 三轴分析—因果分析

针对矿用三维激光扫描测量系统工作过程中前端扫描主机由于转动产生振动传递效应，进而对测量精度产生影响的问题，运用因果分析法分析测量系统中存在该问题的根源，深层剖析影响扫描主机测量精度的根本原因，绘制因果分析图解，如图 5 所示。

由图 5 可知，造成扫描主机测量精度不足的根本原因有三个，分别是：

- 1) 连接件加工缺陷，可以“连接件”的结构为入手点解决问题；
- 2) 结构设计不合理，可以“延长杆系统”的改进为入手点解决问题；

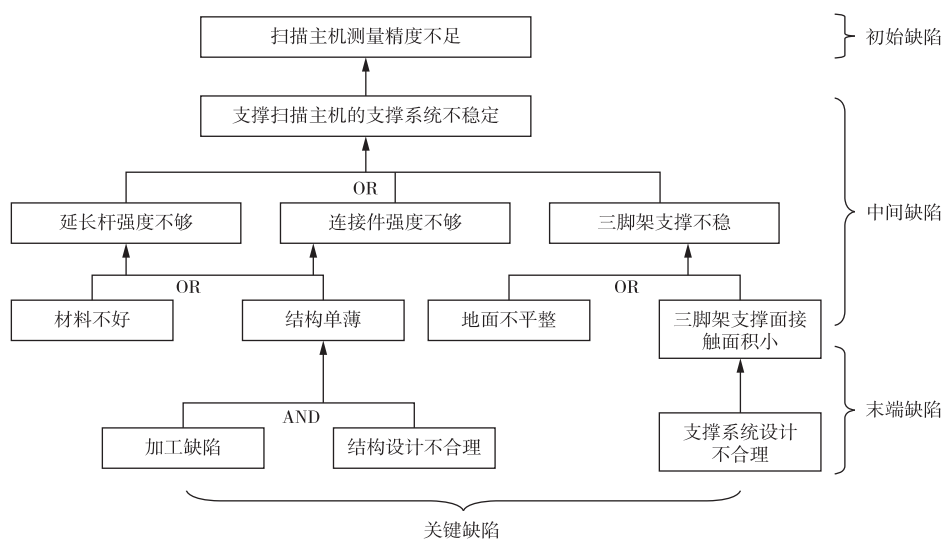


图5 系统存在问题的因果分析

Fig. 5 Causal analysis of system problems

3)三脚架设计不合理，可以“三脚架”支撑作用的改进为入手点解决问题。

同时，产生三种解决方案，具体为：

方案Ⅰ：采用不锈钢、钛合金等轻质高强度材料；

方案Ⅱ：结构上采用更加优化的横截比，以获得更高强度；

方案Ⅲ：增加支撑系统，减少操作过程中由于振动影响稳定性和扫描精度的问题。

3.1.2 三轴分析—操作分析

针对矿用三维激光扫描测量系统工作过程中前端扫描主机由于转动产生振动传递效应，进而对测量精度产生影响的问题，从操作轴出发进行分析，通过三轴分析，可产生三种解决方案，如图6所示。具体为：

方案Ⅳ：延长杆系统制作加工成套筒模式，最大程度减少装配空间，方便快速安装与携带；

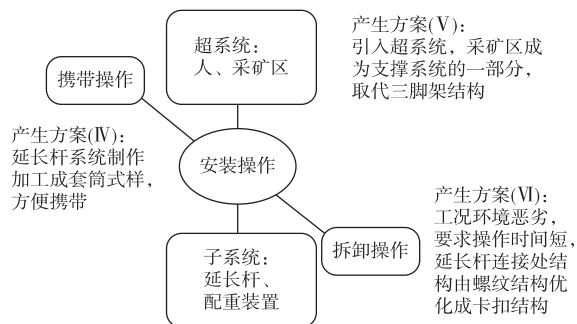


图6 三轴分析和求解过程

Fig. 6 Triaxial analysis and solution process

方案Ⅴ：引入超系统，使矿山采矿区成为支撑

系统的一部分，从而替代三脚架结构的支撑功能；

方案Ⅵ：鉴于工况环境恶劣，延长杆连接处结构由螺纹结构优化成卡扣结构，最大程度减少操作时间。

3.2 矛盾分析

3.2.1 技术矛盾

技术矛盾，就是用已知方法改善技术系统的某一部分(或某一参数)，但又不允许其他部分(或其他参数)恶化^[13]。任何一个技术系统都关联着两个系统，在其上面有一个高级系统，在其下面有一个从属系统，在技术系统中所发生的任何变化都将影响其上、下两个系统。为了保证矿用三维激光扫描测量系统的扫描精度，则需要增加延长杆的强度，在延长杆的材料不变的情况下，杆体厚度增加导致延长杆重量增加、不便携带，这就构成了系统中的技术矛盾。此时改善的工程参数为延长杆的强度，而恶化的工程参数为静止物体的重量，通过查找矛盾矩阵发现，适合解决该技术矛盾发明原理为分割原理、复制原理、廉价替代品原理和复合材料原理，根据这几种原理，产生了如下三种解决方案：

方案Ⅶ：利用分割原理，将10 m整套延长杆系统分割成10个1 m便于携带的延长杆系统，便于交通运输；

方案Ⅷ：利用廉价替代品原理，现场进行取材；

方案Ⅸ：利用复合材料原理，采用复合材料代替均质材料，连接处采用复合材料，提高连接强度。

3.2.2 物理矛盾

物理矛盾是向技术系统的同一部分同时提出两

个相互矛盾的要求，两种截然不同的需求 A 和非 A，制约一个参数 P 的矛盾^[14]，并且同一个参数具有相反并合乎情理的需求^[15]。通过技术矛盾分析也可以发现，延长杆的材料不变的情况下，为了保障延长杆的强度，其厚度要大，但是为了防止厚度增加造成的重量增加，其厚度又要小，这就构成了一对明显的物理矛盾。根据物理矛盾分离的几种方法，从系统级别分离产生了方案 X，即在可伸缩支撑前伸三脚架这个系统上，延长杆的材料不变的情况下，杆体的厚度要大，在延长杆主体杆体这个系统上，杆体的厚度要小，达到高强度轻质便携结构组合体。

3.3 物场分析

物场分析法是一种与现有技术系统相关联的问题建模方法，由物场分析法构建的每个系统都是为了完成特定的功能要求而存在，具体的功能描述为，S1 和 S2 代表了某种物体或物质，其中，S2 代表了工具物质，S1 代表了对象物质，F 代表了某种场，S2 在 F 作用下引发了 S1 的输出结果，而 F 是 S1 和 S2 之间的相互作用力。在基本的物场模型中，S1、S2、F 这三种元素缺一不可，并且 S2 通过场 F 对 S1 的作用分为三种基本类型，分别为效用不足、有害作用、有效作用。其中，效用不足代表了 S2 通过场 F 对 S1 的作用有用但不充分，未能达到预期效果；有害作用代表了 S2 通过场 F

对 S1 产生了有害作用，达到了负面效果；有效作用代表了 S2 通过场 F 对 S1 的作用有用且充分，达到了理想效果。基本的物场模型，如图 7 所示。应用物场分析法解决问题时，首先要确定问题中的 S1、S2 和 F，然后分析三者之间的相互作用关系，并构建起物场模型，通过查找 76 个标准解中与之相对应的标准解，将标准解联系实际问题，最终确定问题的解决方案^[16]。

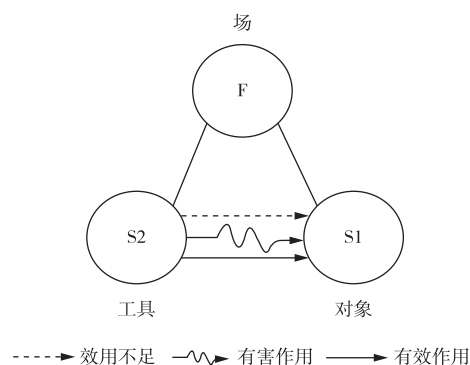


图 7 基本的物场模型

Fig. 7 Basic material field model

由图 4 可知，在正常工作时，扫描主机和延长杆系统固定在一起，扫描主机在旋转扫描的过程中，同时，也将振动传给了延长杆系统，引起延长杆系统的振动。针对扫描主机与前段连接件之间振动的问题，构建物场模型，并对其进行优化，如图 8 所示。

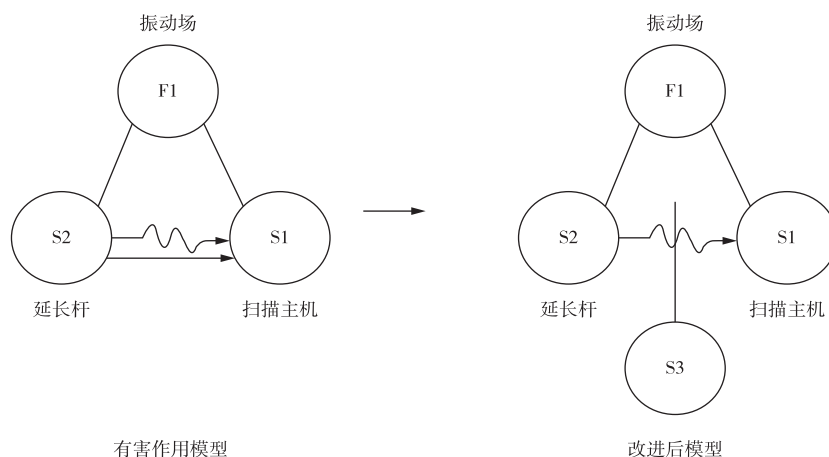


图 8 物场模型及其优化

Fig. 8 Material field model and optimization

由图 8 可知，改进后的模型通过应用标准解法引入 S3，来消除有害作用。由此得出方案 XI，即在系统中引入系统组件——自支撑系统。在延长杆支撑扫描主机完成扫描测量功能中，增加延长杆强

度，减少振动带来的测量误差。

4 方案评价

通过使用 TRIZ 理论方法，拓展了我们解决工

程实际问题的思维,针对矿用三维激光扫描测量系统存在的相关问题,寻找到了11种可能的备选解决方案,为了从中选出综合性可行的解决方案,我们分别从强度、重量、可操作性、成本等4个方面

进行了方案评估,评估结果见表1。

由表1可知,方案I、II、VI、VII的综合得分较高。基于方案I、II、VI、VII,优化改进后的支撑系统实物图,如图9所示。

表1 方案评估

Table 1 Scheme evaluation

方案	备选方案	强度 (满分40分)	重量 (满分30分)	操作 (满分15分)	成本 (满分15分)	方案评价 (满分100分)
I	采用不锈钢、钛合金材料	35	25	10	10	80
II	结构上采用最优的横截比	40	25	10	10	85
III	增加支撑系统	40	10	5	5	60
IV	延长杆系统加工成套筒式样	25	25	10	10	70
V	让采矿环境成为支撑系统的一部分	30	20	10	5	65
VI	连接处结构由螺纹结构优化成卡扣结构	35	20	15	10	80
VII	分割成单杆件	30	20	10	10	80
VIII	现场取材	25	0	15	15	55
IX	复合材料代替均质材料	30	25	10	5	70
X	不同部位不同厚度组合	35	20	10	5	70
XI	加入系统组件	35	15	10	5	65



图9 优化改进后的支撑系统实物图

Fig. 9 Optimized and improved extension rod system structure

5 结论

针对矿冶科技集团有限公司研发的矿用三维激光扫描测量系统实际工程应用中存在的延长杆长度长、体积大、重量大、不易携带等问题,可运用TRIZ理论方法中的功能分析、因果分析、三轴分析、矛盾分析、40个发明原理、分离原理、物场模型和76个标准解等探索矿用三维扫描测量系统中支撑系统优化的解决方案。结果可为三维激光扫描技术在金属矿山采空区测量的应用提供高可靠性解决方案。

参考文献

- [1] 陈凯,张达,张元生. 三维激光扫描点云数据盲区边界识别与应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(5): 6-9.
CHEN K, ZHANG D, ZHNG Y S. Blind aven recognition and application for point cloud data of 3D laser scanner [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(5): 6-9.
- [2] 陈凯,杨小聪,张达. 矿用三维激光扫描测量系统测量精度提升与应用[J]. 矿冶, 2019, 28(6): 73-77.
CHEN K, YANG X C, ZHANG D. The measurement

accuracy promotion and application of 3D laser scanner for mine[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(6): 73-77.

- [3] 余乐文,张达,陆得盛,等. 矿用三维激光扫描仪关键技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(4): 71-74.
YU L W, ZHANG D, LU D S, et al. Study on the key technologies of 3D laser scanner for mining[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(4): 71-74.
- [4] 张魏,张强,杨悦欣. TRIZ理论综述及在轻工装备领域研究展望任工昌[J]. 包装工程, 2019(7): 156-161.
ZHANG W, ZHANG Q, YANG Y X. Summary of TRIZ theory and research prospect in light industry equipment [J]. Packaging Engineering, 2019 (7): 156-161.
- [5] 杨鑫超,张玉,杨伟超. TRIZ在高价值专利培育工作中的创新应用研究[J]. 情报杂志, 2020(7): 54-58, 86.
YANG X C, ZHANG Y, YANG W C. Research on the innovative application of TRIZ in the cultivation of high value patent [J]. Journal of Intelligence, 2020(7): 54-58, 86.
- [6] 于娜,陈文鑫,强峰,等. 基于TRIZ理论的电饭煲防虫设计[J]. 包装工程, 2020, 41(2): 225-230.

- YU N, CHEN W X, QIANG F, et al. Insect-prevention design of rice cooker based on TRIZ theory [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(2): 225-230.
- [7] 王旭, 卢烁十, 夏晓鸥, 等. 基于 TRIZ 的惯性圆锥破碎机创新设计[J]. 矿冶, 2021, 30(2): 138-144.
- WANG X, LU S S, XIA X O, et al. Innovative design of inertia cone crusher based on TRIZ [J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(2): 138-144.
- [8] 王旭, 夏晓鸥, 罗秀建, 等. TRIZ 理论在矿物加工行业中的应用与发展[J]. 中国矿业, 2020, 29(增刊 2): 356-360, 367.
- WANG X, XIA X O, LUO X J, et al. Application and development of TRIZ theory in mineral processing industry [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Sup. 2): 356-360, 367.
- [9] 周永清, 高辉松, 章永年, 等. 基于 TRIZ 和 TOC 的矿用猴车坐具创新设计[J]. 矿冶, 2023, 32(2): 150-157.
- ZHOU Y Q, GAO H S, ZHANG Y N, et al. Innovative design of the seat for mining monkey car based on TRIZ and TOC [J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(2): 150-157.
- [10] 郝雪君, 邓援超, 辛军炜. 基于 TRIZ 理论围框机铲边成型装置的创新设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(2): 10-15.
- HAO X J, DENG Y C, XIN J Y. Innovative design of shovel edge forming device of frame machine based on TRIZ theory [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(2): 10-15.
- [11] 王伟, 李昕迪, 聂子丰. 基于 TRIZ 理论的农机自动装载跟随系统创新设计[J]. 机械设计, 2022, 39(2): 101-106.
- WANG W, LI X D, NIE Z F. Innovative design of agricultural machinery's automatic loading and following system based on TRIZ theory [J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(2): 101-106.
- [12] 张伟, 徐锋, 刘永睿, 于福龙. 利用 TRIZ 创新方法提高轨道巡检机器人矿山应用的适应性[J]. 创新创业理论与实践, 2023, 6(2): 171-174, 187.
- ZHANG W, XU F, LIU Y R, et al. Using TRIZ innovation method to improve the adaptability of track inspection robot in mine application [J]. The Theory and Practice of Innovation and Entrepreneurship, 2023(2): 171-174, 187.
- [13] 根里奇·阿奇疏勒. 创造是一门精密的科学[M]. 1979, 吴光威, 刘树兰, 译. 北京: 航空航天大学出版社. 1990: 1.
- GENLIQI A. Creation is a precise science [M]. WU G W, LIU S L, translated. Beijing: Beihang University Press, 1990.
- [14] 赵敏, 张武城, 王冠殊. TRIZ 进阶及实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- ZHAO M, ZHANG W C, WANG G Z. TRIZ advanced and actual combat [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2016.
- [15] 孙永伟. TRIZ—打开创新之门的金钥匙(之四)[J]. 家电科技, 2013(7): 20-21.
- SUN Y W. TRIZ-the golden key to open the door of innovation (IV) [J]. China Appliance Technology, 2013(7): 20-21.
- [16] 文宗川, 张树山. 基于物场分析的城市创新投入研究[J]. 商业经济研究, 2017(5): 123-125.
- WEN Z C, ZHANG S S. Research on urban innovation investment based on physical field analysis [J]. Journal of Commercial Economics, 2017(5): 123-125.

(编辑: 王爱平)