基于 TRIZ 的移动机器人行走机构创新设计

袁爱军[1], 周朋飞[2]

(1. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;
2. 内蒙古机电职业技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘 要: 移动机器人在多种复杂地形环境的广泛应用, 对行走机构的移动速度和复杂地形通过能力提出了更高的要求。文章通过对轮式行走机构的优缺点进行分析, 以轮式行走机构为原型系统, 利用现代 TRIZ 理论体系中的功能分析工具确定了组件间存在的相互作用及问题所在, 利用因果链分析工具确定了关键问题。通过最终理想解、裁剪、物 - 场模型、物理矛盾、技术矛盾等工具结合发明原理解决了以上问题, 得到了 10 个概念方案。最后确定可变形轮胎方案为最佳技术方案, 并进行了建模设计。

关键词: TRIZ; 移动机器人; 行走机构; 可变形轮胎
中图分类号: TH22 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2026)01 - 0073 - 06

Innovation Design of Travelling Mechanism for Mobile Robot Based on TRIZ

Yuan Aijun[1], *Zhou Pengfei*[2]

(1. *School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot* 010051, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Technical College of Mechanics & Electrics, Hohhot* 010070, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The mobile robot is widely applied in various complicated terrain environments, so the requirements of travelling speed and capacity of passing complicated terrain for travelling mechanism are higher. In the paper, the interactions and problems existing between components are determined with function analysis tool as well as the key problems are determined with causal chain analysis tool in modern TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) theory system by taking wheeled travelling mechanism as the prototype system as well as analyzing its advantages and disadvantages. The above problems are solved and 10 conceptual proposals are obtained through combining such tools as ideal final result, cropping, substance - field model, physical and technical contradictions with inventive principles. Finally, the scheme of deformable tire is determined to be the optimal technical scheme and modeling design is carried out.

Key words: TRIZ; mobile robot; travelling mechanism; deformable tire

收稿日期: 2025 - 03 - 01
基金项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20230114); 内蒙古自治区高等学校青年科技人才发展项目(创新团队)(NMGIRT2306); 内蒙古自治区研究生精品课程建设项目(JP20250395)。
作者简介: 袁爱军(1970 -), 女, 内蒙古呼和浩特市人, 硕士, 副研究员, 现从事创新创业研究工作。

移动机器人作为代替人工在恶劣条件下执行任务的有效手段,在救援、消防、军事、勘探等多个领域得到了广泛的应用,尤其在高原科考、极地科考以及深空探测等领域扮演着重要的角色[1]。移动机器人在砂石、冰雪、台阶、坡面等各种复杂地形环境中的移动行走能力是评价其综合性能的重要方面[2-4]。应用场景最广的轮式行走机构以其移动速度快、效率高、能耗低等优点受到青睐。但其与地面接触面积小,牵引力和地面附着力较小,越障能力和地形适应能力差等缺点限制了轮式行走机构在复杂地形环境中的应用[5-6]。

本文以轮式行走机构为原型系统,以提高轮式行走机构的非结构化环境适应能力为目标,运用发明问题解决理论(TRIZ)和多种 TRIZ 工具对轮式行走机构进行问题识别、分析和解决,创新设计轮式行走机构,大幅提高轮式行走机构的地形适应能力,为开发适应非结构化环境下的新型机器人提供技术支撑。

1 TRIZ 的应用方法

发明问题解决理论(TRIZ)是由前苏联发明家阿利赫舒列尔组建的团队在研究了 250 万份高水平发明专利的基础上,提出的一套具有完整理论体系的创新方法,被誉为创新的"点金术"[7]。在创立初期,该理论体系包含 40 个发明原理、发明问题解决算法(ARIZ)、最终理想解、科学效应库、物 - 场模型、标准解和进化法则等内容,被定义为经典 TRIZ 理论,其主要解题步骤如图 1 所示。当遇到一个用通常方法不能直接找到具体解决办法的问题,先利用工程参数或物 - 场模型分析将待解问题转化为一个标准的 TRIZ 问题,然后再利用 TRIZ 所提供的多种工具进行分析,得到 TRIZ 问题的标准解,最后结合实际条件将 TRIZ 问题的标准解转化为具体问题解[8]。图 2 为现代 TRIZ 理论解决问题流程。

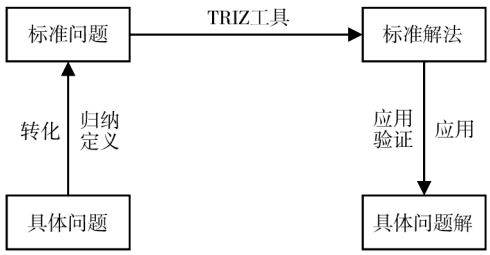


图 1 经典 TRIZ 理论解决问题流程

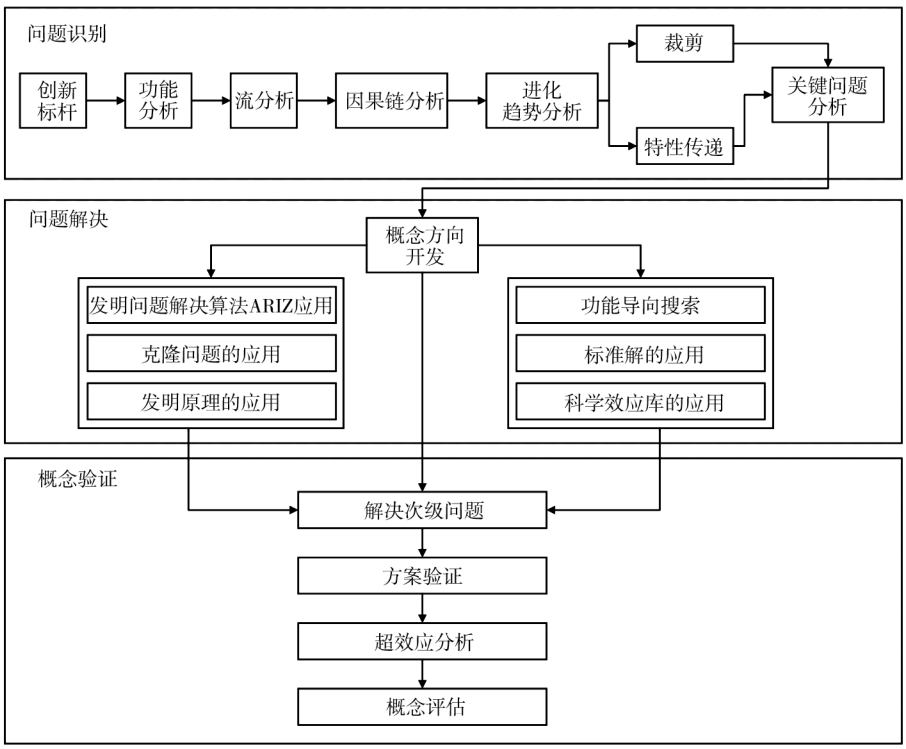


图 2 现代 TRIZ 理论解决问题流程

随着 TRIZ 研究的不断深入，该理论在分析问题、解决问题及商业化应用等方面得到了长足发展，逐渐构成了现代 TRIZ 理论体系。现代 TRIZ 理论作为一个创新理论体系，能够应用在工程技术、专利规避及布局、产品规划布局等多个领域。虽然应用领域不同，但其应用步骤大体可以分为问题识别、问题解决和概念验证三个步骤，在三个步骤中分别有不同的操作工具，如图 2 所示。

1.1　问题识别

问题识别作为现代 TRIZ 理论的第一个步骤，主要侧重于对工程系统进行全面分析，通过一系列工具进行问题识别，从而得到 TRIZ 问题[7-8]。在问题识别阶段，TRIZ 提供的识别工具主要有创新标杆、功能分析、流分析、因果链分析、进化趋势分析、裁剪、特性传递和关键问题分析等。问题识别阶段输出的是关键问题，为下一个步骤“问题解决”提供系统解决问题的入手点以解决系统存在的问题。

1.2　问题解决

问题解决阶段的应用工具主要有功能导向搜索、克隆问题、算法（ARIZ）、发明原理、标准解和科学效应库等。其中功能导向搜索、克隆问题、标准解和科学效应库的解题思路均是从现有的成熟技术领域寻找解决方案，转化为针对识别问题的解决方案。发明原理则是将关键问题转化为技术矛盾或者物理矛盾模型，利用矛盾矩阵中建议的 40 个发明原理，在其启发下产生解决方案。以上工具在使用中没有先后顺序，每一种工具都有可能得到解决方案[9]。问题解决阶段输出多个技术方案（或称之为创意）。

1.3　概念验证

概念验证阶段对问题解决阶段的多个输出方案进行可行性评估，评估标准包括技术实施的难易程度、制造成本、投资成本等。本阶段的分析工具主要有超效应分析和概念评估。最终评估后的概念验证输出唯一技术方案[10]。

2　移动机器人的轮式行走机构原型系统

如图 3 所示，移动机器人轮式行走机构主要包括电机、轮毂、轮胎、安装座和连接轴等零部件，机器人车体通过悬架与行走机构连接。每个车轮的转动通过独立电机进行驱动。当机器人移动时，电机驱动连接轴，连接轴带动轮毂和轮胎旋转，轮胎直接接触地面，在机器人的整体重力作用下与地面产生摩擦力，从而带动机器人移动。

轮式行走机构在平坦路面行走具有较高的移动速度，但在复杂地形环境下的适应能力较差，主要表现：①在冰面和雪地易出现打滑现象，即摩擦力不足；②在台阶和陡坡出现无法逾越的现象，即越障能力不足。

为解决以上两个问题，通常采取以下手段。

（1）在通过冰面或雪地等光滑路面时，在轮胎外部加装防滑链，增加轮胎与地面的摩擦力，提高移动速度。但是方案实施需驻车后通过人员操作，安装过程较为繁琐，不但增加了操作人员的劳动强度，而且耗时较长。

（2）当出现越障困难时，通过加装脱困板或者填补障碍空间的方法降低路面的越障难度，以帮助机器人顺利通行。本方案缺点是劳动强度大，且对外界环境条件有一定的要求，不易实施。

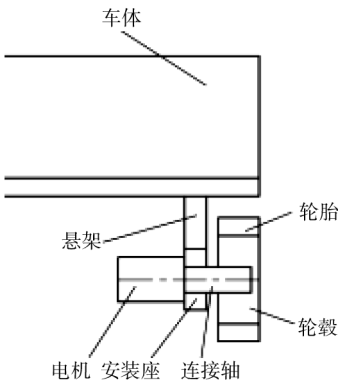


图 3　轮式行走机构原型系统

3　基于 TRIZ 的轮式行走机构创新设计方案

3.1　问题识别

3.1.1　建立功能模型

在进行轮式行走机构问题识别前，需对其原型系统中的各组件进行系统分析，包括组件分析、相互作用分析和功能建模等功能分析。

如表 1 所示，通过组件分析确定原型系统中的 6 个组件和 1 个超系统组件，为下一步的相互作用分析奠定基础。

表 1　组件分析结果

工程系统	组件	超系统组件
轮式行走机构	悬架	车体
	安装座	
	电机	
	连接轴	地面
	轮毂	
	轮胎	

相互作用分析是为了进一步确定发生接触的两个组件之间存在相互作用，即存在力的关系。在分析过程中明确作用的性质，包括有害作用、作用不足、过度作用以及充分作用。在此基础上，建立功能模型图。轮式行走机构原型系统的功能模型如图 4 所示，有害作用以波浪线表示，作用不足用虚线表示，过度作用以粗实线表示，充分作用用细实线表示。由图 4 可知，原型系统存在悬架对安装座具有过度作用，地面对轮胎移动具有阻碍作用等问题。

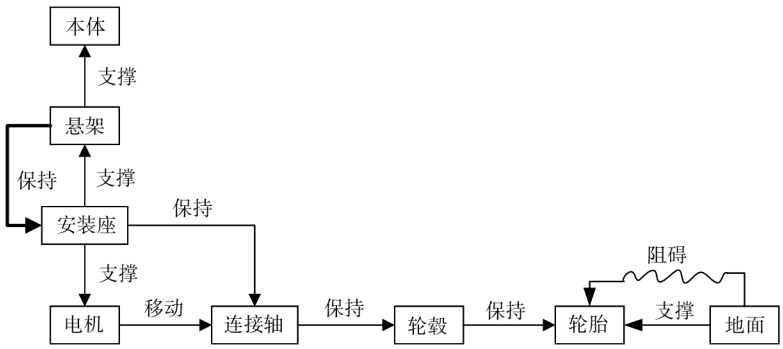


图 4 轮式行走机构原型系统功能模型

3.1.2 因果链分析

针对轮式行走机构“复杂地形适应能力差”的问题进行因果链分析，如图 5 所示。由图 5 可知，“胎压高”、“轮胎宽度窄”以及“连接轴与轮毂刚性连接”为轮式行走机构在复杂地形适应性差的关键问题点。

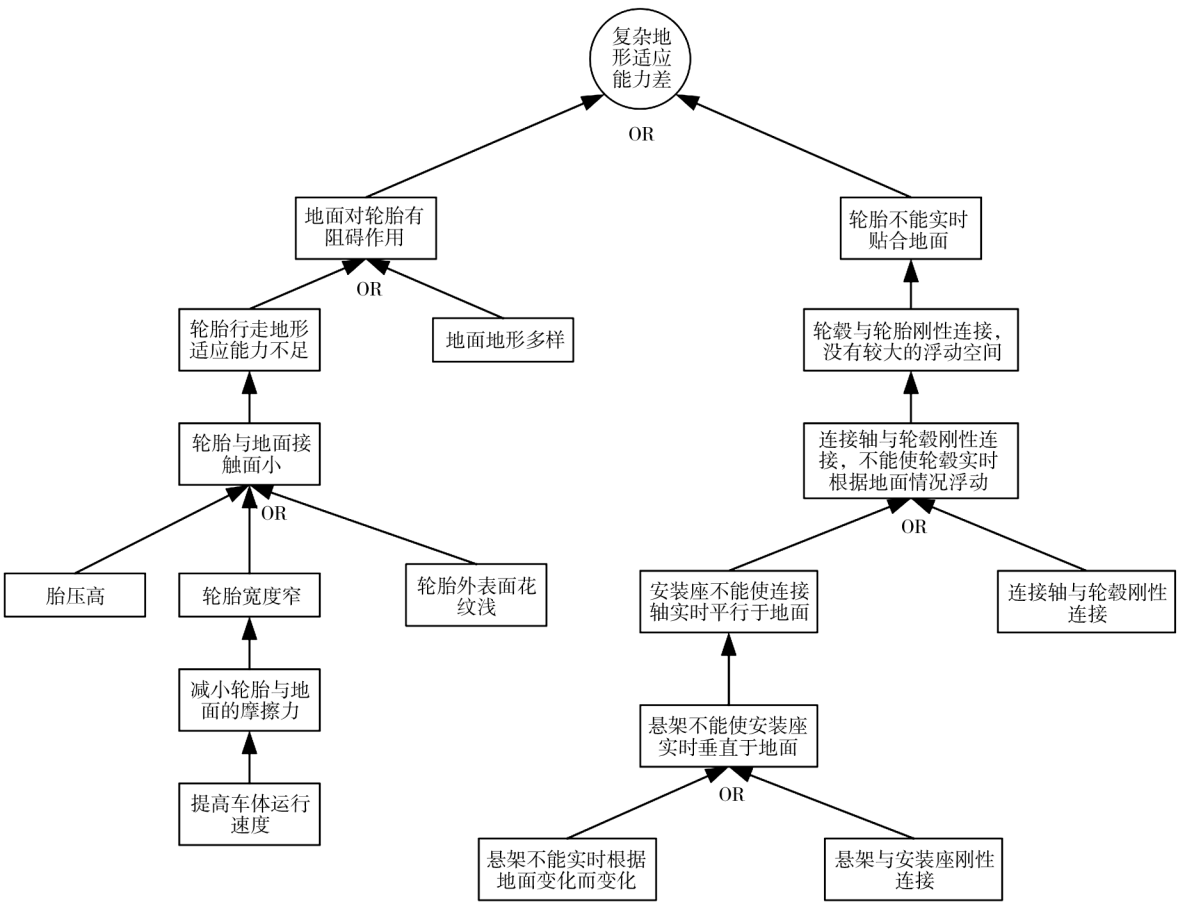


图 5 轮式行走机构原型系统因果链示意图

3.2　问题求解

3.2.1　利用裁剪工具分析求解

轮毂支撑轮胎，轮胎与地面接触，因此地面支撑轮毂。由轮式行走机构原型系统功能模型可知“地面对轮胎移动的阻碍是有害作用”，根据裁剪规则 B“如果有用功能的对象自己可以执行这个有用功，那么功能的载体是可以被裁掉的”，裁剪轮胎能够消除这一有害作用，故选择轮胎为裁剪组件。将轮胎接触地面的功能分配给轮毂，生成概念方案 1：将轮毂与橡胶注塑成为一体式轮胎，内外圈通过钢板进行连接，这样保证其具有一定的缓冲性能以及与地面较大的接触面积，内部的轮毂具有一定的刚性，外部为带花纹的橡胶，直接与地面接触，如图 6 所示。



图 6　一体式轮胎

3.2.2　利用物 - 场模型分析求解

由轮式行走机构原型系统功能模型可知“悬架过度保持安装座”，视为有害作用，如图 7(a)所示。根据“第 1 类标准解——建立和拆解物场模型”的“第 1.2 类标准解——拆解物场模型[11]，在两物质之间引入任一物质”，得到概念方案 2：在悬架与安装座之间引入“关节轴承”。基于自身结构特点，关节轴承连接悬架与安装座，能够实现安装座的倾斜运动和摆动，保证了轮胎与地面实时紧密接触，如图 7(b)所示。

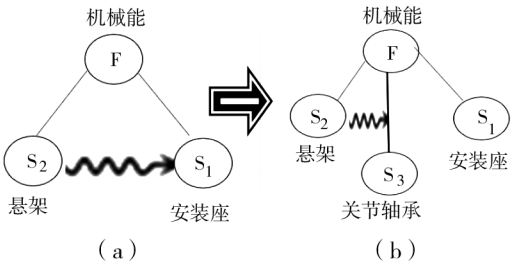


图 7　悬架与安装座的物 - 场模型

3.2.3　利用物理矛盾分析求解

轮胎在平坦或崎岖路面通行能力有差别。轮胎在平坦路面上移动，移动速度快；轮胎在砂石等崎岖路面上行驶，通行能力差，移动速度慢。针对因果链分析获知的关键问题之一“胎压高”，通过物理矛盾分析求解：轮胎在平坦路面上移动，胎压要高，可减小与路面接触面积，有利于提高移动速度；轮胎在砂石路面上行驶，则胎压要低，能增大与路面的接触面积，提高抓地能力，有助于提高通行能力。

基于上述物理矛盾选择“空间分离”解决原理。“空间分离”原理对应的是分割、抽取、局部质量、嵌套、非对称、空间维数变化等 6 个发明原理。

根据“分割”原理生成概念方案 3：胎面设计为不连续的齿型轮胎，如图 8 所示。当在平坦路面上行驶时，胎面突出部分与地面接触，行驶速度快；当在凹凸不平的砂石路上移动时，胎面凹陷部分参与地面接触，增大了接触面积，提高了通行能力。

根据“局部质量”原理生成概念方案 4：在轮胎内部加装加热装置或气泵，根据路面情况自动调整轮胎气压。

根据“非对称”原理生成概念方案 5：将轮胎表面设计为凹凸不平的形状，形似顶针，如图 9 所示。在平坦路面行驶时，其与地面接触面积小；在砂石路上行驶时，其与地面接触面积大。



图 8　齿型轮胎

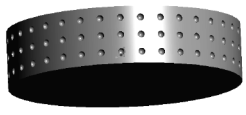


图 9　顶针型轮胎

3.2.4　利用技术矛盾分析求解

针对因果链分析获知的关键问题之一“轮胎宽度窄”，利用技术矛盾方式进行分析，结果如表 2 所示。

表2 技术矛盾分析结果

	技术矛盾-1	技术矛盾-2
如果	增加轮胎的宽度	减小轮胎的宽度
那么	对复杂地形适应能力提高	对复杂地形适应能力降低
但是	车体移动速度降低	车体移动速度提高

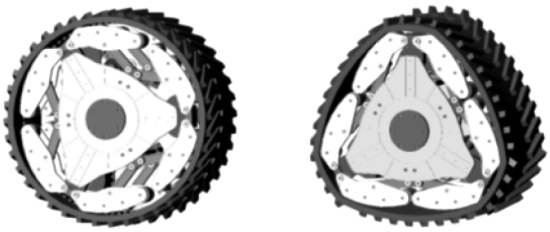
通过分析,可以确定存在的矛盾就是若改善轮胎“复杂地形适应能力”,则恶化了“车体的移动速度”。通过阿奇舒勒39个通用工程参数的一般化处理,改善的参数为“适应性及多样性”,被恶化的参数为“速度”。根据阿奇舒勒矛盾矩阵,确定可使用的发明原理为35—物理或化学状态改变、10—预先作用和14—曲面化,由此提出解决技术矛盾的解决方案,如表3所示。

表3 解决方案

序号	发明原理	概念方案
1	35—物理或化学状态改变	概念方案6:轮胎胎面柔性部分改变,遇到石头等硬物产生凹陷变形,增大接触面积。 概念方案7:设计可转换构造的轮式履带,可自由切换圆形、三角形。圆形结构适用于平坦路面;三角形履带适用于复杂路况。
2	10—预先作用	概念方案8:设计中间窄、两侧宽并具有一定斜度的异形轮胎。在平坦路面时中间窄的部分优先触地;遇复杂路况时轮胎两侧也参与触地。 概念方案9:在轮胎的前方和侧方安装与轮胎不在同一水平线上的辅助轮,遇复杂路况参与触地。
3	14—曲面化	概念方案10:根据路况可调整轮胎表面花纹深浅、胎面宽窄程度。

4 技术方案优选

机器人移动能力的评价,要求在平坦路面行走具有一定的移动速度,遇砂石、冰雪、坡道等复杂路况应具备稳定顺畅的通行能力。针对通过裁剪工具、物-场模型、物理矛盾和技术矛盾分析求解得到的10个概念方案,综合对比技术可行性、成本、性能、环境适应性等多方面因素,选定概念方案7为最优技术解决方案,如图10所示。方案7是在轮式行走机构的基础上创新设计,将其演变成为可变换形状的轮式履带,能够在圆形和三角形之间自由切换,在平坦路面以圆形滚动方式行走,能够实现最大行进速度;在复杂路面以三角形履带滚动方式行走,这种方式增大了轮胎与地面的接触面积,具备行进平稳、越障能力强的特点。



(a)平坦路面下的圆形构造 (b)复杂路况下的三角形构造

图10 可变换形状的轮式履带

5 结束语

利用现代TRIZ理论体系工具对机器人轮式行走机构原型系统进行问题分析、求解和验证,得到了可变形轮式履带的最优技术方案。履带根据路况能在圆形和三角形之间自由切换,彻底解决了移动机器人轮式机构难以通过复杂路面的难题,为提高机器人非结构化环境适应能力提供了新途径。

参 考 文 献

[1] 张元勋,黄靖,韩亮亮. 星表移动探测机器人研究现状综述[J]. 航空学报,2021,42(1):55-72.

[2] Orozco-Magdaleno, Ernesto C. Gomez-Bravo, Fernando, et al. Evaluation of Locomotion Performances for a Mecanum-Wheeled hybrid hexapod robot[J]. Ieee-Asme Transactions on Mechatronics,2021,26(3):1657-1667.

[3] Li Yunwang, Ge Shirong, Dai Sumei, et al. Kinematic modeling of a combined system of multiple mecanum-wheeled robots with velocity compensation[J]. Sensors,2020,20(1):75.

[4] 我国首颗火星探测器天问一号(TW-1)及其研制团队代表[J]. 航天器工程,2020(4):2.

[5] LEVER J H, RAY L E. Revised solar-power budget for Cool Robot polar science campaigns[J]. Cold Regions Science Technology, 2008, 52(2):177-90.

(下转第90页)

矫直难度和能耗,同时有助于减小最终产品的残余应力,全面提高了产品质量的稳定性和一致性。

3 技术应用初步成效

包钢股份轨梁厂冷区集控中心智能化升级项目的成功实施,并非仅仅是技术的堆砌,其最终价值体现在对生产效率、产品质量以及整体运营水平的实质性提高上。通过对项目运行数据的统计分析,本次升级带来的成效显著。应用激光多普勒测长与工业视觉技术后,钢坯长度测量精度由原来的±3 cm提高至±10 mm以内,冷床区域的自动跟踪识别率达到99.5%以上,基本消除了人工核对环节。通过引入AI智能预弯模型后,矫直前的钢轨平直度显著改善,一次矫直合格率从升级前的85%提高至92%,矫直能耗降低了约10%。得益于精准的动态锯切控制,钢轨切损率降低,综合材料利用率提高了0.3%,同时,智能语音报警系统将报警响应时间平均缩短了30%,设备故障停机时间同比下降了15%,有效保障了生产的连续性。

4 结束语

包钢股份轨梁厂冷区智能化升级项目的成功实施,不仅是公司迈向智能制造的坚实一步,也为整个钢铁行业提供了有益的实践与探索。该项目以解决实际生产痛点为出发点,通过系统集成应用新兴电气自动化技术,取得了显著成效。它不仅显著提高了轨梁厂冷区的生产运营水平和核心竞争力,促进新质生产力发展,更重要的是,为包钢在更大范围内推广智能制造积累了宝贵经验,提供了可复制的技术方案。该项目通过将工业视觉、激光测长与AI算法集成于统一的基础自动化与网络平台之上,验证了多源异构技术深度融合对于解决复杂工业场景问题的关键作用。同时,它也提醒我们,智能制造是一个持续迭代、不断优化的过程,会面临传感器稳定性、数据集成、AI适应性及人员接受度等挑战。展望未来,冷区智能化之路将继续深化数据挖掘、数字孪生和与上层系统的融合。

参 考 文 献

[1] 何宁. 智能制造技术在钢铁工业转型升级中的应用[J]. 工程技术研究,2020,5(19):36-37.

[2] 侯爱华,李哲. 钢轨平直度控制关键环节的探讨[J]. 山西冶金,2021,44(6):237-239.

[3] 刘国庆. 冶金电气系统的自动化控制与智能化管理[J]. 冶金与材料,2023,43(10):16-18.

(上接第78页)

[6] RAY L E, LEVER J H, STREETER A D, et al. Design and power management of a solar-powered "Cool Robot" for polar instrument networks[J]. Journal of Field Robotics, 2007,24(7):58-599.

[7] 王军,孙帅. 基于可拓创新法和TRIZ理论的营地手推车折叠机构设计[J]. 图学学报,2021,42(5):866-872.

[8] 付敏,刘威,李萌,等. 基于技术系统进化及物场变换的功能裁剪方法[J/OL]. 计算机集成制造系统:1-23[2021-07-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20210210.1347.019.html.

[9] 王德兰. 基于TRIZ的割草机器人功能设计方法研究[J]. 农机化研究,2022,44(2):74-78,84.

[10] 陈亮,窦昊,魏煌,等. 基于质量功能展开、发明问题解决理论和仿生学的产品创新设计[J]. 中国机械工程,2020,31(11):1285-1295.

[11] 孙永伟,谢尔盖·伊克万科. TRIZ:打开创新之门的金钥匙[M]. 北京:科学出版社,2015.