● 装备技术 Equipment Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.021

轨道式多臂铸件清理机器人的设计与分析

王成军,郝志伟,郭永存,任润润
(安徽理工大学 机械工程学院,安徽 淮南 232001)

摘　要:针对现有铸件清理工作费工费时且需要大量劳动力问题,基于 TRIZ 理论进行系统功能和冲突矩阵分析,结合多用性原理、动态化原理、小人法和拓扑结构设计了一种悬挂轨道式多臂型铸件清理机器人。结果表明,该机器人能够完成铸件清理的所有工序,且其适应性和多用性较好,能够克服现有铸件清理机器人存在的技术缺陷,并为机器人样机制作提供理论依据,为新产品研发提供实时指导。

关键词:铸件清理机器人;TRIZ 理论;悬挂轨道;多臂机器人;变胞结构

中图分类号:TG243　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)01-0081-05

Design and Analysis of Orbital Multi-arm Casting Cleaning Robot

WANG Chengjun, ZHU Zhiwei, GUO Yongcun, REN Runrun
(College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: A kind of orbital multi-arm casting cleaning robot was designed and analyzed by multi-purpose principle, dynamic principle, small man method and topological structure design methods based on the system function analysis and conflict matrix analysis by TRIZ theory. The robot can complete all the processes of casting cleaning, and its adaptability and versatility are good. The results show that the robot can complete all the casting cleaning procedures. It has good adaptability and versatility, and can overcome the technical defects of the existing casting cleaning robot. It also provides theoretical basis for robot prototype production and real-time guidance for new product research and development.

Key words: casting cleaning robot; TRIZ; suspension track; multi-arm robots; cellular structure

随着“中国制造 2025”的提出,中国国内制造业不断升级,各类企业对自动化的要求越来越高,机器换人已经成为推动传统制造业实现产业转型升级的重要举措,具有显著的社会经济效益[1]。在铸件生产过程中,经常需要搬运并调整铸件的姿态,以及完成对铸件的各种清理作业。在生产中不仅要清除型芯和芯铁,还要切除浇口、冒口、增肉、拉筋,以及割筋、飞边、毛刺等金属多余物,清除铸件粘砂和表面异物,对铸件表面进行打磨平整处理[2]。在铸件打磨过程中不仅金属粉尘对操作人员的健康危害大,且手工作业的体力消耗大。目前,大多数铸件的清理工作仍主要依靠手工工具和风冲、风铲、高速手提式砂轮、悬挂砂轮等半机械化工具完成。少数企业尝试采取机器人替代人工作业,采用串联式单臂机器人单机或多机作业,无法满足大质量、大体积和复杂异形铸件的搬运、调姿及清理作业需求[3]。若采用多臂机器人替代单臂机器人则可同时实现铸件的搬运、调姿及清理作业需求,具有很好的市场前景[2]。TRIZ 理论是一种发明问题解决理论,它揭示了创作发明的内在规律和原理,着力于澄清和强调系统中存在的矛盾,然后解决矛盾,从而获得理想解[4]。运用 TRIZ 理论可以帮助发明人或技术工程师对工程问题进行系统分析,快速找到工程问题的本质或关键技术冲突所在,打破思维定式,精准发现工程领域中需要解决的问题,以全新的视角进行产品开发设计,提高问题解决效率,缩短创新周期[5]。本文基于 TRIZ 理论,对铸件清理机器人进行系统功能分析、冲突矩阵分析,结合多用性原理、动态化原理等设计出一种混联且多臂执行部为变胞结构的铸件清理机器人。

1　铸件清理机器人的系统分析

铸件清理工作包括振动落砂、浇注系统切除、边角打磨、孔洞清理和铸件表面抛丸等。尽管一些规模

收稿日期:2018-09-05
基金项目:国家创新方法工作专项(2018IM010500);安徽省科技重大专项项目(16030901012);安徽省自然科学基金面上项目(1708085ME98);淮南市高校创新人才团队专项计划项目(2017A054)
作者简介:王成军(1978-),江苏涟水人,博士,教授.研究方向:智能机械与机器人方面的教学与科研工作.
电话:15155410519,E-mail:cumt1279@163.com

较大的铸造企业拥有码垛机器人，但其针对性较强，一般只用于抓取固定形状的物件，无法一次完成所有工作，采用人工作业费时费力且成本较高。同时，现有的铸件清理机器人大都固定在地面，灵活性较差。根据上述问题，对悬挂轨道式多臂铸件清理机器人进行系统功能分析，如图 1 所示。通过对铸件清理机器人的系统功能分析可知，原系统中的机器人功能单一，工作范围有限，铸件的清理自动化程度低，铸件的清理工作大多依赖人工完成。新系统解决了机器人工作范围小、形式单一和自动化程度低的问题，但同时机器人的结构变得复杂，机器人自身的质量增加。

2　铸件清理机器人的解决方案

2.1　物场模型

(1)问题模型的建立　由系统的功能分析图可知，铸件的清理工作较多，且许多工作都需要人工完成，费时费力，自动化程度低，是一个不完全的场，如图 2 所示。

(2)解决方案　应用一般解法 6，即引入物质 S_3 和另一种场 F_2 来提高有用效应，如图 3 所示。将原有的码垛机器人改为铸件清理机器人，弥补了原机器人功能单一和工作范围小的问题，机器人的工作方式发生变化，从原来的搬运铸件到不仅可以搬运铸件，而且可以完成铸件的清理工作。大大提高了机器人的适用性及多样性，满足市场需求。

2.2　冲突矩阵

通过分析悬挂轨道式多臂型铸件清理机器人的技术矛盾，并用 39 个标准工程参数进行描述定义其技术矛盾[8]。欲改善的参数分别为适用性及多样性和自动化程度，而恶化的参数为运动物体的质量和设备的复杂性，根据这两对冲矛盾建立如表 1[7]所示的冲突矩阵。分别在改善参数与恶化参数交叉的方格内列出了推荐使用的发明原理序号。表 1 提供了进行创新设计的发明原理，选择 6 多用性原理和 15 动态化原理进行轨道式多臂铸件清理机器人的设计。

2.3　结构方案的设计

根据表 1 冲突矩阵得到的创新原理，根据 TRIZ

表 1 冲突矩阵
Tab.1 Conflict matrix

改善参数	恶化参数	冲突类型	发明原理
自动化程度	设备复杂性	技术冲突	15, 24, 10
适应性及多用性	物体质量	技术冲突	1, 6, 15, 8

注：1 分割原理；6 多用性原理；8 重量补偿原理；10 预先作用原理；15 动态化原理；24 借助中介物原理[6]。

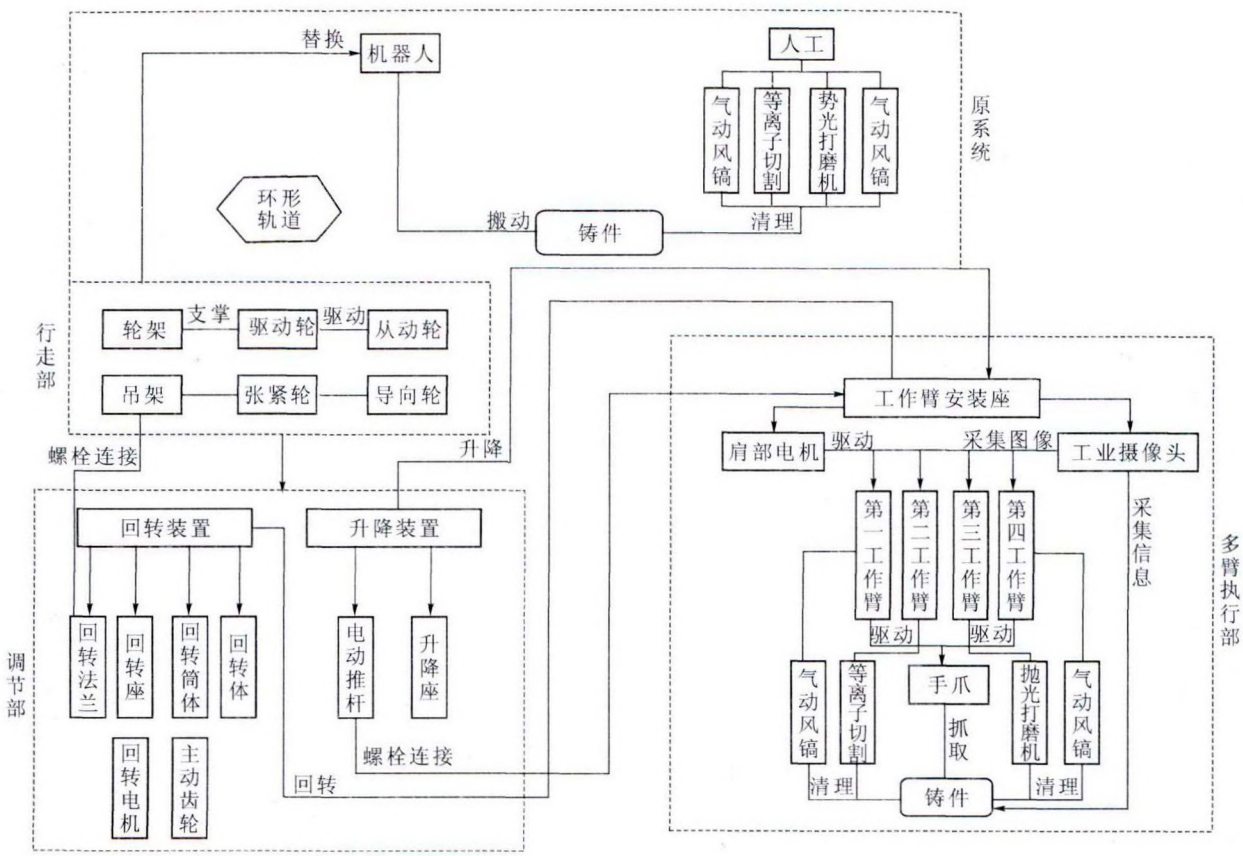


图 1 铸件清理机器人系统的功能分析图
Fig.1 Function analysis diagram of casting cleaning robot system

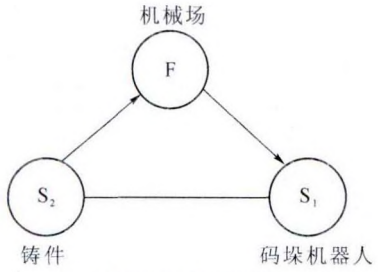


图 2 码垛机器人问题模型
Fig.2 The problem model of palletizing robot

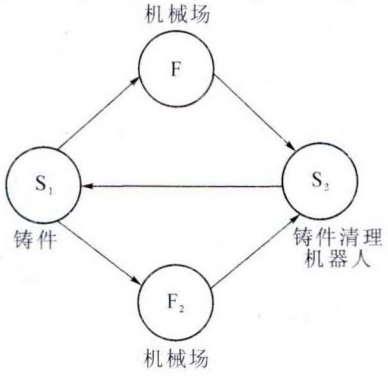


图 3 解决方案模型
Fig.3 Solution model

理论中的动态化原理，将原有的固定于地面的铸件清理机器人改为四点悬挂轨道式，机器人可实现动态化作业，且四点悬挂稳定性较高，可实现机器人平稳运动，结构设计图如图 4 所示。

铸件清理机器人可以在轨道上运动，很好地解决了现有铸件清理机器人工作范围小、灵活性差和工作效率低的问题，提高了自动化程度。此时机器人的结构也相对较简单。根据表中冲突矩阵得到的创新原理，基于 TRIZ 理论中的多样化原理，在每个工作臂的末端安装两个末端执行器，使一个工作臂可执行两个不同的作业任务，减少了工作臂的数量，降低了机器人在运行过程中的重量，4 个工作臂及末端执行器结构设计如图 5 所示。

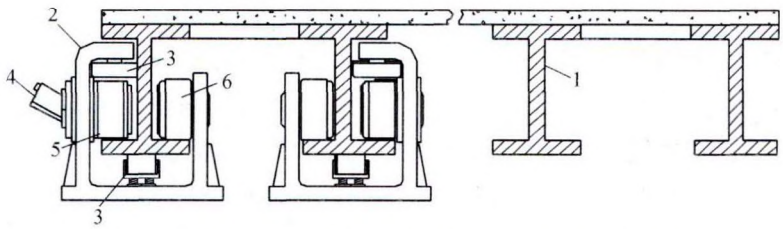
2.4 小人法

由于多臂铸件清理机器人的结构较为复杂，机器人下部结构质量较大，回转装置承受的轴向力较大，现有的回转装置无法满足机器人稳定回转的要求，运用 TRIZ 中的小人法设计一种新型回转装置。

系统：回转座、回转体、回转电机、主动齿轮、圆柱滚子止推轴承、圆柱滚子径向轴承。

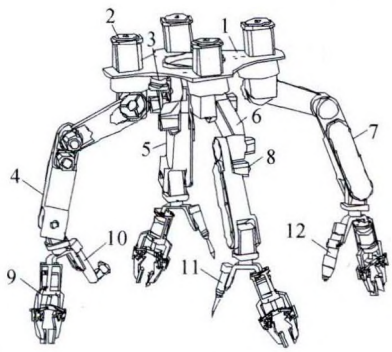
铸件清理机器人的多臂执行部本身质量较大，在工作时还要承受铸件等负载，因此机器人的回转装置在工作过程中不仅轴向负载较大，同时还承受径向载荷，现有单个轴承无法满足强度要求，圆柱滚子止推轴承、圆柱滚子径向轴承相当于两个小人，回转座、回转体、回转电机、主动齿轮就是连接他们的其他小人。组合后的结构能够实现铸件清理机器人在作业过程中的稳定回转运动。

解决方案：将回转座、回转体、回转电机、主动齿轮、圆柱滚子止推轴承、圆柱滚子径向轴承按图 6 中结构组合，构成机器人的回转装置。



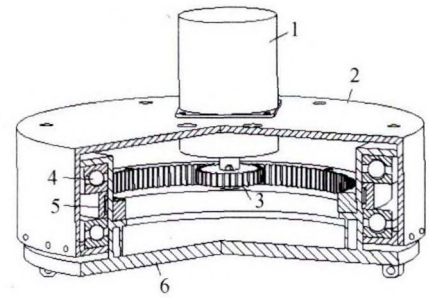
1- 导轨；2- 行走装置；3- 导向轮；4- 气动马达；5- 主动轮；6- 从动轮

图 4 悬挂轨道结构示意图
Fig.4 Schematic diagram of suspended track structure



1- 转盘；2- 大臂电机；3- 工业摄像头；4~7- 工作臂；8- 小臂电机
9- 机械手爪；10- 气动打磨机；11- 气动风镐；12- 等离子切割机

图 5 机器人臂部结构示意图
Fig.5 Schematic diagram of robot arm structure

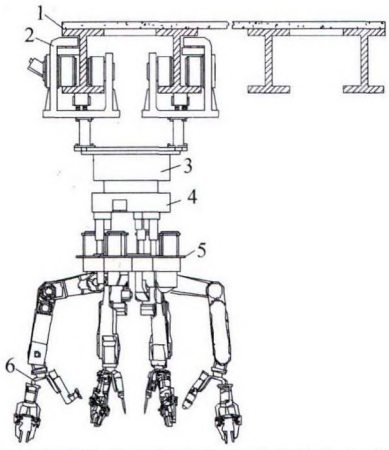


1- 回转电机；2- 回转体；3- 主动齿轮；4- 圆柱滚子止推轴承
5- 圆柱滚子径向轴承；6- 回转座

图 6 机器人回转装置示意图
Fig.6 Schematic diagram of robot slewing device

2.5 铸件清理机器人结构方案整理

综合上述方案设计的悬挂轨道式多臂型铸件清理机器人(总体结构示意图如图 7 所示),可解决铸件清理过程中存在的耗费大量人力物力、增加成本等问题,提高了工作效率和自动化程度,同时也可满足大质量、大体积和复杂异形铸件的搬运、调姿及清理作业的需求。铸件清理机器人的行走部采用四点悬挂方式,可实现机器人在铸件清理过程中准确平稳行走;回转装置和升降分别实现机器人的回转和升降功能;多臂执行部可以实现铸件清理的大部分工序,具有较好的实用性。



1- 导轨;2- 行走装置;3- 回转装置;4- 升降装置;5- 多臂执行部 6- 末端执行器

图 7 铸件清理机器人总体结构示意图
Fig.7 General structure sketch of casting cleaning robot

3 铸件清理机器人机构的拓扑结构

根据机器人机构拓扑结构理论[8],铸件清理机器人的多臂执行部工作臂的拓扑结构为 SOC $\{-R_{i1}\perp R_{i2}\parallel R_{i3}\parallel R_{i4}\perp R_{i5}-\}$,$(i=1,2,3,4)$;当铸件清理机器人在执行铸件抓取、搬运任务时,多臂执行部与铸件一起构成一个并联机构,其中铸件充当动平台,静平台为工作臂的顶部安装法兰,其拓扑结构为 4-SOC$\{-R\perp R\parallel R\parallel R\perp R-\}PM$。

铸件清理机器人在执行铸件表面打磨、清理等作业任务时,要求工作空间大,需采用串联结构方式,而进行大型铸件搬运及姿态调整作业时,机器人负载大,则需采用并联结构方式来满足作业任务的要求,并联工作臂的机构原理图如图 8 所示。

基于 TRIZ 理论中的多样化原理,结合串联机器人,并联机器人结构的优点,设计了一种混联结构的铸件清理机器人,其机构拓扑结构为 $P\perp R\perp P$-4SOC$\{-R\perp R\parallel R\parallel R\perp R-\}$。同时,还将铸件清理机器人的多臂执行部的机构设计成一种变胞结构,即其结构和自由度可变。

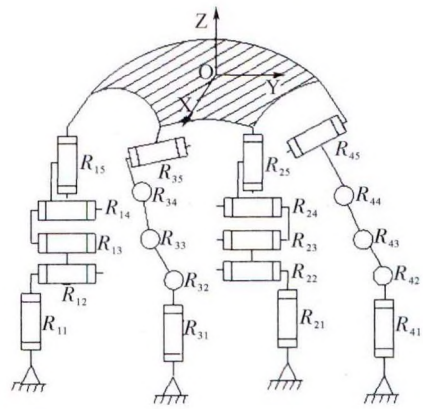


图 8 机器人并联工作臂机构原理图
Fig.8 Mechanism diagram of robot parallel manipulator

(1)当 $R_{11}\parallel R_{21}\parallel R_{31}\parallel R_{41}, R_{12}\parallel R_{22}\parallel R_{32}\parallel R_{42}\parallel$,时,铸件清理机器人自由度 DOF=6,机构的 POC 集为 $M_{pa}=\begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}$,多臂执行部具有空间的三平移三转动,分别为 x,y,z 三个方向的移动和绕 x,y,z 方向的转动。

(2)当 $R_{11}\parallel R_{21}, R_{31}\parallel R_{41}, R_{12}\parallel R_{22}, R_{32}\parallel R_{42}$ 且 R_{11} 与 R_{31},R_{12} 与 R_{32} 为任意关系时,铸件清理机器人机构的自由度 DOF=4,其 POC 集为 $M_{pa}=\begin{bmatrix} t^3 \\ r^1 \end{bmatrix}$,多臂执行部具有空间的三平移一转动,分别 x,y,z 为三个方向的移动和绕 z 轴的转动。

4 结论

基于 TRIZ 理论对所设计的铸件清理机器人进行系统功能分析,找到铸件清理机器人克服现有技术缺陷存在的问题,并根据所得出的结论进行物场分析、冲突矩阵分析,得到铸件清理机器人的结构设计方案,结合拓扑结构设计,最终设计出满足铸件搬运、调姿及清理工作要求的混联式且多臂执行部为变胞结构的悬挂轨道式多臂型铸件清理机器人。所设计的多臂型铸件清理机器人能够克服现有铸件清理机器人存在的技术缺陷,结构更加灵活,可以满足大质量、大体积和复杂异形铸件的搬运、调姿及清理作业需求,自动化程度高。设计过程证明了 TRIZ 理论在求解工程问题上的可行性,为铸件清理机器人的样机制作提供了理论依据,为新产品研发提供实时指导。

参考文献:

[1] 章旭霞. 工业机器人在铸造行业的应用[J]. 金属加工(热加工), 2014(15): 18-21.

[2] 王成军,郭永存,郑志伟,等. 悬挂轨道式多臂铸造机器人[P]. 中国:201710588987.7,2017-07-19.

(下转第 88 页)

将表(1)编号 g、h、i、j、k、l、m、n、o、p、q、r 热电偶的读数代入式(4),通过一系列计算,解得:

标高 6 123 mm 处,已知 A、B 两点是热电偶插入点,读数由表 1 得

已知 T_A=64 ℃、T_B=113 ℃,

R_A=4 550+195=4 335(mm);

R_B=4 550-315=4 235(mm);

R_C=4 550-1 325=3 225(mm);

R_D 初 =4 550-1 325-500=2 725 mm。

解得:T_C=554 ℃。

由于 C 点处是微孔炭砖与刚玉莫来石砖的交界面,假设点 D 温度为 1 150 ℃等温线位置,那么对于 D 点的位置求解需要用到公式(7),得到通过 A、B 两点的热流量 = 通过 C、D 两点的热流量。所以:

$$Q_{AB}=2\pi\lambda_1 l(t_A-t_B)/(\ln r_B-\ln r_A)$$
$$=2\pi 1\cdot 11\cdot(64-113)/(\ln 4\,235-\ln 4\,335)$$
$$Q_{CD}=2\pi\lambda_2 l(t_C-t_D)/(\ln r_D-\ln r_C)$$
$$=2\pi 1\cdot 5\cdot(554-1\,150)/(\ln r_D-\ln 3\,225)$$

由:

$$Q_{AB}=Q_{CD}$$

解得:R_D=2 841 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-2 841=1 709(mm)。

同理解得:

标高 6 469 mm 处 R_D=3 084 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-3 084=1 466 mm。

标高 6 815 mm 处 R_D=3 103 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-3 103=1 447 mm。

标高 7 161 mm 处 R_D=3 109 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-3 109=1 441 mm。

标高 7 908 mm 处 R_D=2 792 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-2 792=1 758 mm。

标高 9 111 mm 处 R_D=2 170 < 2 725 mm,表明炉缸未被侵蚀,耐火砖残厚 L=4550-1 325-500=2 725 mm。

即,炉缸侵蚀结果如图 5。

图中黄线为最初内衬边界,即原始边界;图中红线为炉缸侵蚀后的内衬边界,即遭受侵蚀之后的边界。

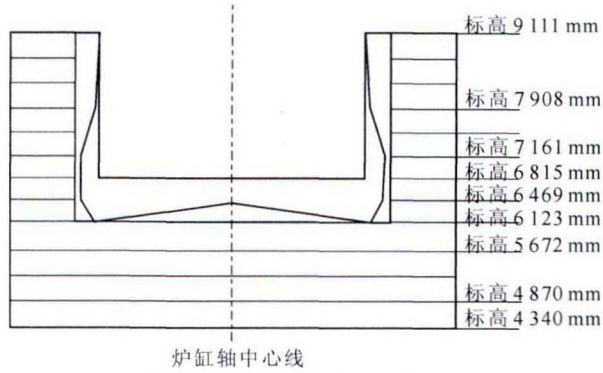


图 5 炉缸侵蚀结果图

Fig.5 Hearth erosion result diagram

5 结论

(1)两点法适用于一维传热过程,相比较有限元法,边界元法,有限差分法的其他算法,两点法计算简单迅速。但是它不能准确计算高炉炉缸炉角的侵蚀程度,所以此方法计算结果存在一定误差,模型有待改进提高。

(2)高炉炉缸、炉底大范围遭受侵蚀,各部分侵蚀程度不一,主要侵蚀部位在出铁口中心线下方,也就是标高 6.123~7.161 m,侵蚀状况较严重。

(3)炉缸、炉底侵蚀未涉及炉内砖衬,侵蚀部位主要发生在刚玉莫来石砖,未曾侵蚀到炉内碳砖。

参考文献:

[1] 陈良玉. 高炉炉缸内衬侵蚀分析与检测新技术综述 // 2007 年中小高炉炼铁学术年会[C]. 北京:中国金属学会炼铁分会,2007:13-16.

[2] 张艳允. 邯钢 5 号高炉炉缸炉底砖衬侵蚀模型 [J]. 钢铁研究,2002(4):10-12.

[3] 周莉英,王平,李家新,等. 马钢新 1 号高炉炉缸侵蚀模型的在线应用[J]. 冶金自动化,2005,29(2):25-30.

[4] 韩行禄. 耐火材料应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1980.

[5] 赵润思. 炼铁工艺设计原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1988.

[6] 杨尚宝. 北京科技大学学报[J]. 北京:冶金工业出版社,1988.

(上接第 84 页)

[3] 陈跃程,刘伟. 铸件清理打磨自动化技术及其应用[J]. 铸造设备与工艺,2015(5): 1-6.

[4] 王成军,沈豫浙. 应用创造学[M]. 北京:北京大学出版社,2010.

[5] 傅骏,魏继业,周杰,等. 基于 TRIZ 矛盾矩阵的快速熔模铸造工艺开发与实践[J]. 铸造技术,2016,37(2):380-383.

[6] 吴卫东,闫双颖,李德根,等. 基于 TRIZ 轮式机器人驱动轮的研究[J]. 机械设计,2011,28(5): 34-37.

[7] 夏文涵,王凯,李彦,等. 基于 TRIZ 的管道机器人自适应检测模块创新设计[J]. 机械工程学报,2016,52(5): 58-67.

[8] 杨廷力,刘安心,罗玉峰,等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京:科学出版社,2012.