

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.039

管子-管板焊接机器人钨极自动更换系统的开发与应用

沈天阔¹, 胡光敏², 邹小平¹, 王翔毅², 张斌¹, 孙志远², 朱旭¹, 张茂龙²

(1. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124; 2. 上海电气核电设备有限公司, 上海 201306)

摘要:针对核电蒸汽发生器管子-管板焊接过程中传统人工更换钨极方式与焊接自动化发展之间的矛盾,通过设计创新型结构的焊枪、搭建专门的钨极更换平台、开发可靠高效运行路径的钨极自动更换系统,成功实现了自动拆卸气罩、更换钨极、回装气罩、输送钨极的全流程自动化作业。实际应用表明该系统显著提高了钨极更换效率和焊接接头质量稳定性。

关键词:核电蒸汽发生器;钨极;自动更换系统;管子-管板;焊接机器人

中图分类号:TG409 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0200-05

Development and Application of an Automatic Tungsten Electrode Replacement System for Tube-to-Tubesheet Welding Robots

SHEN Tiankuo¹, HU Guangmin², ZOU Xiaoping¹, WANG Xiangyi², ZHANG Bin¹, SUN Zhiyuan², ZHU Xu¹, ZHANG Maolong²

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, China;

2. Shanghai Electric Nuclear Power Equipment Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: To address the conflict between traditional manual tungsten electrode replacement and the advancement of welding automation during the tube-to-tubesheet welding process in nuclear steam generators, an automatic tungsten electrode replacement system has been developed. By designing a welding torch with an innovative structure, establishing a dedicated electrode replacement platform, and programming reliable and efficient operating paths, the system successfully achieves fully automated operations including automatic removal of the gas cup, replacement of the tungsten electrode, re-installation of the gas cup, and delivery of the electrode. Practical applications demonstrate that this system significantly improves both the efficiency of electrode replacement and the consistency of weld joint quality.

Keywords: nuclear power steam generator; tungsten electrode; automatic replacement system; tube-to-tubesheet; welding robot

0 引言

在全球制造业历经深刻变革的当下,智能制造已然成为重塑产业竞争力的核心要素^[1]。我国“十四五”规划高度重视智能制造产业的高质量发展,将其提升至重要战略地位^[2]。这一举措不仅是构建新发展格局、实现高水平科技自立自强的关键之举,更是推动供给侧结构性改革的核心动力。在此浪潮中,核电凭借其能量密度高、清洁低碳等显著优势^[3-4],在全球能源结构调整进程里扮演着日益重要的角色,成为未来能源发展的重要方向。核电装备制造向智能化转型,既是提升核电产业安全与效率的必然需求,也是顺应智能制造发展趋势的必由之路^[5-6]。

核电蒸汽发生器的管子-管板接头,作为隔离一、二次侧回路的关键屏障,对于保障核电站的安全稳定运行起着重要作用^[7-8]。由于管子-管板接头数量庞大,传统的人工辅助定位手持式机械氩弧焊焊接工艺暴露出诸多弊端,如劳动强度大、生产效率低、产品质量稳定性欠佳、制造周期冗长等问题^[9]。随着核电建设规模持续扩大,以及对焊接质量要求的不断攀升,这种传统工艺的局限性愈发显著,已成为制约核电装备制造智能化发展的瓶颈^[10-11]。

为突破这一技术困境,国内某公司与 Polysoude 公司展开深度合作,共同致力于研发管子-管板多机头协同智能化焊接机器人,力求实现全过程自动化,以大幅提升焊接质量与效率。然

基金项目:上海市临港地区智能制造产业专项项目(ZN2017020207)

第一作者简介:沈天阔(1989—),男,湖南常德人,高级工程师,硕士,研究方向为核电站核岛主设备制造技术和特种焊接技术研究, stingkool@126.com。

通信作者简介:胡光敏(1990—),男,湖南岳阳人,博士后,研究方向为核电设备、材料、焊接等方面研究, 18821273068@163.com。

而,在实际研发过程中发现,传统的人工更换烧损钨极方式,与机器人焊接全流程自动化、智能化目标存在根本性冲突^[12-13]。人工更换钨极的方式不仅降低了系统的整体效率,还对焊接作业的连续性和稳定性造成了负面影响,阻碍了智能化焊接技术的推广应用。

基于以上背景,本文聚焦于研发与管子-管板焊接机器人高度适配的钨极自动更换系统。期望通过这一研究,有效提升机器人焊接的自动化水平和工作效率,为核电装备制造的智能化升级提供坚实的技术支撑,助力我国核电产业在智能制造时代实现高质量发展。

1 钨极自动更换系统结构设计

钨极自动更换是管子-管板焊接机器人实现全过程智能化的关键路径,是减少人工依赖、降低劳动强度、提高焊接效率和焊接质量的重要途径。钨极自动更换系统的结构设计需与机器人的固有运行规律和结构相适配^[14],以避免因结构不匹配导致机器人无法识别系统和结构,达不到自动更换钨极的目的。因此,需要对焊枪的结构进行创新性设计,以满足机器人自动更换钨极的要求,并设计专门的钨极更换平台,实现全过程的自动化和智能化。

1.1 焊枪结构创新设计

当管子-管板机器人在焊接过程中检测到钨极存在烧损的情况时,需要及时对钨极进行更换^[15-16]。为了使机器人能自动更换钨极,需要对焊枪的结构进行创新设计,使其能满足机器人自动装卸要求。设计的焊枪结构如图1所示,其中图1(a)是焊枪的整体结构,图1(b)是焊枪前端位置放大图。由图1可知钨极位于焊枪的前端位置,而其外围还有一个气罩。在进行钨极更换之前需要机器人将气罩拆卸,更换完钨极后还需要将气罩回装好,因此气罩与焊枪的连接也需要设计成机器人可自动装卸的结构。本文将气罩与焊枪设计成弹簧复位式卡榫结构连接^[17],如图1(c)所示。当需要拆卸气罩时,通过给凸台施加作用力,带动底座转动,同时弹簧被拉伸,卡榫结构的凸起位置滑动到气罩缺口位置,此时就能将气罩往背离焊枪的方向取下。当需要回装气罩时,将气罩缺口位置对准卡榫结构的凸起位置,气罩往焊枪方向插入,同时释放作用在凸台上的作用力,弹簧复位,带动底座转动,卡榫结构将气罩

卡在焊枪上。钨极通过弹簧式卡锁结构与焊枪连接,如图1(d)所示。安装钨极时,给钨极施加往焊枪方向移动的力,其锥形前端顶开卡柱,同时弹簧被拉伸,直到卡柱滑入卡槽,完成锁紧。取下钨极时,给钨极施加背离焊枪方向的力,卡柱滑脱卡槽,完成钨极与焊枪的分离。

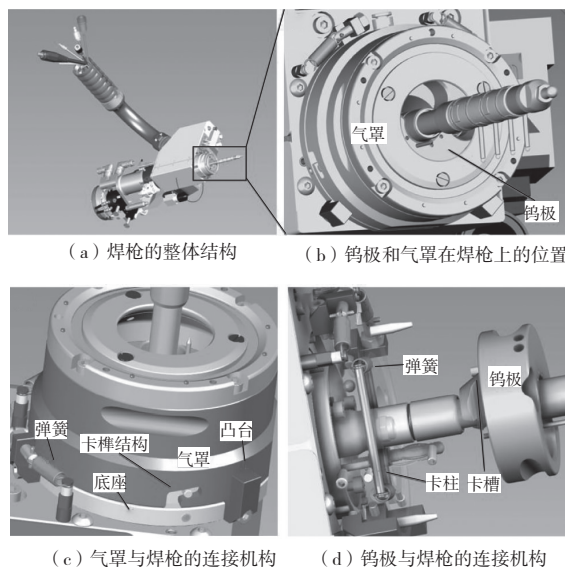


图1 焊枪结构创新设计

1.2 钨极自动更换平台设计

为了使钨极自动更换系统的运行能与焊接作业流程相契合,减少不必要的动作干扰,提高工作效率,设计了专门的钨极自动更换平台。该平台包括钨极和气罩及其装卸装置、横向和纵向拖板及其驱动机构,如图2所示。

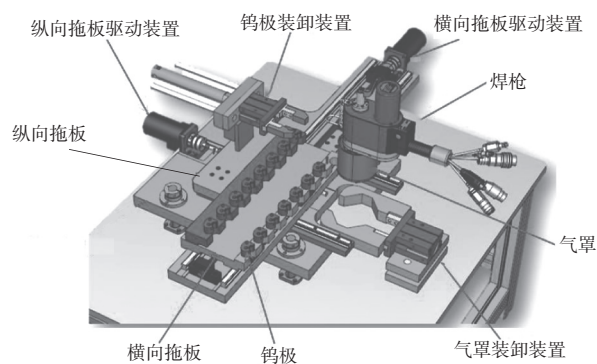


图2 钨极自动更换平台

钨极自动更换平台及其各个功能模块的设计思路 and 结构如下:

1) 整体布局规划:从宏观角度出发,考虑装置与焊接设备的整体适配性,平台应设计得紧凑精巧,避免占用过多空间影响其他部件运行。同时,

平台应能容纳各复杂、高效的功能模块,确保部件易于维护和操作。因此,将平台安装在两个机械臂之间的空档区域,避免对机械臂其他作业的干扰,同时又方便实时观察平台的运行状况。

2) 气罩装卸装置设计:设计固定的气罩装卸装置,每次装卸气罩都在此固定位置进行。气罩装卸装置上的夹具采用弹性材料和可调节结构,根据气罩的直径和形状自动调整夹紧力度,保证牢固夹持的同时不损伤气罩^[18]。气罩装置内设计有顶针,当夹具夹住气罩时,顶针可给焊枪上的凸台施加作用力,从而带动焊枪上的底座旋转,实现装卸气罩。

3) 钨极装卸装置设计:为了能灵活抓取和更换钨极,钨极装卸装置采用可移动的设计方案。钨极装卸装置可在三维空间内移动,能将焊枪上的钨极卸下来,并放置在合适位置,同时抓取新的钨极安装到焊枪上。钨极装卸装置中设计有高精度的光学传感器^[19]、位置编码器^[20]等元件,可实时检测钨极装卸装置的精确位置。

4) 横/纵拖板及其驱动装置的设计:由于平台安装在机械臂能达到范围的末端,随着钨极的不断更换,机械臂到达不了需要安装新钨极的位置。因此设计了横/纵拖板及其驱动装置,在钨极不断消耗时,通过此装置将新的钨极输送到机械臂能达到的位置。采用具有高控制精度和响应速度的伺服电机驱动丝杠螺母副的旋转,推动横/纵向拖板的运动,将新钨极送到指定位置。横向拖板上还设计有带感应的夹具,用于固定和放置换下的旧钨极和准备安装的新钨极。

2 钨极自动更换系统运行机制

当机器人检测到钨极烧损时,发送信息到中控系统,中控系统启动钨极自动更换程序。钨极自动更换系统运行机制如图3所示。

1) 拆卸气罩,中控系统给机械臂发出指令,机械臂携带焊枪到气罩装卸装置上方,同时中控系统控制气罩装卸装置打开夹具,机械臂将气罩插入气罩装卸装置的夹具中间。当气罩装卸装置上的传感器感应到气罩已插入,中控系统控制气罩装卸装置收紧夹具,夹具夹紧气罩。紧接着,顶针给焊枪上的凸台施加作用力,凸台带动焊枪上的底座旋转,当底座上卡榫结构的凸起移动到气罩缺口位置时,中控系统控制机械臂带动焊枪往背离气罩装卸装置的方向移动,直到气罩留在气罩装卸装置上,焊枪前端露出钨极,完成取下气罩的

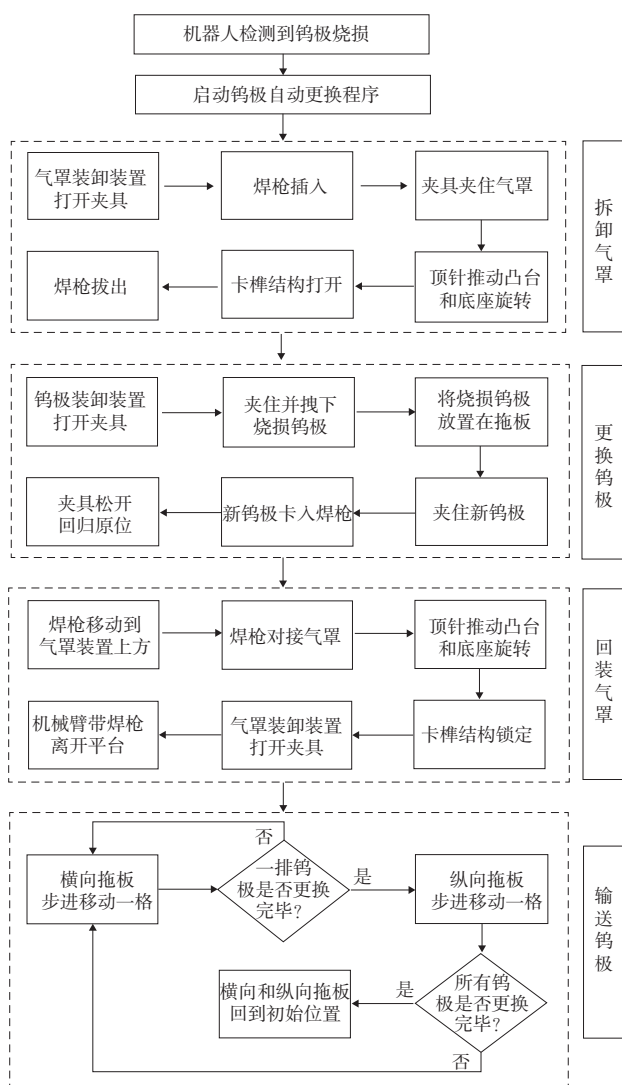


图3 钨极自动更换系统运行机制图

作业并将信息反馈给中控系统。

2) 更换钨极,中控系统接收到气罩拆卸完毕的信息后,给钨极装卸装置发出指令,控制装置的夹具夹住焊枪前端的钨极,将其往背离焊枪的方向拽,此时卡柱脱离卡槽,烧损的钨极被取下。钨极装卸装置将取下的钨极放在拖板的感应夹上,同时用夹具在拖板上夹取存放的新钨极。钨极装卸装置将新钨极对准焊枪前端,往对接焊枪方向施加作用力,直到焊枪上的卡柱卡入钨极上的卡槽,完成钨极更换作业,并将信息反馈给中控系统。

3) 回装气罩,此步骤与拆卸气罩过程相反,中控系统控制机械臂,将安装了新钨极的焊枪移动到气罩装卸装置的上方,随即控制其往对接气罩方向移动。当气罩装卸装置上的感应器感应到焊枪上的凸台已移动到气罩装卸装置上顶针位置时,顶针给凸台施加作用力,凸台带动底座旋转,

直到卡榫结构凸起位置卡入气罩缺口。之后,松开顶针,底座回转,卡榫结构卡紧,夹具松开,机械臂带焊枪离开气罩装卸装置,完成气罩回装。

4) 输送钨极,每完成一次钨极更换作业,横向拖板步进移动一格,保证机械臂和钨极装卸装置的夹具能到达指定位置完成下一轮的钨极更换。当一整排的新钨极更换完毕后,纵向拖板步进移动一格,让另外一排新钨极到达可进行更换钨极的位置。每完成一次钨极更换作业,横向拖板又步进移动一格。当横向拖板上所有的钨极更换完毕后,驱动机构控制横向和纵向拖板移动到初始位置,人工取下所有更换下来的烧损钨极,换上一批新钨极。

3 钨极自动更换系统应用效果

为了评估钨极自动更换系统的应用效果,对其在运行过程中与管子-管板焊接机器人的适配性、运行稳定性和流畅性、对焊接效率和焊接质量的影响进行了分析和评价。钨极自动更换系统实际应用场景如图4所示。

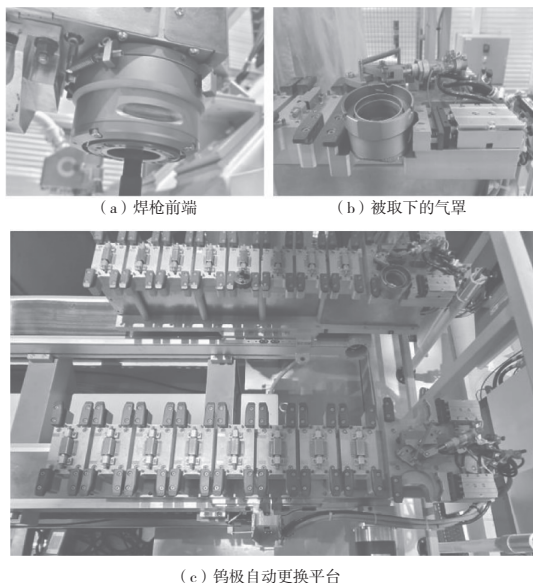


图4 钨极自动更换系统实际应用场景

由于钨极自动更换系统是针对管子-管板焊接机器人的结构和运行规律进行设计的,因此无论是在机械接口的兼容性,还是在电气信号的交互上,都能无缝对接。操作人员只需简单设置,就能让管子-管板焊接机器人与自动更换钨极系统协同工作,具有高适配性,极大降低了操作难度和系统集成成本。钨极自动更换系统在设计上充分考虑了各种复杂工况。通过高精度的传感器和智

能控制系统,能够实时监测钨极的更换状态,在振动、电磁干扰等恶劣环境下也能稳定运行,确保每次更换钨极都能精准无误,具有很高的运行稳定性,极大减少了因钨极更换不稳定导致的焊接中断。钨极自动更换系统的机械结构与其电气控制系统配合紧密,作业动作衔接自然,整个更换过程都具有较高的流畅性,避免了传统人工更换钨极方式中可能出现的卡顿、停滞现象,使得机器人在焊接过程中能够保持连续高效的作业状态,进一步提升了生产效率。

焊接接头的质量检测表明,配有钨极自动更换系统的管子-管板焊接机器人焊接的接头具有更高的质量稳定性。配备自动钨极更换系统管子-管板焊接机器人焊接的接头如图5所示,图5(a)显示焊缝表面光滑,无凹坑、裂纹等缺陷,具有非常好的表观质量;图5(b)显示焊缝的焊喉厚度大,焊缝与管子以及管板上的镍基堆焊层结合紧密,未发现裂纹、孔洞等缺陷,说明焊接质量高^[21]。

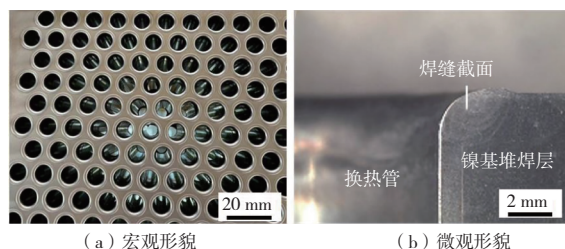


图5 带钨极自动更换系统机器人焊接的管子-管板焊缝宏观微观形貌

目前,配有钨极自动更换系统的管子-管板焊接机器人已在“华龙一号”蒸汽发生器实施应用,一台蒸汽发生器的管子-管板接头共计12 312个,配有钨极自动更换系统的管子-管板焊接机器人一个班次可焊接约600个焊缝,焊接效率较人工更换钨极方法提高3倍,总制造工期缩短了55%,同时焊接质量稳定性显著提高,射线检测一次100%合格。

4 结语

本研究成功研发出满足核电蒸汽发生器管子-管板全过程智能化焊接需求的钨极自动更换系统,它有效解决了传统人工更换钨极方式带来的效率低下、质量不稳定问题。实际应用表明,该系统与管子-管板焊接机器人的适配性高,运行稳定性和流畅性好,能大幅提高焊接效率和焊接接头质量的稳定性。目前该系统已成功应用于国内

华龙一号堆型某项目的管子-管板接头焊接。未来,还将进一步探索该系统在不同类型核电设备焊接中的应用拓展,并与更先进的智能控制技术融合,持续提升核电装备制造的智能化水平。

参考文献:

- [1] 张维. 工业互联网与智能制造推动下的自动化技术探讨[J]. 大数据与人工智能, 2025, 5(9):7-9.
- [2] 杨伊静. 抢占关键技术制高点力推制造业转型升级: 工信部等多部门印发《“十四五”智能制造发展规划》[J]. 中国科技产业, 2022(1):40-41.
- [3] 张蕴. 双碳目标下我国核电发展趋势分析[J]. 核科学与工程, 2021, 41(6):1347-1351.
- [4] 胡道成, 张帅, 韩涛, 等. 碳中和目标下发电领域低碳转型路径[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(7):23-33.
- [5] 李想, 刘焕. 关于推进核电焊接领域国产化、智能化的探索[J]. 南方能源建设, 2020, 7(4):93-97.
- [6] 景晓冬, 郭景昌, 严家福. 数字孪生在核电设备领域中的关键技术应用研究综述[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(3):1-6.
- [7] 邱桂辉, 任红兵, 周鹏, 等. 核电厂蒸汽发生器传热管接近管运行特性研究[J]. 核科学与工程, 2023, 43(6):1294-1299.
- [8] 何戈宁, 周美玲, 赖建永, 等. 核电厂蒸汽发生器一次侧向二次侧泄漏率取值研究[J]. 辐射防护, 2022, 42(1):35-40.
- [9] 徐文镜, 刘鸣宇, 王小刚, 等. 百万千瓦级核电蒸汽发生器管子-管板焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(23):170-173.
- [10] 汪东明, 高增福, 谭笠, 等. 国内外换热器管子管板焊接技术综述[J]. 压力容器, 1995, 12(2):48-53, 3.
- [11] LEI T, WU C Q, RONG Y M, et al. The development of

tube - to - tubesheet welding from automation to digitization[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(3/4):779-802.

- [12] 渠慎全. 薄壁不锈钢管 TIG 焊接生产过程中钨极烧损状态监测[D]. 济南:山东大学, 2022.
- [13] 陈华斌, 肖润泉, 陈善本. 焊接机器人视觉感知及智能化焊接关键技术研究进展[J]. 焊接学报, 2024, 45(11):1-9.
- [14] 樊云博, 严文荣, 鲍亮亮, 等. 石化管件氩弧焊机器人自适应智能焊接应用分析[J]. 焊接, 2024(9):75-80.
- [15] 梁晓梅, 杜兵, 周鑫, 等. 四钨极 TIG 电弧耦合物理特性及高效稳定燃烧机制分析[J]. 焊接学报, 2025, 46(6):81-88, 97.
- [16] 杨义成, 杜兵, 黄继华, 等. 钨极几何特征对电弧与熔池热力行为的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(8):104-108, I0009.
- [17] 陈依苇, 田思雨, 胡昌格. 榫卯结构在工业设计领域的创新应用研究[J]. 模具制造, 2025, 25(2):223-225.
- [18] 胡秀秀. 自动抓取机械手的设计与研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2020.
- [19] 位恒政, 王为农, 裴丽梅, 等. 多传感器坐标测量机的校准及应用[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(2):46-51.
- [20] 雷尼绍. 先进位置编码器技术提升光刻工艺水平[J]. 数控机床市场, 2019(3):69-71.
- [21] 黄均麟, 李磊, 杨俊, 等. 蒸汽发生器管子管板焊缝焊接见证件缺陷原因分析及处理[J]. 电焊机, 2019, 49(4):291-294.

收稿日期:2025-04-03

(上接第 160 页)

- [18] BLEICHER F, RAMSAUER C M, OSWALD R, et al. Method for determining edge chipping in milling based on tool holder vibration measurements [J]. CIRP Annals, 2020, 69(1):101-104.
- [19] 吴石, 张勇, 王宇鹏, 等. 基于双信号融合的主轴/刀柄结合面刚度退化程度预测[J]. 中国机械工程, 2024, 35(8):1449-1461.
- [20] 张越新凯, 卓秀彬, 魏俊, 等. 基于圆弧头立铣刀螺旋角修正的切削力计算方法[J]. 工具技术, 2025, 59(2):71-77.
- [21] 刘倩芸, 林敏, 刘灏, 等. 基于超宽带系统的双卡尔曼滤波定位算法[J]. 电子技术应用, 2023, 49(6):

58-62.

- [22] 章慧芬. 特性 Riccati 微分方程解的探讨[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2023, 23(4):27-29, 38.
- [23] ALTINTAS Y, BER A A. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design [J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54(5):B84.
- [24] ALTINTAS Y. Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurements[J]. Journal of Engineering for Industry, 1992, 114(4):386-392.

收稿日期:2025-05-12