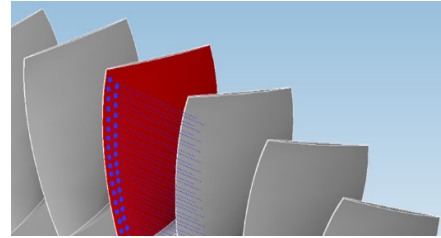




激光冲击强化设备控制系统

陆莹*, 赵吉宾, 乔红超

中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110176



摘要: 针对复杂曲面类零件, 研发一种新型表面激光冲击强化的控制系统, 该系统是一套全自动可控操作系统, 通过工控机/PLC集成控制, 实现自动化、数字化控制, 并完成实时在线监控和信息交互反馈, 属于开放式分布系统。该系统用于激光冲击强化核心设备(包括激光器、机器人、辅助控制、质量检测装置与辅助系统等), 实现各环节的信息交互和系统的协同工作, 通过实时监控, 远程观察加工状态, 有效避免重大事故的发生。同时, 该控制系统添加激光冲击强化工艺试验数据记录功能, 可根据实际需求调用后台工艺参数数据库, 实现高效工艺参数优化。除此之外, 该系统还能够实现激光冲击强化模型建立、加工过程有限元模拟、复杂曲面加工轨迹自动规划、加工策略制定等功能, 从而实现激光冲击强化自动化生产, 目前已经处于工程应用阶段。

关键词: 激光冲击强化; 自动化; 模拟; 轨迹规划; 工艺参数

中图分类号: TS206

文献标志码: A

The laser shock processing control system

Ying Lu*, Jibin Zhao and Hongchao Qiao

Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Science, Shenyang 110176, China

Abstract: This paper introduced control system for complex curved surface laser shock processing, which was a set of automatic and digital control system operation, and controlled by the industrial PC/PLC. And it completed the real-time online monitoring and information interaction feedback, belonging to the open distributed system, by the fact that the remote monitoring and control system status of processing effectively avoid the occurrence of major accidents. This system was laser shock processing core device (including laser, robot, auxiliary control, quality testing device and auxiliary system, etc.), that implemented each link of information interaction and systems work together. By the remote monitoring, control system status of processing effectively avoided the occurrence of major accidents. At the same time, the control system added process of laser shock processing test data record function. According to actual demand parameters database called the background, parameter optimization was processed effectively. In addition, the system also could realize laser shock processing model established in this paper, complex surface machining trajectory planning automatically and processing strategy. The system can realize the automatic production of the whole blade laser impact of aero engine, and it is already in the engineering application stage.

Keywords: laser shock peening(LSP); automation; simulation; trajectory planning; process parameters

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.08.010

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(8): 826–832

1 引言

激光冲击强化作为一种新型的金属表面强化技

术, 在诸多技术领域具有广泛的应用前景。该技术能够有效地提高金属材料的抗疲劳、耐磨损和抗腐蚀能力, 相比于现有的冷挤压、喷丸等金属材料表面强化手段^[1], 该技术具有非接触、无热影响区、可控性强、强化效果显著、自动化程度高以及绿色无污染等突出

收稿日期: 2017-06-04; 收到修改稿日期: 2017-07-14

*E-mail: luying@sia.cn

优点,自产生之日起就得到了广泛的关注和研究^[1-5]。

国内从 20 世纪 90 年代初开始进行激光冲击强化技术的研究^[6-8],主要是针对一些基础理论进行探索和对各种钢材、铝合金材料进行一些简单试验,以及简单的试验装置的开发,所用的激光器多为国外采购^[3]。尚需研究适合工业推广应用的装置,制定出正确的生产工艺,以及不断探索精确控制激光冲击强化的方法,并对影响冲击后残余应力分布、大小、深度的因素进行系统深入的研究分析^[4]。

目前对于激光冲击强化的研究还只是停留在理论水平^[9-11],很难将其合理地应用于工业生产,自动化生产的能力较低,无法对激光工艺参数进行数字化合理控制,相关的工艺研究以及技术标准也不够完善。因此,提高激光冲击强化设备的效率,降低激光冲击强化成本,已经成为限制激光冲击强化技术发展的技术鸿沟^[12]。

中国科学院沈阳自动化研究所成功地研发了激光冲击强化控制系统,该系统是一套全自动可控操作系统,通过工控机/PLC 集成控制激光器、机器人、辅助控制、质量检测装置与辅助系统等部分的系统工作,并通过实时监控系統远程观察加工状态,有效避免重大事故的发生,实现自动化、数字化控制,并完成实

时在线监控和信息交互反馈^[13-15]。

该控制系统添加激光冲击强化工艺试验数据记录功能,可根据实际需求调用后台工艺参数数据库,实现高效工艺参数优化^[16,17]。除此之外,该系统还能够实现激光冲击强化模型建立、加工过程有限元模拟、技工轨迹自动规划、加工策略制定等功能^[17,19]。

2 激光冲击强化控制系统介绍

2.1 激光冲击强化控制系统的功能

自行开发了一种自动化控制的激光冲击强化可控的操作系统,为开放式分布控制系统,实现了控制的数字化、自动化、实时性,通过工控机/PLC 集成控制,现场总线将激光器、轨迹机器人、送水机器人、实时监控系統连接起来,实现了各环节的信息交换和系统各部件的协同工作,并通过对系统的状态监测避免重要部件重大故障的产生。同时,通过对加工工艺实验数据的记录,实现了激光冲击加工参数优化,采用 SQL Server 作为后台数据库,采用分布式 C/S 模式,实现工艺参数的提取、激光冲击强化模型的建立、加工轨迹自动规划、仿真模型的导入与生成、参数优化策略的制定、工艺参数的选取与优化,如图 1 所示为激光冲击强化运动轨迹自动规划加工路线图。



图 1 激光冲击强化控制系统的工作流程。(a) 激光冲击强化轨迹自动规划加工路线图。

(b) 激光冲击强化工艺数据库调用路线图。

Fig. 1 The control system of laser shock processing. (a) The trajectory planning processing map of laser shock processing. (b) The process data selecting of laser shock processing.

2.2 激光冲击强化激光器的控制

该激光冲击强化控制系统组成如图 2 所示,系统采用的波长为 1064 nm,脉冲宽度为 14 ns,单脉冲能量为 3 J~10 J 的 Nd:YAG 固体激光器,激光器的加工频率从单点触发、0.5 Hz、1 Hz、1.5 Hz 和 2 Hz 等,激光器配有循环水冷却系统、电源控制柜等,能够手动控制激光器的触发与调节参数。该激光器与工控机/PLC 集成系统相连,利用工控机接收加工信号,控制并输出激光器的工艺参数,包括激光能量、激光脉宽、脉冲频率、光斑大小。激光器主要用于产生短脉冲(几十 ns)、高功率密度($>10^9$ W/cm²)的激光,由激光诱导在金属靶材和约束层之间形成等离子体冲击波。

2.3 激光冲击强化控制系统的硬件系统

该激光冲击强化控制系统中的硬件系统图 3 所示,主要包括激光器、轨迹机器人、送水机器人、工控机;工控机上装有软件系统,主要包括机器人运动轨迹规划软件、加工过程仿真软件、加工过程监控软件和工艺数据库等。机器人运动轨迹规划软件采用结构力学 CAE 分析软件,能够自动生成作用在金属板料表面的加工运动轨迹,通过限定加工区域与光斑搭接率等要求自动得到机器人单点运动轨迹;加工过程仿真软件采用有限元模拟软件,能够建立零件有限元模型、模拟加工过程,输入零件模型、受力激光冲击后

得到的性能指标,与实际要求进行对比,如果符合技术要求,则采用该工艺生产,若超出允许范围,则需要调整参数重新设定;加工过程监控软件能够实现对加工过程的实时监控,防止加工过程出现异常;工艺数据库包括激光冲击波压力值以及对应的激光器工艺参数;工控机能够实现工艺参数的提取、激光冲击强化模型的建立、加工轨迹自动规划、仿真模型的导入与生成、参数优化策略的制定、工艺参数的选取与优化^[11]。通过工控机/PLC 集成控制,实现各子系统间的通讯与逻辑控制,操作人员只需通过操作界面就可实现对设备的操作。

2.4 离线编程系统

离线编程系统通过软件在电脑里重建整个激光冲击强化工作场景的三维虚拟环境,借助软件的动作指令控制机器人在虚拟环境里的运动,生成激光冲击强化的运动控制指令,再经过软件仿真与调整轨迹生成机器人程序,输入到机器人控制器中。目前通用离线编程软件包括 Robotmaster、Robotworks、RobotCAD、DELMIA 等,这些软件可以进行 3D 加工、去毛刺、抛光、焊接、点胶等加工轨迹的生成,但无法生成用于复杂曲面类零件激光冲击强化加工的加工轨迹。

开发的激光冲击强化加工离线编程系统具有编程智能化、操作简单、节约在线整定时间等优势,适应复杂曲面类零件的激光冲击强化加工自动化生产要

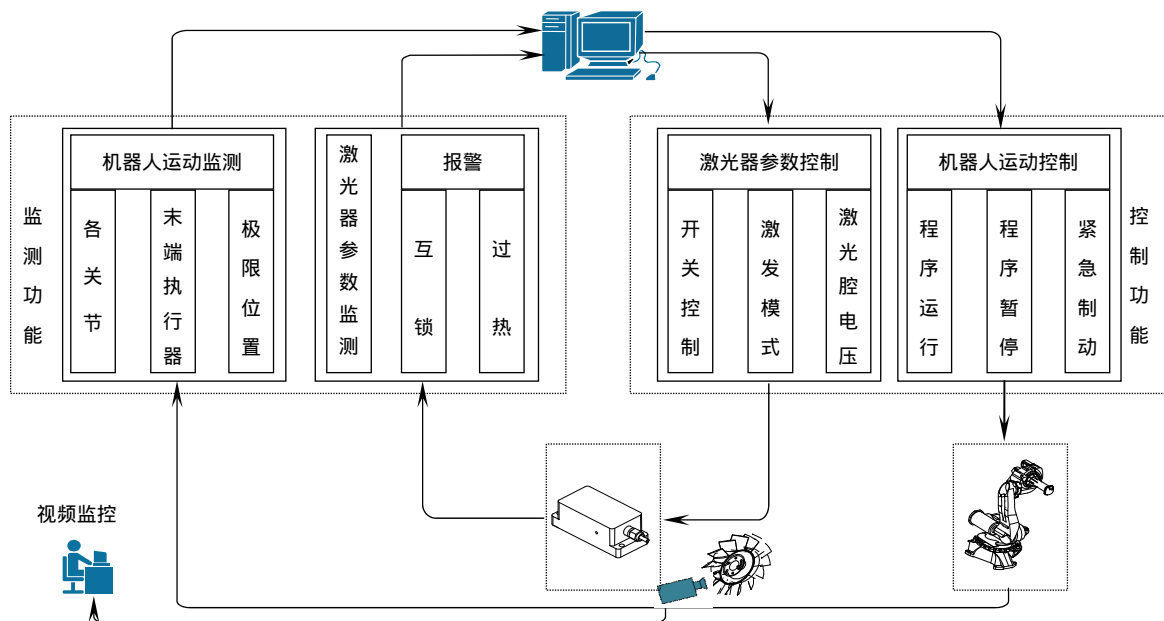


图 2 控制系统的主要功能。

Fig. 2 The main functions of the control system.

求。离线编程系统主要包括：① 文档管理功能；② 三维模型导入功能；③ 加工轨迹规划功能；④ 后置处理功能；⑤ 加工过程仿真功能。

2.4.1 文档管理功能

文件管理功能可以将软件系统导入的三维模型、加工参数设置、生成的加工轨迹等保存为文档，并对这个文件进行管理，如图 4 所示，主要包括以下功能。

1) 新建文档：通过新建文档功能，用户清除当前文档所有内容，建立一个新的文档。

2) 打开文档：用户可以打开保存在硬盘上的文档，显示导入的三维模型、加工参数等，并且可以对加工参数进行修改，重新生成加工轨迹并进行验证。

3) 保存文档：用户可以将当前打开文档保存为硬盘上的文件，以备日后进行浏览和修改。

2.4.2 三维模型导入功能

在导入工件模块后，软件可以对导入的三维模型进行可视化显示，并对工件实现平移、缩放和旋转等不同角度的观察。

2.4.3 加工轨迹规划功能

1) 叶片零件加工轨迹规划

a) 加工参数设置

选取加工区域：操作者通过人机界面选择激光冲击强化加工面，包括加工位置、单双面相对位置。操作者还需要选择可能与激光光束或送水机构发生干涉的干涉面。

设置加工范围：设置加工区域的加工范围值。

设置激光冲击强化参数：设置激光光斑直径、重叠率等工艺参数，这些参数决定了激光冲击强化加工的行距、步长等关键参数。

设置送水机构参数：通过设置送水机构各关节的角度值，确定送水机构的各连杆位置关系，用于送水机构的路径规划和干涉检查。

b) 生成叶片激光冲击强化加工轨迹

根据用户设置的加工参数，生成叶片激光冲击强化加工的机器人加工轨迹，并对加工轨迹进行验证，如图 5 所示。

c) 生成送水机器人激光冲击强化加工轨迹

根据用户设置的加工参数，生成叶片激光冲击强

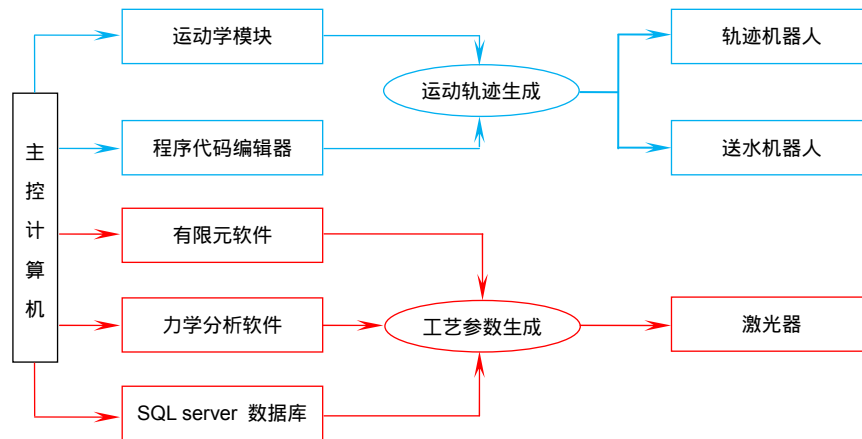


图 3 激光冲击强化控制系统硬件总体布局。

Fig. 3 The overall layout of laser shock processing control system hardware.

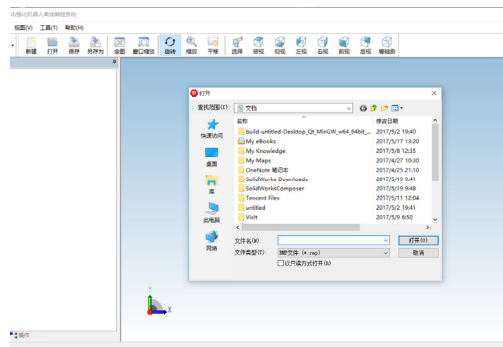


图 4 文档管理功能。

Fig. 4 Document management function.

化加工的送水加工机器人加工轨迹,并对送水加工轨迹进行验证。

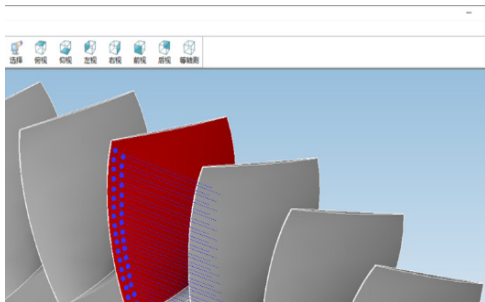


图5 叶片加工轨迹的生成。

Fig. 5 The formation of a blade process trajectory.

d) 加工轨迹显示验证

采用显示法对生成的加工轨迹进行验证。显示验证的基本方法是：从复杂曲面造型结果中取出加工表面及约束面，从加工轨迹计算结果中取出加工轨迹信息，然后将它们组合起来进行显示。可以根据以下原理对显示验证的结果进行判断：冲击点与加工面的相对位置是否合理；分析激光光束与加工面、干涉面是否存在干涉碰撞；分析送水装置与加工面、干涉面是否存在干涉碰撞；分析进/退刀位置及方式是否合理。

2) 叶片类零件加工轨迹规划的基本原理

算法简介：在激光冲击强化加工的主要技术要求区域内进行冲击强化加工，传统的路径明显无法满足冲击加工区域搭接率的一致性要求。采用基于单条边缘线偏置的计算方法，以确保激光冲击路径中所有冲击位置光斑搭接率的一致性。

传统叶盘激光冲击强化加工的轨迹规划算法存在一定缺陷，在生成加工轨迹之后需要进行繁琐的加工轨迹编辑工作(手工删除大量多余冲击点)，往往无法获得最佳的冲击点分布，并且会对激光冲击强化加工效果产生一定的负面影响。采用单条边缘线偏置方法获得复杂曲面激光冲击强化的加工轨迹，无需手工删除多余冲击点，可以获得最佳的冲击点分布，并取得较佳的激光冲击强化加工效果。在欧氏空间中，两点间最短的路径是直线段。给定一个曲面，偏置线在除曲率为零的点以外，主法线方向处与曲面的法线一致，先对加工曲面进行求解，以获得激光冲击强化加工轨迹。

2.5 轨迹机器人加工轨迹代码的生成

如图6所示，该激光冲击强化控制系统中包含两

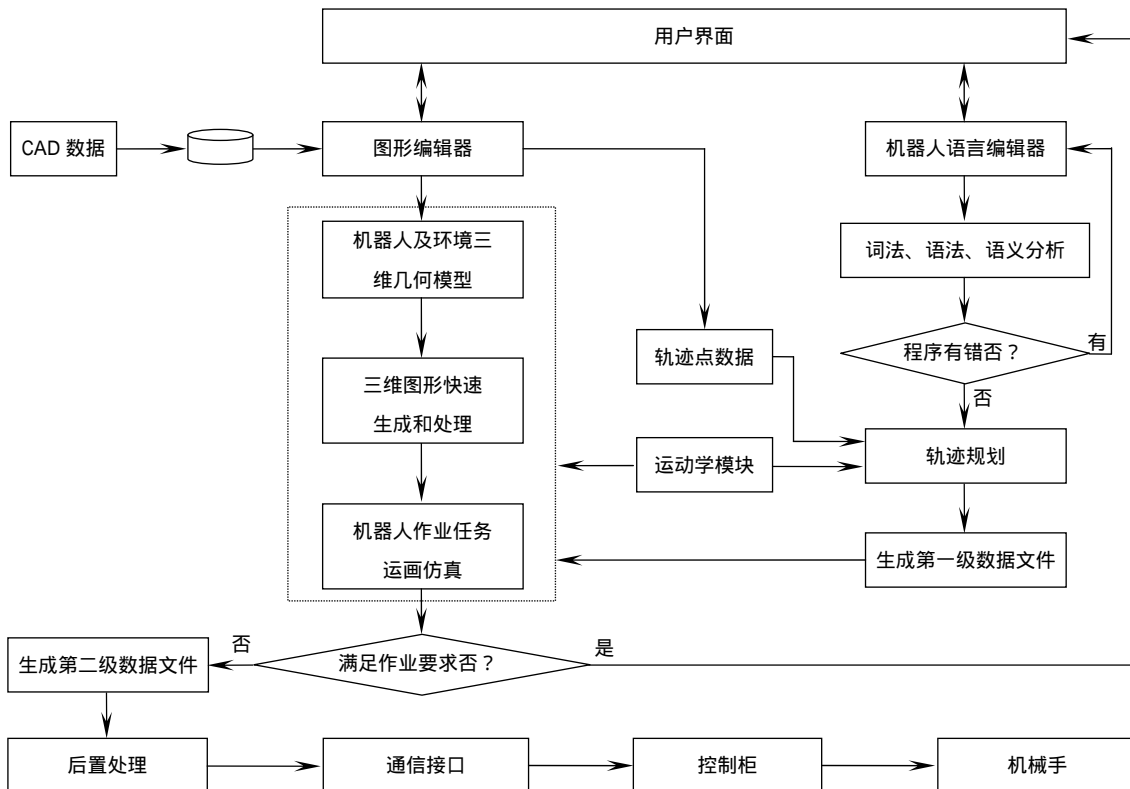


图6 加工轨迹代码生成。

Fig.6 Process track code generation.

个机器人，其中一个为轨迹机器人，在激光冲击强化过程中，机器人执行机构使激光束相对于加工件表面实现曲线轨迹运动，从而实现加工零件表面指定位置的强化处理；另一个为送水机器人，能够实现在金属靶材上形成厚度约为 1 mm ~ 4 mm（可调）的均匀稳定的水约束层，将等离子体限制在约束层和金属靶材之间。使用的轨迹机器人为六轴机械臂，实现复杂曲面加工轨迹运行。工控机接收到模拟软件生成的仿真数据，在机械臂控制柜中形成常规的直线和圆弧的插补指令，在加工复杂曲面或曲线时，结合 CAD/CAE 等画图软件，对复杂曲面进行分段加工，拟合大量运行轨迹指令，实现无限逼近，对于多维的复杂空间型面，还可采用基于改进凸包算法的复杂型面特征参数提取，进行复杂多重曲线拟合或分段拟合，采用插补技术实现加工。通过构建六坐标联动数控运动关系，分析三个直线运动和三个回转运动速度与运动的合成速度对应关系，推导合成速度计算公式，找出其与单坐标速度的对应关系，确定单坐标速度的插补计算公式，实现单点的稳速控制；给予单坐标速度的插补值，推算出六轴运动坐标的插补值，实现六坐标联动控制，确保合成速度的稳定给进，从而实现机械臂仿真与实际加工测试相结合的加工方法。

2.6 激光冲击强化加工数据的实时监测、报警功能

如图 7 所示，监测功能主要体现在激光冲击加工相关参数的实时显示和记录，从而使操作人员可以实时观测激光加工系统的当前运行数据。该模块分别对激光器和机器人实行监测，分别包括控制管理子模块、数据通信子模块、故障处理子模块、数据处理子模块等。报警功能可以实现激光器报警、冷却水装置报警以及机器人报警功能。

2.7 激光冲击强化模拟过程

如图 8，激光冲击强化过程的仿真过程是将 CAD/CAE 数据导入模拟软件，利用图形编辑器进行机器人及环境三维集合模型的建立、三维图形快速生成和处理以及机器人作业任务运行和仿真，通过运行运动学模块，生成第一级数据文件，实现轨迹规划，然后对生成的程序代码进行反馈验证，若程序准确无误则进行后置处理，然后通过通讯接口将加工信号传输到机器人的控制柜中，机器人的控制柜控制机械臂完成轨迹规划与激光聚焦。加工过程仿真是对机器人运动轨迹进行仿真验证，为避免轨迹编程误差引起的

不必要损失。其方法是通过轨迹仿真系统的作业总体布局，使各机器人到达全部工作点，从而获得机器人、工件和激光器光束的合理布置位置。通过这一总体布局，可以预先自动搜索机器人和工件位置的合理性。

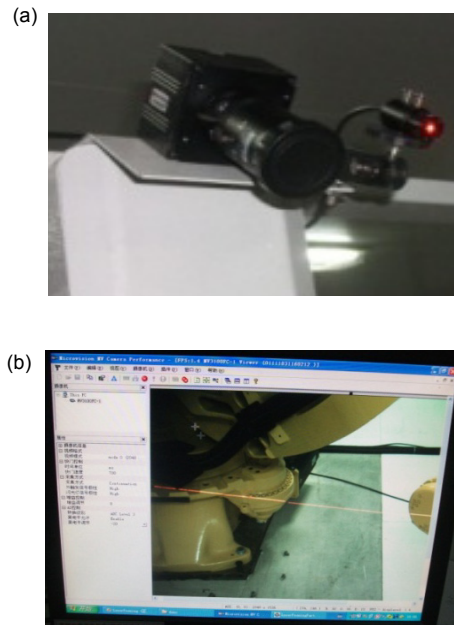


图 7 激光冲击强化实时监测、报警。(a) 实时监测摄像。(b) 实时监测可视界面。

Fig. 7 The real-time monitoring and alarm laser shock processing. (a) Real-time monitoring. (b) Visual interface of real-time monitor.



图 8 激光冲击强化装备的模拟系统操作界面。

Fig. 8 The operation interface of laser shock processing equipment simulation system operation interface.

目前已经利用该设备对叶片类复杂曲面进行激光冲击强化试验验证，叶盘使用寿命大幅提高，耐异物损伤能力增强。短弧汞灯钨极曝光次数提高 20%，航空发动机静子支撑寿命提高 50%等。

3 结论

本文介绍了自主设计研发的适用于复杂大型零件的激光冲击强化全自动可控操作系统,该操作系统是通过工控机/PLC集成控制激光器、机器人、辅助控制、质量检测装置与辅助系统等部分的系统工作,并通过实时监控系統远程观察加工状态有效避免重大事故的发生,实现自动化、数字化控制,并完成实时在线监控和信息交互反馈。同时,该控制系统添加激光冲击强化工艺试验数据记录功能,可根据实际需求调用后台工艺参数数据库,实现高效工艺参数优化。除此之外,该系统还能够实现激光冲击强化模型建立、加工过程有限元模拟、技工轨迹自动规划、加工策略制定等功能。

基金项目

国家重点研发计划(2016YFB1102704);国家机器人重点实验室。

参考文献

- Dai K, Villegas J, Stone Z, et al. Finite element modeling of the surface roughness of 5052 Al alloy subjected to a surface severe plastic deformation process[J]. *Acta Materialia*, 2004, **52**(20): 5771-5782.
- Spanrad S, Tong J. Characterisation of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, **528**(4-5): 2128-2136.
- See D W, Dulaney J L, Clauer A H, et al. The air force manufacturing technology laser peening initiative[J]. *Surface Engineering*, 2002, **18**(1): 32-36.
- King A, Steuwer A, Woodward C, et al. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, **435-436**: 12-18.
- Zhou J Z, Huang S, Zuo L D, et al. Effects of laser peening on residual stresses and fatigue crack growth properties of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, **52**: 189-194.
- Ocaña J L, Morales M, García-Ballesteros J J, et al. Laser shock microforming of thin metal sheets[J]. *Applied Surface Science*, 2009, **255**(10): 5633-5636.
- Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, et al. Development and application of laser shock processing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12): 15-19.
李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应[用]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(12): 15-19.
- Sathyajith S, S Kalainathan. Effect of laser shot peening on precipitation hardened aluminum alloy 6061-T6 using low energy laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(3): 345-348.
- Shi Chaoyang, Liu Chirong, Ying Caisu. Research and application of laser shock processing[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010, (4): 61-63.
石朝阳, 刘赤荣, 应才苏. 激光冲击强化技术研究与应用现状[J]. *机械设计与制造*, 2010, (4): 61-63.
- Nie Xiangfan, He Weifeng, Zang Shunlai, et al. Effect study and application to improve high cycle fatigue resistance of TC11 titanium alloy by laser shock peening with multiple impacts[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, **253**: 68-75.
- Nie Xiangfan, He Weifeng, Li Qipeng, et al. Improvement of structure and mechanical properties of TC6 titanium alloy with laser shock peening[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(5): 1115-1119.
聂祥樊, 何卫锋, 李启鹏, 等. 激光喷丸改善TC6钛合金组织和力学性能[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(5): 1115-1119.
- Peyre P, Fabbro R, Merrien P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, **210**(1-2): 102-113.
- Liu K K, Hill M R. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons[J]. *Tribology International*, 2009, **42**(9): 1250-1262.
- DeWald A T, Rankin J E, Hill M R, et al. Assessment of tensile residual stress mitigation in alloy 22 welds due to laser peening[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2004, **126**(4): 465-473.
- Montross C S, Wei Tao, Ye Lin, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021-1036.
- Chai Lihua, Chen Yuyong, Zhang Laiqi, et al. Effect of spark plasma sintering temperature on microstructure and mechanical properties of melt-spun TiAl alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**(3): 528-533.
- Tao Chunhu, Liu Qingquan, Cao Chunxiao, et al. Failure and prevention of aeronautical titanium alloy Aerospace titanium alloys failure and its prevention[M]. Beijing: Defense Press, 2002: 5-10.
陶春虎, 刘庆琮, 曹春晓, 等. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 5-10.
- Hu Taiyou, Qiao Hongchao, Zhao Jibin, et al. Develop of Laser Shock Peening Device[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(7): 732-737.
胡太友, 乔红超, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化设备的开发[J]. *光电工程*, 2017, **44**(7): 732-737.
- Li Songxia, Qiao Hongchao, Zhao Jibin, et al. Laser shock peening technology principle and research development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 569-576.
李松夏, 乔红超, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化技术原理及研究发展[J]. *光电工程*, 2017, **44**(6): 569-576.