

基于机器人的柔性激光再制造系统

刘立峰^{1,2} 杨洗陈¹ 王 非¹ 刘 正¹ 张要武¹

(¹天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160
²天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300160)

摘要 针对激光再制造技术自动化、柔性化和智能化的发展方向,开发了一种符合工业应用的集成化大功率柔性激光再制造系统,该系统利用机器人和激光器现有的接口,进行了系统集成的软硬件设计。开展了激光同轴送粉系统和温度检测视觉系统研究,实现了三维激光熔覆以及激光熔池温度检测。应用该系统对钻铤和大型车床导轨进行了激光再制造,取得了良好的效果。

关键词 激光技术;激光加工;再制造;机器人;温度检测

中图分类号 TG156.99;TP249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1203003

Flexible Laser Remanufacturing System Based on Robot

Liu Lifeng^{1,2} Yang Xichen¹ Wang Fei¹ Liu Zheng¹ Zhang Yaowu¹

(¹Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China
²School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract According to the developing direction of laser remanufacturing technique with automation, flexibility and intelligence. An integrated high-power flexible laser remanufacturing system for industry application is studied, which is developed by means of the existing interface of the robot, the laser and the design of hardware and software for system integration. Coaxial powder feeding system and temperature vision system are developed to three-dimensional cladding and temperature measurement in laser molten pool. Some samples are built by the flexible laser remanufacturing system. It is showed that the system is efficient.

Key words laser technique; laser processing; remanufacturing; robot; temperature measurement

OCIS codes 140.3390; 350.4600; 120.4640; 150.5758; 350.3850

1 引 言

激光再制造的技术基础是激光熔覆,它以激光熔覆为修复技术平台,结合激光快速成形技术和方法,采用高能激光束作为热源,以预置或同步供给的金属粉末(丝)为材料,以原有损伤零件作为再制造毛坯,在零件基体上逐层堆积,最后生成与原型零件近形的三维实体,使零件恢复尺寸形状和使用性能;或对长期使用过的产品零件的性能、可靠性和寿命等通过再制造加以恢复和提高。从而使产品或设备在对环境污染最小、资源利用率最高、投入费用最小

的情况下重新达到最佳的性能要求。

激光再制造系统所需要激光器功率一般在几百瓦到数千瓦,要求高功率、高光束质量。已有的工作多采用 CO₂ 激光器^[1,2],光束依靠光学反射镜转折传输,光路体积大,一般组装在 CNC 机床上,加工柔性小。近年来可以耦合到光纤、具有良好光束质量的大功率 Nd:YAG 激光器取得了飞速发展,国内外几千瓦 Nd:YAG 激光器已形成产品。由于 Nd:YAG 激光波长短(1.06 μm),在金属材料中的吸收率高于 CO₂ 激光器,可以用光纤传输,可与机器人

收稿日期: 2011-06-13; **收到修改稿日期**: 2011-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(60478004)和天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)资助课题。

作者简介: 刘立峰(1975—),男,博士研究生,讲师,主要从事激光加工理论及应用、信号处理与系统等方面的研究。

E-mail: liulif2005@126.com

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用等方面的研究。

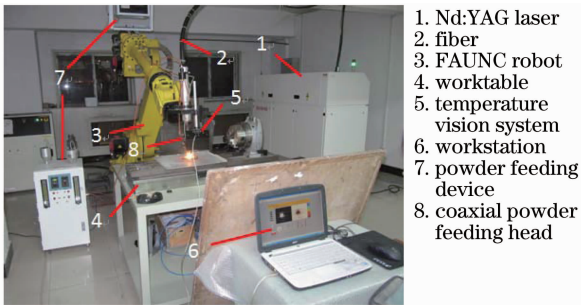
E-mail: yangxich@126.com

耦合,具有良好加工柔性,可以满足机械等行业中用到的熔覆、切割、焊接等工艺的加工要求^[3],实现柔性化三维激光加工。国内外有关单位进行了激光加工机器人的研究^[4~6],集成化、柔性化、智能化成为未来激光加工系统的发展趋势^[7]。

针对激光再制造对象的多样性、再制造形状的复杂性,以及激光再制造系统需要具备较强的三维空间加工能力,天津工业大学激光技术研究所开发了一套先进的基于机器人的柔性激光再制造系统,包含硬件系统和软件系统两大组成部分,并对其关键问题进行了一些研究工作。

2 柔性激光再制造系统的构成

根据激光再制造零件的多品种、结构多样性以及激光再制造加工过程的特点,研发了一套基于机器人的8自由度柔性激光再制造系统,主要包括6自由度机器人系统与2自由度工作台系统构成的运动执行机构、高功率激光器系统与光纤耦合传输系统构成的能量供给系统、远程送粉系统、激光再制造同轴送粉工作头、供气装置、温度检测视觉系统和激光再制造工作站组成,如图1所示。



1. Nd:YAG laser
2. fiber
3. FAUNC robot
4. worktable
5. temperature vision system
6. workstation
7. powder feeding device
8. coaxial powder feeding head

图1 基于机器人的柔性激光再制造系统
Fig.1 Flexible laser remanufacturing system based on robot

柔性激光再制造系统是集水、气、光、机、电控制于一体的复杂控制系统。主要包括激光器控制、机器人通信、送粉器控制、工作台控制、气体压力控制以及激光熔池检测等,其关键是解决机器人和其他设备之间的信息互联与协调问题。机器人自身配有多块输入/输出(I/O)卡,机器人I/O口硬件连接方式如图2所示。主要通过采用机器人数字输入/输出(DI/DO)控制串接在联动控制箱中的继电器或电磁阀来实现对其他设备的控制,并且还要控制各工序的时序,使系统各单元协调工作。

系统选用了一台FAUNC公司R-2000iB/125L型6轴机器人,配以2自由度的工作台(一维旋转台

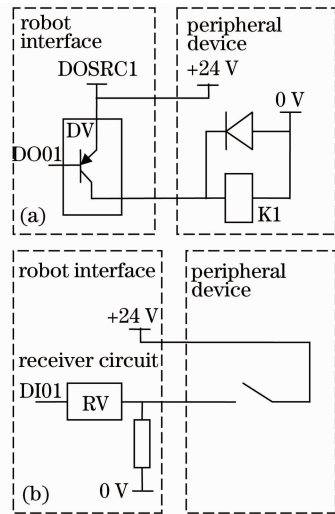


图2 机器人I/O口硬件连接方式。(a)输出;(b)输入

Fig.2 Robot I/O connection. (a) Output; (b) input
和一维y向平移台)可以实现复杂形状曲面的激光熔覆要求。激光器为NCLT CW 1000型大功率连续Nd:YAG激光器,最大激光输出功率1kW;通过光纤耦合输出并经过整形聚焦后进入激光再制造同轴送粉工作头。

同轴送粉方式主要有重力送粉法和气动送粉法。气动式同轴送粉可以使粉体在管道中达到悬浮状态,实现金属粉末远距离输送及多角度送粉。从粉嘴射出的圆环状气/固两相流在粉嘴出口交汇如图3所示。

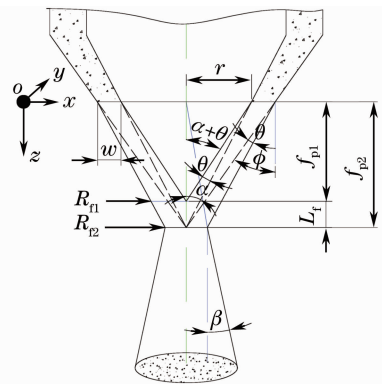


图3 气粉两相流示意图

Fig.3 Diagram of gas-powder flow

图中的 r 是粉腔内壁到轴心的距离, w 是出粉口的宽度, θ 是粉末流束的发散角, ϕ 是粉末外缘与垂直方向的夹角, α 是粉束内侧与垂直方向的夹角, β 是粉末流束的扩张角。 f_{p1} 是粉流束的上焦距, f_{p2} 是下焦距, R_{f1} 是上焦点焦半径, R_{f2} 是下焦点焦半径, L_f 是粉流束的焦深。

根据相互间的几何关系,可以求出

$$f_{p1} = \frac{r}{\tan(\theta + \alpha)}, \quad (1)$$

$$f_{p2} = \frac{r + w}{\tan \phi}, \quad (2)$$

$$L_f = f_{p2} - f_{p1} = \frac{r + w}{\tan \phi} - \frac{r}{\tan(\alpha + \theta)}, \quad (3)$$

$$R_{f1} = (r + w) - f_{p1} \tan(\phi - \theta) = (r + w) - r \frac{\tan(\phi - \theta)}{\tan(\theta + \alpha)}, \quad (4)$$

$$R_{f2} = R_{f1} - L_f \tan(\phi - \theta) = R_{f1} - \left[\frac{r + w}{\tan \phi} - \frac{r}{\tan(\alpha + \theta)} \right] \tan(\phi - \theta). \quad (5)$$

应用数字粒子图像测速(DPIV)技术对同轴送粉的粉末流浓度进行了试验研究。开发的同轴送粉工作头如图4所示,该工作头模块化设计,主要包括四路分粉器、粉嘴、进粉口、进气孔、内锥体、外锥体、进水口、粉腔和出粉口等,每个模块均可单独拆装,可以根据再制造工艺要求很方便地进行更换,以满足不同材料、不同厚度以及不同工艺的加工要求。



图4 同轴送粉工作头

Fig. 4 Coaxial powder feeding head

国内外进行了许多彩色 CCD 相机检测温度场的研究^[8,9],主要是基于比色测温 and 全灰度测温两种方案。本研究工作为了得到特定波长的灰度值,在 CCD 相机前加装一个中心波长为 $\lambda_r = 650 \text{ nm}$ 的窄带滤光片,带宽为 10 nm ,即 $645 \sim 655 \text{ nm}$,而 $\epsilon(\lambda, T)$ 即熔池的发射率受波长的影响较小,因此可以假定 $\epsilon(\lambda, T)$ 为 T 的应变变量,即 $\epsilon(T)$,推导出特定波长下 CCD 输出图像的灰度值与温度的对应关系,得到 CCD 测温公式^[10]

$$T_r = \frac{C_2}{\lambda_r \left\{ \ln \left[0.25 A_r \mu_r t_r \left(\frac{2a}{f} \right)^2 K_{\lambda_r} \epsilon(T_r) C_1 T(\lambda_r) \right] - \ln(H_r \lambda_r^5) \right\}}, \quad (6)$$

式中 $A_r, \mu_r, t_r, K_{\lambda_r}, T(\lambda_r)$ 可以由黑体炉标定得到, C_1 为普朗克第一辐射常数; C_2 为普朗克第二辐射常数,出射光瞳直径为 $2a$,像方焦距为 f 。

激光熔池温度检测视觉系统的组成如图5所示,主要包括 CCD 相机、窄带滤光片、中性衰减片、保护镜片。

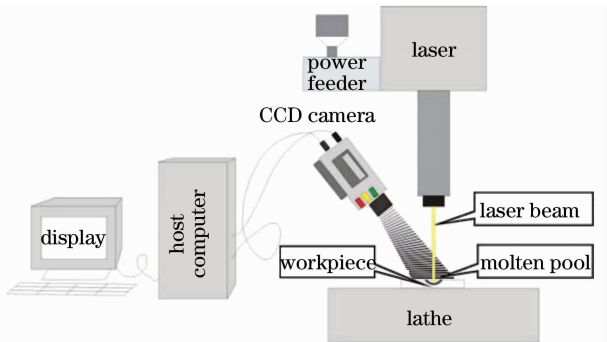


图5 温度检测视觉系统

Fig. 5 Diagram of temperature vision system

由 CCD 相机实时采集激光熔池图像,经图像读取、灰度处理、平滑处理、阈值分割、灰度图着色、生成伪彩色图,实时显示温度场二维(2D)分布及温度场数值,如图6所示。该 CCD 温度检测视觉系统由

试验测得,温度检测范围为 $700 \text{ }^\circ\text{C} \sim 2400 \text{ }^\circ\text{C}$,测温精度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

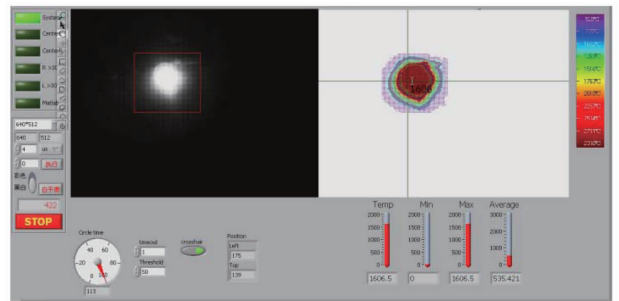


图6 图像采集和处理界面

Fig. 6 Image acquisition and processing interface

3 激光再制造工作站软件设计

激光再制造需要考虑成形结构和基体的相互作用,使局部成形结构和基体结合良好,且成形结构的形状精度高,对基体热影响小等。对于很多大型复杂的零件,示教编程已经不能满足需要。离线自动编程可以克服示教编程的不足,具有显著的优点。在机器人控制器之外加一台移动计算机作为激光再制造工作站(上位机),可以在工作站添加各种检测

装置和开发需要的各种功能,完成自行设计的各种功能,机器人控制器则实现基本的运动控制,如图 7 所示。

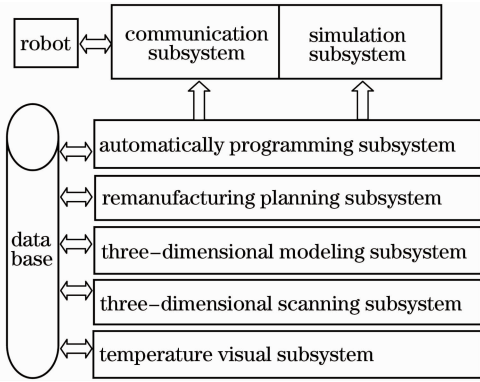


图 7 激光再制造工作站软件组成示意图
Fig. 7 Diagram of laser remanufacturing workstation software

激光再制造的目的是对零件损伤部位进行修复,需要重建其三维(3D)模型^[10,11],以便进行离线编程。三维建模子系统功能是建立再制造对象的 3D 模型,建模方式分 2 种:1)有零件尺寸图纸,通过正向设计建立零件 3D 模型;2)只有再制造零件时,通过逆向工程建立再制造零件 3D 模型。三维扫描子系统由零件三维形貌扫描硬件装置和零件三维模型重构专用软件组成,它根据双目立体视觉三维测量原理,由两个互补金属氧化物半导体(CMOS)相机和结构光组成,双目 CMOS 相机采集结构光反射信息,送入工作站经三维模型重构专用软件处理后,即可生成待修复零件 3D 模型。能达到单道最大扫描宽度 200 mm。普通扫描速度 10~50 mm/s,最大误差小于 1 mm;高精度扫描速度 1 mm/s,最大误差小于 0.1 mm。然后进行识别和提取出待修复区域。

再制造规划子系统根据零件待修复区域进行激光再制造路径规划(单道、多道、搭接量、层厚等)以及工艺规划(设置激光再制造参数包括激光功率、离焦量、送粉量、熔覆速度、气体流量等)^[12]。取 d 作为机器人激光加工步长对加工路径进行离散,步长 d 选取要保证在加工路径曲线曲率大处有足够的加工点以保证再制造的精度。通过程序自动编程子系统自动将数据转换为激光再制造机器人运行控制程序,将生成的激光再制造机器人控制程序导入 FANUC ROBOGUIDE 软件中进行虚拟的运动仿真,检查有无碰撞干涉,优化熔覆路径和参数。优化工作完成后,将激光再制造机器人控制程序通过通

信模块传输到机器人控制柜,进行实际的激光熔覆再制造。

4 大型工件激光再制造修复应用

4.1 石油钻铤激光熔覆再制造

某用户设备石油钻铤三条刀刃在工作中磨损严重,为恢复其尺寸和使用性能,并提高其耐磨性,要求在钻铤每条刀刃需要激光再制造耐磨层 3 mm,表面不得有裂纹、折叠、凹坑和结疤等缺陷。

1) 修复材料:进行材料成分测试,根据测试得到的材料成分情况,选用镍基合金粉 Stelcar 65 为激光熔覆材料。

2) 采用的工艺参数:激光功率 900 W,扫描速度 6 mm/s,离焦量 7 mm,送粉量 12 g/min,载气量 3 L/min。

3) 激光再制造离线编程及仿真

由于石油钻铤刀刃是空间曲面,激光再制造过程中要求激光光束与加工表面垂直,还要求机器人根据零件的表面轮廓不断调整激光同轴送粉工作头的姿态。示教编程不仅速度慢、效率低而且精度也得不到保证。为实现三维激光再制造离线自动编程,就必须结合零件数字模型进行路径规划,根据工艺要求控制机器人走出路径的运动轨迹。

首先获取被加工钻铤三条刀刃的再制造毛坯模型,将其与标准模型进行配准,计算缺损面到标准面的距离作为再制造毛坯表面的缺损量,记录下各部位的缺损量以及对应的缺损位置,建立再制造模型。采用切片技术进行激光再制造路径离线规划如图 8 所示,然后进行自动编程、加工过程仿真及优化。

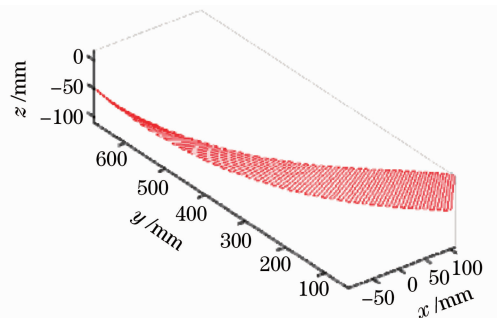


图 8 钻铤再制造路径

Fig. 8 Path of drill collar remanufacturing

4) 激光再制造修复现场如图 9 所示,激光再制造熔洛氏硬度大于 60HRC,修复后完全恢复零件原来表面形状,提高耐磨损性能。

4.2 机床导轨表面强化激光再制造

某用户的大型车床设备导轨长,磨损严重,硬度



图9 钻铤熔覆图

Fig.9 Figure of drill collar cladding

降低,表面不平整,床体质量很大,用常规方法很难加工,并且成本高。采用导轨磨损面进行激光表面网格强化工艺,提高其硬度、耐磨损性能。

1) 采用的工艺参数:激光功率 800 W,扫描速度 8 mm/s。为了避免激光光束反射进入工作头对光路造成损害,使激光束轴线与加工面的法线有一定角度。

2) 激光再制造离线编程及仿真

大型车床导轨磨损面待加工 6 个面,其中 2 个水平面,4 个斜 45°面,网纹的路径较复杂,用示教盒编程的方法很难实现。采用离线编程的方法指定网格区域的四个边界点 P1,P2,P3,P4,设定线距,路径规划工具会自动插补出中间的所有点,并按照一定顺序生成路径,如图 10 所示。

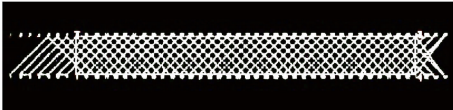


图10 网格路径规划

Fig.10 Grid path planning

生成的路径经过自动编程器转化为机器人识别的指令语句,导入 ROBOGUIDE 仿真环境。在仿真环境里检测规划的路径是否合理,是否有奇异点,是否与周围环境有碰撞。经优化后的程序传送到机器人控制柜。

3) 大型车床导轨激光再制造修复现场如图 11 所示,原导轨表面洛氏硬度为 34~37.9HRC,修复后激光硬化带洛氏硬度为 54.3~58HRC。经使用证明大型车床再制造效果良好,具有高精度和耐用性。

5 结 论

采用气/固两相流理论设计激光同轴送粉工作头,能很好地向加工部位均匀、精确地输送粉末,较好地满足了三维再制造要求。采用全灰度测温方法



图11 车床再制造现场图

Fig.11 Figure of large lathe remanufacturing

开发了温度检测视觉系统,能实时显示所监测激光熔池的温度分布和温度数值。根据激光再制造要求设计了柔性激光再制造系统专业软件,可以实现零件模型的建立、激光再制造路径及工艺规划、自动编程和仿真等功能。利用该柔性激光再制造系统对石油钻铤和大型车床导轨分别进行了激光再制造和激光表面强化工程应用研究,实现了对复杂形状金属零件的激光再制造。

参 考 文 献

- 1 Lu Yaojun, Chen Guangxia, Hu Qianwu *et al.*. Research of direct laser fabrication of metallic materials by Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 180~184
卢尧君, 陈光霞, 胡乾午等. Nd:YAG 激光熔覆快速制造技术研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 180~184
- 2 Yang Xichen, Lei Jianbo, Wang Yunshan *et al.*. Research on cladding characteristics comparing Nd:YAG laser with CO₂ laser [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2003, **22**(5): 1~4
杨洗陈, 雷剑波, 王云山等. Nd:YAG 激光和 CO₂ 激光熔敷性能比较研究[J]. *天津工业大学学报*, 2003, **22**(5): 1~4
- 3 Li Qiang, Jiang Menghua, Lei Hong *et al.*. High-power laser processing system for industry application[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1847~1852
李强, 姜梦华, 雷 匈等. 工业用大功率固体激光加工系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1847~1852
- 4 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2780~2798
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 5 Zhao Chen, Wang Gang. Research report of industrial robot developing in China[J]. *Robot Technique and Application*, 2009, (2): 8~13
赵 臣, 王 刚. 我国工业机器人产业发展的现状调研报告[J]. *机器人技术与应用*, 2009, (2): 8~13

- 6 Yang Xichen. Laser remanufacturing robot [C]. Quanzhou; Session: Laser Manufacturing and Its Industrial Application 08OC11_005, Chinese Optical Society, 2008 Symposium, 2008
杨洗陈. 激光再制造机器人[C]. 泉州: 中国光学学会 2008 年学术年会. 激光制造技术及产业化专题, 2008
- 7 Yu Gang, Yu Huoji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001
虞 钢, 虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 8 Xi Mingzhe, Yu Gang, Zhang Yongzhong *et al.*. Interaction of the laser boam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 562~566
席明哲, 虞 钢, 张水忠 等. 同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 562~566
- 9 Lei Jianbo, Yang Xichen, Chen Juan *et al.*. Measurement of surface temperature field distribution in molten pool of laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1605~1608
雷剑波, 杨洗陈, 陈 娟 等. 激光熔覆熔池表面温度场分布的检测[J]. 中国激光, 2008, **35**(10): 1605~1608
- 10 Yang Xichen, Zhang Haiming, Liu Lifeng *et al.*. Machine vision in laser remanufacturing robot [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601008
杨洗陈, 张海明, 刘立峰 等. 激光再制造机器人光电视觉技术进展[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0601008
- 11 Zhang Haiming, Yang Xichen, Gao Gui. 3D reconstruction of parts to be processed by laser remanufacturing robot[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2937~2944
张海明, 杨洗陈, 高 贵. 激光再制造机器人待加工零件形貌三维重建[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2937~2944
- 12 Liu Lifeng, Yang Xichen. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0703008
刘立峰, 杨洗陈. 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0703008

栏目编辑: 宋梅梅