

文章编号: 0258-7025(2009)11-2780-19

# 激光加工机器人技术及工业应用

杨洗陈

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 激光加工机器人是国际上面向 21 世纪的先进制造技术。综述了激光机器人的原理、构成、种类和若干重大工业应用。重点研究讨论了激光加工机器人的某些关键单元技术——光纤传输的高功率激光技术、机器人本体技术、机器人编程技术、机器人智能化和网络化技术及反求工程重建修复区三维(3D)形貌技术。提出了激光加工机器人未来发展的一些重要方向——高功率激光远程加工和柔性制造技术、具有机器视觉和听觉功能的智能控制技术和远程监控功能的网络化管理技术。

**关键词** 激光技术;机器人;编程;智能化;网络化;反求工程;机器视觉与听觉

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2780

## Laser Processing Robot and Its Industrial Applications

Yang Xichen

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnical University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** Laser processing robot is to be toward 21st advanced manufacturing technology in the world. The principles, constructions, kinds and applications of the robot are comprehensively summarized. Some key techniques for laser robot are focussed on fiber transferable lasers, robot body, online and offline programming, robot intelligence and networking and three-dimensional (3D) reconstruction of repair area by inverse engineering. Laser robot development trends of remote processing, machine vision and hearing, robot intelligence and networking are presented.

**Key words** laser technique; robot; programming; intelligence; networking; inverse engineering; machine vision and hearing

## 1 引 言

几乎在激光诞生的同时,1962 年美国 Unimation 公司推出首台工业机器人。此后,机器人技术经历了一系列不断的发展过程。直到 20 世纪 90 年代全球信息化浪潮风起云涌,计算机技术、微电子技术、网络技术和先进制造技术等快速进步,工业机器人技术也得到了飞速发展。它具有重复性精确生产特征,适应制造业中规模化批量生产要求,装配在生产线上代替人工作业,不仅解除了工人的繁复劳动,而且提高了生产质量。它可以流动作业,适应个性化生产需求。目前工业机器人技术日趋成熟,已经成为一种标准设备而广泛应用于工业界,国内外形成了一批著名的工业机器人公司<sup>[1,2]</sup>。

近年来激光技术飞速发展,涌现出可与机器人柔性耦合的光纤传输的高功率工业型激光器。先进制造领域在智能化、自动化和信息化技术方面的不断进步促进了机器人技术与激光技术的结合,特别是汽车产业的发展需求,带动了激光加工机器人产业的形成与发展。从 20 世纪 90 年代开始,德国、美国、日本等发达国家投入大量人力物力进行研发激光加工机器人。进入 2000 年,德国 KUKA,瑞士的 ABB,日本 FANUC 等机器人公司均研制激光焊接机器人和激光切割机器人的系列产品。目前在国内外汽车产业中,激光焊接机器人和激光切割机器人已成为最先进的制造技术,获得了广泛应用。德国大众汽车、美国通用汽车、日本丰田汽车等汽车装配

收稿日期:2009-07-28;收到修改稿日期:2009-08-28

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: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方面的研究。

E-mail: yangxich @126. com

生产线上,已大量采用激光焊接机器人代替传统的电阻点焊设备,不仅提高了产品质量和档次,而且减轻了汽车车身重量,节约了大量材料,使企业获得很高的经济效益,提高了企业市场竞争能力。在中国,一汽大众、上海大众汽车公司也引进了激光机器人焊接生产线。目前有沈阳新松机器人公司涉足激光切割和焊接机器人制造领域<sup>[3,4]</sup>。

随着激光直接制造和再制造技术的发展,面对航空航天、冶金、汽车等行业快速原形和快速制造的需求,从 2002 年起,国际上开始研发激光熔覆机器人。我国是世界上最大的发展中国家,拥有千万套国产大型贵重装备和进口高精尖的昂贵设备,现场快速修复有广阔的市场需求。天津工业大学在天津市科技支撑计划和国家自然科学基金资助下,开展了激光再制造机器人的研究<sup>[3~9]</sup>。

虽然激光加工机器人取得了广泛的工业应用,但由于它是基于激光技术和机器人技术的高度集成系统,激光加工又是复杂的智能工程,激光加工机器人仍处于初期发展阶段,许多技术尚待开发研究解决。激光加工机器人在国内刚刚开始应用,无论激光领域还是工业应用领域对它还处于不熟悉状态。为此,本文结合我们的工作,对激光加工机器人一些关键技术进展——光纤传输的高功率激光技术、机器人本体技术、机器人编程技术、机器人智能化、网络化技术和反求工程重建三维(3D)形貌技术等作综合报道,期望得到国内业界关注,促进该类技术的发展应用。

## 2 激光加工机器人简介

### 2.1 激光加工机器人组成

机器人是高度柔性加工系统,所以要求激光器必须具有高度的柔性,目前都选择可光纤传输的激光器。智能化激光加工机器人主要由以下几大部分组成<sup>[10~12]</sup>:1) 高功率可光纤传输激光器;2) 光纤耦合和传输系统;3) 激光光束变换光学系统;4) 六自由度机器人本体;5) 机器人数字控制系统(控制器、示教盒);6) 计算机离线编程系统(计算机、软件);7) 机器视觉系统;8) 激光加工头;9) 材料进给系统(高压气体、送丝机、送粉器);10) 激光加工工作台。

图 1 为一种激光熔覆机器人的示意图,图中给出了其主要组成部分。

### 2.2 激光加工机器人工作原理

从高功率激光器发出的激光,经光纤耦合传输到激光光束变换光学系统,光束经过整形聚焦后进

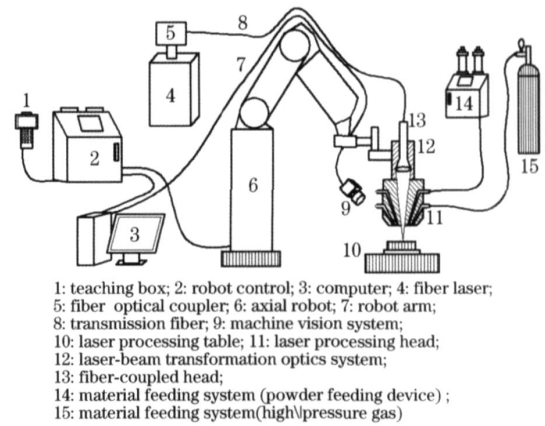


图 1 激光熔覆机器人组成示意图

入激光加工头。根据用途不同(切割、焊接、熔覆)选择不同的激光加工头,配用不同的材料进给系统(高压气体、送丝机、送粉器)。激光加工头装于六自由度机器人本体手臂末端,如图 2 所示。激光加工头的运动轨迹和激光加工参数是由机器人数字控制系统提供指令进行的。先由激光加工操作人员在机器人示教盒上进行示教编程或在计算机上进行离线编程。材料进给系统将材料(高压气体、金属丝、金属粉末)与激光同步输入到激光加工头,高功率激光与进给材料同步作用完成加工任务。机器视觉系统对加工区检测,检测信号反馈至机器人控制系统,从而实现加工过程的适时控制。

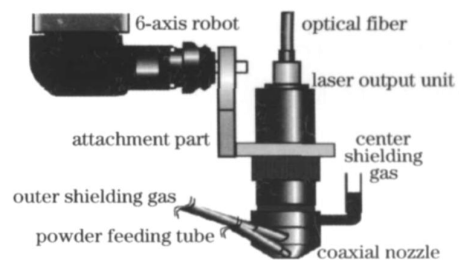


图 2 激光加工头与机器人手臂末端连接示意图

Fig. 2 Connection diagram of laser processing head and the robot arm

### 2.3 激光加工机器人类型

激光加工机器人是光机电一体化化的复杂系统,可以按机械结构、用途、控制等进行许多种分类。

按机器人机械结构分,目前激光加工机器人主要有两种类型:框架式机器人和关节式机器人。

图 3 所示为一种框架式激光加工机器人。这种机器人主要由三坐标高精度龙门框架、数字控制系统和驱动系统、高功率激光器、传输光纤、三自由度旋转光束头和检测系统组成。这种机器人具有加工

范围大,加工精度高等特点。适合各种编程和系统集成,至少可实现六坐标加工,即 3D 直线运动坐标( $x, y, z$ )和 3D 转动坐标( $\alpha, \beta, \gamma$ )。所有坐标轴的驱动均采用交流伺服电机、直线滚动导轨、滚珠丝杠螺母副等。这种机器人可靠性高,但造价也高。



图 3 框架式激光加工机器人

Fig. 3 Framing robot for laser processing



图 4 关节式激光加工机器人

Fig. 4 Prosthetic robot for laser processing

图 4 是一种关节式激光加工机器人。这种激光加工机器人主要由六自由度关节式机器人本体系统(机座、支柱、腰、臂、腕)、数字控制系统和驱动系统、高功率激光器、传输光纤、检测系统及激光工作头组成,它可以至少进行六个自由度加工。关节式机器人由于它在相同几何参数和运动参数条件下具有较大的活动空间,动作灵活,适于现场应用。因此,在国内外生产线上都优先装备关节式机器人。

## 2.4 激光加工机器人控制方式

按加工过程控制的智能化程度分,机器人可有三种编程层次。

### 2.4.1 在线编程机器人(On-line Program)

在线编程主要是示教编程,它的智能性最低,称为第一代机器人。根据实际作业条件事先预置加工路径和加工参数,在示教盒中进行编程,通过示教盒操作机器人到所需要的点,教给机器人按此程序动作 1 次,并把每个点的位姿通过示教盒保存起来,这样就形成了机器人轨迹程序。机器人将示教动作记忆存储,在正式加工中机器人按此示教程序进行作业。示教编程具有操作简单,对人员编程技术要求低,可靠性强,可完成多次重复作业等特点。

### 2.4.2 离线编程机器人(Off-line Program)

机器人离线编程是指部分或完全脱离机器人,借助计算机来提前编制机器人程序,它还可以具有一定的机器视觉功能,称为第二代机器人。它一般是采用计算机辅助设计(CAD)技术建立起机器人及其工作环境的几何模型,再利用一些规划算法,通过对图形的控制和操作,在离线的状况下进行路径规划,经过机器人编程语言处理模块生成一些代码,然后对编程结果进行 3D 图形动画仿真,以检验程序的正确性,最后把生存的程序导入机器人控制柜中,以控制机器人运动,完成所给的任务。此外,它可装有一些温度、位形等传感器,具有一定的机器视觉功能,根据机器视觉获得的环境和作业信息在计算机上进行离线编程。机器人离线编程已被证明是一个有力的工具,可增加安全性,减少机器人不工作时间和降低成本等。

### 2.4.3 智能自主编程机器人(Intelligent Program)

智能自主编程机器人装有多种传感器,能感知多种外部工况环境,具有一定的类似人类高级智能,具有自主地进行感知、决策、规划、自主编程和自主执行作业任务能力,称为第三代机器人。由于计算机现代人工智能技术尚未获得实用性的突破,智能自主编程机器人仍处于试验研究阶段。

## 3 用于激光加工机器人的高功率激光器

机器人是高度柔性加工系统,它对激光器的首位要求是具有高度的光束传输柔性,此外还要求激光器具有光束质量高、稳定、可靠、体积小、重量轻等特点,便于与机器人进行耦合集成。

激光加工机器人的第一代光源是轴流  $\text{CO}_2$  激光器。但  $\text{CO}_2$  激光波长  $10.6 \mu\text{m}$  不能光纤传输。 $\text{CO}_2$  激光器笨重地组装在机器人上,光束依靠光学反射镜转折传输,光路体积大重量大,加工柔性小,应用受到很大的限制。20 世纪 90 年代后,千瓦级灯抽运 Nd:YAG 激光器和二极管抽运全固态激光器(DPSSL)成为激光加工机器人的第二代光源,光束可以光纤传输并与机器人耦合,光路体积大为缩小,具有很高的加工柔性。21 世纪初,随着激光技术飞速发展,涌现出多种具有高度柔性的可光纤传输的高功率工业型激光器:光纤激光器、盘片激光器和半导体激光器,成为激光加工机器人的第三代光源。第三代光源体积大大缩小,集成后的机器人体积小重量轻,可以实现现场流动作业;全光纤传输加工柔性大大增强;激光能量可以分成多路传输,实现

多路加工;极细的光纤可以传输大功率光束,可以在很小空间内进行加工。

### 3.1 灯抽运 Nd YAG 激光器

以3D圆棒形Nd YAG晶体材料为激活介质,采用灯抽运方式,波长 $1.06\ \mu\text{m}$ ,可以制成连续和重频器件。自1971年美国西尔凡尼亚公司推出Nd YAG激光系统以来,经过30多年的发展,Nd YAG激光器技术已比较成熟,成为激光加工的主流器件<sup>[13]</sup>。但是存在电光转换效率低(3%)、热效应严重和光束质量差等缺点。由于其价格便宜,维护简单,目前仍在科研和生产中采用。我国目前从事大功率Nd YAG激光器研发和生产单位主要有:中国科学院物理研究所、北京工业大学、华中科技大学、武汉楚天激光有限公司等。近年来北京工业大学在千瓦级灯抽运YAG激光器研发上取得了突破性进展,已有1~3 kW产品(图5)进入市场。

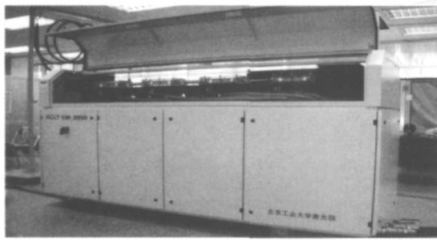


图5 北京工业大学千瓦级灯抽运YAG激光器

Fig.5 kW lamp-pumped YAG laser made by Beijing Polytechnic University

### 3.2 全固态激光器

全固态激光器是在Nd YAG激光器基础上取得了三项突破发展起来的<sup>[14]</sup>:

- 1) 板条形面冷却技术替代圆棒形扩散冷却方式;
- 2) 高吸收转换掺钇Yb YAG材料替代低吸收转换的Nd YAG介质;
- 3) 激光二极管(LD)抽运技术替代灯抽运方式。

日本在2005年研制出平均输出功率10 kW电光效率大于20%的高功率全固态激光器。德国Trumpf公司已有LD抽运的2, 4.5和6 kW系列YAG激光器,光束质量分别为12, 16和25 mm·mrad。图6是德国Rofin公司6 kW级LD抽运YAG激光器外形及原理图,主要技术指标为:波长 $1.06\ \mu\text{m}$ ;最大功率5.5 kW(工件上4 kW);光束质量25 mm·mrad。全固态激光器提高了输出功率和光束质量,可以用于激光切割、焊接、打孔、雕

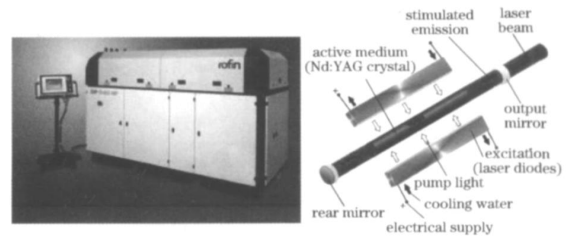


图6 Rofin公司LD抽运YAG激光器

Fig.6 LD-pumped YAG laser made by Rofin's company  
刻、热处理和熔覆等作业。

### 3.3 光纤激光器

YAG固体激光器最大的缺点是电光转换效率低,造成很大的热积累和很强的热透镜效应。激光工作物质YAG的几何结构是影响输出功率和光束质量提高的重要因素,为此将激光介质由3D形状的晶体做成一维的细长光纤。高功率光纤激光器仍遵循传统激光原理:工作物质为D型结构双包层特种光纤;光学谐振腔选用光纤光栅;抽运系统为LD侧面抽运。图7为高功率光纤激光器的原理图。

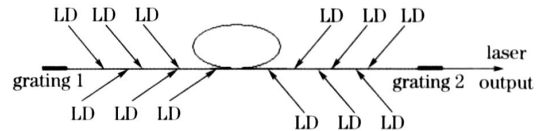


图7 高功率光纤激光器的原理图

Fig.7 Schematic diagram of high power fiber laser

1987年英国南安普顿大学和美国贝尔实验室通过实验证明了光纤放大器的可行性。1988年Snitzer等提出双包层光纤概念。随着高功率LD抽运技术和双包层光纤技术的实用化,光纤激光器出现了革命性发展,2004年美国SPI公司的单根双包层光纤激光器达到1 kW输出水平。德国IPG Photonics公司采用组束技术,在2005年德国慕尼黑国际激光和光电子展览会上推出系列的高功率光纤激光器,标志着工业级光纤激光器取得了里程碑的进展,光纤激光器成为工业激光的主流产品和未来趋向<sup>[15-19]</sup>。

图8为IPG公司YLR-7000光纤激光原理及性能参数。最大输出功率(工件上)6.9 kW,光斑直径 $519\ \mu\text{m}$ ,波长 $(1070 \pm 5)\ \text{nm}$ ,光束质量 $18.5\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ,光纤芯径 $300\ \mu\text{m}$ ,效率20%。图9为IPG公司YLR-10 kW光纤激光器外形尺寸及性能,其主要参数:最大输出功率(工件上)10.5 kW, $f = 200\ \text{mm}$ 时光斑直径 $360\ \mu\text{m}$ ,波长 $(1070 \pm 5)\ \text{nm}$ ,光束质量 $11.6\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ,光纤芯

径  $200\ \mu\text{m}$ , 效率 25%。图 10 为 IPG 公司 YLR-17 kW 光纤激光器外形尺寸及性能, 其主要参数: 最大输出功率 (工件上) 16.7 kW,  $f = 420\ \text{mm}$  时光斑直径  $420\ \mu\text{m}$ , 波长  $(1070 \pm 5)\ \text{nm}$ , 光束质量  $11.7\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 光纤芯径  $200\ \mu\text{m}$ , 效率 30%。

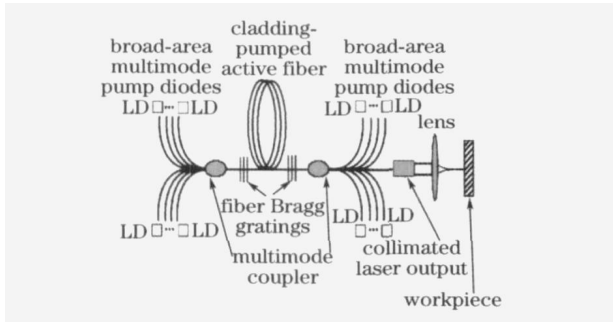


图 8 YLR-7000 激光器  
Fig. 8 YLR-7000 laser

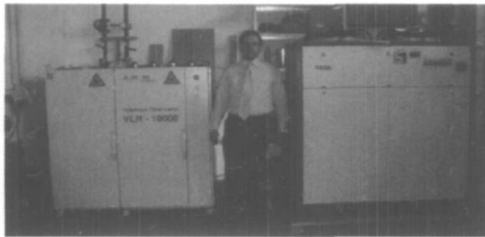


图 9 YLR-10 kW 激光器  
Fig. 9 YLR-10 kW laser



图 10 YLR-17 kW 激光器  
Fig. 10 YLR-17 kW laser

光纤激光与 YAG 激光相比, 具有一系列优点:

1) 输出功率高达 1 ~ 50 kW, 20 kW 已经商品化, 是目前国际上功率最高的激光器。波长  $1.070\ \mu\text{m}$ , 材料吸收率高。可用于焊接、切割、打标、雕刻、熔覆及再制造等各类激光加工作业。

2) 光束质量优良 ( $11.6\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ), 焦点光斑直径微小 ( $10 \sim 100\ \mu\text{m}$ ), 光束几乎呈平行传输, 实现激光远距离加工。

3) 体积小, 重量轻, 便于移动。光纤传输柔性高, 易与工业机器人等配合, 实现高度自动化现场加工。

4) 光电转换效率高达 25% ~ 30%, 寿命长, 工作环境要求低 (水冷), 维护方便, 运行成本低。

国内中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械研究所、清华大学和南开大学等在小功率激光方面取得了阶段性的实验成果。高功率光纤激光器在中国的市场容量十分巨大, 由于关键部件都需进口, 中国在高功率光纤激光器方面与国际先进水平相差甚远, 工业型高功率光纤激光器全靠进口。

### 3.4 盘片激光器

2005 年德国通快 (Trumpf) 公司在德国慕尼黑国际激光和光电子展览会上推出 2 kW, 4 kW 系列的新型激光器——盘片激光器 (Disk Lasers), 与光纤激光器进行竞争<sup>[20]</sup>。尽管两种激光器都利用掺 Yb 晶体作为激光激活介质, 但是几何形状不同: 光纤激光介质又长又细, 而盘状激光介质薄盘片状。这两种几何形状均可以显著减少光/热效应。盘状激光工作原理如图 11 所示: 一束平行的均匀光强分布的半导体激光 ( $\lambda = 940\ \text{nm}$ ) 作为抽运光, 入射到抛物镜面上, 然后回聚到圆盘状薄片 Yb:YAG 晶体上, 该晶片后面安装散热器, 在  $\lambda = 940\ \text{nm}$  光抽运下, 则输出  $\lambda = 1030\ \text{nm}$  的激光。由于散热器作用, 在 Yb:YAG 晶片径向上温度稳定, 温度梯度仅存在于晶片轴向上, 从而克服了热透镜效应, 减小了光束发散角, 提高了光束质量。

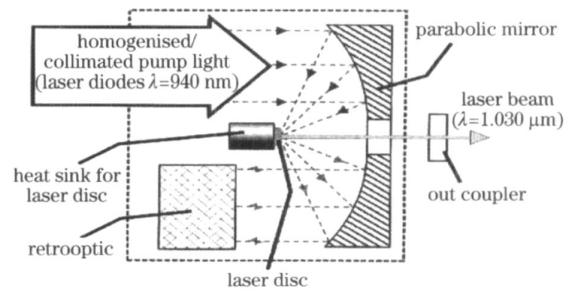


图 11 盘片激光器工作原理

Fig. 11 Working principle of disc laser

德国 Trumpf 公司两种工业盘片激光器 HLD4002 主要参数: 最大输出功率 5.3 kW, 工件上 4 kW, 光斑直径  $200\ \mu\text{m}$ , 波长  $(1030 \pm 5)\ \text{nm}$ , 光束质量  $8\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 光纤芯径  $200\ \mu\text{m}$ , 效率 25%; HLD2002 主要参数: 最大输出功率 2.65 kW, 工件上 2 kW; 光斑直径  $200\ \mu\text{m}$ , 波长  $(1030 \pm 5)\ \text{nm}$ , 光束质量  $8\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 光纤芯径  $200\ \mu\text{m}$ , 效率 24%。

图 12 ~ 14 分别给出了德国 Trumpf 公司的 HLD-4002 盘状激光器外观图、光腔结构和 LD 抽

运光源结构图。

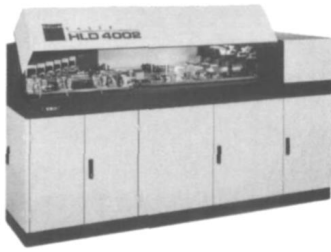


图 12 HLD-4002 外观

Fig. 12 Appearance of HLD-4002

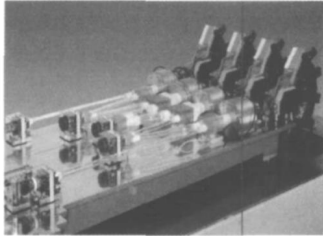


图 13 HLD-4002 的抽运光和光腔

Fig. 13 Pump light and optical cavity of HLD-4002

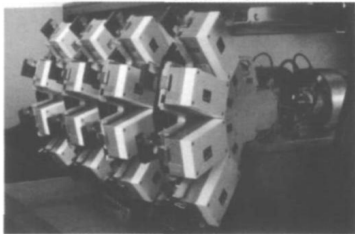


图 14 HLD-4002 的抽运

Fig. 14 Pumping light source of HLD-4002

盘状激光器优点:

1) 功率输出高达 5 kW, 波长  $1.030 \mu\text{m}$ , 材料吸收率高。已经商品化, 可用于焊接、切割、打标、雕刻、熔覆及再制造等各类激光加工作业。

2) 光束质量比光纤激光更优良 ( $8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ), 光束呈平行传输, 激光远距离加工能力更强。

3) 光电转换效率高达 25%。运行寿命长成本低, 工作环境常温, 维护方便。

4) 光纤传输, 柔性高, 易与工业机器人等配合, 多路光缆输出, 多个工作站同时工作。

盘状激光器比光纤激光器光束质量高, 但不易达到万瓦级功率水平, 而且体积和重量大, 不适于现场流动作业, 这些方面光纤激光器具有明显优势。

### 3.5 半导体激光器

世界上第一只半导体激光器是 1962 年问世的, 半导体激光器又称激光二极管。经过几十年来的研发, 半导体激光器取得了惊人的进步, 波长遍及红

外、红光到蓝绿光范围。大功率半导体激光器一般分为单管型和阵列型两种类型, 二维阵列又有单片阵列和叠层阵列两种, 采用叠层阵列输出功率可以高达百瓦、千瓦, 甚至准连续输出功率达万瓦以上, 而这些器件的能量转换效率可高达百分之几十。在激光加工领域, 半导体激光器主要有两方面的应用<sup>[19, 20]</sup>:

1) 抽运固体激光器: 目前最为常用抽运源主要有三种: 808 nm 波长的半导体激光器用于抽运 Nd:YAG 固体激光器; 940 nm 波长的半导体激光器用于抽运 Yb:YAG 固体激光器, 980 nm 的半导体激光器用于抽运掺铒光纤放大器或掺铒光纤激光器。

2) 直接用于激光加工: 808 nm 大功率半导体激光器可提供数千瓦的准连续输出功率及数百瓦的连续输出功率, 可靠工作寿命达上万小时。

但是半导体激光器存在较大的缺点: 激光性能受温度影响大, 光束的发散角较大。因而, 在激光加工领域半导体激光器主要用于激光热处理、激光熔覆等, 不适于激光切割、焊接、打孔、雕刻等要求光束质量高的应用。它体积小、重量轻、可以光纤传输、易与工业机器人等配合集成; 便于移动, 更适于现场流动作业, 这些方面比 YAG、光纤、盘片等激光器具有明显优势。

大功率半导体激光器制造技术已经成为许多发达国家(如美国、德国、俄罗斯等)和中国大力支持的重要领域。国外主要研发单位有: SDL, Spectra Physics, Coherent, Sony, Hitachi, Mitsubishi, IBM, Uniphase, Lasertron, AT&T, Lucent, Nortel, Alcatel, Siemens, Philips 等。国内主要研发生产单位有中国科学院半导体研究所、北京海特公司、上海大恒公司和西安炬光科技有限公司等。西安炬光科技有限公司生产的微通道水冷垂直叠阵 VS 系列激光器功率达到 5000 W, 成为国际上仅有的几家有能力生产同类型产品的产商之一<sup>[21]</sup>。图 15 是北京工业大学研发的 1000 W 半导体激光加工机及淬火效果。

### 3.6 几种工业型大功率激光器比较

图 16 给出了几种不同光源光束质量比较(IPG 公司生产的单模、多模光纤激光器, Trumf 公司生产的盘片激光器, LD 抽运 YAG 激光器, 灯抽运 YAG 激光器和 CO<sub>2</sub> 激光器)。可见, 当激光功率小于 1000 W, YAG 激光器(灯抽运、LD 抽运)、光纤激光器(单模、多模)和盘片激光器的光束质量都优于快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器。当激光功率大于 1000 W,

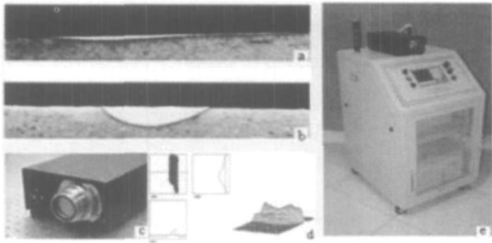


图 15 1000 W 半导体激光器及淬火效果

Fig. 15 1000 W LD laser and its quenching effect

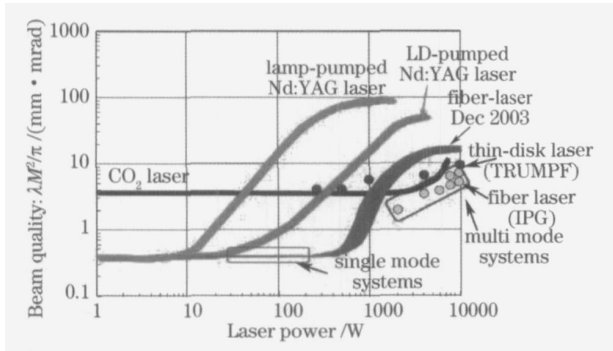


图 16 几种激光器光束质量比较

Fig. 16 Comparison of several laser beam quality

YAG 激光器光束质量最差:灯抽运 YAG 激光器光束参数积(BPP)为23.9 mm·mrad, LD 抽运 YAG 激光器 BPP 为15.6 mm·mrad。当激光功率达到10000 W,光纤激光器(单模、多模)和盘片激光器的光束质量几乎和快轴流CO<sub>2</sub>激光器相当,BPP值基

本为 10~12 mm·mrad。

图 17(a)是几种不同光源焊接性能比较曲线(7 kW 光纤激光 YLR-7000,10 kW 光纤激光 YLR-10000,17 kW 光纤激光 YLR-17000,4 kW LD 抽运 Nd YAG -DY04,4 kW 灯抽运 Nd YAG -HL4006D)。光纤激光功率在17 kW 下最大焊接速度20 m/min,最大焊接深度12 mm,表明光纤激光的焊接能力最强。灯抽运 Nd YAG 激光,最高功率仅达4 kW,焊接能力最低:最大焊接速度4 m/min,最大焊接深度4 mm。

图 17(b)是光纤激光与 CO<sub>2</sub> 激光焊接组织比较。可以看出,在焊接板厚(11.2 mm)相同条件下,CO<sub>2</sub> 激光(13.5 kW)所需功率比光纤激光(10.2 kW)高,而焊接速度 CO<sub>2</sub> 激光(1.8 m/min)比光纤激光(2.2 m/min)低。所需激光能量密度 CO<sub>2</sub> 激光(4.5 kJ/cm)比光纤激光(2.8 kJ/cm)高。比较焊接组织:CO<sub>2</sub> 激光焊缝宽达4 mm,热影响区宽达2 mm;光纤激光焊缝宽度1.5 mm,热影响区宽度0.5 mm。CO<sub>2</sub> 激光焊缝组织为粗大的柱状晶,光纤激光焊缝组织为细小的等轴晶。显然,无论焊接能力还是焊缝组织性能光纤激光均优于 CO<sub>2</sub> 激光。

图 17(c)是光纤激光与 CO<sub>2</sub> 激光/熔化极气体保护焊(GMA)混合焊接金相组织比较。由于 CO<sub>2</sub> 激光能力低于光纤激光,需要增加 CO<sub>2</sub> 激光/GMA 混合焊接才能达到光纤激光单一能源焊接水平。

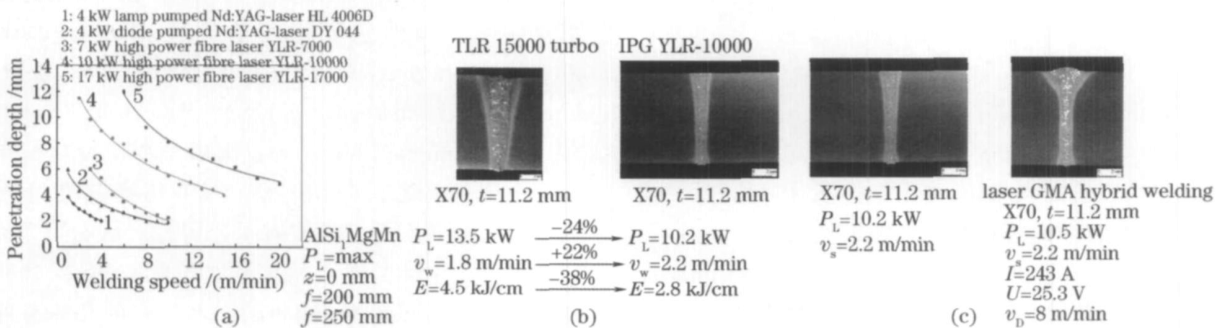


图 17 光纤激光与 CO<sub>2</sub> 激光焊接组织比较

Fig. 17 Welding organization comparison of fiber laser and CO<sub>2</sub> laser

## 4 激光加工机器人基本结构及智能化

### 4.1 机器人结构、性能参数及选型

机器人主要由机器人本体、驱动系统和控制系统所构成。机器人本体由机座、立柱、大臂、小臂、腕部和手部组成,用转动或移动关节串联起来,激光加工工作头安装在其手部终端,像人手一样在工作空间内执行多种作业。加工头的位置一般是由前3

个手臂自由度确定,而其姿态则与后3个腕部自由度有关。按前3个自由度布置的不同工作空间,机器人可有直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型及拟人臂关节坐标型4种不同结构。根据需要,机器人本体的机座可安装在移动机构上以增加机器人的工作空间。

机器人驱动系统大多采用直流伺服电机、步进

电机和交流伺服电机等电力驱动,也有的采用油缸液压驱动和气缸气压驱动,借助齿轮、连杆、齿形带、滚珠丝杠、谐波减速器、钢丝绳等部件驱动各主动关节实现六自由度运动。

机器人控制系统是机器人的大脑和心脏,决定机器人性能水平。主要作用是控制机器人终端运动的离散点位和连续路径。

在选用激光加工机器人时,主要要考虑以下几个性能参数:

1) 负载能力:在保证机器人正常工作精度条件下,机器人能够承载的额定负荷重量。激光加工头重量一般比较轻,约 10 ~ 50 kg,选型时可用 1 ~ 2 倍。

2) 精度:机器人达到指定点的精确度,它与驱动器的分辨率有关。一般机器人都具有 0.002 mm 的精度,足够激光加工使用。

3) 重复精度:机器人多次到达一个固定点,引起的重复误差。根据用途不同,机器人重复精度有很大不同:0.02 ~ 0.6 mm。激光切割精度要求高可选 0.01 mm,激光熔覆精度要求低可选 0.1 ~ 0.3 mm。

4) 最大运动范围:机器人在其工作区域内可以达到的最大距离。具体大小可以根据激光加工作业要求而定。

5) 自由度:用于激光加工的机器人一般至少具有六自由度。

图 18 是 FANUC 公司 R-2000iB 系列 6 轴机器人构成外形图,6 个关节均为旋转关节,6 个坐标轴对应 6 个旋转关节。

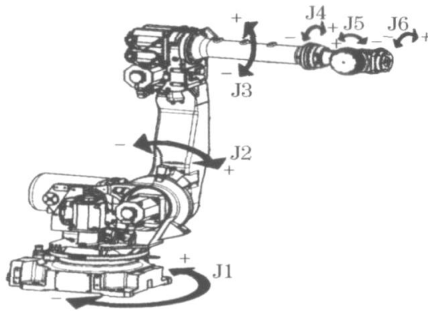


图 18 FANUC R-2000iB 系列 6 轴机器人

Fig. 18 FANUC R-2000iB 6-axis robot

图 19 为 FANUC 公司 R-2000iB 系列 6 轴机器人的部分主要参数及其最大运动范围。

除此之外,机器人还有其他一些指标,在选型时也需要考虑。如:手腕部(J4 轴,J5 轴,J6 轴)允许最大扭矩;手腕部(J4 轴,J5 轴,J6 轴)允许最大惯量;

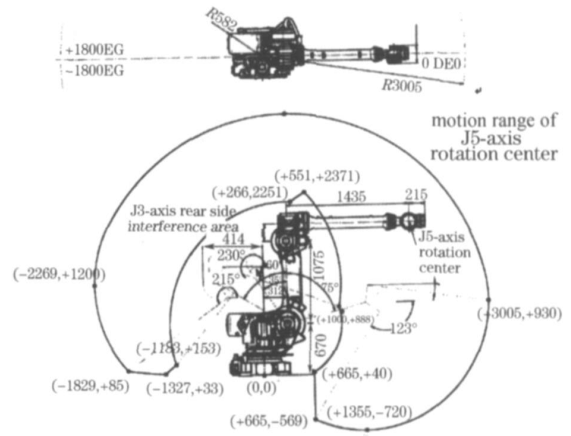


图 19 FANUC 机器人最大运动范围

Fig. 19 Maximum range of FANUC robotics' motion  
最大动作速度(J1 轴,J2 轴,J3 轴,4 轴,5 轴,6 轴);  
最大动作范围(J1 轴,2 轴,3 轴,4 轴,5 轴,6 轴)等。

#### 4.2 激光机器人的智能化

所谓激光机器人的智能化就是利用各种传感技术对激光加工过程物理场进行适时检测,应用人工智能的理论和方法对检测信息进行处理,开发多信息融合算法,使机器人具有高级智能和决策能力,从而在加工对象状态发生变化时,仍然可以满足加工质量要求。

激光加工物理场的检测主要采用视觉(光频)传感技术和听觉(音频)传感技术。

视觉(光频)传感系统主要由 CCD 或 CMOS 相机图像采集器、专用图像处理软件和计算机组成,用于机器人加工点位置、位姿、形貌检测和温度、浓度和速度等物理场的检测。例如:

高功率激光焊接作业和激光再制造存在激光高温熔池,高温熔池内存在传热、传质和对流等物理传输过程,需要用 CCD 或 CMOS 检测激光熔池内温度场。

高功率激光焊接作业和激光再制造存在高温熔池,高温熔池外存在激光等离子体。需要用 CCD 或 CMOS 检测激光熔池外等离子场。

为了控制激光熔覆层的质量,需要用 CCD 相机检测同轴送粉金属粉末流温度场、浓度场和速度场。

上述视觉传感技术在我们和他人以前工作中已有较多报道<sup>[22~26]</sup>,本文从略。

听觉(音频)传感系统主要由听觉传感器(声发射、麦克风、超声、激光超声)、专用声谱仪和频谱处理软件以及计算机等组成,用于检测激光熔池缺陷等。例如:

用声发射技术检测焊缝中的裂纹、未焊透等缺



陷。

用超声、激光超声技术检测激光等离子体、激光熔池缺陷等。

上述听觉传感技术在以前工作中已有较多报道<sup>[27~32]</sup>,本文从略。

激光再制造作业修复损伤部位,需要用 CCD 相机检测损伤部位 3D 几何形貌,利用逆向工程进行反求重建。这是当前激光再制造机器视觉检测技术前沿课题,限于篇幅,本文主要报道激光再制造的反求工程机器视觉技术。

### 4.2.1 双目 CMOS 立体视觉检测

激光修复再制造机器人的视觉重点是对各种复杂曲面上的损坏深度的感知,构建缺损部位 3D 形貌,并对损坏程度做出准确判断,而且视觉系统不仅要对其初始加工位置进行导引,更要在修复过程中实时监控,给出修复路径、修复尺寸和修复厚度,直至完全修复。

双目立体视觉 3D 测量是基于视差原理,已有若干工作发表<sup>[33~40]</sup>。图 20 为简单的平视双目立体成像原理图。空间中某点  $P$  在左图像和右图像中相应的坐标分别为  $P(u_1, v_1)$  和  $P(u_2, v_2)$ 。假定两摄像机的图像在同一个平面上,则点  $P$  图像坐标的  $Y$  坐标相同,即  $v_1 = v_2$ 。由三角几何关系得到

$$u_1 = f \frac{x_c}{z_c}, \quad u_2 = f \frac{x_c - b}{z_c}, \quad v_1 = v_2 = f \frac{y_c}{z_c},$$

式中  $(x_c, y_c, z_c)$  为点  $P$  在左摄像机坐标系中的坐标,  $b$  为基线距,  $f$  为两个摄像机的焦距。视差定义为某一点在两幅图像中相应点的位置差

$$d = u_1 - u_2 = fb / z_c,$$

由此可计算出空间中某点  $P$  在左摄像机坐标系中的坐标为

$$x_c = bu_1 / d, \quad y_c = bv_1 / d, \quad z_c = bf / d.$$

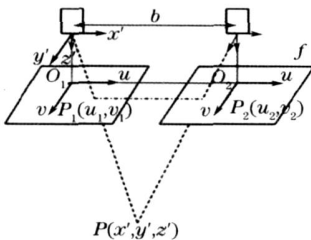


图 20 双目立体成像原理图

Fig. 20 Schematic diagram of binocular stereoscopic image

因此,只要能够找到空间中某点在左右两个摄像机像面上的相应点,并且通过摄像机标定获得摄像机的内外参数,就可以确定这个点的 3D 坐标。

### 4.2.2 逆向工程用于零件表面形貌的 3D 重建

逆向工程(RE),亦称反求工程,它是根据已经存在的产品模型,反向推出产品设计数据(包括设计图纸或数字模型)的过程,是将产品样件转化为 3D 模型的相关数字化技术和几何建模技术的总称<sup>[41~47]</sup>。经过近 20 余年的发展,国际上已研发出四大逆向工程软件:Imageware, Geomagic Studio, CopyCAD 和 RapidForm。

反求工程技术流程如图 21 所示。

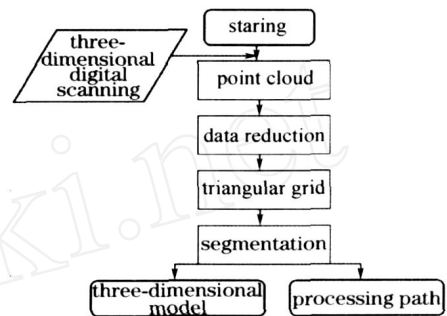


图 21 反求工程技术流程图

Fig. 21 Flow chart of reverse engineering technology

数据简化:非接触式 3D 数字扫描系统能够采集到上百万的数据点,这些点当中存在大量的冗余数据,需要按一定要求减少点云的数量,如图 22 所示。

三角网格化:由于获得的点云数据是散乱的,需要在数据点之间建立合理的拓扑关系,进行三角网络化建模,并对结果进行优化,将图 22 点云进行三角网络化的结果如图 23 所示。

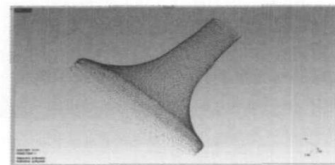


图 22 简化后的点云图案

Fig. 22 Simplified point cloud patterns

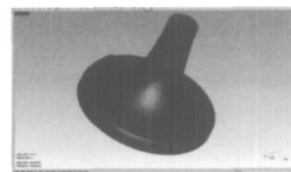


图 23 点云进行三角网络化

Fig. 23 Triangulation network for point cloud

区域分割:首先利用基于边的方法提取出部分边界,把完好区域和磨损区域分开。然后在该边界

两侧分别取一些点,进行法矢、切矢和曲率分析和计算处理,区分出设备完好表面与磨损区域。

生成 3D 模型:由磨损区域三角网格生成 3D 模型。首先将模型分割为若干具有简单拓扑的数据块;在此基础上拟合基于数据块的曲面片;最后将这些曲面片拼接起来,形成整张磨损区域曲面,如图 24 所示。



图 24 三角网格生成 3D 模型

Fig. 24 3D mode generation from triangular mesh

生成加工路径:由三角网格模型直接生成加工路径,由加工轨迹点和轨迹点的法向参数共同来控制机器人的末端姿态。

### 5 激光加工机器人路径规划和在线离线编程方法

目前机器人作业主要有两种编程方法:在线编程和离线编程,国内外对机器人路径规划和在线和离线编程方法开展了大量研究<sup>[48-53]</sup>。

#### 5.1 机器人路径规划

机器人路径规划是在机械手运动学和动力学的基础上,讨论在关节空间和笛卡尔空间中机器人运动的路径规划和路径生成方法。

在机械手运动过程中,由于相应于起始点的关节角度  $\theta_0$  是已知的,而终止点的关节角度  $\theta_f$  可以通过运动学反解得。因此,运动路径的描述,可用起始点关节角与终止点关节角度的一个平滑插值函数  $\theta(t)$  来表示。 $\theta(t)$  在  $t_0 = 0$  时刻的值是起始关节角度  $\theta_0$ ,在终端时刻  $t_f$  的值是终止关节角度  $\theta_f$ 。

路径函数  $\theta(t)$  至少需要满足 4 个约束条件,其中两个约束条件是起始点和终止点对应的关节角度

$$\theta(0) = \theta_0, \quad \theta(t_f) = \theta_f,$$

还有两个约束,即在起始点和终止点的关节速度

$$\dot{\theta}(0) = 0, \quad \dot{\theta}(t_f) = 0,$$

上述 4 个约束条件唯一地确定了一个三次多项式的路径函数  $\theta(t)$

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3,$$

运动路径上的关节速度和加速度则为

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2, \quad \ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t,$$

综合上述 4 个线性方程,求解得三次多项式系数

$$a_0 = \theta_0, \quad a_1 = 0, \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0), \quad a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0).$$

#### 5.2 机器人激光熔覆路径规划

根据机器人运动学及激光熔覆机器人无碰撞路径规划的知识,以机械设计中比较典型的零件传动轴激光熔覆为例,进行路径规划。

1) 给出传动轴的 3D-Pro/E 模型,如图 25 所示。

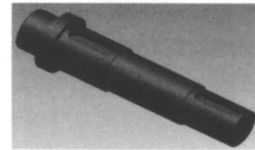


图 25 传动轴的 Pro/E 模型

Fig. 25 Pro/E model for shaft

2) 由传动轴的 CAD 图,给出该轴的基本设计参数,如图 26 所示。

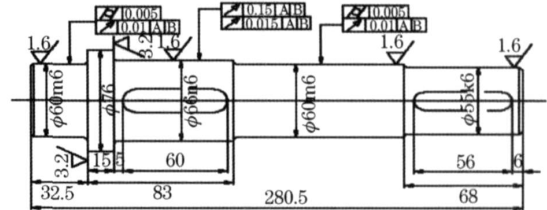


图 26 传动轴 CAD 图

Fig. 26 CAD map for shaft

3) 选择修复部位:该传动轴的两个部分安装轴承,相对其他地方摩擦、磨损比较大,因此在两处地方进行熔覆。

4) 激光熔覆路径规划:在修复的轴段进行螺旋式熔覆,两段熔覆点的螺距为 4 mm。第一圈选取的需要熔覆的点如图 27 所示。每个点逐渐向下变化,呈现螺旋状取点方式,选取特殊熔覆点的坐标。

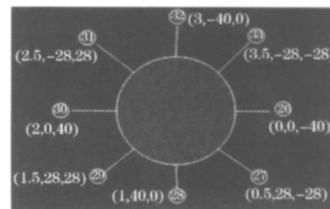


图 27 第一段轴熔覆点截面图

Fig. 27 Paragraph of first shaft sections cladding point

图 28 是激光熔覆头加工的一圈路径规划图,点代表位置,斜线代表位姿。

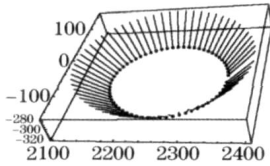


图 28 激光熔覆头位置(点)和位姿(斜线)

Fig. 28 Laser cladding head position (point) and pose (slash)

图 29 是激光熔覆头螺旋加工的路径规划图,点代表位置,斜线代表位姿。

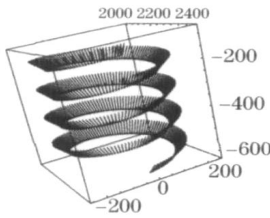


图 29 激光熔覆头螺旋加工的路径规划图

Fig. 29 Spiral path planning map of laser cladding processing

### 5.3 激光加工机器人在线编程

根据以上需要熔覆点的坐标,对机器人进行在线示教编程。FANUC 机器人示教编程的控制部件包括 TP 示教盒、操作面板和断路器,如图 30 所示。单色 TP 示教盒如图 31 所示。

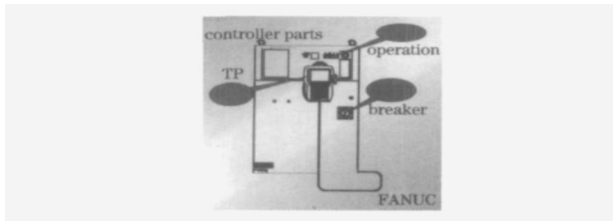


图 30 FANUC 机器人控制部件

Fig. 30 FANUC robot control unit

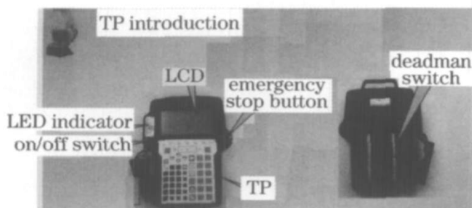


图 31 FANUC 机器人单色 TP 示教盒

Fig. 31 FANUC robot teaching box monochrome TP

一个运动的指令包含的格式有:1;J;P(1,2,3,...);i%;CNTi。

1)“1”代表程序号,表示第几段程序。

2)“J”代表运动的类型。按 F3(CHOICE)有 3 种运动类型可选:“Joint”关节运动。“Linear”直线运动。“Circular”圆弧运动。

3)“P(1,2,3,...)”代表机器人的位置,“P”表示一般位置,“1,2,3,...”自然数表示机器人轨迹的点。

4)“i%”代表速度单位,速度单位随运动类型而改变。按 F3(CHOICE)有四种运动类型可选:(1)1%~100%,(2)1~2000 mm/s,(3)1~12000 min<sup>-1</sup>,(4)0.1~4724 inch/min。

5)“CNTi”代表终止类型。按 F3(CHOICE)有两种终止类型可选:“FINE”被选择后,机器人的运动轨迹要到达“P”点的位置。“CNTi”被选择后,如果 i=0,那么 CNT0=FINE,即机器人运动轨迹与“FINE”一样;如果 i=100,那么机器人的运动轨迹在三点之间运动比“FINE”平滑,呈圆弧状轨迹运行,使机器人的运动看上去更连贯。如图 32 所示。

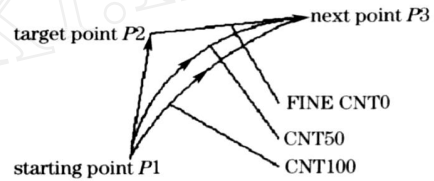


图 32 几种运动轨迹

Fig. 32 Several trajectories

图 33(a)~(d)为程序运行的 4 个典型截图。

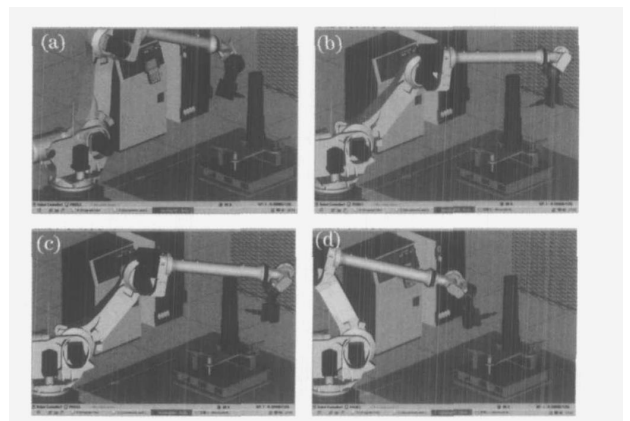


图 33 FANUC 机器人示教编程截图

Fig. 33 FANUC robot teaching program screenshot

### 5.4 激光加工机器人离线编程

天津工业大学激光研究所使用的 FANUC 公司机器人离线编程 ROBOGUID 系统软件。该软件是一种自控软件,它通过使用虚拟机器人控制技术来仿真模拟实际机器人作业的机器人模拟软件,运行于 Windows 环境。此软件包括四大模块:建模模块、布局模块、编程模块和仿真模块。

激光再制造的目的是对损伤部位进行修复,它是 3D 空间重建问题,采用 FANUC 公司机器人离

线编程系统软件 ROBOGUID,预先对熔覆路径和工艺参数在机器人中进行离线编程,其过程为:

建立损伤部位的 3D-Pro 模型;

设置激光熔覆参数(激光功率、焦点、送粉量、熔覆速度、气体流量);

激光熔覆路径规划(单道、多道、搭接量、层厚),建立 3D-CAM 软件包;

在虚拟的机器人示教盒中进行离线编程;

在计算机上进行机器人激光熔覆仿真,检查有无碰撞干涉,优化熔覆路径和参数;

优化工作完成后,将数据传输到机器人中进行实际的激光熔覆。

图 34 为机器人离线编程过程链图。

考虑了修复部位的反求工程后,激光再制造机器人的全部路径规划离线编程流程为:机器视觉检测损伤部位 反求工程重建 3D-CAD 形貌 基于多检测信息融合人工智能决策的路径规划和离线编程 TP 文本自动转换 在计算机 ROBOGUIDE 环境下进行虚拟的运动仿真 将调试好的离线编程

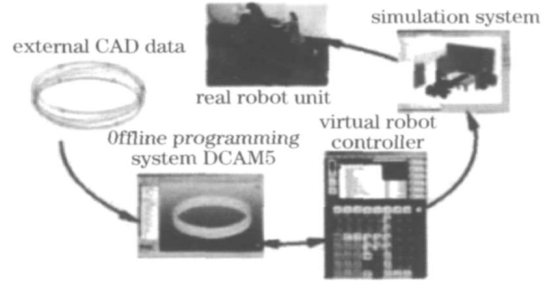


图 34 机器人离线编程过程链

Fig. 34 Processing chain for robot off-line programming

文件下载到真实机器人控制器中。图 35 为激光再制造机器人的路径规划离线编程流程图。

尽管国内外在机器人离线编程方面开展了大量工作,但是激光加工机器人的离线编程仍处于应用研发阶段。由于每个机器人厂家的机器人都是不同的,它们的机器人数字控制系统也是不同的,缺乏通用性,而且对外不开放。因而每个机器人厂家提供的离线编程软件也是不同的而且是收费的。

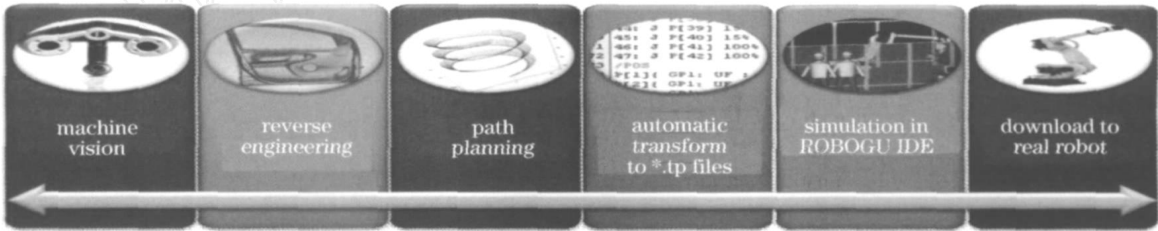


图 35 激光再制造机器人的路径规划离线编程流程图

Fig. 35 Path planning off-line programming flow chart for laser robot remanufacturing

### 6 激光机器人加工工作头

为满足激光加工与制造技术各种不同的需要,国内外研发了各种与激光机器人配套的激光熔覆送粉系统和加工工作头<sup>[54~59]</sup>。

#### 6.1 激光再制造专用送粉器及送粉工作头

天津工业大学在国家科技攻关项目支持下研发



图 36 激光再制造机器人远程送粉器

Fig. 36 Remote powder feeding device of robot laser remanufacturing

生产了多种型号的激光熔覆专用送粉器,如图 36~40 所示。

图 36 是与激光再制造机器人配套的专用远程送粉器,工作距离可达 30 m。图 37 是与激光再制造机器人配套的专用机载式送粉器。图 38 是不同用途同轴送粉工作头。图 39 是激光同轴送粉工作头喷出冷热粉流。图 40 是激光同轴送粉工作头熔覆照片。



图 37 激光机器人机载式送粉器

Fig. 37 Fixed powder feeding device of laser robot

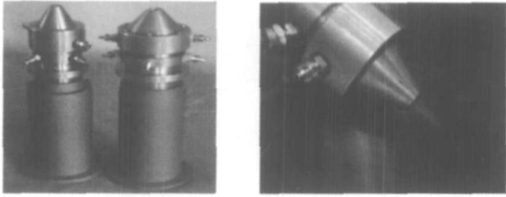


图 38 不同类型同轴送粉工作头

Fig. 38 Work of different types of coaxial powder feeding head

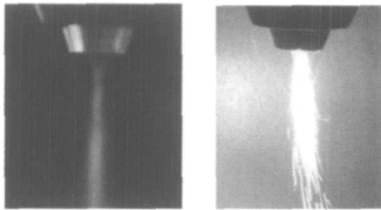


图 39 激光同轴送粉工作头喷出冷热粉流

Fig. 39 Hot and cold powder flow emitted from coaxial powder feeding head

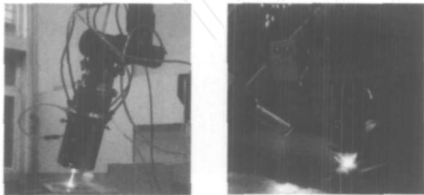


图 40 激光同轴送粉工作头现场熔覆

Fig. 40 Coaxial powder feeding laser cladding work on-site

### 6.2 激光焊接专用工作头

图 41~44 是德国 PRECITEC 公司生产的各类激光焊接专用工作头,图 45 是通快公司生产的光纤耦合聚焦焊接头。

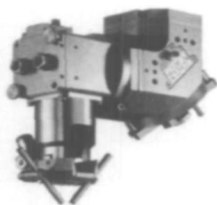


图 41 CO<sub>2</sub> 激光焊接头

Fig. 41 CO<sub>2</sub> laser welding head

### 6.3 激光切割专用工作头

图 46 为 CO<sub>2</sub> 激光 3D 切割头,图 47 为 Nd YAG 激光 3D 切割头。

## 7 激光加工机器人的工业应用

### 7.1 机器人激光焊接



图 42 YAG 激光焊接头

Fig. 42 YAG laser welding head



图 43 光纤激光焊接头

Fig. 43 Fiber laser welding head

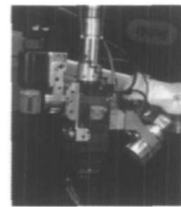


图 44 复合焊接头

Fig. 44 Composite welding head

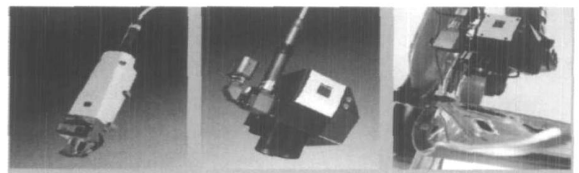


图 45 通快公司的光纤耦合聚焦焊接头

Fig. 45 Fiber-coupled focusing welded joints made by TRUMPF company

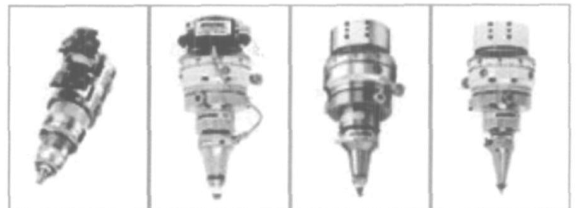


图 46 CO<sub>2</sub> 3D 激光切割头

Fig. 46 CO<sub>2</sub> 3D laser cutting head

汽车工业是激光加工机器人最大的工业应用领域。在现代汽车制造中,机器人焊接是汽车生产流水线上的一道重要的装焊工序。近年来,随着激光焊接技术快速发展,国内外许多汽车制造企业开始在

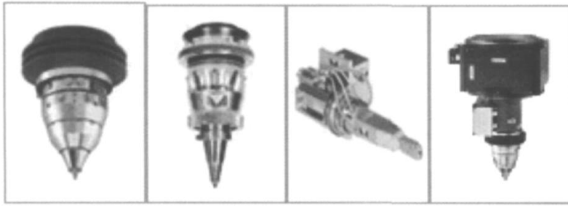


图 47 Nd YAG 3D 激光切割头

Fig. 47 Nd YAG 3D laser cutting head

装配流水线上用机器人激光焊接代替传统的机器人电阻点焊技术,用于车身装焊和零部件焊接。与传统焊接方法相比,激光焊接具有很多独特优势:激光焊接速度快,达20 m/min;焊接变形很小,装焊精度高;焊点冶金质量高,提高了车身的抗疲劳性、抗冲击性、抗腐蚀性能,车身钢度提高了30%多;提高了车身的密封性,降低噪声30%;单面焊接,焊点尺寸小,预留的焊接边缘小。因此,激光焊接不仅大大提高了汽车生产效率、生产质量和车身的安全性,而且减轻了整车重量,降低了汽车生产成本。此外,它属于非接触式焊接,柔性化生产,车身设计更具现代化理念。

在20世纪90年代中期,德国宝马汽车(BMW)公司利用激光机器人完成了BMW 5系列轿车的第一条焊缝,焊缝总长度达12 m。到2003年7月,激光焊接焊缝的总长度累计达到1500 km。德国大众公司在Touran轿车中,激光焊点的数量达到了1400个,焊缝的总长度达70 m。在Audi A6, Golf A4, Passat等品牌的车顶均采用激光焊接。美国通用公司在车架顶部也采用激光焊接。图48为德国大众汽车激光机器人焊接车身生产线照片,设备为德国Hass公司生产的3 kW YAG激光器和Kuka机器人。



图 48 德国大众汽车激光机器人焊接车身生产线

(Hass公司生产的3 kW YAG激光器和Kuka机器人)

Fig. 48 Laser robot production line of car body welding in Volkswagen Germany (3 kW YAG lasers and Kuka robots produced by Hass company)

国内上海大众于1999年率先将其应用于车身焊接,Polo的车身激光焊接总长度达到6591 mm。速腾(Sagitar)分别在车顶盖、后罩盖等处采用了激光机器人焊接,激光焊缝长度达33.2 m,顶盖处最长的1.6 m焊缝在激光焊接程序中一次成型;机器人的重复定位精度达到0.1 mm,为车身加工质量的稳定提供了保障。激光焊接大大提高了车身的刚度和碰撞安全性,打造了速腾坚不可摧的车身,速腾已成为很紧俏的车型。一汽大众采用激光机器人焊接Audi A6顶盖和BORA,高尔夫的后罩盖,使用的设备也是德国Hass公司生产的3 kW YAG激光器和Kuka机器人。高尔夫的激光焊缝长达52.5 m。随着激光焊接技术的成熟和激光焊接机的价格下降,奇瑞汽车也开始采用激光焊接技术。

为了满足批量生产和流水线生产的要求,激光加工作业网络化应运而生。在汽车装焊生产线上,需安装多台机器人同时工作,因此采用网络技术建立工作站,统一管理多台机器人的激光焊接作业,如图49所示。

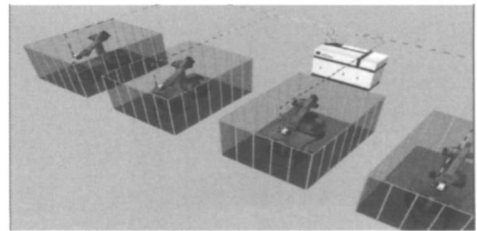


图 49 机器人激光焊接作业网络工作站

Fig. 49 Network workstations for robotic laser welding operations

## 7.2 机器人激光切割

在所有的激光加工中,激光机器人切割技术是最早用于国外汽车生产的。大众公司、通用公司、奔驰公司和日产公司的汽车生产线上安装了大量的激光切割机器人,对车身部位进行切割,满足客户多品种人性化的使用要求,如图50所示。在国家“863”计划中,提出了开发出一条由3D 5轴联动激光切割机床,上、下料和激光焊接机器人组成的白车身激光切割、焊接自动化生产线,在整车或车身制造企业示范应用。

## 7.3 机器人激光热处理

为了解决汽车在线生产或现场生产的需要,国外近年来研发出来激光热处理机器人,在汽车工业生产中获得成功的应用。图51为德国Erlaser公司激光热处理机器人对汽车大型模具进行激光宽带淬

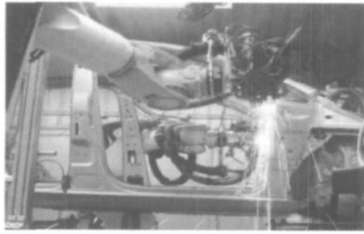


图 50 汽车生产线上的激光切割机器人

Fig. 50 Laser cutting robot in automobile production line

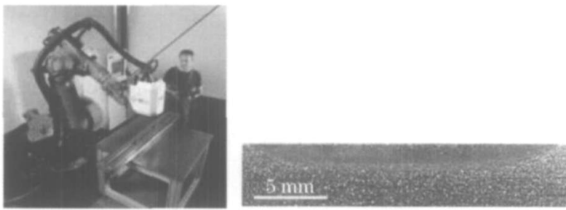


图 51 激光机器人热处理大型模具及激光淬火层

Fig. 51 Large-scale mold heat treatment of laser robot and laser hardening layer

火,使用半导体激光器单道淬火宽度达20 mm。国内上汽通用五菱汽车股份有限公司、柳州科尔数字化制造技术有限公司开始采用此项技术,应用结果表明,模具寿命成倍提高,产品质量显著改善,生产效率明显提高。

### 7.4 机器人激光再制造

激光再制造技术具有许多其他修复技术无法比拟的优点:激光能量密度高,受热范围小,热影响区小,不破坏基体材料性能。熔覆层无砂眼、气孔,与基体形成冶金结合,结合强度高、不容易脱落。熔覆层厚度可控,后加工量微小,不仅能恢复模具原来的尺寸精度,而且提高了材料性能,因此可对模具表面的裂纹、崩角、磨痕各类缺陷进行有效修复再制造。激光可以熔覆金属材料、不锈钢、铜合金、铝合金及钛合金甚至硬质合金等,因此可用于各类材料的零部件和模具修复。

1) 大型汽车模具修复:众所周知,汽车大型精密模具价值昂贵,有的高达数百万元乃至数千万元。常规修复技术有电镀、焊接、热喷涂等,由于它们的热注入高,能量不能精密可控,会造成模具精度和性能下降,因此汽车大型精密模具修复常常是个禁区。由于激光再制造技术上述的优点,90年代汽车行业与大学合作研究激光再制造用于精密大型模具修复技术,现已被汽车行业接受。图 52 为德国 Erlaser 公司激光机器人在汽车大型模具修复中的应用。

2) 冶金大型轧辊、穿头修复:冶金工业中应用

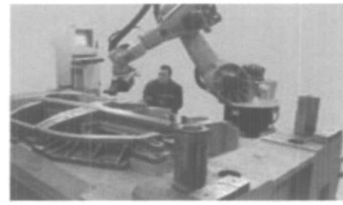


图 52 激光机器人修复汽车大型模具

Fig. 52 Auto large-scale mold repaired by laser robot

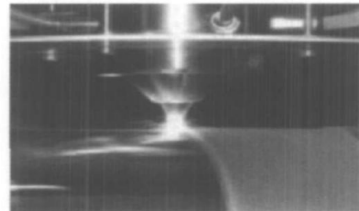


图 53 LD 激光再制造修复轧辊

Fig. 53 LD laser remanufacturing repair roller

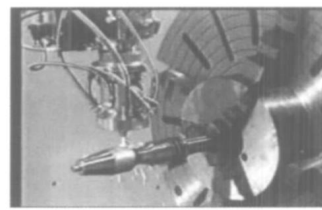


图 54 激光机器人修复无缝钢管穿头

Fig. 54 Seamless wear head repaired by laser robot

上亿只轧辊,每只轧辊价值十余万至百万元。轧辊使用工况恶劣,在高温、高冲击力作用下,磨损严重,使用周期短。无缝钢管生产中需消耗大量的穿头。为保证生产连续性,需要使用激光再制造机器人现场进行修复。图 53 是德国 FRAUNHOFER 研究所使用 Rofin DL030S 3 kW 半导体激光器直接进行激光再制造修复轧辊。图 54 是激光再制造机器人修复无缝钢管穿头。

### 7.5 激光机器人直接制造

激光熔覆机器人除了能够完成修复再制造重大装备外,由于机器人具有很高的自由度,它可以对复

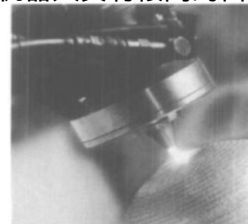


图 55 激光机器人直接熔覆堆积 3D 金属实体球

Fig. 55 3D metal entity ball directly cladding accumulated by laser robot

杂的空间曲面进行直接制造。图 55 是具有 11 个自由度的激光熔覆机器人直接堆积 3D 金属实体球。

### 7.6 激光机器人远程制造

传统高功率激光加工技术工业应用的瓶颈之一是光束缺乏加工柔性: 光束焦长短, 只能在很短加工距离工作, 不能进行复杂的空间加工。近年来激光

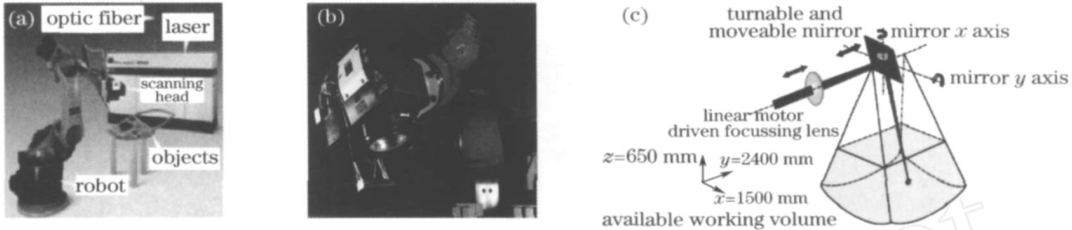


图 56 TRUMPF 公司激光远程焊接机器人 (a), 扫描工作头 (b) 和扫描原理图 (c)

Fig. 56 Laser remote welding robot (a), scanning head (b) and scanning schematic (c) of TRUMPF company

Trumpf 公司 4 kW LD 抽运 YAG 激光远程焊接机器人的工作距离长达 0.5 m, 扫描范围最大 320 mm × 190 mm, 大大开阔了激光加工空间环境, 是常规聚焦方法激光加工无法比拟的 (工作距离仅达 0.005 m)。IPG 光纤激光器不仅具有高达万瓦的激光功率, 而且又有优异的近乎平行光的光束质量, 用于激光远程加工比 YAG 激光更为理想。我在 2007 年慕尼黑光电展览会上, 亲眼观看了 IPG 公司和 KU KA 机器人公司联合开发的 YLR-7000 型 7 kW 光纤激光远程焊接系统用于汽车车身焊接的现场表演。扫描头装在机械手末端, 可在 3D 空间自由操纵, 可以从各个方位焊接更大更复杂的汽车车身。它的激光加工距离长达 2 ~ 3 m, 激光束就像子弹一样发射, 不仅能焊接车身外部, 而且激光头能伸进车箱内部进行焊接, 大大提升了激光焊接的柔性, 减少了焊接工装。观众无比惊奇振奋。图 57 是 IPG 公司送给我的光纤激光远程焊接汽车车身录像光盘中的二个截图, 图 58 是车身激光焊点形貌照片。



图 57 IPG 公司光纤激光远程焊接汽车车身录像截图

Fig. 57 Automobile body shots video of remote welding from IPG's fiber laser

目前 IPG 公司又取得突破性新进展, 在 2009

机器人远程制造技术应运而生, 它采用可编程振镜扫描方式, 聚焦参数、工作距离、扫描路径、扫描范围和扫描速度等通过程序控制改变, 实现了更大的激光加工柔性。图 56 是德国 TRUMPF 公司研发的 4 kW LD 抽运 YAG 激光远程焊接机器人 (a), 扫描工作头 (b) 和扫描原理图 (c)。



图 58 IPG 光纤激光远程焊接焊点形貌

Fig. 58 Appearance of remote welding solder joint from IPG's fiber laser

年 6 月慕尼黑国际光电展览会上宣布, 10 kW 单模 YLS-10000-SM 光纤激光器研发成功。波长 1070 nm, 光束质量为 TEM<sub>00</sub> 高斯基模, 总效率超过 23%。

## 8 激光加工机器人发展趋势

激光加工机器人是激光技术和机器人技术高度结合而诞生的一种新型先进制造技术, 与搬运、码垛和焊接等常规作业的机器人相比, 它具有负载小、多参数多自由度加工、批量加工和在线加工、多信息多智能融合等特点。由于目前它尚处于起步阶段, 所用的机器人只能从常规机器人中相近的产品选用, 许多功能尚待研究开发, 激光加工机器人技术尚处于发展之中。为了适应众多工业应用领域发展的需要, 激光加工机器人将沿着在线化、专业化、信息化、智能化和网络化主线发展, 呈现以下几个方向发展趋势:

- 1) 激光加工机器人的在线化作业: 激光加工机器人很适合大批量重复性的生产, 应针对不同行业生产线要求, 设计满足在线生产的激光机器人。
- 2) 激光加工机器人的专业化、系列化: 激光机



机器人除了在线生产需要外,在小批量生产、个性化制造、技术开发和科学研究中都有大量应用。为此,针对激光机器人的特点,应设计与普通机器人不同的专用机器人。

3) 高功率激光器及光束柔性传输技术:光束可柔性传输的高功率激光器(光纤激光器、盘状激光器、半导体激光器和 LD 抽运的 YAG 激光器)以及光纤技术(制造、传输和耦合技术)将获得快速发展。 $\text{CO}_2$  激光器波长  $10.6 \mu\text{m}$ ,目前不能光纤传输,光束缺乏传输柔性。在传输光纤未解决之前, $\text{CO}_2$  激光器将淡出机器人范围。

4) 高光束质量激光束远程制造技术:传统的高功率激光器光束质量差,发散角大,致使光束焦长短,只能在很短距离内工作,不能进行复杂的空间加工,光束缺乏加工柔性。光纤激光器和盘状激光器具有优良的光束质量,光束几乎呈平行传输,是实现激光远距离加工的首选光源。

5) 机器人本体结构轻量化设计:由于激光加工头负载轻,探索激光机器人本体结构轻量化将是重要课题。选择新的高强度轻质材料,大幅度减轻本体结构自身重量。本体机构设计向着模块化、可重构方向发展。为满足激光微加工的需要,微型和微小机器人技术应提到日程。

6) 机器人开放式数字控制技术:针对目前机器人数控系统不开放情况,重点研发开放式、模块化数字控制系统。人机界面更加友好。开放性的离线编程实用化技术将成为研究重点。

7) 机器人的智能化控制技术:激光加工是个复杂的物理场。机器人除了具有位置、形状机器视觉外,还需要具有声、光、电、磁、热和力等多种传感系统。进一步开发机器视觉技术和听觉技术,应用人工智能的理论和方法对检测信息进行处理,使机器人具有高级智能和决策能力。

8) 机器人的网络化管理技术:机器人在线生产和批量生产中,为解决多机器人和操作者之间的协调控制,通过网络建立大范围内的机器人远程监控系统。对多机器人和操作者相互间的网络通信、磋商、建模、规划、群体行为控制等方面进行研究。发展基于多传感器、多媒体和虚拟现实以及临场感知技术,实现机器人的虚拟遥控操作和人机交互。

发展建议:1) 激光加工机器人是集激光技术、机器人技术、自动化技术、传感技术、网络技术、先进制造技术和先进材料技术等多学科为一体的高科技产品,代表国家的科技水平和先进制造技术发展方

向。建议国家加大研发投入,列入各类科技计划。

2) 激光加工机器人已在国民经济重大支撑领域获得若干成功应用。随着我国产业的不断升级,必将获得更大的发展。基于激光加工机器人技术的前沿性和多学科集成的复杂性,建议企业要加大激光加工机器人及其配套产品研发力度,与大专院校建立产业联盟,实现产学研合作,以便尽快开发出先进产品,满足国内市场的需要,赶超国际先进水平,参与国际竞争。

## 参 考 文 献

- 1 Gu Zhenyu. Industrial robots: global actualities and trends [J]. *Mechatronics*, 2006, 2:6~10  
顾震宇. 全球工业机器人产业现状与趋势[J]. 机电一体化, 2006, 2:6~10
- 2 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
- 3 Yang Xichen, Wang Yunshan, Lei Jianbo *et al.*. New progress in laser processing robot in the world [C]. The Proceedings of Chinese Advanced Manufacturing Equipment and Robot Technical Forum, Wulumuqi, 2006  
杨洗陈,王云山,雷剑波等. 国外激光加工机器人新进展[C]. 2006 全国先进制造装备与机器人技术高峰论坛论文集, 乌鲁木齐. 2006
- 4 Chen Miaohai. Development prospect and present situation on laser processing industry in China [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(1):73~77  
陈苗海. 中国激光加工产业现状和发展前景[J]. 激光与红外, 2004, 34(1):73~77
- 5 Yang Xichen. Laser Remanufacturing Robot [C]. Chinese Optical Society 2008 Symposium, Quanzhou, 2008  
杨洗陈. 激光再制造机器人[C]. 中国光学学会 2008 年学术年会,泉州,2008 年
- 6 S. Nowotny, S. Scharek, A. Schmidt. Advanced laser technology applied to cladding and buildup [J]. *Welding Journal*, 2007, 86(5):48~52
- 7 E. Stiles, E. Hensel. Combination machine for laser hardening and cladding [M]. *Laser Applications International*, February/March, 2006:13~15
- 8 K. H. Richter, S. Orban, S. Nowotny. Laser cladding of the Titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades [C]. International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, San Francisco, 2004. 1506
- 9 A. Gasser, G. Backes. Laser Beam Repairs Engine Components [J]. *LIA Connection*, Enews, July, 2009
- 10 G. J. Xu, M. Kutsuna. Cladding with stellite 6 + WC using a YAG laser robot system [J]. *Surface Engineering*, 2006, 22(5):345~352
- 11 A. Groth, C. Walz, S. Naegeler. New innovations in diode laser cladding [C]. International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, San Francisco, 2004
- 12 Gapontsev. Industrial high power fiber laser systems [C]. Proceedings of the 2nd International Workshop on Fiber Lasers, Dresden, Germany, V. 2006
- 13 Li Jinmin. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(7):16~29  
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J].

- 激光与光电子学进展, 2008, 45(7): 16~29
- 14 Gong Mali, Lu Fuyuan, Liu Qiang *et al.*. Progress in the diode pumped quasi-three level solid state lasers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(4): 516~524
- 巩马理, 陆富源, 柳强等. 二极管泵浦准三能级固体激光器的新进展[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 516~524
- 15 Liu Songhao. New development of fiber laser [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2003, 16(1): 1~8
- 刘颂豪. 光纤激光器的新进展[J]. 光电子技术与信息, 2003, 16(1): 1~8
- 16 Lou Qihong, Zhou Jun, Kong Lingfeng *et al.*. Recent progress of high power pulsed double cladding fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(4): 510~515
- 楼祺洪, 周军, 孔令峰等. 高功率脉冲双包层光纤激光器的新进展[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 510~515
- 17 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135~138
- 楼祺洪, 周军, 朱健强等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135~138
- 18 Meng Hongyun, Liao Jianhong, Liu Songhao. Yb-doped double-clad fiber laser and its application in laser processing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(10): 55~58
- 蒙红云, 廖键宏, 刘颂豪. 掺镱双包层光纤激光器及其在激光加工中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(10): 55~58
- 19 杨贵铤. 2010 年光纤激光器将占工业激光器市场份额的 25% [J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(8): 69
- 20 光纤激光器和盘状激光器竞争进入汽车工业[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(5): 59
- 21 Wang Yonggang, Ma Xiaoyu, Zhang Hongbo *et al.*. Research and development of the high power semiconductor laser for pumping and its applications [J]. *Optoelectronic Technology*, 2003, 23(4): 250~253
- 王勇刚, 马晓宇, 张洪波等. 泵浦用大功率半导体激光器研制与应用发展状况[J]. 光电子技术, 2003, 23(4): 250~253
- 22 Xin Guofeng, Qu Ronghui, Fang Zujie *et al.*. New development of high power semiconductor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(2): 3~8
- 辛国锋, 瞿荣辉, 方祖捷等. 大功率半导体激光器的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(2): 3~8
- 23 西安炬光推出高功率半导体激光器快慢轴两轴准直叠阵[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(7): 7
- 24 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(7): 993~997
- 杨洗陈, 雷剑波, 刘运武等. 激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 993~997
- 25 Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1745~1750
- 杨楠, 杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1745~1750
- 26 Jehnming Lin. Temperature analysis of the powder streams in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, 31(8): 565~570
- 27 Yang Nan, Yang Xichen. Numerical simulation of flow field of nozzle in laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(3): 452~455
- 杨楠, 杨洗陈. 激光熔覆中粉嘴流场的数值模拟[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 452~455
- 28 Chen Juan, Yang Xichen, Lei Jianbo *et al.*. Calibration study on measurement of temperature field in laser processing by CCD [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(Suppl. 1): 354~356
- 陈娟, 杨洗陈, 雷剑波. 激光加工温度场 CCD 检测中的温度标定[J]. 中国激光, 2007, 34(增刊 1): 354~356
- 29 Li L. Steen. Non-contact acoustic emission monitoring during laser processing [C]. *ICALEO '92*, 1992, 75: 719~728
- 30 H. Gu, W. W. Duley. Acoustic emission and optimized CO<sub>2</sub> laser welding of steel sheets [C]. *ICALEO '94*, 1994, 79: 77~85
- 31 H. Gu, W. W. Duley. Acoustic emission from modulated laser welding of materials [J]. *Journal of Laser Applications*, 1996, 8: 205~210
- 32 J. A. Beersiek. CMOS camera as a tool for process analysis not only for laser beam welding [C]. *ICALEO '2001*, 2001, 90: 1185~1193
- 33 N. Seto, S. Katayama. Relationship between plasma and keyhole behavior during CO<sub>2</sub> laser welding [C]. *SPIE*, 2000, 3888: 61~88
- 34 M. B. Klein, B. Pouet. In-process detection of weld defects using laser ultrasonic [C]. *ICALEO '2001*, 2001, 90: 15~18
- 35 Xie Kai, Liu Wanyu, Pu Zhaobang. A calibration method for structured light 3D vision systems [J]. *Photoelectron · Laser*, 2007, 18(3): 369~371
- 谢凯, 刘宛予, 浦昭邦. 结构光三维视觉检测系统的标定方法研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(3): 369~371
- 36 Cui Kaiyong, Wang Renjie, Lin Xiaoling. Research and realization on binocular stereo vision system of robot [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(3): 237~240
- 崔开涌, 王任杰, 林小玲. 机器人双目视觉系统的算法研究与实现[J]. 计算机工程, 2008, 34(3): 237~240
- 37 Xu Peiquan, Tang Xinhua, Lu Fenggui *et al.*. Review on vision sensing system based on robotic welding [J]. *Welding*, 2005, 8: 11~14
- 徐培全, 唐新华, 芦凤桂等. 基于机器人焊接的视觉传感系统研究综述[J]. 焊接, 2005, 8: 11~14
- 38 Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision [J]. *Journal of Automation*, 2000, 26(1): 43~45
- 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43~45
- 39 Wang Jianhua, Han Hongyan, Wang Chunping *et al.*. Theoretic research on double CCD stereoscopic measurement system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(4): 94~96
- 王建华, 韩红艳, 王春平等. CCD 双目立体视觉测量系统的理论研究[J]. 电光与控制, 2007, 14(4): 94~96
- 40 Li Laiping. The visual sensing technology of arc welding robot [J]. *Welding*, 2007, 8: J-1~J-5
- 李来平. 弧焊机器人视觉传感技术[J]. 现代焊接, 2007, 8: J-1~J-5
- 41 Zhang Wenzeng, Chen Qiang, Du Dong *et al.*. 3-D vision-based trajectory tracking of welding robots [J]. *Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2007, 47(8): 1270~1273
- 张文增, 陈强, 都东等. 基于三维视觉的焊接机器人轨迹跟踪[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(8): 1270~1273
- 42 Ke Yinglin, Chen Xi. Automatic method for broken boundary extraction [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(6): 1316~1321
- 柯映林, 陈隙. 叶片破损区域边界的自动提取算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(6): 1316~1321
- 43 Zhang Shusen, Xiao Shengbing, Zheng Chengzhi. Processing method of point\_clouds data based on Pro/E [J]. *Model Industry*, 2006, 32(1): 20~23
- 张树森, 肖胜兵, 郑成志. 基于 Pro/E 点云数据处理方法[J]. 模具工业, 2006, 32(1): 20~23
- 44 Sun Jin, Li Yaomin. Development in key technologies of reverse engineering [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, 43(1): 5~7
- 孙进, 李耀明. 逆向工程的关键技术及其研究[J]. 航空精密

- 制造技术, 2007, **43**(1):5~7
- 45 Wang Lifu, L üQihui. Development design of products based on Pro/E's reverse engineering technolog [J]. *CAD/CAE/CAPP/CAM*, 2006, (4):60~62  
王力夫, 吕其惠. 基于 Pro/E 逆向反求技术的产品开发设计[J]. *现代制造工程*, 2006, (4):60~62
- 46 Chen Tao. Segmentation and regular surfaces fitting in reverse engineering [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004  
陈 涛. 逆向工程中数据分块和规则曲面拟合算法的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2004
- 47 Ma Changsheng. Research and implement of data segmentation technolog reverse engineering [D]. Suzhou: Suzhou University, 2007  
马长胜. 逆向工程中数据分块技术的研究和实现[D]. 苏州:苏州大学, 2007
- 48 Song Yue-e, Wu Lin, Zhang Lianxin *et al.*. Calibration module development of arc welding robot off-line programming system [J]. *Robot*, 2001, **23**(7):695~697  
宋月娥, 吴 林, 张连新等. 弧焊机器人离线编程系统标定模块的开发[J]. *机器人*, 2001, **23**(7):695~697
- 49 Yang Pei, Wu Lin, Xu Binshi *et al.*. Flexible remanufacturing system of arc welding robot [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(9):5~8  
杨 培, 吴 林, 徐滨士等. 弧焊机器人柔性再制造系统[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(9):5~8
- 50 Chen Huanming, Xiong Zhenvu, Liu Pin. Research on virtual teaching programming system of arc welding robot [J]. *Electric Welding Machine*, 2008, **38**(6):31~33  
陈焕明, 熊震宇, 刘 频. 弧焊机器人虚拟示教编程系统[J]. *电焊机*, 2008, **38**(6):31~33
- 51 Chen Huanming, Xiong Zhenyu. Design of the offline programming system of arc welding robot based on VC++ [J]. *Electric Welding Machine*, 2009, **39**(1):20~23  
陈焕明, 熊震宇. 基于 VC++ 的弧焊机器人离线编程系统设计[J]. *电焊机*, 2009, **39**(1):20~23
- 52 Chen Zhiguo, Xu Wenbo. Nondestructive flaw detection system of intelligent robot with machine vision [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, **45**(14):12~14  
陈志国, 须文波. 机器视觉智能机器人无损检测系统[J]. *计算机工程与应用*, 2009, **45**(14):12~14
- 53 Xie Le, Zhou Rurong, Ruan Xueyu. NC tool path generation based on adaptive projection method for freeform surfaces [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, **34**(10):1383~1384  
谢 叻, 周儒荣, 阮雪榆. 自由曲面自适应投影法精加工刀轨生成[J]. *上海交通大学学报*, 2000, **34**(10):1383~1384
- 54 Lin Jehnming. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2000, **105**(1-2):17~23
- 55 A. J. Pinkerton, L. Li. Modeling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling [J]. *J. Manuf. Sci.*, 2004, **126**(3):33~41
- 56 Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1745~1750  
杨 楠, 杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1745~1750
- 57 Cao Shuying, Yang Xichen. Design of nozzle for laser coaxial feed powder [J]. *Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology*, 2003, **22**(5):42~45  
高淑英, 杨洗陈. 用于激光熔敷的同轴送粉喷嘴的设计[J]. *天津工业大学学报*, 2003, **22**(5):42~45
- 58 Asselin Mathew, Toyserkani Ehsan, Iravani-Tabrizipour Mehrdad *et al.*. Development of trinocular CCD-based optical detector for real-time monitoring of laser cladding [J]. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2005)*, 2005, **3**:1190~1196
- 59 St. Nowotny, S. Scharek, F. Kempe *et al.*. COAXn: Modular system of powder nozzles for laser beam build-up welding [C]. 22nd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics (ICALEO 2003), 2003