

工业用大功率固体激光加工系统

李 强 姜梦华 雷 旬 王金国 于振声 郭 江 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 报道了一种符合工业应用的国产化大功率固体激光加工系统。大功率连续 Nd:YAG 激光器采用对称放置方式四棒串接谐振腔,得到大于 2100 W 的稳定功率输出,光束参数积 $24 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,系统总光电转换效率达到 3.5%;激光器的输出激光采用芯径 $600 \mu\text{m}$ 的光纤传输。对激光加工系统的关键问题进行了分析,包括大功率固体激光器在保证光束质量的条件下大功率输出、高效率光纤耦合输出、适应加工要求的控制系统等。研制的系统在实际应用中表明:加工系统稳定、可靠,操作方便,可与机械手、机床等外设联接,满足工业应用的要求。

关键词 激光加工;大功率激光加工系统;Nd:YAG 激光器;光束质量;光纤耦合

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1847

High-Power Laser Processing System for Industry Application

Li Qiang Jiang Menghua Lei Hong Wang Jinguo Yu Zhensheng

Guo Jiang Zuo Tiechuan

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A home made high-power laser processing system for industry application is reported. The symmetrical parallel plane four-rod series resonator CW Nd:YAG laser with krypton lamp-pumped has been developed, the output power is more than 2100 W with beam parameter product of $24 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. The total electro-optics efficiency of system with lamp pumped YAG crystal is as high as 3.5%. The output laser is transmission with $600 \mu\text{m}$ core diameter fiber. The key factors, such as high-power laser output, high efficiency fiber coupling and controlling system of adaptive processing at the premise that the high-power laser processing system guarantees the beam quality, are analyzed. It is conclusion that the laser processing machine is a stability, fastness, operating convenience system. The system can connect with moving components, such as robot and machine, and meet the processing requirements of industry application.

Key words laser processing; high-power laser processing system; Nd:YAG laser; beam quality; fiber coupling

1 引 言

在工业应用领域中,可以耦合到光纤、具有良好光束质量的千瓦级固体激光系统受到了越来越多的应用。大功率固体 Nd:YAG 激光系统应用于材料加工领域有 4 个条件^[1]:激光器要求高效率和高功率输出;激光光束有高的光束质量,这样可以用光纤(通常用 $600 \mu\text{m}$ 的光纤)传输;激光器有较宽的工作范围;激光系统能长时间稳定工作。

工业用大功率固体激光系统,一般要求输出功

率为 2000~4000 W,采用 $600 \mu\text{m}$ 的光纤耦合输出。而常规单棒 Nd:YAG 激光器的输出功率被局限在 400~600 W,采用多棒串接的结构,可以使输出功率得到提高^[2],这种方法得到的激光输出功率可以随着腔内棒数的增加而增长,输出激光光束质量基本不变。本文介绍了一种符合工业应用的国产化大功率固体激光加工系统,对大功率固体激光系统涉及的单棒模块激光器、多棒串接激光器、大功率激光光纤耦合等关键技术问题进行了分析,并介绍

收稿日期:2008-09-16;收到修改稿日期:2008-10-13

基金项目:北京市重点技术创新项目(jc1z2001-1019)和国家自然科学基金(60678014)资助课题。

作者简介:李 强,男,四川人,教授,博士生导师,主要从事高功率固体激光技术与加工系统方面的研究。

E-mail:ncltlq@bjut.edu.cn

了构成大功率固体激光器的水冷却系统、电气控制系统、操作控制软件和控制界面。

2 大功率固体激光加工系统的构成

工业用大功率固体激光加工系统由大功率连续 Nd : YAG 激光器、光纤耦合系统、激光加工工作头和三维柔性加工机械手构成,如图 1 所示。

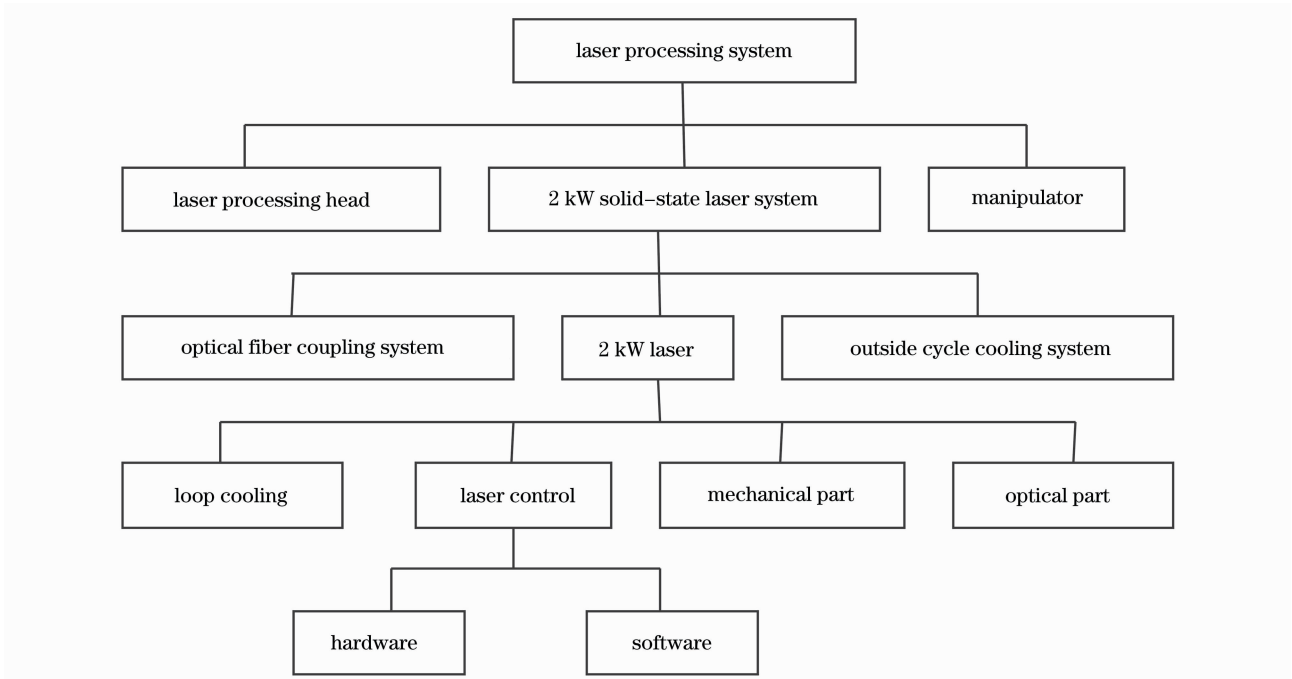


图 1 激光加工系统的构成框图

Fig. 1 Schematic diagram of laser processing system

3 大功率连续 Nd : YAG 激光器

激光系统的光束质量和输出功率体现加工系统的加工能力,大功率激光器在保证高光束质量的条件下大功率输出是构成加工系统的关键之一,也是保证 600 μm 光纤耦合输出的条件。采用多棒串接的方法获得大功率激光输出,涉及单棒模块激光器的光束质量和输出功率,以及多棒串接激光器匹配、稳定区域,以实现输出功率随着腔内棒数的增加而增长,输出激光光束质量基本不变。

3.1 单棒模块激光器

单棒模块激光器性能决定大功率 YAG 激光器的性能,影响大功率固体激光器模块输出功率和光束质量的主要因素是激光棒的热焦距和激光器的稳态宽度。

激光棒光焦度的稳态范围与输出功率变化范围之间的关系^[3]为

$$\Delta D = \frac{\alpha}{\eta_s A} \Delta P_{\text{out}}, \quad (1)$$

式中

$$\alpha = \frac{1}{K} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dt} + \frac{1}{2} n_0^3 \beta (C_r + C_\theta) + \frac{r_0 \beta (n_0 - 1)}{n_0 l} \right],$$

A 为棒横截面积, η_s 为激光器效率。由(1)式可知,提高激光器效率,有利于减小光焦度(增加热焦距)的稳态范围,获得高功率输出。

单棒对称结构平行平面腔在稳态宽度内激光器光束质量为^[3]

$$\frac{\Delta P_{\text{out, max}}}{(\theta_m \omega_m)_{\text{max}}} = \frac{2\pi\eta_s}{\alpha} \quad (2)$$

式中用 $\theta_m \omega_m$ 描述光束质量。由(2)式可知,提高激光器效率,有利于减小光束参数乘积,提高输出激光的光束质量。同时,对既定的激光器,激光器的输出功率范围与输出激光的光束质量之间不能同时满足,为提高激光器的输出光束质量,需要限制激光器的输出功率范围。

基于上述分析,激光器输出功率和光束质量,都归结为激光器效率。灯抽运 YAG 激光器的效率涉及抽运灯的光谱和效率、聚光腔的效率、激光晶体的效率和谐振腔结构等因素,在激光器的结构设计中,综合考虑了激光器件的这些因素,采取了优化措施包括:聚光腔的形状、结构和材料经优化设计;抽运灯的参数和材料经优化;激光晶体的参数经优化;聚光腔的冷却经优化。实现单棒模块激光器的

输出功率随抽运功率近线性地增加, 在 16 kW 最大电源抽运功率时, 输出功率大于 600 W, 输出激光束的光束质量为 $22 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

3.2 多棒串接大功率激光器

工业用大功率连续 YAG 激光器通常都要有较宽的功率输出范围, 多棒串接谐振腔除了临界点外要求一直工作在稳定区内, 以利于激光器在较宽的工作范围内获得高功率输出, 同时, 要实现在稳定区内大功率输出, 要求晶体棒热焦距之间能很好地匹配, 否则激光器在临界点附近将工作在非稳区, 影响激光器大功率输出。

对于 2000 W 级大功率固体激光器, 采用四棒串接对称平平腔结构, 即棒间距为 d (d 为晶体棒间的光学长度, 主面位于距晶体棒端面 $h = 2l/n$ 处^[4], 其中 l 为晶体棒的几何长度, n 为晶体棒的轴向折射率), 棒与高反镜、输出耦合镜的间距为 $d/2$ 。在动态曲线移动过程中, 经过四个位于 $g_1 = 0, g_2 = 0$ 和五个位于 $g_1 g_2 = \pm 1$ 的临界点, 在晶体棒热透镜焦距 $f > 0.5d$ 的情况下, 四棒谐振腔除了几个临界点外将一直工作在稳定区内^[5]。四棒串接激光器的棒间距设计应保证上述条件, 以保证激光器在较宽的工作范围内获得高功率输出。

激光器运行时, 随着抽运功率的增长, 需要经过几个临界点, 这就要求四根晶体棒热焦距之间能很好地匹配, 否则激光器在临界点附近将工作在非稳区, 激光输出功率将会下降, 严重时功率输出为 0。晶体棒热焦距之间的匹配是运行过程中的匹配,

需要晶体棒之间热焦距在工作范围内处处匹配。准确测量激光棒的热焦距对于设计优化大功率激光器系统十分重要, 采用一种简单的测量大功率灯抽运连续激光器的径向和切向热焦距的新方法^[6]。在大功率激光输出时, 利用谐振腔的临界稳定条件计算有效热透镜的焦距。简单的平行平面谐振腔的临界稳定点是对增益介质的热透镜敏感的函数。激光输出功率是抽运灯输入功率的函数, 通过监测激光输出功率, 记录由于有效热焦距使谐振腔通过特殊临界稳定的点特性, 可以确定有效热焦距。这种方法不仅可以测量与激光器结构有关的平均有效热焦距具体值, 而且可以测得对应的径向热焦距 f_r 和切向热焦距 f_θ 。这种方法不需要特别的仪器, 且操作简单。

在四棒腔串接前, 对每个单棒激光模块的输出功率、热焦距都采用对称平平腔进行测试。测得性能相近的模块被用于组装四棒对称平平腔。采取调整抽运功率的方法来匹配各个晶体棒的热焦距, 在一定的抽运功率下, 微调第一根晶体棒的抽运功率并观察激光器的输出功率。若激光器输出功率有所增长, 说明四根晶体棒热焦距未达到匹配; 调至输出功率达到最高时, 说明晶体棒热焦距基本匹配。如此依次调整各个晶体棒的抽运功率, 经多次调整后达到较好的效果。在输入功率为 60 kW 时, 测量激光器输出功率达到 2105 W, (如图 2 所示), 总的电光转换效率为 3.5%, 采用光束光斑质量诊断仪测量光束参数乘积为 $24 \text{ mm} \cdot \text{mard}$ 。

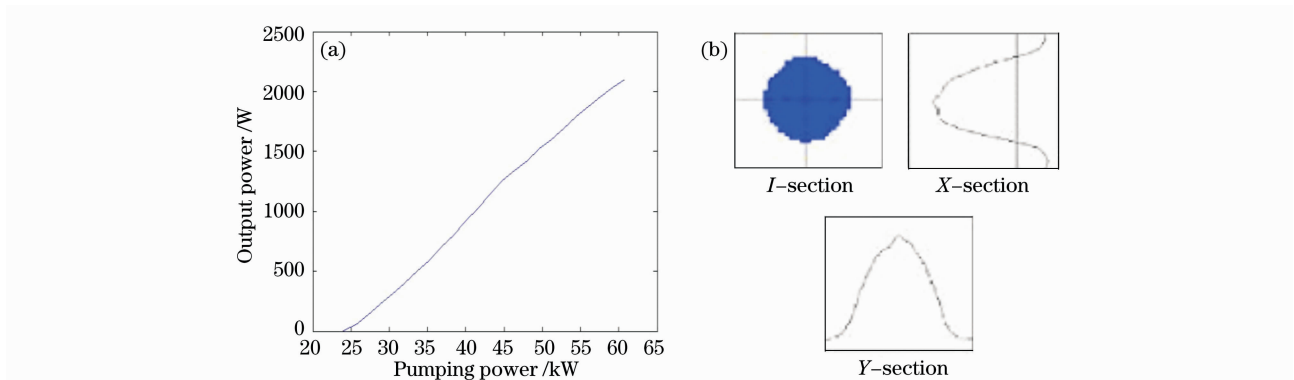


图 2 激光器输出功率随抽运功率的变化曲线(a); 激光光束的强度分布(b)

Fig. 2 Measured output power with changing pumping power (a) and intensity distribution of output laser beam (b)

4 大功率激光光纤耦合

大功率固体激光在金属材料的切割、焊接、熔覆等工业加工中有重要的应用价值, 其主要优势在于它可在光纤中传输, 实现柔性化三维激光加工^[7]。

大功率固体激光光纤耦合效率的提高, 不仅可将激光器输出的激光有效地传输到工件, 最大限度地利用激光器输出功率, 而且耦合损耗的降低可提高光纤耦合、传输系统的可靠性。大功率固体激光光纤

传输系统的效率包括光纤的传输效率和激光与光纤耦合的效率。由于传输大功率固体激光所用的多模光纤只有十几米,自身损耗很低^[8],因此大功率固体激光光纤传输系统的效率,主要取决于激光与光纤耦合的效率。对于工业用大功率固体激光器,输出激光功率较大,达数千瓦;为满足加工过程对不同功率的需要,输出功率有较大的范围,从额定功率到额定功率的 10%;输出激光的模式为多模,出射光束的束腰位置是固定的,光束质量随着输出功率的增加而变化,表现为发散角 θ 和束腰大小的变化。大功率激光光纤耦合系统应具备很好的适应性,即耦合系统要不受光束质量变化的影响,对不同功率的激光,尤其是在高功率范围,都要有较高的耦合效率。

4.1 耦合系统结构

激光全部耦合进光纤,必须满足光纤耦合条件,即输入光束的光斑半径要小于光纤芯径,发散角(全角)要小于光纤数值孔径反正弦值的 2 倍。工业用激光器的光束质量常用光束参数积 BPP 表征,其定义为 $BPP = \text{束腰光斑半径} \times \text{远场发散角}$ 。光纤耦合条件为^[9]

$$\begin{aligned} BPP_{\text{laser}} &< \frac{d_{\text{laser}} \cdot NA}{2} \\ d_{\text{in}} &< d_{\text{core}}, \\ \theta_{\text{in}} &< 2 \arcsin(NA). \end{aligned} \quad (3)$$

由于工业用大功率固体激光器输出光束发散角 θ 和束腰大小随输出功率变化,选择适应光束质量变化的耦合系统结构,是光纤耦合系统高效率耦合的关键之一。

常用的耦合方式有两种:单透镜直接聚焦;进行光束变换后再聚焦,分别如图 3(a), (b) 所示。其中进行光束变换后再聚焦的方式中有一种望远镜准直

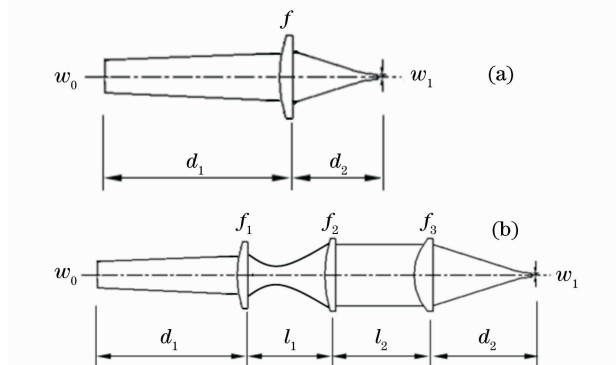


图 3 单透镜直接聚焦(a),光束变换后聚焦(b)

Fig. 3 Focusing with single lens(a) and after beam transforming (b)

聚焦方式^[10],此方式能够明显提高基模激光束的耦合效率,但不适用于光束质量变化的多模激光束。

比较两种聚焦方式,根据 ABCD 传输定律,可得到基模高斯光束经过两种方式聚焦后的光斑半径。通过计算机数值模拟,得到在不同光束质量下两种方式对聚焦光束束腰半径大小及束腰位置的影响,如图 4 所示。

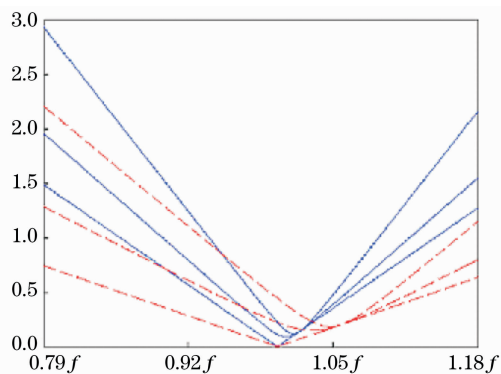


图 4 不同光束质量下两种方式对聚焦光束束腰半径大小及束腰位置

Fig. 4 Different beam quality in two focusing ways impacted the focused beam waist size and the focused beam location

图 4 中虚线对应单透镜聚焦光斑 w_1 相对于 d_2 的变化,实线对应变换后再聚焦 w_1 相对于 d_2 的变化,其中 w_1 为聚焦光斑半径, d_2 和 f 分别为聚焦光斑到聚焦镜主面的距离和聚焦镜的焦距,实线和虚线各对应三条曲线的光束质量因子 M^2 自上而下依次为 120, 60 和 1。模拟计算表明单透镜聚焦后的光斑在光束质量变化时,半径和束腰位置的变化都比变换后再聚焦的情况大,因此,光纤耦合系统需要在光束变换后再进行聚焦耦合,以适应光束质量的变化。

4.2 耦合系统参数优化与结果

采用光束变换后聚焦耦合的结构(如图 3),对光束变换的透镜 F_1 , F_2 , 以及聚焦透镜 F_3 的焦距和位置参数进行优化。使透镜 F_3 的主面在透镜 F_2 的束腰处,保证入射到透镜 F_3 的激光束的准直度尽量好,从而使聚焦激光束的束腰到透镜 F_3 主面的距离保持为稳定值,这样即使光束质量变化,透镜 F_3 也有一定的调节范围; d_2 的大小由透镜 F_3 的焦距 f_3 确定, f_3 的大小由光束质量(光束参数积 BPP)、光纤芯径 d_{core} 和数值孔径 NA 决定,在满足光纤耦合条件的前提下,对光纤的接收端面优化,工业用大功率固体激光器的光束质量变化范围一般为 $10 \sim 24 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,光纤芯径为 $600 \mu\text{m}$,选取最差时的光

束质量进行计算确定 f_3 。

图 5 为耦合系统的光纤耦合效率与输入功率曲线。输入激光功率为 2000 W 时, 耦合效率大于 94 % 的激光输出。图 5 中耦合效率随着抽运灯输入功率的增加所体现出来的下降与上升主要是光束质量的变化造成的。随着激光器抽运灯输入功率的增加, 工作物质的热透镜效应就越明显, 激光器的工作状态由稳区进入临界稳定区再过渡到稳区^[5]。在稳区工作时, 激光器的输出功率随激光器抽运灯输入功率的增加而增加, 且光束质量优于临界稳定区状态下的光束质量。此外, 透镜的球差和镀膜、光纤端面倾斜、激光与光纤机械对准误差、轴向误差、纵向间隙、角度误差等因素也会影响光纤耦合效率, 耦合效率曲线的变化是多种因素共同作用的结果。

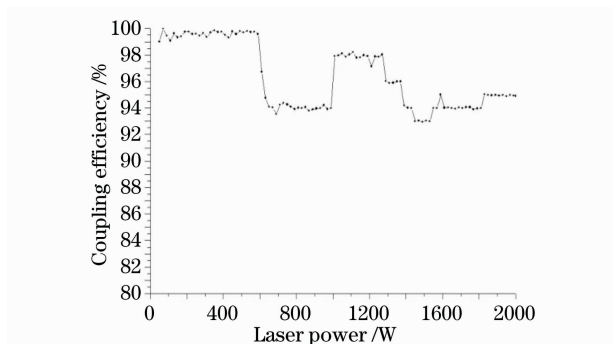


图 5 光纤耦合系统耦合效率

Fig. 5 Coupling efficiency of fiber coupling system

5 系统控制

工业用大功率固体激光加工系统对控制系统有特殊的要求, 包括人机操作界面的信息传递、水冷系统的监测控制、光闸单元的控制和检测、激光器操作模式的控制、与机器人等外控设备的联接、安全保护、报警功能等, 是构成加工系统的关键之一。采用可编程逻辑控制器(PLC)为控制系统的下位机, 采用触摸屏为上位机(操作面板), 实现激光加工机方便操作、安全可靠运行。

大功率固体激光加工机的控制系统结构如图 6 所示, 采用可编程控制器作为系统主控部件, 抗干扰能力强, 可靠性高; 采用触摸式人机操作界面将系统数据和操作命令传送给 PLC, 同时接收系统状态信息, 以便操作者了解加工系统的运行状态, 操作灵活, 使用方便; 手动操作和自动运行通过按钮信号, 对激光器的输出功率、切割及焊接参数和 Ramping 参数进行控制, 与机械手等外部执行单元连接, 适用于工业化加工生产过程。具有较强的 Ramping 功能, 最大限度地保证了激光加工的工艺质量; 激光电源控制器对激光电源的点火、灭火信号以及输出的功率值进行控制、监测, 并通过 PLC 反馈到人机操作界面; 水冷系统、光闸单元的状态通过多路水流量监测仪和光闸位置开关提供系统内部的安全信号, 以保证激光器各部件正常安全运行; 安全保护部分根据安全分类对系统内部的信号进行快速响应, 采取了多种保护措施, 保障系统及人身安全。

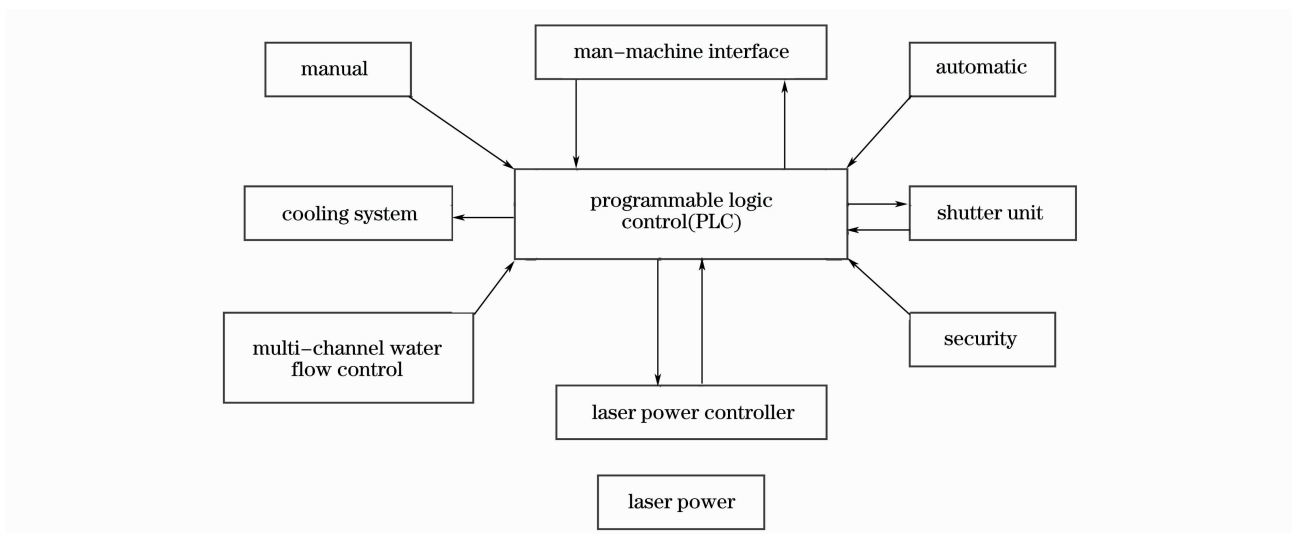


图 6 大功率固体激光加工机的控制系统结构

Fig. 6 Construction of controlling system of high power solid state processing machine

6 应用效果与结论

构成的激光系统如图7所示，NCLT-CW 2000系统输出2000W的激光，激光采用光纤耦合的方式传输，配合机械手可以很方便满足汽车等行业中用到的切割、焊接等工艺的加工要求，如图8所示为汽车制造企业应用现场照片。加工头自行设计，可以方便的更换，以满足不同材料，不同厚度以及不同工艺的加工要求。



图7 大功率固体激光加工系统

Fig. 7 Photograph of high power solid state processing machine



图8 激光加工系统在企业应用

Fig. 8 Application of high power solid state processing machine in automobile

参 考 文 献

- 1 K. P. Driedger, R. M. Ifflander, H. Weber. Multirod resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, **24**(4): 665~673
- 2 M. Kumkar, B. Wedel, K. Richter. Beam quality and efficiency of high-average-power multirod lasers [J]. *Optics & Laser Technology*, 1992, **24**(2): 67~72
- 3 Koechner W. T. Solid-State Laser Engineering [M], New York, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995
- 4 Vit Torio M.. Resonator for solid state laser with large volume fundamental mode and high alignment stability[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 107~117
- 5 Li Qiang, Fang Mingxing, Wang Zhiyong *et al.*. Three-rod resonator for Krypton lamp pumped 1.8 kW continuous-wave Nd : YAG laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, **21**(12): 2422~2425
- 6 Li Q., Wang Z M., Zuo T. C.. A method measuring thermal lens focal length of all rays polarized in radial and tangential direction of high power Nd : YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**: 155~158
- 7 Th. Beck, K. Richter, H. Weber. Beam addition of Nd : YAG high power lasers [C]. *SPIE*, 1996, **2788**: 157~166
- 8 Wang Limeng, Zhang Tingrong, Qin Dajia. Special optical fiber for infrared high power transmitting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(3): 31~38
王黎蒙, 张廷荣, 秦大甲. 用于大功率红外传输的特种光纤[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(3): 31~38
- 9 Wang Baohua, Jiang Menghua, Hui Yongling *et al.*. Improving coupling efficiency of optical fiber for high power laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 195~199
王宝华, 姜梦华, 惠勇凌 等. 大功率固体激光器高效率光纤耦合 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 195~199
- 10 Wei Rong, Wang Yuzhu. Telescope system used to the single mode fiber coupling of the laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 687~690
魏 荣, 王育竹. 望远镜准直系统应用于激光的单模光纤耦合 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 687~690