

华中科技大学
硕士学位论文
激光切割-拼焊关键技术研究
姓名：刘云
申请学位级别：硕士
专业：机械电子工程
指导教师：汤漾平
2002. 1. 1

摘要

激光切割—拼焊系统的研制及加工工艺参数的正确选取是激光切割—拼焊的关键技术，与激光拼焊板坯 (Tailored Welded Blank, TWB) 的质量直接相关。如何研制出激光切割—拼焊系统，使之能满足激光切割—拼焊的要求，是生产拼焊板坯的重要前提条件。迅速而准确地选取激光切割—拼焊的工艺参数是提高生产效率和加工质量的有效途径。

本文重点论述了激光切割—拼焊加工的特点、HJP-01 型激光切割—拼焊系统研制过程及工艺参数的基于遗传算法的神经网络选取方法。激光切割—拼焊加工是激光切割和激光焊接的有机融合。本系统仅仅采用一个聚焦光头，通过激光切—焊转换机构来实现激光切割和激光焊接的自动切换，从而使得切割和焊接紧密衔接。由左、右钳口和安装在其上的左、右夹具组组成板坯的装夹系统，并与定位机构的协调运动来实现板坯的切割定位。定位机构的运动有左、中、右三个位置的定位。左、右位置分别对左右板坯定位，确定要切除的余边的宽度；中位为焊接位。整个系统由计算机控制，以 PC 总线的工控机为硬件平台，配上相应的运动控制单元和 I/O 接口，完成控制系统的功能。根据激光切割—拼焊的工艺要求，控制系统软件包括：自动循环程序，手动操作程序，参数设置及状态显示程序，另外还有调试程序，从而实现了激光切割—拼焊的自动化。

本文提出了基于遗传算法的神经网络的激光切割—拼焊的选取工艺参数的方法。由于激光切割—拼焊参数的输入和加工质量之间的关系比较复杂，很难建立起明确的关系表达式；利用神经网络的方法，并用遗传算法对其权值进行训练，克服了传统的 BP 算法的局部最优的缺点。为了便于在多种环境下调用选参程序，本文介绍了动态连接库建立的方法，并为选参程序建立了一个动态连接库。然后进行了激光切割—拼焊的工艺试验，表明本系统的研制达到了预期的指标。

最后总结全文，提出了现存的激光切割—拼焊系统及其关键技术中的存在的问题，并对其解决方法做了初步的探讨。

关键词：激光切割—拼焊系统 激光切割 激光焊接 神经网络 遗传算法

BP 算法 拼焊板坯 切—焊切换机构 定位机构 装夹系统

ABSTRACT

The manufacture of Laser Cutting-Welding system as well as the correct selection of processing technology parameter, which are directly related with quality of tailored welded blank (TWB), are the key technology of Laser Cutting-Welding. How to manufacture Laser Cutting-Welding system and make them meet the requirement of Laser Cutting-Welding are the essential prerequisites. The proper and quick selection of Laser Cutting and Welding technology parameter is the efficient way to improve the production efficiency and products' quality.

The essay mainly discusses the features of Laser Cutting-Welding, the process of Model HJP-01 Laser Cutting-Welding system's manufacture as well as Neural Networks(NN) based on Genetic Algorithms (GA) parameter selecting method of Laser Cutting-Welding is the integration of laser cutting and laser welding. This system makes use of only one laser focusing head to realize the automatic exchange of laser cutting and laser welding by cutting-welding exchange machine, which connects cutting and welding closely. The fixing system for blanks, which posits cutting by its coordinate movement with positing machine, consists of clamps and fixtures. The positing machine has three movements: the right and left movements for right and left blanks cutting position determine the width of the material, which should be cut off; the middle movement is for welding position. The whole system is controlled by a computer, whose hardware platform is PC bus of IPC (Industrial Personal Computer) and is equipped with movement control unit and I/O interface accordingly to control this system. In response to the requirement of Laser Cutting-Welding, the system software is made up of auto-recycle program, manual operation program, parameter setting program and the state show program, in addition, it also includes experiment program, and realizes the automation of Laser Cutting - Welding.

The paper puts forward NN method based on GA for parameter selecting. As the relations between Laser Cutting-Welding parameter input and the product quality is very complicated, it is very difficult to establish clear relation expression. The NN parameter selecting method, which uses GA to train its weight, overcomes the disadvantages of local optimism. For the convenience of executing this program under all kinds of environments, this paper introduces the method of constructing the Dynamic Link Libraries (DLL), and also establishes a DLL for this parameter-selecting program. Then, the experiment is carried out and proves the character of this system reached the expected requirement.

The end of the essay comes out the brief discussion of problems as well as its solutions in the existing Laser Cutting-Welding system and its key technology.

Key words: Laser Cutting-Welding, NN (Neural Networks)
Laser Cutting GA (Genetic Algorithms)
BP (Back Programming) Laser Welding
TWB (Tailored Welded Blank) Positing & Fixing System
Dynamic Link Libraries (DLL)

1 绪 言

1.1 前言

以激光切割和焊接为代表的激光加工技术,是近代发展起来集光学、机械、计算机、材料、物理和化学于一体的综合性交叉科学技术^[1]。激光加工工艺和激光加工系统的实用化研究同时涉及激光、机械、控制和材料各科技的集成,具有较大的难度。近年来,我国虽然在激光加工的单项技术上取得了长足的进展,但是同国外相比,还有较大的差距,尤其在激光加工系统实际开发应用方面的差距更加突出。因此,我国对激光加工成套设备及其关键技术的开发与研究势在必行,以期在此领域赶上或接近国际先进水平。

1.2 课题的来源、目的和意义

1.2.1 课题的来源

本课题来源于国家“九五”攻关项目——“轿车底板用板材的激光拼焊中试生产技术研究”的子专题“轿车底板用板材激光切割、拼焊加工设备”,合同编号为:96-B11-01-04-02。

1.2.2 课题的研究目的和意义

激光切割-拼焊工艺原理是先利用激光将两块平板坯的毛边分别切割,然后将其对中拼接,最后利用激光将两块平板坯焊接成没有挠曲和变形的板坯。该工艺可以解决钢铁生产和汽车生产中对超宽和超长板的需求;激光切割-拼焊也可将不

同厚度、材质、强度、冲压性能以及不同表面处理状况的数块板坯拼焊在一起，形成冲压成型前的板坯。这样可节省材料，减少冲压的模具的套数、焊接装备和夹具，还可提高部件的尺寸精度，减少焊缝数量和打磨工作量，提高材料的利用率。

1.3 激光切割-拼焊技术的国内外概述^{[2] - [21]}

1.3.1 国外激光切割-拼焊技术现状

在国外，激光剪裁拼焊板坯（Tailored Welded Blank, TWB）已成为一个专有名词。它是经过切割、拼接和焊接而成的板材。激光切割-拼焊是生产剪裁拼焊板坯的一种有效工艺。

在发达国家，激光切割-拼焊已经广泛地应用到了钢铁生产和汽车生产领域之中。激光切割-拼焊作为目前工业激光应用的一个重要领域，预计还将有较大幅度的增长。

加拿大、美国、日本、德国等发达国家的钢铁生产和汽车生产厂家，如美国的福特以及日本的尼桑、本田等汽车公司，大量采用激光切割-拼焊技术对轿车底板内门、车门框的板坯材料进行切割-拼焊，不仅提高了生产效率和加工质量，而且还能解决车身加长，车顶开窗等问题。利用大功率的 CO_2 激光器，可把焦点调到距镜头 2.5m，采用数控系统操纵聚焦精确地转动以形成扫描激光束，用以焊接或切割相距约 2.5m 处的车身工作面。其功率最大可达 27kW，最大速度 4m/s，最大加速度达 100m/s^2 ，焊接位置精度为 $\pm 0.5\text{mm}$ 。丰田汽车公司于 1985 年开始应用激光拼焊板坯，凌志牌高级轿车的车围就是用激光把 5 块板坯拼焊成一个整体后送进冲压生产线的。奔驰 300SEL 轿车的顶盖也是用激光焊接生产的。德国大众汽车公司使用板拼焊板坯作为车底，且在梯森公司实现了全自动化生产激光拼焊板坯。日本汽车厂家采用激光焊接车门内板坯，由于改变了下料的排样方式，废料率从 24% 降到 10%，工业的材料利用率由 49.2% 提高到 58.4%。激光拼焊技术在大

批量生产条件下,可以取得很大的经济效益。卡车车门框零件在冲压成型及工作中的受力状况随零件部位不同而变化,整体下料毛坯只能按照同一要求选料,造成使用的板坯质品位高,板厚过大。而采用激光切割-拼焊技术,可以将不同板厚和不同材质的板材先切割成预定的形状,然后让其拼焊和成型,能减轻零件的重量,降低材料的等级。采用激光拼焊件取代车门内板整体下料毛坯,材料的利用率提高 9.2%。美国汽车工业应用激光焊接技术以后,进行成本核算时发现,每辆白车身可节约成本 100 美元。其中拼焊板坯节约 32 美元;激光切割节约 10 美元;激光焊接覆盖件及骨架件节约 20 美元;节约钢材 25 美元;节省密封材料 3 美元;节省工装费 10 美元。

激光切割-拼焊在钢铁行业中主要用于钢带的焊接及连续酸洗线上。日本川崎钢铁公司的激光切割-拼焊系统用于厚 1.2~6mm、宽 1650mm 薄钢板生产线以及厚 0.4~2.3mm、宽 1270mm 薄钢板生产线上。焊接质量大大提高,投资成本仅为原闪光焊的 2/3。该公司还应用 10kW 的 CO₂ 激光,焊接最大厚度达 8mm 的不锈钢板,与传统的焊接方法相比,接头的反复弯曲次数增加 2 倍。在连续酸洗线上的激光焊接机,可以焊接最大厚度为 6mm 的各种钢板,其接头的塑性和韧性比闪光焊接有很大的改进,可以顺利通过焊接后的酸洗、轧制和热处理工序,而不会断裂。

1.3.2 国内激光切割-拼焊技术现状

激光切割-拼焊技术在国外迅速发展,在很大程度上是对传统技工技术的一种革命,同时也提高了废料的利用率,减少了汽车的制造成本,产生了巨大的经济效益和社会效益。但在国内,仅在激光切割和焊接的单项技术上取得了一定的成果,而激光切割-拼焊技术及设备的研究尚处于空白。

目前国内激光焊接工艺和设备,正从实验室逐步走向工业生产,先后完成了多联齿轮、热轧硅钢片、双金属锯条焊接等一批具有较高水平的激光焊接工艺和设备的研究课题,使我国激光焊接的应用向前迈进了重要的一步。

我校与上海光机所合作,应用国产大功率的 CO₂ 激光加工设备,成功地进行

了齿轮的深熔焊接,激光的输出功率为:2~5kW,焊接深度为4mm,焊接宽深比为2:1,焊接速度为50mm/s,焊口硬度高于母材。我校与江西轻工业机械厂合作完成的食物罐身激光焊接成套设备及工艺研究,采用700W CO₂激光焊,焊接速度可达8~12m/min,达到了国际先进水平。上海光机所使用1000W CO₂激光焊,焊接厚度0.5mm、宽度1m的热轧硅钢片,焊缝的机械性能均与母材相当,在冲压过程中无裂纹、无脆断,即便剪口在焊缝上,也可保证磁芯的质量。中国科学院长春光机所完成了齿采用高速钢,背部采用弹簧钢的金属手锯条的激光焊接工艺课题,从而使其使用寿命比原来提高了5倍以上。双金属锯条的焊接采用CO₂激光器,输出功率700W,焊接速度2m/min,被焊接后经高温回火,焊缝的剪切强度为600MPa,完全可以达到国外的用电子束焊接质量,而且还可以克服原有锯条生产中电子束焊接工艺复杂、能耗大、成本高的缺点。我校材料学院利用激光对0.8mm厚的对接镀锌板进行焊接后的一系列试验表明,接头无变形,其力学性能、冲压性能均与母材的性能相当。激光焊接作为一种特殊的焊接工艺,正逐步被人们所认识和使用。

激光切割和焊接的单项技术逐渐为国内的人们所理解与掌握,并被逐步地应用到工业生产中。如何将激光切割和激光焊接技术巧妙地结合起来,应用到激光切割—拼焊中去,以期实现各种汽车用拼焊板的国产化,正是本课题所要解决的问题。

1.4 本文的主要工作

1. 概述了HJP-01型激光切割—拼焊系统中的关键技术。着重论述了作者自己设计的激光加工头,装夹定位系统及切—焊切换机构的结构与工作原理,同时也简要地阐述了作者参与设计和调试的机床主机,液压系统和计算机控制系统的结构与工作原理。

2. 激光切割—拼焊的工艺参数优化与选择。主要参数有切割和焊接速度,激光功率及切割辅助气体的气压等,对这些参数的优化和预测采用了基于遗传算法的神经网络选取工艺参数的方法,该法首先采用遗传算法对网络的中的连接权值

进行优化，然后利用神经网络的方法对未知参数进行预测。这样就解决了激光切割—拼焊中选参难的问题。

3. 为基于遗传算法的神经网络程序建立了一个动态链接库，使之能很方便地被应用程序调用。

4. 进行了激光切割—拼焊的工艺试验。利用试验对该系统的加工性能进行了检验，并证明该系统的研制达到了预期的指标。

2 HJP-01 型激光切割-拼焊系统的总体结构研究和设计

2.1 引言

激光切割-拼焊系统集成激光切割、对中拼接及激光焊接于一体。高质量的激光切割和精密的数控对中直接关系到焊接质量。因而对激光加工的原理，激光切割焊接的转换及对中技术的研究具有重要的意义。

2.2 激光切割原理及特点

激光切割是利用经聚焦的高功率激光束——较多使用 CO_2 连续波——照射工件，在超过一定（阈值）功率的密度的前提下，光束能量以及活性气体辅助切割过程附加的化学反应热能被材料吸收，温度急剧上升。达到沸点后，材料开始汽化，并形成空洞。随着光束与工件的相对移动，最终使材料形成切缝。切缝处熔渣被一定压力的辅助气体吹除，如图 2-1 所示^[22]。汽车工业中，激光切割一般采用基模或低阶模的光束模式，激光经聚焦以后具有极高的功率密度，可使材料产生汽化或熔化现象。由于金属表面对于波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光的反射率高，为了提高切割速度和切割质量，在切割金属工件时，往往与激光同轴地吹送氧气或压缩空气以提高切割效率，在切割易燃的材料时则与激光同轴吹送氮气或氩气等惰性气体以防燃烧^[23]。

2.2.1 激光切割的种类

从激光与各类材料作用不同的物理形式来看，激光切割大致可分为汽化切割、熔化切割、氧助熔化和控制断裂切割四类^{[24][25][26]}。

1. 汽化切割

工件在激光束的加热下，升至沸点以上的温度，一部分材料化作蒸汽逸去，另一部分作为喷出物从切割缝底部吹走。它需要 10^8W/cm^2 的高功率密度的激光束。对于不能熔化的材料（如木材、碳素和一些塑料），一般采用这种切割方式。

2. 熔化切割

激光束功率密度超过一定值时，会使工件内部蒸发、形成空洞。然后，与光束同轴的辅助气流把空洞周围的熔化材料驱除、带走，这就是熔化切割。其所需的功率密度约为汽化切割的 $1/10$ 。

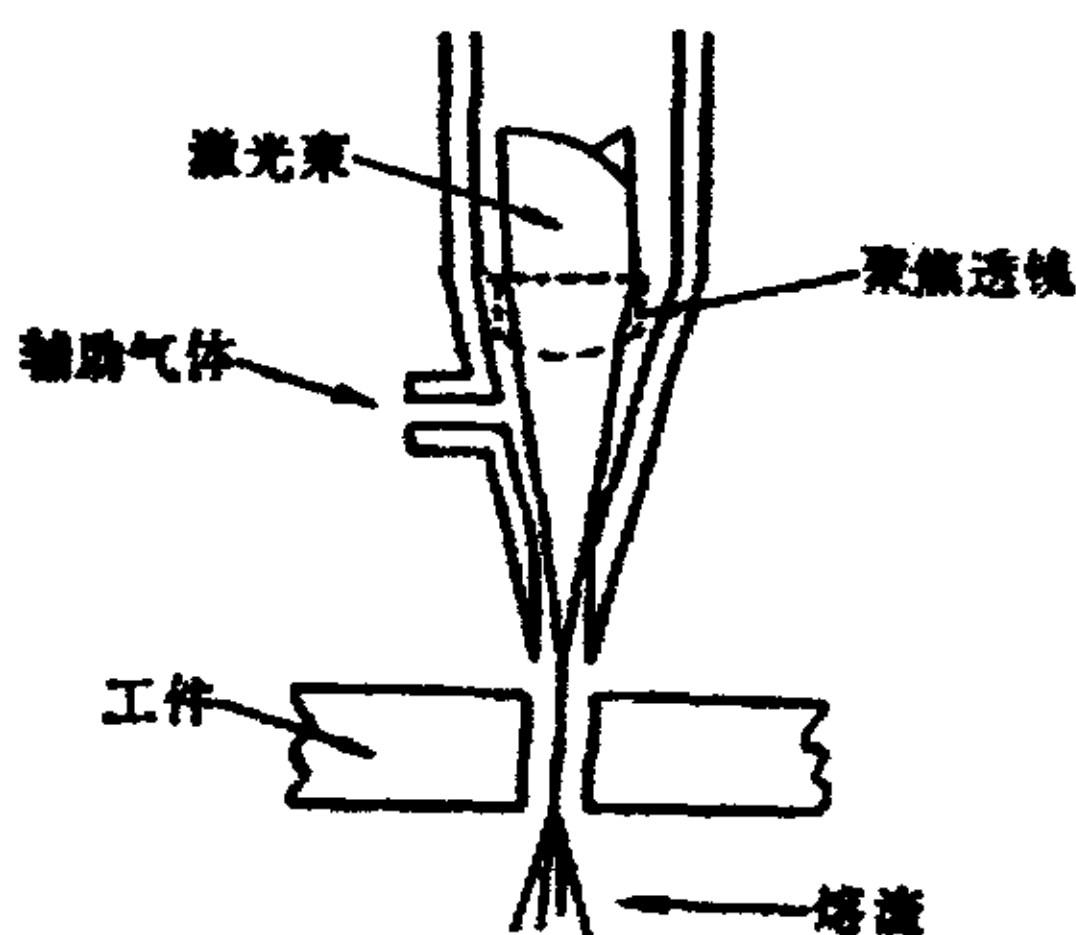


图 2.1 激光切割示意图

3. 氧助切割

如果用氧气或其它活性气体代替熔化切割所用的惰性气体，用于热基质的点燃，产生另一热源。其机制较为复杂。

4. 控制断裂切割

通过激光束加热，易受热破坏的脆性材料可被高速可控地切断，其切割机制可概括为：激光束加热脆性材料小块区域，引起热梯度和随之而来的严重机械变形，使材料形成裂缝。因为最大的机械变形区域是激光束加热区，只要保持均衡的加热梯度，激光束就可以引导裂缝在任何需要方向产生。但是，这种切割机制不适用于切锐角和角边切缝，切割特大封闭外形也有危险。

2.2.2 激光切割的优点

激光切割有许多优点：切缝窄(0.1~0.5mm)，节省材料；工件的热变形小；工件只需定位，不需夹紧、划线，无工件机械应力和表面损伤；能切割脆性材料和极软、极硬的材料(包括淬火钢)；切口平行度好、切边洁净，可直接用于焊接；切割速度高(可达10m/min以上)，无工具磨损；易于实现数控和计算机控制，并且可多实现工位操作。

2.2.3 激光拼焊对激光切割质量的要求

激光拼焊对激光切割质量的要求主要有：切缝入口处轮廓清晰、明显；切缝窄，可以节省材料，还可以切割盲缝；切边热损伤最小，可以减少热畸变程度；切边平行度好，切割边光滑，可直接进行焊接；切边无挂渣；切割表面无氧化，光洁度高，可以提高焊接性能。

2.2.4 影响激光切割质量的因素

影响激光切割的因素有很多,但是从总的情况来看,有以下一些方面。

1. 光束的特性

它包括激光的功率、光束模式、聚焦光斑、光束偏振。激光的模式与它的聚焦能力有关，与机械刀具的刃口尖锐度相似。最低阶模是 TEM_{00} ，其光斑内的能量呈高斯分布。它几乎可以把光束聚焦到理论上最小的尺寸，如百分之几毫米直径，并给出最陡、最尖的高能量密度。模式如图 2.2。而高阶或多模光束的能量分布扩散，经过聚焦的光斑较大而能量密度较低，用它来切割材料犹如一把钝刀。依据衍射理论，聚焦光斑直径 D 可以用下式计算

$$D=2.4F\lambda \quad (2.1)$$

对切割常用的 CO_2 激光束来说，因 $\lambda=10.6\mu m$ ，上式可改写成

$$D=25.4F (\mu\text{m}) \quad (2.2)$$

其中, D 是指功率强度下降到 $1/e^2$ 中心值时的光斑直径; F 是所用光学系统的 F 系数, 对双凸镜, 它等于焦距/入射光束直径。与光斑直径相联系的焦深 Z_0 , 它指焦点上、下沿光轴中心功率强度超过 $1/2$ 的那段距离:

$$Z_0=\pm 4\times 1.39(\lambda L^2/2\pi a^2)=\pm 4\times 1.39(2\lambda F^2/\pi) \quad (2.3)$$

对波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光束来说:

$$Z_0=\pm 37.5 F^2 \quad (2.4)$$

其中, λ 波长; L 为凸镜焦距; $2a$ 为光束斑直径; F 即 $L/2a$, F 系数。

由上可知, F 应与工件材料、厚度和激光的功率相匹配。几乎所有的高功率激光器都是平面偏振, 也就是在发射光束内电磁波都在同一平面内振动。电磁波在垂直于工件的平面或表面内振动, 对能量耦合效应的差别较小。在表面处理或焊接领域, 光束的偏振问题并不重要。但是在切割过程中, 光束在切割面上不断反射, 如果光束能沿切缝方向振动, 光束的能量就能被最好地吸收。因而在实际切割中的缝宽、切边粗糙度和垂直度都与光束的偏振有关。对复杂的工件来说, 很难保持光束的方向与工件的运动方向平行, 一般在聚焦前, 激光腔射出的线偏振光束先经过特殊附加的圆偏振镜, 转成圆偏振光束, 从而消除线偏振光束对切割质量不良的方向效应。在允许的最高切割速度下, 圆偏振光束切割的切割质量仍能在各个方向保持一致。切缝底部区切面角与切割方向偏离 90° 的现象也被消除。

2. 材料特性

它包括表面的反射率、表面状况等。激光加工的材料种类不同, 其物化性能各异, 从而对光束的表面反射率也不一样。理论上讲, 材料对光束的反射率越低, 切割速度越快。对不透明的材料而言, 吸收率 $= (1 - \text{反射率})$, 它强烈地与材料的表面形状、氧化态、偏振面以及等离子体耦合有关, 同时也是时间和温度的函数。不同的表面状况也显著地影响着材料对光束的吸收。

3. 切割喷嘴的内部形状及切割喷嘴与工件表面的距离

设计好的喷嘴孔直径必须允许光束顺利通过, 避免孔内光束与喷嘴壁接触。

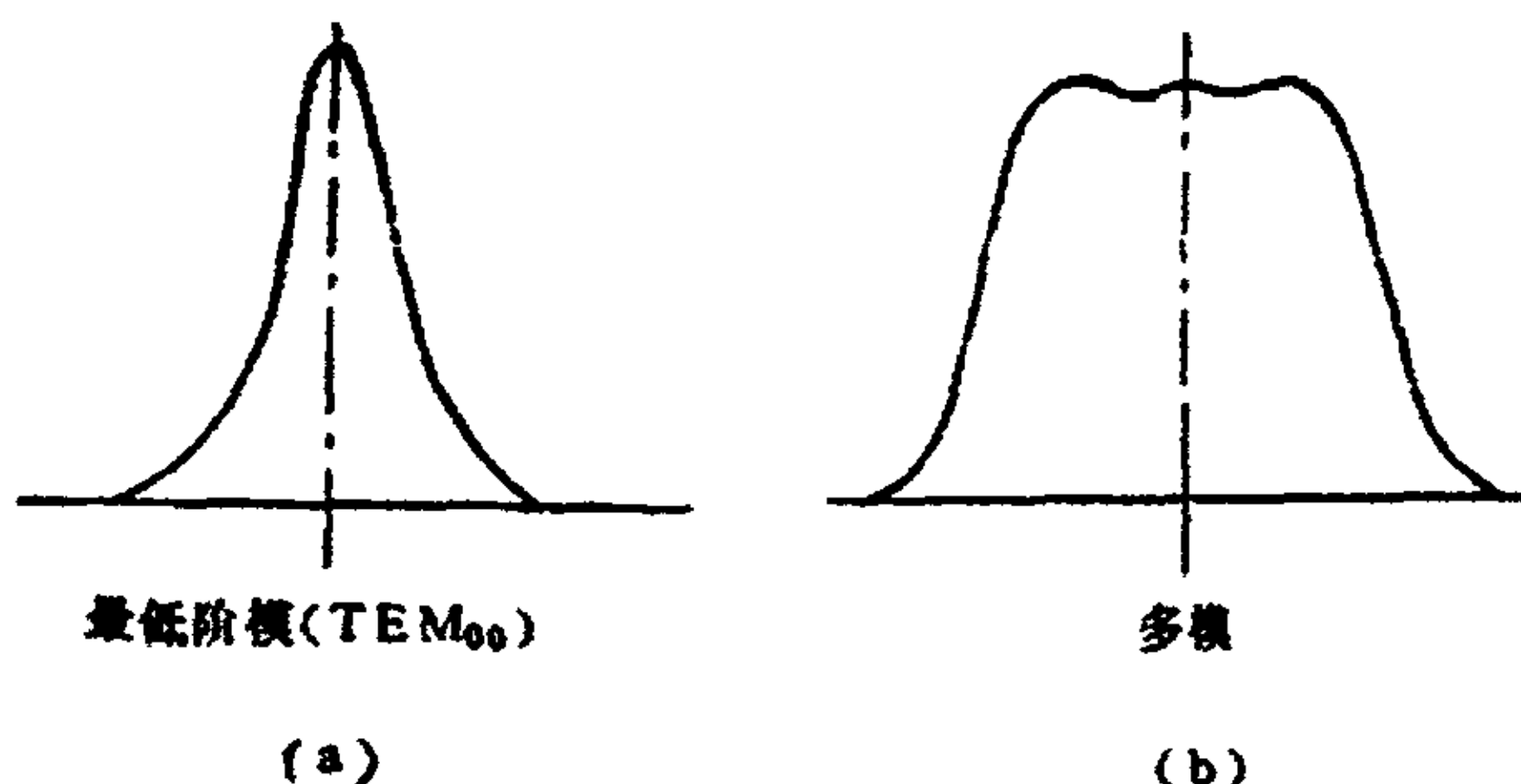


图 2.2 光束端面能量分布一模式示意

(a) 基模(TEM_{00}) (b) 多模

而且，设计较好的喷嘴可以克服切割过程中因切割辅助气压的增加产生的激波对切割产生的不良的影响^[27]。喷出的辅助气流必须与驱除切缝内熔融产物和强切割作用有效地偶合，使供气的滞压（Stagnation Pressure）全部转化为动能，有效地把熔化的金属及其夹渣物从切割前沿口吹走。喷嘴与工件表面的距离对切割质量的影响以及喷嘴气流与工件切缝的偶合属于动力学问题，排出气流形式和工件间距离都是重要变量，喷嘴口离工件板面太近，会产生对凸镜的强烈的返回力，影响对溅散切割产生物质点的驱散能力，但是喷嘴口离工件板面太远，也会造成不必要的动能损失。

4. 切割速度

切割的基础在于有效的功率密度和被切工件的性能。在阈值以上和其它参数设定的情况下，切割速度直接与有效功率密度成正比，而后者又与光束模式和光斑尺寸有关。切割速度与材料密度和厚度成反比。

5. 切割气体气压及种类

辅助气体为活性气体时，可以与金属产生化学反应，增加能量强度。与激光同轴的辅助气体可以吹开和消除等离子云对激光的屏蔽作用，保持恒定的切割速度，同时也可以从切割区吹掉熔渣，清洁切缝，冷却切缝邻近区域，减小热影响区域，保护凸镜，防止燃烧产生的烟雾污染光学镜片。如图 2.3 所示，在 *A*、*B* 或者 *C* 方向使用第二种辅助气体和相应的流速可以明显提高切割速度和增加切割材料的厚度。

目前，激光切割技术已经发展到完备的地步。激光切割系统，除配置功率大、模式好的激光器外，还配有高精度工作台，可以多轴联动，实现各种复杂的平面或空间图形的切割，甚至还研制出加工精度更高、柔性更好的激光切割机器人。

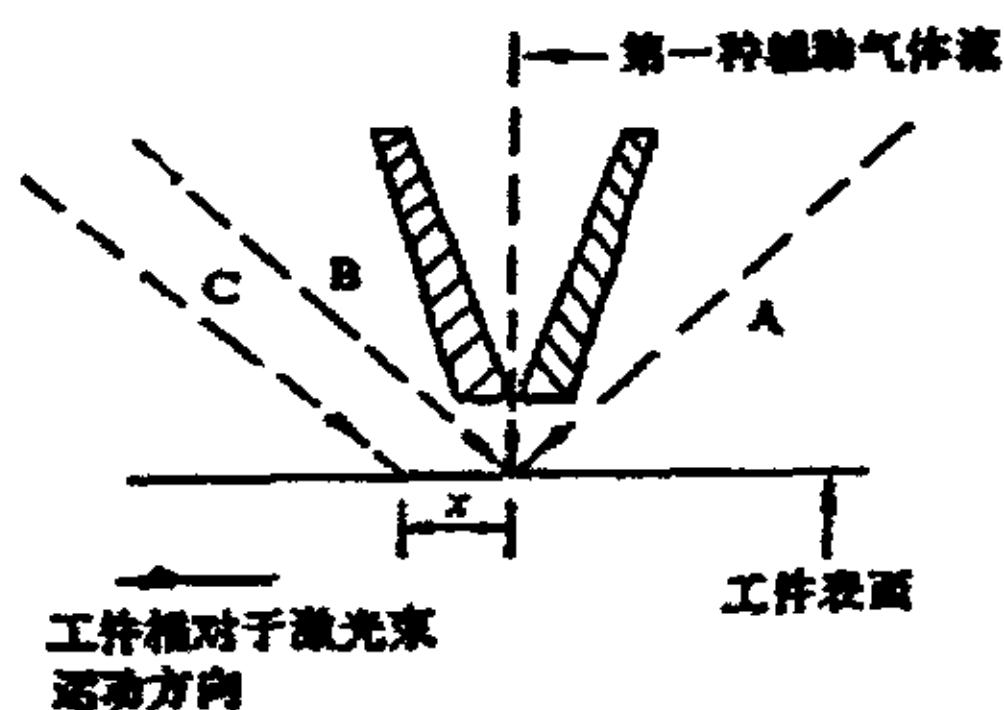


图 2.3 第二种气体流可能的设置的位置

2.3 激光焊接的特点

激光焊接分为传导焊和深穿透焊两种。两者都需将高强度激光束直接辐射至材料的表面，通过激光与材料的相互作用，使材料局部熔化实现焊接。在激光与材料相互作用过程中，同样会出现光的反射、吸收、热传导及物质的传导。只是在热传导型激光焊接中，辐射至材料表面的功率密度较低，光只能被表层的功率吸收，不产生非线性效应或小孔效应。即光的穿透深度为

$$\Delta Z = -\ln(I/I_0)/A \quad (2.5)$$

其中， ΔZ 表示光透过的厚度， A 表示材料对激光的吸收系数， I_0 表示材料表面的

吸收的光强, I 表示光入射至 ΔZ 处的光强。

激光深穿透焊 (Deep penetration welding) 的过程中, 当激光的功率密度达到 $10^6 \sim 10^7 \text{W/cm}^2$ 时, 由于材料的瞬间熔化与汽化, 会形成一个匙孔, 激光可以透过匙孔中的金属蒸汽而直射孔底, 焊缝的深宽比可达到 12: 1, 这种过程被称为深熔焊。深熔焊具有以下优点: (1) 激光束没有惯性, 可以迅速开始与停止; (2) 焊缝的深宽比大, 焊件的热变形很小; (3) 焊接不需真空环境, 不产生 X 射线; (4) 可以得到无污染无杂质焊缝; (5) 热影响区小; (6) 焊接速度快, 易于实现自动化^[28]。

2.4 激光切割一拼焊的特点

激光切割一拼焊是集激光切割、激光焊接于一体的加工技术, 可以不受限制地把厚度、牌号、等级、镀层等不同的钢板连接在一起, 制成各种形状的零件, 使汽车设计的灵活性大大提高。对整体下料毛坯只能按同一要求选材, 会造成使用的板材品位高、板厚大, 增加零件的重量。采用激光切割-拼焊工艺以后, 可以减轻零件的重量, 降低材料的等级^[29]。经过激光切割、拼焊而成的拼接板坯是在充分分析车身的结构的基础上优化部件的设计, 使之可以由少数几种典型的板坯焊接而成。

激光切割一拼焊系统工作时, 首先对板坯进行定位、自动装夹, 接着利用激光对其切割, 然后对切割后的板坯进行拼接对中, 最后利用激光对其焊接。其加工对象以等厚的轿车底板为主, 可兼顾不等厚的其他轿车用板。

2.5 激光切割一拼焊系统的总体结构

为了满足先对板坯定位装夹, 然后利用激光对板坯切割, 接着让板坯对中拼接, 最后利用激光对其焊接的工艺要求; 将 HJP-01 型激光切割一拼焊的系统总体结构设计如图 2.4 所示, 激光拼焊设备由计算机控制系统、激光拼焊主机、 CO_2 激光发生器组成^{[30][31]}。激光拼焊的主机由 Y 轴、左右夹具、左右钳口、快速定位机构、切焊切换机构和液压系统等组成^[32]。左右夹具、左右钳口、快速定位机构相

互配合的运动实现板坯在切割前的预定位、装夹定位以及激光焊接前的对中拼接。Y轴和切焊切换机构的协调运动可实现切割与焊接的快速切换。由计算机系统以协调各机构的运动、控制激光器的功率及各种辅助气体的开启和关闭,达到激光切割—拼焊自动化加工的目的。

2.6 本章小结

本章介绍了激光切割—拼焊的原理及特点。按照激光切割—拼焊的工艺要求提出了 HJP-01 型激光切割—拼焊系统的总体结构的设计。

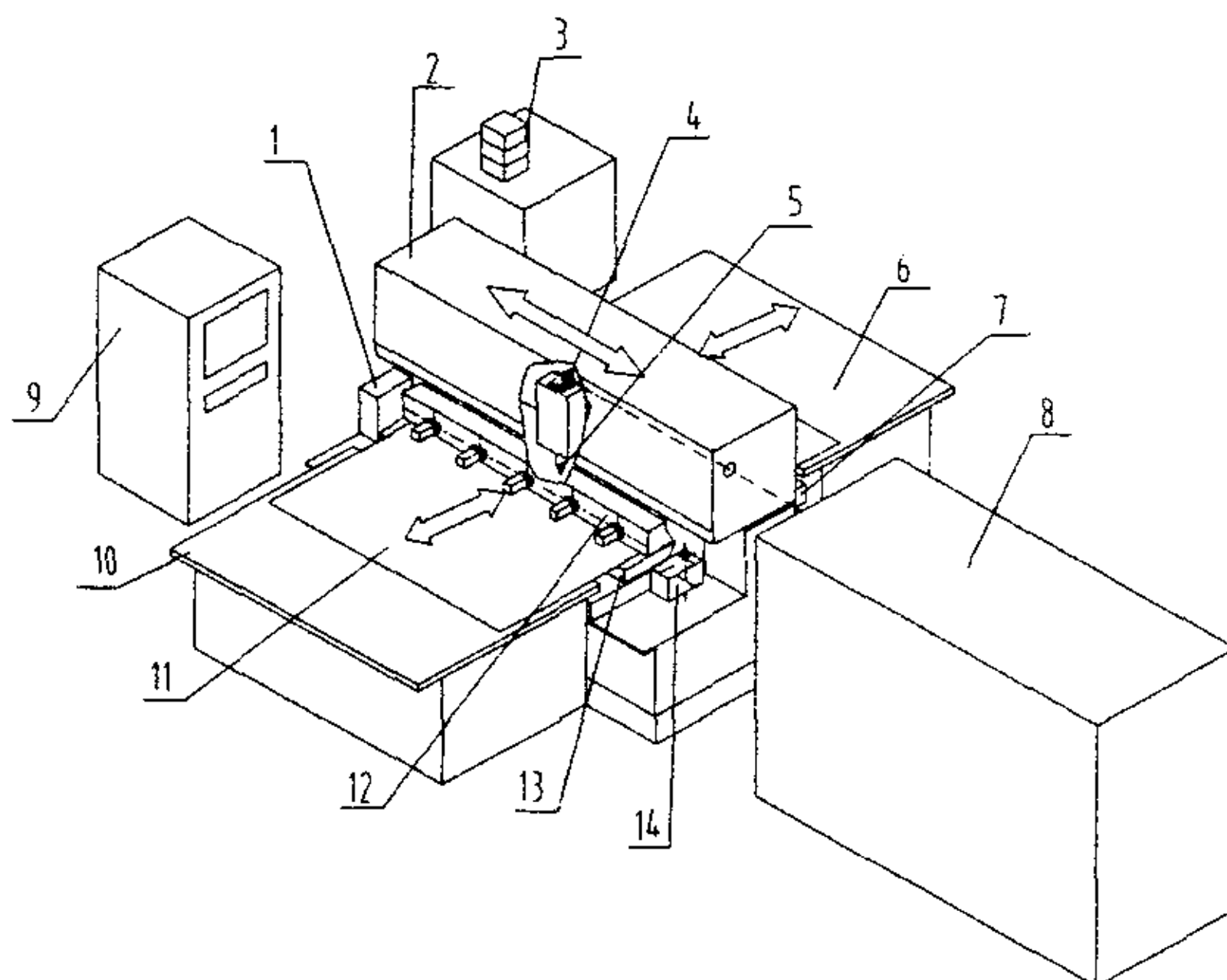


图 2.4 HJP-01 型激光切割—拼焊系统的总体机构

- 1.快速定位机构 2.Y轴 3.液压系统 4.反射装置 5.激光头 6.左托架
7.左钳口 8.激光器 9.计算机控制及声光监测系统 10.右托架 11.拼焊板坯
12.右夹具系统 13.右钳口 14.切焊切换机构

3 HJP-01 型激光切割—拼焊系统部件的设计及开发

3.1 引言

激光切割—拼焊系统是对板坯的切割、对中拼接及焊接功能的光机电综合系统。鉴于激光切割和焊接的紧密衔接，本系统采用同一导光聚焦光路，利用切割和焊接加工头相互切换来实现切—焊功能的转换^[33]。激光加工头、切割和焊接的切换机构、装夹与定位系统、液压系统和计算机控制系统的设计与开发是本系统研制的主要任务。

3.2 部件的设计与开发

3.2.1 激光加工头的设计

按照激光切割和焊接的要求，激光加工头的设计如图 3.1 所示^[34]，来自于激光器的光束首先被 45° 反射镜（3）反射，然后通过聚焦凸镜聚焦，用于激光切割或焊接。反射镜装置中的调节顶丝（1），用于调整反射角度，使得经过凸透镜聚焦后的光束与切割辅助气体同轴。冷却水由进水口（2），经过反射镜周围的水套，最后流出出水口，这样的冷却系统与外界的自来水管相接，使得水不断地流动，从而反射镜得到冷却，以便消除激光对反射镜的热效应。凸透镜周围也有类似冷却结构。自来水由进水口流入，流经凸透镜周围的水套（13），然后由出水口流出。在此设备中，反射镜的水冷系统与凸透镜的水冷系统串联。因此各冷却单元只需要一个进水管和一个出水管。

激光切割—拼焊中的气路有切割辅气、焊接辅气和焊接保护气帘三套气路，切割气由进气口（9）进入，然后由切割喷嘴喷出，辅助激光切割。焊接辅助气体

由进气口（4）进入，然后经吹气管（5）对准焊接点吹气。焊接气帘的气体，由进气口（7）进入，然后向下喷出。这样可以避免焊接过程中产生的烟雾污染凸透镜。调节螺母（8）能调节连接激光加工头与光头箱的丝杠螺母副，能达到调整离焦量和板坯与加工头的距离的目的。

激光切割头的切割喷嘴为超音速喷嘴^[35]，它能使得供气压的滞压（Stagnation Pressure）全部转换成动能，这样可以有效地把熔化的金属及其夹杂物从切缝中吹走。喷嘴中的气流均匀一致、边界整齐、紊流度小、且没有激波。喷嘴的结构如图 3.2 所示。它由稳定段（Stable Section），亚音速收缩段（Convergent Section），喉部（Throat）及超音速扩张段（Divergent Section）组成。稳定段的目的是使进入稳定段的气体均匀，降低紊流度。亚音速收缩段的作用是加速气流，同时保证收缩段口气流均匀、平直且稳定。喉部是气流从亚

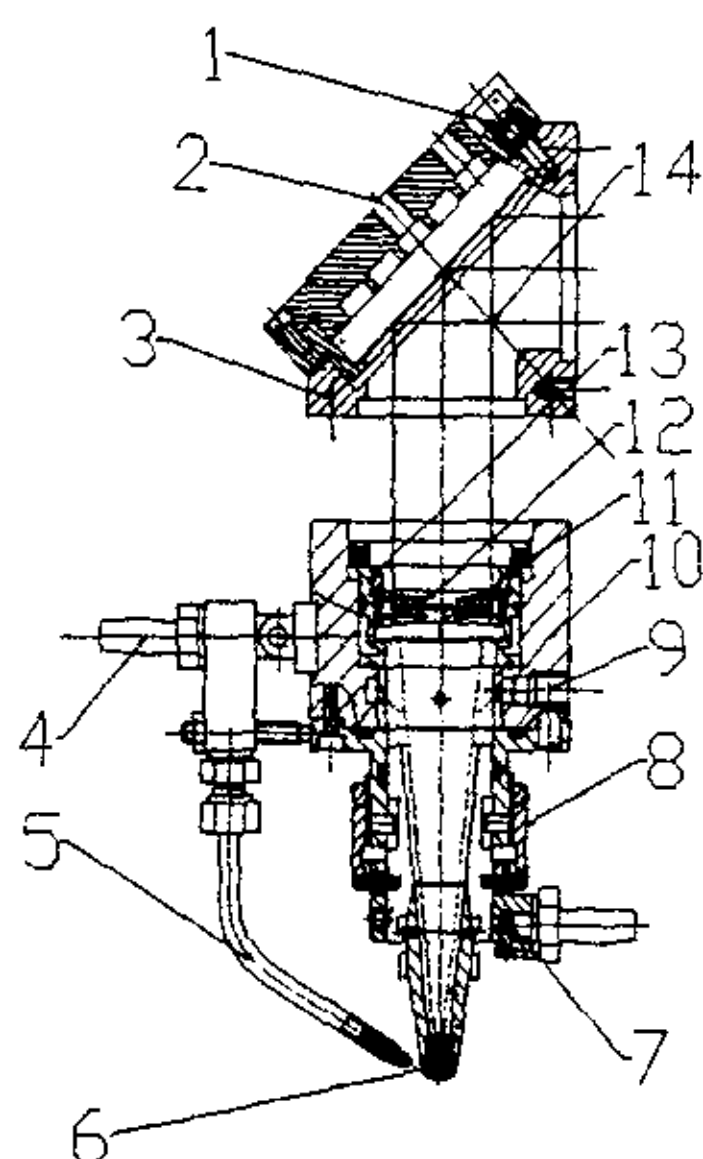


图 3.1 激光加工头结构及光路图

1. 调节顶丝 2. 进水口 3. 45° 反射镜 4. 焊接辅气接头 5. 焊接辅吹气管 6. 切割头
7. 焊接气帘进气口 8. 调节螺母 9. 切割气进气口 10. 凸透镜座 11. 压簧 12. 反射镜
13. 冷却水套 14. 飞行光路

音速转变为超音速的过渡段。这一段在整个喷嘴设计中比较重要。超音速扩张段曲线是整个喷嘴设计中最关键的一部分，也是整个喷嘴设计中最复杂的一部分。这一段把喉部的超音速气流进一步加速到设计的马赫数。

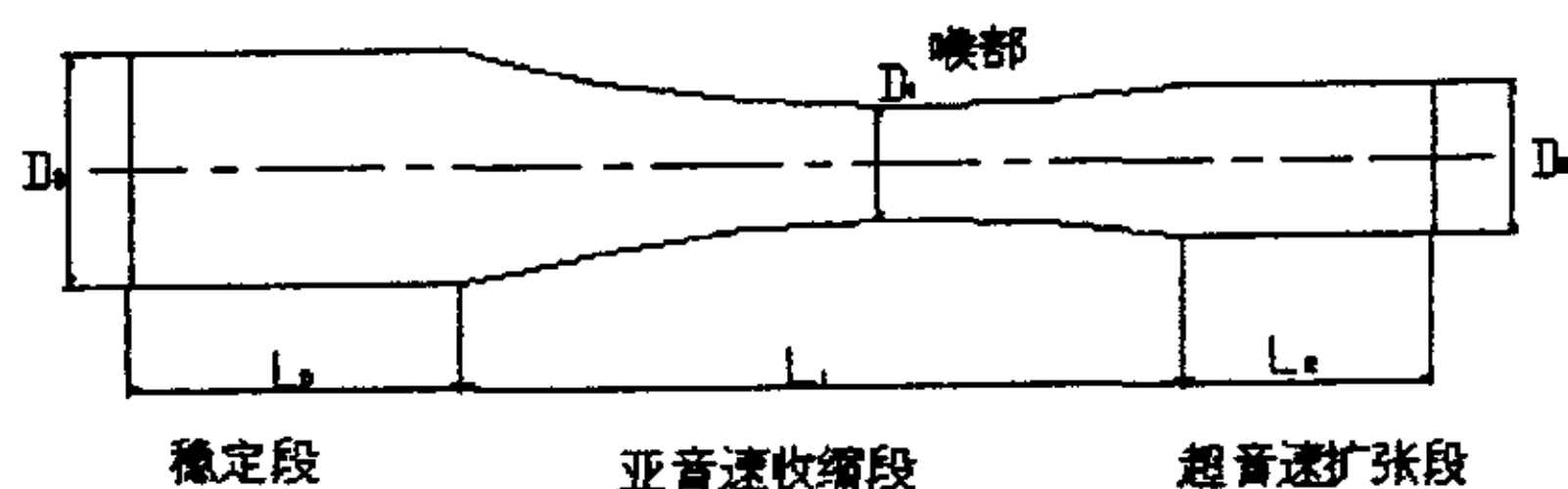


图 3.2 超音速喷嘴的内部结构

3.2.2 装夹与定位系统的设计

根据宽幅薄板对接拼焊的要求，必须使对接后的板坯在接缝全长范围内的最大接缝间隙小于 10%板厚^[36]，对接端的端面平行度一致，粗糙度峰值应小于板厚的 5%。有两种方法能让毛坯板达到此要求。其一是国外采用得较多的高精剪^[37]，其二是激光切割。但是高精剪的成本高，占用的场地面积较大，不便于与激光焊接的工序衔接而形成自动化生产线。因此，采用激光切割的方式来获得对接板坯端面的质量是比较理想的选择。

此系统中，激光切割和焊接采用同一光路，大大地减小了设备所需要占用的场地面积。使得激光切割、拼接对中和激光焊接的工序紧密衔接，形成切割、拼接、焊接的自动化生产线。定位机构的结构如图 3.3 所示，液压缸（3）作为动力，通过齿条齿轮副带动固定在轴上的定位块，使之有三个转动位，分别为：左、右切割定位和中位。定位块上面有两个定位销（2），用于左右定位。当定位块由左切割位转到右切割位，及由切割位转到中位的过程中，能将切下的余边导入切屑槽中。

在一般的激光切割加工的过程中，不需要对加工的工件夹紧，但是此系统中激光切割板坯的目的是保证板坯对接端面的质量，便于板坯的对中拼接及最后的

激光焊接。而且本系统的加工对象是宽幅的薄板，当装夹在某一边钳口上的板坯切边以后，必须让其退出切割位，让另一钳口上的板坯前进到切割位。

对中拼接时，由于切缝的存在，即使两边的板坯都回到切割位，也不能立即对其焊接。还必须让两板坯分别向中间补偿 0.5 个切缝间隙，才能让接缝对中。在此过程中，很容易使板坯移动，而且在拼接时，两板坯的对接面之间会产生一定的预挤压力，焊接的过程中也需要夹紧板坯，否则激光从一端焊到另一端过程中，由于热变形的影响，另一端对接边会相互分离，使得接缝间隙过大，激光泄漏，达不到焊接目的。因而，此系统必须有一个装夹和定位系统。它由左右钳口和安装在其上的夹具组成。

由前面的讨论知道，激光切割—拼焊的顺序为：先对板坯快速定位和夹紧，然后激光切割板坯毛边，接着让板坯对中拼接，最后激光焊接板坯。该装夹系统必须能有效地减小切割和焊接中的变形，确保焊接质量。

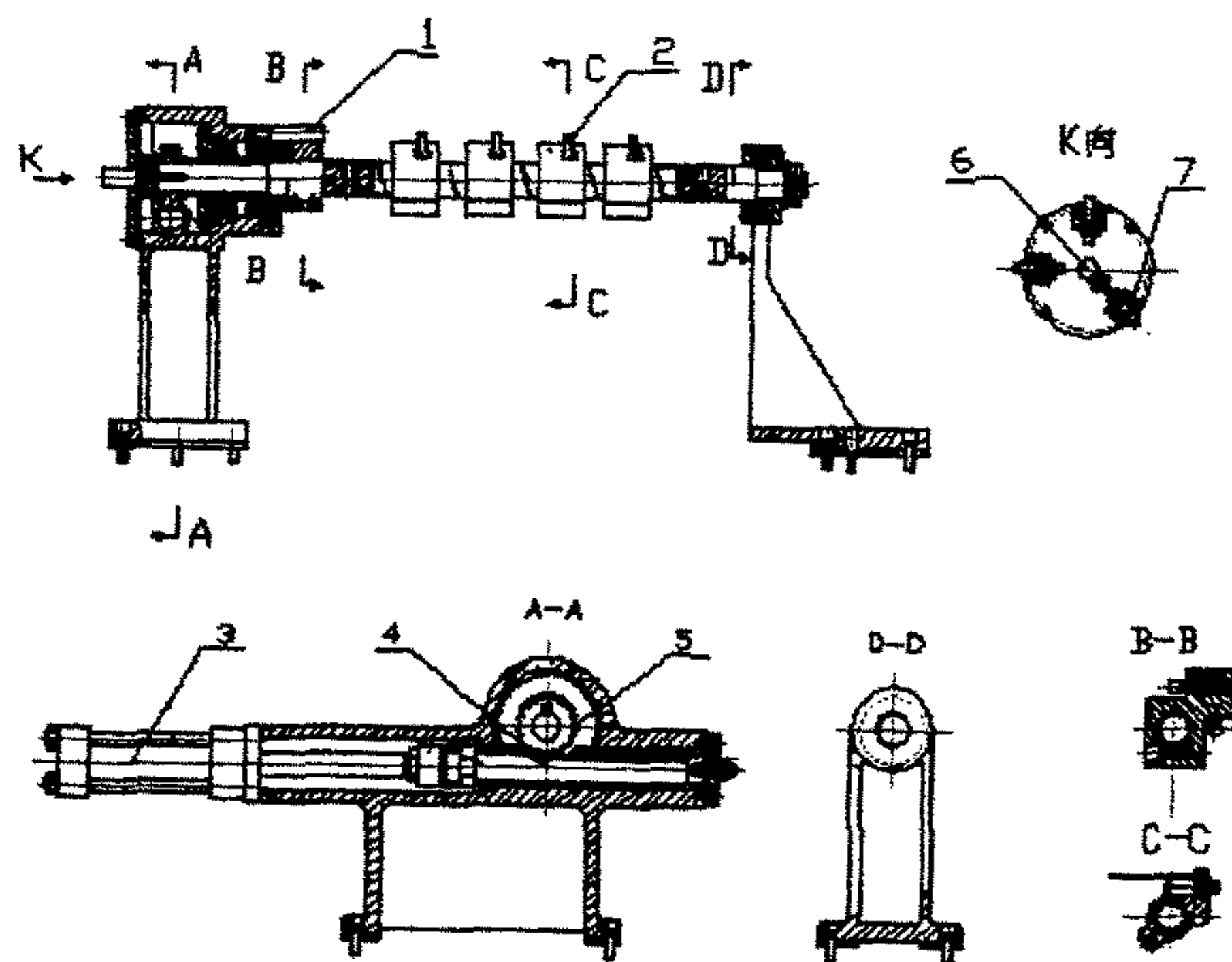


图 3.3 快速定位机构图

1. 挡铁 2. 定位销 3. 液压缸 4. 齿条 5. 齿轮 6. 信号体 7. 行程开关

3.2.3 激光切割-拼焊的光路切换系统的设计

由于激光切割与焊接辅助气体的种类和工作方式的不同,而且此系统对切割、焊接采用同一光路,激光切割头和焊接头必须相互切换。迄今为止,国内外都用手工切换或者切割焊接分别采用各自的光路和导光聚焦系统。我们尝试着设计了一种新型的切焊切换机构。其结构如图 3.5 所示,切换松卡液压缸(1)推动齿条(13),通过齿轮齿条副带动切换的拨叉作旋转运动;切换升降液压缸(2)直接推动升降杆

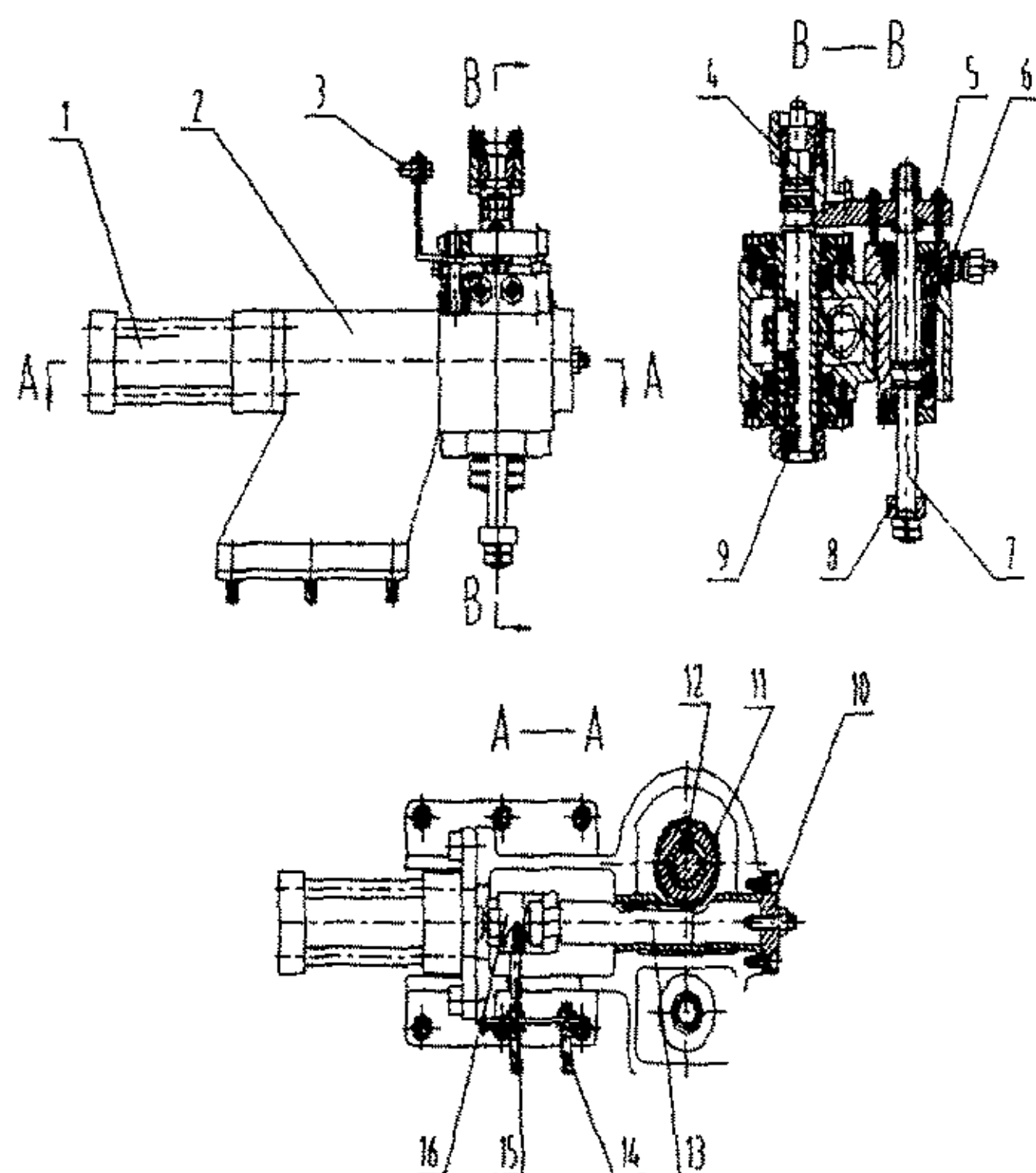


图 3.5 激光切割、焊接切换机构

1. 液压缸 2. 切换机构支座 3. 行程开关 4. 拨杆 5. 导向杆 6. 油路 7. 升降杆 8. 垫片 9. 旋转轴

10. 定位螺钉 11. 齿轮 12. 平键 13. 齿条 14. 行程开关 15. 信号体 16. 连接头

(7)通过拨杆(4)推动拨叉上下运动;切换松卡液压缸和切换升降液压缸(2)的行程由行程开关来控制。升降及旋转运动都由液压系统中的电磁阀(如图 3.4 所示)的换

向的动作来控制。两油缸及 Y 轴相互配合, 协调运动, 达到切割和焊接切换。切换过程如图 3.6 所示, 实践证明该切换机构结构简单, 操作方便而且易于与其它部分协调形成自动化。

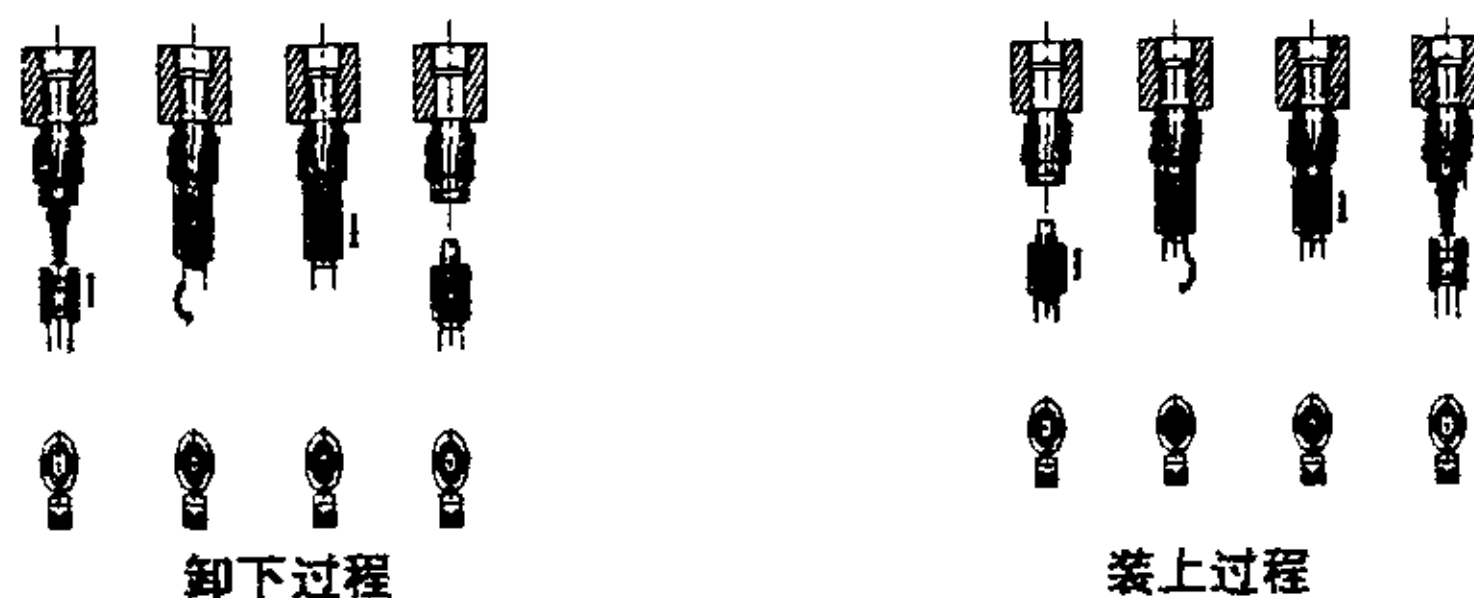


图 3.6 激光加工的切换过程

3.2.4 计算机控制系统

1. 硬件系统^{[41][42][43]}

以 PC 总线的工控机为硬件平台, 配上相应的运动控制单元和 I/O 单元, 完成控制系统的功能。控制系统的结构如图 3.7 所示。

左右板坯的运动定位采用步进电机, 而激光切割、拼焊运动控制采用伺服电机。工控机通过 RS232 接口对伺服驱动进行控制, 省掉了伺服控制卡, 节约了硬件资源。步进电机和伺服电机的脉冲当量都为 0.001mm/pulse , 保证了系统的尺寸精度。配上三个运动控制器。根据激光切割、拼焊的要求, 需要检测的状态信号为: 左夹具原位, 左夹具夹紧, 右夹具原位, 右夹具夹紧, 板坯定位机构左位, 板坯定位机构原位, 板坯定位机构右位, 切换升降缸原位, 切换升降缸上升, 切换松卡缸原位, 切换松卡缸松开; 还有三个电机的行程信号: 前极限, 后极限和原位。这些信号通过接近开关就可检测到。另外, 还有报警信号, 包括: 伺服故障, 激光器故障, 系统实时地对这些状态信号进行诊断报告。

输出的控制信号为: 左夹具, 右夹具, 板坯定位机构左位, 板坯定位机构右位, 切换升降缸原位, 切换升降缸上升, 切换松卡缸原位, 焊接气帘, 切割辅助

气, 焊接辅助气, 驱动电源控制, 光闸开关, 监控开关, 液压泵, 另外, 还有激光器的脉冲方式和占空比的控制信号, 这些都由工控机通过输出板输出。由工控机通过 D/A 转换板输出 0~10V 的控制电压, 来实现激光功率由 0~2kW 连续可调。

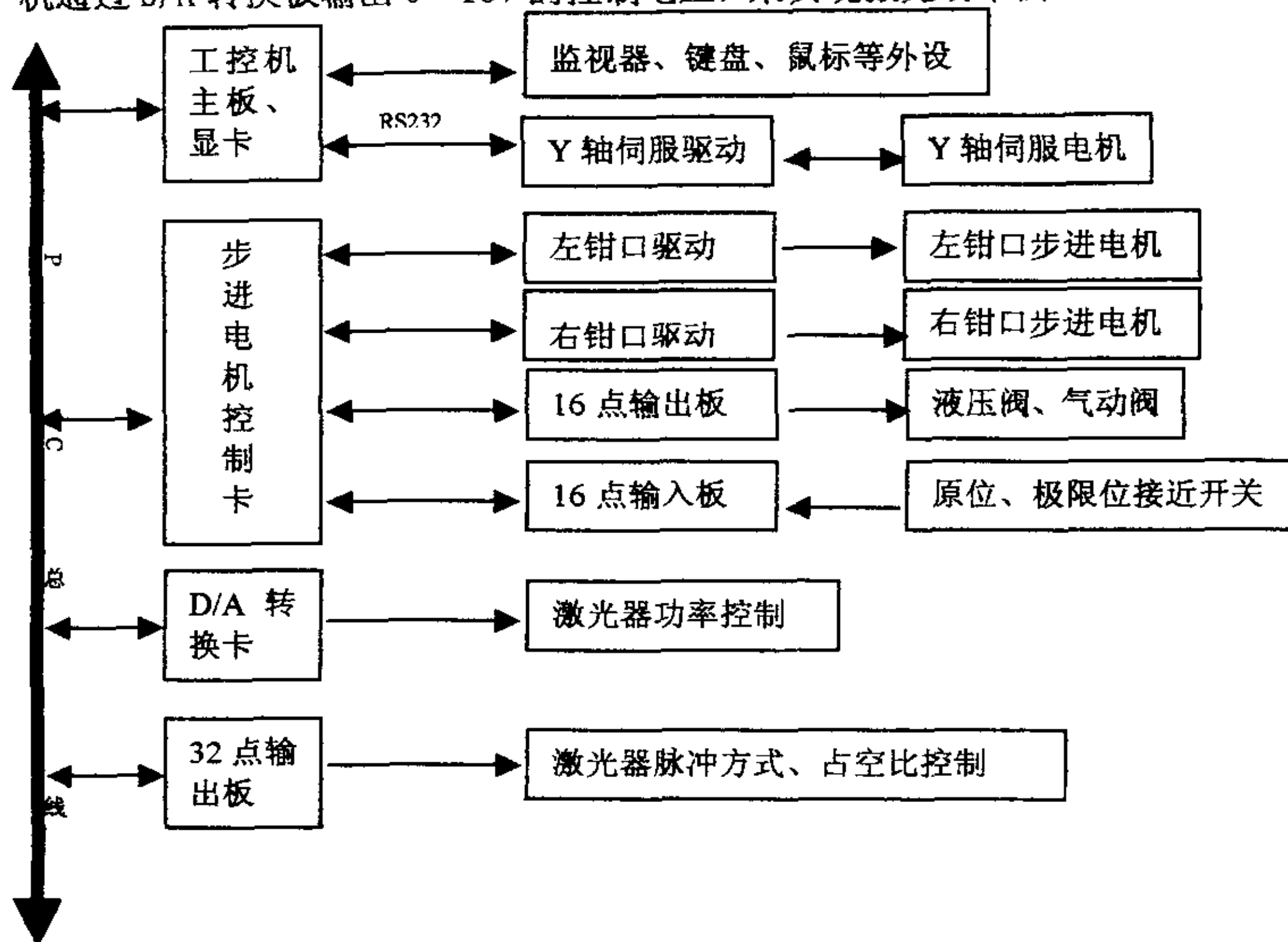


图 3.7 控制系统结构图

2. 软件系统

根据激光切割、焊接的工艺要求, 系统软件包括: 自动循环, 手动操作, 参数设置及状态显示, 另外, 还包括编制调试程序^{[44][45]}。

系统手动模块所要实现的功能为: (1) 能对各输出点进行开、关控制; (2) 对三个运动轴实现点动、回原位等控制; (3) 对激光功率及光闸进行控制; (4) 为自动程序初始化做准备。

自动循环完成轿车底板用板材激光切割、拼焊的加工。当系统初始化完成后, 就可进行自动循环。自动循环分为三个程序段:

程序段 1: 定位机构左定位, 左钳口和 Y 轴分别回切割位。

程序段 2: 人工将板坯推上左钳口以后, 夹具夹紧板坯, 然后开启切割气体和光闸, Y 轴按切割速度运动, 利用激光切割板坯; 切割完毕时, 关切割气体和光闸, 左钳口回原位; 接着, 定位机构右定位, 右钳口和 Y 轴分别回切割位。

程序段 3: 人工将板坯推上右钳口后, 夹具夹紧板坯, 然后开切割气和光闸, Y 轴按切割速度运动, 激光切割板坯; 切割完毕时, 关切割气和光闸, 右钳口回原位; 接着定位机构转到中位, Y 轴运动到激光头切换位, 切换机构卸下切割喷嘴; 接着让左右板坯拼接对中, 并对缝隙进行补偿, 调整激光的功率, 开焊接辅气和光闸, Y 轴按切割速度运动, 激光焊接板坯; 完毕时, 关焊接辅气开关, 焊接保护气帘开关和激光闸, 激光功率回设切割功率值, 装上激光切割喷嘴, 松左右夹具, 三轴运动到原位。其软件结构系统的主界面如图 3.8 所示。系统参数设置包括: 板坯的长度, 切割和拼焊的激光功率, 三个运动轴的切割初始位、点动速度、切割和焊接的速度, 切缝补偿宽度, 及激光器的相关参数。系统手动界面如图 3.9 所示。

3. 光机电联调中的关键技术

(1) 完善的联锁保护, 如板坯的左定位与右定位的联锁, 挡块位置与钳口位置的联锁, 激光光闸与辅助气的联锁等。

(2) 在板坯拼接过程中对缝隙进行补偿。由于激光切割的过程中不同材料的切缝宽度不一样, 因而在拼接的过程中, 需要对中补偿的值也不一样, 所以只能在调试中, 从现场测量出切缝的宽度, 然后在人机对话框中给出需要补偿的值。

(3) 切割喷嘴在装上和卸下时与 Y 轴运动因该联锁。

3.3 本章小结

本章着重阐述了 HJP-01 型激光切割-拼焊系统各部件的设计及其工作原理。

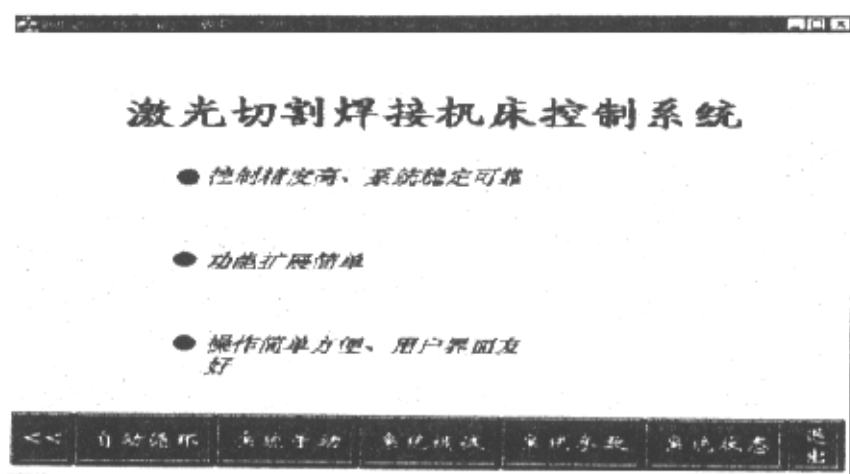


图 3.8 系统主界面

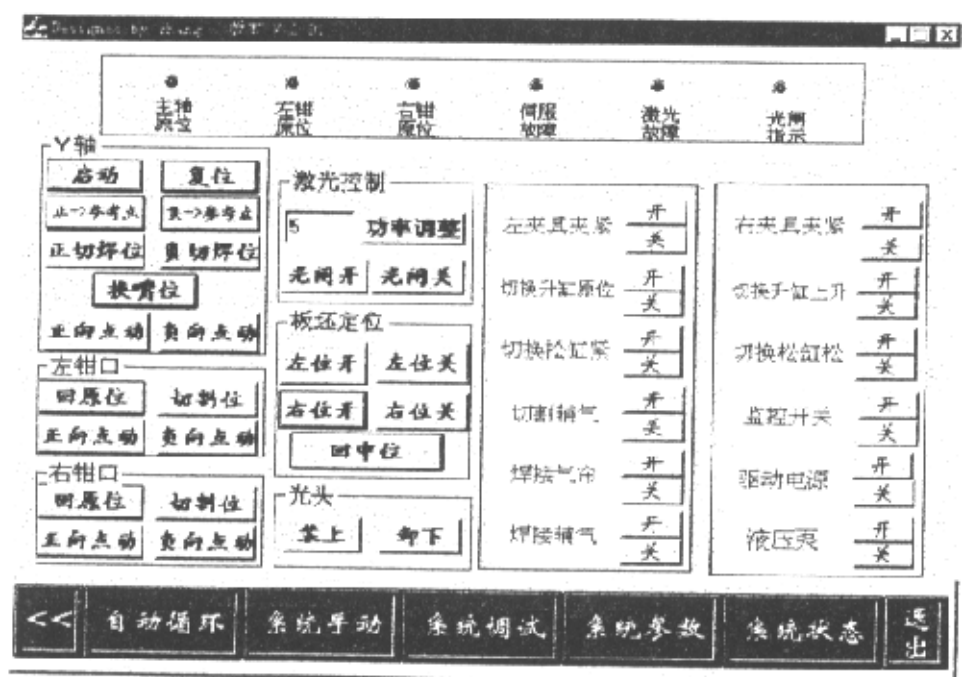


图 3.9 系统手动界面

4 激光切割-拼焊的工艺参数选择的理论基础

4.1 引言

由前面的讨论知道,影响激光切割-拼焊质量的因素既多又复杂。J. Fieret 等人著文认为影响激光切割质量的因素有 50 个^[46],其主要影响因素如图 4.1 和图 4.2 所示。在激光切割加工的早期,由于激光工作方式单一,功率范围较窄,加工对象比较简单,仅依靠有限次数的试验和经验,就可以生产出令人满意的产品。但是随着激光器质量的改善,加工范围的拓宽,单纯依靠试验确定工艺参数已经不能满足实际应用的需要^[47]。

4.2 激光切割加工工艺参数选取方法的概述

最初人们采用列表和描图的方法对试验数据进行定性的分析。这往往是在其它参数确定的情况下,对两个相关参数进行描述。例如在辅助气体种类、辅助气压、切割材料及材料的厚度确定的情况下,可以用曲线表示出切割速度随激光输出功率变化的情况。把不同板材厚度和不同材料的变化曲线进行比较,会发现这些曲线形状十分相似,只是在图中的位置不同而已,从而可以揭示出一条对几乎所有的加工材料都适应的规律。这种方法被广泛地应用在实际加工的过程中。但是其缺点也是显而易见的,其一是在图中或表中能反映的因素较少,对试验的指导不具有—般性;其二从图或表上查的数据会因加工机的变换或加工环境的变化而失去实用价值,如果其中假定的因素有一个变动时,在这个假设的条件下作出的图表均不准确,乃至失效。

D. Shooke 等人^[48]对激光切割研究表明,切割前沿存在能量的平衡、反应气体质量平衡、金属材料质量平衡、熔融层的物质总平衡和熔融层物质在竖直方向上的动平衡,并可以列出动态热源下的热传递关系,在列出其它一些辅助方程之后,

就可以求解这个方程组得到影响因素与加工质量的解析关系。

B. S. Yilbas 等人^[49]发现, 边界扰动层中存在着物质守恒、动量守恒和能量守恒关系。列出这些偏微分方程, 辅以边界条件, 能求得熔融层水平流速、垂直流速及厚度的解析表达式, 定性地描述各影响因素与熔融层状态参数的关系, 从而进一步对加工质量作出评测。实际上, 使用解析法得到的结果与试验的结果相吻合。

但是解析法要考虑的因素太多, 给实际分析工作带来了很大的难度。例如, 熔化金属所需能量部分来源于金属与辅助氧气反应放热, 而金属熔化物脱离工件时的平均氧化程度决定了反应放出的热量, 为了测定这个平均氧化率, I. Miyato 等人^[50]专门设计了一个试验方案, 在工件下方不同距离处放置充水容器, 当金属熔融物落入这些容器侵入水中之后就停止了氧化过程, 使用 X 射线衍射仪测定各容器内金属残渣的成分, 绘出残渣与容器放置距离的关系曲线, 从而估算出距离为 0, 即熔融物刚刚脱离工件时的平均氧化率。对于不同的材料和不同的温度, 这个氧化率要重新测定。由此可见解析法的工作量极大, 不适合激光加工的实际需要。

M. J. Kim 等人^[51]于 1993 年提出了一个二维传导有限元模型, 求解边界片微分方程组的数值解。这个有限元模型可以在较广的范围内分析激光切割过程, 推导出加工因素对切割端面形状与深度的影响关系。偏微分方程的数值解法相对于解析法来说是进了一步, 精确度稍差一些, 实用性要好一些。它代表了工程分析的趋势。但是对整个激光切割过程来说, 它只能描述切割区域的热场分布, 尚不能满足实际分析的全部需要。

文献^{[52][53]}中提出了神经网络的方法分析试验数据, 探讨了加工工艺参数自动选取的方法。为解决工艺参数如何选取的问题提供一种新的思路, 神经网络系统是由大量的简单处理单元(神经元)互连而成。只要事先通过各样本对整个网络进行训练, 确定网络内各个单元之间的连接权值, 就可以精确地计算出所需的参数。如果样本涵盖了所有可用的数据区, 只需保存网络权值的记录, 就可以对系统进行嵌入式处理。

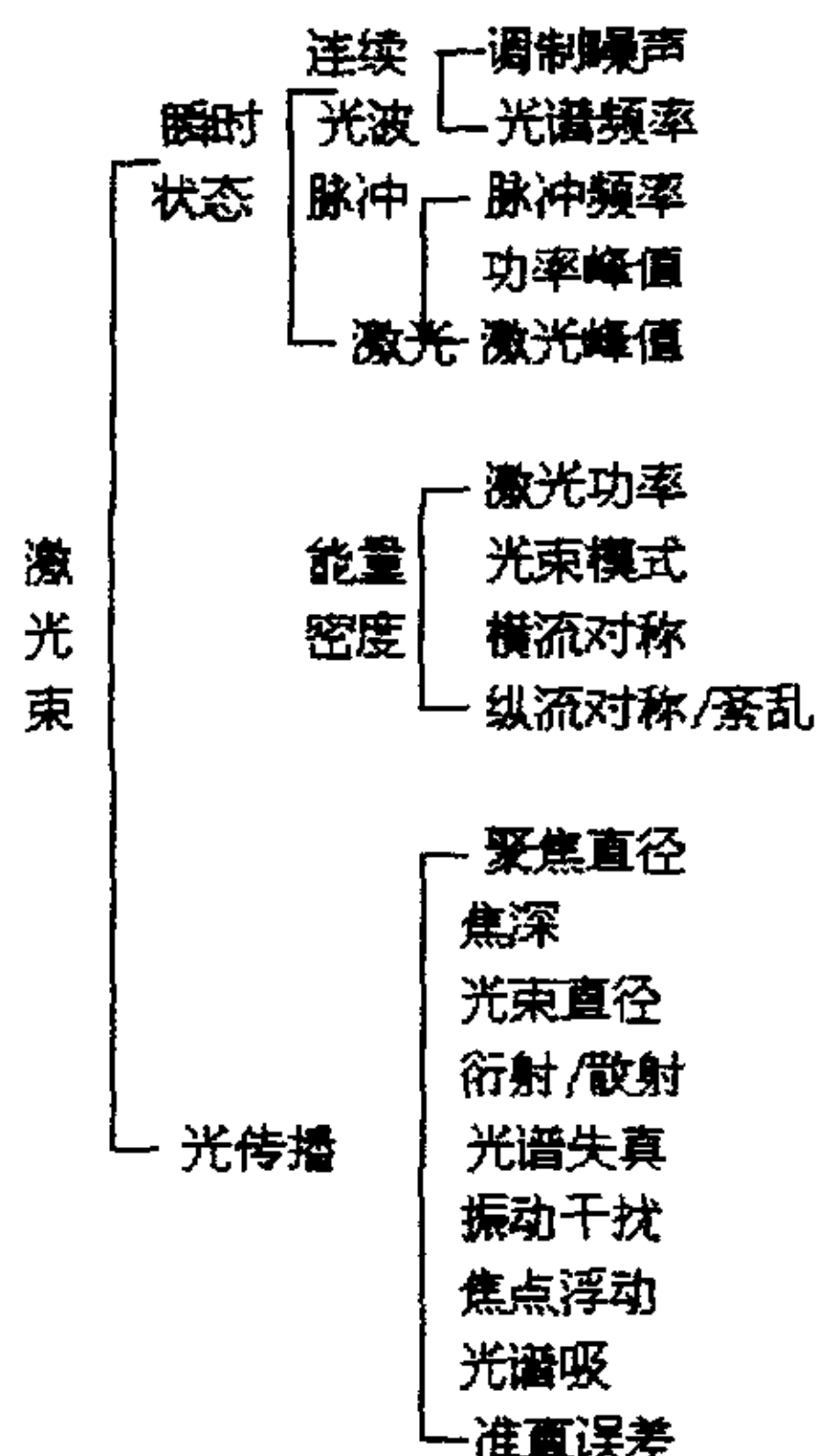


图 4.1 激光束对切割质量的影响

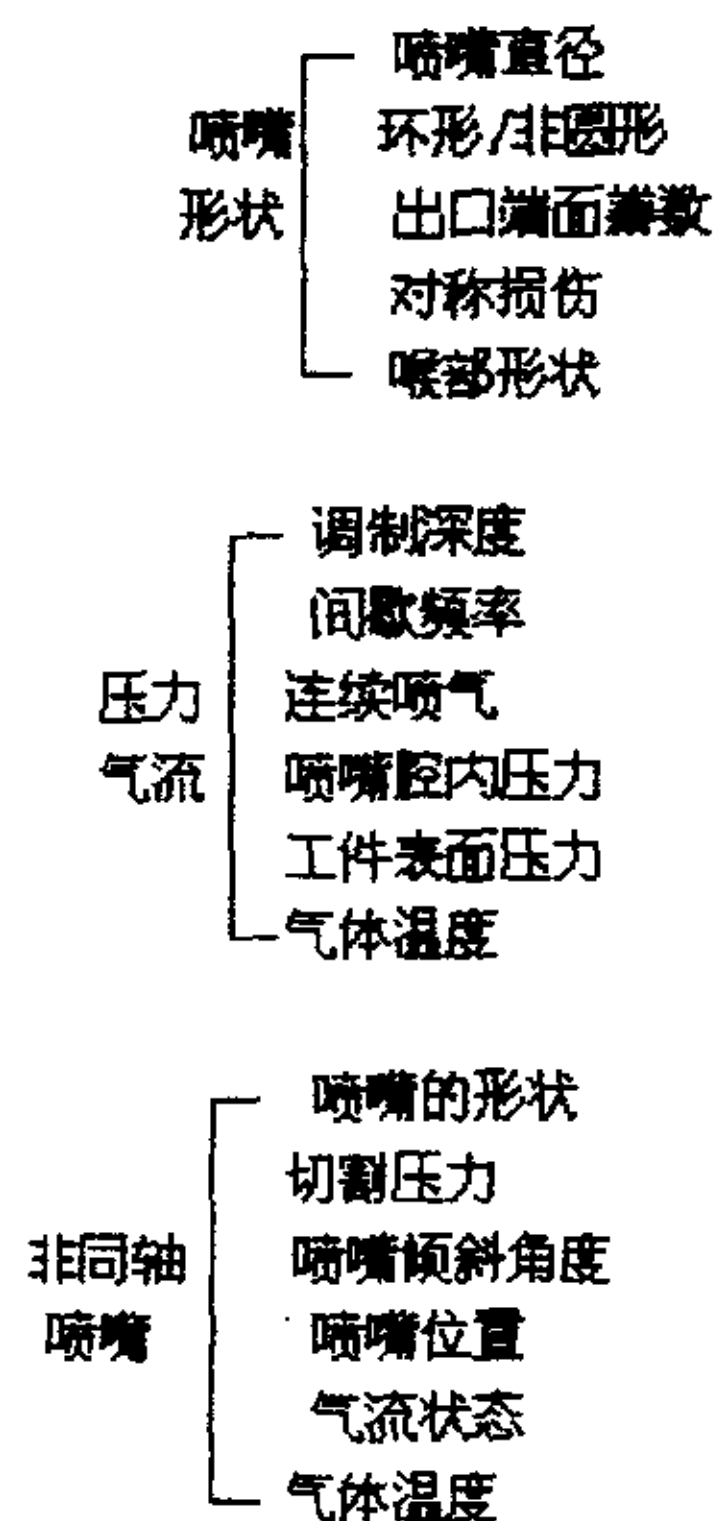


图 4.2 辅助气流对切割的影响

由于 BP (Back Propagation) 神经网络特别适用于目标模型不明确问题的优化^{[54][55]}，因此它在工业中得到广泛的应用，但是 BP 神经网络在训练时需要把一组输入输出问题转化为一元约束的多变量的非线性优化问题

$$\min E = f(w, x, y) \quad (4.1)$$

式中, x , y , w 分别为输入向量、输出向量和决策向量。

$$W = (W_b, W_{bb}, W_o, W_{ob}) \quad (4.2)$$

由于决策向量 W 维数与网络的结构有关, 如其结构为 $n_i \times n_b \times n_o$, 则 W 的维数为

$$n_d = (n_i + 1) \times n_b + (n_b + 1) \times n_o \quad (4.3)$$

其中 n_i 、 n_b 、 n_o 分别为输入层、隐含层和输出层的神经元数。因此 W 的维数通常比较大, 这种高维无约束的问题会有多个局部最优解。

采用传统的梯度下降法 GDR (Gradient Descent Research) 迭代时, $\frac{\partial E}{\partial W} \rightarrow 0$

时, 则出现所谓的“平台”, 迭代点就会陷入局部最优点, 因而目标函数就会下降不到期望值。

为了克服局部最优导致的问题, 人们采用了多种方法。其中, 遗传算法 (Genetic Algorithm) 是一种有效地克服局部最优解的方法。其不足之处是收敛的速度比较慢。同时, 也有人提出了新遗传算法 (Extend Genetic Algorithm), 试验表明, 它是一种有效地提高 BP 神经网络训练速度和精度的方法。对中小型 BP 网络, EGA 比 GDR 的收敛速度慢。因此, 对中小规模的网络优化问题 EAG 和 GDR 结合起来构成 EGA-GDR 算法, 实现优势互补。当遇到平台时, 采用 EGA 跳出平台之后采用 GDR 加快收敛速度。但是这对于实际操作比较困难。

4.3 遗传算法

4.3.1 遗传算法的原理和执行策略

4.3.1.1 遗传算法原理

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是基于自然选择和基因遗传学说的随机搜索算法, 它将“适者生存”这一基本的达尔文进化理论引入串结构, 并在串之间进行有组织但又随机的信息交换。伴随着算法的执行, 优良的品质被逐渐保留并加以组合, 从而不断地产生出更佳的新个体, 这一过程犹如生物进化, 好的特性被继承, 坏的品质被逐渐淘汰。新一代中包含着上一代的大量信息, 且在总体性上不断地胜过上代, 从而使整个群体不断地向前发展。遗传算法是不断地接近最优解的优化方法, 它以能解决非线性问题的鲁棒性, 全局收敛性而具有独特的吸引力^[56]。

4.3.1.2 遗传算法的执行策略

遗传算法是对人类自然演化过程的模拟^[57]。人类的自然演化过程是进化过程，它从一个种群出发，不断地重复执行选择、杂交和变异过程，使种群越来越接近一个既定的目标。如果视种群为超空间的一组点，选择、杂交和变异的过程即是在超空间中进行点集之间的某种变换，通过信息交流使种群不断地优化。这种进化过程发生在染色体上：自然选择使适应值好的染色体比那些适应差的染色体有更多的繁殖机会。

标准遗传算法的执行步骤如下：

(1) 基因编码。基因编码过程是将问题空间转化为遗传空间的过程。选择并确定将参数转化为串的编码策略，一般采用二进制编码，每个二进制即为一基因，

如： $x \in [a, b]$ 则 $x = a + (b - a) \sum_{i=0}^{l-1} g_i 2^i / (2^l - 1)$ ，其中 l 为码长， g_i 为第 i 个基因。

例如，切削用量一般包含 3 个变量，即切削深度 a_p ，进给量 f 和切削速度 V_c ，所以遗传基因编码应包含 3 段，每段代表一个参数。采用二进制和十进制变换来实现问题空间与遗传空间的转换，则可定义第一段代表切削深度 a_p ，第二段代表进给量 f ，第三段代表切削速度 V_c ，假如最大的切削深度为 15mm，编码精度为 0.5mm，则可以用 5 位二进制码串代表切削深度；如果最大进给量设定为 1.5mm/r，编码精度设为 0.1mm/r，则需 4 位二进制代码串代表。这样个体基因的总长度为 15 位二进制编码串，如图 4.3 所示。

切削深度 a_p					进给量 f					切削速度 V_c				
1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1

图 4.3 二进制编码示意图

(2) 确定适度函数 $F(x) = f(x)$ 。适度函数是由目标函数确定的，用来计算各

个体对环境的适应度，它是经过遗传变异以后对染色体进行选择的标准。例如，在切削加工的过程中，根据需要可以采用最大生产率目标函数 Q ，最低成本目标函数 C 和最大利润目标函数 P 。为了便于对遗传算法进行操作，需要将目标函数构造适应函数：最大生产率的适应函数 $F=Q$ ；最低成本的适应度函数 $F=\frac{1}{C}$ ；最大利润的适应函数 $F=P$ 。

(3) 确定算法中参数种群大小 n ，交叉概率 P_c ，变异概率 P_m 并随机生成 n 个串 S_i ($i=1, \dots, n$)，构成初始群体。

(4) 计算各个串的适应度 $f(S_i)$ ，也就是对各个串进行评价，用以反映个体对问题环境适应能力的强弱和解的优劣。适应度是个体竞争的测度，是控制个体生成机会的标准。

(5) 选择 (Selection)：选择体现了“适者生存”的自然法则。一般采用与适应度成正的概率方法，个体的适应度越高，其被选择的机会就越多。具体地说，个体的选择概率为 $\frac{f_i}{\sum f_i}$ ，其中 f_i 为个体的适应度， $\sum f_i$ 为个体适应度的总和。选择的目的是从群体中选出繁殖后代的双亲。

(6) 交叉 (Crossover)：交叉是重要的遗传算子。交叉算子分为：单点交叉算子，单点随机交叉算子及均匀随机交叉算子。等概率地随机确定一个基因位置作为杂交点，把一对母体从杂交点分成前后两部分，交换两母体的后半部分得到两个新个体，取第一个个体为杂交的结果，这种交叉方法称为单点交叉。以等概率随机地确定一个基因位置做杂交点，在把作为母体的两个个体从杂交点分为前后两个部分，以概率 P_c 交换两个个体的后半部分，得到两个新个体，取第一个个体为杂交的结果，称 P_c 为杂交概率，此交叉为单点随机杂交。独立地以概率 P_c 把母体的第一个个体的相应分量交换为第二个母体的相应分量，从而得到杂交结果，这种杂交方式被称为均匀随机杂交。例如，有两个个体， $X_1=(1 \ 1 \ 0)$ ， $X_2=(0 \ 1 \ 1)$ ，假定第二个点为杂交点，则将 X_1 和 X_2 的最后第一位相互交换得到 $X'_1=(1 \ 1 \ 1)$ ， $X'_2=(0, 1, 0)$ 于是 X_1 和 X_2 杂交后得到新个体 $X'_1=(1 \ 1 \ 1)$ ，这就是单点

杂交的结果。如果 $P_c=0.5$, 则各有 0.5 的概率使杂交结果为 (1 1 1) 和保留 (1 1 0)。如果采用均匀随机杂交则可能有以下情形: (1 1 0), (0 1 0) 和 (0 1 1)。通过交叉产生的新个体继承父辈个体的特性。交叉的目的在于产生新的基因组合, 形成新个体, 可探测搜索到空间的新区域。另外它也体现了自然界中信息交流的思想。

(7) 变异 (Mutation): 交叉完成后, 染色体就作用于变异算子, 变异是按位 (Bit) 进行的, 即以概率 P_m 改变串上某一位。以二进制串为例, String: 0 1 0 1 $\bar{0}$ 1 0 $\xrightarrow{\text{mutation}}$ 0 1 0 1 $\bar{1}$ 1 0。变异是一种微妙的操作, 能起到恢复丢失的遗传信息, 生成新的遗传信息的作用。从而保持群体中个体的多样性, 有效地防止算法的早收敛。但是过分的变异会使 GA 退化为随机搜索。

(8) 转到 (6) 重复进行, 直至新群体个数为 n 。

(9) 转到 (5) 重复进行, 直至满足某一指标或规定的迭代次数。

(10) 找出最佳串, 解码得到问题的最优解。

4.3.2 遗传算法发展和现状

遗传算法是一种仿生优化算法, 它的产生归功于美国 Michigan 大学的 Holland 在 20 世纪 60 年代末和 70 年代初的开创性工作, 其本意是在人工适应系统中设计的一种基于自然演化原理的搜索机制。大约在同一时间, Fogel 和 Rechenberg 及 Schwefel, 引入了另外两种基于自然演化理论的算法^{[58][59]}, 演化程序 (Evolutionary Programming) 和演化策略 (Evolution Strategies)。这三种算法构成了目前演化计算 (Evolutionary Computation) 领域的三大分支, 它们从不同的层次、不同角度模拟自然演化原理, 以达到求解问题的目的。

Holland 不仅设计了遗传算法模拟操作原理, 更重要的是, 它运用统计决策理论对遗传算法的搜索机理进行了理论分析, 建立了著名的 Schema 定理和隐含并行性 (Implicit Parallelism) 原理, 为遗传算法的发展奠定了基础。遗传算法应用于函数的优化始于 De Jong, 他在其博士论文中设计了一系列遗传算法的执行策略和性能评价指标, 对遗传算法性能做了大量的分析。De Jong 的在线 (On-line)

和离线 (Off-line) 指标仍是目前衡量遗传算法性能的重要手段, 而且他精心挑选的 5 个试验 (称作 De Jong' s Five Test Functions) 也是遗传算法数值试验中用的最多的试验函数。

在 Holland 和 De Jong 的工作之后, 遗传算法经历了一个相对平稳的发展时期, 逐渐被人们所接受和应用。遗传算法的发展高潮开始于 20 世纪 80 年代末, 而且延续至今。人们对遗传算法兴趣日益增长有两个背景, 其一是工程领域, 特别是将人工智能用于控制的领域, 不断涌现的超大规模的非线性系统, 在这些系统中存在着大量的经典优化方法所不能有效地求解的优化问题, 诸如神经网络中连接权重及网络拓扑结构优化、模糊系统中模糊规则的选取及隶属函数的确定、知识库的维护与更新等等。其二是算法本身就是一种模拟自然演化学习过程求解问题的方法, 它以独立的或者与其它的方法相结合的形式用于智能机器学习系统的设计之中。经过 30 多年的努力, 遗传算法不论是在应用上、算法设计上、还是在基础理论上, 均取得了长足的发展, 已经成为信息科学、计算机科学、运筹学和应用数学等诸多学科所共同关注的热点研究领域。

4. 4 神经网络

4. 4. 1 神经网络的原理

神经网络系统是个高度复杂的非线性动力系统^[60], 它由大量的神经元(节点)组成, 结构如图 4. 4 所示。

各个神经元之间通过相互连接形成一个网络拓扑, 这个神经网络拓扑形式称为神经网络的互连模式。不同的神经网络模型对网络的结构和互连模式都有一定的要求和限制, 比如允许它们是多层的, 是全互连的, 等等。

神经网络以外的部分 (即虚线以外的部分) 可以统称为神经网络的环境。神经网络从其所处的环境中接受信息, 对信息进行加工处理之后又返回到其所处的环境中去。

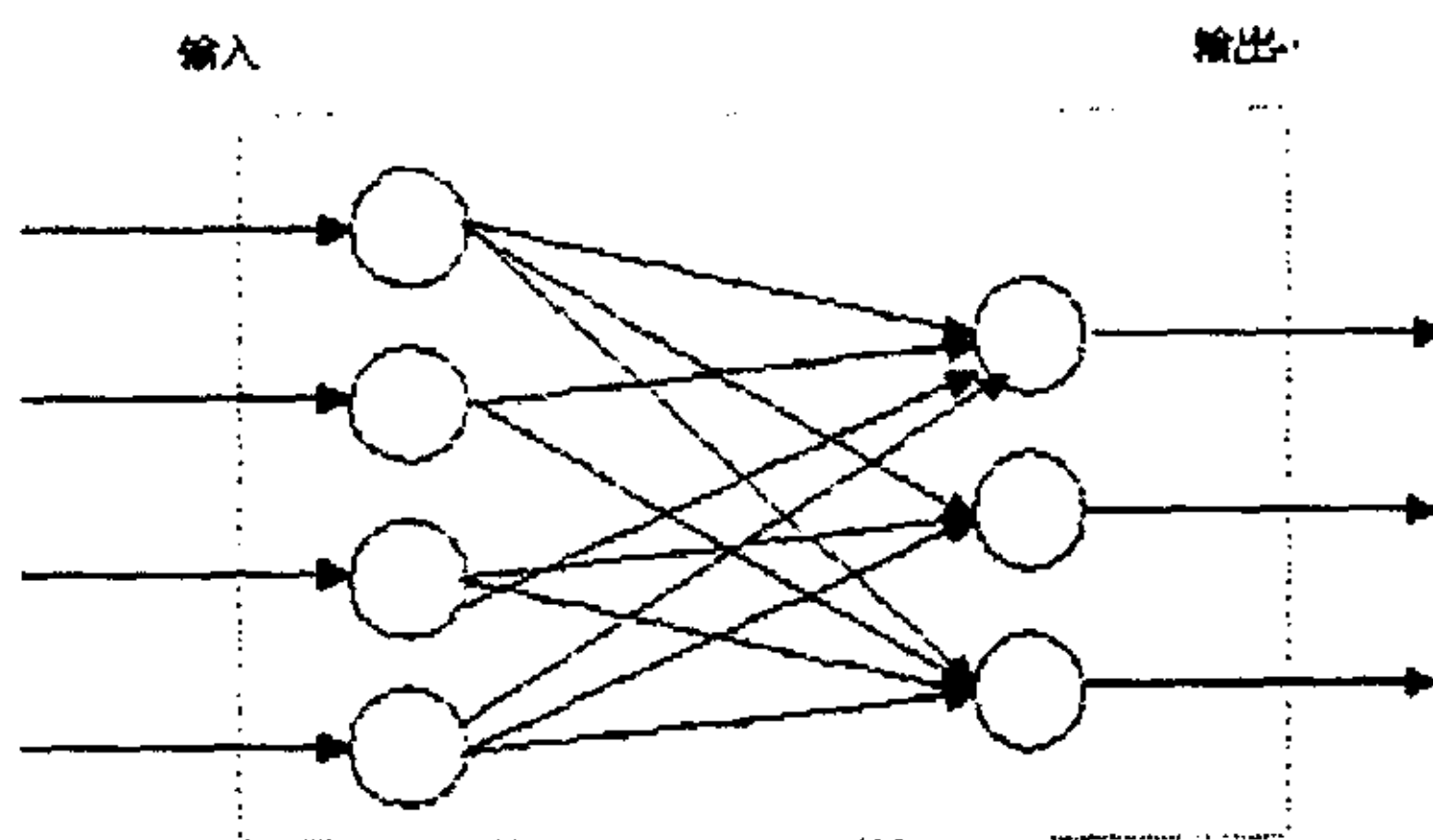


图 4.4 简单神经网络模型

各神经元之间的连接并不是单纯的传递信号的通道，而且在每对神经元之间连接上还有一个加权系数，这个加权系数起着类似于生物神经系统中神经元间触突连接的强作用，它可以加强或减弱上一个神经元的输出对下一个神经元的刺激，通常被称为权值。

神经网络中发生的动力学过程有两类：一类称之为快过程，一类称之为慢过程。快过程就是神经网络的计算过程，它是神经网络活跃状态的模式变换过程。神经网络在输入量的影响下进入一定的状态，由于神经元之间相互联系以及神经元本身的动力学性质，这种外界刺激兴奋模式会迅速地演变而进入平衡状态。这样，具有特定结构的神经网络就可以被定义为一类模式变换，而计算过程就是通过这类模式变换而实现的。在快过程中，从输入态到它邻近的某平衡态的映射是多一对应的映射关系。

神经网络只有通过学习才能逐步具有上述模式变换能力，神经网络学习过程即为慢过程。在动力学中，神经元之间的连接强度将随环境信息的变化而发生缓慢的变化，将环境信息逐步存于神经网络中。这种由于连接强度的变化而形成的记忆是长久的，称之为长期记忆或者对应权值记忆。慢过程的目标不是寻求某个平衡态而是希望形成一个具有一定结构的自组系统，在与环境交互作用的过程中，它把环境的统计规律反应到自身的机构上来，即通过与外界环境的交互作用来获

取知识。

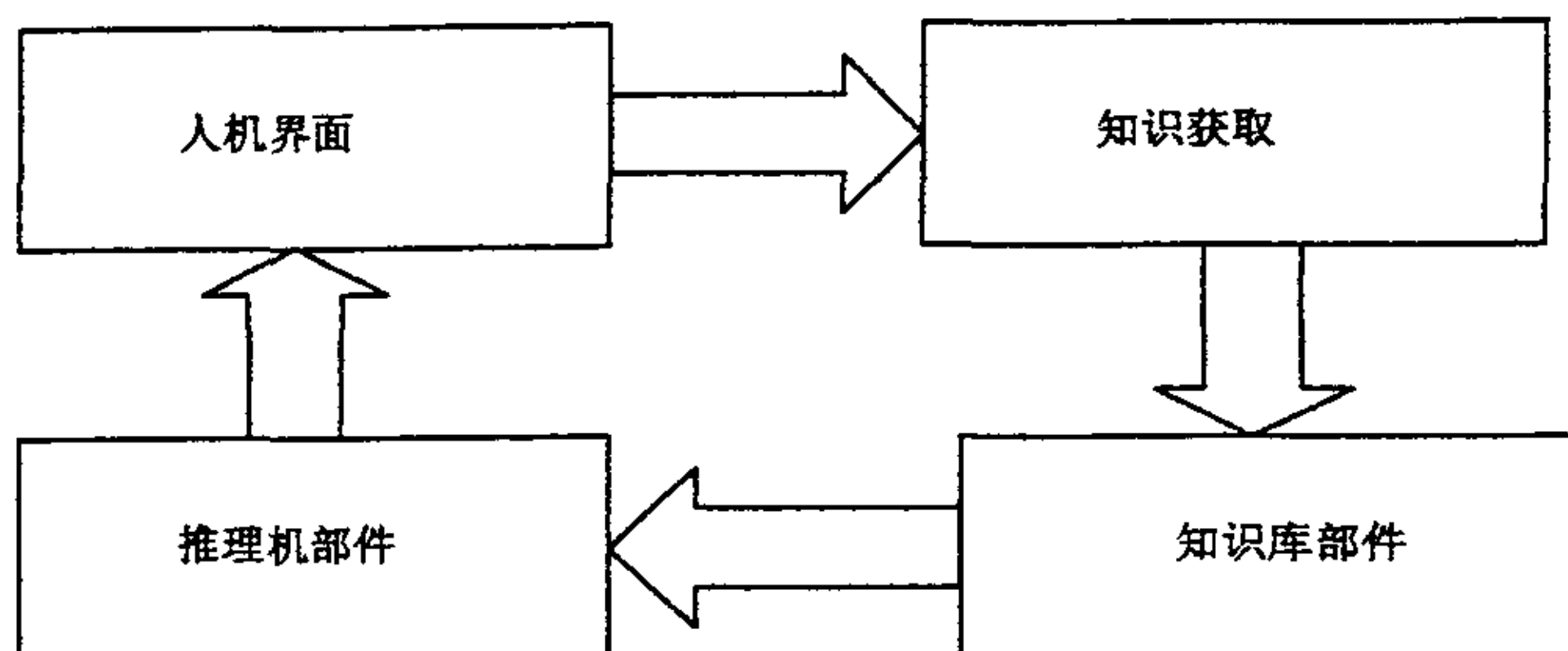


图 4.5 神经网络专家系统基本结构

完整的神经网络专家系统的基本结构如图 4.5 所示，知识获取部分，知识库部件、推理机部件和人机界面四部分组成，其中知识获取部件主要由神经网络学习算法组成，包括神经网络的结构（网络的层数及输入层、隐层和输出层节点的个数），通过样本的学习可得到网络权值的分布和量值，完成知识的获取。知识库部件由学习获取的网络权值构成，知识库的内容在学习新知识后不断更新权值的分布和量值。知识库是知识获取后权值分布和量值的载体，也是推理机的先导部分。推理机是问题求解的主要手段，它应用知识库中的神经网络权值分布和量值，并通过神经网络算法得到推理结果。人机界面是为用户使用专家系统而提供的程序接口。

4.4.2 反向传播学习算法的原理

反向传播学习算法可分为单输出的反向传播算法、多输出的反向传播算法及变步长尺度反向传播算法。比较常用的是前两种。

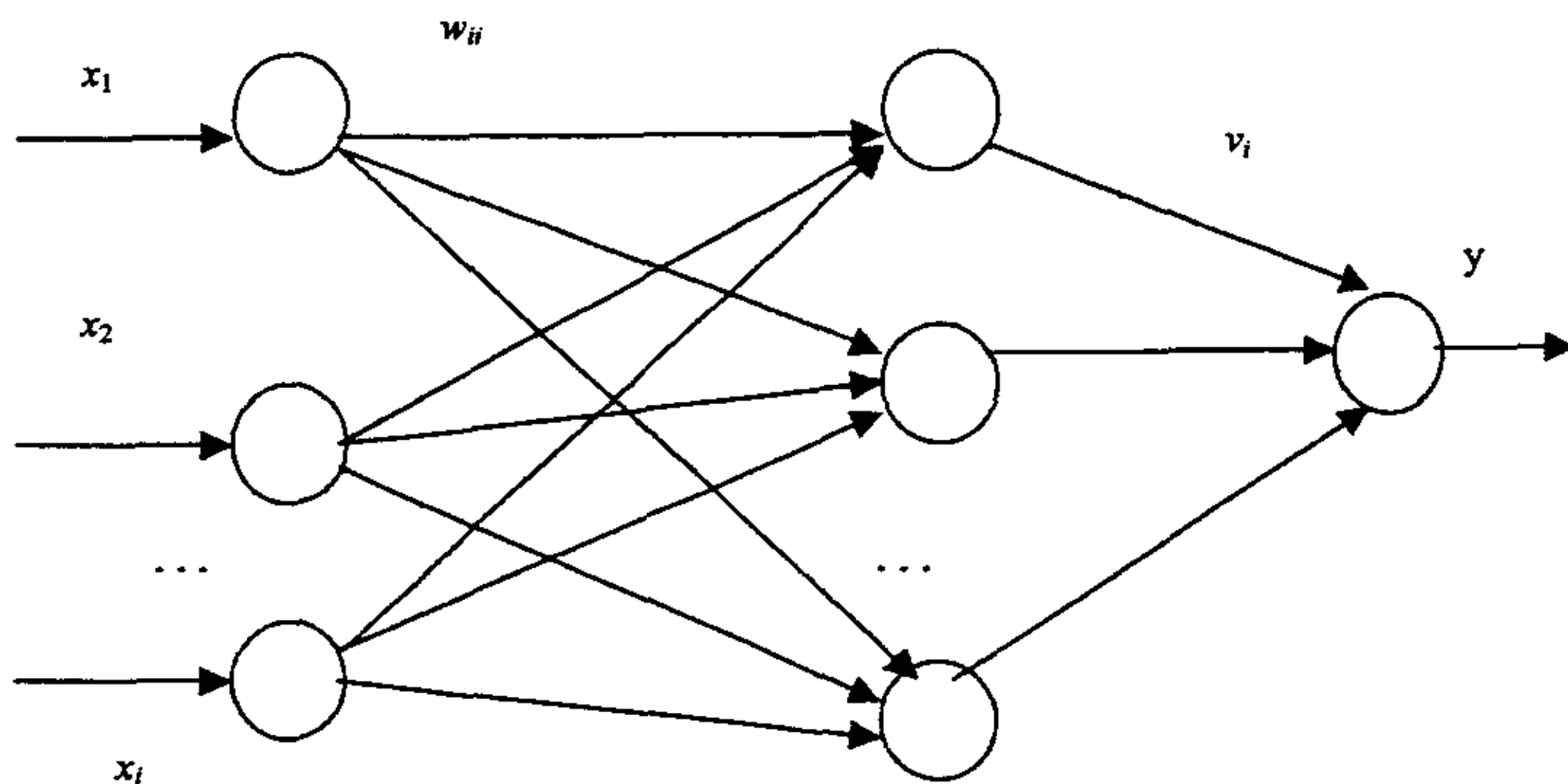


图 4.6 输出层中含有一个神经元的三层前向人工神经网络

4.4.2.1 单输出情况下的反向传播算法的计算原理和过程^[61]

对于输出层只含一个神经元的三层前向人工神经网络，其结构如图 4.6 所示。输入层中有 n 个神经元，隐含层中有 m 个神经元。输出层神经元的输出也是整个网络的输出 y ，网络中输入层分别是 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ；隐层各神经元的输入是：

$$I_i = \sum_{j=1}^n (w_{ij}x_j + \theta_i) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (4.3)$$

在上式中， w_{ij} 为隐层神经元 i 与输入层神经元 j 的连接权， θ_i 为隐层神经元的阈值，选择 Sigmoid 函数作为隐层神经元的激发函数 $f()$ ，则隐层神经元的输出为：

$$o_i = \frac{1}{1 + e^{-I_i}} \quad (4.4)$$

不失一般性，取输出层神经元的阈值为 0，输出层神经元的激发函数取线性函数，则输出层神经元的输出，也就是整个网络的输出为：

$$y = \sum_{i=1}^m v_i o_i \quad (4.5)$$

其中, v_i 为输出层神经元与隐层神经元 i 的连接权。

定义一个网络, 其中, 隐层神经元与输入层神经元的连接权为 w_{ij} 、隐层神经元的阈值为 θ_i , 输出层神经元与隐层神经元的连接权值为 v_i 。由此就可以确定此网络向量即网络的连接权向量 W 。当给出一组网络的输入后, 由公式(4.4)及(4.5)就可以求出网络的输出值 y 。

上述计算过程是这样的, 先给出已知网络的输入, 然后计算网络的输出, 常常把它称为正向计算过程, 其原因是网络的输入信息是从输入层开始, 逐层向输出层传递, 没有信息反馈过程。

设有学习样本为 $(x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{np}; t_p)$, ($p=1, 2, 3, \dots, p$; p 为样本数)。对某样本 $(x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{np}; t_p)$, 在给出网络向量 W 后, 可以通过公式(4.4)至(4.5)计算出网络的输出值 y_p , 对于样本 p , 定义网络输出误差为:

$$d_p = t_p - y_p \quad (4.6)$$

并定义误差函数为

$$e_p = \frac{1}{2} (t_p - y_p)^2 \quad (4.7)$$

一般情况下, W 的值是随机给定的, 因此, 求得网络输出值 y_p 后, 计算公式(4.7)的误差较大, 也就是说, 网络的计算精度不高。在确定网络的结构之后, 即在确定网络中隐层神经元数目的情况下, 只能通过调整 W 的值, 以逐步降低误差 d_p 来提高网络的计算精度。下面为根据误差 d_p 的信息来调整 W 的过程。

在反向传播算法中, 应沿着误差函数 e_p 随 W 变化的负梯度方向对 W 进行修正。设 W 的修正值为 ΔW 取

$$\Delta W = -\eta \frac{\partial e_p}{\partial W} \quad (4.8)$$

式中, η 为学习效率, 取 0~1 间的值。

将式(4.6)和(4.7)代入式(4.8)中有

$$\Delta W = \eta d_p \frac{\partial e_p}{\partial W} \quad (4.9)$$

式(4.9)就是 ΔW 的基本计算公式。

定义

$$\Delta W = (\Delta v_i, \Delta q_i, \Delta w_{ij}) \quad (4.10)$$

由式(4.9)推导, 可以求得当样本为 p 时, ΔW 中的第 i 个元素为

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_i &= \eta d_p \frac{\partial y_p}{\partial v_i} = \eta d_p o_{ip} \\ \Delta \theta_i &= \eta d_p \frac{\partial y_p}{\partial q_i} = \eta d_p v_i o_{ip} (1 - o_{ip}) \\ \Delta w_{ij} &= \eta d_p \frac{\partial y_p}{\partial w_{ij}} = \eta d_p v_i o_{ip} (1 - o_{ip}) x_{ip} \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

由于在完成正向计算之后, 已经求出隐层各神经元的输出 o_{ip} 和网络的输出误差 d_p , 因此能够使用公式(4.11)求得 ΔW 的值, 最后采用

$$W = W + \Delta W \quad (4.12)$$

对原 W 进行修改计算, 得到新的连接向量 W 。

以上计算过程是这样的, 首先求输出层神经元的输出值并计算其误差, 再沿着正向计算过程的反向将误差信息传递, 修正连接权值向量 W , 因此将这一计算过程称为反向计算过程。一般将这种正向计算, 误差反向传播的过程称为反向传播算法 (Back Programming Algorithm, 简记为 BP)。

对于所有的学习样本, 均按照样本排列顺序进行上述的计算过程, 然后固定 W 的值。对 P 个样本分别进行正向计算, 从而求出能量函数值

$$E = \sum_{p=1}^P e_p \quad (4.13)$$

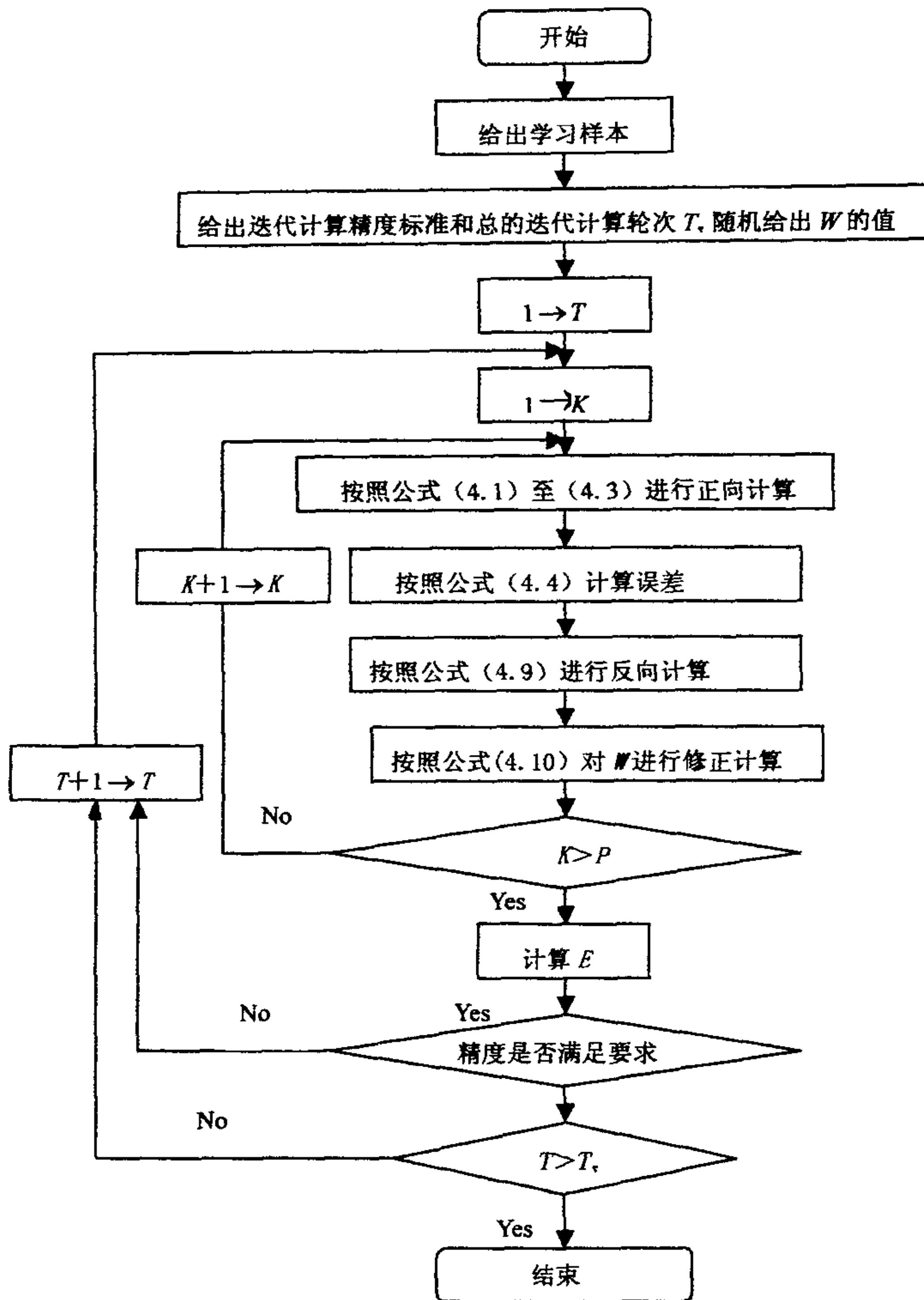


图 4.7 反向传播算法计算框图

这样就结束了一个轮次的迭代计算过程。

计算式(4.13)是对网络精度的评价。当 E 的值满足一定的精度要求时,就停止迭代计算,否则,就要进行新一轮迭代计算。对网络连接权值 W 的修正迭代计算的整个过程如图 4.7 所示。

设网络输出层中各个神经元的输出为 y_k ($k=1, 2, \dots, l$; l 为网络输出层中神经元数), 输出层神经元与隐层神经元的连接权值为 v_{ki} ($i=1, 2, \dots, m$), 选用线性函数作为输出神经元的连接激发函数, 输出层神经元的输出, 即网络输出为:

$$y_k = \sum_{i=1}^m v_{ki} o_i \quad (4.14)$$

4.4.2.2 多神经元输出情况下的反向传播算法的计算原理

这里仍然以向量 W 表示隐层神经元与输入层神经元的连接权 w_{ij} , 隐层神经元的值 θ_i 和输出层神经元的连接权值为 v_{ki} 。在给出 W 和一组网络的输入后, 由公式(4.3)、(4.4)和(4.5)就可以求出网络输出 y_k 。设有学习样本为 $(x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{np}; t_{kp})$, 在给出网络连接权值向量 W 后, 可以计算出网络的输出值 y_{kp} 。定义网络误差为^[62]:

$$d_{kp} = t_{kp} - y_{kp} \quad (4.15)$$

并定义样本的误差函数为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (t_{kp} - y_{kp})^2 \quad (4.16)$$

不考虑动量误差项时, 对 W 进行修正的公式仍然是

$$\Delta W = -\eta \frac{\partial e_p}{\partial W} \quad (4.17)$$

将(4.15)和(4.16)代入(4.17)中, 有

$$\Delta W = \eta \sum_{k=1}^l d_{kp} \frac{\partial y_{kp}}{\partial W} \quad (4.18)$$

这里 ΔW 为:

$$\Delta W = (\Delta v_{ki}, \Delta \theta_i, \Delta w_{ij}) \quad (4.19)$$

由公式(4.19), 可以求得样本为 p 时, ΔW 的元素是:

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_{ki} &= \eta d_{kp} o_{ip} \\ \Delta \theta_i &= \eta o_{ip} (1 - o_{ip}) \sum_{k=1}^l d_{kp} v_{ki} \\ \Delta w_{ij} &= \eta o_{ip} (1 - o_{ip}) x_{jp} \sum_{k=1}^l d_{kp} v_{ki} \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

按照 ΔW 的计算式, 对 W 进行修正计算的过程, 与神经网络中含有一个输出神经元的情况相同。

4.5 反向传播学习算法中存在的一些问题及改进方法和措施

反向传播的计算特点是, 计算公式比较简单, 相应的计算程序也简单, 但是在计算过程中也存在一些问题^[63]。

(1) 反向传播的收敛速度比较慢, 一般需要成千上万次迭代计算; 反向传播算法中, 是沿着误差函数随着 W 变化的负梯度方向对 W 进行修正。这样容易陷入能量函数的局部极小值;

(2) 网络隐层神经元数目的选取和 W 初值的选取, 往往靠经验;

(3) 新加入的样本要影响已经学习完的样本。另外还有一些理论上的问题, 如网络的收敛性与网络的结构之间的关系等。

针对上述问题, 有一些改进方法, 如改进算法的优化设计方法, 改进激发函数, 调整网络结构, 改进训练样本的归一方法, 对训练样本进行非线性的转换处理等方法。

神经网络的学习问题是属于超高维优化问题, 因此采用此优化方法所遇到的棘手问题是如何克服局部最优, 而比较有效地收敛于全局最优正好是遗传算法的特长。因此我们常采用基于遗传算法的神经网络训练方法。

4.6 基于遗传算法的神经网络训练方法

可以将遗传算法应用于确定人工神经网络连接权值的学习过程中,也可以用遗传算法优化网络的结构^[64]。我们将主要是使用前者。神经网络的学习结果是使能量函数 E 降低,因此,网络的学习过程也可以看作一个极小化的优化过程。其目标函数为 E , 优化变量为 W , 所以能够应用遗传算法确定网络的连接权 W 。粗略的计算过程如图 4.8 所示。

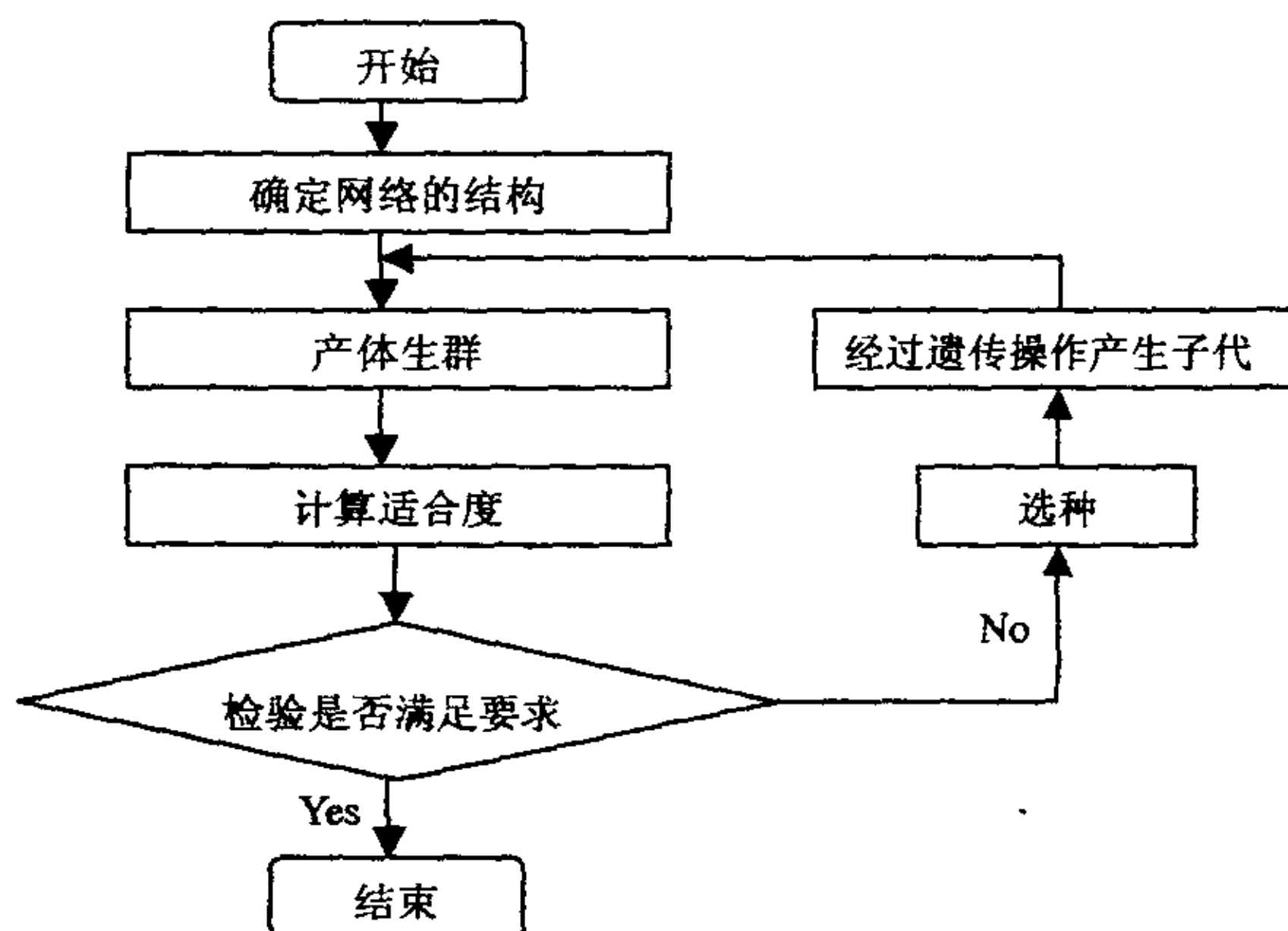


图 4.8 基于遗传算法的人工神经网络训练流程

遗传算法的不足之处是它的进化(优化)过程比较缓慢^{[55][66]}, 采用改进的遗传算法 EGA (Extended Genetic Algorithms), 采用多点交叉和自适应多点变异等方法, 使得 EGA 训练 BP (Back Programming) 神经网络的速度和精度比典型的遗传算法高的多。

对神经网络的优化向遗传算法提出了新的挑战。遗传算法的理论基础是假设待优化的多维空间可由不同的二进制来表示。但是长期以来遗传算法的解(染色

体) 长度小于 50 个字节^[67], 而神经网络的编码队列长度可能是上千个字节组成, 因此这里的问题不仅在于怎样将遗传算法应用于神经网络的优化之中, 而且要解决它的优化速度和精度问题。

4. 7 本章小结

本章介绍了基于遗传算法的神经网络选参方法中需要用到的遗传算法, 神经网络以及基于遗传算法的神经网络的理论知识。为建立基于遗传算法的神经网络的模型奠定了基础。

5 激光切割-拼焊中基于遗传算法的神经网络

选参方法的实现

5.1 激光切割-拼焊的神经网络选参模型的建立

由前面的讨论可以知道,激光切割-拼焊的关键是激光切割的质量。影响激光切割质量的因素很多,但是对于选定一种材料的板坯来说,我们通常考虑的是激光功率、辅助气体的气压、板材的厚度和切割速度。对于每一种材料我们建立一个样本组,利用样本组的数据来训练网络的权值。不同的材料采用不同的样本进行训练。然后,对未知道的参数进行预测。其基本模型^{[68][69]}如图 5.1 所示。分为三层:输入层、隐层和输出层。

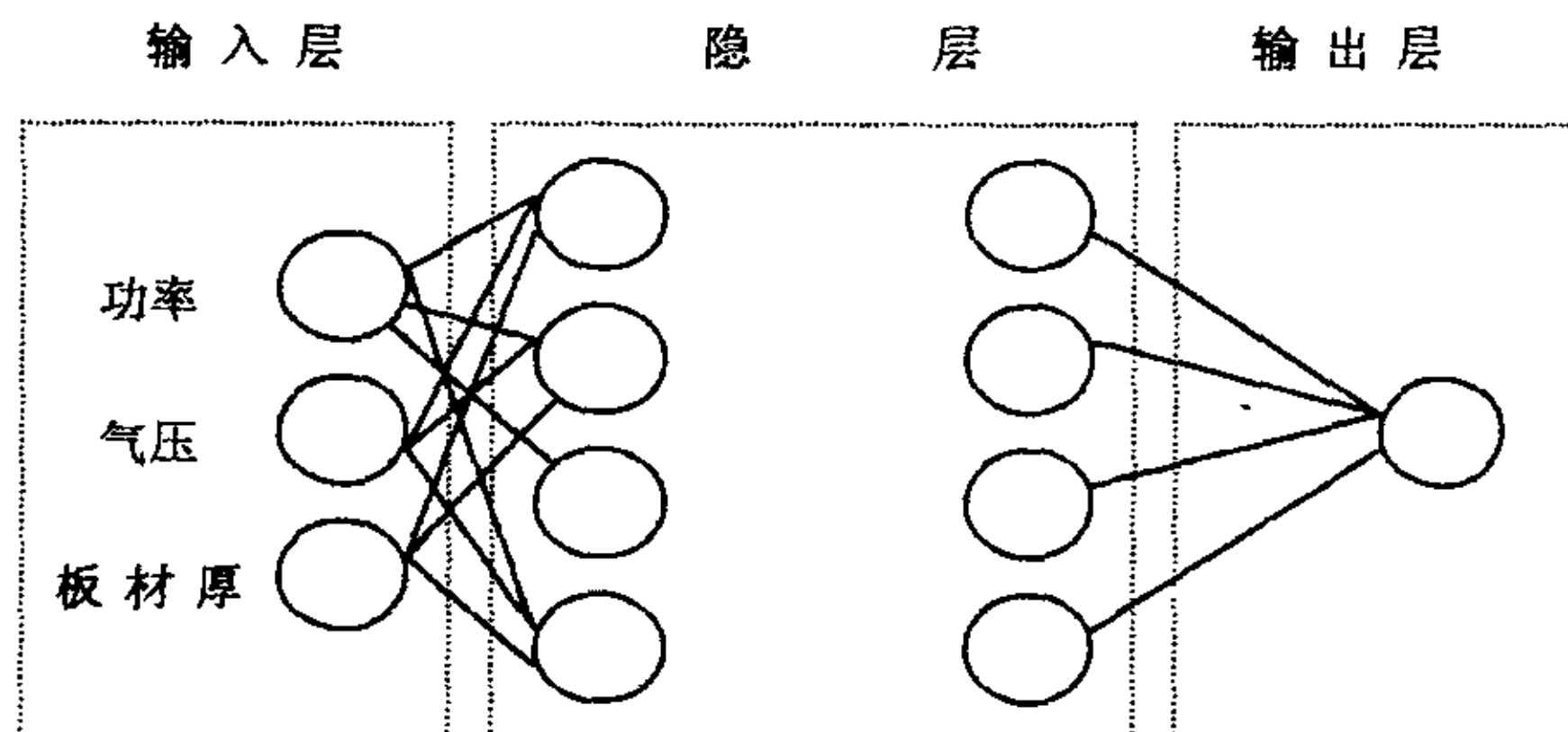


图 5.1 激光切割-拼焊神经网络选参模型

激光拼焊的焊接参数的选取,利用已知参数,采用插值法即可。因为本系统只采用了一个激光聚焦系统,只是在激光切割前调节好焦点的位置,而在激光焊接时并不需要重新调节,因而,影响激光焊接质量的主要参数只有激光功率。所以对激光切割-拼焊参数的选取分为两步:第一步是激光切割工艺参数的正确选取;第二步是用插值法来选择激光焊接工艺参数。

5.2 基于遗传算法的神经网络的实现

按照上一章所述的遗传算法, 首先对参数进行编码^{[70][71]}。在此, 遗传算法优化的对象是神经网络的权值, 我们将上面的神经网络模型的权值按如下方式定义: 隐层的权值定义为一个 4×4 的矩阵, 输出层的权值矩阵定义为 4×1 的矩阵。但是它们一般不用于常规的矩阵计算, 只是表示权值的分布。隐层中, 第一层, 第二层, ... 第 n 层的输入权值分别定义为:

$$\begin{bmatrix} w_{11}^1 & w_{12}^1 & w_{13}^1 \\ w_{21}^1 & w_{22}^1 & w_{23}^1 \\ w_{31}^1 & w_{32}^1 & w_{33}^1 \\ w_{41}^1 & w_{42}^1 & w_{43}^1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} w_{11}^2 & w_{12}^2 & w_{13}^2 & w_{14}^2 \\ w_{21}^2 & w_{22}^2 & w_{23}^2 & w_{24}^2 \\ w_{31}^2 & w_{32}^2 & w_{33}^2 & w_{34}^2 \\ w_{41}^2 & w_{42}^2 & w_{43}^2 & w_{44}^2 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} w_{11}^n & w_{12}^n & w_{13}^n & w_{14}^n \\ w_{21}^n & w_{22}^n & w_{23}^n & w_{24}^n \\ w_{31}^n & w_{32}^n & w_{33}^n & w_{34}^n \\ w_{41}^n & w_{42}^n & w_{43}^n & w_{44}^n \end{bmatrix}$$

输出层中的权值矩阵为:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}$$

因而, 遗传算法要优化 $w_{4 \times 3}$, $w_{4 \times 4}$, ... $w_{4 \times 4}$ 矩阵和 $v_{4 \times 1}$ 矩阵。所以要对它们的权值进行编码, 有关的资料介绍, 所有权值的范围一般在 $-100 \sim 100$ 。在此, 我们采用二进制编码, 而且其精度 $\delta = 0.0001$, 因而有编码公式 (5.1):

$$\delta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^l - 1} \quad (5.1)$$

因而得

$$l = \log_2 \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\delta} + 1 \quad (5.2)$$

取整。

其编码的顺序为:

$$\left[w_{11}^1 w_{12}^1 w_{13}^1 w_{14}^1 \dots w_{41}^n w_{42}^n w_{43}^n w_{44}^n \right] v_1 v_2 v_3 v_4$$

我们把它定义为基因(Gene)的长度,因而染色体(Chromosome)的长度为

$$ch=1 \times (4 \times 4 + 4) \quad (5.3)$$

适度函数(fitness)定义为误差之和

$$fitness = \sum_{i=1}^4 (y_i - y_{ip})^2 / 2 \quad (5.4)$$

其中, y_i 为样本的输出值, y_{ip} 为期望输出。

在程序中的结构定义为:

```
struct individual// data structure of individual
{
    char chrom[CHROMLENGTH+1]; //a string of code representing individual
    double value;                //object value of this individual
    double fitness;              //fitness value of this individual
};
```

全局变量定义为:

```
int generation ; //number of generation
int best_index;  //index of individual
int worst_index; //index of individual
struct individual bestindividual;//best individual of current generation
struct individual current best;//best individual by now
struct individual population[POPZIZE]; //POPULATION
```

基本函数有:

```
void GenerationInitialPopulation(void); //initialize the population
void GenerateNextPopulation(void)      //generate the next generation
void EvaluatePopulation(void)          //evaluate population
void CalculateObjectValue(void)        //calculate the object value
void CalculateFitnessValue(void);      //calculate the fitness
```

```

void FindBestAndWorstIndividual;           //find the best and worst
individual
void PerformEvolution(void);               //perform evolution
void SelectionOperator(void);              //selection operator
void CrossoverOperator(void);              //crossover operator
void MutationOperator(void);              //mutation operator
void OutputTextReport(void);              //out put text;

```

遗传算法的主函数的结构为:

```

void main(void)
{
    generation=0;
    GenerateInitialPopulation();
    EvaluatePopulation();
    While(generation<MaxGeneration)
    {
        generation++;
        GenerateNextPopulation;
        EvaluatePopuplation();
        PerformEvolution();
        OutputTextReport();
    }
}

```

将遗传算法的结果即权值输出写入神经网络的计算程序之中, 然后利用神经网络的算法对未知的参数进行预测。神经网络的算法过程如下。

由前面的讨论知道隐层和输出的激励函数可以知道当输入的参数为 (x_1, x_2, x_3) , 第一隐层的输出为 $(y_1^1, y_2^1, y_3^1, y_4^1)$, 则

$$(y_1^1, y_2^1, y_3^1, y_4^1) = \left(\frac{1}{1+e^{-x_1}}, \frac{1}{1+e^{-x_2}}, \frac{1}{1+e^{-x_3}}, \frac{1}{1+e^{-x_4}} \right) \quad (5.5)$$

其中,

$$\lambda_1 = (w_{11}x_1 + w_{12}x_2 + w_{13}x_3); \quad \lambda_2 = (w_{21}x_1, w_{22}x_2, w_{23}x_3);$$

$$\lambda_3 = (w_{31}x_1 + w_{32}x_2 + w_{33}x_3); \quad \lambda_4 = (w_{41}x_1 + w_{42}x_2 + w_{43}x_3)。$$

再把 $(y_1^1, y_2^1, y_3^1, y_4^1)$ 作为第二层的输入,同理可求得第三隐层的输入,依次类推,可以求得最后隐层的输出。这样,最后的隐层的输出是 $(y_1^4, y_2^4, y_3^4, y_4^4)$,则输出层的输出为:

$$y = (v_1y_1^4 + v_2y_2^4 + v_3y_3^4) \quad (5.6)$$

从而得到了输出的值。由此可见,基于遗传算法的神经网络的选参方法的计算量是比较大的,而且有时需要的对神经网络的结构进行调整,如隐层的数目,神经元的个数,以及权值的初始化值等。这些都需要用经验和针对实际的实验来调整。这中间的没有涉及到利用反向传播需要用到的学习效率和稳定率。而是用遗传变异中的交叉率和变异率来代替它。对本结构中交叉率为 0.8,变异率为 0.15。选参系统的主界面如图 5.2 所示。

5.3 动态链接库的建立

5.3.1 建立动态链接库的必要性

由于 Windows 为微机提供了前所未有的标准用户界面、图形处理能力和简单灵便的操作,绝大多数程序编制人员都已转向或正在转向 Windows 编程^{[72][73]}。在许多用户设计的实际应用系统的编程任务中,常常要实现软件对硬件资源和内存资源的访问,例如端口 I/O、DMA、中断、直接内存访问等等。若是编制 DOS 程序,这是轻而易举的事情,但要编制 Windows 程序,尤其是 WindowsNT 环境下的程序,就会显得较困难。因为 Windows 具有“与设备无关”的特性,不提倡与机器底层的东西打交道,如果直接用 Windows 的 API 函数或 I/O 读写指令进行访问和操作程序运行时往往就会产生保护模块。

那么在 Windows 下怎样方便地解决上述问题呢?采用 DLL(Dynamic Link

Libraries)技术就是良好途径之一。DLL 是 Windows 最重要的组成要素, Windows 中的许多新功能、新特性都是通过 DLL 来实现的其实 Windows 本身就是由许多的 DLL 组成的, 最基本的三大组成模块 Kernel、GDI 和 User 都是 DLL, 它所有的库模块也都设计成 DLL。凡是以 .DLL、.DRV、.FON、.SYS 和许多以 .EXE 为扩展名的系统文件都是 DLL, 要是打开 Windows\System 目录, 就可以看到许多的 DLL 模块。尽管 DLL 在 Ring3 优先级下运行, 仍是实现硬件接口的简便途径。DLL 可以有自己的数据段, 但没有自己的堆栈, 使用与调用它的应用程序相同的堆栈模式, 减少了编程设计上的不便; 同时, 在内存中只有一个 DLL 一个实例, 使之能高效经济地使用内存; DLL 实现的代码封装性, 使得程序简洁明晰; 此外还有一个最大的特点, 即 DLL 的编制与具体的编程语言及编译器无关, 只要遵守 DLL 的开发规范和编程策略, 并安排正确的调用接口, 不管用何种编程语言编制的 DLL 都具有通用性。例如在 BC31 中编制的 DLL 程序, 可用于 BC、VC、VB、Delphi 等多种语言环境中。在 win98 环境下编译了 Windows 下直接内存访问和端口 I/O 两个 DLL, 用在多个自制系统的应用软件中, 运行良好。

5.3.2 DLL 的建立和调用

5.3.2.1 DLL 建立的方法

关于 DLL 的建立, 有如下几个方面的要素。

1. 入口函数 LibMain()

就象 C 程序中的 WinMain() 一样, Windows 每次加载 DLL 时都要执行 LibMain() 函数, 主要 用来进行一些初始化工作。通常的形式是:

```
int FAR PASCAL LibMain(HINSTANCE hInstance, WORD wDataSeg, WORD
wHeapSize, LPSTR lpszCmdLine)
{
    if(wHeapSize!=0) //使局部堆、数据段可移动
```

```
UnlockData(0); //解锁数据段
/*此处可进行一些用户必要的初始化工作*/
return 1; //初始化成功
}
```

2. 输出函数的引出方法

自定义的输出函数,为了让位于不同内存段的应用程序进行远程调用,自定义的输出函数必须定义为远程函数(使用 FAR 关键字),以防使用近程指针而得到意外的结果;同时,加上 PASCAL 关键字可加快程序的运行速度,使代码简单高效,提高程序的运行速度。输出函数的引出方法有两种:

(1) 在 DLL 的模块定义文件(.DEF)由 EXPORTS 语句对输出函数逐一列出。

例如:

```
EXPORTS WEP @1 residentname //residentname 可提高 DLL 效率和处理速度
PortIn @2
PortOut @3 //通常对所有输出函数附加系列号
```

(2) 在每个输出函数定义的说明中使用 _export 关键字来对其引出。

以上两种方法任选其中的一种即可,不可重复。后面的两个实例分别使用了上述两种不同的引出方式,是只得注意的。

5.3.2.2 DLL 的调用方法

1. DLL 的调用,加载 DLL 时,Windows 寻找相应 DLL 的次序

第一,当前工作盘。第二,Windows 目录; GetWindowsDirectory() 函数可提供该目录的路径名。第三,Windows 系统目录,即 System 子目录;调用 GetSystemDirectory() 函数可获得这个目录的路径名。第四,DOS 的 PATH 命令中罗列所有目录。第五,网络中映象的目录列表中的全部目录。

2. 模块中输出函数的调用方法

不论使用何种语言对编译好的 DLL 进行调用时,基本上都有两种调用方式,

即静态调用方式和动态调用方式。静态调用方式由编译系统完成对 DLL 的加载和应用程序结束时 DLL 卸载的编码（如还有其它程序使用该 DLL，则 Windows 对 DLL 的应用记录减 1，直到所有相关程序都结束对该 DLL 的使用时才释放它），简单实用，但不够灵活，只能满足一般要求。动态调用方式是由编程者用 API 函数加载和卸载 DLL 来达到调用 DLL 的目的，使用较复杂，但能更加有效地使用内存，是编制大型应用程序时的重要方式。具体来说，可用如下的方法调用：

(1) 在应用程序模块定义文件中，用 IMPORTS 语句列出所要调用 DLL 的函数名。如：IMPORTS MEMORYDLL.MemoryRead

MEMORYDLL.MemoryWrite

(2) 让应用程序运行时与 DLL 模块动态链接，先用 Load Library 加载 DLL，再用 GetProcAddress 函数检取其输出函数的地址，获得其指针来调用。

5.3.2.3 DLL 实现

1. 用 VC++6.0 定制和调用动态链接库

动态链接库(dll)是包含共享函数库的二进制文件，可以被多个应用程序同时使用。建立应用程序的可执行文件时，不必将 DLL 连接到应用程序中，而是在运行时动态装载 DLL，装载时 DLL 被映射到调用进程的地址空间中。

动态链接库(DLL)结构，DLL 中定义有两种函数：导出函数(Export Function)和内部函数(Internal Function)，导出函数可以被其它模块调用，内部函数只能在 DLL 内部使用。我们在用 C++定制 DLL 文件时，需要编写的就是包含导出函数表的模块定义文件(.DEF)和实现导出函数功能的 C++文件。下面以 Nga.dll 为例介绍 DEF 文件和实现文件的结构：

(1) 定义文件(.DEF)是由一个或者多个用于描述 DLL 属性的模块语句组成文本文件，每个 .DEF 文件至少必须包含以下模块定义语句：第一个语句必须是 LIBRARY 语句，指出 DLL 的名字。EXPORTS 语句列出被导出函数的名字。可以使用 DESCRIPTION 语句描述 DLL 的用途(此句可选)。“;”对一行进行注释(可选)

(2) 实现文件(.cpp 文件为例)

实现入口表函数的.cpp 文件中, 包含 DLL 入口点处理的 API 函数和导出函数的代码。

2. 创建基于遗传算法的神经网络的选参的 Nga.dll

(1) 首先创建 Nga.dll 的工程, 启动 VC++6.0 按以下步骤生成 DLL 工程: 在菜单中选择 File\New\Project 在工程列表中选择 Win32 Dynamic-Link Library 在 ProjectName 中输入工程名:Nga 单击 Location 右边按钮, 选择 C:\Nga 目录 单击 OK 完成, 至此已创建了 Nga.dll 的工程文件。

(2) 创建 Nga.def 文件 在菜单中选择 File\New\Text File 输入以下完代码后保存文件名"Nga.def";

Nga.def; 指出 DLL 的名字 Sample, 链接器将这个名字放到 DLL 导入库中 LIBRARY Nga, 定义导出函数 Learn() 为例

EXPORTS

Learn @1

myr @2

def 文件结束

(3) 创建 Nga.cpp. 在菜单中选择 File\New\C++ Source File 项, 输入以下代码后保存文件名"Nga.cpp"

```
//Nga.cpp
#include < windows.h >
#include < math.h >
...
int Learn(void)
{
...
}
void myr(...)
```

```
{  
...  
}
```

(4) 编译 DLL 文件——从 Build 菜单中选择 Build Nga.DLL, 产生 Nga.DLL 文件, 以后就可以随时调用了。

3. 在选参的应用程序中调用 DLL 文件

在应用程序中要首先装入 DLL 后才能调用导出表中的函数, 例如用 MFC 创建基于对话框的工程 PS, 并在对话框上放置“ONGASART”按钮, 你就必须添加装载代码。

(1) 首先在 PSDlg.cpp 的首部添加变量设置代码:

```
//设置全局变量 gLibNga 用于存储 DLL 句柄  
HINSTANCE gLibNga=NULL;  
//第二个变量 LEARN 是指向 DLL 库中 Learn() 函数的指针  
typedef int(* LEARN)();  
LEARN Learn;  
typedef void (* MYR)();  
MYR myr;
```

(2) 利用 ClassWizard 为“ONGASART”按钮添加装载 DLL 的代码 Void CPStdlg::OnGASart()

```
{  
    //要添加的代码如下  
    if(gLibNga!=NULL)  
    { MessageBox("The NGa.DLL has already been load.");  
      return;  
    }  
    //装载 Nga.dll, 未加路径, 将在三个默认路径中寻找  
    gLibNga=LoadLibrary("Nga.DLL");  
    //返回 DLL 中 Learn() 和 myw() 函数的地址
```

```
Learn=(LEARN)GetProcAddress(gLibNga, "Learn");  
myr=(myr)GetProcAddress(gLibNga, "myr");  
//代码添加完毕  
}
```

(3) 只要 DLL 装载成功, 在应用程序中就可以直接调用 Learn() 和 myr() 函数, 此时已完成了定制和调用 DLL 的全部过程。

5.4 本章小结

本章介绍了基于遗传算法的神经网络的激光切割一拼焊选参的实现方法。介绍了建立动态连接库的方法, 并为本程序建立了一个动态连接库, 从而能很方便地调用有关程序。

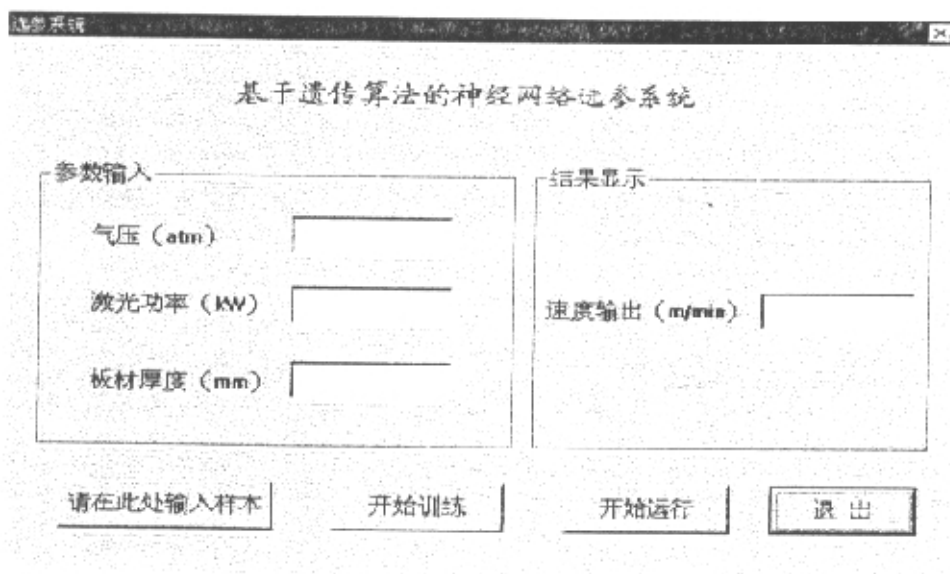


图 5.2 选参系统的主界面

6 激光切割—拼焊的加工过程及实例

6.1 试验条件

(1) 试验设备: HJP-01 型激光切割—拼焊系统。

(2) 激光器: 美国 PRC 公司 2kW 快轴流 CO₂ 激光器。

(3) 试验材料: 武汉钢铁公司生产的 IF 钢与 08AL 基镀锌板 (WLZn), 化学成分 (wt%) 如表 6.1 所示。板坯厚度: 0.75~1.2mm; 板坯宽度: 2000mm; 板坯长度: 3000mm, 但是其长度在理论上可以是无限的。

表 6.1 镀锌板的化学成分

钢 材	C	Si	Mn	P	S	Al
IF 板	0.003	0.012	0.11	0.006	0.003	/
WLZn 板	0.06	/	0.28	0.01	0.009	0.06

6.2 切割—拼焊工艺过程

6.2.1 切割工艺过程

1. 切割辅助气体的选择

由于激光切割以后的钢板不能再进行任何加工, 而直接用于对接拼焊, 板坯切割辅助气体必须保证切割面无氧化, 以确保接头的机械性能。为此, 本试验将氩气作为切割辅助气体, 氮气也可以。

2. 切割工艺参数的选择

由于轿车底板用板材主要是 0.8mm 厚的镀锌板, 试验主要对 0.8~1.2mm 厚的轿车底板用板坯进行激光切割—拼焊。经试验优化以后的切割参数如表 6.2 所示。

表 6. 2 激光切割工艺参数

板坯厚度	激光功率(kW)	切割速度(m/min)	气体压力(Bar)
0.8mm	1.1	4~4.5	6
1.0mm	1.5	4~4.5	6

从切割质量来看,切口边缘镀锌层未被烧损,仅有 0.3mm 宽的镀锌层熔化(光亮未氧化)。切口粗糙度不大于 $R=0.248\mu\text{m}$ 。图 6.1 为 1mm 厚镀锌板在激光功率为 1.5kW,切割速度为 4.5m/min 的条件下切口粗糙度实测结果。

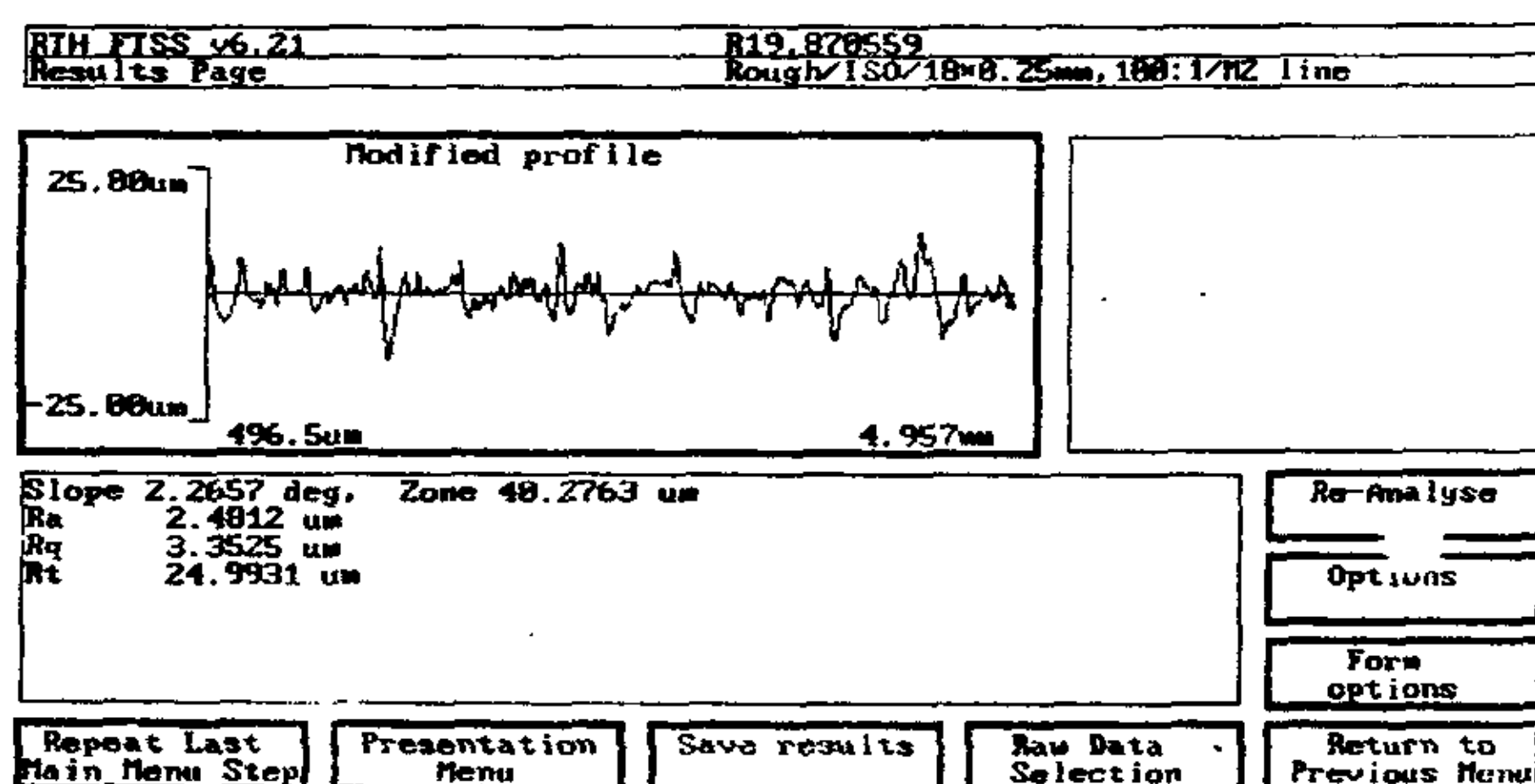


图 6. 1 激光切割断面粗糙度测定结果

6. 2. 1 对中拼接工艺过程

板坯切割完毕以后,首先让左右钳口都回到切割位,然后利用人机对话的方式补偿切缝间隙,则可以用塞尺检测到在接缝的全长范围内最大间隙小于 0.05mm。调整夹具的夹紧力大小,压板的状态等各个环节,可以保证两块拼接板坯在焊缝处的最大错边量小于 0.05mm。通过观察焊缝的状态和检测红色激光(一般与工作激

光同轴)的运动轨迹,可以测得激光光斑中心运动的轨迹与接缝中心线的重合误差小于或等于 0.01mm,满足切割一拼焊对光斑移动的要求。

6.2.2 焊接工艺过程

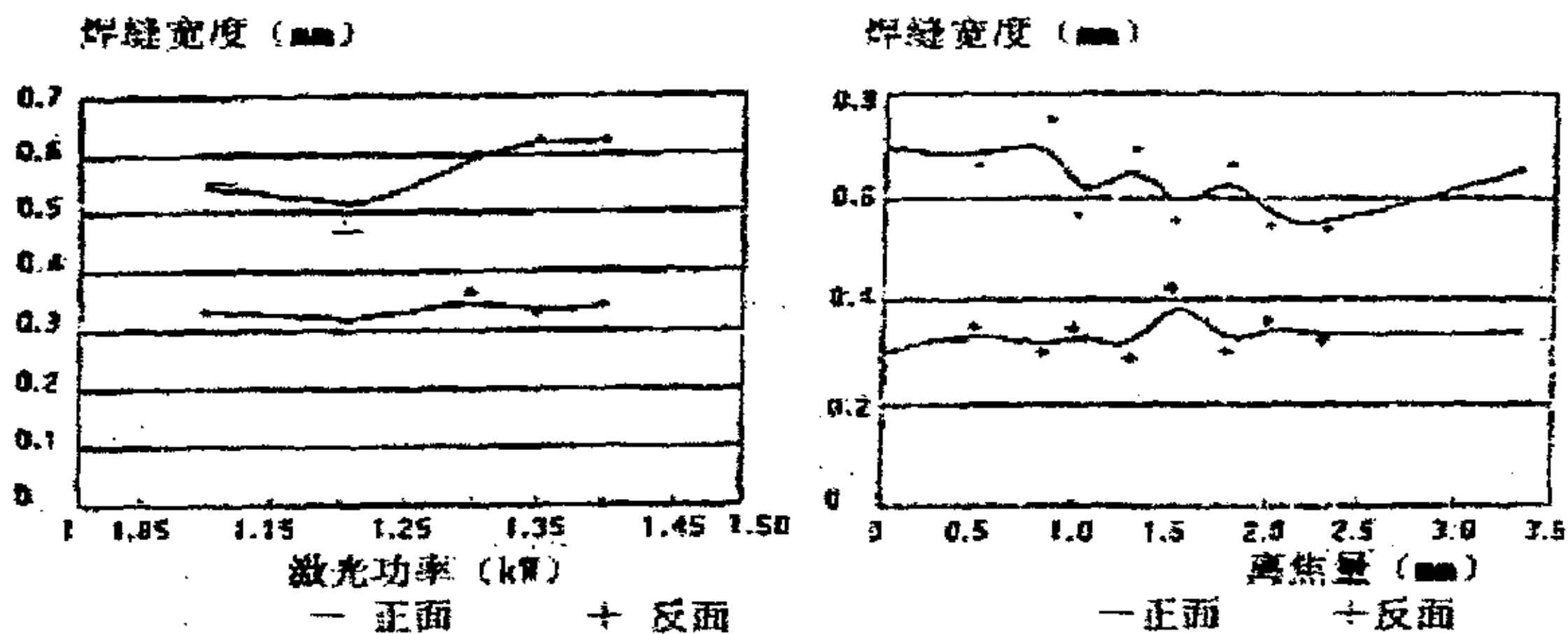
激光拼焊是不需添加任何填料的对接焊,依据工艺试验和试验的数据处理,选择如下的拼焊条件和工艺参数:

- (1) 保护气体。氩气作为保护气体和等离子的吹除气体。
- (2) 焊接工艺参数。焊接工艺参数见表 6.3。焊接头的性能可见附件 5。

表 6.3 激光焊接工艺参数

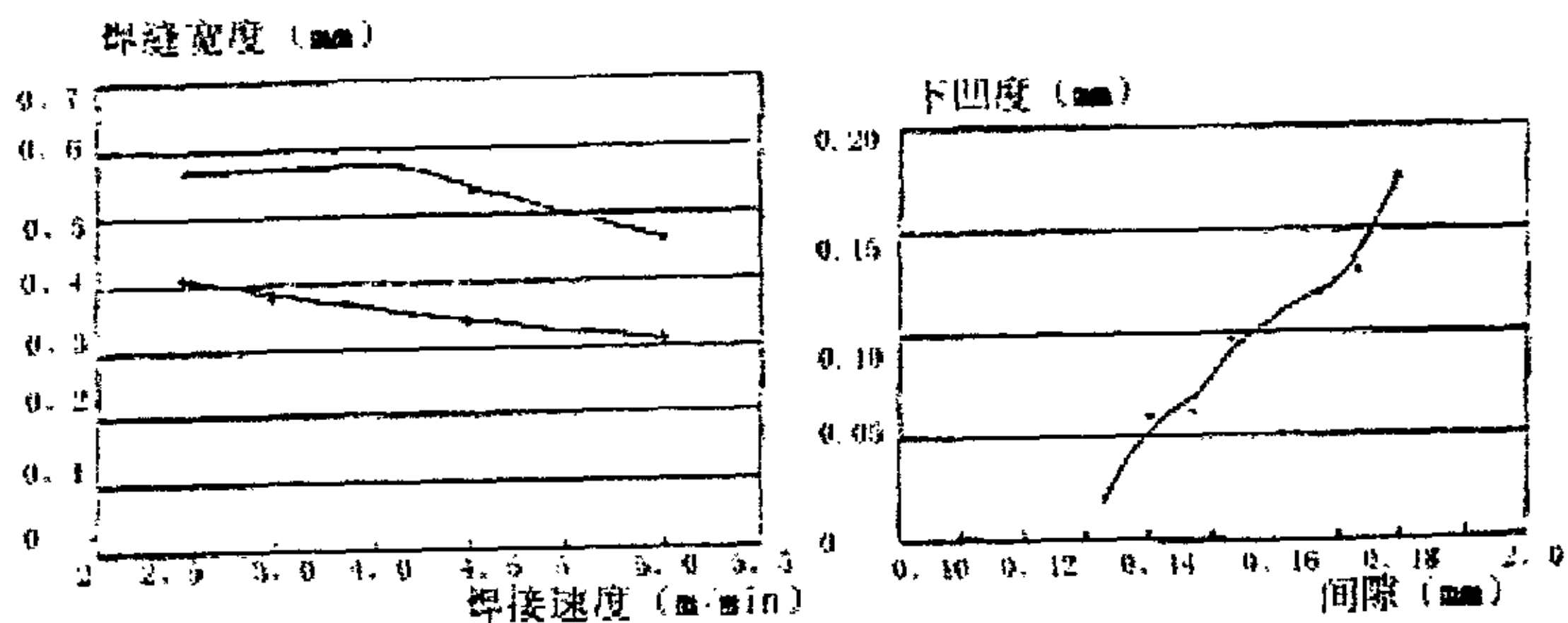
镀锌板板材厚度(mm)	激光功率(kW)	焊接速度(m/min)
0.8	1.6~1.8	4~5

从试验的结果可以看到,由于在激光拼焊的过程中没有添加任何填料,接缝间隙未得到填充而下凹。因此,间隙的大小是决定下凹的重要因素,对焊缝宽度也有重要影响。通过 1mm 厚镀锌板的间隙对下凹度影响的定量试验(用读数显微镜观测在各种不同的间隙条件下焊接接头截面),归纳的结果如图 6.2 所示。从图上可见,焊接表面下凹度几乎与接头间隙大小成线性关系,因此,要保证下凹度



(a) 焊缝宽度与激光功率的关系

(b) 焊缝宽度与离焦量的关系



(c) 焊缝宽度与焊接速度的关系图

(d) 焊缝的下凹量与接缝间隙关系图

图 6.2 焊接接缝的外形与焊接工艺参数及接缝间隙的关系图

小于 10%板厚, 其间隙不能超过 0.08~0.015mm。从试验结果来看, 正面焊缝下凹量一般都为 7%~10%板厚, 背面下凹则更小一些, 一般为 0%~8%板厚, 经试验优化后的焊接工艺参数见表 6.4。

表 6.4 优化以后的焊接工艺参数

镀锌板板坯厚度(mm)	激光功率(kW)	焊接速度(m/min)
0.8	1.6~1.8	4~5
1.0	1.8~2.0	3~4

6.2.3 切割—拼焊过程

在调整好系统的加工工艺参数和给左右钳口上料之后, 整个系统在计算机的控制下自动地进行激光切割—拼焊。当以 0.8~1.2mm 厚的镀锌板坯为加工对象时, 生产单对板坯的节拍小于 4min。

6.3 本章小结

在 HJP-01 型激光切割-拼焊系统上进行了工艺试验, 表明 HJP-01 型激光切割-拼焊系统无论是在切割质量、拼接接缝在全长范围内的最大间隙上, 还是在切割-拼焊过程的自动化程度及焊接接头的质量上都达到了预期的要求。从而为实现拼焊板坯的国产化迈出了具有创造性的一步。

7 总结与展望

7.1 全文总结

激光切割-拼焊技术是集机械、电子、光学、材料学于一体的高新技术,是生产拼焊板坯的一种有效途径。在国家九五攻关课题的资助下,作者参与的课题组研制了国内第一条拼焊板坯的中试生产线。为实现拼焊板坯的国产化迈出非常重要的一步。

激光切割-拼焊的步骤分为三步:激光切割板坯、拼接和激光焊接。为了使这些步骤紧密地衔接,减少设备占用的场地面积,整个系统只使用了一个导光聚焦系统,通过切-焊转换机构,就实现了切割和焊接的切换。装夹系统与定位系统的协调运动保证了对板坯的有效夹紧和准确定位。从而保证了拼焊板坯的生产质量。

为了实现拼焊板坯生产的自动化。整个系统采用计算机控制,控制系统以工控机的 PC 总线为平台,并配以相应的运动控制单元和 I/O 单元。系统软件分为自动循环,手动操作,参数设置及状态显示和调试部分。因而可以很方便地进行参数的设置,对整个系统进行调试和故障诊断。从而实现了在人工装料以后切割-拼焊的完全自动化。在激光功率小于 2kW 的情况下,生产单对 0.8~1.2 毫米厚拼焊板坯的节拍小于 4min。

选择好工艺参数是激光切割-拼焊的一个重要环节。本文提出了一个基于遗传算法的神经网络选参方法。这个方法是对原有的 BP 算法的改进,此方法提高了选参的速度,克服了 BP 算法局部最优的缺点。将遗传算法与神经网络的方法有机地结合起来了,实现了智能化的参数选取。此外为了便于在各种不同的环境下调用选参的算法程序,本系统为之建立了一个动态链接库,实现了应用程序调用选参算法程序的动态链接。

激光切割-拼焊在国外早已蓬勃发展,而国内却很少有人研究。我们在研究其关键技术的基础上,研制了上述系统,并在加工工艺参数的选取方面做了一些有益尝试,完成了在激光器功率小于 2kW 的条件下,生产单对 0.8mm, 0.9mm, 1.0mm, 1.2mm 厚镀锌板坯(3000×2000mm)的指标,处于国内领先水平。

7.2 工作展望

从整个系统的研制及生产试验情况来看,尤其是在研究激光切割-拼焊关键技术刚刚起步的情况下,研制出来的这个新系统必然存在一些问题,需要我们在今后的工作中去研究和解决。

首先,激光切割-拼焊加工中,夹紧系统需要的夹紧力大小的预测问题。夹紧力的预测对夹具系统的设计和保证切割-拼焊加工质量具有着重要的意义。由于激光焊接的过程中存在着材料的相变而且拼焊又不同于单纯的焊接,它是一种对接焊,其中没有添加任何填料。对其中温度场和应力计算是值得我们去研究和解决的。

其次,激光切割-拼焊中的热效应问题。在切割-拼焊的过程,尤其当加工对象对激光的反射效应比较强的时候,怎样减少反射光的能量,保护透镜,减小热透效应,增加透射光的强度,又是一个急需要解决的问题。

再次,目前的系统只能事先手动调节好透镜的位置、离焦量及切割喷嘴与待加工板坯表面的距离,然后进行切割-拼焊;而不能由加工系统自动地在线调节。它与智能制造还有相当的距离。我们的目标应当是由系统本身依据加工对象的特性和已有的知识库去自动调节离焦量、切割喷嘴与板坯表面的距离。为此我们应该在加工头与控制系统之间建立一个加工头纵向的位置反馈,实现对加工头纵向位置的闭环控制。

最后,在选参方面,我们虽然建立起了一个基于遗传算法的神经网络选参方法;但是,对遗传算法中精度的确定、遗传和变异概率的确定、其收敛速度的控制及网络结构的构造,在很大程度上靠的是经验,没有确定的格式可以套用,因而存在一个随机因素。如何控制其中的随机因素,用现存的样本训练其权值,从而准确地预测出未知的工艺参数,也是我们今后应该解决的问题。

总之,在今后的学习和工作中,我们要对激光切割-拼焊系统中激光、控制、电子等各个环节在现有的基础上加以研究,使之成为一个有机的整体,满足激光-切割拼焊的要求,实现拼焊件的智能化生产。

致 谢

本文是在导师汤漾平教授热情关怀和悉心指导下完成的。从论文的选题、课题研究到论文的撰写、修改的全过程中无不凝聚着导师的心血。导师广博的学识、严谨求实的治学风范、敏锐的洞察力、创造性的学术思想、平易近人的领导风范以及诲人不倦的精神，将使作者终身受益。无论是现在，还是将来，都激励着作者奋发向上。同时也感谢导师在生活上给予的无微不至的关怀，特别是在作者毕业求职的过程中给予的大力支持，以及在学习和生活中严格要求、言传身教，使得作者能过顺利完成本学位论文的研究工作。值此论文即将完成之际，谨向导师致以深深的谢意和真诚的祝福！

在课题完成的过程中，作者得到了熊正鹏工程师、冯清秀副教授、龚时华副教授的大力支持与帮助，在此向他们表示真诚的谢意！

在平时的学习和生活中得到了张福润教授，杨楚民副教授的大力帮助。在此表示感谢！

在与动力系的王坤博士、自控系的廖俊峰硕士、同窗杨杰、杨晓君、孙刚、张清明、金闻瑞、罗玢以及本课题组的李丛晖、陈隽、樊小彬、刘佳等硕士的交流之中，作者受益匪浅。在此一并向他们表示感谢！

学有今日，离不开父母和亲友的关怀，他们的理解和鼓励是作者努力完成学业的巨大动力，值此即将踏上新的人生旅程之际，唯以加倍的努力来报答他们的关心和与支持。

刘 云

2002. 4

参考文献

- [1] 国家九·五重点科技攻关计划专题—轿车底板用板材激光切割拼焊技术研. 验收材料, 2001 年 9 月
- [2] Swift HookDT, GrckAE. Penetration welding with lasers, welding Journal, 1973,(52): 492~499
- [3] B.Iring, What is the latest news on laser beam welding and cutting. Welding Journal,1994,(2):31~35
- [4] A.U.Nirykalin ,I,Zuev,A.Kodkora ,Laser and electron beam material processing handbook.Moscow,MIR Publishers,1998
- [5] 闫毓禾, 钟敏霖. 高功率激光加工及应用. 天津: 天津科学技术出版社, 1994
- [6] 杨晋萍, 孟勤. 国内外焊接技术现状. 焊接技术, 1991, (5): 42~43
- [7] 孙文德. 激光加工技术得新进展. 机械科技, 1992, (5): 4~6
- [8] 王昆林. 激光材料加工技术的工业应用. 中国机械工程, 1996, 7 (2): 67~69
- [9] D.Belforte,M.levitt,Industrial laser handbook 1992~1993 edition.New York, Springer-Verlag, New York Inc.1992.
- [10] 黄小枚. 材料的激光加工概况. 国外金属热处理, 1996, 17 (1, 2): 15~17, 52
- [11] 汪声奎. 激光在汽车车身上的应用. 汽车工艺与材料, 1994, (5): 1~4
- [12] 易树平. 激光焊接在汽车车身制造中的应用. 中国机械工程, 1994, 5(6): 38~39
- [13] G J. Shannon, W. M. Steen, Investigation of Keyhole and melt pool dynamics during laser beam butt welding of sheet steel using a high speed camera. ICALEO' 92:130~135
- [14] D. M. Roessler, Update on Laser processing in the automotive industry, Lasers' 91, San Diego, California , Dec. 9~13, 1991, 514~521

- [15] C. A. Forbis-Parrott, Laser beam welding is read to go to work at Cadillac. Welding Journal, 1991, July
- [16] I. Migamoto, Laser materials processing in Japanese industry. ICALEO'92 Laser Materials Processing, Oct, 1992, Orlando, Florida
- [17] Martellussic, A. N. Chester, A. M. Scheggi, Laser applications for mechanical industry. NATO ASI Series, Published by Kluwer Academic Publishers, 1993
- [18] 朱海红, 朱国富, 李家榕等. 传送钢带的激光焊接, 1994, (9): 10~11
- [19] 胡伦骥, 刘建华, 熊建刚等. 汽车用薄板的激光拼焊. 钢铁研究, 1995, (3): 46~50
- [20] 刘建华, 胡伦骥, 熊建刚等. 汽车用薄板的激光拼焊. 中国机械工程, 1996, 7(4): 96~98
- [21] 宋天虎. 焊接技术的发展与未来. 中国机械工程, 1994, 5(3): 61~63
- [22] 王家金. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992
- [23] 李春青, 冯树强. 汽车工业中激光技术的应用. 广西工学院学报, 2001, (6): 63~66
- [24] Adams, M. J. 1970, Metal Construction and Brit. Weld J. (Jan.)2, No.1, Clarke, J. and Steen, W. M., 1978, Arcaugment Laser cutting, Proc. Laser 78 Confer, London, March.
- [25] Rosen, H. G., 1975, Conf. proc., Laser 75 Opto-Electronics Conf. Munich, FRG, June 1975, (IPC Science and Tech., 1976)
- [26] 汤漾平等. 汽车发动机连杆称重分组与激光刻标自动机床德设计与研究. 组合机床与自动化加工技术研究. 1997, (9): 8~9
- [27] 汤漾平等. 数控激光切割加工机床的型谱分析与系列化. 激光与光电子学进展, 1997, (380): 22~25
- [28] 龚时华等. 不等厚板激光拼焊生产线中的机器人设计. 机电工程, 2000, 17(2): 45~46
- [29] 汤漾平, 段正澄, 李鹤九. 多用途五轴联动激光加工系统. 制造技术与机

- 床, 1997, (11): 12~13
- [30] Terry L Vander Wert, P E. Advances in Lasers and Laser Systems for Processing 3D metal Parts. ICALEO, 1994: 405~413
- [31] 刘建华. 激光切割超音速喷嘴设计. 激光技术, 2000, (1): 47~49
- [32] 苏彦东, 王健. 激光焊接过程中的等离子体的研究现状. 航空工艺技术, 1998, (4): 22~25
- [33] 易树平. 激光焊接在汽车车体制造中的应用. 中国机械工程, 1994, (5): 38~39
- [34] 张靖周, 徐九华. 激光匙孔焊接过程二维传热数值计算. 计算物理, 14 (3): 320~324
- [35] Davish M, Kapadia P, Dowden J. Solution of s Stefan Problem in the theory of laseaser Welding by method of lines. Journal of Computatonal Physics, 1985, 60: 534~548
- [36] Mazumder J, Steen W M. Heat transfer model for CW laser material Proceing. Journal of Applied Physics, 1980, 51: 941~947
- [37] 徐爱卿, 孙涵芳, 盛焕鸣. 单片微型机应用和开发系统. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992
- [38] 杨振生, 单洪. 8088/8086 汇编语言程序设计. 合肥: 中国科技大学出版社, 1994
- [39] 钱能编著. C++ 程序设计教程. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [40] 刘正林. 面向对象德程序设计. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000
- [41] 彭毅, 郑大春. 激光加工在汽车工业生产中的应用. 新技术新工艺, 2000, (7): 15~17
- [42] 刘建华等. 激光焊接剪裁板应用与研究. 新技术新工艺, 1997, (2): 25
- [43] 李季等. 高精剪一板材激光拼焊生产线上的关键设备. 锻压技术, 1998, (2): 46~49
- [44] 刘庆斌, 赵忠勇等. 高功率 CO₂ 激光焊接及工业应用. 激光与光电子学进展,

- 1997, 8: 1~4
- [45] Rieret J, Terry M J, Ward B A. Aerodynamic interactions during laser cutting SPIE, 1984, v (45) 5: 88~95.
- [46] 左铁川, 肖运鸿. 如何加速发展我国激光加工产业. 激光与红外, 1993, 22 (6): 11~14
- [47] Schuocker D, Abel W. Material removal mechanism of laser cutting, SPIE, 1984, v455: 88~95
- [48] Yibas B S, Davies R, et al. Investigation into development of liquid layer and formation of surface plasma during CO₂ laser cutting process, Proc Inst. Mech. Engrs Part B: Journal of Mechanical Engineering Science, 1994, v 208: 275~281.
- [49] Miyamoto I, Maruo H. The mechanism of laser cutting, Welding in the world, 1991, v29(9/10): 283~294
- [50] Kim M J, Chen Z H, et al. Finite element modeling of the laser cutting process, Computer & Structures, 1993, v49(2): 231~241
- [51] 朱国力, 段正澄等. 基于神经网络的激光切割加工工艺优化建模及工艺参数自动选取的研究. 机械工业自动化, 1995, 17 (4): 21~24
- [52] 杨丰羽. 基于神经网络的激光加工工艺参数选取与质量预测. [硕士学位论文]. 武汉: 华中理工大学档案馆, 1997
- [53] 陈方泽, 陈丙珍等. 遗传算法与神经网络 (II): 用 EGA-GDR 训练神经网络. 化工学报, 1996, 47 (4): 421~426
- [54] Baldi P. IEEE Tran on Neural Networks 1995, 6 (1): 182~195
- [55] Edgar T F, Himmelbau D M. Optimization of Chemical Process. London: McGraw-Hill Book Company, 1998, 123~151, 190~239
- [56] Johnson D S. Operation Research, 1991, 39(3): 378~389
- [57] Maniezzo V. IEEE Tran on Neural Networks, 1994, 5(1): 39~53.
- [58] 韩玉兵. 遗传算法数学机理分析. 河海大学学报, 2001, 29 (3): 92~94
- [59] Chen H, Flann N S. Parallel Simulated Annealing and Genetic Algorithms: A Space of Hybrid Methods. In: Parallel Problem Solving from Nature 3, Springer

– Verlag, 1994, 428~436

- [60] 谢政, 李建平. 网络算法与复杂性理论. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997
- [61] 周明, 孙数栋, 彭炎午. 基于遗传模拟退火算法的机器路径规划. 航空学报, 1998, 19(1): 118~120
- [62] Schwefel H P. Numerical Optimum Seeking. John Wiley & Sons. 1995
- [63] Egresits C. Multi-strategy Learning Approaches to Generate and Tune Fuzzy Control Structures and their Application in Manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing. 1998(9): 323~329
- [64] Bennai Y. A Modular and Hybrid Connection is to the System For Speaker Identification. Neural Computation, 1995, (7): 791~798
- [65] 刘保碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998
- [66] Kosuke Kato, Masatoshi Sakawa. An interactive fuzzy satisfying method for large scale multi objective 0-1 programming problems with fuzzy parameters through genetic algorithms [j]. European J. of Operational Research, 1998, 107(3): 509~599
- [67] Welstead S T. Neural network and fuzzy logic application in C/C++. John Wiley & Sons, Inc, 1994
- [68] Tyc S, Quintana V. Linear optimal regulator based on fuzzy logic neural network. Proc. ISAP'94, 63~70
- [69] 尹洪超等. 过程总合的全局优化改进遗传算法. 大连理工大学学报, 1997, 37(4): 420
- [70] Qin X F, Palmien F. IEEE Tran on Neural Networks, 1994, 5(6): 900~909
- [71] 赵金荣, 陶晓农, 施玉祥. 动态连接库技术在变电站自动化系统中的应用. 电力系统自动化, 1996, 2 (20): 39~41
- [72] 朱东海, 任爱珠, 江见鲸. Arc Vview 应用开发中动态连接库方法研究. 计算工程, 2000, 9 (26): 92~94.
- [73] 王华, 叶爱亮, 祁立学等. Visual C++ 6.0. 北京: 机械工业出版社, 1999

附录 1 攻读学位期间发表的学术论文目录

1. 刘云, 汤漾平, 熊正鹏. HJP-01 型激光切割拼焊设备及其关键技术. 锻压机械, 2001, 36(6): 11~12

附录 2 用户证明

用户证明

我公司委托华中科技大学试生产富康轿车 N21 后盖板左
右下流水槽, 坯板尺寸 1100X400X1mm, 由两块镀锌汽车钢
板激光拼焊而成, 激光焊缝长度为 1100mm, 经我公司按该零
件实际生产条件冲压成型。冲压件质量合格, 特此证明。

神龙汽车有限公司技术采购部
车身产品及工艺设计分部
2001年12月15日



附录3 验收意见

国家“九五”重点科技攻关项目 “轿车底板用板材激光拼焊技术研究”

专题验收意见

国家科技部于2001年9月27日在武汉组织专家组，对华中科技大学承担的“九五”国家科技攻关计划“轿车底板用板材激光拼焊技术研究”（编号96-B11-01-04）专题进行了验收。专家组听取了课题组做的专题自评估及研制报告，审阅了相关技术文件，并参观了现场设备运行，经认真讨论，一致认为：

1. 专题已按合同要求解决了轿车用板材激光拼焊设备与工艺的关键技术，达到了合同所规定的各项技术指标。

2. 专题开发了具有实用价值的大幅面薄板激光拼焊设备，不仅具有原专题要求的超宽轿车底板拼焊功能，还可以用于不等厚汽车剪裁坏板的拼焊制造，具有良好的应用前景。

3. 专题成功开发出轿车用板材的高精度激光切割——焊接工艺及相应的板材激光拼焊自动化加工设备及在线监测装置。拼焊最大尺寸3500x2000mm，生产节拍 ≤ 4 分钟，板厚0.8mm拼缝间隙和错边量可控制在0.05mm，可以识别 ≥ 2 mm的未焊透及烧穿缺陷，接头性能满足轿车板材要求。利用该设备生产的富康轿车N21后盖板左右下流水槽，经神龙汽车公司按实际生产条件冲压成型，质量合格。

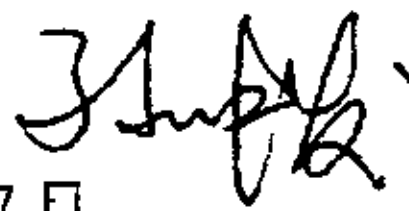
4. 该专题立项合理、及时，国拨经费全部到位，使用合理。

专家组一致同意该专题通过验收。

希望该套装置进一步完善，尽快投入使用。

专家组组长：

2001年9月27日



附录 4 接头的微观组织结构金相照片

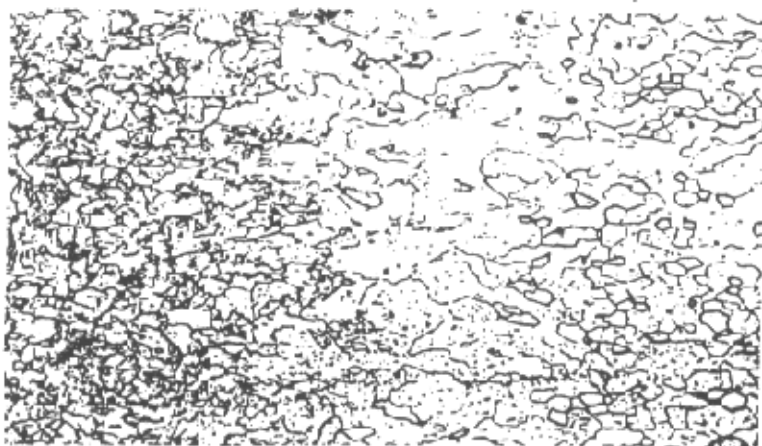


图 1 IF 钢焊接接头焊缝—HAZ—母材金相照片 (200X)

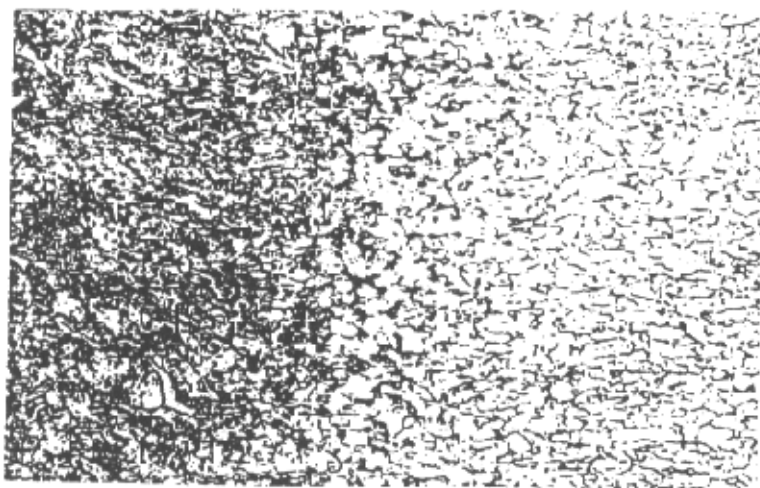


图 2 0.75mm 镀锌板焊缝—HAZ—母材金相照片 (200X)

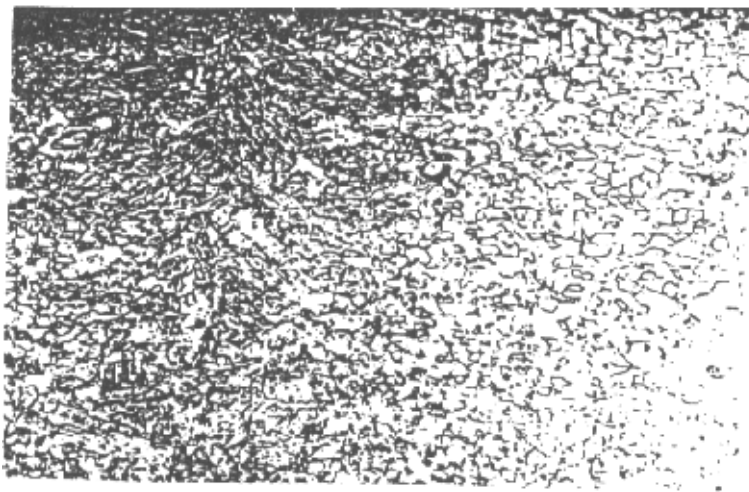


图3 1.2mm 厚镀锌板焊缝-HAZ-母材金相照片

附录 5 接头照片

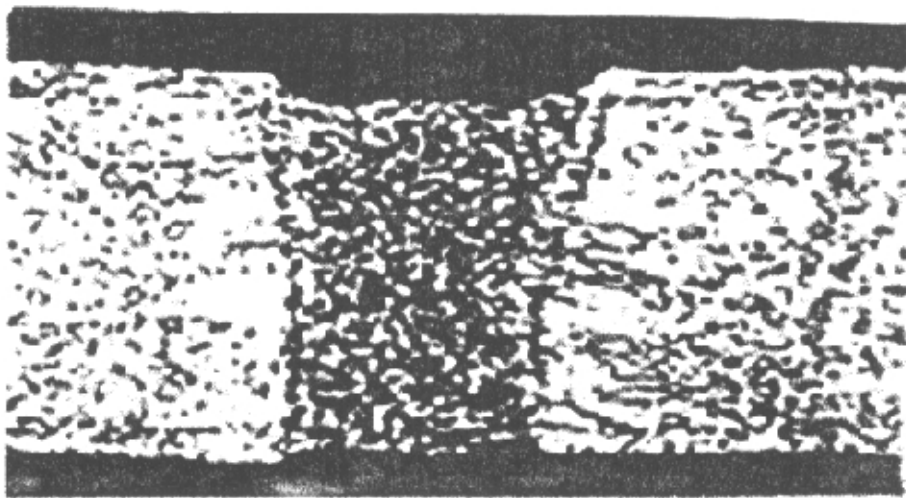


图 a IF 板接头界面照片 (X50)

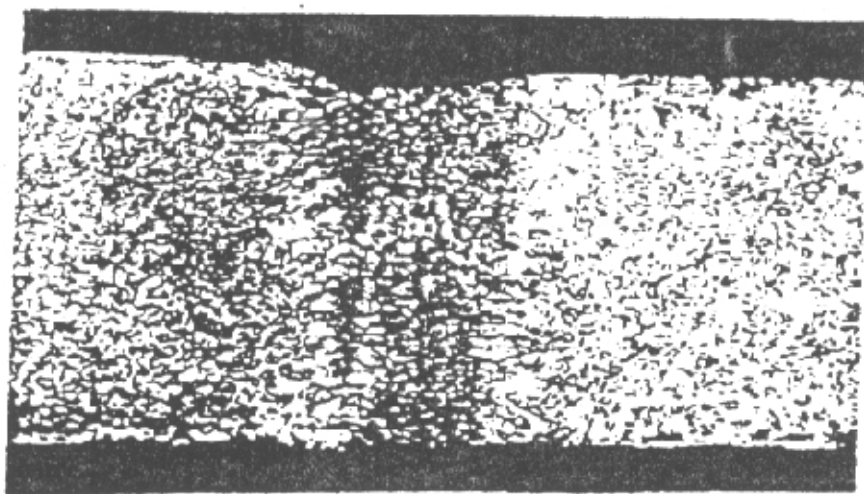


图 b WLZn 板接头界面照片 (X60)