

第1章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

激光制造作为一种先进的加工技术,在汽车、国防、航空航天等领域得到广泛的应用^[1]。随着全球科技的迅速发展和国民经济不断增长的要求,激光加工已经成为工业生产中一项不可缺少的技术^[2-6]。我国先进制造领域中的激光加工技术在工业上的应用虽然起步较晚,但近几年来发展很快,国内很多工业企业开始把激光加工引进到自己的产品生产和技术改造的项目中,先后建立了多条激光热处理、激光焊接和激光切割生产线^[7-11]。激光热处理汽车发动机缸体、缸套用于汽车维修行业如同雨后春笋。虽然我国的激光加工技术近几年有了长足的发展,但和国外发达国家的先进技术水平还有一定的距离^[12-15]。随着我国汽车制造业等产业的迅猛发展,国内对激光加工设备的需求量每年都在逐步地上升,最近两年的需求量更是以 80% 的速度增长,这些都为激光加工设备的研究与开发提供了广阔的应用空间^[5, 16-23]。

激光拼焊自动化装备作为一种先进的激光加工技术,不仅影响着汽车行业的发展,而且将对国家的综合国力,对国家的可持续发展有着巨大而深远的影响^[24-28]。而我国作为世界制造加工大国,目前尚不能完全独立自主开发激光拼焊成套装备。激光拼焊成套设备的研制、开发成功,必将推动我国制造业整体制造能力的进步,对提高我国企业的核心制造能力,提高企业产品的竞争力具有重要意义^[4, 19]。

本课题针对激光拼焊中存在的科学问题和实际应用需求,以中科院知识创新工程方向项目“全自动激光拼焊成套装备关键技术与示范应用”为依托,通过对激光拼焊定位、夹紧机构的创新设计,综合评价与优化理论,焊缝精密预成型理论与实现技术,机构精度对焊接质量影响规律以及定位机构误差补偿方法等关键技术进行研究,争取在激光拼焊定位、夹紧机构创新设计、机构精度与拼焊质量研究方面取得一些进展,为新型激光拼焊技术研制提供理论和技术支持。

1.2 激光拼焊技术综述

激光拼焊是指将两块或两块以上的板料,采用激光焊接的方法焊在一起,然后进行冲压成形^[29-36]。激光拼焊板在汽车车身上的应用对于减轻汽车重量、减少材料消耗、减少加工工序、降低生产成本、提高生产效率、提高安全性能等都有十分重要的作用^[37-40]。使用激光拼焊板可有效降低汽车白车身生产成本 10%~15%;同时也满足了消费者提高汽车产品质量和安全性能、减少油耗、保护环境等方面的多种需求^[25, 26, 41-45]。

开发激光拼焊板成套设备的国外公司主要有：瑞士的 Soudronic 公司、德国的 Nothelfer 公司、美国的诺贝公司和 VIL 公司、加拿大的 AWS 公司、日本的 H&F 公司、小矢部精工株式会社和 IHI 公司^[42, 46-53]。这些公司完成的主要工作是系统的集成和局部关键技术的研发。作为激光拼焊成套设备的标准部件激光器，多采用固体 YAG 激光器和光纤激光器，主要生产厂家有日本 IHI 公司、德国 TRUMPF 公司，功率一般在 4kW 以上，光纤激光器的生产厂家多为美国 IPG 公司；采用 CO₂ 气体激光器的功率一般在 8kW 以上，供应商为德国 TRUMPF 公司和 ROFIN 公司^[54-65]。

目前，西欧生产的拼焊板占世界总产量的 70%，美国生产的占 20%，日本生产的占 10%，其中每年由装配焊接流水线生产的大约有 2.9 亿件，由单个机床及成套设备生产的有 1 亿件^[18, 66]。

激光拼焊板发展大致经历了三个阶段^[19]：

开始阶段：20 世纪 80 年代中期，德国蒂森钢铁公司与德国大众汽车公司合作，在 Audi100 车身上成功采用了全球第一块激光拼焊板。90 年代欧洲、北美、日本各大汽车生产厂也开始在车身制造中大规模使用激光拼焊板技术，当时汽车工业对超大板的需求促进了激光拼焊板的使用和发展。

成长阶段：随着激光焊接设备的不断改进，激光拼焊板应用范围和使用数量在不断增加，促进了激光拼焊技术的快速发展，激光拼焊板的优势越来越明显。

成型阶段：由于激光拼焊板具有传统汽车零件成型所不具备的优越性能，因此 90 年代中后期，欧洲、北美、日本等各大汽车生产商开始在车身制造中大规模的使用激光拼焊板。应用高端的激光拼焊技术可以生产更大更复杂的零件。近年来该项技术在全球新型钢制车身设计和制造上获得了日益广泛的应用。

1.2.1 国内外激光拼焊装备现状

汽车板产量位居世界第一的阿赛洛集团 (Arcelor) 与瑞士的 Soudronic 公司合作，在激光拼焊领域经过十几年的研究和发展，采用 Soudronic 的拼焊板生产线，建立激光拼焊生产线现已达到 78 条，其产品在欧洲市场占有率超过 50%，成为当今世界规模最大的钢铁巨头^[67]。由阿塞洛集团 ARBED 公司与宝钢股份公司、宝钢国际、上海大众联合发展公司合资组建的上海宝钢阿塞洛激光拼焊有限公司，引进我国第一条应用于汽车行业的激光拼焊板生产线。该公司位于上海嘉定，一期投资 2.67 亿元人民币，宝钢集团下属的两家公司占股 38%，阿赛洛占股 25%，上海大众公司下属联合发展公司占有剩下的 37% 的股份，其设计年产量为 260 万件，最终形成 1000 万件的年产规模。该公司一期工程共建成一条落料线和两条激光拼焊线，已于 2004 年 11 月正式投产，其生产的不同类型的激光拼焊板，向中国一汽、上汽等主要汽车厂商供货。

Soudronic 公司在拼焊设备技术方面拥有多项专利技术，与世界许多著名钢铁企业级轿车制造企业进行拼焊技术及焊接质量控制技术方面的项目开发，在技术上、设备上与市场上处于全球领先地位。该公司开发了直线焊缝、折线焊缝和曲线焊缝全自动拼焊生产线，在焊缝质量检测上具有三项世界专利，在两块钢板精确定位和夹紧系统上拥有两项世界专利。国内有四条激光拼焊线为该公司的产品，三条直线焊缝拼焊板生产线和一条曲折线焊缝拼焊板生产线。

Soudronic 公司在直线焊接和折线焊接生产线上，采用激光头不动，工作台运动的方法实现焊接，不采用填丝系统，由 Souka 轮压板边预加工系统完成定位、夹紧，折线焊缝须增加旋转机构，将已部分焊接的板材旋转，然后继续焊接；在曲线焊接时，采用激光头和工作台同时运动的方式实现焊接，质量检测装置和激光头固定在一起，采用 Souvis 进行焊缝跟踪、几何形状和焊接质量检测，该系统采用了填丝系统。

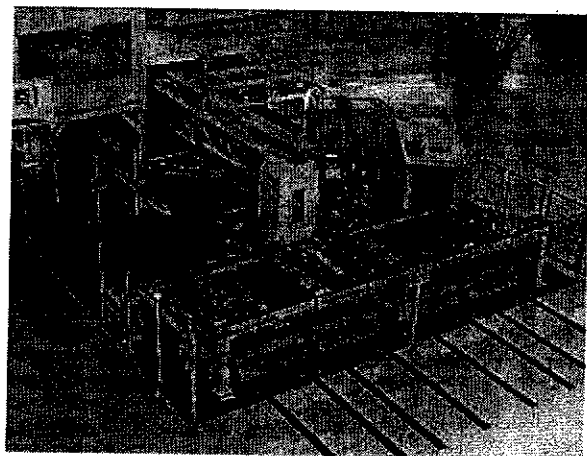


图1-1 Soudronic激光拼焊生产线

Fig 1-1 Soudronic tailored blank laser welding line

蒂森克虏伯是由德国的蒂森两家大型钢铁公司于1999年3月合并而成。早在1985年，德国蒂森钢铁公司与德国大众汽车公司合作，在Audi100车身上成功采用了全球第一块激光拼焊板。蒂森克虏伯的子公司Nothelfer为激光拼焊设备研发企业，蒂森克虏伯的汽车拼焊板配送中心，均采用其设备。最近，蒂森克虏伯集团与沃尔沃汽车签订合作协议，计划在沃尔沃汽车位于瑞士南部的Olofstrom汽车制造厂内建立一个客服中心，主要为该厂的汽车制造提供拼焊板以及定尺裁剪服务，而后拼焊板将在该厂的锻压车间进行下一步处理。

2001年，蒂森克虏伯与武汉中人瑞众汽车零部件产业有限公司签订合同，共同组建了武汉蒂森克虏伯中人激光拼焊板公司，立志于组建中国最大的激光拼焊板生产基地。公司计划在武汉安装3条生产线，设计年生产能力为6万吨，产值将达到18亿元。目前已启动的生产线具备2万吨的生产能力，可年产激光拼焊板

150 万~200 万件。这也是其在亚洲的第一家激光拼焊板公司。2005 年 5 月，蒂森克虏伯鞍钢中瑞（长春）激光拼焊板有限公司（TKAZ）正式生产。

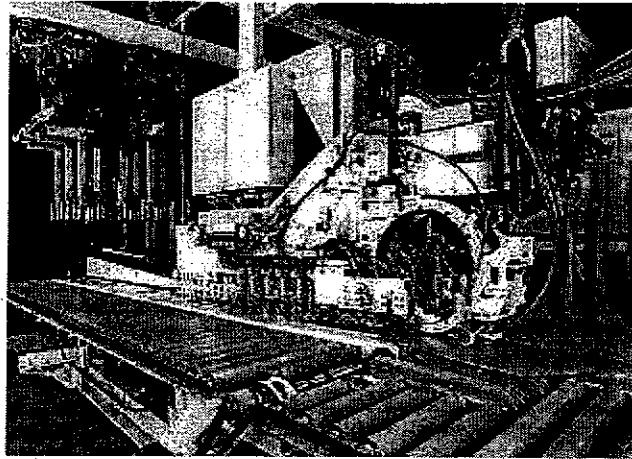


图1-2 Nothelfer公司激光拼焊线

Fig 1-2 Nothelfer tailored blank laser welding line

美国诺贝公司（Noble International, Ltd.）是北美地区最大的激光焊接板提供商，其主要产品是激光拼焊平板和激光焊接钢管，面向对象主要是北美地区汽车制造厂，市场占有率为 35%。美国诺贝公司自行研发激光焊接设备，实现激光焊接平板和激光焊接钢管的生产，其拥有和即将拥有的技术包括直线、曲线、折线的激光拼焊技术，钢管的激光焊接技术和空间多维焊接技术等。2006 年 11 月美国诺贝公司与武钢合作建立武钢诺贝激光拼焊技术有限公司。

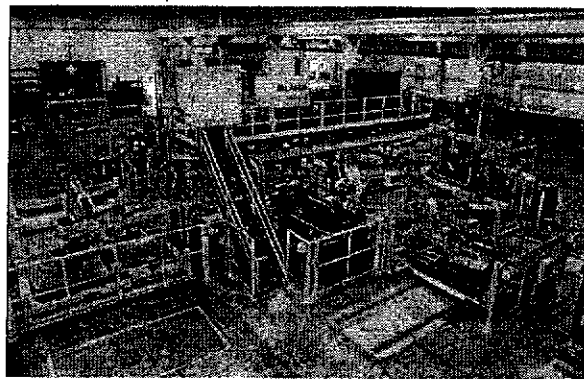


图1-3 诺贝公司激光拼焊生产线

Fig 1-3 Noble tailored blank laser welding line

美国VIL公司开发出包括高精剪、自动拼焊机床及焊接过程在线监测在内的或手工传输，或机器人自动送料不同生产规模的生产线商品系列，以适应各种用户需要。其主要客户为北美拼焊板供应商。

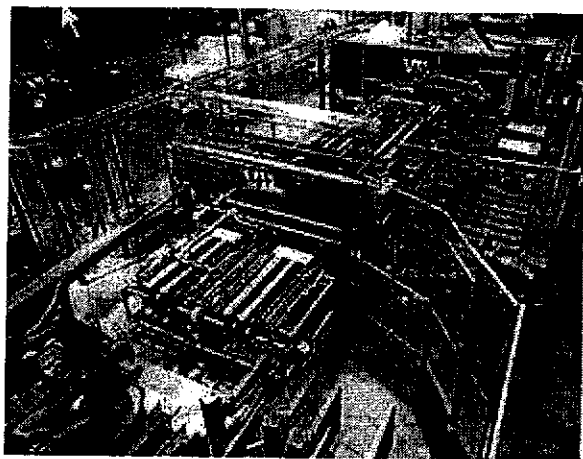


图1-4 VIL公司全自动激光拼焊线

Fig 1-4 VIL tailored blank laser welding line

近年崛起的加拿大AWS公司是一家以激光焊接汽车车身板为方向的大型集团公司。它是世界上车身拼焊板行业中最早利用固体激光双光斑焊接工艺的公司，可提供拼装间隙可达0.3mm、双光束自动补偿、二维焊缝拼焊机床而无须高精剪预加工的专利技术与设备。几年来，为许多著名的世界汽车生产厂提供了生产线和服务。

此外，欧洲许多冶金公司也都在生产这种拼焊板。其中，意大利 Sollak 公司在不断扩大产能，其子公司 Solblank 公司已经投入了 14 条生产线，而且还准备在英国及美国建立 4 条激光拼焊线，每条的产能将达到 2 万吨/年。一些大型冶金联合企业也正在加快在其他国家组建合资公司的步伐。

日本 IHI 公司是日本著名企业集团，是世界 500 强企业，在汽车用板激光拼焊生产线的研发、设计有一定的基础。该公司第一条激光拼焊线已于 2003 年在日本 Mazda 公司应用，并批量生产。现已研发应用三条激光拼焊线，均为用于直线焊缝的焊接，前两条方案相同，第三条可实现口字形多道平形焊缝的焊接生产。

IHI 公司目前只开发了直线焊缝的激光拼焊线，焊接时，激光头运动，工作台不动，不采用添丝技术，工作台有自动定位和压紧装置，系统没有实时焊缝质量检测装置。

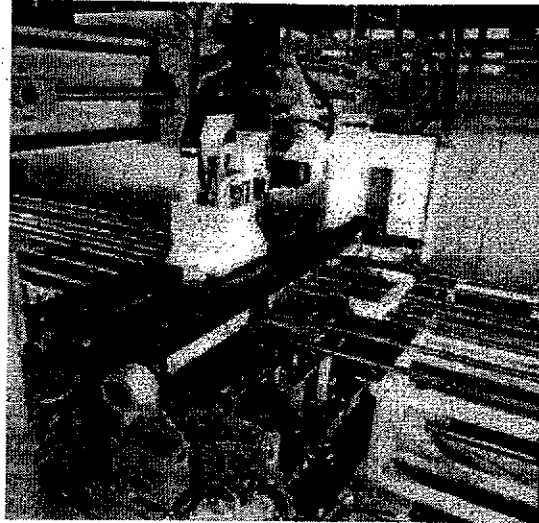


图1-5 IHI公司的全自动激光拼焊线

Fig 1-5 IHI tailored blank laser welding line

日本小矢部精工株式会社在国内有三条激光拼焊线。其设备特点为曲直线一体，交替焊接。上海宝钢与日本住友公司合作在南京建立拼焊板配送中心，现拥有一条小矢部精工的激光拼焊线，目前还没有正式投产，另两条为广州本田所有。

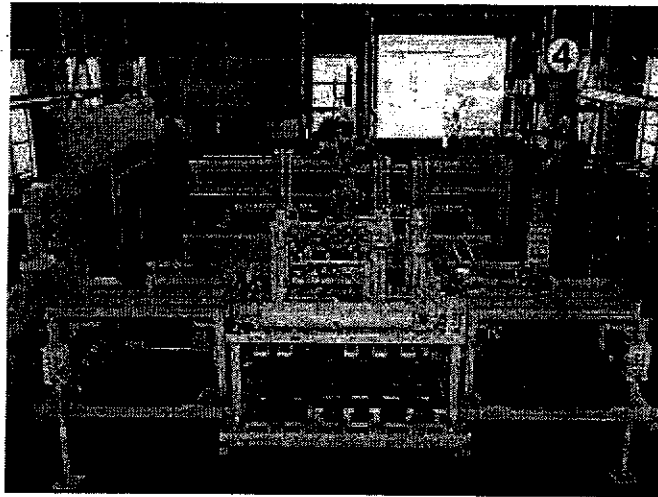


图1-6 日本小矢部的全自动激光拼焊生产线

Fig 1-6 Oyabe tailored blank laser welding line

广东花都的花井公司有两条日本 H&F 公司生产的激光拼焊线。

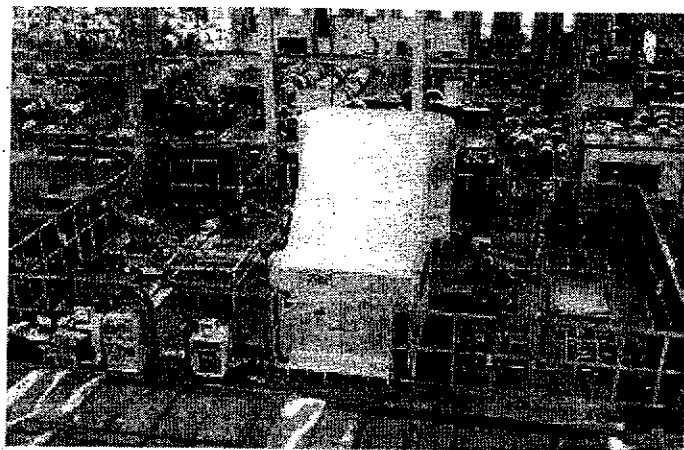


图1-7 日本H&F公司的激光拼焊生产线

Fig 1-7 H&F tailored blank laser welding line

孟晋科技股份有限公司发展激光焊接设备研究已有二十余年, 具有直线焊缝焊接设备、曲折线焊缝焊接设备、机器人驱动焊接设备以及通用激光拼焊设备。其设备主要应用于台湾本土的汽车拼焊板生产, 并占有较大市场份额。

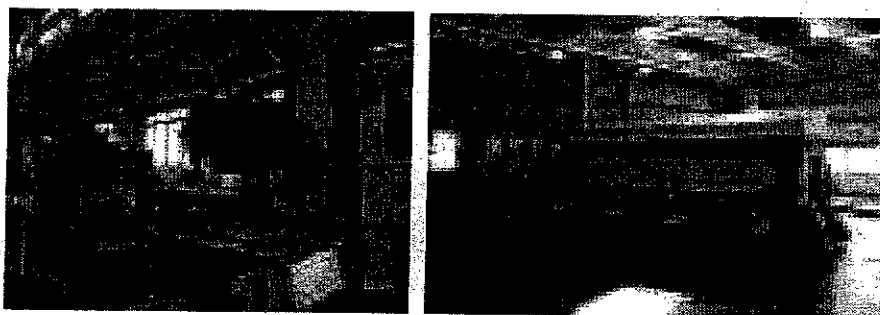


图1-8 台湾孟晋公司的激光拼焊线

Fig 1-8 Mengjin tailored blank laser welding line

因国内拼焊板市场的蓬勃发展和巨大潜力, 国内开始广泛的开展激光拼焊生产设备的研制与应用工作。目前, 国内的一些大学和研究单位纷纷研究激光拼焊的关键技术, 跟踪国际前沿, 在焊缝质量检测、焊接工艺等相关领域有一定的研究。

1999年, 华中科技大学激光加工国家工程研究中心(武汉华工激光工程有限责任公司)在国家科委立项《汽车车身用钢板激光拼焊工艺研究》项目, 2001年年底进行中试, 达到拼焊2m的宽板能力。目前, 该中心已掌握激光在线焊接质量监控系统、柔性生产技术、精密机床加工和制造技术三大核心技术。采用PRCLaser2.5 Kw快速轴流CO₂激光器和HUST型自制拼焊机组, 为浙江瑞安市汽车附件厂拼焊了江铃汽车用加强板0.9 mm、1.2 mm、1.6 mm、1.8 mm以及0.95 mm与0.75 mm的不同厚度的冷轧钢板, 经零件冲压、腐蚀和涂装工艺的检验, 取得了较满意的

效果^[68-70]。

华工激光为武钢一硅钢厂 CP1 酸洗线上的激光拼焊机, 集激光切割、焊接、退火等工艺于一体, 是我国第一套自主研发、制造的带钢在线激光拼焊设备, 该设备用于带钢连轧线上钢卷的相互联接, 厚度 6mm。目前并没有找到该套设备应用的具体证据^[71, 72]。

攀钢与华中科技大学合作也开展了“攀钢冷轧钢板激光拼焊及应用技术研究”课题的研究。其主要内容是: 激光拼焊的焊接工艺及接头性能、激光拼焊接头冲压性能和激光拼焊接头的耐腐蚀性能及防腐工艺。最近在东风汽车公司进行了国内首次冷轧激光拼焊板冲压汽车零部件的试验, 取得了满意的效果^[73-75]。东风汽车公司已向攀钢正式提出用攀钢冷轧激光拼焊板冲压新型汽车顶盖。2007年3月25日在成都通过四川省科学技术厅鉴定。

以上研究和开发工作为我国激光拼焊技术打下了良好的基础也进行了有益的尝试, 但是, 研究工作还仅仅局限于试验阶段的, 虽开发出了样机, 但并没有研发出具有实际工业应用价值的全自动激光拼焊生产线, 还不具备在市场上与国际性激光拼焊设备供应商进行实质性竞争。

2006 年中科院沈阳自动化研究所研制了国内第一条全自动激光拼焊生产线, 目前已在南京进行示范应用。它的最大焊接长度为 1.65m, 最大焊接速度 10m/min。这条激光拼焊生产线研制成功是中国在制造领域取得的一项重大科技成果。它将为中国的钢铁企业、汽车制造企业的技术进步产生重要推动作用。

总的来说, 激光拼焊设备在国外已经具有相当规模, 有较多研究成果, 但国外企业对于一些核心技术并不急于申请专利, 例如对拼焊装备整体性能有重大影响的关键技术(如精确定位技术)与产品内部细节, 以及将板材拼焊加工的特点与激光技术、焊接设备关键技术相结合的综合研究, 还很少有国内外专利和文献进行论述, 这阻碍了国内企业获得技术进行模仿, 但也有利于我国企业申请专利。因此, 我们通过各种途径对国外先进装备进行了实地考察, 掌握了一些国外装备的具体细节, 通过深入比较和消化吸收, 结合我们在自动化装备方面的研发经验, 我们可实现确保具有自主知识产权的新颖方案, 与现有激光拼焊装备相比具有一定优势。

1.2.2 激光拼焊技术研究现状

按照机构学和激光焊接的观点, 激光拼焊系统可以分为准连续型和非连续型。准连续激光拼焊要求激光头基本上一一直处于焊接状态, 而非连续型激光头不是一直出光。根据准连续型激光焊接特点, 一般要求激光头固定, 板材移动, 板材在运动中完成定位、对中及夹紧等工序, 同时定位和夹紧机构源源不断的把板材输送到焊接位置, 这样就要求定位、夹紧机构能够循环运动或者多个定位、夹紧

机构交替运动以实现这个目的,而非连续激光拼焊系统则不要求定位、夹紧机构能循环或者多个机构交替运行,这就是准连续激光拼焊与非连续激光拼焊定位、夹紧机构的本质区别。

目前国内外激光拼焊系统基本都是非连续形式,像诺贝公司激光拼焊生产线、日本 H&F 公司的激光拼焊生产线、日本 IHI 激光拼焊生产线、VIL 公司全自动激光拼焊线、Soudronic 激光拼焊生产线和沈阳自动化所研制的全自动激光拼焊生产线等都属于非连续激光拼焊生产线。

在准连续拼焊原理与实现技术方面,德国 Thyssen 公司专利“用于金属板材焊接的装置”(专利号:US5098005)中一条生产线由两条平行的穿梭平台循环链路组成,这里的穿梭平台循环链路指若干个穿梭平台通过链条连接和驱动,依次从固定式激光焊接头所在龙门下面经过,穿梭平台在生产线的两端通过升降机构实现循环使用。生产时,一对拼焊板分别定位、夹紧在左右两个同步运动穿梭平台上,在固定式激光焊接头前方有碾压轮用于缩小焊缝,该方案可扩展用于 2 块以上不同形状板材的拼焊^[88]。德国 Thyssen 公司专利“用于运输金属板材到激光切割和/或焊接设备的过程,以及实现该过程的布置”(专利号:US6156996)也采用了链式连接可循环穿梭平台,但采用单一穿梭平台,每一个穿梭平台上装有定位、夹紧装置(如电磁铁、推杆),激光焊接头可以横向移动,故可以焊接非线性焊缝^[89]。法国 Sollac 公司专利“高能束焊接中用于引导和馈送两片以上已对边板坯以形成对接平面的设备”(专利号:US5747768)分成左右两部分,每部分由上下两条闭环链条组成,链条上安装夹紧板,从而实现拼焊板坯的夹紧和运送。在固定式激光焊接头附近,在侧向气缸的推动下夹紧板可以横向移动以减小焊缝,同时压紧板与特制的凸轮面接触,使压紧力更大^[90]。美国通用汽车公司专利“焊接中用于装夹已对接金属板材的方法”(专利号:US5630269)的方案兼有 Thyssen 公司上述两个专利的一些特点,左右穿梭平台各只有一个,同时激光头可以横向运动,而非固定式。可以看出以上准连续拼焊方案通过合理规划生产流程(如定位、夹紧与焊接等操作的并行),最大限度地发挥了激光器的作用^[91]。

1.2.3 激光拼焊装备定位、夹紧机构发展概述

在激光拼焊板精确定位方面,如图 1-9 所示德国 Thyssen 公司专利“用于即将拼焊的板材的导引过程以及板材运送方法和装置”(专利号:US4733815)将滚压电阻焊设备中较常见的“Z”形导轨改进应用于拼焊板材的定位引导,并提出多种采用不同输送辊和碾压辊的定位、夹紧方案^[76]。德国 Volvo 公司专利“用于焊接中金属板材定位的装置”^[77](专利号:US5605275)具有位置可调的定位销驱动机构,并采用独特设计的连杆机构实现压紧踏板位置的微调(图 1-10)。美国 Armco 钢铁公司专利“高产量激光焊接生产线和方法”(专利号:US5229571)采用电磁

铁定位平台, 通过电磁铁磁场的变化促使拼焊板振动实现定位, 并依靠焊缝两边电磁铁之间吸力进行对中夹紧^[78]。法国 Sollac 公司专利“用来将至少两块板材边缘带到对接位置的设备”(专利号: 5536915)中采用两自由度活动定位销(图 1-11), 定位销的支撑机构具有一定柔性, 到达工作位置后依靠外力夹紧固定, 易于保持定位销精度^[79]。日本尼桑公司专利“板材定位装置和板材定位方法”(专利号: US6080961)对每一块拼焊板配置一个手爪, 板材粗定位后, 手爪首先夹紧板材边缘并往后拉动, 迫使得板材中间翘曲, 然后释放侧拉运动, 让板材自由恢复, 手爪手腕上装有可旋转的柔顺关节, 可使板材自适应定位和对中^[80]。日本丰田汽车公司专利“可制造两块或更多不同类型焊接面板的设备和方法”(专利号: US5532450)采用特殊的三手指手爪, 手指末端装有滚轮, 通过手指从上下两侧顶压促使拼焊板中间翘曲, 手指释放后, 板材与定位销和/或其他拼焊板准确对接(图 1-12)^[81]。

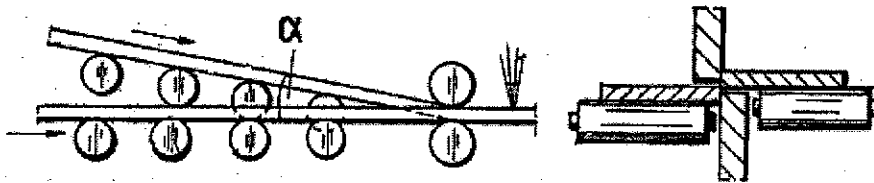


图1-9 Thyssen 定位、夹紧机构

Fig 1-9 Thyssen positioning clamping mechanism

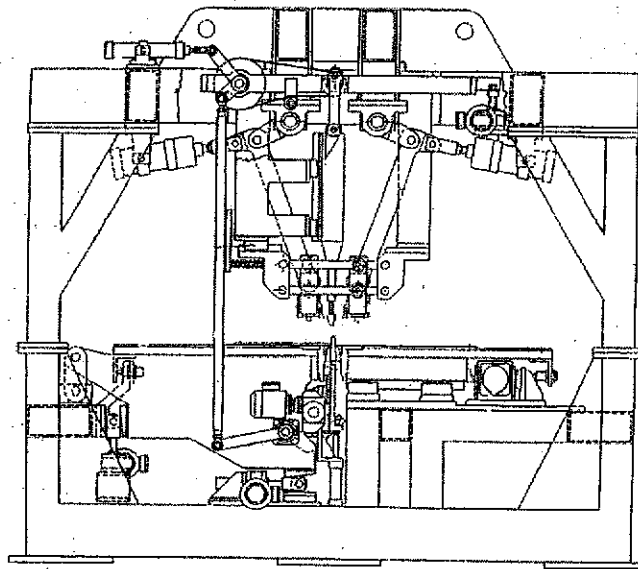


图1-10 Volvo定位、夹紧机构

Fig 1-10 Volvo positioning clamping mechanism

接的
1-2),
程和
性带
夹紧
平台
国 Li
60707
起落
以兼
夹紧
控制
US659
实际运

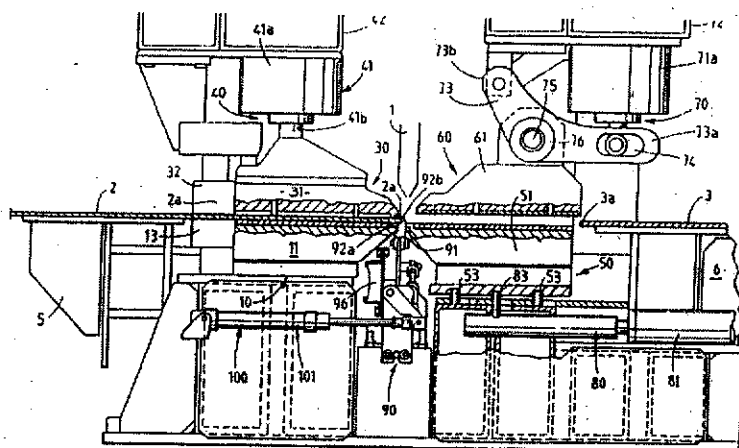


图1-11 Sollac定位、夹紧机构

Fig 1-11 Sollac positioning clamping mechanism

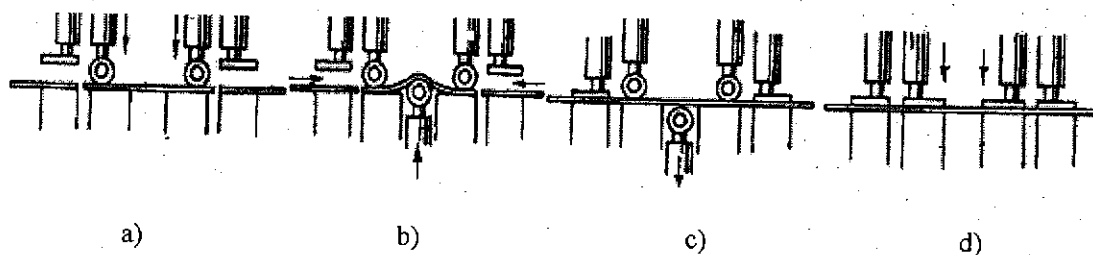


图1-12 丰田定位、夹紧机构

Fig 1-12 Toyota positioning clamping mechanism

在拼焊板夹紧方面,德国 Thyssen 公司的美国专利“用于钢条和/或钢板连续焊接的装置”(专利号: US4872940)提出采用一对大直径碾压轮对拼焊板进行压紧(图 1-2),而激光头固定安装在碾压轮内侧^[82]; Thyssen 公司专利“金属板材连续拼焊过程和设备,尤其用于汽车工业中车身制造”(专利号: US6034347)中提出采用磁性带和辊子进行板材夹紧固定和输送^[83]。美国通用汽车公司专利“拼焊对接板材的夹紧方法”(专利号: US5630269)提出采用穿梭平台和移动激光头的方案(图 1-13),平台上的定位销和自适应推杆用于板材定位,采用电磁铁可将拼焊板固定^[84]。美国 Littell 公司专利“用来将板材对接边缘带到对接焊位置的系统”(专利号: 6070781)采用位置可调的琴键式踏板,压紧板材时踏板依次落下,避免了踏板一起落下时造成板材翘曲引起的内部应力,此外钳口采用液压缸与双气囊驱动,可以兼顾实现快速定位和适当的对中力^[85]。美国 Worthington 公司专利“焊接机中的夹紧设备”(专利号: US5674420)采用多个气囊和弹性杆实现拼焊板材压紧力的控制(图 1-14)^[86],另外韩国机械及材料研究院的美国专利“激光焊接系统”(专利号: US6590180)采用弹性件和齿面对焊件施加静摩擦力以减少焊缝宽度和错配,不过实际运行效果尚未见报道^[87]。

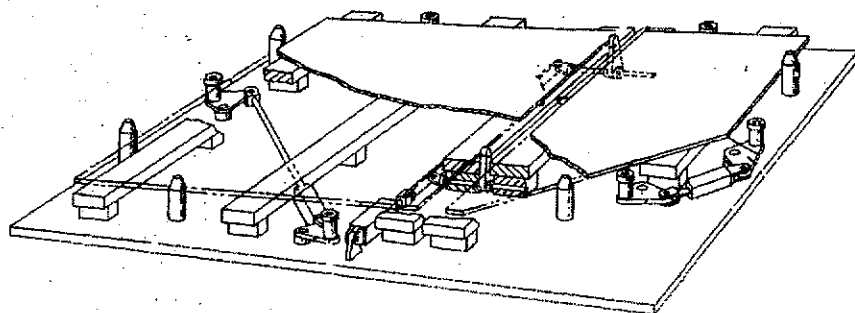


图1-13 通用夹紧机构

Fig 1-13 GM clamping mechanism

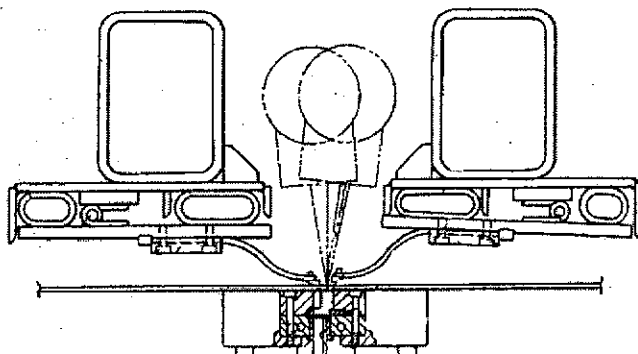


图1-14 Worthington 夹紧机构

Fig 1-14 Worthington positioning clamping mechanism

1.2.4 激光拼焊板焊缝预成型技术研究现状

定位误差是影响激光拼焊焊接质量的一个非常重要因素，激光拼焊定位误差可以分为线性定位误差和非线性定位误差两种。在短焊缝激光拼焊中，可以通过提高定位、夹紧机构精度、刚度等办法使定位误差控制在要求范围内，但是随着焊缝长度的增加，定位误差也逐渐增大，通过一般手段不能将其控制在要求范围内，必须通过板材边缘进行预处理、预加工等手段将误差消除或减小到要求范围内，因此焊缝精密预成型技术出现了。

在拼焊板焊缝预成型方面，瑞典 Esab 公司专利“焊接装置”（专利号：US6854632）、美国 Worthington 工业公司专利“组合式激光切割和板坯拼焊的装置和方法”（专利号：US6031199）、日本尼桑公司专利“对接焊方法与装置”（专利号：US6491210）、日本安川钢铁公司专利“带研磨设备的焊接装置”（专利号：US4721541）等专利均采用在同一设备内实现在线精剪和激光拼焊的方案，但是效率受限^[92-95]。美国通用汽车专利“焊接中用于装夹已对接金属板材的方法”（专利号：US5630269）集成了一个精剪机、一个精定位平台、两个穿梭式工作台，采用交替焊接的方式，提高了生产效率，该方案也被美国 VIL 公司等借鉴^[91]。我国华中科技大学的中国专利“薄板激光切割—焊接组合工艺及其设备”（专利号 CN1368418）

采用焊切转换机构,通过激光切割减小焊缝宽度提高焊接质量,成本适宜,但是生产效率低于前面的方案^[96]。丹麦技术大学 Olsen 的专利“精确接合两块板材的方法”(专利号:US5505365)提出了一种拼焊板预处理方法,通过激光切割板边和板边嵌合来减小焊缝和避免热变形,但生产效率较低^[97]。美国 Littell 公司专利“用于剪板的刀刃装配体”(专利号:US6360643)将精密冲裁技术用于精剪,适用于中等长度直线板边的精剪^[98]。德国 Thyssen 公司欧洲专利“用于从深拉板材生成结构化零件的方法和设备”(专利号:EP1276576)将精密冲裁技术用于不规则拼焊板冲裁,并提出多块钢板同时冲裁,使得拼焊时可对板边进行匹配^[99]。瑞士 Elpatronic 公司专利“用来焊接板材以获得复合板材的过程和设备”(专利号:US5550345)根据材料塑性变形理论设计碾压轮,其中一对平轮将薄板压平,而具有异型剖面的碾压轮将厚板边缘挤向焊缝中线以减小焊缝,轮上有空隙避免挤压力过大,不过碾压轮宽度较大,容易在拼焊板上留下明显压痕,经考察其实际产品对此有较大改进^[100]。在此应注意到国外设备制造商与知识产权拥有者的关系较为多样,如 Soudronic 公司产品是基于 Elpatronic 公司专利,VIL 公司前身为 Littell 公司,Sollac 公司是 Arcelor 公司的子公司,等等。

1.3 论文课题来源和主要内容

1.3.1 课题来源

本文的研究是结合中国科学院知识创新工程方向项目“全自动激光拼焊成套装备关键技术与示范应用”展开的,图 1-15 为全自动激光拼焊成套装备。

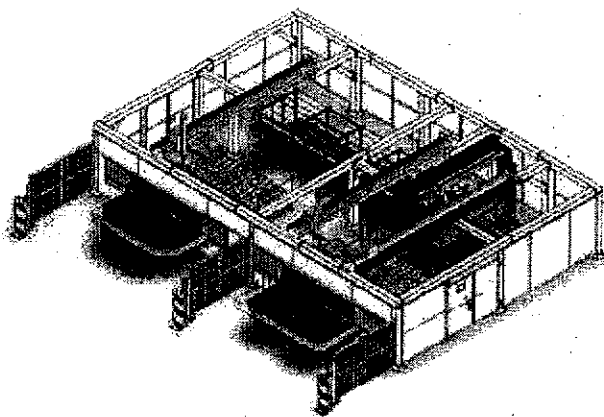


图1-15 全自动激光拼焊成套装备

Fig 1-15 SIA automatic tailored blank laser welding system

1.3.2 本文的主要研究工作及章节安排

以激光拼焊定位、夹紧机构为研究对象,主要开展激光拼焊定位、夹紧机构创新设计及其评价与优化和机构误差对焊接质量影响规律等方面的工作。主要内容包括激光拼焊定位、夹紧机构创新设计与分析,焊缝精密预成型原理与实现技术,基于 Kriging 模型的机构优化方法研究,机构精度对激光拼焊焊接质量影响规律研究以及激光拼焊定位机构精度补偿方法研究。全文共分为六章,各章节内容安排如下:

1. 第一章对国内外现状进行综述。首先介绍了课题的来源和研究意义,然后对激光拼焊定位、夹紧机构研究所涉及的几个关键领域——激光拼焊技术、定位、夹紧机构和焊缝预成型技术等国内外研究现状进行综述。

2. 第二章研究激光拼焊定位、夹紧机构设计方法。主要包含以下几部分:基于构型的定位、夹紧机构设计方法;碾压预成型基本原理;基于 Kriging 的碾压机构优化方法;定位、夹紧机构性能评价模型。

3. 第三章对所研制的全自动激光拼焊生产线定位、夹紧机构展开研究。研究其定位、夹紧机构设计原理以及关键技术,主要包含:定位、夹紧机构原理、定位、夹紧机构适应性分析;定位机构精度建模及误差补偿方法;夹紧力确定与优化方法;效率分析与优化。

4. 第四章针对长焊缝激光拼焊研究新型定位、夹紧机构。在对国外激光拼焊定位、夹紧机构深入分析基础上,研制高性能新型激光拼焊定位、夹紧机构。主要从以下几个方面入手:准连续传输,新型定位、夹紧机构基本原理,焊缝碾压精密预成型机构,焊接机构等关键技术。

5. 第五章研究焊缝碾压精密预成型理论以及实现技术。焊缝碾压精密预成型是长焊缝激光拼焊最关键技术之一,为了设计碾压机构必须对碾压成型理论进行深入研究。这一章主要完成碾压预成型理论与实现技术,主要研究内容包括:焊缝碾压预成型数学模型建立;金属塑性流动理论及数学模型;宽展与碾压力数学模型;基于 Kriging 模型的碾压轮机构优化;基于曲柄滑块原理的碾压机构设计。

6. 第六章进行工艺试验研究,主要是通过工艺试验研究机构误差对焊接质量影响:通过实际的工艺试验研究关键的几个因素对焊接质量的影响,初步确定激光拼焊机构精度对焊接质量的影响规律,以供激光拼焊实际焊接做参考;建立机构误差对焊缝截面形状影响数学模型;完善激光焊接工艺对机构误差的补偿机制;研究碾压对焊接质量提高的影响。

最后,全面总结了本论文的主要研究工作、研究成果,并对后续工作进行了展望。

第2章 激光拼焊定位、夹紧机构设计方法

2.1 引言

激光拼焊装备定位、夹紧机构是构成激光拼焊系统的基础,其功能和适应性的好坏直接关系到激光拼焊系统焊接效率和焊接质量的好坏。基于不同的原理和性能侧重点,国内外提出并应用了多种类型的激光拼焊机构,根据激光拼焊的特点,基本可分为定位销加压紧块和连续传输激光拼焊定位、夹紧机构类型。其中,连续型激光拼焊定位、夹紧机构具有焊接效率高、对板材适应性好等优点,欧洲少数公司研制的激光拼焊设备采用了这种方式,但是这种方式对技术要求比较高,实现起来比较困难。很多公司采用了更加容易实现的定位销加压紧块形式激光拼焊定位、夹紧机构。我国在激光拼焊关键技术研究处于初期阶段,因此要发展我国激光拼焊技术就需要在吸收国内外激光拼焊定位、夹紧机构特点基础上,研究具有自己特点的定位、夹紧机构。

2.2 定位、夹紧机构基本构型分析

2.2.1 上、下料机构

上、下料机构主要有直线机器人方式、工业机器人方式以及人工方式。IHI与SIA研制的激光拼焊生产线1号机所采用的上、下料机构为图2-1所示的直线机器人,主要由二自由度直线机器人、上、下料架和吸盘等组成。直线机器人机构自由度少,抓取板材时是悬臂结构,刚度较低,稳定性差,影响上料精度,因此其可靠性和适应性比较差,并且在运行时噪声比较大(90分贝)。

瑞士的Soudronic、日本的H&F以及VIL等采用工业机器人上下料(如图2-2)。由于工业机器人自由度多、活动空间大、柔性好、负载大,因此工作效率和适应性也较高,由于工业机器人工作空间广,可适应不同位置上下料,较直线机器人运行时噪声小,成本低。

也有一些公司采用人工上下料,比如Thyssen公司,由于其激光拼焊设备机构特点,人工上下料很容易,因此可以采用人也可以采用机器人。

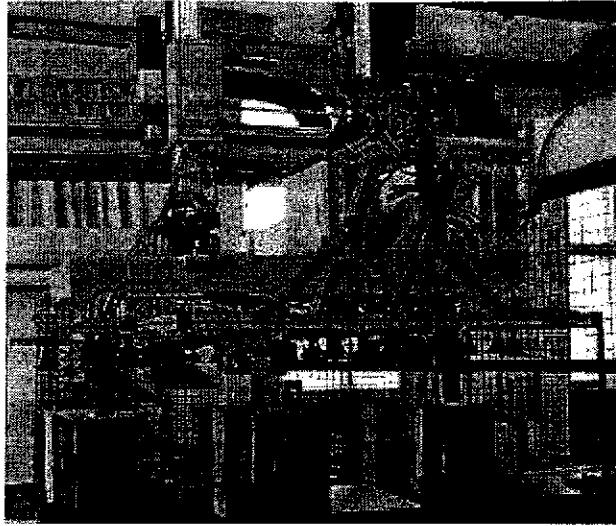


图 2-1 IHI 直线上料机器人

Fig 2-1 IHI linear robot for loading

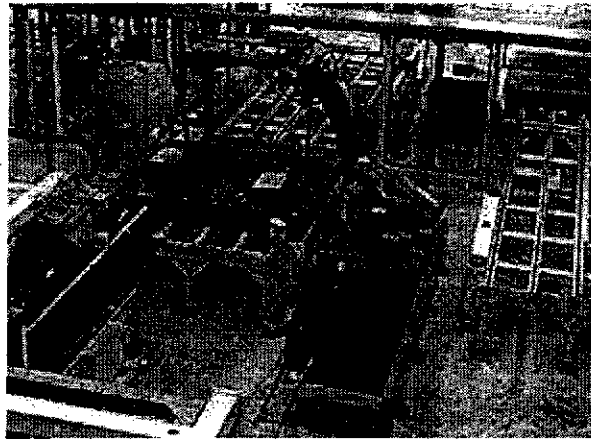


图 2-2 工业机器人上料

Fig 2-2 Industrial robot for loading

2.2.2 定位机构类型分析

定位机构分为定位驱动机构和定位机构，定位驱动机构完成定位过程中板材的运动，定位机构完成板材精密定位。

定位驱动机构可分为驱动销式、吸盘式和轮式。日本 IHI 以及 Littell 等采用了驱动定位销机构(图 2-3)，定位销驱动机构简单，对于形状规则的小尺寸板材比较适用，对于异形料片以及大尺寸的料片适应性较差，焊接不同尺寸料片时调整时间长。因此驱动定位销机构的柔性比较差。此外板材与定位驱动装置之间是刚性连接，因此对定位驱动装置运动精度要求较高，否则容易产生定位误差或者板材变形。

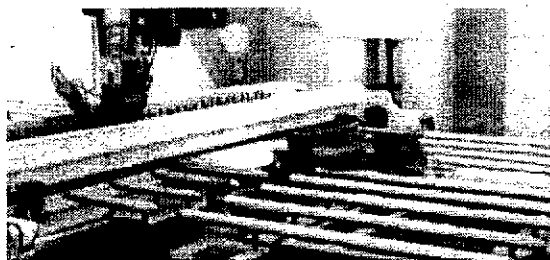


图 2-3 定位销驱动定位

Fig 2-3 Positioning driven mechanism by pins

Soudronic 以及 SIA 定位驱动装置采用了吸盘进行, 如图 2-4 所示, 吸盘具有两个自由度, 驱动板材完成前定位和侧定位。定位时, 吸盘通过板材表面施加驱动力使板材完成定位, 因此对板材形状和大小没有限制, 只要合理设计吸盘间距就可以, 吸盘与板材之间是柔性连接, 在受到较大阻力时可以相对滑动, 这种结构可以降低在定位过程中板材弯曲变形, 对定位机构运动精度要求也降低, 因此这种定位驱动方式柔性较大。



图 2-4 吸盘式定位驱动机构

Fig 2-4 Positioning driven mechanism by sucker

Thyssen 和 Sollac 采用了如图 2-5 所示的轮式驱动机构, 通过与定位装置成一定角度的运动的轮驱动板材向定位机构运动完成定位, 这种机构适用于连续激光焊接系统, 适合任意形状、任意长度的板材定位驱动, 这种定位驱动机构是三种机构中柔性最好的一种。但是这种机构的难度是如何保证轮的平面度, 激光拼焊对板材错边要求比较严格, 如果轮不在同一平面就容易产生错配等问题。

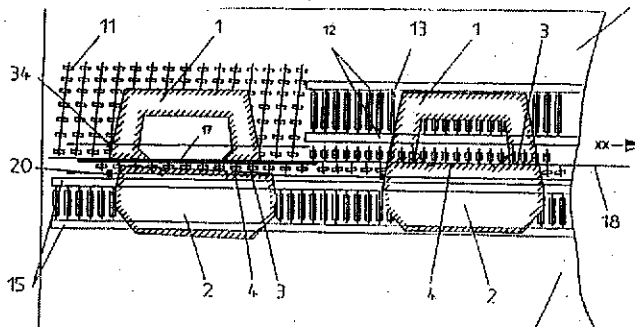


图 2-5 轮式驱动机构

Fig 2-5 Positioning driven mechanism by wheels

定位机构决定了激光拼焊的成败,激光光斑较小,因此对定位精度要求非常高。激光拼焊定位机构主要分为翻转式定位机构、升降式定位机构以及固定式定位机构。

以 IHI 和 SIA 为代表的翻转式定位机构,被焊接两块板分别通过两组翻转式定位销定位,定位完成后,定位销翻下,两块板同时向焊缝中心方向运动进行对中。前面分析过了这种定位方式定位精度较低,因为定位精度是板材自身直线度误差、定位销误差、两组定位销位置关系误差以及对中误差等的和,定位步骤过多,积累误差较大。

另一种定位机构是以 Littell 和 BWG 为代表的升降式定位机构,如图 2-6 所示,两块板采用同一定位机构定位,定位完成后定位销落下,薄板向厚板侧运动,厚板不动,完成对中。这种定位机构简单,定位步骤少,采用单侧对中有有效的提高了定位精度高。

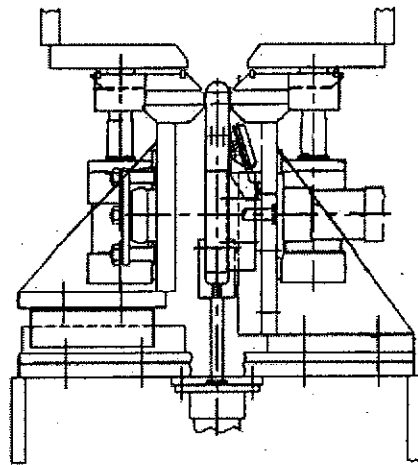
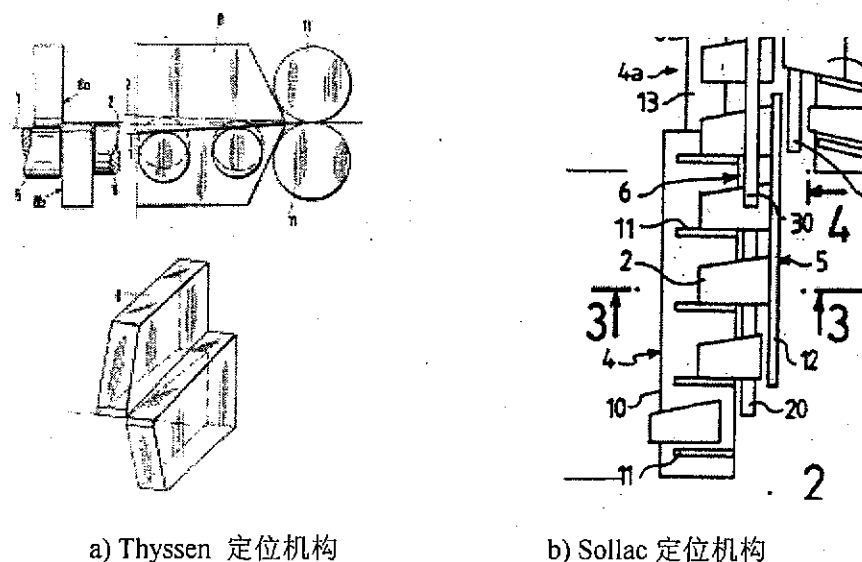


图 2-6 Littell 定位机构

Fig 2-6 Positioning mechanism of Littell

最后一种定位机构是在连续激光拼焊设备上采用的定位板结构,如下图所示 Thyssen 和 Sollac 的定位机构。Thyssen 的定位系统采用两个定位板进行定位,用来定位的两平面在垂直方向上共面。被焊接板材的两个边分别与两个定位面紧贴,并放置在传送装置上,两个传送装置的平面夹角为精确的 α , 由于两个定位面共面,所以经过该定位装置定位的焊缝间隙为零。此系统定位机构巧妙,但是对制造装配精度要求比较高,如何解决定位面磨损对定位精度的影响等问题只得进一步研究。Sollac 提出的定位机构是一块固定的定位板,定位板上固定一排可以自由转动的圆柱体,圆柱体轴线在同一直线上,采用圆柱体外表面对板材进行定位。



a) Thyssen 定位机构

b) Sollac 定位机构

图 2-7 连续拼焊装备采用的固定式定位机构

Fig 2-7 Positioning mechanism for continuous Tailored Blank Laser Welding

2.2.3 夹紧机构类型

夹紧机构用于保证定位后板材位置精度、控制板材自身变形和焊接变形，是激光拼焊系统的重要部分。激光拼焊夹紧机构主要由传统压板式压紧机构、压紧轮机构、飞梭+碾压轮机构和电磁压紧机构等。

IHI、小矢部、SIA 以及 Littell 都采用了传统的压块压紧机构，它主要由施力源、中间传输机构、弹簧和压板构成。根据中间传输机构的特点压块机构还可分成杠杆式和垂直式，IHI、小矢部和 SIA 采用了杠杆增力原理。压紧力由气缸产生通过杠杆传递给弹簧，弹簧通过压块进行压紧，它的优点是可以通过杠杆可以增加压紧力，缺点是翻转式压紧机构不能保证压紧力垂直作用在板材上，由于压紧力比较大，随着板厚不同杠杆施加力的方向也随之发生变化，支撑底板在 x 和 z 向发生不确定的变形使得系统刚度降低，同时，压紧横梁是两端简支机构横梁变形大，影响压紧力的均匀性，从而使得系统变形具有不确定性。Littell 则采用垂直作用方法，这种机构简单，并且消除了水平分力对机构精度的影响，是一种比较实用的机构。传统压块压紧机构原理简单，但是由于是在整条焊缝上施加压紧力，因此总压力要求比较高，并且压紧位置距焊缝中心较远。

Thyssen 研制了大型压紧轮机构对板材进行压紧，压紧轮机构如图 2-8 所示，上轮由两部分组成，可单独运动以适应不等厚板材的焊接，上轮通过液压机构控制其位置，下轮为主动轮，电机通过皮带驱动其转动，压紧轮中空，激光从上轮中间通过进行焊接，同时吸烟等机构也在其中间进行布置。由于压紧轮直接在焊接点处对板材进行压紧，因此板材在焊接区域没有变形，能提高焊接质量。

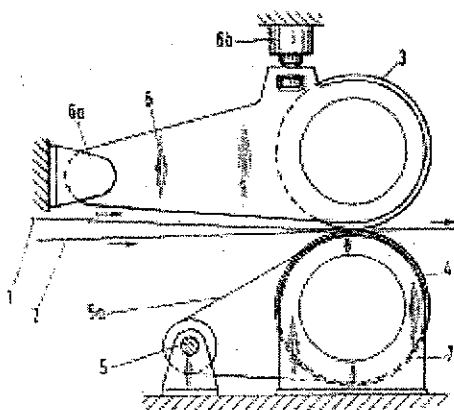


图 2-8 压紧轮机构

Fig 2-8 Clamping roller

Soudronic 采用了飞梭机构和碾压轮机构对板材进行压紧和碾压预处理(图 2-9 所示)。飞梭机构是运动的夹紧机构,在板材完成定位后,飞梭机构将板材压紧,然后沿焊缝方向驱动板材运动,进行焊接。焊接前,为了消除焊缝间隙,通过碾压轮机构对板材边缘进行碾压,至少一个板材边缘发生塑性变形弥补焊缝间隙,板材塑性成型在定位压紧中的提出直接解决了由于定位误差引起的间隙问题,它可以将 0.3mm 的间隙消除。但是也存在不少问题,这些将在后面进行详细讲解。飞梭机构+碾压轮机构是激光拼焊技术中一个比较新颖的方案。

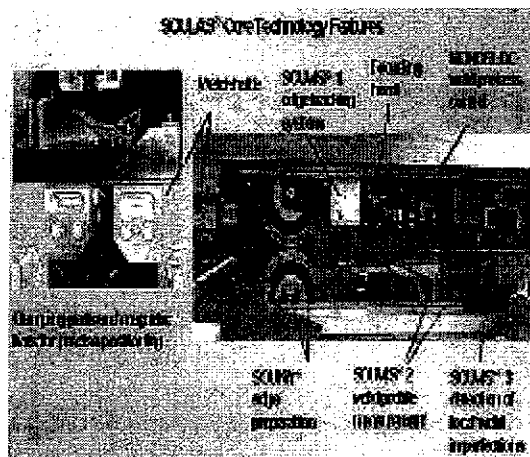


图 2-9 Soudronic 夹紧机构

Fig 2-9 Soudronic clamping mechanism

在一些激光拼焊系统上采用了电磁压紧方法,比如 Elpatronic 和 Armco。Soudronic 的飞梭机构上也采用了电磁压紧机构。采用电磁铁压紧机构的优点是施力源结构尺寸小,机构简单精度高。难点是如何提高电磁力。

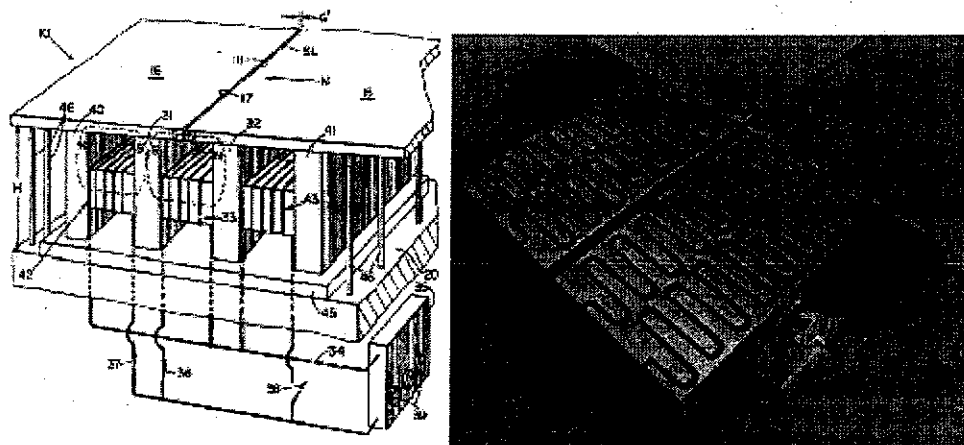


图 2-10 电磁夹紧机构

Fig 2-10 Electromagnetic clamping mechanism

2.2.4 焊接机构类型

焊接机构可以分为直角运动机构、工业机器人机构和固定激光头式机构等。

大部分的激光拼焊系统采用了三自由度直角运动机构，如 IHI、SIA、VIL 和小矢部等，前面分析了激光头运动机构的特点，可以看出，激光头运动的机构类型精度受到刚度、垂直度等影响有精度受到影响。

SIA 在曲折线试验台上实现了工业机器人焊接系统，采用工业机器人代替传统的直角坐标运动机构，不仅可以实现直线焊缝的焊接，还可以实现曲折线的焊接，工业机器人机构具有焊接范围广焊接柔性好的特点，但是工业机器人自身精度是影响其在直线焊缝焊接的主要瓶颈。

在连续型激光拼焊系统和工作台运动型激光拼焊系统中，如 Thyssen、Sollac 和 Soudronic 主要采用固定激光头机构，激光头固定的方式能有效减小激光头运动带来的误差。

2.2.5 激光拼焊定位、夹紧机构设计方法

将组成激光拼焊定位、夹紧机构的运动链或者机械装置称为子构型，对于激光拼焊定位、夹紧机构，可以划分为上、下料机构、定位驱动机构、定位机构、夹紧机构和焊接机构五类子构型。非别记为

- a) 上、下料机构 $L=\{l_1, l_2, \dots, l_i\}$
- b) 定位驱动机构 $D=\{d_1, d_2, \dots, d_j\}$
- c) 定位机构 $P=\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$
- d) 夹紧机构 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$
- e) 焊接机构 $W=\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$

式中, i, j, k, m, n 分别为可供组合的各个子构形的数量, 称之为选择度。

激光拼焊定位、夹紧机构可视为由这几个子构型通过运动学和动力学约束联系起来的多体系统。对于任意激光拼焊定位、夹紧机构, 其构形组合可记为

$$M_r = (L_r, D_r, P_r, C_r, W_r)$$

则激光拼焊定位、夹紧机构的解空间可表示为

$$M = (M_1, M_2, \dots, M_K)$$

根据前面 4 节分析的几种典型机构分别归入所属构形, 很容易得到多个解。基于构形组合的激光拼焊定位、夹紧机构设计方法只是提供了一个广义的解空间, 并不是每个解都是可行解, 因此需要对所求解进行验证, 验证方法基本思想就是保证每个解的两个子构型具有可连接性。

2.3 焊缝碾压精密预成型基本原理

碾压预成型原理是针对超长焊缝(焊缝长度大于 2.5m) 在激光拼焊中非线性定位误差提出来的。在超长焊缝中, 非线性定位误差带来的间隙大于 0.1mm, 激光从间隙中透过, 对激光拼焊质量的影响不容忽视(图 2-11), 如果不解决非线性定位误差, 超长焊缝激光拼焊就很难实现。为此提出了基于金属塑性变形的碾压预成型理论。

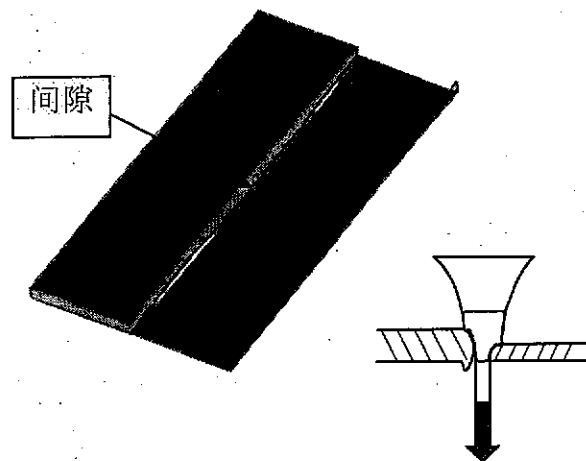


图 2-11 非线性定位误差带来间隙对焊接质量影响

Fig 2-11 Welding quality affected by nonlinear positioning error

使金属发生塑性变形需要很大力, 如果采用整体压紧机构对厚板进行压紧实现碾压所需碾压力会很大, 对系统刚度提出很高要求。因此采用碾压轮结构, 通过板材运动, 碾压轮固定方式完成整条焊缝上的碾压。为了保证碾压时薄板不发生滑动和变形在薄板处增加压紧轮起到压紧作用。

如图 2-12 所示, 它的基本原理是通过对厚板边缘施加较大压紧力使其发生塑性变形, 塑性流动的金属将间隙填补。

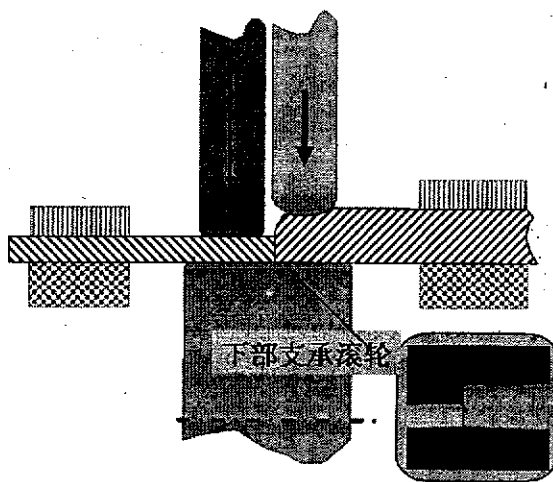


图 2-12 碾压预成型原理

Fig 2-12 Principle of plastic and precise roller-preform of seam

2.4 基于 Kriging 的碾压机构优化方法

Kriging模型是一种方差估计最小的无偏估计模型,该方法最早由南非地质学者 Krige于1951年提出^[101-103]。近年来,在航空、汽车以及集成电路CAD开发等领域都开始采用Kriging模型代替响应曲面模型作为复杂系统近似模型,进而对系统进行优化^[104-108]。

Kriging 是由一个参数模型和一个非参数随机过程联合构成的。它比单个的参数化模型更具有灵活性,同时又克服了非参数化模型处理高维数据时存在的局限性,比单个的参数化模型具有更强的预测能力。Kriging 模型有两方面的优点。第一, Kriging 模型以已知信息的动态构造为基础充分考虑到变量在空间上的相关特征,即只使用估计点附近的某些信息,而不是所有的信息对未知信息进行模拟。第二, Kriging 同时具有局部和全局的统计特性,这个性质使得 Kriging 可以分析已知信息的趋势和动态。与其它的近似模拟技术相比, Kriging 是一种更具有“统计性”的近似技术。同时, Kriging 模型的有效性并不依赖于随机误差的存在,也就是说已知信息中是否包含噪声信息不会影响 Kriging 模拟的有效性程度。在分析中,相同的结构数据(截面积、惯性距、外力荷载等)必定得到相同结构响应(应力、位移等)。对于这种问题, Kriging 模型在已知信息中插值未知信息的精度会更高^[109-114]。

在过去的几十年中, Kriging 技术在许多的领域得以应用^[103, 106, 107, 109, 110]。作为一种半参数化的插值技术,其目的就是通过部分已知的信息去模拟某一点的未知信息。传统的模拟技术大都为参数化的模拟(如响应面法),使用参数化的非线性模型,首先必须选择一个适合的数学模型(如二次多项式),其次模型确立之后必须确定其待定系数。而半参数化的 Kriging 模型并不需要建立一个特定的数学模型,相

对于参数化模型而言, Kriging 模型的应用就更加的灵活和方便^[15]。

Kriging 作为线性回归分析的一种改进的技术, 包含了线性回归部分和非参数部分, 其中的非参数部分被视作随机过程的实现。假设随机过程服从高斯分布, 其中协方差矩阵的系数可以通过最大似然估计法确定。线性回归的不同选择对所模拟模型的性质没有很大的影响。Kriging 在某一点进行模拟要借助于在这一点周围的已知变量的信息, 即通过对这一点一定范围内的信息加权的线性组合来估计这一点未知信息。加权选择则是通过最小化估计值的误差方差来确定, 因此, Kriging 模型被视为最优的线性无偏估计^[16]。

本文提出了一种以 Kriging 模拟为基础的碾压轮结构优化方法, 该方法包含三个部分, 有限元计算、Kriging 模拟和碾压轮机构的优化计算。通过 Kriging 方法建立一个与已知信息相关的插值模型来模拟碾压的响应, 它是一种半参数化的模拟方法, 所需要确定的参数少、计算量小; 而且模型简单, 通过少量的样本试验就可以确定估计模型。该方法并不给出极限状态方程的具体形式, 以此避免假定的函数表达式对可靠性计算的影响。使用这种方法的一个优点就是可以最大程度的利用现有的大型工程分析软件。

2.4.1 Kriging 方法的基本理论

给定一个样本集 $S = [s_1 \dots s_m]^T$, 其中 $s_i \in \mathcal{R}^n$, 其输出为 $Y = [y_1 \dots y_m]^T$, 其中 $y_i \in \mathcal{R}^q$ 。对于一个 n 维的输入 $x \in D \subseteq \mathcal{R}^n$, 采用模型 $\hat{y}$ 表示确定的 $y(x) \in \mathcal{R}^q$

$$\hat{y}_l(x) = F(\beta_j, x) + z_l(x), \quad l = 1, \dots, q \quad (2-1)$$

式中 F 为回归模型, $z(x)$ 为期望为 0 方差为 σ^2 随机函数。回归模型 $F(\beta_j, x)$ 由 p 个已知函数线性组合构成, $f_j: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$

$$\begin{aligned} F(\beta_j, x) &= \beta_1 f_1(x) + \dots + \beta_p f_p(x) \\ &= [f_1(x) \dots f_p(x)] \beta_j \\ &\equiv f(x)^T \beta_j \end{aligned} \quad (2-2)$$

$\{\beta_{k,j}\}$ 为回归模型参数。

随机过程 z 的数学期望为零, 其协方差为

$$E[z_l(w)z_l(x)] = \sigma_l^2 \mathcal{R}(\theta, w, x), \quad l = 1, \dots, q \quad (2-3)$$

σ_l^2 为随机过程的方差, $\mathcal{R}(\theta, w, x)$ 是以 θ 为参数的相关模型。

真实的 y 值可以表示为

$$y_l(x) = F(\beta_j, x) + \alpha(\beta_j, x) \quad (2-4)$$

其中 α 为估计误差。

下面分析 Kriging 预测模型。对于设计样本 S 根据公式 (2-2)，得到

$$F = [f(s_1) \dots f(s_m)]^T \quad (2-5)$$

定义 R 为样本点之间的相关性

$$R_{ij} = \mathcal{R}(\theta, s_i, s_j), \quad i, j = 1, \dots, m \quad (2-6)$$

对于预测点 x ，定义

$$r(x) = [R(\theta, s_1, x) \dots R(\theta, s_m, x)]^T \quad (2-7)$$

利用样本点 S 的响应值 Y 的线性加权叠加插值来估计待测点 x 的响应值

$$\hat{y}(x) = c^T Y \quad (2-8)$$

式中， $c = c(x) \in IR^m$

利用上式作为预测模型，则预测值误差为

$$\begin{aligned} \hat{y}(x) - y(x) &= c^T Y - y(x) \\ &= c^T (F\beta + Z) - (f(x)^T + z) \\ &= c^T Z - z + (F^T c - f(x))^T \beta \end{aligned} \quad (2-9)$$

这里 $Z = [z_1 \dots z_m]^T$ 为样本点处的误差，为了保证预测模型的无偏性，要求

$$F^T c - f(x) = 0 \text{ 即}$$

$$F^T c(x) = f(x) \quad (2-10)$$

此时，预测模型的均方差为

$$\begin{aligned} \phi(x) &= E[(\hat{y}(x) - y(x))^2] \\ &= E[(c^T Z - z)^2] \\ &= E[z^2 + c^T Z Z^T - 2c^T Z z] \\ &= \sigma^2 (1 + c^T R c - 2c^T r) \end{aligned} \quad (2-11)$$

由于 Kriging 模型要求模型的预测方差最小，所以求解式 (2-8) 中权系数 c 的问题最后化为求解式 (2-9) 在式 (2-10) 等的约束下的极值问题。用拉格朗日乘子法求解^[17]

$$L(c, \lambda) = \sigma^2 (1 + c^T R c - 2c^T r) - \lambda^T (F^T c - f) \quad (2-12)$$

关于 c 的梯度为 $\dot{L}_c(c, \lambda) = 2\sigma^2 (Rc - r) - F\lambda$ ，由此得到 Kriging 方程组

$$\begin{bmatrix} R & F \\ F^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ \tilde{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \\ f \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

式中 $\tilde{\lambda} = -\frac{\lambda}{2\sigma^2}$, 方程组的解为

$$\begin{cases} \tilde{\lambda} = (F^T R^{-1} F)^{-1} (F^T R^{-1} r - f) \\ c = R^{-1} (r - F \tilde{\lambda}) \end{cases}$$

因为 R 与 R^{-1} 对称, 根据公式 (2-8) 得到

$$\hat{y}(x) = (r - F \tilde{\lambda})^T R^{-1} Y = r^T R^{-1} Y - (F^T R^{-1} r - f)^T (F^T R^{-1} F)^{-1} (F^T R^{-1} Y) \quad (2-14)$$

根据 $F\beta \equiv Y$, 得到 R 的广义最小二乘解为 $\beta^* = (F^T R^{-1} F)^{-1} (F^T R^{-1} Y)$, 将其代入公式 (2-14) 得到

$$\begin{aligned} \hat{y}(x) &= r^T R^{-1} Y - (F^T R^{-1} r - f)^T \beta^* \\ &= f^T \beta^* + r^T R^{-1} (Y - F \beta^*) \\ &= f(x)^T \beta^* + r(x)^T \gamma^* \end{aligned} \quad (2-15)$$

其中, $R\gamma^* = Y - F\beta^*$, 对于固定的样本集 γ^* 和 β^* 是固定的。对于任意一个新的 x , 只需计算出 $f(x) \in \mathbb{R}^p$ 和 $r(x) \in \mathbb{R}^m$, 就可以估计出新的响应值, 根据最大自然估计可以得到

$$\sigma_l^2 = \frac{1}{m} \|Y_{:,l} - F\beta_{:,l}^*\|_2^2$$

同时, 预测模型的均方差(MSE)为

$$\begin{aligned} \varphi_l(x) &= \sigma_l^2 (1 + c^T (Rc - 2r)) \\ &= \sigma_l^2 (1 + (F\tilde{\lambda} - r)^T R^{-1} (F\tilde{\lambda} + r)) \\ &= \sigma_l^2 (1 + \tilde{\lambda}^T F^T R^{-1} F \tilde{\lambda} - r^T R^{-1} r) \\ &= \sigma_l^2 (1 + u^T (F^T R^{-1} F)^{-1} u - r^T R^{-1} r) \end{aligned} \quad (2-16)$$

式中, $u = F^T R^{-1} r - f$

回归模型与相关模型

回归模型 $\mathcal{F}(\beta_j, x)$ 是设计空间上的全局近似, 一般采用多项式函数组的形式, 通常分成0阶(常数)、线性和二次多项式3类模型。回归模型阶次的选取对模型精度的影响并不显著^[118]。如下图2-13所示, 分别为选取0阶和二阶时的模型对比, 可以看出模型相差不大。

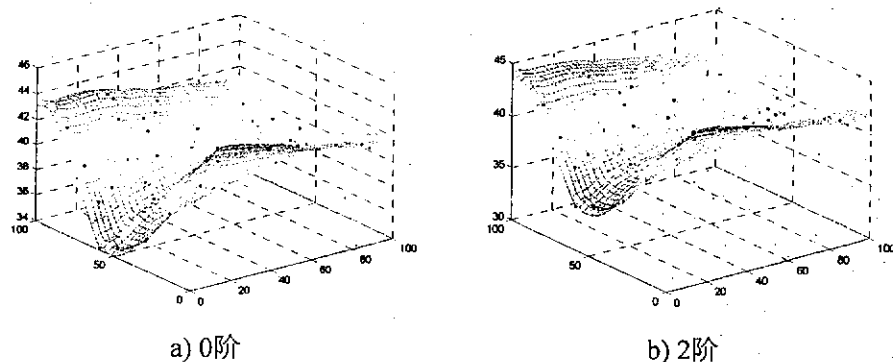


图 2-13 选取不同阶次回归模型时对比

Fig 2-13 Comparison with different order model

相关模型代表与全局模型的局部偏差，反映数据的局部特性，相关模型结构为

$$\mathcal{R}(\theta, w, x) = \prod_{j=1}^n \mathcal{R}_j(\theta, w_j - x_j)$$

通常采用简单的单变量核函数来构造的相关模型，如下表所示包括指数函数、幂指函数、高斯函数、线性函数、球状函数、立方函数和样条函数等。表中的相关函数可以分为两类，一类是具有抛物线性的(gauss, cubic和spline)，一类是线性的(exp, lin和spherical)，幂指相关函数具有上述两类性质，受到参数 θ_{n+1} 的影响。相关函数的选取要根据实际情况，如果真实函数 $y(x)$ 满足连续可微，可选择高斯或立方相关函数，反之可选择指数或线性相关函数，而幂指相关函数性质介于指数和高斯相关函数之间。

表2-1 相关函数

Table 2-1 Correlation functions

名称	$\mathcal{R}_j(\theta, w_j - x_j)$
EXP	$\exp(-\theta_j d_j)$
EXPG	$\exp(-\theta_j d_j ^{\theta_{n+1}}), \quad 0 < \theta_{n+1} \leq 2$
GAUSS	$\exp(-\theta_j d_j^2)$
LIN	$\max\{0, 1 - \theta_j d_j \}$
SPHERICAL	$1 - 1.5\xi_j + 0.5\xi_j^3, \quad \xi_j = \min\{1, \theta_j d_j \}$
CUBIC	$1 - 3\xi_j^2 + 2\xi_j^3, \quad \xi_j = \min\{1, \theta_j d_j \}$
SPLINE	$\zeta(\xi_j), \quad \xi_j = \theta_j d_j $

回归模型与相关模型形式确定后，矩阵 R 以及由它推导出的 β^* 和 σ^2 都依赖于 θ 。

因此只有相关参数确定后, Kriging模型才能完整建立。因此问题转化为如何选择合适的 θ 使得 $\varphi_l(x)$ 最小, 这是一个无约束非线性最优问题。一般在建模是选用高斯相关函数, 这时最优的 θ^* 通过解如下方程得到

$$\theta^* = \min\{\psi(\theta) = |R|^{-\frac{1}{m}} \sigma^2\} \quad (2-17)$$

2.4.2 基本过程

2.4.2.1 样本点的选取

一般工程优化设计是多因素多水平的问题, 对于 n 个因素的 q 水平试验, 完全析因设计的总试验数目为 q^n , 需要的试验次数太多, 进行一次碾压分析需要很多时间, 计算成本太高。在Kriging模拟中, 必须拥有一定数量的已知信息, 这些信息的获取是通过确定性的试验来完成的。因此, 需要在设计空间的一定范围内选取一定数量的样本点, 并对其进行数值试验, 要求有限的样本应该尽可能全面的反映设计空间的特性。

在设计空间中选取 n_s 个样本点。如果抽样空间的选取范围过大, 则会降低结构响应整体模拟的精度; 相反, 会导致对可靠性指标影响最大的点被排除在抽样空间之外, 进而影响计算精度。以拉丁超立方抽样(Latin Hypercube Sampling)选取样本点, 这种抽样方式的主要优点就是对于产生的样本点可以确保其代表向量空间中的所有部分。

1979年McKay提出了拉丁超立方抽样, 该方法的本质在于控制抽样点的位置, 避免抽样点在小邻域内重合问题。它的基本原理是如果进行 n 次抽样, 那么就把 m 个随机变量都分成等概率的 n 个区间, 于是整个抽样空间就等概率的 n^m 个小格子。对于每个变量来说, n 次抽样则一定分别落在每区间中, 因而实际得到的抽样点等概率地分散在整个随机空间中, 利用这样的方法构造的近似响应的整体性能比较好^[119-121]。

相对于其它抽样, 拉丁超立方抽样的最大优势在于对样本数量的节省, 且任何大小的抽样数目都能很容易地产生。图2-14为二维随机变量使用拉丁超立方抽样选取20个样本点的示意图。

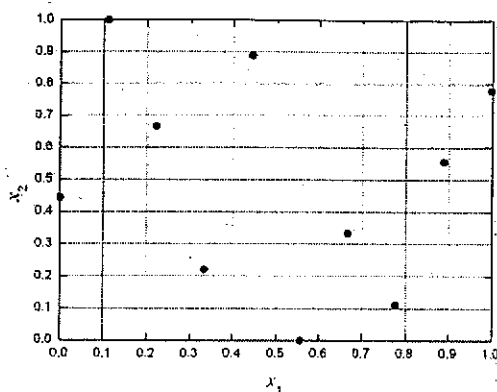


图 2-14 二维随机变量 10 个点的拉丁超立方抽样示意图

Fig 2-14 Schematic diagram of two-dimensional random variables Latin Hypercube Sampling

2.4.2.2 响应值的计算

在得到 n_s 个样本点之后, 需要选用有限元分析软件, 对样本点进行逐次结构分析, 并得到其响应值。

本文主要采用 ABAQUS 软件进行碾压成型有限元分析, ABAQUS 是一套功能强大的工程模拟的有限元软件, 其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。ABAQUS 包括一个丰富的、可模拟任意几何形状的单元库。并拥有各种类型的材料模型库, ABAQUS 还包含一个全面支持求解器的图形用户界面, 减轻了建模工作量。ABAQUS 有两个主求解器模块: ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit。ABAQUS/Explicit 是求解复杂非线性动力学问题和准静态问题的理想程序, 特别是用于模拟冲击和其它高度不连续事件^[122-127]。

2.4.2.3 模型的建立

使用基于 Kriging 模型的优化方法来求解全局优化问题的基本流程为:

- 1) 使用 Latin Hypercube Sampling 获取样本点并通过 ABAQUS 有限元分析得到的样本点响应结果。
- 2) 选取回归模型的类型, 由于多项式函数 $f(x)$ 的选取对模型精度不起决定性作用, 可以随便选择, 有时为了计算简便选取 $f(x)=1$, 即线性回归模型。
- 3) 相关模型的选取对模型精度起决定性作用, 一般选择计算效果最好而且被广泛采用的高斯相关模型。
- 4) 搜索相关方程中变量系数 θ , 最终建立一个无偏的 Kriging 模型。
- 5) 确定优化设计模型, 依据建立的 Kriging 模型选择最优组合。

2.4.3 优化指标的建立

碾压轮结构优化设计中, 影响碾压效果的主要因素有: 碾压轮直径、碾压轮宽度以及碾压轮截面形状。这里采用两段圆弧模拟碾压轮截面形状, 用两段弧所占

有的碾压轮宽度之比作为控制条件。

这里以宽展最大, 碾压力和侧向力最小为优化目标, 以碾压轮直径、碾压轮宽度和两段弧所占碾压轮宽度之比作为优化设计变量; 由于最大间隙和板厚已知, 所以碾压截面上的碾压面积设置成一个约束条件, 这里令碾压面积一定。

根据以上分析, 优化指标的计算可以表述为如下优化问题,

$$\begin{aligned} & \text{find } x^* \\ & \min O(y) \\ & \text{s.t. } S(x) = s \end{aligned} \quad (2-18)$$

这里 $O(y)$ 是响应值的函数, 这里称为优化目标函数。

在本方法中, 对于一个观测点 x^* , 可以通过 krignig 模型确定其模拟响应值 y^* , 然后可以得到对应的优化目标函数的一个值 $O(y^*)$, 从而可以确定 $O(y)$ 在整个设计区间上的取值, 最后求解(2-18)可以得到最优设计变量的组合。

这里最关心的是宽展、碾压力和轴向力, 因此, 优化目标函数 $O(y)$ 可以表示为

$$O(y) = KY \quad (2-19)$$

其中, $K=(k_1, k_2, k_3)$, 是系数向量

$Y=(y_1, y_2, y_3)$, 为响应值, y_1 为宽展, y_2 为碾压力, y_3 为轴向力。

2.5 激光拼焊定位、夹紧机构性能评价

激光拼焊定位、夹紧机构是一个复杂的机械机构, 它的创新研究过程是一个复杂的多层次的总和和优化设计过程, 为了评价所设计的定位、夹紧机构性能, 建立定位、夹紧机构性能评价模型具有重要的指导意义和应用价值。

激光拼焊定位、夹紧机构它的总体性能取决于许多因素, 如定位精确精度、柔性、适应性和效率等。在这些因素中, 每种因素的描述方式、衡量标准都各不相同, 对定位、夹紧机构的总体性能的影响程度也不尽相同。

2.5.1 定位精度

工件在夹具中获得一个确定的位置称为工件在夹具中的定位。保证工件定位的准确性是对定位、夹紧机构的基本要求。在分析三维空间中工件的定位方面, 一般采用 3-2-1 定位原理确定工件位置^[128-130], 但是对于薄板型工件由于其尺寸大、质量重、易变形等特点一般采用 N-2-1 定位原理^[8, 131-133]。激光拼焊生产线的定位要求是将两块预焊板材底面在同一平面内, 同时焊接边紧密贴合, 并使焊缝中线与激光头焊接运动中线重合。激光拼焊定位机构是激光拼焊生产线的核心部分,

其精度决定了焊接质量的好坏。提高定位精度主要从以下三个方面入手：一是针对被定位对象提出有效定位原理并合理设计定位机构；二是分析机构精度，找出影响因素来减小机构误差；三是误差补偿。

在激光拼焊中主要是要求保证焊缝处板材在 x 与 z 向定位精度， y 向定位精度要求较其它两个方向低，基于工件特点设计定位机构原理。板材厚度远远小于板材长度和宽度，在 z 向(板材平面的法向)刚度较小、易变形采用平面支撑， x 向与 y 向采用定位销定位，由于 x 向为垂直焊缝方向，所以精度要求高，根据焊缝尺寸变化范围确定 x 向定位销数量 n 和间距 I_p

$$\begin{aligned} I_p &= l_{s\min} \\ n &= \frac{l_{s\max}}{I_p} \end{aligned} \quad (2-20)$$

式中， $l_{s\min}$ 为最小焊缝长度， $l_{s\max}$ 为最大焊缝长度

y 向定位销数量为 2，对于短板采用 1 个定位销，长板采用 2 个定位销。 x 向为过定位，因此定位过程中如图 2-15 所示，定位销自身直线度误差为 Δa ，板材焊接边直线度误差为 Δb ，因此定位后焊缝中线就会在 $[0, \Delta a + \Delta b]$ 之间随机波动。

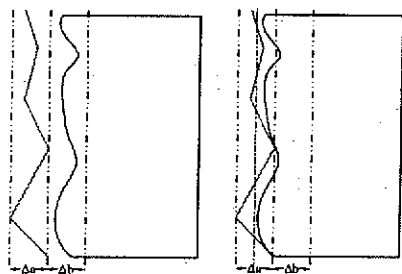


图 2-15 x 向定位

Fig 2-15 Position in x direction

激光拼焊定位、夹紧机构首要功能是保证板材的精确定位。对拼焊板定位精度要求分为 x 向定位精度、 z 向定位精度。 x 向定位误差会产生间隙，一般激光拼焊中要求间隙控制在 0.08mm 以下， z 向定位误差要求控制在薄板厚度的 15% 以下。

2.5.1.1 误差理论基础

机构误差源主要来源于以下几个方面：几何误差，包括零件尺寸误差和装配误差；热变形误差；机构刚度不足引起的误差；振动误差等^[134-138]。

机构几何误差和刚度误差是本文研究的主要内容。机构几何误差研究有了相当长的历史，它是设备加工精度的基本保证，提高机构精度主要方法就是通过提高机构几何精度来实现的。定位机构受夹紧机构力的作用，并且夹紧力较大因此机构变形不可避免，因此研究机构变形对提高系统刚度减小误差有至重要意义^[138-140]。

激光拼焊定位、夹紧机构误差按其性质可以分为系统误差和随机误差,定位销直线度和对中误差属于系统误差,板材直线度、定位过程板材变形引起误差以及机构变形随着板材不同而变化属于随机误差。

系统误差是误差大小和符号固定不变或者按照一定规律变化的。系统误差具有重现性,对于固定不变的系统误差,重复工作时,其误差是重复出现的,由于其重现性,可以通过预先实验或者分析查明产生原因和变化规律从而采取相应的措施使之减小或者消除。

随机误差是纯粹的随机量,它的出现没有一定的规律,即前一个误差出现后,能预测下一个误差的大小和方向、也就是说误差的大小和正负都无法预测,误差具有随机性,但是对大量重复试验的数据进行分析后,发现随机误差却存在着统计学上的规律性。它所出现的数值大小在某一一定的范围内,并且有一定的概率分布规律;大多数随机误差是服从正态分布的。随机误差不能通过实验的方法来消除。

要掌握随机误差的分布规律,要通过实验的方法,取得一定量实验数据,经过整理和归纳,作出统计直方图来找出其概率分布规律。一般分为以下几步:

1. 通过实验得到样本点 $X = [x_1 \dots x_m]^T$, 并得到 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 。
2. 根据 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 计算极差 $R = x_{\max} - x_{\min}$, 根据样本容量和极差值确定分组数并对样本数据进行分组,
3. 计算各组频数,从而做出直方图和分布曲线。
4. 得到随机误差分布规律。

在实际问题中,不仅需要得到随机误差的分布规律还要得到它的某些数字特征如数学期望和方差。随机误差 X 总体均值 μ 决定随机误差数值分布中心位置,随机误差总体标准偏差 σ 决定随机误差值对其分布中心的离散程度。

样本算术平均值 $\bar{X}$ 计算公式为^[141-143]

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \quad (2-21)$$

样本方差计算公式为

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{m-1} \quad (2-22)$$

在实际中,经常通过样本方差估计总体方差

$$\hat{\sigma}^2 = S^2 \quad (2-23)$$

为了研究机构的整体精度需要对误差进行合成。对于系统误差,由于已定系统误差其数值大小和符号均已确定,故其总的已定误差可以按代数和法求出。设有 p

个已定系统误差为 $A_1, A_2, \dots, A_p$, 其总的系统误差 A 为^[137]

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_p = \sum_{i=1}^p A_i \quad (2-24)$$

绝大多数情况下, 随机误差是相互独立或弱相关的, 其误差分量大多为正态分布。设有 n 个随机误差分量, 它们的标准偏差(均方根差)分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 。根据方差的运算规则, 其合成的总随机误差的标准偏差 σ 应为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right]^2} \quad (2-25)$$

式中 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为误差传递函数。

对于随机误差不服从正态分布的, 在实际工程中常习惯采用一个约定概率条件下的极限误差来表征随机误差。各单项随机误差的极限误差 δ_i 表示为

$$\delta_i = \pm K_i \sigma_i \quad (2-26)$$

式中 σ_i 为各误差分量标准偏差

K_i 为各误差分量对应的置信系数。

各单项随机误差合成后总的随机误差极限值为

$$\begin{aligned} \delta &= \pm K \sigma = \pm K \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \\ &= \pm K \sqrt{\left(\frac{\delta_1}{K_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta_2}{K_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta_n}{K_n} \right)^2} = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i}{K_i} \right)^2} \end{aligned} \quad (2-27)$$

对于各单项误差间具有相关性, 则合成总随机误差的标准偏差变为下式

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} \quad (2-28)$$

对于已定系统误差和随机误差, 其合成公式可以表示为

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^p A_i \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i}{K_i} \right)^2} \quad (2-29)$$

式中 δ_i 为随机误差的极限值

2.5.1.2 基于多体系统的精度建模理论

保证定位、夹紧机构的精度目的就是保证激光焦点位置与焊缝之间的位置精度, 研究定位机构精度实际上就是研究定位机构相对于激光焦点位置精度。定位、夹紧机构的特点决定了激光头的机构特点, 对于激光头固定的结构形式, 只需保证定位、夹紧机构的精度即可, 对于激光头运动的结构形式, 必须保证激光头与定位、夹紧机构的相对位置精度, 针对激光头运动的机构特点这里采用基于多体

系统的精度建模理论进行分析。

激光头运动精度受到系统结构、装配精度、伺服系统性能、工艺参数以及外界环境等因素影响。随着对激光拼焊加工材料范围的扩大以及焊接质量的要求不断提高,如何将激光拼头运动误差控制在所追求的目标范围内,是一个需要不断研究的重要课题。关于机床精度建模的研究已经有了较长的时间,发展了多种不同的建模方法。近年来针对复杂机械系统的有误差运动,发展起来了一种多体系统理论。以刘又午及其课题组成员和栗时平等^[134, 144-155]运用多体系统运动学理论对多轴机床建模进行了多方面的研究,取得了相当成效。多体系统理论突破了传统理论的研究思路,不仅在对系统采取了新的描述方法,而且对系统采取了新的误差参数指标体系,因此还有许多研究工作要做。本文的一个重要研究内容就是对多体系统运动学理论进行深入研究和改进,然后在此基础上对激光拼焊生产线进行精度建模。

基于多体系统理论的误差建模方法是将具体的研究对象抽象成一个多体系统,用拓扑结构对多体系统进行高度概括和提炼,用低序体阵列描述多体系统拓扑结构,用特征矩阵表示多体系统中间体的相对位置和姿态^[134, 145, 147]。

拓扑结构是对多体系统本质的高度提炼和概括,描述多体系统拓扑结构的方法有两种,一种是基于图论的描述方法,一种是用低序体阵列进行描述的方法^[89]。本文采用第二种方法。

任设一个多体系统,设定惯性参考系为 B_0 体,选一体为 B_1 体,然后沿远离 B_1 体的方向,按自然增长竖列,从一个分支到另一个分支,依次进行编号。可以得到描述多体系统拓扑结构低序体阵列的公式如下所示^[89]

$$L^n(j) = i \quad (2-30)$$

式中, L 为低序体算子,并称体 B_j 为体 B_i 的 n 阶高序体。它满足

$$L^n(j) = L(L^{n-1}(j)) \quad (2-31)$$

且 $L^0(j) = j$

$$L^0(0) = 0$$

当 B_j 为 B_i 的相邻体,有

$$L(j) = i$$

根据以上定义,可以算出任何一个多体系统的各个低序体阵列。

首先建立广义坐标系,即在惯性体 B_0 上建立静坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$,在典型体 B_i 与 B_j 上分别建立自己的动坐标系 $O_i-x_iy_iz_i$ 和 $O_j-x_jy_jz_j$ 。这样相邻体之间的位置和姿态等价于相邻坐标系之间的相对位置关系。用 4×4 齐次矩阵描述空间点在各个坐标系

中静止和运动位置变换, 其中描述误差的齐次矩阵称为误差特征矩阵。

多体系统中各体之间存在相对静止和相对运动两种状态, 而相对静止状态可以看成是一种参数不变的特殊运动, 因此这里只需讨论两种基本的运动形式: 平动和转动。

任意平移运动可以分解为沿 x 、 y 、 z 轴的基本平移运动。如图 2-16 所示, 坐标系 $O_i-x'y'z'_i$ 由 O_i-xyz_i 沿矢量 $P=x_i+y_j+z_k$ 平动得到, 则 $O_i-x'y'z'_i$ 至 O_i-xyz_i 的变换矩阵为

$$H = \text{Trans}(x, y, z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i \\ 0 & 1 & 0 & y_i \\ 0 & 0 & 1 & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-32)$$

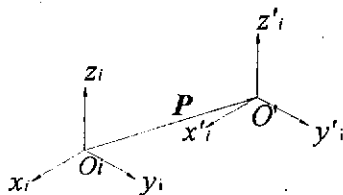


图 2-16 沿矢量 P 平移运动

Fig 2-16 Linear transformation in vector P

多体系统中典型体相对其相邻低序体的理想转动等价于典型体所固连的坐标系相对于相邻体所固连的坐标系转动。任何复杂的转动都可以分解成绕 x 、 y 、 z 三个轴的转动。例如, 坐标系 $O_i-x'y'z'_i$ 分别绕 O_i-xyz_i 的 x 轴转动的坐标变换矩阵为

$$\text{Rot}(x, \alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-33)$$

式中, α 称为坐标系 $O_i-x'y'z'_i$ 相对于 O_i-xyz_i 的欧拉角。

当相邻体之间既有平动又有转动时, 用合成运动特征矩阵表示如下

$$T_{ij} = T_{ij}(R)T_{ij}(M) = \begin{pmatrix} c\beta_{ij}c\gamma_{ij} & -c\beta_{ij}s\gamma_{ij} & s\beta_{ij} & x_{ij} \\ c\beta_{ij}s\gamma_{ij} + s\alpha_{ij}s\beta_{ij}c\gamma_{ij} & c\alpha_{ij}c\gamma_{ij} - s\alpha_{ij}s\beta_{ij}s\gamma_{ij} & -s\alpha_{ij}c\beta_{ij} & y_{ij} \\ s\beta_{ij}s\gamma_{ij} - c\alpha_{ij}s\beta_{ij}c\gamma_{ij} & s\alpha_{ij}c\gamma_{ij} + c\alpha_{ij}s\beta_{ij}s\gamma_{ij} & c\alpha_{ij}s\beta_{ij} & z_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-34)$$

式中, $s=\sin$, $c=\cos$, 下同。矩阵 T_{ij} 称为体间理想运动特征矩阵, $T_{ij}(R)$ 称为体间旋转运动矩阵, $T_{ij}(M)$ 为体间平动运动矩阵。

公式(2-34)是在理想情况下的运动矩阵, 对于实际的机床, 例如本文所研究的激光拼焊生产线, 当激光头沿着 x 轴运动时, 由于受到热、振动、丝杠运动误差等的影响会使激光头在 x 、 y 、 z 三个方向发生微小的转动和移动误差, 从而导致激光光斑的实际运动轨迹与理想发生偏移。

任意两个物体之间存在 6 个自由度, 因此在实际条件下, 两个物体具有相对运动时会在 6 个自由度方向上产生误差 (图 2-17): Δx_{ij} 、 Δy_{ij} 、 Δz_{ij} 、 $\Delta \alpha_{ij}$ 、 $\Delta \beta_{ij}$ 、 $\Delta \gamma_{ij}$ 。其中, Δx_{ij} 、 Δy_{ij} 、 Δz_{ij} 为沿 x 、 y 、 z 轴的平动误差, $\Delta \alpha_{ij}$ 、 $\Delta \beta_{ij}$ 、 $\Delta \gamma_{ij}$ 为绕 x 、 y 、 z 轴的转动误差。根据以上 6 个基本运动误差可以得到运动误差特征矩阵为

$$\Delta T_{ij} = \Delta T_{ij}(R) \Delta T_{ij}(M) = \begin{pmatrix} c\Delta\beta_{ij}c\Delta\gamma_{ij} & -c\Delta\beta_{ij}s\Delta\gamma_{ij} & s\Delta\beta_{ij} & \Delta x_{ij} \\ c\Delta\beta_{ij}s\Delta\gamma_{ij} + s\Delta\alpha_{ij}s\Delta\beta_{ij}c\Delta\gamma_{ij} & c\Delta\alpha_{ij}c\Delta\gamma_{ij} - s\Delta\alpha_{ij}s\Delta\beta_{ij}s\Delta\gamma_{ij} & -s\Delta\alpha_{ij}c\Delta\beta_{ij} & \Delta y_{ij} \\ s\Delta\beta_{ij}s\Delta\gamma_{ij} - c\Delta\alpha_{ij}s\Delta\beta_{ij}c\Delta\gamma_{ij} & s\Delta\alpha_{ij}s\Delta\gamma_{ij} + c\Delta\alpha_{ij}s\Delta\beta_{ij}s\Delta\gamma_{ij} & c\Delta\alpha_{ij}c\Delta\beta_{ij} & \Delta z_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-35)$$

式中, $\Delta T_{ij}(R)$ 称为体间旋转误差运动矩阵, $\Delta T_{ij}(M)$ 为体间平动误差运动矩阵。

当 $\Delta \alpha_{ij}$ 、 $\Delta \beta_{ij}$ 、 $\Delta \gamma_{ij}$ 很小时, 有

$$\Delta T_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{ij} & \Delta\beta_{ij} & \Delta x_{ij} \\ \Delta\gamma_{ij} & 1 & -\Delta\alpha_{ij} & \Delta y_{ij} \\ -\Delta\beta_{ij} & \Delta\alpha_{ij} & 1 & \Delta z_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-36)$$

相邻体间的实际运动过程可以看成是先进行理想运动再进行误差运动, 因此多体系统中的体间实际特征矩阵为

$$T_{ij\text{real}} = T_{ij} \Delta T_{ij} \quad (2-37)$$

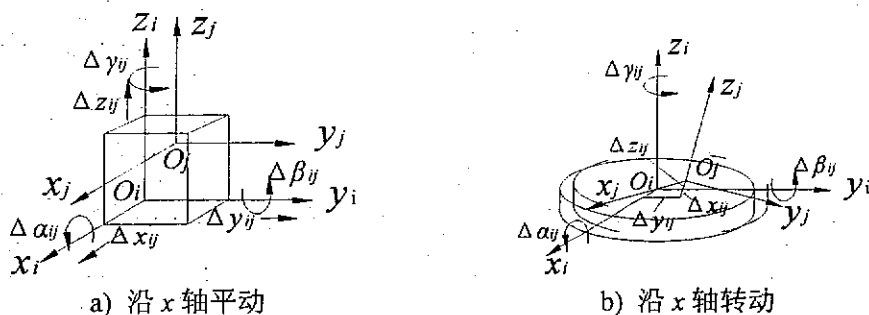


图 2-17 沿 x 轴移动或转动产生的 6 项基本误差

Fig 2-17 Six errors produced during the movement/rotation along X axis

式(2-35)给出了任意两个相邻体之间, 实际运动过程中误差的一般表达式。为了更清楚的描述各个误差源对运动误差的影响, 这里引入误差传递关联函数的概念。

当激光拼焊运动单元中 x 轴与 y 、 z 轴之间不完全垂直时, 激光头沿 x 轴运动时, 在 y 轴和 z 轴方向就会产生位置误差, 这个误差可以通过两个轴之间夹角的余弦来表示。图 2-17 是在实际情况下, 理想运动轴与实际运动轴之间的关系图。图 2-17 中, 假设实际的 x 轴与理想的 z 轴相互重合, 实际的 x 轴与理想的 x 轴以及实际的 y 轴与理想的 y 轴都存在偏差。在图 2-17 的假设情况下, 当激光头沿 x 轴运动时, 由于垂直度误差的存在, 它将会在 y 轴和 z 轴方向产生误差。假设激光头沿 x 轴运动距离为 x , 则运动误差矩阵可以表示成如下形式

$$\Delta T_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{ij} & \Delta\beta_{ij} & \Delta x_{xx} \\ \Delta\gamma_{ij} & 1 & -\Delta\alpha_{ij} & \Delta y_{xy} + x \cdot k_{xy} \\ -\Delta\beta_{ij} & \Delta\alpha_{ij} & 1 & \Delta z_{xz} + x \cdot k_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-38)$$

式中, Δx_{xx} 、 Δy_{xy} 和 Δz_{xz} 是基本位置误差; k_{xy} 是 x 轴与 y 轴之间的垂直度误差, k_{xz} 是 x 轴与 z 轴之间的垂直度误差; $x \cdot k_{xy}$ 是激光头沿 x 轴运动距离为 x 时, 由于 x 轴与 y 轴垂直度误差, 在 x 轴方向产生的位置误差, $x \cdot k_{xz}$ 是激光头沿 x 轴运动距离为 x 时, 由于 x 轴与 z 轴垂直度误差, 在 z 轴方向产生的位置误差。

在实际加工过程中, 由于重力、惯性力的作用以及振动等的影响, 机床会发生形变。这些变形将影响激光光斑的位置精度。下面介绍如何用位置误差关联函数将可预测的变形与激光光斑位置误差之间关系进行表示。

如图 2-18 所示, 当激光头沿 x 轴运动时, 由于重力或者其他力 F 的作用, x 轴横梁发生弯曲变形。此时误差矩阵可以表示成如下形式

$$\Delta T_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{ij} & \Delta\beta_{ij} & \Delta x_{xx} + \Delta x_d \\ \Delta\gamma_{ij} & 1 & -\Delta\alpha_{ij} & \Delta y_{xy} + \Delta y_d \\ -\Delta\beta_{ij} & \Delta\alpha_{ij} & 1 & \Delta z_{xz} + \Delta z_d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-39)$$

式中, Δx_d 、 Δy_d 和 Δz_d 是 x 轴横梁分别在 x 、 y 和 z 轴方向上的变形大小, 它们是 F 的函数

$$\begin{cases} \Delta x_d = g_x(F) \\ \Delta y_d = g_y(F) \\ \Delta z_d = g_z(F) \end{cases} \quad (2-40)$$

式中, $g_x(F)$ 、 $g_y(F)$ 和 $g_z(F)$ 是在力 F 的作用下, 横梁在 x 、 y 和 z 轴方向上的变形规律。由式(2-39)和(2-40)可以清楚的描述由于变形引起的位置误差。

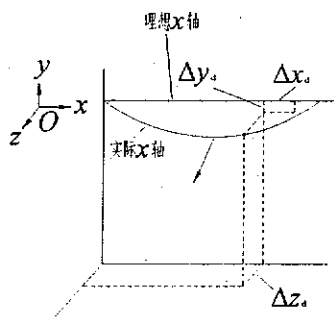


图 2-18 变形引起的位置误差

Fig 2-18 Positioning errors produced by deformation of axis

通过以上的分析, 给出了基于运动轴垂直度误差以及受力变形的误差传递关联函数的表达形式。由式(2-36)、(2-38)、(2-39)和(2-40)可以得到基于位置误差关联函

数的体间运动误差矩阵的一般表达式为式(12)所示

$$\Delta T_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{ij} & \Delta\beta_{ij} & f_x \\ \Delta\gamma_{ij} & 1 & -\Delta\alpha_{ij} & f_y \\ -\Delta\beta_{ij} & \Delta\alpha_{ij} & 1 & f_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-41)$$

式中, f_x 、 f_y 和 f_z 是位置误差关联函数的一般表达形式。它们反映了在运动过程中, 各个误差源对位置误差的影响规律。例如, 在式(2-38)中, $f_y = \Delta y_{xy} + x \cdot k_{xy}$; 在式(2-39)中, $f_y = \Delta y_{xy} + g_y(F)$ 。式(2-38)和(2-39)分别只考虑了垂直度误差和变形的影响, 在实际中, 误差关联函数受到多个因素的影响, 可以表示成式(2-42)所示形式。

$$f_k = f_b + f_s + f_d + f_t + f_v + \dots \quad (k=x, y, z) \quad (2-42)$$

式中, f_s 表示在运动过程中, 垂直度误差对位置精度的影响函数, f_d 表示在运动过程中, 变形对位置精度的影响函数, f_t 表示在运动中, 温度变换对位置精度的影响函数, f_v 表示在运动中, 振动对位置精度的影响函数。式(2-42)是位置误差关联函数的一般表达式。

2.5.2 定位机构适应性和柔性

激光拼焊不仅仅是实现大尺寸板材焊接, 还要将尺寸较小形状各异的板材焊接在一起。评价定位、夹紧机构的柔性和适应性主要通过以下几个指标:

1. 对焊缝最大长度适应性
2. 对板材形状适应性

2.5.3 定位、夹紧机构效率

激光拼焊定位、夹紧机构直接影响着生产效率, 如公式(2-43)所示, 激光焊接效率主要由焊接部分工作时间决定。而 $t_{\text{焊接}}$ 和 $t_{\text{非焊接}}$ 受到定位、夹紧、对中和下料等时间约束, 在激光拼焊中定位、夹紧和对中时间与焊接时间之间的关系决定了焊接效率, 一般激光拼焊焊接效率最大为 60% 左右, 而连续激光拼焊焊接定位、夹紧机构采用了功能分离的思想, 效率可以接近 100%。

$$r = \frac{t_{\text{焊接}}}{t_{\text{非焊接}} + t_{\text{焊接}}} \quad (2-43)$$

2.6 本章小结

本章是全文的理论基础, 首先提出了基于构形的激光拼焊装备定位、夹紧机构设计方法, 通过对国内外经典激光拼焊定位、夹紧机构的构形进行分析和综合, 建立基本构型库, 根据设计目标进行设计。研究了碾压预成形基本原理, 并提出