

分类号 _____

学号 M201070494

学校代码 10487

密级 _____

华中科技大学

硕士学位论文

二维激光切割路径优化研究

学位申请人：孙鑫

学科专业：机械工程

指导教师：饶运清 教授

答辩日期：2012年05月18日

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering**

**Research on Path Optimization of Two
Dimension Laser-Cutting**

Candidate : Sun Xin

Major : Mechanical Engineering

Supervisor: Professor YunQing Rao

Huazhong University of Science and Technology

Wuhan, Hubei 430074, P. R. China

May, 2012

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的
研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个
人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，
均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有
权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和
借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据
库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 ☐ 保密，在_____年解密后适用本授权书。
☐ 不保密。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月

摘要

激光切割以其切割范围广、切割速度快、切缝窄、热影响区小等优点被广泛的应用于到各种加工领域，是激光加工中比较成熟的技术之一。为了提高激光切割的效率和切割质量并有效的降低切割成本，本文对激光切割相关工艺进行了深入的研究。

本文首先介绍了课题的背景、意义及其在国内外的发展的现状，其次论述了常用切割方式的分类，激光切割技术的基本原理，并阐述激光切割板材的工艺处理技术，包括路径的优化、切割引入引出线的设置、辅助切割路径的合理安排、尖角处理技术等。本文主要研究在两种不同切割条件下的激光切割路径优化问题。

针对数控激光切割机在切割零件时，会出现大量空行程问题，提出了一类基于最短路径的优化算法。该算法首先使用零件形心位置来表达其在板材中的位置，将确定轮廓切割顺序问题转化为旅行商问题，用遗传算法求解得到零件切割顺序，再用传统的启发式算法确定切割起点。最后通过实例有效验证了算法的有效性，切割空行程减少 11.77%。

由于激光割嘴经过板材已经切割区域时可能与板材碰撞导致损坏，针对该问题本文提出了割嘴碰撞避让算法，该算法首先用按列连续或者按列折返的规则确定零件的切割顺序，然后通过基于启发式搜索方法的切割起点优化算法使激光割嘴尽量避开已经切割的区域，最后通过路径避让方法确保割嘴不经过板材上已经切割的区域。采用该算法对 40 个零件切割路径规划，实验结果表明该算法能够完全避免割嘴与零件发生碰撞，路径最大优化比例为 38.32%。

本文研究了激光切割路径规划中两个关键问题，提出最短路径优化算法和激光割嘴防碰撞算法，通过算例验证算法的有效性，实验结果表明本文所提出的算法有着较高的效率，具有较强的实用性。

关键词：激光切割，路径优化，碰撞避让，遗传算法

Abstract

Laser cutting is one of the most widely applied cutting technologies in the manufacturing industry because of its wide range, high speed, narrow kerfs and small heat-affected zone. In order to improve the efficiency, quality, and cost, the laser cutting process is further studied in this dissertation.

First, the significance of the topic and the domestic, foreign research status, frequently-used cutting technologies and mechanisms in laser cutting are introduced. And the technological treatments of laser cutting for sheets are discussed, including setting up lead-in and lead-out lines, arranging auxiliary cutting path, the treatment in cutting sharp corners and so on. In this paper we consider the problem of path optimization for laser cutting with two different constraint cutting conditions.

For the idle stroke problem in laser cutting, an algorithm to optimize the cutting path is presented. At first, centroid coordinates are used to express part positions, which transforms the problem into a Travelling Salesman Problem, so that the best cutting sequence can be got by genetic algorithm. Then traditional heuristics methods are adopted to determine the piercing point of each contour. Computational experiments show that the idle stroke is reduced by as much as 11.77%.

To avoid the torch falling down into the finished cut cavity during its vacancy course, a collision-avoiding algorithm is presented. Firstly, two local search heuristics algorithm are used to determine the cutting sequence. Secondly, make sure that the torch has travelled through the cut area as few as possible. Finally, the former path is adjusted to totally prevent collisions. Experimental results demonstrate that the algorithm can completely avoid the cutting collision. The largest path optimization is as high as 38.32%.

Two key problems in laser cutting path planning are studied in this dissertation, for which a shortest path optimization algorithm and a collision-avoiding algorithm are presented, whose effectiveness is tested in computational trials. The experimental results show that proposed algorithms have high efficiency and strong practicability.

Key words: Laser cutting, path optimization, collision-avoided, genetic algorithm

目录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论	
1.1 课题来源及背景	(1)
1.2 激光切割工艺优化的研究综述	(2)
1.3 本文主要内容与组织结构.....	(5)
1.4 本章小结	(6)
2 激光切割工艺概述	
2.1 制造业中常用的一些切割技术	(7)
2.2 激光切割技术.....	(11)
2.3 激光切割工艺研究.....	(14)
2.4 本章小结	(17)
3 基于空程最短的切割路径优化	
3.1 模型的提出.....	(18)
3.2 最短路径优化算法.....	(21)
3.3 实验验证	(26)
3.4 本章小结	(30)
4 基于碰撞避让的切割路径优化	
4.1 问题的提出.....	(31)
4.2 防碰撞避让算法	(33)
4.3 实验验证	(41)
4.4 本章小结	(46)

5 总结与展望

5.1 全文总结 (47)

5.2 展望..... (47)

致 谢..... (49)

参考文献..... (51)

1 绪论

1.1 课题来源及背景

1.1.1 课题的来源

江苏省科技攻关项目《板材下料优化与生产管控软件系统》(项目编号 BE201070)。

1.1.2 课题的背景

1960 年,美国科学家 T.H.Maiman 研制出世界第一台激光器,此后激光相关产业飞速发展。激光切割技术首先应用于零件切割是在 20 世纪 70 年代的中后期,随着经济的发展,对各种零件的需求越来越大,对零件的精度要求也变得越来越高的,这就必然需要一种新的零件的切割方式,使零件的生产率大幅度提高以满足市场的需求,同时这种新的生产方式也能很大的提高零件的切割精度。当前金属零件的生产过程,首先得用切割机在钢板上切割零件轮廓得到零件毛胚,目前切割板材的方式主要有等离子切割^[1],火焰切割^[2],水刀切割^[3]和数控激光切割,激光切割方式是近些年来比较先进的切割方式,其他几种切割方式已经得到的非常广泛的应用,切割技术已经非常的成熟,但是这几种切割方式得到的零件精度与激光切割相比有一定的差距,可以将它们划分为粗加工的范围,一般来说,这几种方式切割得到的零件大都需要再次精加工后才能投入使用。自从第一台激光器产生后,人们越来越重视将激光应用于生产加工的方面,经过国内外学者的潜心研究,激光加工技术得到了很好的发展,可用于激光加工的对象广泛,在加工的过程中采用的是非接触式加工因此工件的变形很小,而且加工的精度高,对提高生产效率和改善产品质量有很大的帮助。近些年来,激光加工业在整个产业中占了很大比例,并且还有不断上升的趋势。在激光加工中,激光切割又是应用的最早,被广泛使用的加工方式,日本拥有大约占据全世界激光加工机总量三分之一的产量,在这些激光加工机中大约有 80%的为激光切割机,并且日本自上世纪末年生产激光加工机的产量每年都在不断的增加。随着改革开放的进一步发展,国民经济飞速的发展,市场的竞争加剧,传统的加工方式已经不能在竞争日益激烈的制造业很好立足了,传统的制造产业需要改造升级,必然要将激光切割等先进的生产方式引入生产线,从而提高企业竞争力。因此激光切割机在未来板材切割加工领域将占有越来越大的比例,市场前景广阔,虽然激光切割跟等离子切割和火焰切割等有相似之处,但是激光切割有自己的特点,能够应用于等离子和火焰等切割的软件在激光切割上就不能完全合适了,目前专门针对激光切割工艺优化的研究比较少,因此,此课题的研究很有必要。

1.2 激光切割工艺优化的研究综述

研究激光切割路径优化问题时首先须得研究多种不同形状的零件在板材上的排样问题，然后在排好样的前提下根据激光切割的特点找出最优的切割路径和合适工艺处理。二维不规则图形排样问题就是给定的板材上将一系列形状各异的零件排放在其上，找出对板材利用率最高的零件的排布，从而达到节约材料，提高经济效益的目的。理论而言，复杂性很高的二维不规则排料问题属于 $NP^{[4][5][6][7]}$ (Nondeterministic Polynomial) 问题，有着很大的难度，目前国内外学者在优化排样的研究上取得一定成就，提出了很多的解决方法，具体可以归纳为四个方面：启发式算法^{[8][9][10][11][12]}，数学规划法^{[13][14]}，临界多边形算法^{[15][16][17][18]}，人工智能优化算法^{[19][20][21]}等算法。

在一块钢板上同时切割多种零件是在已经经过优化排样的板材上进行的，零件排样完后板材的利用率得到极大的提高，然后就是如何在已经排好样的板材上切割出各个零件的问题，如果在零件排样完，切割零件的时候如果切割不能有效的缩短零件的切割路径，那么零件的生产率也就得不到提高，研究零件优化排样的意义也就显现不出来。因此，我们必须对零件的切割路径进行优化以达到提高生产率的目的。激光加工的成本比等离子和火焰切割要高出很多，激光切割工艺优化研究的一个重点就切割路径的优化；激光切割机在切割零件时割嘴移动到钢板合适的位置需要先打孔，在切割过程中，切割方法不同，打孔点的数目就不同。打孔需要耗费一定的时间，选择合理的打孔点数目能减少切割时间，降低切割成本；激光切割能产生很高的温度，特别是在零件的尖角处，如果不考虑尖角处理，容易导致热量集中引起烧损，使尖角过热熔化，因此激光切割时需要考虑尖角处理，设置辅助路径。当然对于具有零件排样上有共边情况的，在激光切割时优先考虑共边切割。在板材中排好样的零件都是封闭轮廓的，所以轮廓轨迹可以用一个封闭的图形表示，这个封闭轮廓的轨迹是激光切割时激光割嘴必须的走的轨迹，所以要想整个激光切割路径最短，只能努力缩短激光割嘴的空行程路径，在分析路径优化的问题可以不用考虑零件的轮廓轨迹，只需要在轮廓中取一点作为切入和切出点，这一点表示激光切割的起点和终点，待加工的零件轮廓就变成了求一系列点集的最短路径问题，此路径问题又可以归结为求解旅行商问题。目前，旅行商问题有很多求解的方法。在激光切割工艺优化问题上，最主要的就是解决加工路径的优化问题。对此，国内外进行了大量的研究。

早在 1975 年的时候 J.K. Lenstra 和 A.H.G Rinnooy Kan^[22]两人就提出来将旅行商问题应用在电脑布线，车辆路径的规划，车间调度等问题，将科学研究应用与生活实际，并且建立了 TSP（旅行商问题）的应用与相应问题的简单模型方程，并且求解的方法，

取得了不错的结果。

1984 年 U.Manber 和 S.Israni^[23]解决了在等离子火焰切割中的打孔点最少化和切割路径优的问题，在一块已经排好样的板材上，他们找到了一条相对最优的切割加工路径，这条路径既保证了有最少的打孔点，有保证了整个加工路径的相对最短，从而在一定程度上节约了加工时间和降低了生产的成本，但是他们没有考虑到板材待切割零件包含内孔的情况。

1985 年 V. Cerny^[24]采用热力学中退火的原理来解决 TSP 问题，首先用蒙特卡洛算法找出旅行商问题的近似最优解，该算法是根据旅行商问题相应的路径长短来随机产生旅行商问题解的不同的排列组合，然后利用统计热力学中的玻耳兹曼吉布斯分布中的概率函数来对这些解的序列进行类比来获得最优的解。这个相对简单的而有效的算法能够找到刀具切割路径的与最优解非常接近的解，甚至就直接能找到最优解。并且他用几个例子证明这种算法的有效性。对于复杂度大的旅行商问题，有时候要获得用于比较的近似解，仍然需要很长的计算时间，于是 J. J. Hopfield 提出了在最优解问题神经网络选择法，能够在极短的神经元时间内获得近似最优解，充分显示了采用集成网络方法的力量和速度，能够处理实际问题提供思路。

由于 Garey 和 Johnson^[25]在 1979 年就指出了 TSP(旅行商问题)是一个 NP 难问题，所以对于大规模的求解最优解问题运用一般的算法是不切实际的，耗费大量的时间还未必能达到理想的解，但是小规模的问题可以采用启发式算法来获得近似最优解。于是 Rob A. Rutenbar^[26]在 1989 提出了用模拟退火算法解决复杂优化的问题的构想，利用一个简单的例子说明了模拟退火算法所包含的几个关键的部分。

1991 年 J.A. Blanda 和 G.P. Dawson^[27]采用禁忌搜索算法在重点考虑路径最短的影响下成功的解决一些组合的优化问题。

1999 年 Guk-chan Han 和 Suck-joo Na^[28]提出用模拟退火算法来解决激光切割板材的路径优化问题，首先对一个包含内孔的复杂零件建立一个数学模型，考虑最短路径和激光切割加工所产生的热效应对零件质量的影响，确定两个目标函数。用模拟算法求得的目标函数的最优解满足如下条件：一是在切割零件的轮廓是最短的，同时还必需保证切割零件轮廓的时候尽量减少温度的累积避免零件产生过热。最后用几个实例证明的算法的有效性，在适当的时间获得了全局最优解。

2002 年徐路宁，王霄等^[29]通过对现有的激光切割工艺的深入研究的基础上对激光切割加工板材的工艺处理进行了进一步的探讨，包括怎样设置引入线、引出线，怎样合理的安排辅助切割路径，在考虑热效应情况下的切割路径优化和零件在板材上优化排样以及激光切割加工参数的优选等等，结合计算机的应用，实现计算机辅助工艺设计^[30]。

同年, Kenneth Castelino^[31]用启发式算法对在机械加工中的非常加工的路径进行优化, 对于不同的问题都能获得一定程度的优化。

2004年刘会霞,王霄等提出了用分级规划的三步算法来解决激光切割路径优化问题, 首先用改进的最近邻算法选择打孔点; 然后用智能的仿生算法—蚁群算法来求解激光切割机割嘴最佳路径; 最后根据Z轴随动功能对割嘴的约束情况,用割嘴路径调整算法来调整前两步算法确定的最佳路径,并获得最终割嘴最佳路径,作者给出了运行实例并指出进一步的研究工作。。

2005 年冯爱新^[32]等在遵循路径优化原则的基础上, 研究了少无废料激光切割板材的两个关键技术, 将排样技术和路径优化算法相结合, 研究了激光切割的一些关键的编程技术, 使得材料的利用率大大的提高, 切割板材所用的时间明显的缩短, 零件的切割生产率得到了提高。

高伟增, 张宝剑^[33]等首先将切割路径的求解简化成点与点之间距离的求解并给出了数学模型, 然后用遗传算法求解点与点之间的相对最优路径。

李建涛, 黄星梅^[34]等首先从全局考虑对二维矩形零件的切割顺序进行优化以确保总体的空行程路径最短, 再通过采用连续切割和共边切割对局部路径进行优化, 最后达到缩短切割空行程和防止零件过热变形的目标。

2006 年俞武嘉, 傅建中^[35]等为缩短数控切割时间和提高切割效率, 他们提出基于遗传算法的切割路径优化方法。该方法首先对数控切割代码进行分析, 将切割路径分解切割零件的路径和空行程路径(包括切割辅助路径), 根据切割的类型又可以将切割零件的路径进一步划分为封闭式切割路径和开放式切割路径。对于这两种不同的切割路径采用不同的编码方法进行编码, 最后采用改进的遗传算法, 分别对前两种切割路径进行优化计算, 从而得到一条相对最优的切割路径。

2007 年王书文, 黄星梅^[36]把相同尺寸的矩形块组合成一个整体, 然后对进行整体优化排样, 在切割路径的优化上采用连续切割、共边切割并结合遗传算法的方法, 提出了一种矩形组合体的切割技术, 有效的解决了在切割矩形零件时的板材浪费、切割效率低的问题。最后通过实验用算例表明, 该切割方法既能很好地满足工艺要求, 又可以使切割路径得到优化。

李泳, 张宝峰^[37]为了解决复杂轮廓激光切割路径优化问题, 他们根据图论的一些知识, 将切割路径优化问题转化为广义旅行商问题, 他们首先构造了一个能够反映板材上零件位置关系的树形结构, 这个树形结构也同时反应了零件外轮廓切割的顺序, 然后按照树形结构以切割起点为搜起点按照激光切割原则依次确定各个零件轮廓的切割起点, 形成激光切割的路径, 并通过实验来验证本文所提算法的效果。实验结果表明, 文中所

提算法可将激光切割空行程距离缩短 10% 以上,很大程度上提高了激光切割的效率和质量。

2009 年 Cuneyt Oysu 和 Zafer Bingulto^[38]提出一种混合的算法来解决刀具空程时间最短的刀具路径优化问题,在文章中他们指出,一般的启发式算法,像模拟退火算法,遗传算法,混合算法(遗传算法和模拟退火算法结合的一种算法),这些算法被广泛的应用在以减少刀具空行程时间为目的路径优化问题。但是像对初始解有很强忍耐性的模拟退火算法在刀具路径优化的过程中由于初始解选取不同最后所获得的解并不一定是最优解。作者在文章中提出的算法是遗传算法和模拟退火算法相结合,首先用遗传算法获得一组模拟退火算法运行时候所必需的相对最优的初始解,然后模拟退火算法用前面得到的初始解进行计算就能获得一个比较好的解。为了对比效果,作者将这种混合算法和另外两种单独的算法所获得最优解分别在三坐标数控机床上进行对比实验,最后结果表明,混合算法所得到的结果比标准的遗传算法所得到的结果在最短路径的解上减少了 1.5%,比标准的模拟退火算法所得到的最短路径减少 47%。

2010 年李妮妮^[39]等提出了一种新的算法来解决激光切割路径优化问题,这种算法是将局部搜索法与遗传算法相结合的算法,能够使加工效率有很大的提高,加工时间也有很大的缩短。该算法是用局部搜索法对从加工轮廓中提取的节点进行局部的路径优化,近似的最优解可以再运用遗传算法获得,基于适应度的轮盘赌选择算子可以由遗传算法中的选择算子改进得到。

以上按照时间的顺序介绍了在切割路径求解上的一些经典算法,并简单介绍了每一种算法进行路径优化的思路,并对算法的效果进行了分析比较。在工程实践中,由于问题的复杂性和特殊条件的约束,我们无法确定在以上介绍的众多路径求解算法中到底那一种是最优的,应该根据工程实际中问题的特点来选择一种合适的算法来求解切割路径。

1.3 本文主要内容与组织结构

激光切割精度高,切割出来的产品质量可靠,切割速度快,特别是自从上世纪 80 年代以来,激光切割技术与计算机数控技术的相结合,让激光切割技术在当前的制造业中占据很大的优势,但是激光的切割成本比普通的切割机要大很多,为了降低成本,本文根据激光切割工艺的特点对切割工艺进行优化,分别从激光割嘴的空行程最短路径和减少割嘴在切割时抬起的次数,减少切割时间,避免割嘴因碰撞而损坏等方面对激光切割路径进行规划设计,本文研究的主要内容如下:

第一章首绍了课题的来源,表明课题的研究的实际价值,然后介绍解决板材排样问

题的一些常用算法，并阐述了本文研究的基础；最后总结了近年来国内外学者对相关课题的研究所取得的成果。

第二章主要介绍激光切割技术的相关知识。首先对工业上切割技术分类，比较几种常用技术的特点；然后介绍了激光切割的原理、激光切割系统的主要组成部分、激光切割的几种不同的方式、激光切割机系统的主要参数；最后研究了激光切割时的工艺，主要内容包括切割路径优化、切割引入引出线和如何切割零件轮廓尖角部分。

第三章首先介绍了激光切割板材所遵循的几大原则，提出零件用几何图形简化表达模型，建立空行程最短路径求解模型。然后根据先定切割顺序再确定打孔点位置的原则确定切割轨迹。最后实验进行验证算法的效果。

第四章开始介绍了激光切割机的随动系统，根据这个系统的特点，提出了激光切割机割嘴的防碰撞算法的研究。在本章为了简化计算，也是采用先确定板材上零件的切割顺序，后确定切割起点的原则，采用两种不同特点的排序算法：一是考虑到防碰撞算法的特点采用按列连续的规则对板材上的零件进行排序；二是考虑到激光切割热效应，防止零件尖角因为过热而烧毁的按列折返的规则排序。在确定零件的切割起点时首先采用两步搜索算法初步确定切割起点，然后对切割路径进行局部调整，最后对于仍旧无法满足条件的轨迹采取绕行零件避让的措施，并用两种排序的算法实例来验证了算法的有效性。

第五章总结全文的内容，并提出了研究还可以改进的地方，并提出未来在本课题方面可进一步深入研究的方向。

1.4 本章小结

本章首先介绍课题的来源，结合实际介绍了本课题的研究背景，通过对大量相关文献的阅读，阐述课题方面国内外的研究成果，并分析比较国内外学者在解决与本课题相关的课题的时候采用的不同方法之间的区别，最后说明本文所做的研究工作。

2 激光切割工艺概述

2.1 制造业中常用的一些切割技术

2.1.1 切割方法的分类

在现在制造业中，切割技术具有很大的应用量，是应用范围相当广泛的加工基础工艺之一，特别是机械行业和电子行业，切割加工占据整个产品工艺的较大的比重，在整个产品的成型过程中起着相当重要的作用，切割技术的好坏直接影响着制造企业的生产成本，生产出产品的效率和质量跟在切割时的效率和质量密切相关。

金属加工中，切割的方法有很多种，按照不同形式可以有多种分类，在切割时可以使用不同的能源，如光能，化学反应，电能，动能，机械能等，还可以使用两种或者两种以上的混合能源，如氧气辅助气体的激光切割，这种切割方法在切割金属板材是既使用了氧化反应的热能，有使用了激光的光能。根据使用不同的能源可将切割分为如下几类，如图 2.1 所示：



图 2.1 切割分类

2.1.2 几种常用的切割方法比较

在当前的制造业中，由于受到成本，切割效率和切割条件等方面的限制，主要采用

的是热切割方法，其他切割方法一般都用于特定的场合。在热切割方法中被广泛使用的切割方法主要有三种：等离子弧切割，氧气切割和激光切割。这三种常用的切割技术，都有各自的优点。

氧气切割是利用金属在氧气的燃烧的化学反应和反应产生的热能来完成切割的方法。氧气切割是一种古老的热切割技术，世界上第一把氧乙炔割炬在 1900 年就被制造出来了，直到现在氧气切割仍然是机械制造中的一种常用的切割技术。氧气切割的具体过程是：首先用火焰将钢板加热到燃点，再向钢板的加热点喷射高能量的氧气，让割缝处的钢与喷射氧气发生化学反应产生熔渣(铁的氧化物)，高能量的氧吹走切口处的氧化物。氧气切割时，所选择的气体种类不同，所能切割钢板的厚度，需要预热的次数就不同。乙炔为氧气切割过程经常选用的气体，在以电石为原料的乙炔生产过程中，产生了大量有毒有害气体，严重污染环境。近些年通过研究，采用新型工业燃气代替乙炔用于火焰切割，并且与这种新型燃气配套的割炬种类齐全，使得采用手工割炬切割的钢板厚度达到 350mm，机用割炬的厚度更是达到了 1800mm，氧气的切割过程见下图 2.2 所示。

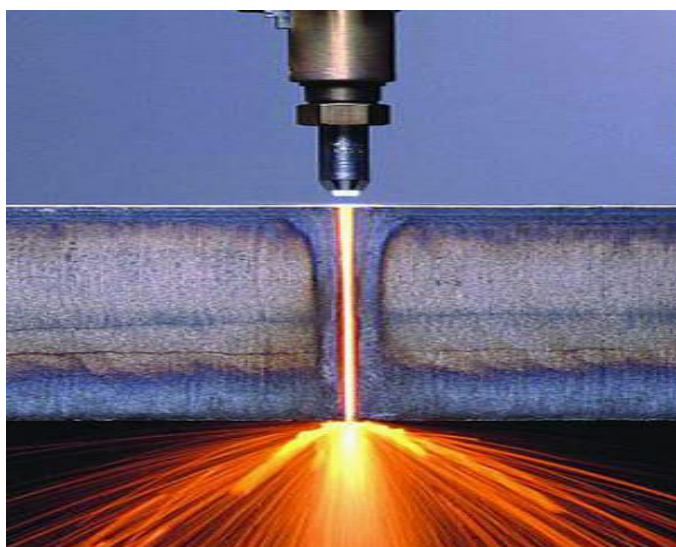


图 2.2 氧气切割

等离子切割是用高能量密度，高速高温的等离子流作为热源进行切割的一种热切割技术。这种高能量密度，高速的等离子是利用小孔径喷嘴压缩产生的，这种通过喷嘴的等离子具有高能量密度的是机械压缩效应、热收缩效应、磁收缩效应综合作用得到的。在这三种压缩效应的共同作用下，等离子体的温度能够达到 11000~28000℃，而且等离子喷出喷嘴的速度远远高于声速，大约为 800~2000m/s，当这种高速高温的等离子作用在待切割钢板表面时，高温熔化钢板，并将熔渣从钢板吹离，完成切割。普通的等离子切

割机可以切割厚度为 30mm 以下的金属板材；精细的等离子切割机可以切割厚度为 12mm 以下，割缝宽度仅为 0.65~0.75mm，等离子切割过程见下图 2.3 所示。



图 2.3 等离子切割

激光切割是通过激光发生器产生的高能量密度的激光束对工件表面的照射，工件受到激光照射的表面激光作用点处的材料迅速熔化、气化或者燃烧导致材料分离，同时产生的熔渣和激光光束同轴的高速辅助气流吹走，最终在工件上形成割缝，从而达到切割的目的。目前国际上最先进的激光切割机的切割速度达到 20m/min 以上，割嘴的空程运动速度可达 250m/min，定位的精度达到 0.01mm/500mm。在切割直径为 10mm 厚度为 1mm 的圆孔时，如果采用激光切割机，每分钟能切割出直径误差不大于 50 μ m 的小孔 500 多个，实现了真正意义上的高速高精度切割。激光切割的过程见下图 2.4 所示。随着科技的发展，用于产生激光的激光发生器的功率也在逐渐增大，激光切割机所能切割板材的厚度也在增加，激光切割正从轻工业的薄板切割向重工业的厚板切割方向发展，也使得激光切割适用的范围越来越广。



图 2.4 激光切割

以上介绍的三种制造业常用的切割方法所采用的切割能源不同，他们切割板材所得到的产品的质量和切割精度也各不相同。

氧气切割技术是较早使用的切割技术，其切割设备相对于其他的切割简单，而且便于操作，切割出来的产品能够达到一定的质量要求，能够切割最大厚度达到 4m 的板材，是目前能切割超厚板材为数不多的切割方法，但是氧气切割的速度一般较低，尺寸精度也不够高，不适合精密切割，氧气切割时板材的变形相对较大，经过前人用以上三种切割方法切割板厚 12mm，直径 100mm 孔的材料受热量实验得到的资料(见下表 2-1)所知，氧气切割板材时，板材的受热量最大，相比来说激光切割的受热量最小。

表 2-1 材料受热量比较

切割方法	切割条件	温升平均值 (°C)	吸热量 (KJ)	单位吸热量(J/mm ²)
氧气切割	气流 3.4L/min 割速 420mm/min	183.0	85.3	22.53
等离子切割	电流 150A 割速 2150mm/min	75.0	28.2	7.33
激光切割	功率 3000KW 割速 900mm/min	56.8	15.3	4.09

上面表 2-1 中也可以看出，等离子切割的速度是以上三种切割方法中最快的，同等条件下，等离子切割板材变形比氧气切割要小很多，但是等离子切割的切割宽度也比较大，切割面的垂直度不高，切割的最大厚度也不如氧气切割，并且只能切割能导电的板材；相比之下，激光切割既能够切割金属板材，也能够切割非金属板材，切割板材时，板材的热变形小，切口的宽度小，切割精度高，切割速度也快，对环境的污染也小。下表 2-2 是激光切割与等离子弧切割的性能比较。

表 2-2 等离子切割与激光切割性能比较

	等离子切割	激光切割
切割材料	金属	金属，非金属(陶瓷，橡胶)
切割精度(mm)	0.2-0.5，有 3°-4°坡度	0.1，无坡度
割缝宽度(mm)	1-3.5	0.2-0.3
切割速度(m/min)	2.5(4mm 板厚)	3.8(4mm 板厚)
热影响区宽度(mm)	0.5-1.5	0.1
表面粗糙度(μm)	6.3-12.5	3.2-6.3

通过以上比较并结合激光特性可以综合得出激光切割的特点如下：

- (1)激光切割割缝小，不浪费材料。
- (2)切割速度快，能提高生产效率。

- (3)激光切割板材时，板材的热影响区域小，板材的变形也小。
- (4)切割范围广泛，不仅能够切割金属板材，还可以切割非金属材料。
- (5)激光切割只需要定位板材，不需要夹紧，非接触式切割，无刀具磨损。
- (6)产品质量好，精度高。

随着计算机数控技术的发展，激光切割机技术与计算机数控技术相结合的数控激光切割技术，使得激光切割在各种切割技术表现出了很大的优越性，在制造业被使用的越来越广泛。

2.2 激光切割技术

2.2.1 激光切割原理

激光的频谱宽度非常窄，单色性很好，基本上沿着某一直线传播，激光束的发散角很小，并且在单位面积、单位立体角内输出的功率特别大，在激光的焦点处功率的密度可以达到 $10^4\text{kw/cm}^2 \sim 10^8\text{kw/cm}^2$ ，焦点处的温度可以达到上万摄氏度。激光切割正是基于激光的以上特性来进行切割的，它利用激光器发出的高能量高密度光束，经过反射器转向，照射到待切割板材的表面，板材吸收激光束的以及在切割过程中化学反应产生的热量，处于激光焦点处的板材局部被迅速加热，温度迅速上升，焦点处的材料熔化形成了孔洞，激光束的焦点在板材上连续变化，于是板材上就形成了割缝，材料受热熔化形成的熔渣被与激光束同轴的切割辅助气体吹走，最终完成板材的切割。见下图 2.5 激光切割原理图。

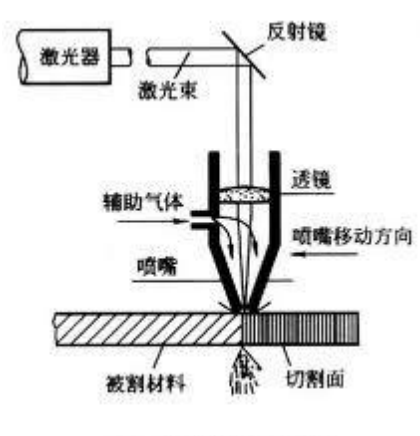


图 2.5 激光切割原理图

2.2.2 数控激光切割系统的组成

目前激光切割机多与计算机数控系统结合组成数控激光切割机来切割工件，数控激光切割机主要由激光器，激光切割机主机，激光器的电源系统，计算机数控系统，光路传递系统，冷却系统等组成，见下图 2.6 所示，其中激光切割机主机是由工作台，机床底座，割嘴，Z 随动系统等部分组成，作为数控激光切割机关键部件的激光器和传递激光的外光路系统，它们的性能指标直接影响着切割质量。

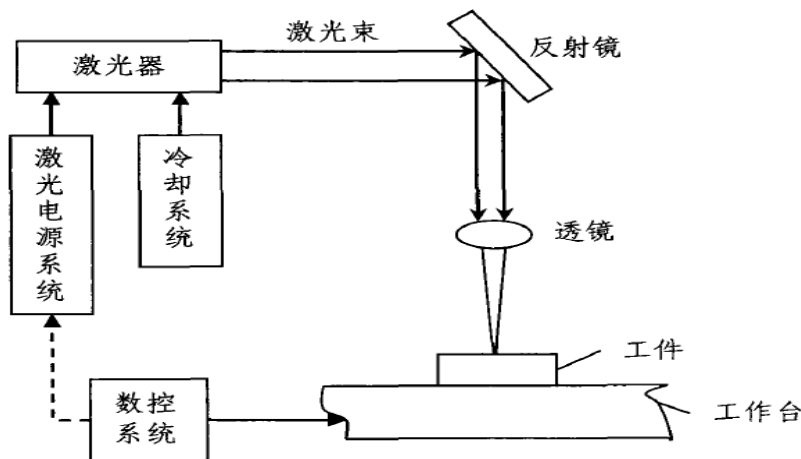


图 2.6 激光切割系统示意图

2.2.3 激光切割主要方式

根据激光切割板材时，板材形成割缝时材料表现不同物理过程来分类，激光切割一般可分为熔化切割、汽化切割、氧助熔化切割和控制断裂切割。

(1) 熔化切割

当一定能量的激光光束照射到板材表面时，激光光束焦点附近的材料熔化而形成孔洞，并用辅助气体吹走熔渣，如此板材上的割缝便形成了，激光熔化切割时光束的能量密度大约是激光汽化切割的十分之一。

(2) 汽化切割

当激光的能量很高时，如果这种高能量的激光束照射在板材表面时，被照射板材区域的材料会在非常短的时间内上升到它汽化的温度，板材上的被激光直射区域的材料化作蒸汽逸出材料表面就在板材上形成割缝，这种激光汽化的切割方式大都用于不能熔化的非金属材料，对于一般的非金属材料，如果让材料直接汽化，需要激光光束的功率密度一般为 10^8w/cm^2 ，这是激光熔化切割十倍。

(3) 氧助熔化切割

首先用一定能量密度的激光束对待切割材料进行加热，工件被加热到燃点后，通入

一定的有助于材料燃烧的活性气体，使得切割割缝处的材料持续燃烧达到切割的目的。这种切割方式采用的是两种热源，即激光光束热能量和材料燃烧放热，如果在切割的过程中能够控制活性气体的输入的速度，便能控制材料切割的速度和切口处燃烧反应所得产物的冷却速度。

(4)控制断裂切割

在切割很容易受热被破坏的脆性材料时，通过激光束的照射脆性材料的某一小块区域时，引起这种脆性材料受热，在材料的不同位置形成梯度变化的热量，这种热梯度会导致材料产生严重的机械变形，从而形成割缝，完成切割，在这种切割中，激光的功率和激光光斑的尺寸是影响切割质量的主要参数。

2.2.4 激光切割主要参数

在激光切割过程中，影响激光切割质量的因素有很多，主要可以分为两类：一类是激光切割机的软件和硬件的性能；另一类是待切割材料的特性和在切割的时候选择的工艺参数，对激光切割质量的影响的主要参数有：

(1)激光功率

激光光束功率是激光切割的一个重要参数，激光切割机所能切割板材的厚度跟激光光束的功率有关，切割板材的功率越大，所需要激光光束的功率就越大，但是如果激光切割功率太大会增加切口处的受热量，导致切口偏大。因此，对于特定的待切割板材都会对应一个特定的激光功率，功率太小不能完全切割，功率太大导致切割质量不能满足要求和功率的浪费。

(2)切割速度

激光切割板材时，切割速度也是影响切割质量的一个关键因素，在切割板材时，也需要一个合理的切割速度，保持合理的切割速度才能得到满意的切割质量。切割速度太慢，板材上单位面积光照量增大，扩大了热影响区域，使得切口变得粗糙；切割速度太快，辅助气体来不及吹走切割时产生的熔渣，熔渣会粘连切口，使得切缝变粗糙。

(3)焦点位置

激光光束焦点与待切割板材的位置也影响着激光切割质量。不同的切缝宽度和质量要求，激光光束焦点的位置也不一样，在工业中常用的数控激光切割机中，一般采用随动系统来控制焦点的位置。

(4)辅助气体的种类和压力

根据激光切割的特点，选择不同辅助气体和辅助气体的压力，会对切割质量产生不同的影响，合理的选择辅助气体的种类和压力是获得较高切割质量的前提。

(5)喷嘴

喷嘴的直径和喷嘴距离板材的高度影响着切口处的空气流动性，喷嘴有不同型号，应根据需要，选择合适的型号，才能获得高的切割质量。

2.3 激光切割工艺研究

激光切割机在切割板材之前，需要对切割一些工艺进行规划，以保证切割出工件的质量。在激光切割机开始切割之前，技术人员必须根据激光切割的特点和所需遵循的原则，合理的规划路径，其他的工艺参数也应该合理设置，关于激光切割路径规划工艺研究的内容主要包括：切割路径优化，切割引入引出线的设置，零件轮廓尖角的切割工艺处理。

2.3.1 切割路径优化

在激光切割零件中，切割路径主要包括有零件轮廓周长、切割空行程路径，零件轮廓周长是激光切割零件所必须经过的路径，切割路径就等于零件轮廓边界的总长度，是固定不变的，切割路径的优化从切割空行程入，在加工速度不变的前提下，只有割嘴空行程路径才能到达路径优化的效果。板材会有大量不规则的零件，切割零件的先后顺序和各个零件切割起点的不同选择，都会导致路径的不同，因此路径优化问题可以转化为确定零件切割顺序和各个零件切割起点确定的问题。

(1)零件切割顺序

假设板材上有 n 个零件，那么零件的轮廓的切割顺序就会有 $n!$ 种可能，如果排样图上有 10 个零件，那么便有 3628800 种可能切割顺序，这种数目是巨大的，如果通过枚举法来计算出每个顺序的路径长度来比较来找到最短路径的，需要大量的时间，这在生产实际中是不允许的，只有通过合适的算法在合理的时间里找到一个合理切割顺序，才具有较大的实际意义。

(2)切割起点的确定

激光切割零件轮廓的时候，首先得在轮廓的起始处或者废料区域打一个孔，这个孔就作为切割机在切割该轮廓的时候切割起点，这个切割起点也叫打孔点，因为激光光束照射板材穿孔时，需要的一段时间的光束照射预热，所以打孔点附近的热影响区域比在正常切割时要大得多，因此打孔点的直径比切割时的切缝要大一些，如果零件要求的切割精度高。由于打孔点的影响，打孔点就不能直接选择在待切割零件轮廓边上，因该将打孔点的设置在板材的废料区域上，然后通过引入引出线将激光割嘴平稳的过渡到零件切割的轮廓线上，割嘴沿着零件轮廓线完成切割。此外，打孔点距离零件轮廓的切割距

离应该合理，不能太长，如果距离太长会导致引入引出线太长，增加了激光切割的成本，也降低了切割效率；但是距离也不能太短，距离太短，在激光打孔时，由于热影响，会导致轮廓边缘由于过热而烧坏，影响零件的切割精度。

2.3.2 引入引出线的设置

当板材上切割零件的打孔点的位置确定以后，就应该考虑如何设置切割时的引入引出线，在激光切割机切割的时候，特别是进行精密加工的时候，引入引出线的设置是保证零件切割质量的一个重要的工艺方法。切割时从引入线进入零件轮廓切割，零件轮廓切割完毕从引出线退出切割。设置切割的引入引出线还可以保证激光光束稳定，同时避免激光打孔的时候产生热效应对零件切割轮廓的影响。在设置引入引出线的时候，引入引出线应该尽量在最长轮廓边或者圆弧的中点处引入，在传统的切割加工中引入引出线多为直线，见下图 2.7 表示内轮廓切割的引入引出线的设置示意图，图 2.8 表示外轮廓切割引入引出线的设置示意图。直线引入引出线需要激光切割机的系统有较快的响应能力，这样才能保证切割速度，因为采用直线的引入引出线的方式在切割时候切割方向有较大的变化，如果激光切割机系统响应不及时，就会造成切割的停顿，对切割质量会造成影响。如下图采用圆弧形式的曲线引入引出，使得激光割嘴在切割不会遇到方向的迅速的转换的情况，在切入和切出零件轮廓的时候能够平稳光滑的过渡，使得切割过程中速度的变化不会太大，下图 2.9 表示内轮廓切割的时候选择的引入引出线为直线。

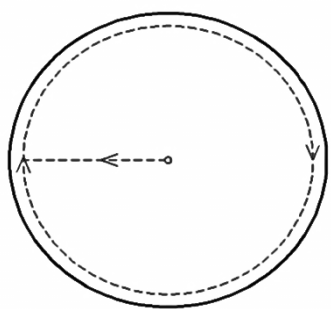


图 2.7 引入引出线为直线内轮廓切割

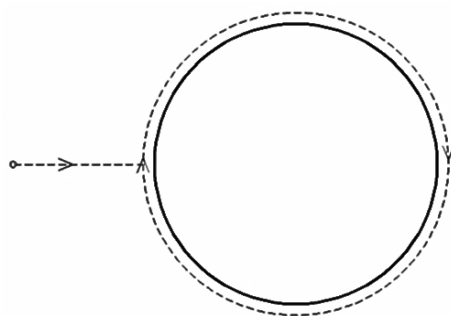


图 2.8 引入引出线为直线外轮廓切割

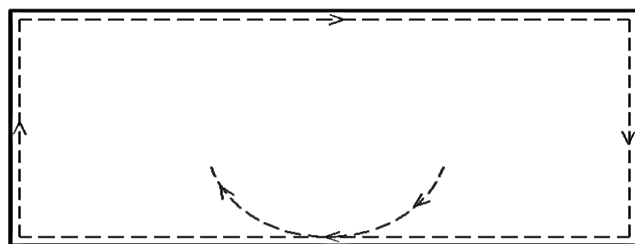


图 2.9 引入引出线为曲线的内轮廓切割

2.3.3 切割尖角处理

激光切割轮廓的时候，会遇到零件轮廓的某些部分有比较尖锐的夹角，在切割的时候如果不设置辅助路径，以正常的激光功率和切割速度加工尖角部位时很容易导致尖角处散热不充分，尖角局部热量集中温度迅速上升，这些现象会导致切割出来的零件精度和质量不符合要求，甚至会导致零件尖角处烧毁。因此，在尖角处应该设置环形的切割路径或者采用降低激光功率、减小切割速度的方法，使热量不过分集中到零件的尖角部位，环形路径的设置如下图 2.10 所示，环形路径的设置是为了不改变激光切割的功率和切割速度，保证正常的生产率。在切割内轮廓的时候就不能设置环形的路径，只能通过控制激光的功率和切割速度的方法来避免尖角处过热而烧毁，降低激光功率和增大切割速度是处理这一问题的常用方法，激光功率必须降低到合适大小，如果激光功率太小会导致板材切不透；切割速度也不能增加到太大的值，切割速度高也会出现板材切割不完全的情况。这些值的都是可以通过实验测定的。当激光割嘴接近尖角部位时，如图 2.11，通过设定功率/速度(P/v)的范围、 d 的大小，及时降低激光器的功率和切割速度，使激光切割产生的热量能够均匀的分布在零件切割轮廓处，保证切割零件的精度。

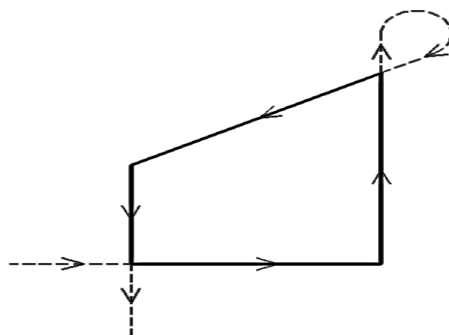


图 2.10 外轮廓尖角处环形路径设置

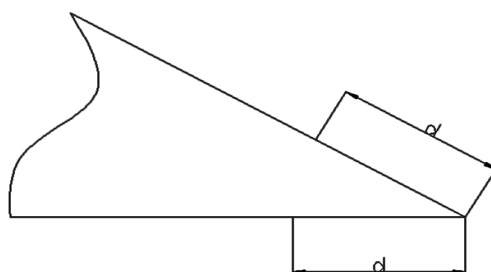


图 2.11 内轮廓尖角控制

2.4 本章小结

本章通过对制造业中常用的切割技术比较来说明激光切割的特点，并对激光切割的相关知识进行了详细的介绍；着重研究了确保零件切割质量的激光切割工艺，包括切割路径的优化、引入引出线等切割辅助路径的设置以及切割轮廓尖角部位时工艺处理方法。

3 基于空程最短的切割路径优化

由于激光切割成本比较高，激光切割板材的时候，特别是切割非金属材料时，如果能找到一条符合激光切割加工工艺的最短路径将能大大提高生产率，节约大量的生产成本。切割最短路径的求解也是激光切割路径优化问题的一个难点，这条路径是遵循激光切割原则前提得到的。在本章中，将介绍激光切割所遵循的原则、最短路径优化模型的建立、激光切割打孔点的选择、遗传算法和局部搜索算法相结合求解的有效的切割最优路径的方法。

3.1 模型的提出

3.1.1 激光切割遵循的原则^{[40][41]}

(1)激光切割先内后外原则

激光切割先内后外的原则是指同一个工件应该先切割内轮廓然后再切割外部轮廓。一个包含内轮廓的工件，在激光切割加工时应该先切割工件内部轮廓的废料，然后再切割外轮廓边。因为如果先切割工件外轮廓边后，工件可能由于重力的作用脱离板材或者变动位置，再对该工件内轮廓切割时就无法进行准确的定位而无法准确切割。

(2)激光切割的先小后大原则

激光切割的先小后大原则是指先切割金属板材尺寸较小的零件轮廓然后再切割大的尺寸轮廓。如今为了提高材料的利用率，节约生产成本，激光切割板材都是按照排样图来切割，排样图上有各种尺寸的零件，激光切割如果先切割大尺寸零件，钢板的刚度会下降的较大，钢板热变形也比较的大，就会影响后续切割零件的精度；对于接触式随动结构的激光切割，钢板的变形翘起会损坏激光割嘴。

(3)工件切割顺序的合理安排

激光切割能让钢板产生很高的温度，在设置切割路径时应该合理的安排切割顺序，是钢板的热变形尽可能的少，防止局部过热导致工件的尖角部位烧毁或者导致工件的变形。

(4)较少的激光切割的打孔点数目

激光开始切割零件轮廓时，首先会在板材的废料区域预热打孔，然后通过引入线进入工件的轮廓的切割。在激光打孔预热时，所需的时间比较长，如果能减少切割打孔点的数目，便能够缩短切割的时间，提高生产效率。

(5)激光切割路径最短原则

在保证工件的加工精度的前提下，激光切割板材路径越短，切割的时间也便越短，生产效率就越高。

3.1.2 零件的几何表达^[42]

一般情况下，在板材上切割的零件不可能是单一特征的零件，大部分需要切割零件包含至少一个内轮廓，每个轮廓都是一些封闭的图形，组成这些封闭轮廓的元素共三种，即线段，圆弧，圆。对于一个工件只能有一个外轮廓，但是可以有多个内轮廓。在此可以定义直线的首尾两点为直线的顶点，圆弧的起点和终点定义为圆弧的顶点，而圆的顶点可以是圆弧上任意的一点，当这一点确定后，在切割时，它既是切割的起点也是切割的终点。零件的几何表达图形见下图 3.1。

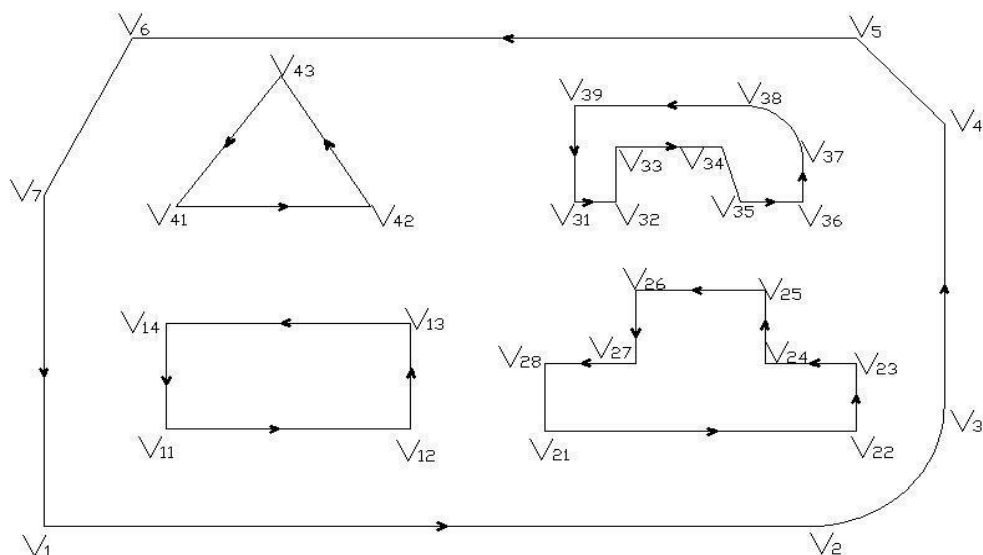


图 3.1 零件几何图形

3.1.3 路径求解数学模型

如上图 3.1 所示的各个轮廓，激光切割的时候按照上图轮廓的轨迹切割，先切割所有的内轮廓，再切割零件的外轮廓，零件便能加工出来。激光切割机在切割内轮廓或者外轮廓的时候，首先在轮廓上的特定点开光打孔，打穿孔后开始沿着轮廓按照特定的方向开始切割；对于精度要求比较高零件，打孔点就不能在轮廓边上，应该在轮廓附近的板材废料区域，打穿孔后沿着引入线进入轮廓开始切割，切割完一个轮廓，激光光束关闭，运动到下一个轮廓打孔点的位置，重复之前步骤。激光的切割精度高，在一般的钣金零件切割中，如果零件的精度要求不是特别高，打孔点一般都选择在待切割零件的轮廓边上，此时打孔点也就是零件的轮廓的切割起点。在整个的切割过程中，必须遵循先

内后外的原则，激光切割完所有零件内轮廓后，最后切割外轮廓。在上图 3.1 中假设外轮廓的切割起点为 V_1 ，内轮廓的切割起点分别为 V_{11} ， V_{21} ， V_{31} ， V_{41} ，那么上图零件的一个完整的切割路径为：激光割嘴快速移动到 V_{11} (激光光束打开)→ V_{12} → V_{13} → V_{14} (激光光束关闭)→割嘴快速移动到 V_{21} (激光光束打开)→ V_{22} → V_{23} → V_{24} → V_{25} → V_{26} → V_{27} → V_{28} (激光光束关闭)→激光割嘴快速移动到 V_{31} (激光光束打开)→ V_{32} → V_{33} → V_{34} → V_{35} → V_{36} → V_{37} → V_{38} → V_{39} (激光光束关闭)→割嘴快速移动到 V_{41} (激光光束打开)→ V_{42} → V_{43} (激光光束关闭)→割嘴快速移动到 V_1 (激光光束打开)→ V_2 → V_4 → V_5 → V_6 → V_7 (激光光束关闭)→零件切割完毕。

要切割一个完整的零件，割嘴需要切割完该零件的所有的内轮廓和外轮廓。在一块钢板上切割多种不规则的零件，要使整个切割过程的切割路径最短，就是合理安排钢板上零件的切割顺序和选择合适的切割起点的问题，如果待切割钢板上所有零件的切割的顺序和切割起点的都确定了，那么整个切割过程的空行程路径的求解可以建立如下的模型，见图 3.2，下图表示需要切割出 N 个零件的板材上的第 n 个零件的轮廓图(其中 N 为正整数， n 为不大于 N 的正整数)。

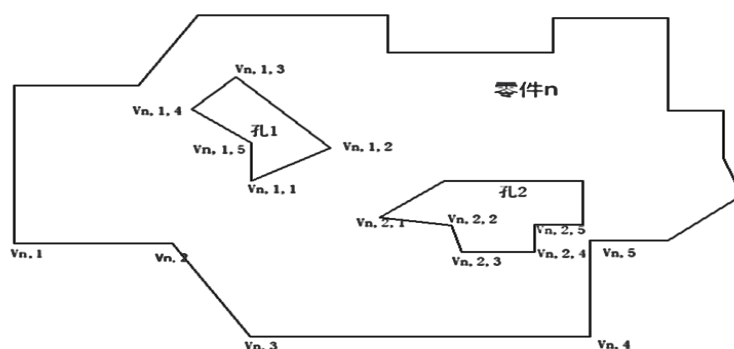


图 3.2 第 n 个零件的轮廓图

根据图 3.2 可以建立求解激光割嘴的空行程的路径的模型，假设上图中零件 n ($1 \leq n \leq N$) 具有 K_n 个孔和 V_n 个顶点，编号为 n 的零件中孔 k ($1 \leq k \leq K_n$) 具有顶点的数目为 $M_{n,k}$ 个，在下图中 $V_{n,l}$ 表示零件 n 的第 l ($1 \leq l \leq V_n$) 个顶点， $v_{n,k,m}$ 表示编号为 n 的零件中孔 k 的第 m ($1 \leq m \leq M_{n,k}$) 顶点。假设激光切割起点定在每个轮廓的起点处。零件的外轮廓的起始位置设在点 $V_{n,1}$ 处，零件中的孔 1 和孔 2 起点位置分别设在 $V_{n,1,1}$ 和 $V_{n,2,1}$ 处，其实切割起点可以在零件轮廓的任意位置，可以在零件轮廓的顶点上，也可以在零件的边上，为了计算的方便，一般都会将切割的起点选择零件的特殊点上(比如说零件轮廓

的顶点和等分点上)。假如我们将激光切割的起点都设定在零件轮廓的顶点上,那么需要的考虑的起点数为 $\sum V_n + \sum \sum M_{n,k}$, 但是总共有 $N + \sum K_n$ 个点参与路径优化的计算, 所以优化的目标函数可以定义为最短的路径, 函数如下:

$$\min f(x) = I_{n+1} \times L_{a,n+1} + (1 - I_{n+1}) \times L_{b,n+1} \dots\dots\dots(3-1)$$

I_{n+1} 表示编号为 $n+1$ 的零件包含着内孔

$L_{a,n+1}$ 表示编号为 $n+1$ 包含内孔的零件切割路径总长度

$L_{b,n+1}$ 表示编号为 $n+1$ 不包含内孔的切割路径总长度

且 $L_{a,n+1}$ 和 $L_{b,n+1}$ 表达式分别如下:

$$L_{a,n+1} = \sum_n v_{n,1} v_{n+1,1,1} + \sum_n \sum_k v_{n+1,k,1} v_{n+1,k+1,1} + \sum_n v_{n+1,K_n,1} v_{n+1,1}$$

$$L_{b,n+1} = \sum_n v_{n,1} v_{n+1,1}$$

$\sum_n v_{n,1} v_{n+1,1,1}$ 表示编号为 n 的零件外轮廓的切割起点到编号为 $n+1$ 的零件第一个内孔的切割起点的总距离

$\sum_n \sum_k v_{n+1,k,1} v_{n+1,k+1,1}$ 表示要切割完编号为 n 和 $n+1$ 的零件所有内孔所切割的总距离

$\sum_n v_{n+1,K_n,1} v_{n+1,1}$ 表示编号 $n+1$ 零件轮廓上最后一个内孔到该零件外轮廓起点的距离

3.2 最短路径优化算法

一张钢板上可以加工很多的零件, 为了节约材料, 激光切割机对板材切割生产零件之前用专业的排样软件排样, 让需要切割的零件在钢板上合理的布局, 得到排样图。如果一张排样图上有 N 个零件, 那么在激光切割机切割时便有 $N!$ 种切割顺序, 如果排样图上有 10 个零件, 零件的切割顺序便有 $10! = 3628800$ 种, 每个零件的轮廓是由无数多个连续的点组成, 激光切割机切割出这所有的零件便有无数的可能的路径, 如果采用逐一计算比较每条可能路径来找到最短的路径是不现实的, 只能根据一些算法来寻找相对最优的路径, 为了减少计算量, 可以将路径优化分解为两个子问题来求解, 即先定零件切割顺序, 然后再定切割起点, 最后根据切割顺序和切割起点来确定切割路径。

3.2.1 遗传算法确定零件切割顺序

板材排样图的零件的切割顺序排序必须在符合整体路径相对最短的原则上进行的。

各个零件的轮廓分布在排样图的不同位置,必然有一个合理的顺序使得激光割嘴按照这个顺序切割的路径比其他的切割方式整体要短。如果各个零件的外轮廓的形心来表示各个零件在钢板排样上的位置关系,那么也便有一个特定的顺序,使得这些形心的连线总长度最短。这些形心的连线的顺序确定以后,它们所对应的排样图的外轮廓的切割顺序便也确定了。根据激光切割的先内后外原则,结合已经确定的外轮廓排序对整个排样图上的所有轮廓切割排序。对于一个零件包含多个内轮廓的情况,同样根据上面的方法确定所有内轮廓的切割顺序。此时问题的排序问题的关键就是如何求解一系列已知坐标位置的点连线的最短路径的问题了,这种路径优化问题便是著名的旅行商问题。

(1)旅行商问题数学模型

旅行商问题(Traveling Saleman Problem)又可以称作旅行推销员问题、货郎担问题,简称为 TSP 问题。旅行商问题是组合优化问题,是一个典型的描述起来很容易但是却很难找到绝对最优解的优化问题。旅行商问题可以具体描述为:有 n 个城市需要推销员需要去推销货物,推销员只能去每个城市一次,走遍所有城市最后回到出发的城市,求按要求走完所有城市的最短路线。假设板材 n 个零件需要切割,那么这 n 个零件的外轮廓的形心可以表示 n 个城市坐标位置,如果能找到一条最短的路径一次不重复走遍所有城市,那么这个顺序便可以作为板材上零件的切割的先后顺序,如果再以此顺序确定各轮廓的切割起点必然能得到一条相对优化的路径。设 d_{ij} 表示两零件形心的直线距离(即 i 和 j 两个城市的距离),根据图论模型^{[43][44][45][46]}的相关知识,在此可以建立如下的 TSP 问题的数学模型:

$$\min \sum_{i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad (3-2)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, \quad (3-3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, \quad (3-4)$$

$$\sum_{i,j \notin s} x_{ij} \leq |s| - 1, 2 \leq |s| \leq n - 2, s \subset \{1, 2, \dots, n\} \quad (3-5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (3-6)$$

上面公式中 x_{ij} 表示的决策变量, i 和 j 分别表示不同零件外轮廓的形心,故 $i \neq j$,因此上面公式中共有 $n \times (n-1)$ 个决策变量。如果 $x_{ij} = 1$ 表示选择的路径包含从形心 i 到形心 j 的路径;如果 $x_{ij} = 0$ 表示选择的路径不包含从形心 i 到形心 j 的路径。公式(3-2)表示

的是目标函数；公式(3-3)和公式(3-4)的约束表示每个形心所代表的城市只能进出一次；公式(3-5)表示在每个形心所代表城市的任何子集中都不能形成一个完整的回路，式子中 $|s|$ 表示由若干数目的形心组成的子集中元素的数目。

(2)遗传算法求解旅行商问题

旅行商问题是经典的组合优化问题，从理论上说，组合优化问题一般都能通过枚举法找到最优解，如果问题的规模较小，能够在很短的时间内通过枚举法找到问题的最优解，如果枚举法所消耗的时间很长，那么通过路径优化获得的优势便在用枚举法求解这个优化结果过程中所耗的大量时间给抵消了，在工程中也便失去了实际应用的意义了。对于 TSP 问题，用枚举法计算的时间随着城市的数量增加而急剧增加，15 个城市的计算的组合就可能达到 130767436800 种，所需要的计算时间也是巨大的，因此用枚举法解决复杂 TSP 问题是不可行的。由于工程的需要，人们提出了一些算法，这些算法虽然不一定能获得最优解，但是运用这些算法能在较短的时间获得一些比较优化的可行解，能解决一些实际的问题。

目前有很多优化算法解决 TSP 问题，这些算法有模拟退火算法^{[47][48][49][50][51]}，禁忌搜索^[52]，人工神经网络^{[53][54]}，蚁群算法^[55]，遗传算法^{[56][57]}，粒子群优化算法^{[58][59]}，这些算法单独或者相互结合应用于工程实际，能解决大量的实际问题，本文中主要采用遗传算法解决 TSP 问题，从而获得板材零件的一个合理切割排序。

遗传算法是人们根据达尔文的进化论中自然选择的启发和遗传规律的相关原理而产生的一种算法思想，通过用计算机来模拟自然界中生物的进化过程来搜索最优解的方法。在自然界中，生物的自然选择过程中会出现交配，繁殖和变异等现象，基于这一机理，在遗传算法中也有三种算子来模拟这些现象，这三种算子就是选择，交叉和变异。在本文中用遗传算法求解 TSP 问题包括如下三个方面：

①选择

按照一定规则，对零件轮廓形心进行编码，用随机函数产生不同规定数量的编码，每个编码对应的个体组成种群，根据零件外轮廓形心坐标位置计算不同编码顺序的总距离，将这个距离值作为个体的适应度，按照一定的选择规则，从当前种群中选择一些优良个体遗传到下一代的种群中，作为下一代种群的一部分。

②交叉

将当前种群的个体两两配对，对于配对的两个个体，按照一定的概率(交叉概率)相互交换它们对应部分的元素形成两个新的完整的个体，保存到下一代种群去。

③变异

以一定的概率(变异概率)将当前群体的某些个体的某一个或者某一些基因改变。在

本文中采用的变异方法是：将某个个体的某两个位置的城市序号改变即可达到变异的效果。

在本文中使用遗传算法具体解决前面所提出的 TSP 问题方法如下：

(1)染色体编码

对每个不同的零件的形心进行编号，编号不同的序列对应板材上零件的不同切割顺序。编号可以采用数字编号，对于零件数量不多的情况，为了简便我们可以采用字母编号，组成遗传算法中的个体，又由这些序列不同的个体组成一个种群。例如 ABCD 形式的字母编码就可以表示有四个基因的个体，由这四个不同位置基因组成的个体一共可以有 $4! = 24$ 种，一个相关的种群可以由若干个这样的个体组成。

(2)遗传算法本文中具体的实施过程

首先设定种群的数量，根据种群数量，用随机函数产生与种群数量相同的个体；根据上面公式(3-2)的函数计算总的路径，路径越长表示个体的适应度越小；在遗传算法的选择操作中，算法按照个体适应度的大小来决定个体遗传到下一种群的机会大小，适应度越大这种机会便越大，这样便有部分适应度大的优良个体遗传到新的种群；新的种群的个体除了部分是由上一种群直接遗传而来外，还有另外一部分是由上一代种群个体的交叉和变异而来。交叉操作在本文中具体的处理过程是，将种群中的个体两两配对，假设个体 1 和个体 2 相互配对，将一个个体 1 的某个或者某几个位置的基因保留，去掉其余的基因，然后在个体 2 中去掉个体 1 保留的基因的部分，最后将剩下的基因按顺序插入个体 1 中去，便得到了一个新的个体，保留到新的种群；变异操作时在单个个体中进行的，具体的实现时将个体的某两个位置或者几个位置的基因互换，便得到一个新的个体，保存到新的种群。由选择，交叉和变异得到新的种群后，继续根据前面过程进行，直到满足中止条件，输出最优解。

经过实验，本文中遗传算法的几个参数作了特殊的设定，种群的规模 M 设定为 200 个个体；遗传过程停止的代数 G 设定 20000 代；交叉的概率 P_c 为 0.05；变异的概率 P_m 为 0.01；具体的算法流程图见下图 3.3。根据遗传算法求出的零件形心相对最佳序列，可以以此确定各个零件切割的顺序，然后根据激光切割的原则确定板材上所有轮廓的切割顺序，最后根据局部搜索算法确定各个轮廓的切割起点生成得到切割轨迹。用遗传算法求解零件切割顺序的详细流程图见下图 3.3 所示：

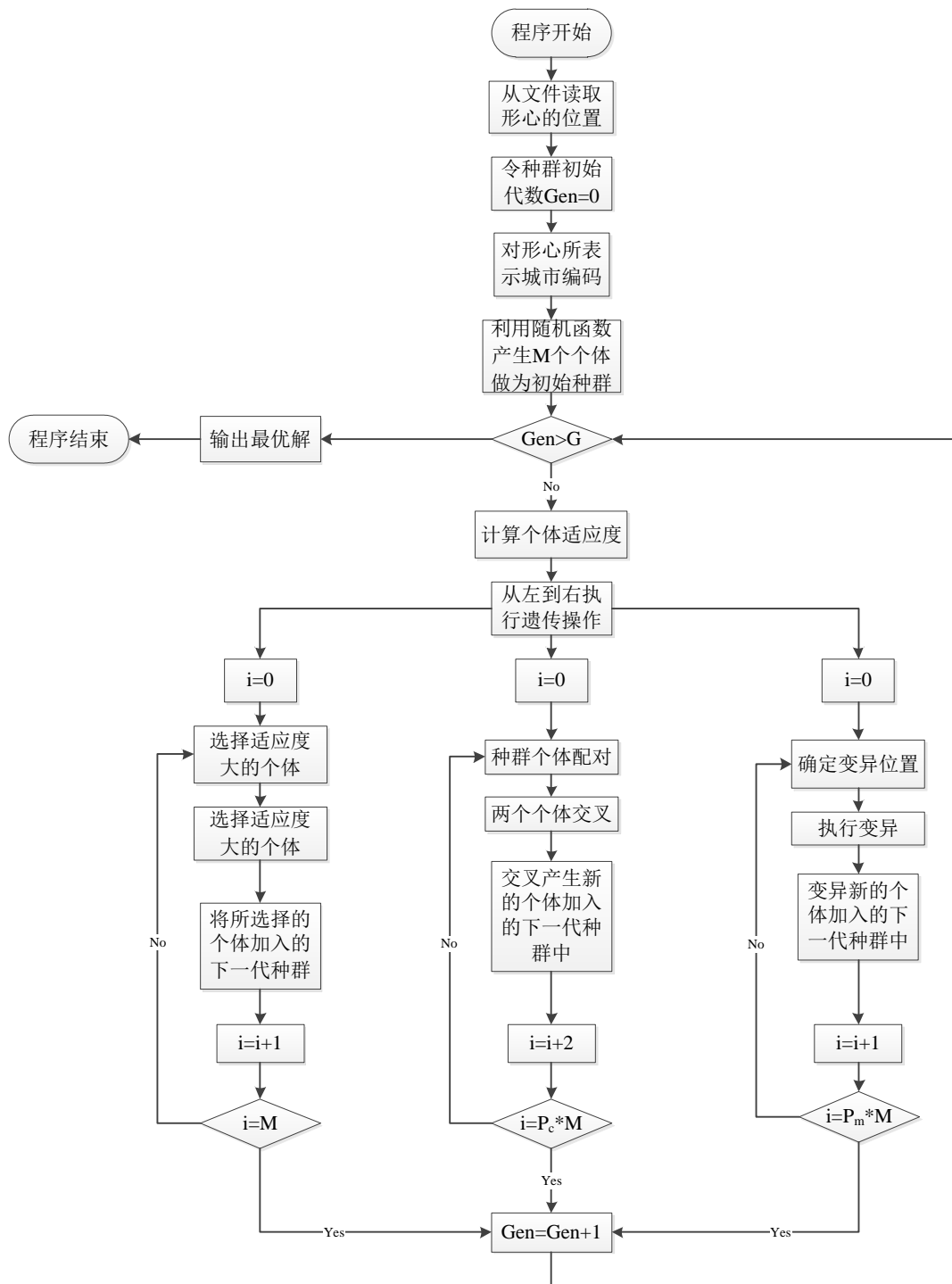


图 3.3 遗传算法解决 TSP 问题流程图

3.2.2 局部搜索算法确定轮廓切割起点

板材排样图上的各个零件轮廓的切割顺序确定以后,可以采用局部搜索算法来确定各个零件轮廓的切割起点,算法的过程如下:

- Step1:** 按照切割顺序,求得第一零件的外轮廓和第二个零件的外轮廓形心连线段与第一个外轮廓的交点,取距离第二个轮廓形心最近的点作为第一个零件的外轮廓的切割起点;
- Step2:** 判断第一个零件是否包含内轮廓,如果包含,则以在 Step1 中确定的切割起点按照反向切割顺序搜索紧临内轮廓上距离该点最近的点作为该内轮廓的切割起点,继续以这个切割起点搜索,直到第一个零件所有轮廓切割起点确定;如果第一个零件不包含内轮廓,按照前面相同的搜索规则,确定板材上所有轮廓的切割起点,并保存这切割起点的位置坐标;
- Step3:** 反向搜索,以在 Step2 中确定的最后一个切割起点为搜索起点,按照 Step2 的搜索规则,重新确定其余切割轮廓的切割起点。根据各个起点的位置,生成激光割嘴的切割轨迹。

3.3 实验验证

本实验需要高端计算机一台,Windows XP 以上的操作系统,Microsoft Visual C++6.0 开发环境,安装有板材自动套料功能的软件,如下图 3.4 中零件 20 个,下面板材排样图 3.4 中零件的详细信息见下表 3-1 所示。

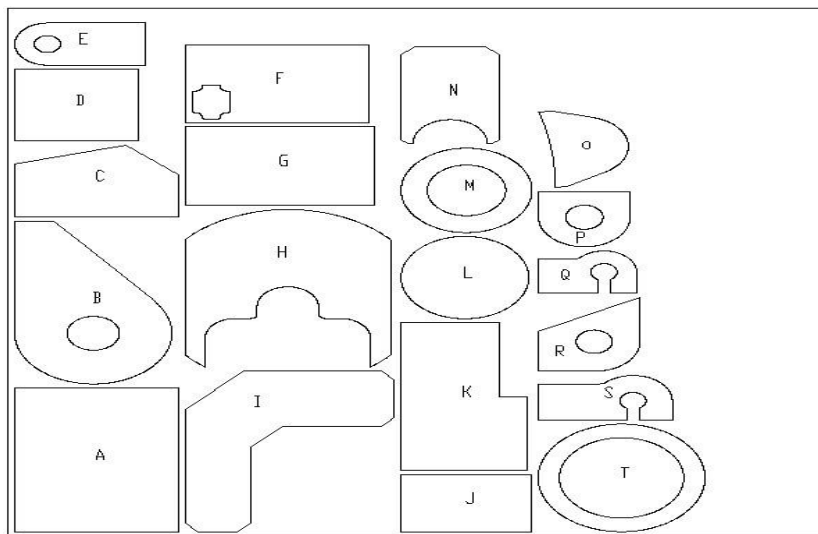


图 3.4 零件排样图

华中科技大学硕士学位论文

表 3-1 排样图中零件详细信息

零件编号	零件数量	周长(m)	规格(mm*mm)	外轮廓形心位置(mm)	
				X	Y
A	1	1.18	250×340	135.0000	180.0000
B	1	1.28	385×240	130.0000	552.5000
C	1	0.76	250×170	135.0000	840.0000
D	1	0.72	189×170	104.5000	1020.0000
E	1	0.68	100×200	109.9656	1165.0000
F	1	1.17	280×185	410.0000	1071.5000
G	1	0.95	290×185	415.0000	876.5000
H	1	1.53	314×373	427.000	586.5558
I	1	1.27	380×320	430.0000	200.0000
J	1	0.67	200×135	700.0000	77.5000
K	1	1.08	192×350	696.0000	330.0000
L	1	0.61	D=195.00	697.5000	611.9659
M	1	1.01	D=200.00 d=120.00	700.0000	818.4522
N	1	0.79	230×150	675.0000	1044.0000
O	1	0.52	181×137	878.0383	915.7829
P	1	0.66	140×130	880.0000	749.9574
Q	1	0.61	100×150	885.0000	625.0305
R	1	0.74	175×155	887.5000	477.5000
S	1	0.72	105×204	912.1838	327.5366
T	1	1.40	D=255.00 d=190.00	936.8015	137.5000

注：上面零件的信息中，零件外轮廓形心位置的坐标是在以板材的左下角为原点，板材的长度和宽

度方向分别为 X 轴和 Y 轴的坐标系里面测量的

将各个零件外轮廓的形心作为各个城市的位置，遗传算法求解板材上零件切割的最佳排序为：H→G→F→E→D→C→B→A→I→K→J→T→S→R→Q→P→O→N→M→L，则根据激光切割所遵循的原则，板材上各个轮廓的切割顺序如下图 3.5 所示；经过局部搜索算法确定切割起点后，激光割嘴切割的轨迹如下图 3.6 所示。图中虚线部分表示激光割嘴空行程的轨迹。

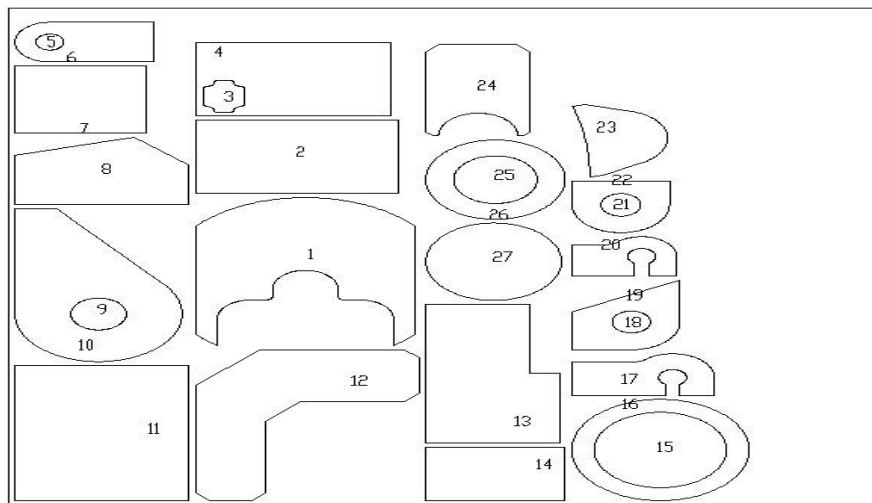


图 3.5 轮廓切割顺序编号图

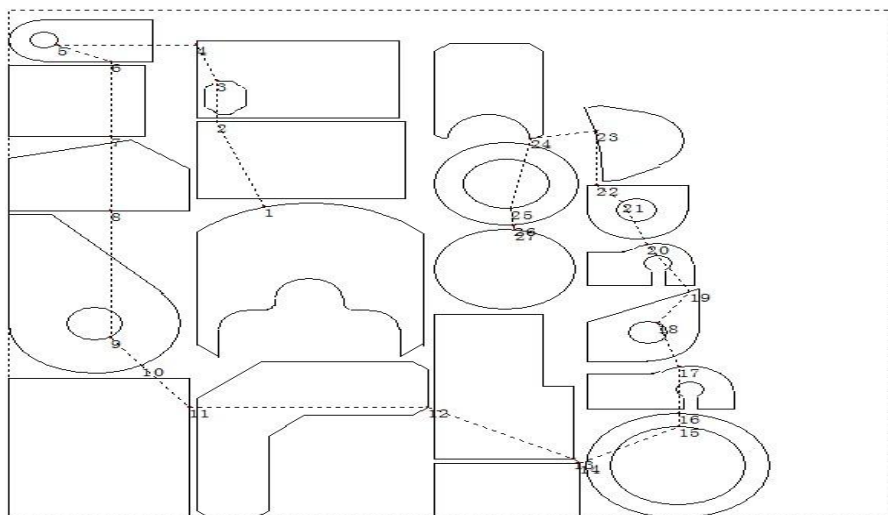


图 3.6 激光割嘴切割轨迹图

在激光切割板材之前，为了提高板材的利用率，通常会对各种零件在板材进行套料，

在市场有很多这样的套料软件，这些套料软件不仅有套料功能并且有自动生成切割轨迹的功能。在激光切割过程中，板材上零件的切割顺序通常采用下→上→右→上→下→左不断重复按列连续的排序，然后采用某算法随机确定切割起点。如图 3.7 表示的是采用按列连续的排序、切割点随机生成的切割轨迹图；图 3.8 是采用按列连续排序及切割起点优化生成的切割轨迹图；图 3.9 表示采用本章所介绍的先用遗传算法确定切割零件顺序然后随机生成切割起点的方法确定的切割轨迹图；图 3.10 表示先用遗传算法确定切割零件顺序然后切割起点优化确定切割起点的方法生成的切割轨迹图。

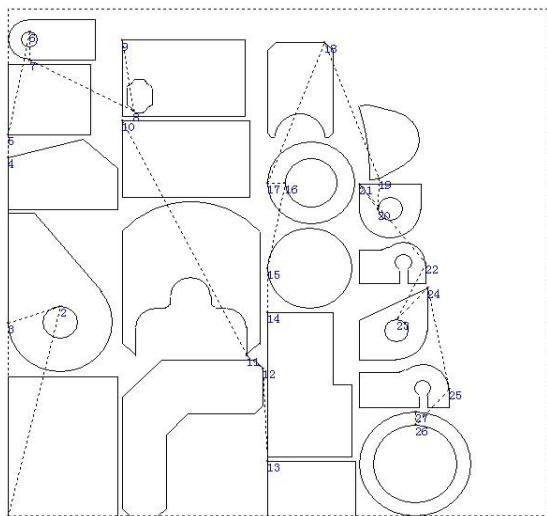


图 3.7 n 型排序切割起点随机定的轨迹图

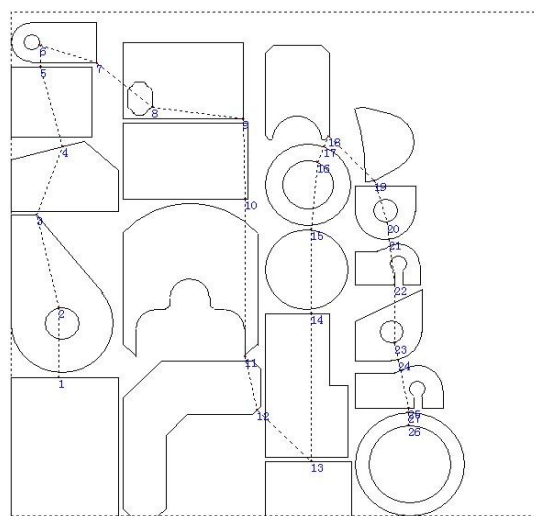


图 3.8 n 型排序切割起点优化的轨迹图

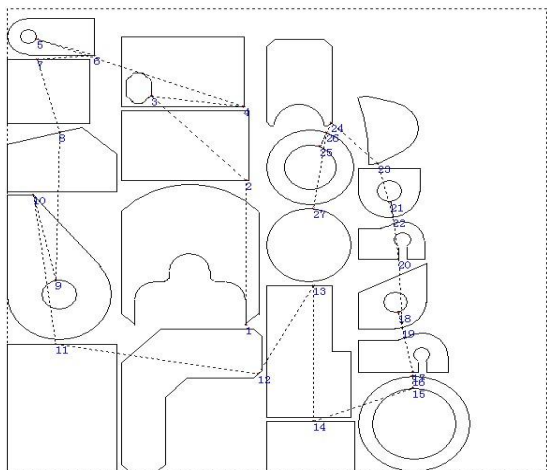


图 3.9 遗传算法排序切割起点随机定的轨迹图

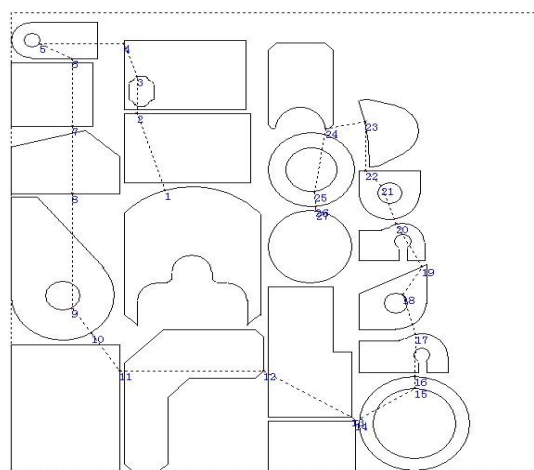


图 3.10 遗传算法排序切割起点优化的轨迹图

上面的实验结果对比分析见下表 3-2 所示，下表通过对实验结果进行多重对比来验

证了本章中采用算法的有效性。

表 3-2 实验结果对比分析

	n 型算法排序	遗传算法排序	优化比例
切割起点优化前	5452.541113mm	5472.691825mm	-0.37%
切割起点优化后	3825.770893mm	3375.539949mm	11.77%
优化比例	29.83%	38.32%	——

从上表 3-2 可以看出，只进行排序而不对切割起点优化，切割路径得不到优化，采用本章的公式求解空程轨迹的总路径，按照不同的算法得到的路径结果在上表都列出来了。根据上表中计算结果可知，两种排序方法采用切割起点优化后，空行程的轨迹都能明显的缩短，路径得到优化，n 型排序采用切割起点优化算法后路径缩短 29.83%，遗传算法排序采用切割起点优化算法后路径缩短 38.32%；从计算结果中也可以看出，采用遗传算法对零件排序并优化切割起点得到的轨迹比通过 n 型排序并优化切割起点的到的轨迹明显短 450.230944mm，路径优化了 11.77%，因此可知采用遗传算法对零件顺序排序然后通过优化算法确定切割起点得到的激光切割路径的方法是有效的，运用此方法能得到一条相对最优的路径、提高激光切割的效率、降低生产成本。

3.4 本章小结

本章首先介绍了激光切割遵循的原则，提出了零件表达的几何模型和最短路径求解的数学模型，然后提出以先定板材上零件切割顺序后定切割起点为总体思路的最短路径优化算法，采用遗传算法求解得到零件切割顺序，用局部搜索算法确定各个零件的切割起点得到零件切割的相对最短路径，最后用实验验证算法的有效性。

4 基于碰撞避让的切割路径优化

为了提高材料的利用率，需要在切割零件之前对零件在板材进行排样，现在一些排样算法能够很大程度上提高材料的利用率，但是如果激光切割零件的时候不能提高切割效率和质量的话，那么排样提高的材料利用率就没有优势了。激光切割与普通切割有很多不同之处，因此不能将所有普通切割工艺应用于激光切割之中。根据激光切割的特点，激光切割工艺优化主要可以归纳为切割路径的规划（包括上章最短的路径），穿孔空点数目，切割尖角的处理，零件的热变形等。本章主要研究了路径规划中的防碰撞避让算法，该算法能够让激光切割过程中的空行程避免经过已加工的区域，防止割嘴碰撞导致损坏，保证了切割的连贯性，避免频繁的开关随动系统、增加系统的响应时间、降低生产效率。

4.1 问题的提出

与普通切割不同，激光切割时割嘴不与工件接触，是一种非接触式加工，激光喷嘴端面与工件表面总是留有一定的间隙，为了保证切割出来工件的质量，使激光切割时能够以最大的功率密度照射在切口处，焦点与工件表面的相对位置是确保切口切割质量的重要因素，根据前人实验的结果，对于薄板材料，切割时焦点位置可处于工件表面；对于厚板(大于 3mm)，激光切割光束的焦点位于待加工工件表面为基准的下方的 $1/5 \sim 1/3$ 板厚处，能够获得较好的切割效果。同一块板材的各处厚度相同，因此要想确保激光切割时的光束焦点落在板材合理位置，必须保证喷嘴与待加工工件表面的间距恒定不变。由于激光切割能产生高温是板材出现一定的变形，就会出现板材部分翘起或者凹下的情况，已经完成切割的零件并不都是能够顺利的落到板下的落料槽中，会出现零件的悬空部分高出板材表面的情形，这时候如果激光割嘴经过已经切割零件的区域时就有可能与工件高出板材表面的部分发生碰撞，损坏割嘴，导致机器故障。经过观察，大部分数控激光切割机在切割零件时候的路径基本都是：从编程零点出发，激光喷嘴与板面保持一定的安全高度空行程运动到第一个待切割零件轮廓的起点，喷嘴下落到合适的距离，开始开光切割，完成第一个零件轮廓切割后关光，切割头抬升到安全高度，然后空行程到第二个图形轮廓切割的起刀点，重复上面步骤完成所有零件的切割。切割头切割完一个零件后到开始切割下一个零件开始在平面所走路径示意图如下图 4.1，其一般的过程为其过程一般为，切割头切割零件完毕运动到 A 点→停顿→切割头抬升至安全高度位置 A'→停顿→平面空程 A'B'→停顿→割嘴由 B'下降至 B 点→停顿。这是目前大部分数控

激光切割机都采用这一 Z 轴控制模式,为了避免激光切割头在下降的过程中碰到板面损坏割嘴,切割头下降的速度都是很低的,这使得切割头在空行程耗时太长,这就必然的增长的整个生产时间,影响了生产的效率。

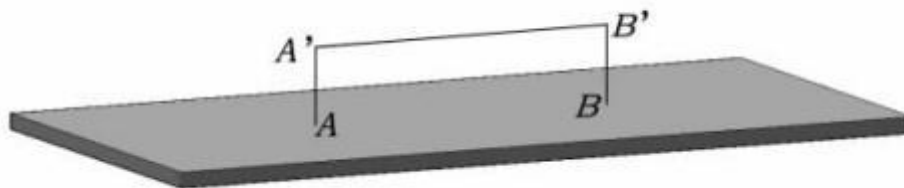


图 4.1 激光切割头空行程路径

为了保证切割零件的精度,喷嘴在空间的绝对位置就应该相应的也发生变化,使其与工件的表面的相对位置保持不变,因此在激光切割的过程中便需要一个相应的响应系统能够快速感应到割嘴与工件表面间距的变化并迅速调整喷嘴的高度以确保相对位置的不变。当激光头喷嘴在工件表面上方移动时能有一个相应的传感器准确的测出工件的表面与激光喷嘴的法向距离,然后根据事先设定的喷嘴与工件之间的间距值来自动的调整激光头喷嘴的绝对位置。这种系统也可以称为激光切割的随动系统,目前大多数数控激光加工系统中,控制焦点和待切割工件之间位置方法常采用电容传感器的非接触测量方法,电容传感器跟激光割嘴安装在一起,切割之前,设定光束焦点的位置,然后系统自动计算出割嘴需要距离待切割工件表面的位置,在切割过程中,待切割工件表面的不平整会导致激光喷嘴与工件的间距发生变化,安装在喷嘴处的电容传感器动极板与金属工件表面组成一个可变电容,由两个平行极板的电容计算公式(4-1):

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (4-1)$$

S 表示平行板电容器极板面积

d 表示板间距离

ϵ_0 相对介电常数公式

从上面公式可知,电容值由仪器直接测的, ϵ_0 为常数,可以计算出两极板之间的距离,即喷嘴和工件表面的距离。实际操作中,随着喷嘴路径的变化,激光喷嘴的动极板与工件表面形成的电容发生变化,电容的变化量通过外部振荡器经过传输电缆传入测控系统控制激光喷嘴位置,实现对动功能。基于上面的原理,当激光切割完一个零件,零

件由于重力的作用落入落料槽在板材上形成一个空洞，如图 4.2，喷嘴经过空洞区域时，由于随动系统作用，喷嘴会落入空洞区域，按照原来的路径，激光喷嘴会碰到钢板导致损坏。



图 4.2 激光切割板材

根据以上特点，为了防止激光喷嘴与板材、工件发生碰撞，提高切割效率，在激光割嘴的路径的规划中，应该遵循一下两个原则：

- (1)切割钢板的时候应尽量减少割嘴避让零件而抬起的次数。
 - (2)激光割嘴的空行程应该尽量避免经过已切割零件后钢板的所形成的空洞区域。
- 我们将符合上面两个原则的方法叫激光割嘴的防碰撞避让算法。

4.2 防碰撞避让算法

为了简化问题，本文在研究割嘴防碰撞避让算法时，采用先确定零件切割顺序，再确定零件切割起点的步骤，最后对切割起点优化调整的思路。

4.2.1 零件轮廓切割顺序的确定

对于一张所有待切割零件已经在钢板上排样的排样图，下一个生产步骤就是在切割钢板上所有的零件，要提高生产效率，满足激光切割特点的切割路径的规划就是必要的，要确立合理的切割路径需从两方面考虑，第一：要确定排样图上各个零件轮廓的切割顺序；第二：就是选取激光切割的起刀点。这两个方面满足了，一个确定的切割路径就生成了，由这条路径生成相应的数控代码导入数控激光切割机就能加工出所需要的零件了。一张排样图上可能会有很多个零件，而这些零件会产生很多可能的切割顺序，假设排样图有 n 个零件，那么零件的轮廓的切割顺序就会有 $n!$ 种可能，如果排样图上有 10 个零件，那么便有 3628800 种可能切割顺序，一个零件轮廓上任意一点都可能作为切割点，为了简化计算通常会将零件上的特征点作为切割点的待选点，即使这样得到的所有切割路径的数目也是巨大的，计算机需要耗费大量的时间来计算，况且一张排样图上的

零件远远不止 10 个零件。因此在生产激光切割零件实际路径之前，首先确定待切割零件的切割顺序，能有效的提高切割路径生成的速度。零件轮廓的切割顺序确定总体来说应该遵循以下原则：

第一：切割方向按顺序进行，避免杂乱无章。

第二：尽量避免切割的跳跃。

第三：首先切割零件内轮廓。

第四：避免切割时遗漏任何零件。

在工程中，为了确保一定的切割顺序，尽量减少空行程，可以使用下图 4.3 的排序方法，这种按列连续的方法可以简称“n 字型”排序；激光切割零件会产生高温，为了避免高温对零件的影响，可以采用图 4.4 的按列折返排序方法，这种方法可以简称为“N 字型”排序，这种排序的切割方式就是从上到下，再从上到下如此往复。

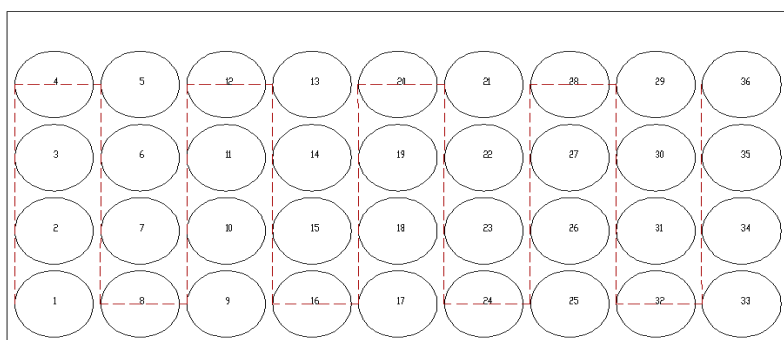


图 4.3 n 型排序图

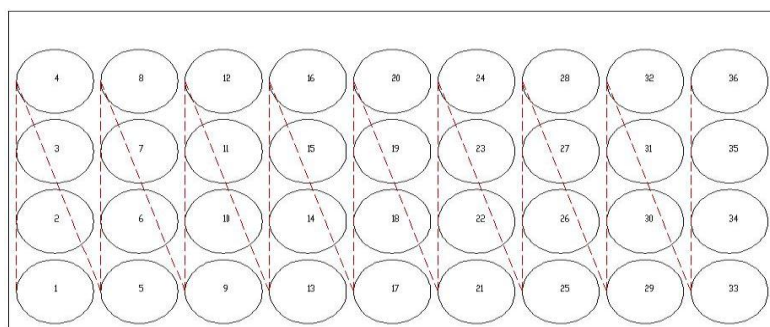


图 4.4 N 型排序图

(1)n 型排序的算法思路

n 型排序的前提是所有零件在板材上已经排好样，其主要的算法思路主要包括下面几步：

- Step1: 搜索排样图最左下角零件, 如果找到, 对它们进行排序, 否则搜索结束, 执行 Step2;
- Step2: 搜索在 Step1 中已排序零件上面的零件, 如果找到, 对其排序, 循环执行 Step2; 否则搜索结束, 执行 Step3;
- Step3: 搜索排样图左上角是否存在未排序零件, 如果存在, 对其排序, 并顺序执行 Step4; 否则程序结束;
- Step4: 搜索当前排序零件下面是否存在零件, 如果存在, 对其排序后, 继续执行 Step4; 如果排序零件下方不存在零件, 则转向执行 Step1, 如此循环直到所有零件搜索完毕。

详细的算法流程, 如下图 4.5:

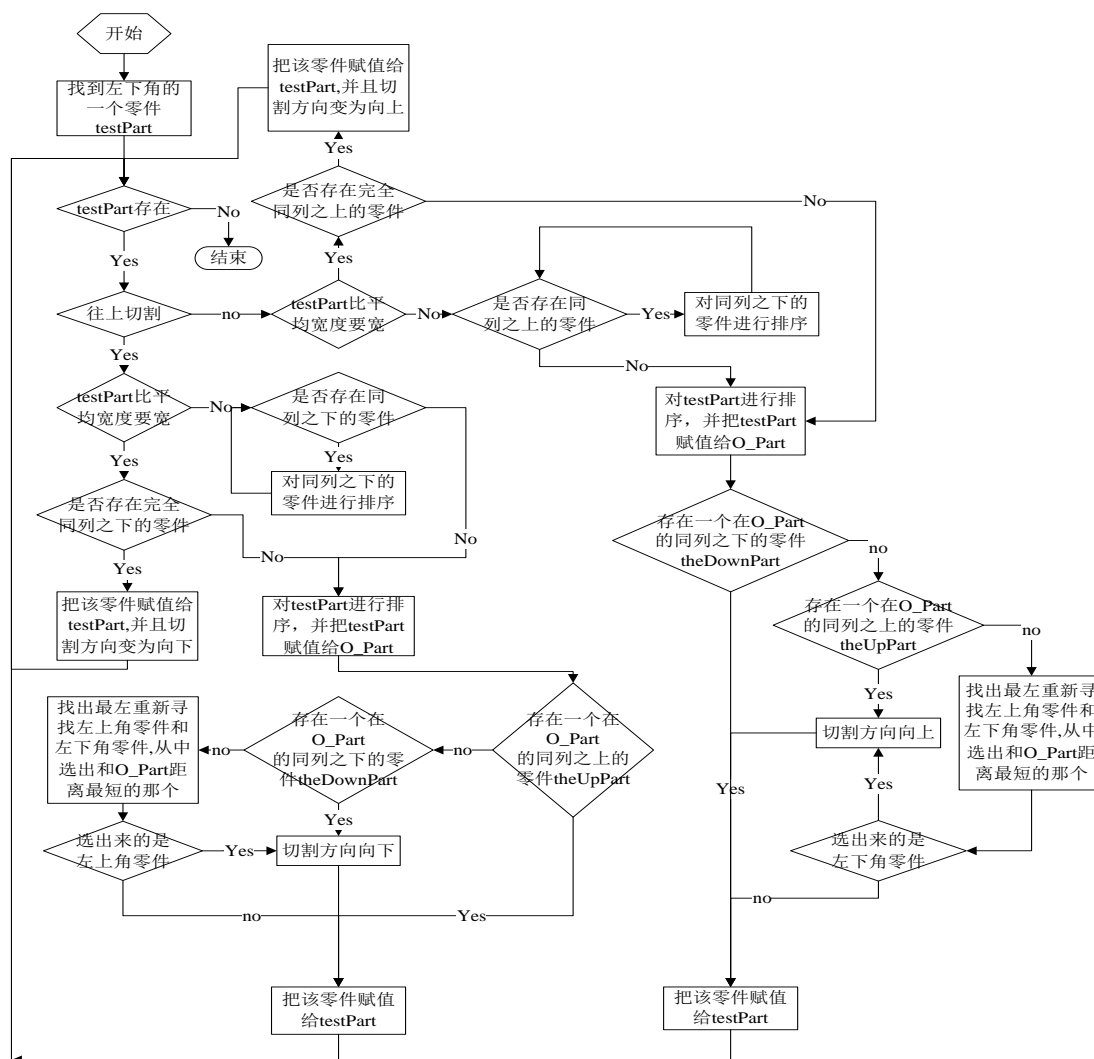


图 4.5 n 型排序算法详细流程图

(2)N 型排序的算法思路

N 零件排序也是在零件排好样的基础上进行，算法总体思路如下：

Step1: 搜索排样图左下角零件，如果存在，对其排序；如果不存在，结束搜索，排序算法结束；

Step2: 搜索当前已经排序零件上方零件，如果存在，对其排序，然后继续执行 Step2；如果不存在，执行 Step1，直至所以零件搜索排序完毕，程序结束。

详细的算法流程，如下图 4.6:



图 4.6 N 型排序详细算法流程图

(3)以上两种算法中零件位置关系的说明

◆零件的包含关系

根据激光切割首先切割内轮廓然后再切割外轮廓的原则，所以在切割排序的时候，应该考虑首先切割当前零件的轮廓所包含的零件，当前零件轮廓包含的零件有如下图两种情况，见图 4.7

①零件 1 被零件 3 内包含。

②零件 2 被零件 3 外包含(当零件 2 与零件 3 之间的重叠部分达到零件 2 面积的 50% 以上就视为零件 3 外包含零件 2；否则两零件不存在包含关系)。

所以在零件切割排序的时候，排序顺序应该是 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 。

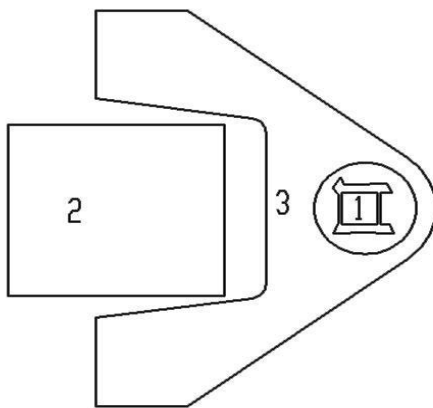


图 4.7 零件包含关系图

◆最左下角零件

最左下角的零件位于排样图未排序零件部分的左下角，必须满足不被任何零件包含，否则选取他被包含的零件作为左下角零件。

◆最左上角零件

最左上角零件位于排样图未排序零件部分的左上角，必须满足不被任何零件包含，否则选取他被包含的零件作为左上角零件。

4.2.2 算法的描述

当排样图上零件的切割顺序定了以后，就应该考虑确定排样图上各个带切割零件的切割起点了，零件轮廓上的任意一个点都可以作为零件的切割起点，这样就可以产生无数条切割加工路径，我们必须从中选择出符合激光切割特点并且能降低生产成本的路径，根据激光切割机随动系统的特点，为了避免割嘴损坏，空行程中，割嘴要上升到安全高度，如下图 4.8，这是一个简单的 11 个零件的排样图，图中虚线表示切割加工时切割轨迹，切割完所有零件，激光割嘴一共抬升 14 次，这样就增加了不必要的生产时间。

割嘴切割完零件轮廓之后，割嘴抬升到安全高度的目的是为了防止割嘴在经过板材上已切割零件形成的空洞时在随动系统的作用而下落而导致与钢板的碰撞或者与已切割零件发生碰撞，如下图 4.8，图中加粗部分表示割嘴轨迹经过已切割零件后形成的空洞区域，从图中看出，切割零件过程中割嘴 14 次抬升，只有 10 次是必要的，为了减少割嘴不必要的抬升，提高切割效率，并且防止割嘴的损坏，割嘴防碰撞避让算法应该遵循以下原则：

- ①切割轨迹尽量避免已切割区域。
- ②对于无法避免的要经过已切割零件轮廓区域的路径，切割运动到此处时，割嘴绕行零件避让。

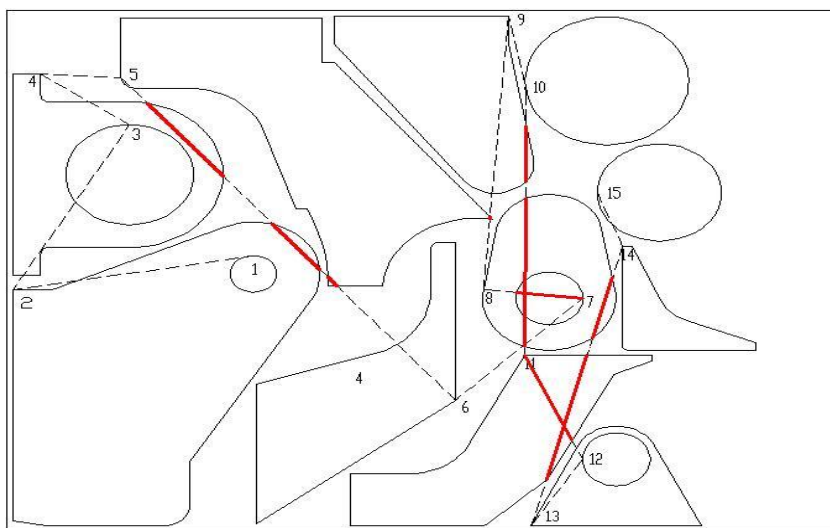


图 4.8 零件切割轨迹

(1)算法总体思路及详细流程

根据上节提出的零件排序算法，对待切割零件轮廓按顺序编号，确定零件轮廓切割顺序后，确定零件加工的轨迹，在此过程中，遵循尽量减少经过板材上切割区域，其主要的算法思路包括以下几步：

- Step1:** 生成排样图，对排样上的所有零件来排序，确定各个零件的切割顺序，在第一个零件上确定切割起点，将此切割起点确定为程序的搜索起始点，继续执行 Step2；
- Step2:** 按照 Step1 确定的切割顺序编号在当前轮廓上搜索距离上一个切割起点距离最短的点作为该轮廓的切割起点，重复执行 Step2，直到排样图上所有轮廓搜索完毕，确定各轮廓的切割起点，继续执行 Step3；
- Step3:** 以在 Step2 确定的最后一个轮廓的切割起点为新一轮的搜索起始点，按照

Step2 搜索原则,按照 Step1 的零件轮廓的编号顺序反向调整各轮廓的切割起点,重复执行 Step3,直到排样图上所有轮廓搜索完毕,确定各轮廓的切割起点,继续执行 Step4;

Step4: 根据在 Step3 中确定各个轮廓的切割起点,生成激光割嘴的切割轨迹,判断当前轮廓和下一轮廓两个轮廓之间空行程轨迹是否经过已经切割的轮廓区域,如果是,进行局部切割起点调整,即搜索该轮廓判断是否存在符合条件的点使得两个轮廓之间的空行程轨迹不经过已切割轮廓区域,如果不存在符合条件的点,切割起点仍然用 Step3 中已经确定的点,重复执行 Step4 直到搜索完毕,继续执行 Step5;

Step5: 全局搜索判断激光割嘴空程轨迹与已切割轮廓的是否有交点,有交点则调整该部分轨迹,让其绕行零件外轮廓避让已切割区域,重复执行 Step5,直至符合条件,程序结束。

上面算法执行的四个步骤只是该算法的一个简单的流程,激光割嘴的防碰撞算法的详细流程图如图 4.9 所示:

关于下面算法流程图中一些符号的说明:

- ◆ T_k 表示在执行 Step2 中第一轮搜索确定的轮廓的切割起点。
- ◆ D_k 表示在执行 Step3 中第二轮搜索重新确定的轮廓切割起点。
- ◆ P_k 表示在执行 Step4 中经过对第二轮搜索确定再整确定的轮廓切割起点。

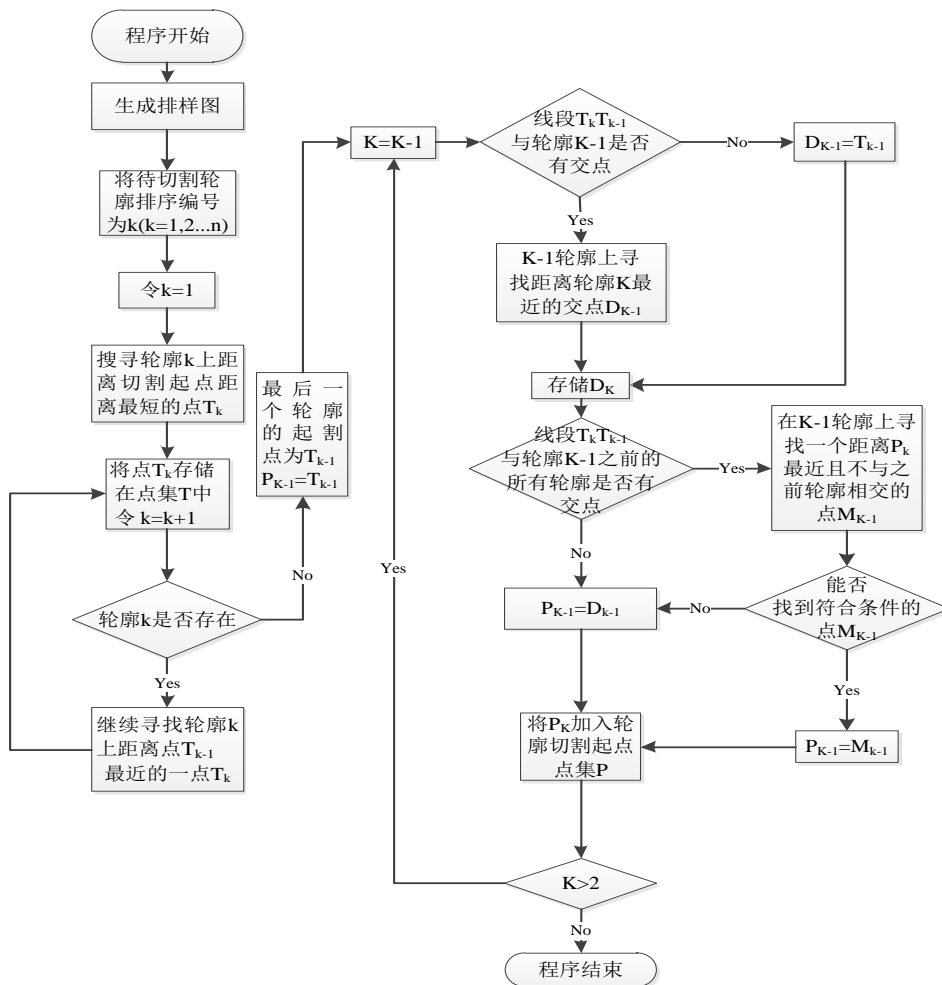


图 4.9 激光割嘴防撞算法

(2) 算法相关的搜索流程

在 Step4 中局部调整切割起点的算法思路如下：

- 第一步：根据上面算法确定的各轮廓的切割点形成激光切割空行程路径，判断当前待调整切割起点的轮廓与与其轨迹有交点轮廓的位置关系；
- 第二步：按照位置关系，在当前轮廓上按照位置关系反向搜索符合条件的点作为当前轮廓新的切割起点；
- 第三步：局部调整结束。

局部调整切割起点方法示意图如图 4.10，从图中可知轮廓 $K+1$ 的切割起点 P_{k+1} 需要重新调整，调整过程如下图从 $A \rightarrow B \rightarrow C$ ，最后轮廓 $K+1$ 的新的切割起点 P_{k+1} 在 C 处，该算法的详细流程图如下图 4.11：

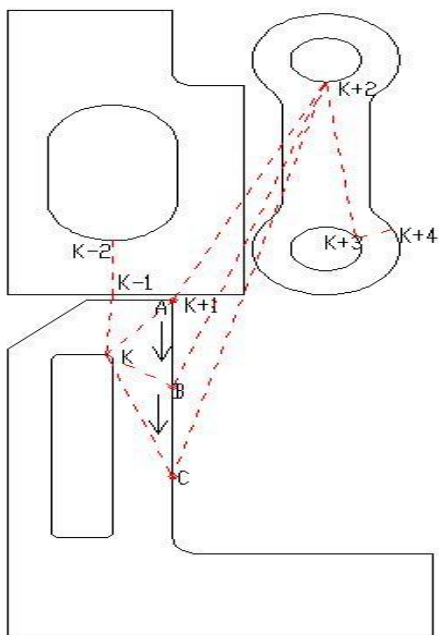


图 4.10 轮廓切割起点局部调整示意图

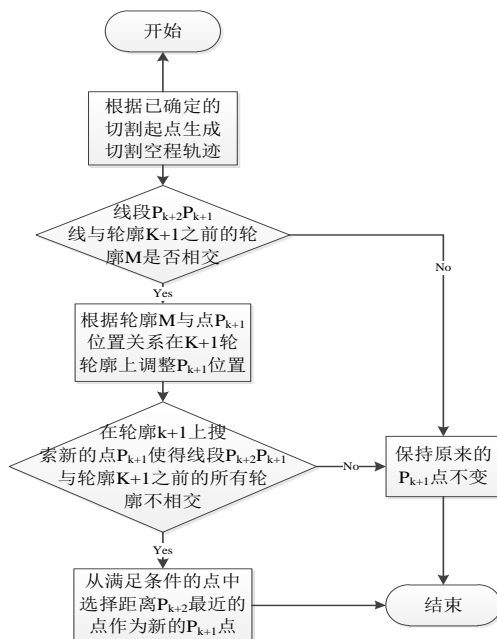


图 4.11 轮廓切割起点局部调整算法流程图

在全局搜索中，切割轨迹绕行零件外轮廓示意图如图 4.12，其算法流程如下图 4.13：

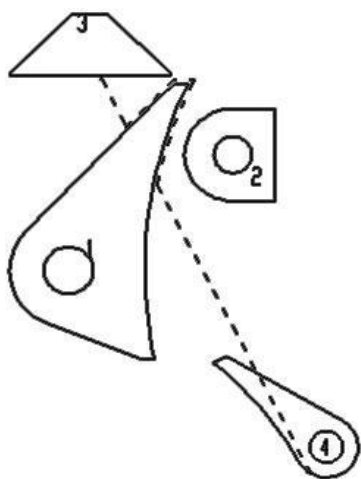


图 4.12 轨迹绕行避让示意图

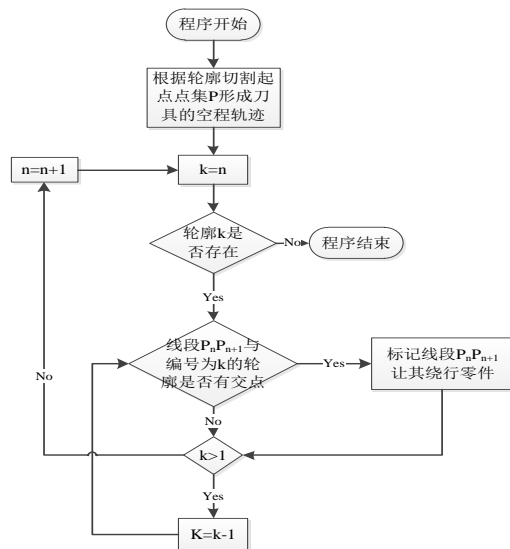






















图 4.13 全局搜索交点算法的流程图

4.3 实验验证





















本实验采用 40 个不规则零件图形在钢板上排样，零件详细信息见表 4-1 所示：

华中科技大学硕士学位论文

表 4-1 零件的详细信息

序号	数量	重量 (kg)	面积 (m ²)	周长 (m)	零件规格 (mm*mm)	零件图形
1	1	18.27	0.233	2.595	479×610	
2	1	5.70	0.073	2.166	460×330	
3	1	4.79	0.061	1.279	385×240	
4	1	0.39	0.005	0.251	80×80	
5	1	7.02	0.089	1.356	180×530	
6	1	13.47	0.172	2.350	520×520	
7	1	15.99	0.204	2.978	540×500	
8	1	12.44	0.158	1.815	379×540	
9	1	7.50	0.096	2.536	380×505	
10	1	2.06	0.026	0.682	230×145	
11	1	1.08	0.014	0.653	140×130	
12	1	7.75	0.099	2.256	271×526	
13	1	10.60	0.135	2.955	489×620	
14	1	4.27	0.054	1.778	520×170	
15	1	4.01	0.051	0.937	330×170	
16	1	1.39	0.018	0.683	100×200	
17	1	9.77	0.124	1.675	680×200	
18	1	9.61	0.122	1.681	302×701	
19	1	4.91	0.063	1.427	325×300	
20	1	2.82	0.036	0.757	250×170	

续表 4-1

21	1	2.49	0.032	0.891	240×155	
22	1	2.53	0.032	0.719	190×170	
23	1	5.40	0.069	1.204	305×440	
24	1	5.90	0.075	1.529	314×373	
25	1	1.29	0.016	0.520	180×125	
26	1	0.94	0.012	0.449	160×100	
27	1	1.24	0.016	0.804	160×151	
28	1	1.61	0.020	0.793	165×222	
29	1	1.56	0.020	0.975	173×340	
30	1	2.52	0.032	0.718	189×170	
31	1	1.38	0.018	0.742	175×155	
32	1	9.78	0.125	1.677	285×560	
33	1	3.67	0.047	1.318	258×420	
34	1	1.09	0.014	0.548	95×232	
35	1	0.60	0.008	0.483	100×100	
36	1	0.92	0.012	0.725	130×236	
37	1	0.89	0.011	0.671	147×132	
38	1	1.29	0.016	1.100	205×205	
39	1	0.91	0.012	0.731	209×184	
40	1	4.95	0.063	1.271	380×320	

实验中，对 40 个零件图形进行排样，得到排样图如图 4.13 所示，采用 n 型算法对

零件切割排序然后随机生成的切割路径如下图 4.14 所示；采用 N 型算法对零件切割排序然后随机生成的切割路径如下图 4.15 所示；采用割嘴防碰撞算法对 n 和 N 型排序算法生成的切割路径用文中所提算法进行优化，可以得到满足条件的激光切割路径（下图中虚线为激光割嘴空程路径）。见下图 4.16 和 4.17 所示：

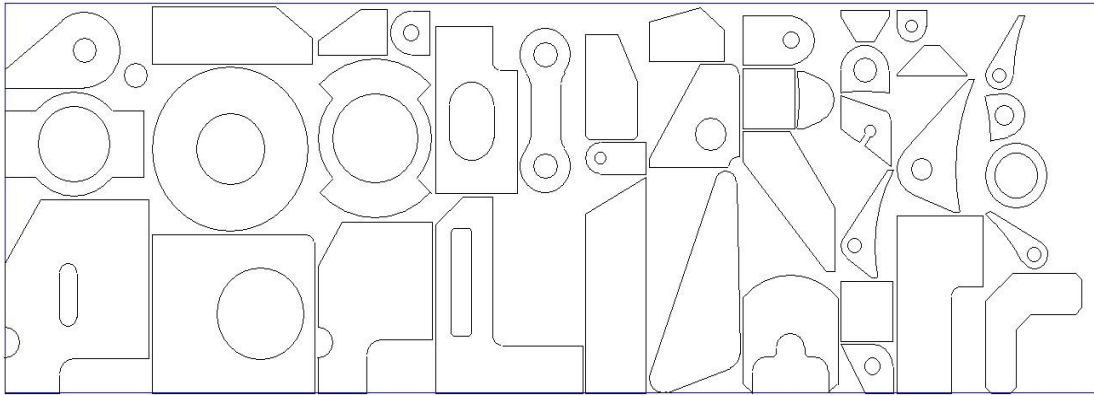


图 4.13 40 零件排样图

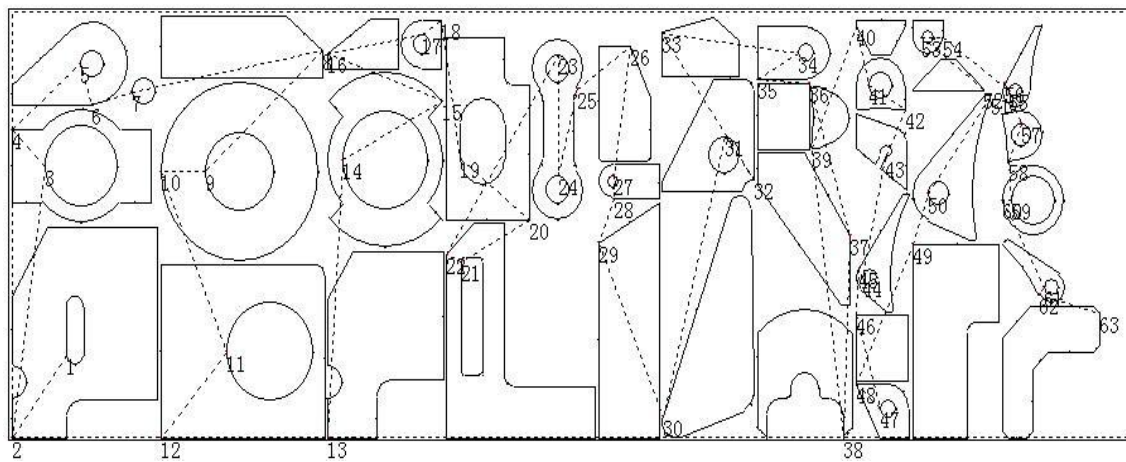


图 4.14 n 型排序优化前切割路径图

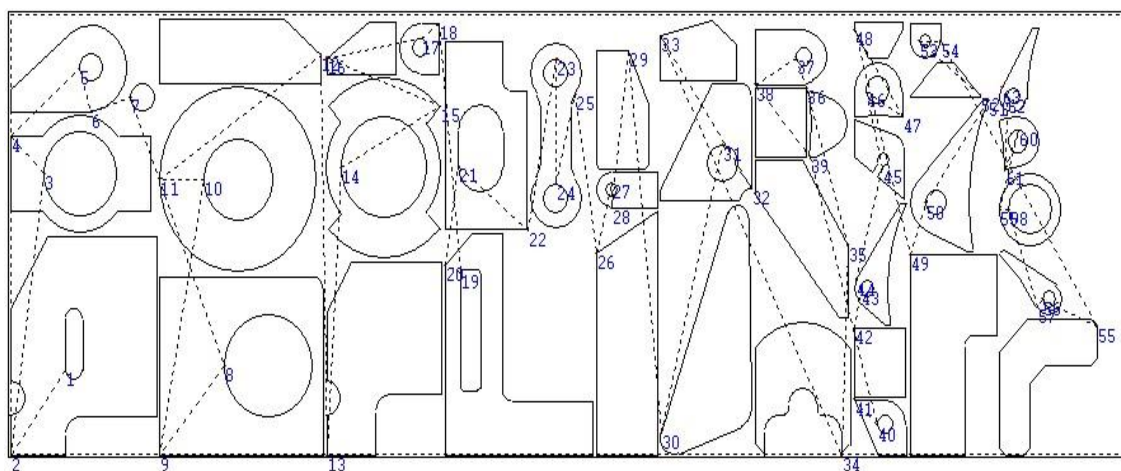


图 4.15 N 型排序优化前切割路径图

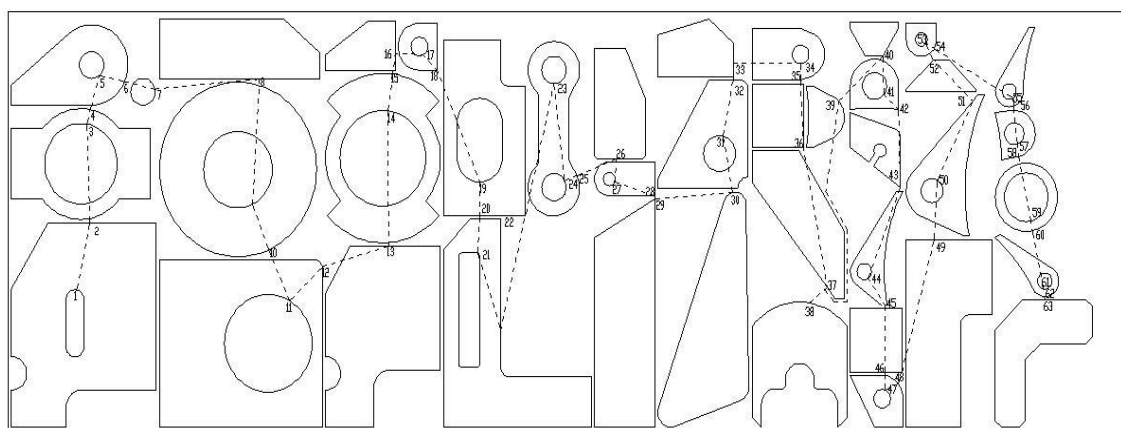


图 4.15 n 型排序优化后切割路径图

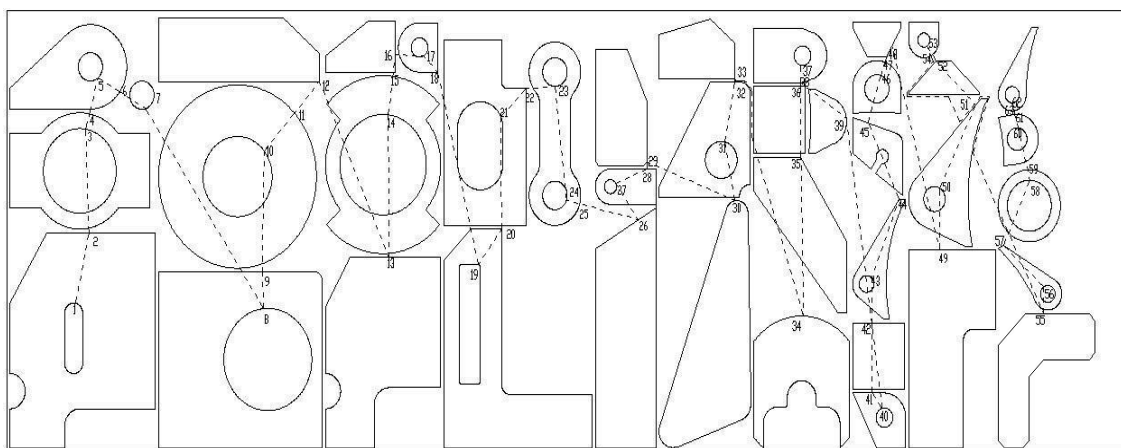


图 4.15 N 型排序优化后切割路径图

实验结果对比分析见下表 4-2:

表 4-2 实验结果对比分析

	n 型算法排序		N 型算法排序	
	经过已切割区域次数	割嘴空行程路径(mm)	经过已切割区域次数	割嘴空行程路径(mm)
优化前	32 次	18558.083	37 次	22404.328
优化后	1	10405.278	2	12523.950
优化比例	96.9%	43.93%	94.6%	44.10%

从上表中看出,在采用碰撞避让算法优化之前,用 n 型排序方法得到的切割路径中,激光割嘴经过已切割区域次数达到 32 次,空行程总路径为 18558.083mm;采用 N 型排序方法得到的切割路径中,割嘴经过已切割区域次数达到 37 次,空行程总路径为 22404.328mm。此时为了保护激光割嘴,每切割完一个零件轮廓,割嘴需要抬起到安全高度空行程到另外一个待加工的轮廓,这样必然增加生产时间。采用防碰撞避让算法优化之后, n 和 N 型两种排序方法得到的切割路径,都能满足割嘴在切割时不经过板材已切割区域,并且切割空行程路径分别减少了 43.93%和 44.10%,实验结果表明本章中提出的算法既能防止割嘴碰撞损坏,又有一定的路径优化的效果。

4.4 本章小结

本章首先介绍碰撞避让算法研究提出的背景,然后介绍对排样图上的零件排序的算法,并在板材上零件排序的基础上阐述了防碰撞避让算法实现的三个主要的步骤,最后采用实验验证了算法的有效性。

5 总结与展望

5.1 全文总结

本文在江苏省科技攻关项目《板材下料优化与生产管控软件系统》的支持下对二维激光切割路径的优化问题进行深入的研究，从空行程最短和割嘴的防碰撞两个方面分别进行了切割的路径规划，实现了提高切割生产率和节约切割成本的目的。本文的主要工作可以归纳为以下几点：

(1)研究了激光切割工艺的主要内容，包括激光切割所遵循原则、在路径规划中的打孔点的位置的选定、引入引出线的等辅助路径的设置、切割轮廓尖角的处理方法，并建立了零件图形表达的几何模型和路径求解的数学模型。

(2)研究了基于空程路径最短的优化算法，其主要针对激光切割中大量空行程导致切割效率下降的问题而提出的。该算法首先用零件外轮廓的形心来表示零件在板材中的位置，将零件切割顺序的确定问题转化为旅行商问题，用遗传算法求解得到零件的切割顺序，并用局部搜索算法确定切割起点确定切割路径。最后用实验来验证算法的有效性。

(3)研究了激光割嘴防碰撞避让的切割路径优化算法，其主要针对激光割嘴经过板材已切割区域可能会与未及时落下的零件发生碰撞而导致激光割嘴损坏的问题而提出。首先用按列连续或者按列折返的两种排序规则，对板材上零件切割排序，在遵循尽量减少割嘴经过板材已加工区域的原则下，采用两次最近邻搜索算法初步确定各零件切割起点，然后用局部调整算法对不合要求的切割起点进行调整，并对仍然无法满足要求的切割路径采用绕行零件轮廓避让的方法。最后用实验证明了算法的有效性。

5.2 展望

本文主要对二维激光切割路径的规划问题进行的研究，但由于时间和自身知识水平的限制，本文的研究的相关成果仍然有很多值得改善之处，在以后进行相关课题的研究时，将在以下几个方面有待进一步改进：

第一：在基于空行程最短的路径规划中，在排序的过程中采用了遗传算法求解旅行商问题的思路对零件的切割顺序进行排序，求解的结果只是一个相对最优值，根据这个相对最优值得到的零件的切割顺序并不一定是能让切割路径最短的顺序，随着对算法的研究深入，算法求解的最优值能够越来越接近最优值，将这些智能优化算法应用于求解本章的问题能够得到更好的解。

第二：在割嘴的防碰撞算法的研究中，也是采用先确定排样图上零件的切割顺序后

确定各个轮廓的切割起点的原则确定割嘴的轨迹。在切割排序的采用的是n和N型排序，这两种排序都有各自的特点，割嘴防碰撞避让算法也是基于前面提到的两种排序的基础上进行研究的。在今后的工作中，可以研究适合激光割嘴防碰撞避让算法的切割排序方法，在切割零件排序的时候就综合考虑割嘴的防碰撞问题，这样就可以减少算法在后续的路径调整的复杂度，同时可以应用智能优化算法顺序搜索确定零件轮廓切割起点的位置，使得到的路径在满足割嘴防碰撞的基础上路径最短，从而更加节约生产成本。

致谢

行文至此，感慨万千。时光的流逝的速度用光阴似箭来形容也丝毫不为过，两年的硕士生活很快就要接近尾声了，几十年的读书生涯随着硕士毕业也宣告结束了。在这告别校园之际，心中除了对我的老师和同学们的依依不舍外，我也想对曾帮助过的人表示真诚的感谢。

依稀的记得在 2010 年夏天第一次见到我的导师的时候，我就被他的和蔼可亲 and 渊博的知识所感染，在接下来的两年里，我受到了饶老师耳濡目染的熏陶，使我不仅在学术上有所进步，而且在思想上逐渐的成熟。饶老师在学术上的严谨，在工作上的认真，让我深深的折服。作为一个年轻有为的教授，我知道这些成就是他无数个夜晚的挑灯夜战，废寝忘食的辛勤汗水的结晶。当我遇到疑惑时，饶老师简短的几句话就能让我冲出迷雾，恍然大悟。饶老师对我的指导和他对工作的态度，是我一生受用无穷的财富，能成为饶老师的弟子也是我人生的幸事，在实验室的两年时光也将给我留下美好的回忆。此外也非常感谢课题组的张超勇老师和刘琼老师，感谢你们平时对我的指导和帮助，你们身上的优秀品质永远值得我学习！

感谢我的亲人，感谢你们给我提供稳定的后勤保障，让我无论遇到多大的困难都有坚持下来的决心和勇气，让我无论离家多远都能时时刻刻的眷恋着家的舒适和温暖，在这些年里，你们为了我的成长成才辛勤的耕耘，不求回报，让我切身的体会到亲情的无私和伟大。如今我毕业了，能够具体报答你们的恩情的时候也到来了，虽然你们对我从来不求回报，但是在以后的岁月里，让你们能够在物质上过得比以前更丰富是我奋斗的目标；以后无论多忙，我都会在隔一段不长的时间内常回家看看，因为我知道在你们心中我常回家看看比什么都重要，以后工作再忙我仍然会像在学校一样隔三差五打电话问候你们，让你们在以后的岁月里在健康和欢乐中渡过！

感谢实验室的各位同仁们，感谢你们在学术上指导和生活上的帮助，特别感谢王孟昌博士和曹德列师兄，你们对我的帮助让我终生难忘，谢谢你们。感谢既是我的羽毛球的黄金搭档又是我的好朋友的黄敬博士，想象着以后西体球场没我的日子，你将会是怎样的孤独！感谢我研究生好友李俊，郭鹏，李新鹏，去百景园的路上因为有你们而不单调，谢谢你们！

感谢我高中的那帮兄弟和好友，曾为所谓的梦想共同奋斗的那段岁月，让我们结下了深厚的情谊，我相信这种纯真的情谊不会因为时间的久远和距离的分割而黯淡。那两次彻夜畅谈的经历、那几次与你们一起买醉的夜晚、那聚会时留下的欢乐都将是我心中无限美好的回忆，感谢生命中一路有你们！感谢那些在我失意的时候给我鼓励和安慰的

华中科技大学硕士学位论文

好友，你们让我在挫折中有了快速站起来的勇气和决心，让我时不时的想起来就会有一种温暖的感动，谢谢你们！

还有一些特别的人值得我去感谢，生命的历程会经历太多的事情，每一段旅程中所经历的人和事，无论当时是以煎熬还是以欢快的状态经历的，也无论这些人在你的生命中是个瞬间的过客还是永久的伙伴，相信在以后真正成熟的时候回忆这些事情，都将是美好的记忆，生命因为经历而精彩，所以现在我要为以后的我真心的去感谢你们！

曲终人散，一段旅程就要结束了，临别之际，再一次真心祝福所有的人。在下一段旅程中，我要更加的努力，继续拼搏，不辜负所有关心我的人的期望。

2012.5.8 夜写于华工

参考文献

- [1]孔德杰, 张光先, 立强. 等数控等离子切割技术在我国现状与发展[J]. 电焊机, 2005 35(001):6-7
- [2]华自圭. 火焰切割技术的发展与应用(一)[J]. 焊接, 1986, 3:1-3
- [3]廖勇, 卢义玉, 向文英等. 数控水刀在石材切割中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1800-1803
- [4]曹炬, 胡德彪. 大规模矩形件优化排样的遗传算法[J]. 锻压机械, 1999, 34(4): 17-20
- [5]Hopper E, Turton B. A genetic algorithm for a 2D industrial packing problem[J]. Computer and Industrial Engineering, 1999, 37(1): 375-378
- [6]陶献伟, 王华昌, 李志刚. 基于填充算法的矩形件排样优化求解[J]. 中国机械工程, 2003, 14(13): 1104-1107
- [7]贾志欣, 殷国富, 罗阳. 二维不规则零件排样问题的遗传算法求解[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(5): 467-470
- [8][Horacio Hideki Yanasse, Marcelo Saraiva Limeira. A hybrid heuristic to reduce the number of different patterns in cutting stock problems[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(9): 2744-2756
- [9]Wenqi Huang, Kun He. A new heuristic algorithm for cuboids packing with no orientation constraints[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(2): 425-432
- [10]Yaodong Cuia, Yiping Lub. Heuristic algorithm for a cutting stock problem in the steel bridge construction[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(2): 612-622
- [11]华焱, 陈文亮. 基于 Minkowski Sum 的优化排样算法研究[J]. 中国制造业信息化, 2006, 35(19): 10-15
- [12]Sriram.M, Kang.S.M. A modified hop-field network for two-dimensional modular placement[J]. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits system, 1990, 5: 1664-1667
- [13]Cheok.B, Nee.Y. Algorithm for nesting and ship/offshore structural plates [J] Advances in Design Automation, 1991, 32(2): 221-226
- [14]王及忠. 一种新的快速求解NFP的方法[J]. 西南交通大学学报, 1993, 5(1): 1-2
- [15]Francis E.H, Tay .T.Y. Chong, F.C. Lee. Pattern nesting on irregular-shaped stock using Genetic Algorithms [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, 27:

203-208

- [16]Julien Antonio, Fabrice Chauvet, Chengbin Chu, et al. The cutting stock problem with mixed objectives:Two heuristics based on dynamic programming[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 114: 395-402
- [17]Paolo. Toth Optimization engineering techniques for the exact solution of NP-hard combinatorial optimization problems[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 125: 222- 238
- [18]Adamowicz M, Albano. A.Nesting Two-Dimensional Shapes in Rectangular Modules [J]. Computer Aided Design, 1976, 8: 27-33
- [19]刘胡瑶, 何援军. 基于重心NFP的二维不规则形状排样算法[M]. 上海: 上海交通大学, 2007
- [20]Hamish T. Dean, Yiliu Tu, John F. An improved method for calculating the no-fit polygon[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33: 1521-1539
- [21]Wenqi Huang, Kun He. A new heuristic algorithm for cuboids packing with no orientation constraints[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36: 425-432
- [22]J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Kan. Some Simple Applications of the Traveling Salesman Problem[J]. Operational Research Quarterly, 1975, 26(4): 17-733
- [23]U. Manber, S.Israni, Pierce Point Minimization and Optimal Torch Path Determiation in Flame Cutting [J]. Journal of Manufacturing Systems, 1984, 3(1): 81-89.
- [24]V. Cerny. Thermo dynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm[J].Journal of Optimization Theory and Applications, 1985, 45(1): 41-51
- [25]Garey.M.R, Johnson. A Guide to the Theory of NP-completeness[D]. Computers and Intractability: W.H. Freeman, 1979
- [26]R.A.Rutenbar. Simulated Annealing Algorithms: An Overview[J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 1989, 5(1): 19-26
- [27]J.A. Bland, G.E Dawson. Tabu Search and Design Optimization[J]. Computer Aided Design, 1991, 23(3): 195-201.
- [28]Han G, Na S. A study on torch path planning in laser cutting process part 2 cutting path optimization using simulated annealing[J]. Journal of Manufacturing Process. 1999, 1(1): 62-70

- [29]徐路宁, 王霄等. 激光切割板材的工艺处理[J]. 应用激光, 2002, 22(6): 533-538
- [30]N. N. Rykalin, A. Uglov, A. Kokora, et al. Laser machining and welding[M]. Pergamon Press. 1978.
- [31]Kenneth Castelino, Roshan, D'Souza, et al. Toolpath Optimization for Minimizing Airtime During Machining[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2002, 22(3): 173-180
- [32]冯爱新. 少无废料激光板材切割技术[J]. 应用激光, 2005, 25(2): 87-89
- [33]高伟增, 张宝剑, 陈付贵等. 基于遗传算法的切割路径优化[J]. 西南交通大学学报, 2006, 40(4): 457-461
- [34]李建涛, 黄星梅等. 二维矩形件切割的路径优化[J]. 机械设计与制造, 2005, 4: 86-87
- [35]俞武嘉, 傅建中等. 基于遗传算法的刀具路径优化排布方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(12): 2117-2121
- [36]王书文, 黄星梅, 李建涛. 二维矩形件组块优化切割的研究与实现[J]. 苏州大学学报: 工科版, 2007, 27(6): 49-52
- [37]李泳, 张宝峰. 复杂轮廓激光切割路径优化算法的研究[J]. 天津理工大学学报, 2007, 23(3): 6-79
- [38]Cuneyt Oysu, Zafer Bingul. Application of heuristic and hybrid-GASA algorithms to tool-path optimization problem for minimizing airtime during machining[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, 22(3): 389-396
- [39]李妮妮, 陈章位, 陈世泽. 基于局部搜索和遗传算法的激光切割路径优化[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(2): 234-239
- [40]刘会霞, 王霄. 共边排样件激光切割路径的规划[J]. 中国激光, 2005, 31(10): 1269-1274
- [41]刘斌, 黄树槐. 分层实体制造技术中激光切割路径的优化[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2001, 29(1): 31-33
- [42]刘会霞, 王霄, 蔡兰. 钣金件数控激光切割割嘴路径的优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(005): 660-665
- [43]David F R, 石教英译. 计算机图形学的算法基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 131-147
- [44]王树禾. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1990: 9-19
- [45]舒贤林, 徐志才. 图论基础及其应用[M]. 北京: 北京邮电学院出版社. 1988: 12-22
- [46]戴一奇, 胡冠章. 图论与代数结构[M]. 北京: 清华大学出版社. 1995, 6: 32-56
- [47]冯剑, 岳琪. 模拟退火算法求解TSP问题[J]. 森林工程, 2008, 24(001): 94-96

- [48]高尚. 求解旅行商问题的模拟退火算法[J]. 华东船舶工业学院学报, 2003, 7(003): 13-16
- [49]盛国华, 陈玉金. 改进模拟退火算法求解 TSP 问题[J]. 电脑知识与技术, 2008, 2(15): 1103-1105
- [50]W B Yang, Y W Zhao. Improved simulated annealing algorithm for TSP[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(15)
- [51]Y Elhaddad, O Sallabi. A new hybrid genetic and simulated annealing algorithm to solve the traveling salesman problem[J]. Proceedings of the World Congress on Engineering, 2010, 1: 2078-0958
- [52]R Thamilselvan, P Balasubramanie. A Genetic Algorithm with a Tabu Search (GTA) for Traveling Salesman Problem[J]. International Journal of Recent Trends in Engineering Issue, 2009, 1: 607-610
- [53]田景文, 高美娟. 人工神经网络算法研究及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006
- [54]J L An, J Gao, J H Lei, et al. An Improved Algorithm for TSP Problem Solving with Hopfield Neural Networks[J]. Advanced Materials Research, 2011, 143: 538-542
- [55]马良, 朱刚, 宁爱兵. 蚁群优化算法[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [56]玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [57]余楠. 一种改进的遗传算法及其在旅行商问题中的应用[J]. 电脑开发与应用, 2009, 22(1): 35-36
- [58]黄岚, 王康平, 周春光等. 粒子群优化算法求解旅行商问题[J]. 吉林大学学报: 理学版, 2003, 41(004): 477-480
- [59]X Shi, Y Liang, H Lee, et al. Particle swarm optimization-based algorithms for TSP and generalized TSP[J]. Information Processing Letters, 2007, 103(5): 169-176