

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0126-04

# 激光平面切割自动编程的关键技术

鲍勇 武强 王喜兵 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 激光平面切割所面对的原始对象是众多无序的曲线段,而加工轨迹间的定位以及切割过程本身却是一个有序连续加工过程。如何将无序的曲线段转换成有序的并且符合激光切割工艺要求的加工轨迹,如何将杂散的轨迹规划成高效的切割路径从而最终生成数控(NC)加工代码,这些都是实现激光平面切割自动编程的关键。根据激光平面切割轨迹和加工工艺的特点,对实现自动编程所必须解决的若干关键技术进行了深入分析,对每一个关键步骤均给出了解决方案和思路,最终实现了经“轨迹的自动提取”、“轨迹间关系的自动判别”、“开光点的自动创建”、“最短切割路径的自动规划”等关键步骤由无序的曲线段自动生成数控程序的过程。

**关键词** 光学制造; 激光加工; 自动编程; 轨迹分析; 平面切割

**中图分类号** TG485; TP31 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0126

## Key Technologies of Auto Programming for Laser Planar Cutting

Bao Yong Wu Qiang Wang Xibing Zuo Tiechuan

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

**Abstract** The original objects dealt with in laser planar cutting are numerous curve segments out of order, while the processing itself is sequential. The key of auto programming for laser planar cutting is how to convert such curve segments to ordered cutting traces and generate numerical control (NC) codes at last. According to the characteristics of laser planar cutting, the key technologies of auto-programming are discussed and the solutions to every key steps are given here. NC programs of laser planar cutting can be automatically generated from unordered curve segments through such key steps, namely “auto extraction of traces”, “auto analysis of relations between traces”, “auto creation of laser-on points” and “auto plan of the shortest path”.

**Key words** optical fabrication; laser processing; auto programming; trace analysis; planar cutting

## 1 引言

激光切割作为一种高柔性、高质量、高效率的加工手段在金属、非金属材料加工领域有着越来越广泛的应用。借助于 CAD/CAM 技术,激光切割可以加工出非常复杂的零件。加工对象的复杂性使得数控(NC)编程过程成为整个生产链的重要组成部分,制约着整体的加工效率,甚至影响加工质量的好坏。激光平面切割数控编程通常的方式是读入已编辑好的 CAD 图形,通过图形分析提取切割轨迹、规划加工路径。然而,对于数控编程系统,原始的 CAD 图形内的几何元素都是无序存在的。CAD 图形越复杂,其所包含的几何元素就越多,几何元素的数量可能是海量的。如何将海量的处于无序状态的曲线段

经一系列自动化、智能化的处理,转换成有序的加工轨迹,最终高效地自动生成数控代码是本文研究的重点。

## 2 技术分析

针对激光平面切割的特点,本文从以下几个关键问题对自动化编程进行了系统的研究。

### 2.1 断点的自动清除及轨迹的自动提取

激光切割是一个连续的过程。加工轨迹通常是由圆或众多首尾相连的直线段和圆弧构成的。在实际的 CAD 图形设计中,由于人为错误或者捕捉误差本应首尾相连的曲线段间可能存在微小间隙,即所谓的“断点”,如图 1 所示。如果不清除这种间隙,

**作者简介:** 鲍勇(1973—),男,硕士,副研究员,主要从事激光加工和数控编程等方面的研究。

E-mail: smartbao@bjut.edu.cn

那么本应连续的轨迹将变成断续加工,由此得到的加工结果没有准确性可言。所以在提取加工轨迹之前首先要查找断点并清除之:从曲线集的第一条曲线的两端开始同时向两个方向查找断点,在查找的过程中如果找到与当前加工轨迹的两个端点( $P_s$ 和 $P_e$ )有重合端点的曲线则以该曲线的另一端继续后面的搜索;如果没有找到重合端点则点 $P_s$ ( $P_e$ )处必然存在断点,那样就必须找到离点 $P_s$ ( $P_e$ )最近的曲线段,并为该曲线的近端设置新的端点。设置新端点时根据连接对象的不同分为两种情形,如图1所示。

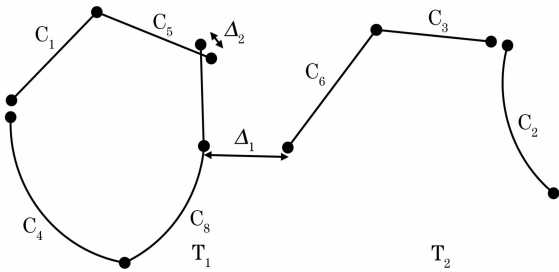


图2 轨迹中曲线段间的“断点”

Fig. 2 “Breakpoints” between curve segments in traces

- 1) 如果离点 $P_s$ ( $P_e$ )最近的曲线是直线段(如图2中的 $C_2$ ),则直接将该直线的近端点设置为 $P_s$ ( $P_e$ );
- 2) 如果离点 $P_s$ ( $P_e$ )最近的曲线段是圆弧(如图2中的 $C_3$ ),则以该圆弧的远端点、圆弧中点和点 $P_s$ ( $P_e$ )三点构成的一个新圆弧(如图2中的 $C'_3$ ),取代原有圆弧。

激光切割的加工轨迹根据轨迹的起点与终点是否重合分为闭合加工轨迹和非闭合加工轨迹。如图1中的 $T_1$ 是闭合加工轨迹, $T_2$ 是非闭合加工轨迹。轨迹的自动提取包含两个方面的内容:顺序化及闭合与非闭合加工轨迹的识别。

在CAD图形中所包含的直线段、圆弧在处理前彼此之间是没有内在联系的。如图2所示, $C_1$ 到 $C_8$ 共8条曲线段构成两条加工轨迹 $T_1$ 和 $T_2$ ,虽然看上去 $C_1-C_4-C_8-C_7-C_5$ 首尾连接构成了 $T_1$ , $C_6-C_3-C_2$ 首尾连接构成了 $T_2$ ,但实际上在CAD数据文件

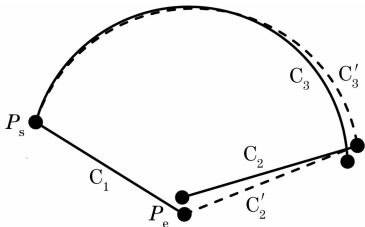


图1 “断点”的清除

Fig. 1 Cleanup of “breakpoints”

中这些曲线段是“随机”存储的,即对于编程系统而言,最初这些曲线段是无序的。顺序化的过程就是按首尾相连的顺序将原本“无关”的曲线段连接起来以构成闭合或非闭合加工轨迹。顺序化的算法与清除断点的算法相似,在此不再累述。

之所以要识别闭合与非闭合加工轨迹,是因为某些后续处理只是针对闭合加工轨迹的,如自动创建开光点、自动实现刀具半径补偿等。这一识别过程是通过判断相关曲线段间的间隙大小来实现的:轨迹之间的间隙远大于轨迹内曲线段间的间隙,如图1中 $\Delta_2 \gg \Delta_1$ 。由此可以提取出不同的加工轨迹,再根据起点与终点是否重合就能判别出闭合与非闭合加工轨迹了。

### 2.2 轨迹间相对位置关系的自动判别

完成轨迹的自动提取后,对于编程系统加工轨迹之间仍是无序存在的。只有确定了轨迹间的相对位置关系才能进一步确定激光切割的先后顺序。加工轨迹间的相对位置有三类情形。以闭合轨迹为例,如图3所示。

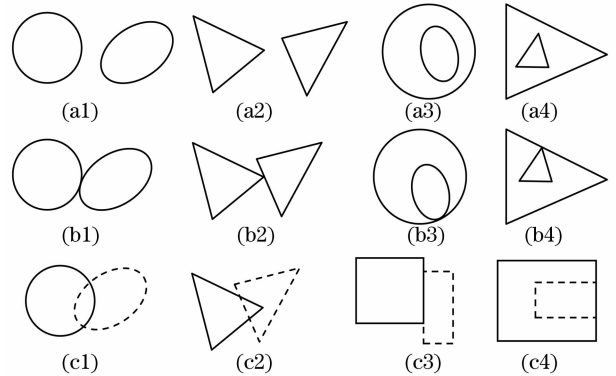


图3 轨迹间的相对位置关系

Fig. 3 Relation between traces

- 1) 两条闭合轨迹没有交点,或分离[如图3(a1)和图3(a2)]或嵌套[如图3(a3)和图3(a4)];
- 2) 两条闭合轨迹有可数个交点,它们所形成的封闭区域或分离[如图3(b1)和图3(b2)]或嵌套[如图3(b3)和图3(b4)];
- 3) 两条闭合轨迹所形成的封闭区域局部相交[如图3(c1)和图3(c2)];两条闭合轨迹有不可数个交点,它们所形成的封闭区域或分离[如图3(c3)]或嵌套[如图3(c4)]。

对于图3(c1)和图3(c2)的情形,当激光切割头沿着后切的轨迹从另一条已切的闭合轨迹所形成的镂空区域上经过时会与工件发生碰撞。这是因为在切割过程中为了保持焦点位置和喷嘴气压不变,在

随动调节系统的控制下激光切割头的喷嘴与材料表面的间距始终保持不变。当切割到镂空区域时,喷嘴下面已没有材料,随动调节系统会驱动切割头向下运动而导致与工件发生碰撞,切割过程随之中断。可见具有这种相对位置关系的轨迹应被筛选出来。另外,对于图 3(c3)和图 3(c4)的情形,后切的轨迹在重叠的路径上使材料经受两次激光扫描,这会导致过烧,是不必要的,具有这种相对位置关系的轨迹也应被筛选出来。

轨迹间的相对位置关系可以由闭合轨迹所围成的封闭区域经相交运算获得。设有  $n$  条轨迹,确定任意两条轨迹间的相对位置关系理论上需要进行  $(n^2-n)/2$  次判别。然而轨迹间实际上存在一定的约束关系,即若轨迹  $T_1$  已被轨迹  $T_2$  直接包含,则  $T_1$  不可能被任何其他轨迹直接包含。根据这一约束条件,按照先外后内的顺序逐级进行判别,从而使判别次数大大减少。

### 2.3 最佳开光点的自动创建

对于每一条加工轨迹激光切割的过程总是先打孔再切割。有时打孔的孔径大于聚焦光斑的直径,在高反射性材料表面打孔时产生的飞溅往往会将表面划伤。因此对于闭合加工轨迹一般不在轨迹上直接打孔而是选择在有废料的一侧开光,如图 4 所示,图中阴影部分均为废料。另一方面,加工轨迹是由众多直线段、圆弧构成的,轨迹的形状、走向千变万化,并不是轨迹上的每一点都适合于做开光线段的接入点。如图 5 所示,图中给出了 3 条不同的开光线段。

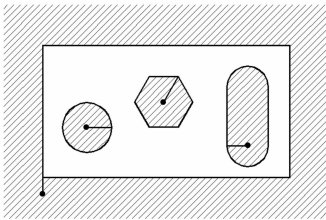


图 4 切割轨迹上的开光点

Fig. 4 Laser-on points on cutting traces

1)  $L_1B$  是角  $ABC$  的平分线。角  $ABC$  是锐角,当激光切割头运动到点  $B$  时由于运动方向急剧变化,切割速度降至最低,在激光功率保持不变的情况下该处会出现热积累,从而产生明显的过烧现象;

2)  $L_2C$  是角  $BCD$ (逆时针方向)的平分线。角  $BCD$  是钝角,与第一种情况相比,当切割头运动到点  $C$  时速度变化不大,该处的过烧现象也不明显;

3)  $L_3, F, E$  三点共线,当切割头运动到点  $F$  时速度保持不变,因而不会产生过烧现象。

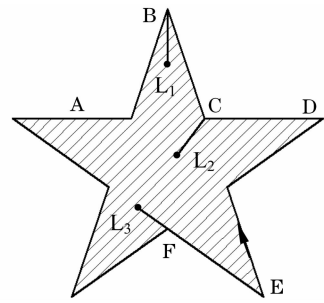


图 5 最佳开光点的选择

Fig. 5 Selection of the best laser-on point

实验证明采用第 3 种开光方式能获得最佳的加工质量,第 2 种方式次之。可见最佳开光点应选在开光线段与相应的接入曲线段夹角最大的地方。

### 2.4 最短切割路径的自动规划

切割路径规划的目的是保证激光切割头在不同加工轨迹之间总的定位行程最短,以获得最高的加工效率。尽管定位运动的速度远高于切割速度,但当切割成百条、上千条轨迹时如果不对切割路径进行规划,则用于定位的耗时可能与切割过程的耗时相当甚至更多,这样激光切割高效率的优势就无从体现了。

在规划切割路径时首先要保证嵌套加工轨迹“先内后外”的切割顺序,这是获得正确加工结果的前提。对于具有对等相对位置关系的轨迹则以开光点离上一条加工轨迹的关光点最近的轨迹为先。图 6 是一个复杂加工件,在未规划前有 3822 条曲线,585 条加工轨迹,理论上要进行 170820 次相对位置判别,按 2.2 节的自动判别方法,可使判别次数减少 85%。图 6 是此工件按上述算法进行路径规划后的结果。

上述规划算法对于轨迹间呈矩阵关系的加工对象可能并不是最佳的方案。这是因为在矩形矩阵中某条轨迹的关光点到其邻近的两条(或以上)轨迹的开光点是等距的。对于这种情况,按行或按列进行轨迹规划一般可以得到最短的加工路径。

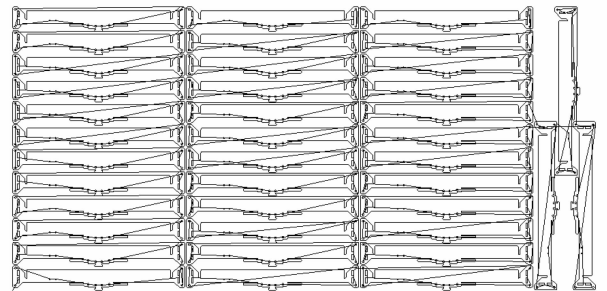


图 6 最短切割路径的规划结果

Fig. 6 Result after plan of the shortest path

### 3 结 论

由原始的 CAD 图形自动生成数控程序是一个从无序到有序、从相对有序到绝对有序的变换过程,是将有确定位置和尺寸的曲线段变换为可顺序执行的数控代码的过程。在这一过程中引入一系列智能的优化算法,可以消除人为因素的干扰,保证加工的一致性,从而最终获得高效率和高质量的加工结果。

通过对激光平面切割自动编程关键技术的系统研究,独立开发出一套基于 AutoCAD 的激光平面切割自动编程系统——Laser2D。该系统具有实用、高效、小巧等突出优势,编程人员在完成零件设计的同时就能自动获得数控加工程序。

#### 参 考 文 献

- 1 Chen Guangxia, Zeng Xiaoyan. The development of laser cutting CNC system based on AutoCAD [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2008, **4**: 151~153  
陈光霞,曾晓雁. 基于 AutoCAD 激光切割数控系统的开发[J]. *机械设计与制造*, 2008, **4**: 151~153
- 2 Mao Guibo, Lü Shanjin, Wang Yang *et al.*. Development of laser processing oriented NC auto-programming system [J]. *Mechanical Engineer*, 2003, **12**: 9~12  
毛贵波,吕善进,王 扬等. 面向激光加工的数控自动编程系统的开发[J]. *机械工程师*, 2003, **12**: 9~12
- 3 Xu Yan, Chen Wenliang, Wang Qifeng. The algorithm of judging the loop's direction in NC tooling automatic programming [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2000, **17**(5): 20~22  
徐 岩, 陈文亮, 王奇峰. 数控加工自动编程中环方向的判断算法[J]. *机电工程*, 2000, **17**(5): 20~22
- 4 Luo Wen, Sun Yanming, Chen Zhenwei *et al.*. An improvement algorithm of judging upon the relationship between a point and polygon[J]. *Machinery*, 1999, **26**(3): 25~27  
骆 雯, 孙延明, 陈振威等. 判断点与封闭多边形相对关系的改进算法[J]. *机械*, 1999, **26**(3): 25~27
- 5 Duan Aiqin, Chen Xinsong, Zhang Peng. Development of laser cutting programming system and its software[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1999, **S1**: 17~20, 24  
段爱琴, 陈新松, 张 鹏. 激光切割编程系统及其软件的研制[J]. *航空工艺技术*, 1999, **S1**: 17~20, 24
- 6 高恒强, 补家武, 蔡红娟. 基于 AutoCAD2002 的数控切割系统 [J]. *CAD/CAM 与制造业信息化*, 2006, **7**: 80~82
- 7 贾 军, 乐 英. 基于 AutoCAD 的板类零件数控切割自动编程 [J]. *CAD/CAM 与制造业信息化*, 2002, **2**: 30~31