基于特征线的棱脊重构及加工轨迹规划算法

虞　钢　王建伦
中国科学院力学研究所,北京,100080

摘要:在基于三维曲面的激光强化加工中,针对某些特殊的加工表面,采用基于特征线的测量、重构及轨迹规划方法,可在不降低精度的基础上大幅度提高效率。主要针对常见的一种曲面类型即棱脊,介绍了基于特征线的棱脊重构及加工轨迹规划方法的应用。除适用于激光强化外,该方法对于一般的刀具加工也有一定的应用价值和参考意义。

关键词:激光加工;轨迹规划;棱脊;特征线
中图分类号:TG665　　**文章编号**:1004 - 132 X(2005)23 - 2083 - 04

Reconstruction and Path Planning of Ridges Based on Feature Lines

Yu Gang　Wang Jianlun
Institute of Mechanics,Chinese Academy of Sciences,Beijing,100080

Abstract:In 3D laser surface hardening, an algorithm based on feature lines was applied to solve the problems of surface reconstruction and manufacturing path planning. Taking a specific surface type - ridge as example, the procedure of algorithm and its application were introduced. As results, a good effect is obtained with the whole efficiency greatly improved. It is also valuable and useful for other manufacturing prcesses using machine tools.

Key words:laser manufacturing;path planning;ridges;feature line

0　引言

在三维激光强化加工中[1],待加工工件的面型数据除CAD模型外,主要来源于测量系统。通过自适应测量技术得到不规则的密集三维散乱数据点,加工时五轴数控机床或机器人的轨迹数据格式为空间三维坐标加 A、C 轴转角的五维数据 (x,y,z,A,C)[2],或者是空间三维坐标加外法向量的六维数据 (x,y,z,ax,ay,az)。A、C 轴转角或外法向量 (ax,ay,az) 都不是任意的,因为系统加工时要求激光束的方向垂直于加工表面(沿法线方向)。另外按照强化的工艺要求,轨迹点(对应激光光斑)应当均匀有序地覆盖加工面。

基于上述特点和要求的轨迹规划算法,一般包含如下两个主要步骤[2]:①空间三维数据点的曲面拟合,即据测量的三维散乱数据,反向求解加工物体表面的形状,将散乱点拟合成具有数学表达方式的自由曲面;②空间曲面上的五维(或六维)等距轨迹线的规划,即在经过拟合后的曲面上根据数控机床或机器人的加工轨迹的要求,求出每一轨迹点的坐标值及单位法向量。

构造散乱数据插值曲面的基本方法为构造NURBS曲面及三角曲面[3]。因NURBS曲面方法主要构造四边域曲面且不适合构造无规则的散乱数据插值曲面,所以多采用构造三角曲面的方法。

从理论上说,上述算法无疑具有较好的通用性,但就实际而言,在诸如大型汽车覆盖件冲压模具表面,存在大量棱脊这类有特定形貌、曲率较大的面型。对这类面型,上述方法显得过于繁琐,效率不高,效果也不是很好。此时基于特征线的重构及轨迹规划算法可以作为一种很好的补充。文献[4]假定棱脊的横截线为圆弧,从而通过纵向的3条特征线来重构棱脊。这种假定有其局限性,而且整体的效率也不够高。本文在重新给出棱脊定义的基础上,提出了一种新的基于特征线的棱脊重构及轨迹规划的算法。

1　棱脊的定义

棱脊是加工表面中常见的一种面型,因应用环境和应用目的不同,加之棱脊的种类很多,故还没有一个通用的定义。从特征线的角度及激光强化加工的目的出发,可给出棱脊的定义如下:

给定一条光滑的空间曲线 L,则在 L 上任一点可作相应的法平面,在法平面上作过该点的曲线 R,令 R 沿 L 运动,R 扫掠所构成的曲面即称为棱脊。曲线 L 称为棱脊导线,R 称为棱脊母线(图1)。

上述运动需满足如下要求:R 在运动过程中对应起点至终点的向量与某一参照平面(一般取为水平面)始终保持相同夹角 θ;在 L 上任一点处可建立局部坐标系,即以这一点为坐标原点,以该点处 L 的切线方向为 x 轴,以 R 在该点对应的起点至终点的方向为 y 轴,x、y 的叉积为 z 轴,则任

收稿日期:2004 - 11 - 19

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

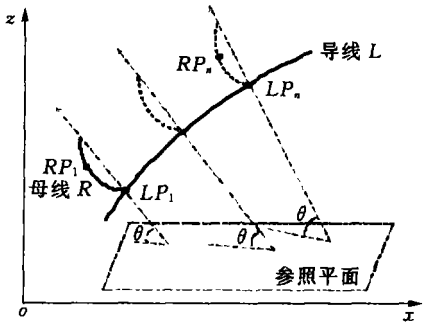


图 1　棱脊示意图

意点处的 R在相应局部坐标系内都有完全相同的坐标表示。

严格地说,上述定义并不能涵盖棱脊的所有情形,但对于大型汽车覆盖件冲压模具表面这类激光强化对象,其中的绝大多数棱脊都符合定义的特征要求。

2　棱脊重构及轨迹规划的基本步骤

由上述定义可知,对于一个棱脊,只要知道一条棱脊导线以及导线上某一点处的母线,则整个棱脊就可以确定下来。导线与母线就是棱脊的两条特征线。具体的测量、重构及轨迹规划流程如下:①测量棱脊的一条导线及导线上某一点处的母线,为提高效率,可采用三维自适应测量方法[5];②在上述测量数据的基础上对棱脊导线及母线分别进行样条插值拟合,从而得到棱脊导线和一条已知母线;③按照一定的步长,分别在棱脊导线和已知母线上取等距点,并可在此基础上进一步计算已知母线上各等距点的法向量;④在导线等距点上都有相应的母线,母线上的等距点(包括坐标及对应法向量)可由已知母线上的对应等距点经一定的坐标变换得到;⑤将不同母线上的对应等距点按照一定顺序排列,即得到所需的加工轨迹。

3　关键步骤算法及算例分析

3.1　已知母线加工点的坐标确定

上述流程中的第 3 步和第 4 步是关键所在,结合图 1 讨论如下:

设 LP_1 为棱脊导线 L 上的一点,RP_1 为过该点的母线上的一点,作为加工点其六维坐标为 (x, y, z, ax, ay, az)。假设上述母线是由测量、拟合得到,即所谓已知母线,则其空间坐标 (x, y, z) 已知,主要考虑 RP_1 点处的法向 (ax, ay, az) 计算。计算有两种方法:一种是把母线近似认为是圆弧,在求得近似圆心的基础上可得到母线上各点的法向,这种方法较为简易,但仅适合于母线较短、较光滑的情形;另一种则是从一般的角度来考虑其算法。

由上面给出的棱脊定义,母线上点的法向一定在对应法平面内,且垂直于母线在该点的切矢(图 2)。

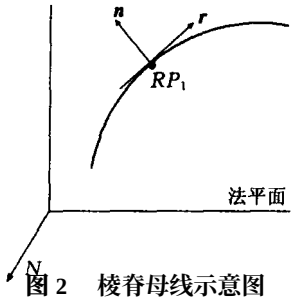


图 2　棱脊母线示意图

RP_1 点的法向 n 既垂直于母线在该点的切矢 r,同时又垂直于法平面的法向 N。所以 $n = \pm r \times N$,要求 n 的方向是向上的(n 的 az 分量大于 0)。对于 r 和 N,可采取数值求解的方法。前面已经在测量点的基础上对母线进行了拟合,故可采用一般参数曲线的切矢算法求解[3]。又因为母线上的点全都在法平面上,由母线上的三点可以确定法平面,并进一步确定法平面的法向 N。

3.2　对应母线加工点的坐标变换及求解

在求得 RP_1 点的坐标及法向后,可通过坐标变换求得其他母线对应点的坐标及法向。法向是由起点与终点所决定的,只要知道点坐标的变换公式,就可以求得对应的法向,只需对点的坐标变换进行推导。

首先建立一系列局部坐标系如下:以母线与棱脊导线的交点为原点,对应的 3 个坐标轴分别取为棱脊导线在该点的切矢、由母线的起点指向终点的矢量以及由两者的叉积所决定的向上的矢量。由棱脊的定义可知,不同母线上的点在对应的局部坐标系中的坐标表示是完全相同的,所以只要知道一条母线上点的局部坐标表示,也就知道了所有其他母线上对应点的局部坐标表示。然后由对应局部坐标到整体坐标的转换,就可以得到相应的整体坐标表示。

为讨论方便,设母线的起点在棱脊导线上(由棱脊定义,母线上的点与棱脊导线上对应点的相对位置关系是确定的,则该假定并不失一般性),设各点坐标如下(图 3):$o_1(LP_1)$ 坐标为 (x_1, y_1, z_1),RP_1 坐标为 (x_0, y_0, z_0),RPS_1 坐标为 (x_1', y_1', z_1'),$o_n(LP_n)$ 坐标为 (x_n, y_n, z_n),RP_n 坐标为 (x, y, z),RPS_n 坐标为 (x_n', y_n', z_n')。设坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 下 o_1x_1 对应向量为 $n_1(n_{1x}, n_{1y}, n_{1z})$,$o_1y_1$ 对应向量为 $n_2(n_{2x}, n_{2y}, n_{2z})$,$o_1z_1$ 对应向量为 $n_3(n_{3x}, n_{3y}, n_{3z})$。在坐标系 $o_nx_ny_nz_n$ 下 o_nx_n 对应向量为 $m_1(m_{1x}, m_{1y}, m_{1z})$,$o_ny_n$ 对应向量为 $m_2(m_{2x}, m_{2y}, m_{2z})$,$o_nz_n$ 为对应向量 $m_3(m_{3x}, m_{3y}, m_{3z})$。另设整体坐标系下 x、y、z 轴对应的单位向

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

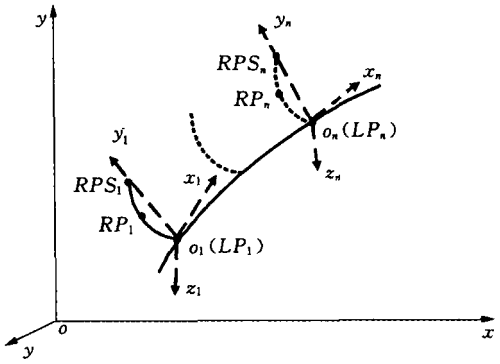


图 3　整体坐标系与局部坐标系

量分别为 i、j、k。这里 o_1 - RP_1 - RPS_1 为已知母线,从而可以确定其对应局部坐标系的坐标轴向量。而 o_n - RP_n - RPS_n 是导线上任意另外一条母线,要确定其局部坐标轴向量,根据局部坐标系定义,其 x 轴向量由 o_n 点处导线的切矢决定,故只需确定 RPS_n 点的坐标,即可确定局部坐标系中 y 轴向量即 $m_2(m_{2x}, m_{2y}, m_{2z})$,从而进一步确定 z 轴向量。由棱脊定义,棱脊母线的起点至终点的向量与水平面的夹角保持不变,根据测得的一条母线,可求得此夹角,设为 θ。另外设棱脊母线起点至终点的距离为 l,l 也可由已测得的母线求得,则 RPS_n 的坐标 (x_n', y_n', z_n') 将满足下式:

$$\left.\begin{aligned}&(x_n'-x_n)m_{1x}+(y_n'-y_n)m_{1y}+(z_n'-z_n)m_{1z}=0\\&(x_n'-x_n)^2+(y_n'-y_n)^2+(z_n'-z_n)^2=l^2\\&z_n'-z_n=l\sin\theta\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

由式(1)可以确定 RPS_n 的坐标,从而确定局部坐标系 $o_nx_ny_nz_n$ 的各坐标轴向量。

下面由已知母线上的点来计算棱脊任意母线上点的坐标,首先将 RP_1 的整体坐标 (x_0, y_0, z_0) 转换为其在局部坐标系 o_1, x_1, y_1, z_1 下的坐标 (a_0, b_0, c_0)。据三维坐标的复合变换公式[6],可得

$$\left.\begin{aligned}a_0&=(x_0-x_1)\cos(\alpha_1(n_1,i))+\\&(y_0-y_1)\cos(\beta_1(n_1,j))+\\&(z_0-z_1)\cos(\gamma_1(n_1,k))\\b_0&=(x_0-x_1)\cos(\alpha_2(n_2,i))+\\&(y_0-y_1)\cos(\beta_2(n_2,j))+\\&(z_0-z_1)\cos(\gamma_2(n_2,k))\\c_0&=(x_0-x_1)\cos(\alpha_3(n_3,i))+\\&(y_0-y_1)\cos(\beta_3(n_3,j))+\\&(z_0-z_1)\cos(\gamma_3(n_3,k))\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

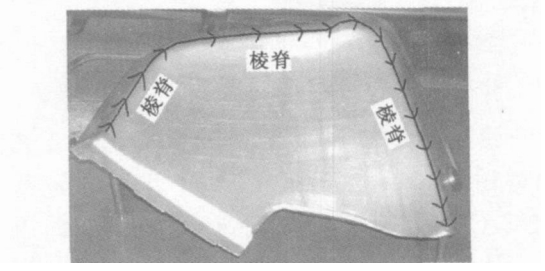
(a_0, b_0, c_0) 同时也就是 RP_n 在局部坐标系 $o_nx_ny_nz_n$ 下的坐标,再作由局部坐标系 $o_nx_ny_nz_n$ 到整体坐标系 $oxyz$ 的坐标变换,即可得 RP_n 的整体坐标:

$$\left.\begin{aligned}x&=a_0\cos(\alpha_1(m_1,i))+b_0\cos(\alpha_2(m_2,i))+\\&c_0\cos(\alpha_3(m_3,i))+x_n\\y&=a_0\cos(\beta_1(m_1,j))+b_0\cos(\beta_2(m_2,j))+\\&c_0\cos(\beta_3(m_3,i))+y_n\\z&=a_0\cos(\gamma_1(m_1,k))+b_0\cos(\gamma_2(m_2,k))+\\&c_0\cos(\gamma_3(m_3,k))+z_n\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

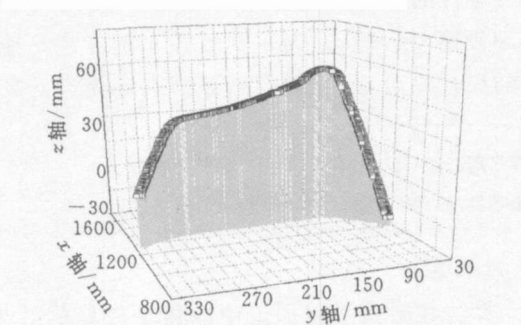
3.3　算例分析

由以上分析可以看到,如果已知一条母线上任一点 RP_1 的坐标 (x_0, y_0, z_0),则可通过上述两步坐标变换得到在其他母线上对应点 RP\ - n 的坐标 (x, y, z)。而法向是由起点与终点决定的,如果已知点 RP_1 处的法向,则其他母线对应点 RP_n 处的法向也可求得。结合前述流程中的其他步骤,棱脊的轨迹规划问题即可得到较好的解决。

图 4 是实际加工件表面一段棱脊及其加工轨迹的示意图。棱脊作为加工件表面应力比较集中的区域,容易出现磨损及疲劳等情况。利用本文方法对棱脊进行重构及轨迹规划,可得到激光强化的加工轨迹。按照这一轨迹进行强化加工,取得了良好的效果。较之文献[4]中的方法,效率有较大的提高,特别是测量时间较原来缩短近 2/3。



(a) 加工件表面的一段棱脊



(b) 棱脊加工轨迹示意图

图 4　棱脊及其加工轨迹

4　结论

基于特征线的棱脊轨迹规划算法实际上是一个从测量、重构到轨迹生成的完整过程。算法在给出棱脊定义的基础上高度精炼地提取棱脊导线及一条母线作为特征线,不仅简化了测量工作,而且根据整体坐标与局部坐标的变换关系,将曲面重构与轨迹规划合而为一,从而使整个算法更为简

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

数控快速点磨削技术及其应用研究

修世超　蔡光起　巩亚东　李长河
东北大学,沈阳,110004

摘要:介绍了快速点磨削技术的发展现状及工艺特征,分析和研究了快速点磨削机理和材料去除机制。研究结果表明,砂轮的磨损机制不同于一般外圆磨削,磨削过程具有较高的绿色加工性能,通过合理控制磨削参数和磨削条件,该项技术可应用于一些难加工材料和复杂回转表面的高质量磨削加工。由此提出了在这些领域开展应用研究的重点内容,以及推广和开发此项技术的意义。

关键词:快速点磨削;超高速磨削;难加工材料;CBN
中图分类号:TG580　　**文章编号**:1004—132X(2005)23—2086—04

Study on Applications and Technology of Quick - point Grinding

Xiu Shichao　Cai Guangqi　Gong Yadong　Li Changhe
Northeastern University, Shenyang,110004

Abstract: The development and the process principle of quick - point grinding were introduced. From the study of quick - point grinding mechanism, it is shown that wear mechanism of the grinding wheel is different from conventional cylindrical grinding, and it can be used to grind some difficult - to - grinding materials and complex round surface with high working quality and green degree under proper grinding conditions. Therefore, the main research issues in the field of quick - point grinding and its importance were presented.

Key words: quick - point grinding; ultra - high speed grinding; difficult - to - grinding material; CBN

0　引言

快速点磨削(quick - point grinding)工艺是由德国 Junker 公司于 1994 年开发的一种集 CNC、CBN 超硬磨料、超高速磨削三大先进技术于一体的高效率、高柔性先进加工工艺,主要用于轴类零件的加工。它采用薄层 CBN 或人造金刚石超硬磨料砂轮,是新一代数控车削和超高速磨削的极佳结合,是目前超高速磨削最先进的技术形式之一[1]。快速点磨削技术已在国外汽车工业、工具制造业中得到应用。我国部分汽车制造企业目前也针对特定零件引进了这一工艺和相应设备,并取得了明显的效益。但由于国外对此项技术的垄断,国内企业并没有真正掌握其关键工艺技术,因而其应用领域很小。国内目前还不能生产配套砂轮及相关附件,全部设备依赖进口。国外有关快速点磨削的机理、规律、磨削质量控制及点磨削工艺等的系统理论与实验研究及相关技术信息也鲜见报道,因此该项新工艺的许多关键技术及理论、新的应用领域均有待于进一步开发

收稿日期:2004—12—07
基金项目:教育部科学技术研究重点项目(104190)

练,效率更高。

算法在激光强化加工中取得了较好的效果,对于传统的刀具加工等也同样适用或具有一定的参考价值。

参考文献:
[1] 虞钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程. 北京:冶金工业出版社,2002
[2] 涂孟夫,虞钢. 五轴框架式机器人激光加工系统轨迹算法研究. 中国激光,2003,30(4):364～368
[3] 孙家广,杨长贵. 计算机图形学. 北京:清华大学出版社,1998
[4] 刘荷辉. 集成化柔性激光加工系统中的智能测量和模具强化 CAM 技术研究:[博士学位论文]. 北京:中国科学院力学研究所,2003
[5] 刘荷辉,虞钢. 汽车模具复杂棱边的三维自适应测量及六维加工轨迹划分. 中国机械工程,2003,14(17):1444～1447
[6] 蔡自兴. 机器人学. 北京:清华大学出版社,2000

(编辑　周本盛)

作者简介:虞　钢,男,1958 年生。中国科学院力学研究所研究员、博士研究生导师。主要研究方向为激光与材料相互作用、智力系统集成化及其应用。出版专著 1 部,发表论文 70 余篇。王建伦,男,1975 年生。中国科学院力学研究所博士研究生。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net