

文章编号: 0258-7025(2009)12-3313-05

基于 STL 模型的五轴激光切割干涉 检查与修正

朱 虎 扶建辉

(沈阳航空工业学院机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要 提出了一种在五轴激光切割中激光头与工件干涉检查并对激光头姿态进行修正的方法。采用 STL 模型对激光头进行模型化,并将其分为凸型和凹型两种类型;利用工件 STL 模型的离散点与激光头各三角面片法向量位置关系找出干涉区域;给出了通过旋转激光头来消除干涉并利用一系列切平面切割激光头来计算临界旋转角的方法;采用 VC++ 和 OpenGL 完成了算法的系统实现。算法应用实例表明,该方法能够很好地检查出激光头和工件的干涉区域,并能够修正激光头的姿态以避免干涉,整个检查与修正过程稳定可靠。

关键词 激光技术;激光切割;STL 模型;干涉;修正

中图分类号 TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093612.3313

5-Axis Laser Cutting Interference Detection and Correction Based on STL Model

Zhu Hu Fu Jianhui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering,
Shenyang, Liaoning 110136, China)

Abstract Methods for interference detection between laser head and part, and correction of laser head posture were proposed. The stereo lithography (STL) model of laser heads was built and divided into two types of concave and convex. The interference areas were found out by using the ubiquity of the disperse points on STL model and normal vector of triangles that are composed of laser head model. A method to avoid the interference by rotating the laser head and to calculate critical rotating angle by using a series of cutting planes cutting the laser head model was presented. The algorithms were implemented by using VC++ and OpenGL. The case studies show that the method can primarily detect the interference areas of laser head and part, and correct the posture of laser head so as to avoid the interference. The whole process of detection and correction are stable and reliable.

Key words laser technique; laser cutting; STL model; interference; correction

1 引 言

五轴三维激光切割以其高柔性而广泛应用于航空航天、汽车等领域,与其他切割方式相比,具有切割质量好、效率高、绿色环保、材料适应性高的优点^[1,2]。随着科学技术的发展,五轴激光切割更多地应用于复杂三维曲面形状的切割,这对于五轴激光切割的数控编程提出了更高的要求。目前,五轴激光切割数控编程大多采用离线自动编程来代替传统的在线示教编程^[3,4],而在离线自动编程过程中

需要解决的很重要的问题就是激光头与工件的干涉问题。在激光切割过程中,激光头的姿态对于三维激光切割质量有着重要的影响^[5]。为了最大限度地吸收激光束能量来保证切割的质量,要求激光束始终与被切割表面垂直,这就促使激光头的姿态要随切割路径上曲面的法线方向及时调整^[6],使得激光头和工件时常有发生干涉的危险。针对上述问题,本文提出一种基于 STL 数据模型的五轴激光切割干涉自动检查与激光头姿态修正方法。

收稿日期:2009-03-23;收到修改稿日期:2009-05-25

作者简介:朱 虎(1964—),男,教授,博士,主要从事 CAD/CAE/CAM 和激光切割技术方面的研究。

E-mail:zhuhu100@yahoo.com.cn

2 五轴激光切割干涉检查

2.1 激光头的模型化

由于在五轴激光切割中可能发生的干涉类型有激光束与工件干涉、激光头与工件干涉两种类型(如图 1 所示),因此激光头模型应该包括具有实体的激光枪和没有实体的激光束,以检查出上述两种类型的干涉。

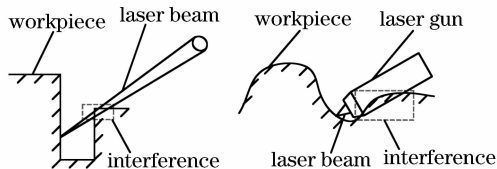


图 1 干涉类型

Fig. 1 Interference types

根据激光束的半径和焦距(如图 2 所示)建立不同类型的激光束模型,同时根据通用激光头尺寸和形状建立各种类型的激光枪模型,并把二者合二为一建立如图 3 所示的激光头模型,然后将其转换成 STL 数据模型以后,存入激光头类型库,以便不同的用户根据需要调用。STL 数据模型是在金属板材成形、快速成形技术、激光加工、反求工程和数控加工等领域广泛使用的数据模型,具有卓越的跨平台性和数据结构简单的优点,是一种用三角面片及其法向量来表达实体的数据格式。

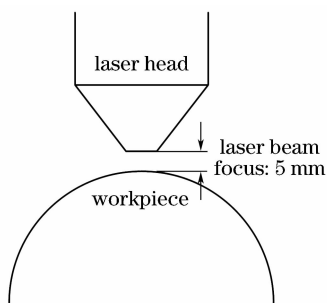


图 2 激光束焦距

Fig. 2 Laser beam focus

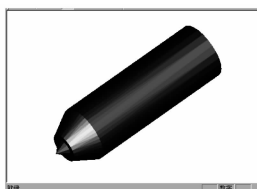


图 3 激光头模型

Fig. 3 Model of laser head

2.2 工件模型的离散化表示

为了便于进行干涉检查,把给定的工件 STL 数据模型进行离散化,用点云来表示。采用等长度法

对工件的所有边进行离散。具体方法是首先通过顶点合并来去除 STL 文件中存在的大量冗余数据,并建立边类(其中包含两个点);然后从边的一个端点向另一个端点延伸,每隔一定长度 l 提取一个点,直到提取的最后一个点与另一个端点的距离小于 l 为止, l 值由用户根据所需干涉检查精度要求决定;以同样的方法把 STL 模型上所有的边离散化。图 4 所示为按上述方法离散化 STL 模型而得到的点云。

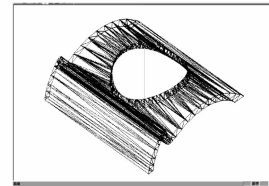


图 4 工件模型的点云

Fig. 4 Cloud points of part model

2.3 干涉检查算法

有关干涉处理的研究大多集中在数控加工领域。吴宝海等^[7]对数控加工中干涉处理的研究现状作了分析。此外,赵冲等^[8~10]用两组三角面片集合代替被加工曲面和刀具,并通过判断两组三角面片是否相交以及对相交三角面片的几何求交计算,检查加工曲面是否和刀具发生干涉。此种方法算法复杂,时间复杂度大,不易编程实现。赵瑾等^[11]利用测试线与刀具扫掠体包络面的交点来判断刀具或刀柄在加工过程中是否和夹具发生碰撞,然而这种方法只适合三轴数控加工。杨勇生^[12]以刀具系为检测基准,按特征点的坐标值分段来判断特征点是否落入刀具系表面内部。该方法对于不同的刀具分段区间和各区间段边界方程都是不一样的,而且对于具有复杂边界方程的刀具是行不通的。谭光宇等^[13]研究了一种基于 B-rep 的碰撞干涉检验算法。Mahadevan 等分别利用可见性^[14]和五自由度力反馈触感系统^[15]进行了干涉检测。然而由于这些研究主要面向特定切削方式的数控加工,因此很难直接适用于五轴激光切割。

激光切割中的干涉检查就是判断激光头和工件占有的空间是否发生重叠。本文将工件的 STL 模型经过离散后以点云的形式来描述工件模型,因此干涉检查的关键就是判断激光头模型的内部区域是否含有这些工件模型的离散点。根据激光头的形状特点,把激光头模型分为凸型和凹型两种类型来判断。

2.3.1 凸型激光头

如果激光头 STL 模型上所有三角面片的边延长线都不穿透激光头模型的内部(如图 5 所示),那

么称其为凸型激光头。对于凸型激光头,从图 5 中可以看出,激光头 STL 模型的所有三角面片的法向量由内指向外,即三角面片外部方向为正方向,而三角面片内部方向为负方向。因此,如果可能发生干涉的工件模型的某一个离散点 $\mathbf{W}(W_x, W_y, W_z)$ 位于激光头所有三角面片的负法向量方向上,那么就断定该离散点包含在激光头模型的内部区域,该点就是激光头与工件的干涉点。

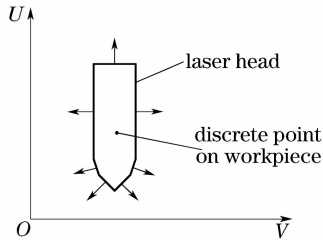


图 5 凸型激光头

Fig. 5 Laser head of convex type

为了判断点 \mathbf{W} 是否在某个三角面片的负法向量方向上,平移并旋转点 \mathbf{W} 和三角面片,使三角面片的法向量正方向与 z 轴正方向一致,然后考察变换后点 \mathbf{W} 的 z 坐标的符号。设三角面片的法向量坐标为 (a, b, c) ,其中三角面片的一个顶点为 $\mathbf{V}(V_x, V_y, V_z)$,具体过程为:

1) 平移点 \mathbf{W} , 平移矩阵为 \mathbf{T} , 其中

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ l & m & n & 1 \end{bmatrix},$$

$$l = -V_x, \quad m = -V_y, \quad n = -V_z. \quad (1)$$

2) 绕 x 轴旋转, 旋转矩阵为 \mathbf{R}_x , 其中

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}}\right). \quad (2)$$

3) 绕 y 轴旋转, 旋转矩阵为 \mathbf{R}_y , 其中

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\beta = -\arccos\left(\frac{\sqrt{b^2 + c^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}\right). \quad (3)$$

那么, 变换后的点 $\mathbf{W}^*(W_x^*, W_y^*, W_z^*)$ 与变换前的点 $\mathbf{W}(W_x, W_y, W_z)$ 的关系为

$$(\mathbf{W}_x^*, \mathbf{W}_y^*, \mathbf{W}_z^*) = (\mathbf{W}_x, \mathbf{W}_y, \mathbf{W}_z) \times \mathbf{T} \times \mathbf{R}_x \times \mathbf{R}_y, \quad (4)$$

如果 $W_z^* < 0$, 则点 \mathbf{W} 在该三角面片的负法向量方向上。

2.3.2 凹型激光头

如果激光头 STL 模型的任意三角面片上有一条边的延长线穿透激光头模型的内部(如图 6 所示), 那么称其为凹型激光头。对于凹型激光头采用的判断方法为:

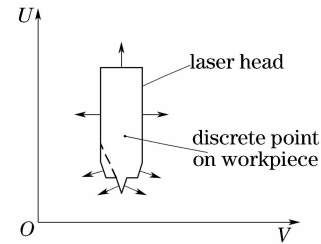


图 6 凹型激光头

Fig. 6 Laser head of concave type

1) 分别绕 x 轴和 y 轴旋转激光头模型和工件模型的离散点, 使激光头模型的中轴线与 z 轴一致。

2) 设激光头 STL 模型有 m 个三角面片, 其中每个三角面片的三个顶点的 z 坐标最大值用 $z_{\max i}$ [$i \in (1, 2, \dots, m)$] 表示, z 坐标最小值用 $z_{\min i}$ [$i \in (1, 2, \dots, m)$] 表示。对于工件模型的某一离散点 $\mathbf{W}(W_x, W_y, W_z)$, 提取符合以下条件的三角面片集合 S

$$S = \left\{ (z_{\max i} \geq W_z \geq z_{\min i}) \cap (z_{\max i} \neq z_{\min i}) \right\},$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

然后按上述方法判断点 \mathbf{W} 是否在三角面片集合 S 的所有三角面片的负法向量方向上, 若是, 则该点为激光头模型与工件模型的干涉点。

3 五轴激光切割干涉修正

陈继民等^[16]研究了激光束入射角对薄板切割质量的影响, 认为即便由于干涉等原因而无法保证激光束垂直入射, 但只要采用合理的切割方式和速度仍可获得满意的切割效果。因此, 本文对在某个位置发生干涉的激光头的姿态进行修正, 以保证激光头与工件不发生干涉。具体方法是在保持激光束照射点(焦点)的位置不变的情况下, 也就是使激光头以某照射点(焦点)为旋转中心, 沿着 x 轴正方向, x 轴负方向, y 轴正方向, y 轴负方向之中的某一方向或几个组合方向旋转一定的角度来修正激光头

的姿态。下面以激光头绕 x 轴旋转修正方式为例,具体说明其修正算法。

当激光头处于某一个位姿时,假设激光头和工件存在 n 个干涉点 $P_j (j=1, 2, \dots, n)$, 那么过每一个干涉点 P_j 做垂直于 x 轴的切平面有 n 个。图 7 显示了通过干涉点 P_j 且垂直于 x 轴的切平面切割激光头而得到的断面, 其中点 P_j 表示激光头内部的任意一个干涉点, 点 O'_j 为激光束的照射点(焦点)在该切平面上的投影。以点 O'_j 为圆心, $|\overrightarrow{O'_j P_j}|$ 为半径做圆, 并求出该圆与激光头在切平面上轮廓线的所有交点。若激光头绕 x 轴正方向旋转修正, 则 V_j 坐标值最大的交点(即点 A_j)就是所需旋转的临界点; 若激光头绕 x 轴反方向修正, 则所需旋转的临界点是 V_j 坐标值最小的交点(即点 B_j)。那么, 对于各个干涉点来说, 激光头绕 x 轴正方向需要旋转的临界角为

$$\gamma_j = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{O'_j P_j} \times \overrightarrow{O'_j A_{jV}} + \overrightarrow{O'_j P_j} \times \overrightarrow{O'_j A_{jU}}}{|\overrightarrow{O'_j P_j}| \times |\overrightarrow{O'_j A_j}|}\right),$$

$$[j \in (1, 2, \dots, n)], \quad (6)$$

式中 $\overrightarrow{O'_j P_{jV}}$ 和 $\overrightarrow{O'_j P_{jU}}$ 为向量 $\overrightarrow{O'_j P_j}$ 的 V_j 和 U_j 方向的分向量; $\overrightarrow{O'_j A_{jV}}$ 和 $\overrightarrow{O'_j A_{jU}}$ 为向量 $\overrightarrow{O'_j A_j}$ 的 V_j 和 U_j 方向的分向量; $|\overrightarrow{O'_j P_j}|$ 和 $|\overrightarrow{O'_j A_j}|$ 分别为向量 $\overrightarrow{O'_j P_j}$ 和向量 $\overrightarrow{O'_j A_j}$ 的模。

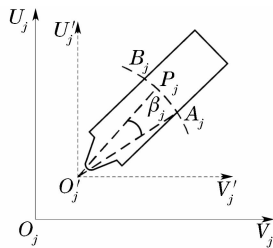


图 7 激光头切断面

Fig. 7 Laser head section

显然, 为消除所有的干涉点, 在该轨迹点上激光头绕 x 轴正方向旋转修正时, 需要旋转的临界角 γ 是各个干涉点所对应的临界角 γ_j 之中的最大值, 即

$$\gamma = \max(\gamma_j | j = 1, 2, \dots, n) + \gamma_0, \quad (7)$$

式中 γ_0 为临界角的修正间隙余量, 由用户决定。

4 算法应用实例

本文提出的算法在 Windows XP 环境下用 Visual C++ 和 OpenGL 实现。为验证本算法的可行性, 以图 8 所示的工件模型为对象, 进行五轴三维激光切割干涉检查与修正算法应用探讨。图 9 所示为五轴三维激光切割干涉检查与修正仿真平台的用

户界面和设定的工件及激光头。在仿真过程中, 如果激光头与工件发生干涉, 那么系统将自动弹出消息框, 提示用户干涉信息, 并在发生干涉处停止运动, 等待用户采取必要的措施来消除干涉。图 10 和图 11 分别显示了在仿真过程中检查出的激光头和工件的干涉区域, 以及自动弹出的干涉警示。对检查出的干涉区域, 系统就自动计算出干涉消除临界旋转角, 并通过旋转激光头来完成激光头姿态的修正, 从而避免干涉发生。图 12 显示了经过修正后的激光头的姿态。

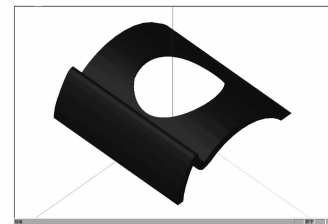


图 8 工件模型

Fig. 8 Part model

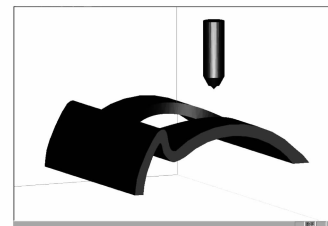


图 9 工件和激光头

Fig. 9 Part and laser head

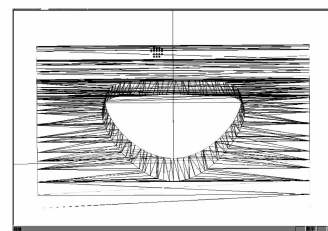


图 10 检查出的干涉区域(俯视)

Fig. 10 Detected interference areas (top view)

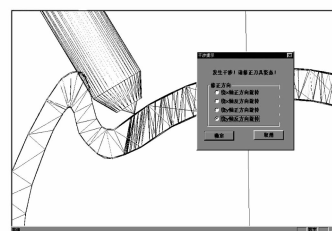


图 11 检查出的干涉区域(前视)

Fig. 11 Detected interference areas (front view)

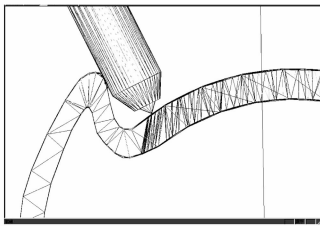


图 12 修正后的激光头姿态

Fig. 12 Corrected laser head posture

5 结 论

提出的通过判别工件 STL 模型的离散点是否在激光头各三角面片负法向量方向来找出干涉区域和利用一系列切平面切割激光头模型来计算干涉消除临界旋转角的方法, 切实可行, 具有实用性, 而且算法思想简单, 易于编程实现, 系统运行稳定可靠。但当工件形状很复杂时, 由于离散点数量多, 而计算量较大, 因而有必要采用轴向包围盒法 (AABB) 进行粗判断, 检查当前位置的激光头模型是否可能与工件模型存在干涉, 然后采用本文提出的方法进行详细检查为好。

参 考 文 献

- Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):135~138
廖健宏, 蒙红云, 王红卫 等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):135~138
- Hong Lei, Mi Chenglong, Liu Dejin. Laser cutting special steel sheet controlled by rotating gas flow [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):543~548
洪 蕾, 米承龙, 柳德金. 旋转气流控制激光切割特种钢薄板[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):543~548
- Su Min, Shi Shihong, Hu Jin. Auto programming system for 3D laser processing based on PMAC [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(6):433~435
苏 敏, 石世宏, 胡 进. 基于 PMAC 的三维激光加工自动编程系统的研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(6):433~435
- Chen Jimin, Bao Yong, Xiao Rongshi. Auto-programming system for 3D laser processing [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(3):217~220
陈继民, 鲍 勇, 肖荣诗. 三维激光加工自动编程系统的研究[J]. *激光技术*, 2001, **25**(3):217~220
- Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. Effect of laser beam attitude on 3D laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):124~127
张永强, 吴艳华, 陈武柱 等. 激光束姿态对三维激光切割质量的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):124~127
- Chen Genyu, Cao Maolin, Huang Fengjie. Application and research of three-dimensional laser cutting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3):38~42
陈根余, 曹茂林, 黄丰杰. 三维激光切割的应用和研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(3):38~42
- Wu Baohai, Luo Ming, Zhang Ying *et al.*. Advances in tool path planning techniques for 5-axis machining of sculptured surfaces [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **44**(10):9~18
吴宝海, 罗 明, 张 莹 等. 自由曲面五轴加工刀具轨迹规划技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2008, **44**(10):9~18
- Zhao Chong, Lou Junyu, Tang Yansheng *et al.*. Collision detection of 3D models with triangulated mesh based on STL [J]. *Machinery Manufacturing Engineer*, 2005, (9):82~84
赵 冲, 娄俊宇, 唐延生 等. 基于 STL 格式数据的网面体碰撞检测方法[J]. *现代制造工程*, 2005, (9):82~84
- Zhang Yu, Ma Lihong, Yu Yinglin. Vector symbol analysis for collision detection of models in three dimensions [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1998, **3**(6):481~484
张 宇, 马丽红, 余英林. 空间模型碰撞检测的向量符号分析方法与实现[J]. *中国图像图形学报*, 1998, **3**(6):481~484
- Zhang Heming, Zhang Yuyun, Xiong Guangleng. Interference checking and tool position correction for 5 axis NC machining of sculptured surfaces [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1998, **38**(2):65~68
张和明, 张玉云, 熊光楞. 复杂曲面五坐标数控加工干涉检查及刀位修正[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1998, **38**(2):65~68
- Zhao Jin, Zhou Laishui, Zhang Chen *et al.*. Research on the real-time collision detection algorithm in numerical control machining simulation [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, **41**(10):200~202
赵 瑾, 周来水, 张 臣 等. 数控仿真中的实时碰撞检测算法的研究[J]. *计算机工程与应用*, 2005, **41**(10):200~202
- Yang Yongsheng. Characteristic projection method for avoiding cutter interference in 5-axis NC machining [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2003, **24**(1):15~22
杨勇生. 五轴数控加工中刀具干涉处理的特征投影法[J]. *工程图学报*, 2003, **24**(1):15~22
- Tan Guangyu, Yuan Zhejun, Li Jianguang *et al.*. New method for checking impact interference in NC machining [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 1999, (1):37~38
谭光宇, 袁哲俊, 李建广 等. 数控加工碰撞干涉检验的新方法[J]. *制造技术与机床*, 1999, (1):37~38
- B. Mahadevan, E. S. Sanjay, M. Krzyzt. Collision-free finishing tool paths from visibility data [J]. *Computer-Aided Design*, 2003, **35**(4):359~374
- B. Mahadevan, H. Stephen, S. Sanjay. Generation of collision-free 5-axis tool paths using a haptic surface [J]. *Computer-Aided Design*, 2002, **34**(4):267~279
- Chen Jimin, Zuo Tiechuan. Effect of laser beam incident angle on laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1037~1040
陈继民, 左铁钊. 激光切割中入射角对切割质量的影响[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11):1037~1040