

多平台三维钣金激光切割过程 仿真系统研究与开发*

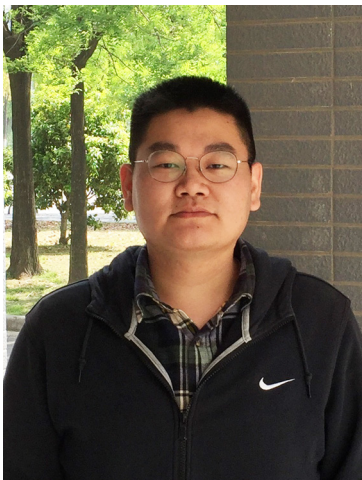
陈更明,仇晓黎,幸 研

(东南大学机械工程学院,南京 211189)

[摘要] 针对三维钣金件激光切割对于虚拟仿真的需求以及目前激光切割过程仿真系统的不足,以龙门式五轴机床、立式六轴机器人和倒置式六轴机器人切割平台为样本,研究并开发多平台三维钣金激光切割过程仿真系统,包括虚拟加工场景三维可视化、基于刀位点数据的机床运动学计算和激光切割工艺体现及加工代码输出。配置节点顺序,实现虚拟加工场景搭建;基于 Nurbs 曲面拟合非垂直侧壁切缝形貌,实现切割扫掠体对刀位点数据的映射;基于刀位点数据对激光头位姿矩阵进行求解,并建立 $D-H$ 运动坐标系,实现机床运动学计算和机床运动仿真;建立切割工艺问题处理流程,实现切割工艺体现,包括切割工艺缺陷的体现、干涉碰撞的检测与处理、切割环间过渡轨迹的显示。最终输出对应平台可靠的加工代码。

关键词: 激光切割;过程仿真;三维可视化;运动学计算;工艺处理

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.16.051



陈更明

硕士研究生,研究方向为先进制造技术。

激光切割相比传统切割方式,如线切割、水切割、电火花切割、等离子

* 基金项目:江苏省产学研前瞻性项目(BY2016076-15);国VI低排放柴油机进气系统核心部件的研发及产业(BA2016058)。

切割等方法,具有明显的优势^[1]。因其具有精度高、切缝窄、非接触式加工、切割速度快等特点,在汽车制造、航空航天、模具制造^[2]等领域中,激光切割得到了广泛的应用。制造业的发展对激光切割质量的要求不断提高,尤其在航空领域中^[3]对复杂曲面钣金件进行三维激光切割时,需要实时根据表面曲率调整激光头位姿及工艺参数,以确保切割质量。通过仿真系统不仅可以使管理人员直观地掌握激光切割过程,确保加工代码的可靠性,而且能优化一些切割工艺问题,保证切割质量^[4]。实际切割中,为满足不同类型钣金的加工需要,主要是针对钣金尺寸、加工精度需要以及钣金形状特征等需运用多种三维激光切割平台对应进行加工。目前的激光切割仿真软件虚拟场景搭建效率较低、平台切换较复杂、学

习成本较高、缺乏切割痕迹的体现、工艺处理模块不完善。针对上述问题,本文研究并开发了支持包括龙门式五轴机床、立式六轴机器人和倒置式六轴机器人切割平台的多平台三维钣金件激光切割过程仿真系统。

系统结构

图1为多平台三维钣金激光切割过程仿真系统结构图,系统由交互层、应用层和支撑层构成。交互层提供系统软件操作交互界面;应用层包含功能模块层、关键技术层和数据层;支撑层为系统提供模型数据和仿真参数数据。系统采用两层C/S架构,客户端与数据库服务器端之间采用通用的SQL语言进行数据库直接通信访问。利用数据库存储并管理加工环境模型数据、切缝参数及切割工艺参数、刀位点数据。基于这些

数据,利用虚拟场景搭建技术、机床运动学计算方法、激光切割工艺处理技术实现多平台三维钣金激光切割过程仿真系统的开发。

如图2所示,系统功能主要包含了虚拟加工场景三维可视化模块、多平台机床运动学计算模块、工艺体现及代码输出模块。虚拟加工场景三

维可视化模块包含虚拟加工场景搭建、运动模型建立、材料去除过程模拟等;多平台机床运动学计算模块包含龙门式五轴机床运动学计算、立式六轴机器人及倒置式机器人运动学计算、基于刀位点数据的P矩阵计算等;工艺体现及代码输出模块包含工艺缺陷显示、碰撞检测实现、过

渡轨迹显示等。激光切割场景中包含各类模型,有必要建立一种快速搭建虚拟环境^[5]的方法;各类机床平台结构和运动形式存在差异,有必要分析其运动特征并建立运动模型,在此基础上基于刀位点数据进行机床运动学计算并将计算结果输入运动模型中,实现机床运动仿真;为了能通过切割痕迹实时反映切割质量,需要对激光切割材料去除过程进行模拟仿真;仿真中对工艺现象进行体现及处理,最终生成对应平台可靠的加工代码。

三维可视化

三维可视化首先进行虚拟场景的搭建^[6],包括钣金模型、夹具模型、机床各部件模型的导入。根据模型动静属性进行分类,对于静止类模型仅需定义其空间位置参数、外观属性参数,对于机床运动部件模型除定义这些参数外还需定义其运动参数,以改变其运动状态,实现机床运动仿真。建立导入顺序配置信息表,先导入静态模型后导入运动模型并保留各模型在建模时的相对位置^[7]即可快速实现场景搭建。

以倒置式六轴机器人为例建立运动模型,各关节均为旋转运动,杆6继承了杆1~5的所有运动特征^[8],进行节点规划时,如图3所示,将各杆包装成一个节点组,包含位置参数节点、运动参数(旋转和平移)节点和模型数据节点,子机构节点组添加在父机构模型节点下,以继承父机构的运动特征。根据计算出的机床运动学数据,修改对应运动参数节点数据,即可实现机床运动仿真。

场景中每个模型均被打包成类似上述这样的节点组形式。加工场景搭建流程如图4所示,连接数据库后导入顺序配置信息表,获取当前模型数据,创建对应节点单元并添加到节点树中,快速实现场景搭建。

切缝质量是评价激光切割效果

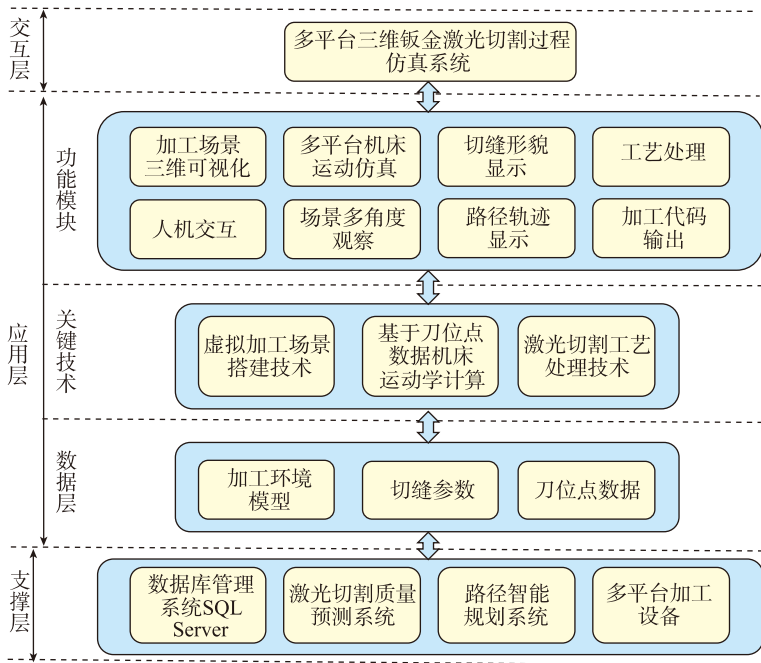


图1 系统结构
Fig.1 System structure

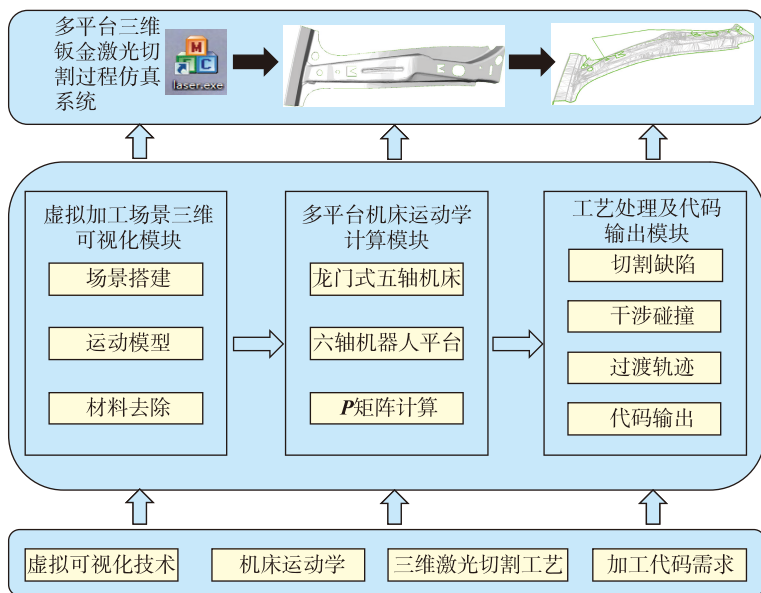


图2 系统功能开发
Fig.2 System function development

的重要指标,虚拟仿真中通过模拟切缝形貌体现工艺问题。由于切缝具有非垂直侧壁形貌特征^[9],基于刀位点数据利用 Nurbs 曲线拟合出对应切缝截面轮廓。如图 5 所示,通过定义几个控制点^[10]的坐标确定曲线形状。

定义控制点的坐标,根据刀位点数据建立特征线框,其由端点 a 、 d 、 g 、 e 顺次相连得到,其余控制点 b 、 c 、 f 的坐标由这 4 个端点计算得出。根据刀位点数据确定特征线框的过程如下:

刀位点数据由 5 个数据组成,图 6 中 (x_0, y_0, z_0) 表示当前刀位点数据的前 3 位数值,即当前刀位点所处位置。图 6 中方向 1 表示激光束的方

向矢量,其可由刀位点后两位数据表示,这里定义其为 (m, n, p) ; 方向 2 表示刀位点变化方向,即激光头运动方向矢量,用相邻两组刀位点数据的差值 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 表示; 方向 3 表示特征线框所在平面的方向矢量,其与方向 1、方向 2 两两垂直,满足右手定则。 (x_1, y_1, z_1) 表示点 d 坐标, (x_2, y_2, z_2) 表示点 g 坐标, (x_3, y_3, z_3) 表示点 e 坐标, (x_4, y_4, z_4) 表示点 a 坐标。

特征线框计算流程如图 7 所示,读取当前刀位点数据,即确定坐标值 (x_0, y_0, z_0) ; 然后根据刀位点数据计算出方向矢量 1, 2, 3, 其中方向 3 即特征线框的方向矢量 (q, r, t) 是由方向 1 和方向 2 叉乘计算得出,在计算特征点 d 、 g 、 e 、 a 坐标时,先将刀

位点坐标按方向矢量 1 即激光束方向正负距离各平移一次,平移距离为切割截面切缝深度值 sd 的一半,获得两个平移点; 然后对这两个平移点按方向矢量 3 即特征线框方向正负距离各平移一次,得到特征点 d 、 g 、 e 、 a , 其中点 a 和点 d 是平移切缝上宽值 kd_1 距离得到,点 e 和点 g 是平移切缝下宽值 kd_2 得到。最终计

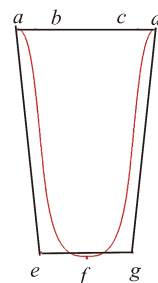


图5 切缝截面模拟

Fig.5 Slit section simulation

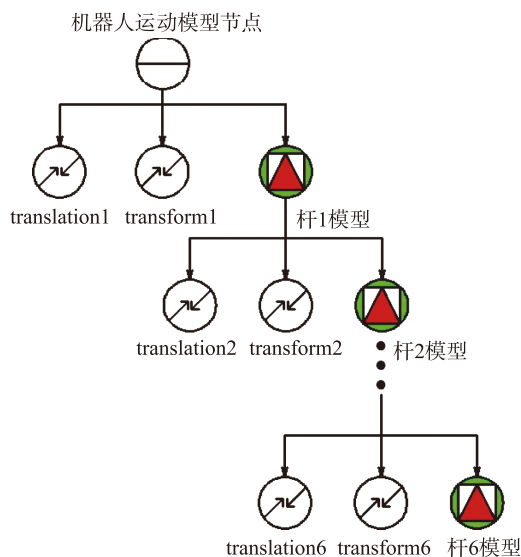


图3 机器人运动模型节点规划

Fig.3 Robot motion model node planning

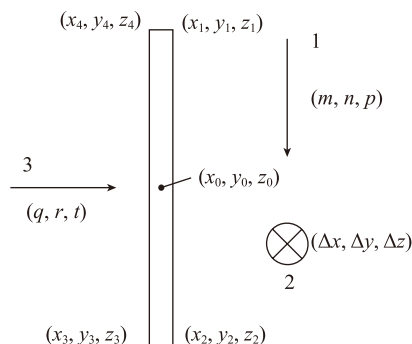


图6 特征线框参数定义

Fig.6 Feature wire frame parameter definition

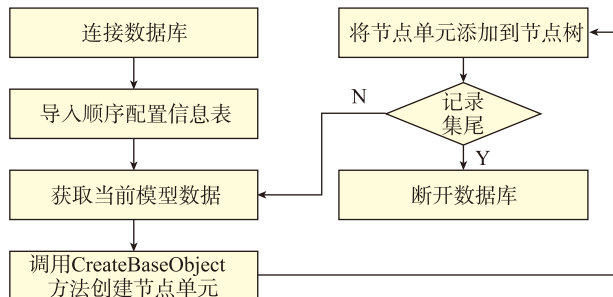


图4 虚拟场景搭建流程

Fig.4 Creating process of virtual scene

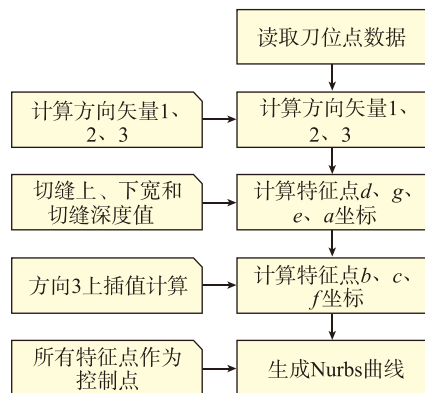


图7 特征线框计算流程

Fig.7 Feature wire frame calculation process

算得到点坐标如式(1)~(4):

$$\begin{aligned} (x_1, y_1, z_1) = & \\ (x_0 - sd \cdot m + kd_1 \cdot q, y_0 - sd \cdot n + & \\ kd_1 \cdot r, z_0 - sd \cdot p + kd_1 \cdot t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (x_2, y_2, z_2) = & \\ (x_0 + sd \cdot m + kd_2 \cdot q, y_0 + sd \cdot n + & \\ kd_2 \cdot r, z_0 + sd \cdot p + kd_2 \cdot t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (x_3, y_3, z_3) = & \\ (x_0 + sd \cdot m - kd_2 \cdot q, y_0 + sd \cdot n - & \\ kd_2 \cdot r, z_0 + sd \cdot p - kd_2 \cdot t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (x_4, y_4, z_4) = & \\ (x_0 - sd \cdot m - kd_1 \cdot q, y_0 - sd \cdot n - & \\ kd_1 \cdot r, z_0 - sd \cdot p - kd_1 \cdot t) \end{aligned} \quad (4)$$

点 b 、 c 、 f 由上述 4 点插值计算得出,最终生成由所有控制点确定的曲线。将相邻两组切缝截面轮廓曲线连接得到扫掠体模型,在此之前,为更好地控制曲面形状,在相邻两组曲线之间平均差值计算生成另外两组曲线,如图 8 所示。

在曲线 1 和曲线 2 之间平均差值出两组曲线,将这 4 组曲线连接生成曲面 12,曲面 23 和曲面 34 也是用同样的方法生成。最终生成扫掠体模型,如图 9 所示。

再将钣金模型和生成的扫掠体模型做布尔差^[11]运算,即可模拟出激光切割材料去除过程,如图 10 所示。

运动学计算

基于刀位点数据对龙门式五轴

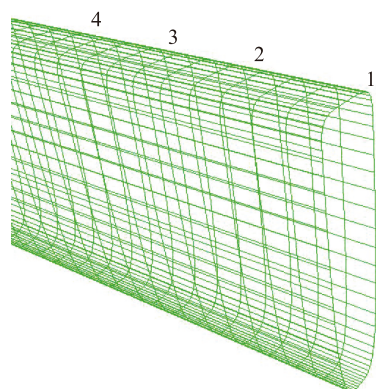


图8 扫掠体线框模型
Fig.8 Sweep body wire frame model

机床、立式六轴机器人平台以及倒置式六轴机器人平台进行运动学正逆解计算,实现多平台机床运动仿真。

刀位点数据由 5 个元素 $(x, y, z, \alpha, \theta)$ 组成,其中前 3 个元素 (x, y, z) 表示当前切割点所处的空间位置,后两个元素 (α, θ) 表示激光束当前的姿态。如图 11 所示, α 表示激光束在 XOY 面的投影与 x 轴的夹角, θ 表示激光束与 XOY 面的夹角。其

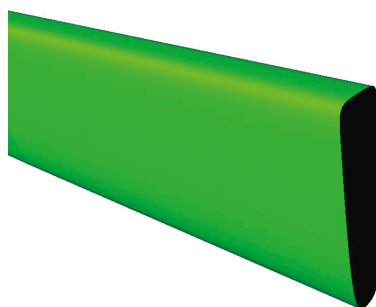


图9 扫掠体模型
Fig.9 Sweep body model

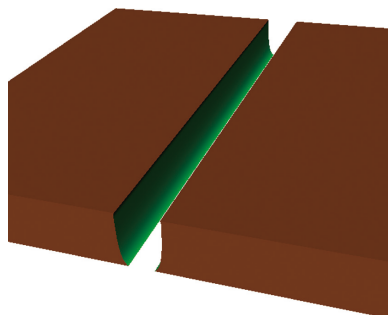


图10 材料去除模拟
Fig.10 Simulation of material removal

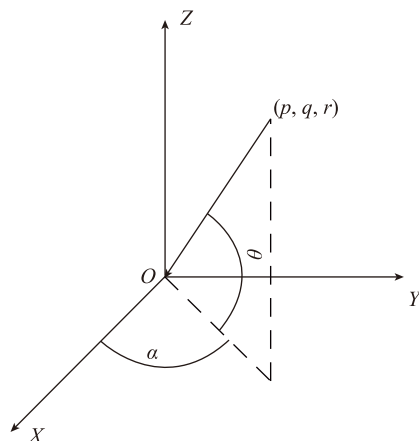


图11 刀位点数据几何表示
Fig.11 Cutter point data geometry representation

表示的激光束方向矢量为 (p, q, r) , 龙门式五轴机床旋转轴 C 轴旋转了角度 α' , 摆动轴 A 轴即激光头自转了角度 θ' , 其确定的激光束方向矢量为 (p', q', r') 。经换算可用刀位点数据表示机床两旋转轴运动角度。如式(5)和式(6)所示:

$$\alpha' = \alpha \quad (5)$$

$$\theta' = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (6)$$

假设当前刀位点是 (m_1, n_1, p_1) , 机床中 7 个平移轴部件的运动量 (pyx, pyy, pyz) 即可表示为式(7)~(9)。

$$\begin{aligned} pyx = & \\ m_1 - c \cdot \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2 + r^2}} + a \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} pyy = & \\ n_1 - c \cdot \frac{q}{\sqrt{p^2 + q^2 + r^2}} - a \cdot \cos \theta + a \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} pyz = & \\ p_1 - c \cdot \frac{r}{\sqrt{p^2 + q^2 + r^2}} - c \end{aligned} \quad (9)$$

至此,龙门式五轴机床 5 个运动轴对应的运动量均可由刀位点数据求解得出。

立式六轴机器人和倒置式六轴机器人的运动特征相似,均为串联式六轴旋转运动结构。激光头位姿由所有关节运动决定,其中前 3 个关节运动确定激光头的位置,后 3 个关节运动确定激光头的姿态,以倒置式六轴机器人为例,进行运动学计算。

建立机器人对应的 $D-H$ 坐标系如图 12 所示,列出其对应的 $D-H$ 参数表如表 1 所示,表中 a_i 表示机器人杆件 i 的长度, α_i 表示关节 i 旋转轴线和关节 $i+1$ 旋转轴线的夹角, d_i 表示机器人杆 i 与杆 $i+1$ 的相对距离, θ_i 表示关节 i 对应的运动角度^[12]。

将机器人各杆对应参数代入齐次变换通式(10)中得到各杆运动变换矩阵 $A_1 \sim A_6$, 式中 A_i 表示第 i 个关节对应的位姿变换矩阵, $s_i = \sin \theta_i$, $c_i = \cos \theta_i$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ 。

$$A_i = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & a_{i-1} \\ s_{\theta_i}c_{\alpha_{i-1}} & c_{\theta_i}c_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}} & -d_i s_{\alpha_{i-1}} \\ s_{\theta_i}s_{\alpha_{i-1}} & c_{\theta_i}s_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}} & d_i c_{\alpha_{i-1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

激光头位姿矩阵即式(11)所示,满足关系式 $P=A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6$ 。式中前3列向量 (n, o, a) 表示激光头姿态,其可由基坐标系表示,第4列元素表示激光头空间位置。

根据刀位点数据对 P 矩阵中各元素进行求解,图13为激光头运动参数定义, $D_0(x_0, y_0, z_0)$ 是刀位点坐标, O_6 是末端关节点,点 P 在由 O_6 指向连接激光头的法兰方向上且满足 O_6P 垂直于 D_0P , O_6P 的长度

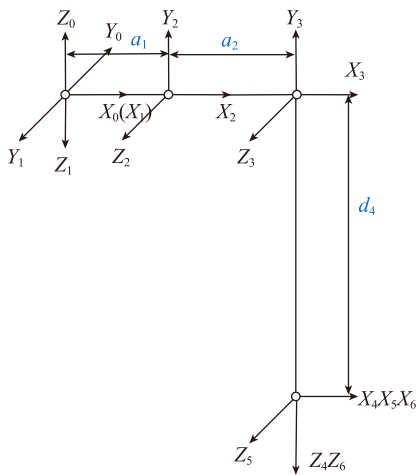


图12 机器人D-H坐标系
Fig.12 Robot D-H Coordinates

表1 机器人连杆参数

杆 i	连杆长度 a_{i-1}/mm	相对角度 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	相对距离 d_i/mm	运动角度 $\theta_i(^{\circ})$
1	0	-180	0	0
2	a_1	-90	0	0
3	a_2	0	0	0
4	0	90	d_4	0
5	0	-90	0	0
6	0	90	0	0

为 d_6 。

定义激光头初始位姿是 (n, o, a) , 其值为 $(0, 0, -1)$ 运动后的位姿是 (n', o', a') , 如图14所示。

根据几何变换关系确立3个关系式:

$$-d_6 \cdot q = (P_x - x_p) \cdot q - (P_y - y_p) \cdot p \quad (12)$$

$$|p o_6| = d_6 \quad (13)$$

$$p o_6 \cdot n' = 0 \quad (14)$$

向量 n 表示激光束方向,前面已经求解。根据上3式求解出 P 矩阵其他各元素的值,如式(15)~(21)所示。

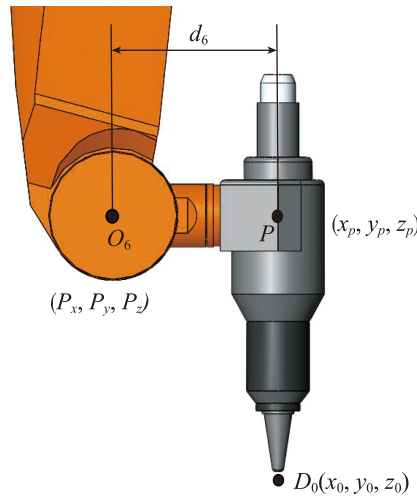


图13 激光头运动参数定义
Fig.13 Definition of laser head motion parameters

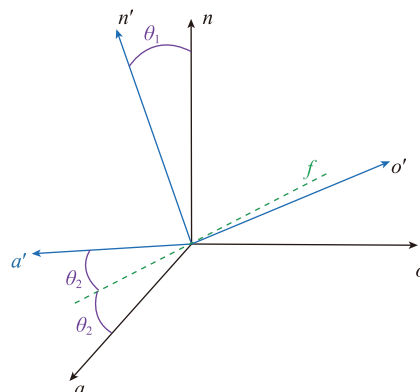


图14 激光头坐标变换
Fig.14 Laser head coordinate transformation

$$p_x = \frac{x_p \cdot p^2 - d_6 \cdot q^2 + x_p \cdot q^2 + d_6 \cdot p^2 \cdot r}{p^2 + q^2} \quad (15)$$

$$p_y = \frac{y_p \cdot p^2 + y_p \cdot q^2 + d_6 \cdot p \cdot q \cdot r + d_6 \cdot p \cdot q}{p^2 + q^2} \quad (16)$$

$$p_z = z_p - d_6 \cdot p \quad (17)$$

$$a_x = \frac{p_x - x_p}{\sqrt{(p_x - x_p)^2 + (p_y - y_p)^2 + (p_z - z_p)^2}} \quad (18)$$

$$a_y = \frac{p_y - y_p}{\sqrt{(p_x - x_p)^2 + (p_y - y_p)^2 + (p_z - z_p)^2}} \quad (19)$$

$$a_z = \frac{p_z - z_p}{\sqrt{(p_x - x_p)^2 + (p_y - y_p)^2 + (p_z - z_p)^2}} \quad (20)$$

$$o = a \times n \quad (21)$$

基于求解出的矩阵 P , 用代数求法对机器人各关节运动角度值进行求解,如求解 θ_1 时,首先建立矩阵变换等式: $A_1^{-1} \cdot P = A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6$, 再根据等式两边矩阵对应元素值相等解出值,其他关节运动角均以此法求出,各关节角如式(22)~(27)所示。

$$\theta_1 = \arctan(-p_y, p_x) \quad (22)$$

$$\theta_3 = \arctan(s_3, c_3) \quad (23)$$

$$s_3 = -d_4 - k_1 \cdot c_{23} + k_2 \cdot s_{23}$$

$$c_3 = k_2 \cdot c_{23} + k_1 \cdot s_{23}$$

$$\theta_{23} = \arctan\left(-\sqrt{1 - \frac{k_3^2}{\rho_2^2}}, \frac{k_3}{\rho_2}\right)$$

$$-\arctan(k_2, k_1)$$

$$\theta_2 = \theta_{23} - \theta_3 \quad (24)$$

$$\theta_4 = \arctan(s_4, c_4) \quad (25)$$

$$s_4 = a_x \cdot s_1 + a_y \cdot c_1$$

$$c_4 = -a_x \cdot c_1 \cdot c_{23} + a_y \cdot s_1 \cdot c_{23} - a_z \cdot s_{23}$$

$$\theta_5 = \arctan(s_5, c_5) \quad (26)$$

$$s_5 = -a_x(s_1 \cdot s_4 + c_1 \cdot c_4 \cdot c_{23}) - a_z \cdot c_4 \cdot s_{23} + a_y(c_1 \cdot s_4 - s_1 \cdot c_4 \cdot c_{23})$$

$$c_5 = a_z \cdot c_{23} - a_x \cdot c_1 \cdot s_{23} + a_y \cdot s_1 \cdot s_{23}$$

$$\theta_6 = \arctan(s_6, c_6) \quad (27)$$

$$s_6 = n_x(c_1 \cdot c_{23} \cdot s_4 - s_1 \cdot c_4) - n_y(s_1 \cdot c_{23} \cdot s_4 + c_1 \cdot c_4) + n_z \cdot s_{23} \cdot s_4$$

$$c_6 = -o_x(c_1 \cdot c_{23} \cdot s_4 - s_1 \cdot c_4) + o_y(s_1 \cdot c_{23} \cdot s_4 +$$

$c_1 \cdot c_4 - o_2 \cdot s_{23} \cdot s_4$

通过运动学计算,基于刀位点求解出 P 矩阵后,逆解出机器人各运动关节运动量值,并将其输入之前建立的运动模型即可实现机床运动仿真。

工艺处理

三维激光切割质量受工艺参数和激光头姿态影响较大,不同于二维激光切割只需保证固定的激光头姿态,三维激光切割中由于钣金复杂曲面的表面形貌特征,激光头需要实时改变姿态以满足加工需要,这就可能导致工艺缺陷,如过烧、挂渣^[13]等。激光头在运动中可能会与钣金件发生干涉,需要在激光切割过程仿真中体现这些工艺问题。

(1) 激光切割工艺缺陷。一般分为过烧缺陷和欠切缺陷。过烧现象一般出现在激光能量密度过大,即钣金件在单位时间内吸收的激光能量过多所导致的工艺问题,当激光功率选取过大或是切割速度过小时,容易引起过烧现象。过烧时,切缝出现过度灼烧的痕迹,且缝宽较大。欠切现象出现在激光能量密度过小时的加工情况,表现为钣金未切透或是挂渣量较多。

如图 15 所示,过烧时增大切缝宽度(kd_1 和 kd_2)及切缝深度值(sd),且定义扫掠体颜色为红色;欠切时减小切缝宽度及切缝深度值,且定义扫掠体颜色为蓝色;无切割工艺缺陷时,不修改切缝参数,且定义扫掠体颜色为绿色。

(2) 干涉碰撞。三维激光切割中激光头在进行需要根据三维钣金复杂曲面形貌实时改变姿态,且两者距离较近(1mm 左右),可能导致激光头与钣金表面发生碰撞^[14],在加工仿真中首先对碰撞情况进行检测并显示,然后再进行处理。处理方法是 将激光头方向偏离法线一定角度,选取 20° ,如图 16 所示。

(3) 过渡轨迹显示。原始的刀位点数据仅包含所有切割环的离散点数据,对于切割环之间的过渡轨迹数据未定义。首先判断出前一个切割环的末尾点和下一个切割环的起始点,由于同一切割环离散点间距很小,两切割环间过渡点的间距相对大得多,可以通过计算对比两刀位点距离值判断过渡点;然后沿过渡点法线方向一定距离添加工艺点,再将两工艺点连接,最终连接成过渡轨迹。

具体的算法流程如图 17 所示。

系统开发及实例验证

基于 Microsoft Visual Studio 2008 和 Open Inventor 进行系统开发,既可利用 Open Inventor 提供的各种组件和图形库,又可以利用 MFC 提供的用户接口以及 Windows 提供的事件响应功能。实现虚拟场景三维可视化时,采用 SoWinExaminerViewer 观察器显示虚拟场景,实

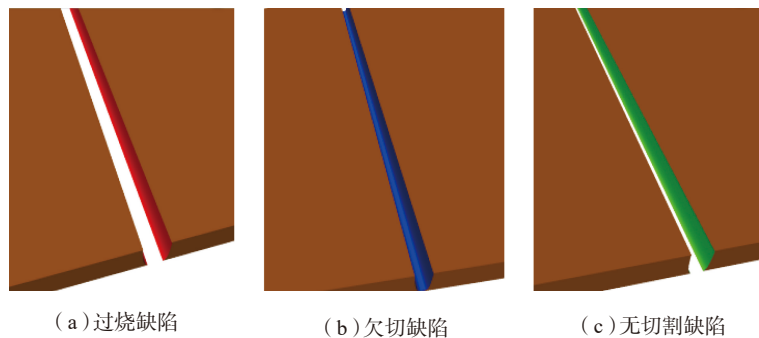


图 15 不同切割结果显示
Fig.15 Display of different cutting results

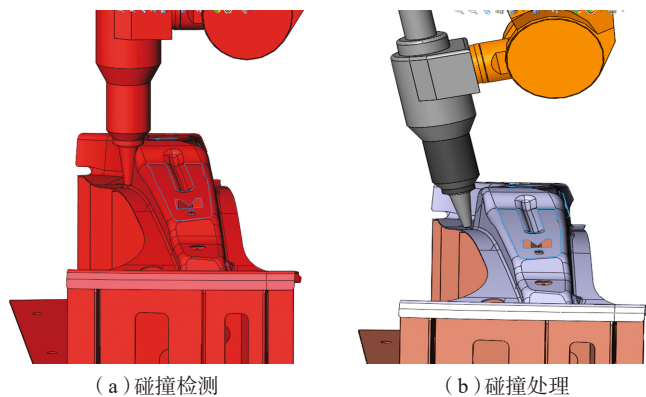


图 16 干涉碰撞处理
Fig.16 Interferometric collision treatment

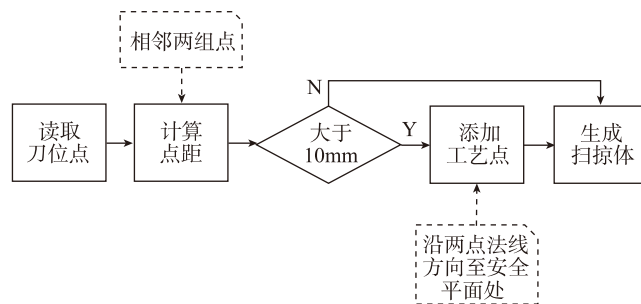


图 17 过渡轨迹生成流程
Fig.17 Transition path generation process

现场景的平移、旋转以及缩放；其次，通过调用 SetSceneGraph 函数配置显示范围；再次，通过调用 Set-BackGroundColor 函数调整视窗参数；最后，调用 Show 函数显示视窗。根据场景搭建流程建立龙门式五轴机床切割平台和立式六轴机器人切割平台虚拟场景如图 18 所示。使用 SoTranslation 函数配置模型位置参数，使用 SoTransform 函数配置模型运动参数，使用 SoCSGgroup 方法实现材料去除模拟中的布尔差运算。运动学计算结果通过系统界面反馈。利用 SoIntersectionDetection 函数实现碰撞检测定义。

系统界面如图 19 所示，首先选择激光切割平台类型，即在“龙门式五轴机床”、“STAUBLI-RX160”和“STAUBLI-RX160L”3 个平台中选择一个，选择完成后系统会自动搭建对应的虚拟加工场景并建立好运动模型；然后点击左侧“刀位点读取”按钮和“工艺参数读取”按钮，即导入了刀位点数据、切缝参数及切割工艺参数等；点击“切割仿真”按钮即开始仿真，在仿真过程中会实时将对应加工平台的运动学计算结果对应显示在下方的运动量区域，且在显示区域右击选择显示模式为“线框模式”即可显示刀路轨迹及过渡切割轨迹；一旦在虚拟制造过程中反生碰撞，则会在右下方的“是否碰撞”处显示为“是”；虚拟仿真结束后，点击“加工代码输出”按钮即可生成加工代码文本文件。界面右侧是相关参数显示。

多平台三维钣金激光切割过程仿真系统能否有效地基于刀位点数据进行激光切割虚拟制造仿真，并处理好在虚拟制造中出现的工艺问题，最终输出可靠的加工代码，还需要进一步验证。本文试验所采用的加工设备包括：JSDU 光纤激光器、龙门悬挂史陶比尔六轴机器人、激光水冷机、辅助气体、计算机控制系统等。

试验中采用的各个加工设备，具体参数如下：

系统型号：CYFP-1000-2010

整机功率：8kW

工作电压：380V

辅助气体：0~1.8MPa

机器人：史陶比尔 RX160L（倒装方案）

工装：网格型夹具

工件：汽车 B 柱覆盖件

激光器：JSDU 光纤激光器

激光冷水机：DIC050ADH-LC2

试验对象选用的三维钣金件为汽车 B 柱，毛坯件如图 20 所示。钣金件材料为热成型 DP600 高强度钢。工件厚度为 3mm，其化学成分见表 2。加工参数：激光功率 1500W，辅助氮气 1.5MPa，切割速度 1.5m/min。该钣金件的切割轨迹包括了不同形

状的内轮廓环和外轮廓环的切割，不仅可以反映加工代码的可靠性，还可以体现切割环过渡处理、碰撞检测处理等工艺信息。

试验采用本文所述的多平台三维钣金激光切割过程仿真系统进行验证，试验包括加工代码可靠性的验证、过渡轨迹添加和碰撞检测处理后实际切割可行性的验证。图 21 为仿真系统运行结果的线框显示，可以看到激光头的运行轨迹，包括 B 柱钣金的内外切割环以及过渡轨迹。图 22 为 B 柱钣金仿真结果显示，可以看到切割环上保留了切割痕迹，即激光切割材料去除的模拟结果。然后将系统输出的加工代码输入到史陶比尔机器人切割平台的控制中心进行试件切割。图 23 展示了切割结果切割过程中无碰撞现象，钣金切割无

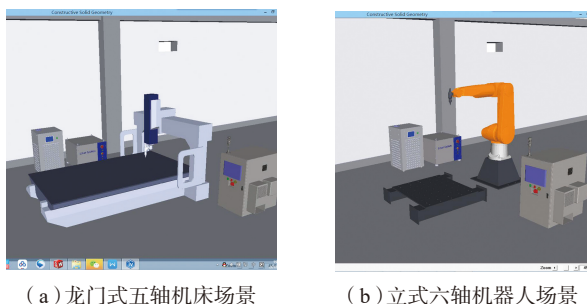


图 18 切割平台虚拟场景
Fig.18 Virtual scenes of cutting platforms

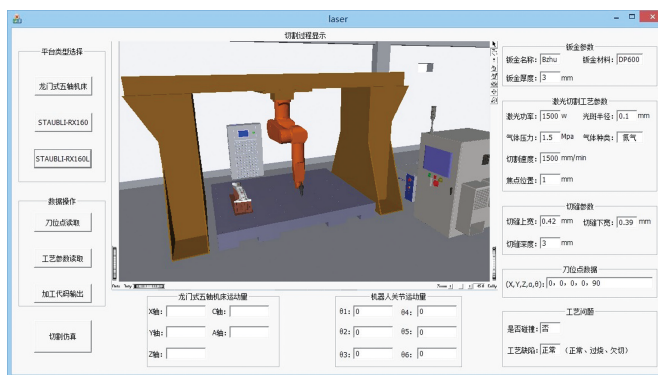


图 19 系统软件界面
Fig.19 System software interface

表 2 DP600化学成分（质量分数）

钢种	C	Si	Mn	P	S	Als	Cr	Mo
DP600	0.06	0.9	1.39	0.014	0.003	0.035	0.25	0.2



图20 B柱钣金毛坯
Fig.20 B column sheet metal blank

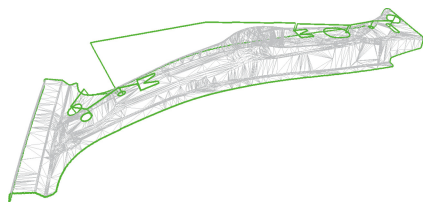


图21 仿真结果线框形式
Fig.21 Simulation result wire frame form

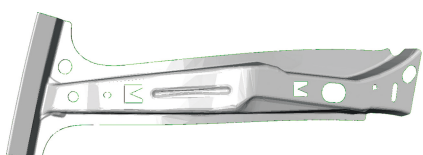


图22 仿真结果显示
Fig.22 Display of simulation result



图23 B柱加工成品
Fig.23 Finished B column product

工艺缺陷,验证了仿真系统输出的加工代码的可靠性。

结论

以运动形式和运动特征为主要依据,对机床运动轴部件模型进行运动配置,可建立运动模型;同时确保各模型相对位置并利用 OIV 读取 WRL 文件函数接口可以实现虚拟加工场景的快速搭建。

用 Nurbs 曲面拟合非垂直侧壁特征的切缝轮廓形貌,并将生成的扫掠体模型与钣金模型做布尔差运算可实现激光切割材料去除过程的仿真。

六轴机器人切割平台中,运用所述计算方法可基于刀位点数据快速

准确计算出激光头位姿矩阵 P 并逆解出对应机器人关节运动量。

对激光切割过程中可能出现的工艺问题:切割工艺缺陷、干涉碰撞、过渡轨迹可以进行有效显示并处理,最终输出可靠的加工代码。

参考文献

[1] GHANY K A, RAFFEA H A, NEWISHY M. Using a Nd:YAG laser and six axes robot to cut zinc-coated steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(11-12): 1111-1117.

[2] 李葆. 激光切割技术在模具开发及冲压件生产中的应用[J]. 锻造与冲压, 2016(8): 45-47.

LI Bao. The application of laser cutting technology in die development and stamping parts production[J]. Forging and Metalforming Stamping, 2016(8): 45-47.

[3] 赖仁享,程国祥,谢居懿,等. 激光切割装备在航空零部件制造中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2015(4): 39-41.

LAI Renxiang, CHENG Guoxiang, XIE Juyi, et al. The application of laser cutting equipment in aerospace parts manufacturing[J]. Metal Working, 2015(4): 39-41.

[4] 陈涛. 激光切割工件质量控制及参数优化研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2014.

CHEN Tao. Study on quality control and parameter optimization of laser cutting workpiece[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.

[5] 赵德金. 基于虚拟制造的金属板材成型加工仿真技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012.

ZHAO Dejin. Research on simulation technology of metal sheet forming processing based on virtual manufacturing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.

[6] 蔡磊. 基于 Open Inventor 产品三维可视化系统研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.

CAI Lei. Research on 3D visualization system of Open Inventor product[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[7] KO J H, YUN W S, CHO D W, et al. Development of a virtual machining system,

part 1: approximation of the size effect for cutting force prediction[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(15): 1595-1605.

[8] 王梦. 多自由度串联机器人运动学分析与仿真[D]. 北京:北京理工大学, 2016.

WANG Meng. Kinematics analysis and simulation of multi-degree-of-freedom series robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[9] YILBASB S. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156(1): 2106-2115.

[10] 杨胜宇,李英,宋宇飞. 基于 VC++ 和 Open Inventor 的数控铣削仿真系统研究[J]. 机械设计与制造, 2009(1): 162-164.

YANG Shengyu, LI Ying, SONG Yufei. Research on CNC milling simulation system based on VC++ and Open Inventor[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2009(1): 162-164.

[11] 艾萍. 计算机辅助工业设计中 NURBS 曲线质量控制方法研究[J]. 机械设计, 2013, 30(6): 101-103.

AI Ping. Study on NURBS curve quality control method in computer-aided industrial design[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(6): 101-103.

[12] 姜立. 多关节机器人运动学与轨迹规划及仿真研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.

JIANG Li. Study on kinematics and trajectory planning and simulation of multi-joint robot[D]. Changchun: Jilin University, 2016.

[13] ELTAWAHNI H A, HAGINO M, BENYOUNIS K Y. Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 1068-1082.

[14] GROPP A, HUTFLESS J, SCHUBERTH S, et al. Laser beam cutting[J]. Optical & Quantum Electronics, 1995, 27(12): 1257-1271.

通讯作者: 仇晓黎,博士、教授,研究方向为智能制造、CAD/CAM/CAPP/CAE、数控技术、先进制造技术, E-mail: qiuxiaoli@seu.edu.cn.

(下转第 66 页)

Automatic Modeling and Post-Processing of Aviation Tube Bending Forming

FAN Shengbao¹, BAO Yidong¹, WANG Wen¹, ZHAO Zhengda², SHU Yang², LUO Yun²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] With the complication of the three-dimensional geometry of the aerial tube and the increasing requirements of the manufacturing precision, the application of the finite element analysis method to study the optimum bending process has become a universal choice. In this paper, the forming principle of typical tube bending forming process is studied, and the evaluation index of tube bending performance is analyzed. To improve the efficiency and reduce the difficulty of using the finite element analysis in the tube bending, the user defined interface of the bending tube forming based on the ABAQUS general finite element analysis software platform is developed by using the Python programming language. It provides both preprocessing and post-processing functions of the rotary draw bending and free tube bending. By analyzing the finite element analysis results of tube bending, it can automatically calculate the evaluation index of tube bending and produce the analysis report.

Keywords: Tube bending; Forming; Finite element simulation; Secondary development; Python

(责编 铃兰)

(上接第 58 页)

Research and Development of Multi-Platform 3D Sheet Metal Laser Cutting Process Simulation System

CHEN Gengming, QIU Xiaoli, XING Yan

(College of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

[ABSTRACT] For virtual simulation demand of three dimensional sheet metal pieces laser cutting and the shortcomings of the current laser cutting process simulation system, with gantry five-axis machine tools, vertical axis robot and upside-down six-axis robot cutting platform as sample, multi-platform three-dimensional sheet metal laser cutting process simulation system, including virtual machining scene 3D visualization, machine kinematics calculation based on site data, laser cutting technology and processing code output is developed. Configuring node sequence to realize virtual machining scene construction, based on Nurbs surface fitting, this paper realizes the mapping of the cutter site data with the shape of non-vertical sidewall cutting. Based on the cutter point data, the laser head pose matrix is solved, and the $D-H$ motion coordinate system is established to realize the kinematics calculation of the machine tool and the simulation of machine tool motion. The process of cutting process is established, and the cutting process is realized, including the embodiment of cutting process defect, the detection and processing of interference collision, and the display of the transition trajectory between the cutting ring. Finally, corresponding reliable platform processing code is output.

Keywords: Laser cutting; Process simulation; 3D visualization; Kinematics calculation; Optimizing processing

(责编 文竹)