

DOI: 10.7652/xjtub201602017

变截面辊弯成形装备运动特性研究

黄昔光¹, 王健¹, 李端玲², 管延智³

(1. 北方工业大学柔性变截面辊弯成形北京市工程技术研究中心, 100144, 北京;
2. 北京邮电大学自动化学院, 100876, 北京; 3. 内蒙古工业大学理学院, 010051, 呼和浩特)

摘要: 针对 U 型变截面零件辊弯成形工艺要求,对变截面辊弯成形装备设计方案及其运动特性进行了研究。给出了变截面辊弯成形机的结构组成与工作原理、机构模型及其运动学方程,求解了符号形式的运动学逆解,获得了变截面辊弯成形机各个驱动轴的运动特性与末端轧辊路径的几何特性、机床结构参数以及加工速度之间的数学表达式。采用 Mathematica 编程对逆运动学进行仿真,获得了所有驱动轴的运动特性仿真曲线,仿真运动规律与成形工艺要求一致。基于设计方案制造了变截面辊弯成形装备,并完成了变截面辊弯成形零件的成形加工实验。实例仿真和实验结果表明:装备移动关节驱动轴的运动特性与机械结构参数、加工速度以及轧辊成形轨迹曲线有关,而转动关节驱动轴的运动特性只与轧辊运动轨迹曲线有关;新方案能够完成板材的进给、拉伸和折弯操作,实现连续的变截面辊弯成形加工,成形精度可达 0.397 mm。

关键词: 变截面辊弯成形;运动特性;运动学分析

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)02-0098-07

Motion Characteristics Analysis for Variable Cross Section Roll-Forming Machine

HUANG Xiguang¹, WANG Jian¹, LI Duanling², GUAN Yanzhi³

(1. Beijing Engineering Research Center of Flexible Roll Forming, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
3. School of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: A scheme for variable cross section roll-forming machine is proposed and the motion characteristics are analyzed to specially meet the demand of a U-profile variable cross section roll-forming parts. The mechanical structure, working principle and kinematic diagram are introduced. The inverse kinematics analysis problem is solved by symbolical arithmetic, and the transformation relationship of the motion characteristics of all drive shafts to the geometrical properties of machining part, mechanical structure parameters and velocity of feeding of the metal sheet is established. Then kinematic simulation curves of all drive shafts are obtained with software Mathematica, and the formed track well coincides with the desired shape. A variable cross section roll-forming machine is constructed following the proposed scheme and the experiment for forming a U-profile variable cross section roll-forming part is conducted. The simulation and experiment show that the novel scheme enables to realize continuous process of feeding, stretching and compressing of metal sheet with the highest forming accuracy of 0.397 mm.

Keywords: variable cross section roll-forming; motion characteristics; kinematic analysis

变截面辊弯成形是在传统的等截面辊弯成形基础上实现金属板带连续通过多道次串联的变截面辊弯成形机,顺次辊压弯曲成零件截面形状沿长度方向产生与载荷分布相匹配的塑性成形加工方法^[1]。该技术通过减少成形零件次要位置材料,同时增加关键位置材料,可以减轻零件结构质量,提高承载能力和材料利用率,降低生产成本^[1-4]。随着轻量化技术的广泛应用,变截面辊弯成形零件在航空航天、汽车、电力、高速列车、船舶以及建筑等领域有着十分诱人的应用前景^[5],因此变截面辊弯成形机的设计与研究将成为国内外先进成形技术领域研究的热点之一。

变截面辊弯成形是近年来新出现的绿色近净成形技术^[6]。2001年,针对建筑覆盖件变截面型材的需求,ORTIC公司率先研制了变截面辊弯成形机^[7-8]。2003年,针对汽车工业变截面零件的需求,文献^[1]首次提出了变截面辊弯成形的概念,即在传统的定截面辊弯成形生产线中增加了一个道次的变截面辊弯成形机。随后,文献^[2-4]开发出一种单边变截面成形样机,通过辊压成形获得了一种U型变截面零件。在欧盟第6框架下的ProForm项目连续4年资助下,DATA M公司于2009年开发了世界上第一条变截面辊弯成形生产线,随后提出了第3代变截面辊弯成形原理样机^[9]。在国内,北方工业大学先后完成了单轴、双轴以及双齿条变截面辊弯成形原理样机的设计^[10]及其相关理论研究^[11-13]。

目前,国内外学者对变截面辊弯成形技术的研究主要集中在成形原理^[11-14]、计算机仿真与数值模拟^[15]以及辅助工艺^[16]等方面的研究,尚未对变截面辊弯成形加工装备的特性进行分析以提高零件的加工精度和效率。因此,对变截面辊弯成形机的运动特性进行研究具有重要理论意义和工程应用价值。

变截面辊弯成形技术的研究主要集中在瑞士、德国、日本以及中国等少数几个国家,全球用于变截面辊弯成形零件的加工装备仅有几台,本文对国内首套变截面辊弯成形装备的运动特性进行研究。针对U型变截面零件辊弯成形工艺的要求,提出了一种变截面辊弯成形机的设计方案,给出了变截面辊弯成形机的结构组成、工作原理及机构模型,求解了符号形式的运动学逆解,分析了影响变截面辊弯成形机运动特性的因素,建立了轧辊路径的几何特性、结构参数以及加工速度与设备各个驱动轴运动特性之间的数学表达式。采用Mathematics编程对其进行仿真,获得了所有驱动轴的运动特性仿真曲线。

基于新方案制造了变截面辊弯成形生产线,实现了变截面辊弯成形零件的成形制造,为变截面辊弯成形装备的研制与开发提供了新的设计方案和理论依据。

1 结构及工作原理

变截面辊弯成形机的原理样机及世界坐标系如图1所示。每个变截面辊弯成形机由对称分布的左侧和右侧2个轧辊组组成,每个轧辊组主要包含2个导轨伺服电机、1个双齿条单齿轮机构、1个旋转机架、2个轧辊伺服电机以及传动机构。旋转机架上装有轧辊驱动电机、减速器、上下轧辊轴以及2个轧辊,旋转机架与双齿轮单齿条机构的齿轮固定安装。

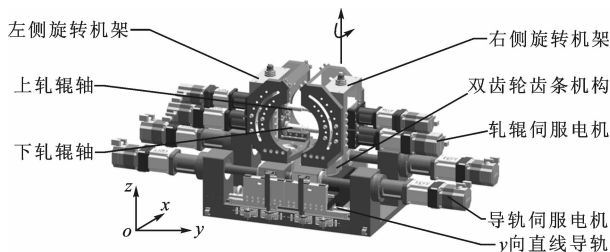


图1 单道次变截面辊弯成形机的原理样机

如图1所示,旋转机架作沿 x 向和 y 向的耦合运动,理论上可以完成轧辊在平面 xoy 上的任意曲线轨迹运动,结合轧辊的轮廓特征,可以完成金属板带的变截面成形加工。但在实际加工过程中,为避免轧辊轮廓面与零件已成形好的区域发生干涉,要求轧辊轴线时刻与成形轨迹的法线保持一致,因此旋转机架应具有绕 z 轴的转动。

变截面辊弯成形机的工作原理是:导轨伺服电机通过传动机构驱动双齿条单齿轮机构和旋转机架沿 y 向移动,同时绕 z 轴的旋转运动;轧辊伺服电机通过减速机构驱动旋转机架的上、下轧辊轴转动,从而驱动轧辊辊压金属板带沿 x 轴向移动。通过多道次变截面辊弯成形机在板材 xoy 平面上沿 x 向、 y 向移动以及绕 z 轴旋转运动的耦合辊压成形,完成变截面零件曲线轨迹加工。由于在变截面辊弯成形过程中每个道次都具有完全相同的机械结构,因此整个装备的运动特性研究可以简化为单道次变截面辊弯成形机的运动特性研究。

2 运动学分析

2.1 机构模型及坐标系

为方便建立变截面辊弯成形机机构模型以及运动学分析,作如下等效处理:①在实际加工过程中,

板材与单道次轧辊的接触为线接触,即高副,但板材在变截面辊弯成形全过程中与连续多个道次轧辊线接触,因此可将板材与多个道次轧辊的高副接触等效为低副,即移动副 P_1 ;②变截面辊弯成形机相对世界坐标系固定不动,板材在轧辊的辊压下相对装备沿 x 向移动,等效处理为板材固定不动,装备沿 x 向移动,移动速度为板材进给速度;③双齿条单齿轮机构能同时实现沿 y 向移动和绕 z 轴转动,等效为移动副 P_2 和转动副 R_1 ,两者的运动关系与齿轮齿条的参数有关,属于机械零件设计范畴,不做深入分析;④变截面零件截面形状与轧辊轮廓有关,为分析简便,只分析轧辊轴线在板材 xoy 平面的运动轨迹,暂不考虑轧辊的轮廓曲线。根据成形机的机械结构及工作原理获得其机构模型,如图 2 所示。

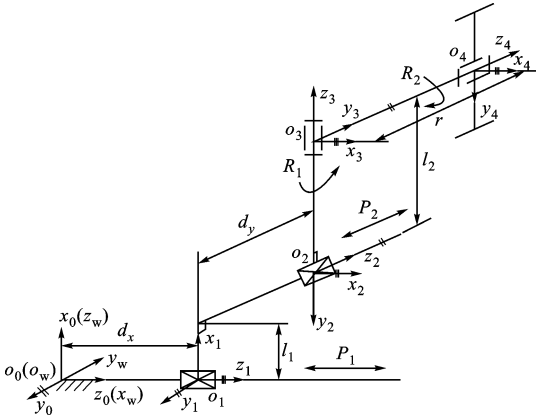


图 2 单道次变截面辊弯成形机的机构模型

由图 2 可知,单道次变截面辊弯成形机的机构包含板材在 x 方向的移动副 P_1 、沿 y 向的移动副 P_2 和一个绕 z 轴的转动副 R_1 , R_2 表示轧辊绕轧辊轴的转动,为局部自由度,不影响轧辊轴线的运动轨迹。基于 D-H 方法^[17],建立空间坐标系及关节参数,如图 2 所示。进行变截面辊弯成形加工时,输入量为移动副 P_1 的位移 d_x 、移动副 P_2 的位移 d_y 及转动副 R_1 的转角位移 θ ,输出量为轧辊末端坐标原点 o_4 的运动轨迹曲线。

2.2 运动学方程

正运动学问题就是根据各关节位置、速度、加速度来求解轧辊末端的位置、姿态、速度和加速度问题。由图 2 可得出变截面辊弯成形机的 D-H 参数表,如表 1 所示。

将表 1 中 D-H 参数带入运动变换矩阵^[17],得

$${}^3_0\mathbf{T} = {}^1_0\mathbf{T} {}^2_1\mathbf{T} {}^3_2\mathbf{T} {}^4_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & l_2 \\ -\sin\theta & 0 & -\cos\theta & -d_y - r\cos\theta \\ \cos\theta & 0 & -\sin\theta & d_x - r\sin\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 1 变截面辊弯成形机的 D-H 参数表

连杆 i	θ_{i+1}	d_{i+1}	α_i	a_i	关节变量
1	0	d_x	0°	0	d_x
2	0	d_y	-90°	l_1	d_y
3	θ	l_2	90°	0	θ
4	0	r	-90°	0	

注: $l_1=0$; l_2 为常数; r 为常数。

根据式(1)可知,轧辊末端相对基坐标系 $o_0-x_0y_0z_0$ 的位置坐标为

$$\left. \begin{aligned} {}^0p_x &= l_2 \\ {}^0p_y &= -d_y - r\cos\theta \\ {}^0p_z &= d_x - r\sin\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为方便运动学位置逆解计算,将轧辊末端位置坐标式(2)转换到世界坐标系 $o_w-x_wy_wz_w$ 中,由图 2 的坐标系关系可知,轧辊末端的位置坐标为

$$\left. \begin{aligned} {}^wp_x &= {}^0p_z = d_x - r\sin\theta \\ {}^wp_y &= -{}^0p_y = d_y + r\cos\theta \\ {}^wp_z &= {}^0p_x = z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

轧辊的姿态为绕 z 轴转动的角度

$${}^w\theta = \text{rot}({}^wz, \theta) = \frac{\pi}{2} + \theta \quad (4)$$

由式(3)~式(4)可以确定轧辊在世界坐标系 $o_w-x_wy_wz_w$ 中的位姿,即变截面辊弯成形机的运动学方程为

$$\left. \begin{aligned} {}^wp_x &= {}^0p_z = d_x - r\sin\theta \\ {}^wp_y &= -{}^0p_y = d_y + r\cos\theta \\ {}^wp_z &= {}^0p_x = z \\ {}^w\theta &= \text{Rot}({}^wz, \theta) = \frac{\pi}{2} + \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.3 逆运动学分析

逆运动学主要解决的问题是根据轧辊的位置和姿态求解各关节变量的位置、速度、加速度,该问题是变截面辊弯成形装备运动规划以及轨迹控制的理论基础。

2.3.1 加工路径曲线 加工零件路径曲线方程为关于加工时间 t 的函数,可表示为

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= f(x(t)) \\ x(t) &= v_b t \\ k(t) &= y'(t) = \frac{f'(x(t))}{x'(t)} = \frac{f'(v_b t)}{v_b} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $y(t)$ 为被加工零件的曲线方程; $x(t)$ 为轧辊辊压带动板材的进给长度; v_b 为板材的恒定进给速度; t 为板材的进给时间; $k(t)$ 为曲线方程 t 时刻的切线斜率。

2.3.2 位置逆解 由于在变截面辊弯成形加工过程中, 轧辊轴线的成形轨迹要求与被加工零件的曲线方程完全一致。因此, 式(3)中 ${}^w p_x$ 、 ${}^w p_y$ 与式(6)中 $x(t)$ 、 $y(t)$ 对应相等, 即

$$\left. \begin{aligned} {}^w p_x &= d_x - r \sin \theta = x(t) = v_b t \\ {}^w p_y(t) &= d_y(t) + r \cos[\theta(t)] = y(t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

同时, 轧辊的成形截面应该始终与成形轨迹相切, 即轧辊旋转轴与成形曲线的法线方向一致, 因此被加工零件曲线方程的斜率 $y'(t)$ 与轧辊旋转轴绕 z 轴转动的角度 θ 有如下关系

$$y'(t) \tan {}^w \theta = y'(t) \tan \left(\frac{\pi}{2} + \theta(t) \right) = -1 \quad (8)$$

由式(8), 得

$$\theta(t) = \arctan[y'(t)] \quad (9)$$

由式(7)和式(9), 可得

$$\left. \begin{aligned} d_x(t) &= v_b t + r \sin[\theta(t)] \\ d_y(t) &= y(t) - r \cos[\theta(t)] \\ \theta(t) &= \arctan[y'(t)] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(10)为变截面辊弯成形机的运动学位置逆解。由

$$y(x) = \begin{cases} 20 & 0 < x \leq 90 \\ -\frac{20}{22} \frac{791}{22} + \left(\frac{450}{484} \frac{755}{484} \frac{361}{361} - (-90+x)^2 \right)^{1/2} & 90 < x \leq 160 \\ 20 - \frac{4}{55}(x-125) & 160 < x \leq 365 \\ -\frac{21}{22} \frac{231}{22} + \left(\frac{450}{484} \frac{755}{484} \frac{361}{361} - (-435+x)^2 \right)^{1/2} & 365 < x \leq 435 \\ 0 & 435 < x \leq 565 \\ -\frac{21}{22} \frac{231}{22} + \left(\frac{450}{484} \frac{755}{484} \frac{361}{361} - (-565+x)^2 \right)^{1/2} & 565 < x \leq 635 \\ \frac{4}{55}(x-600) & 635 < x \leq 840 \\ -\frac{20}{22} \frac{791}{22} + \left(\frac{450}{484} \frac{755}{484} \frac{361}{361} - (-910+x)^2 \right)^{1/2} & 840 < x \leq 910 \\ 20 & 910 < x \leq 1\,000 \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 单侧成形加工轨迹的曲线为直线与圆弧的连接, 过渡区域为圆弧, 整段曲线为一阶连续, 单侧成形加工轨迹曲线方程 $y(x)$ 如图4所示。

3.2 运动学分析

设定板材的进给速度 $v_b = 20$ mm/s, 机构参数 $r = 260$, 根据给定的成形轨迹曲线方程 $y(x)$, 应用 Mathematics 编程对该变截面辊弯的各关节进行运

式(10)可知, 驱动轴移动关节的位移、速度及加速度与机械结构参数 r 、加工速度 v_b 以及轧辊轴线的成形轨迹曲线方程 $y(t)$ 有关, 而转动关节的位移、速度及加速度只与轧辊轴线的运动轨迹曲线 $y(t)$ 有关, 与机械结构参数以及关节变量无关。

3 加工实例

3.1 加工曲线路径方程

加工实例的零件为某型轿车的 B 柱加强板初加工零件, 三维模型如图3所示。通过后续的切割、整形、钻孔可以一次性成形加工得到4件轿车的 B 柱加强板零件。图3所示零件尺寸呈左右对称, 为简化分析, 仅分析单侧成形加工轨迹的曲线方程。

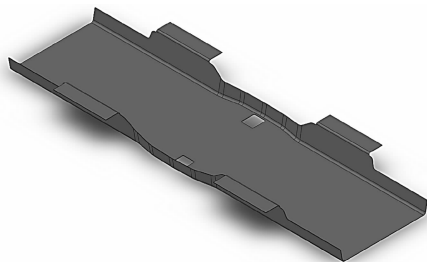


图3 加工成形零件的三维模型

通过读取三维数学模型中的成形轨迹曲线参数, 可以获得单侧成形加工轨迹的曲线方程如下

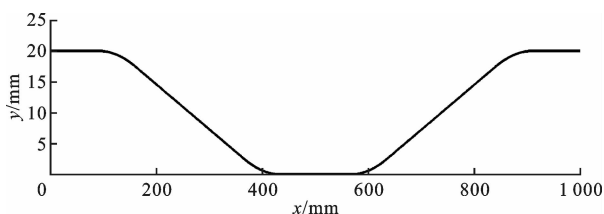


图4 单侧成形加工轨迹曲线

动仿真。根据式(10)获得各关节的位移曲线如图 5~图 7 所示。

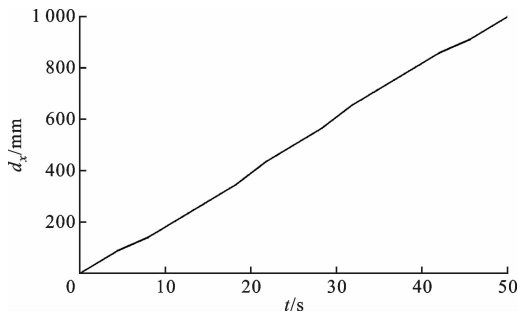


图 5 移动关节 P_1 位移 d_x 的变化曲线

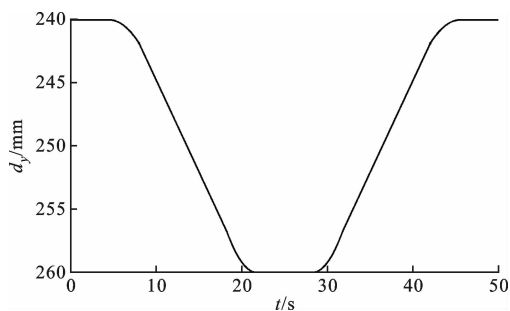


图 6 移动关节 P_2 位移 d_y 的变化曲线

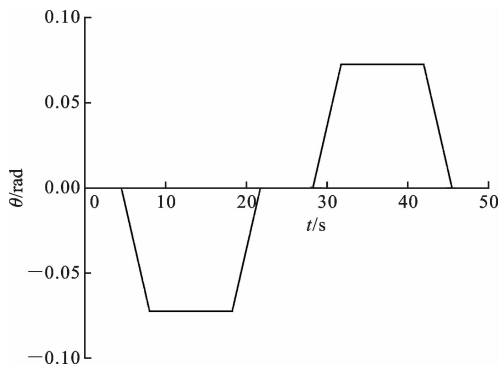


图 7 转动关节 R_1 转角 θ 的变化曲线

分析图 5~图 7 可知,变截面辊弯成形加工过程如下:①0~4.5 s 水平直线段表示窄面定截面辊弯成形加工,板材仅受到辊压;②4.5~8 s 水平直线段与斜线段之间的圆弧过渡区表示变截面折弯区辊弯成形加工,零件的截面开始变大,板材受到辊压的同时开始进入横向(y 向)拉伸;③8~18.25 s 斜线段为变截面成形加工,零件截面均匀变大,板材受到辊压的同时连续被横向拉伸;④18.25~21.75 s 斜线段与水平直线段之间的圆弧过渡区为变截面成形加工,零件截面逐渐停止变大,板材受到辊压的同时受到的横向拉伸量逐步减小;⑤21.75~28.25 s 水平直线段为宽面定截面成形加工,零件截面保持不变,板材仅受到辊压;⑥28.25~31.75 s 为水平直线

段与斜线段圆弧过渡区为变截面成形加工,零件截面开始变小,板材受到辊压的同时开始受到横向压缩;⑦31.75~42 s 斜线段为变截面成形加工,零件截面连续减小,材料受到辊压的同时被连续横向压缩;⑧42~45.5 s 斜线段与水平直线段之间的圆弧过渡区为变截面成形加工,零件截面逐渐停止减小,材料受到辊压的同时横向压缩量逐步减小;⑨45.5~50 s 直线段为窄面定截面成形加工,零件截面保持不变,板材仅受到辊压,进入成形加工过程①。依次重复成形加工,从而实现带材的连续变截面辊弯成形加工。

由上述加工过程可知,变截面辊弯成形机通过辊压实现板带 x 向的进给运动,板材 y 向的拉伸和压缩等操作,并且轧辊旋转轴始终与被加工零件曲线的法线方向一致。仿真得出的运动规律与图 4 的变截面辊弯成形运动规律相一致。

3.3 实验验证

基于新方案制造了有 6 个道次的变截面辊弯成形生产线,如图 8 所示,实现了变截面辊弯成形零件的成形加工,如图 9 所示。

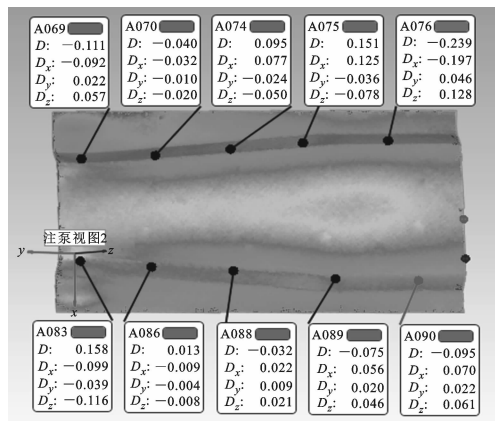


图 8 变截面辊弯成形生产线



图 9 变截面辊弯成形零件

使用三维激光扫描仪对变截面辊弯成形零件进行轮廓扫描,采用直接最佳拟合与原数学模型对齐比较,颜色对比偏差显示误差,如图 10 所示。由图 10 可知,轧辊运动轨迹啮合点最大上偏差为 0.158 mm,最大下偏差为 -0.239 mm,因此成形加工最大偏差(即成形精度)为 0.397 mm,满足变截面辊弯成形工艺设计要求。



D 为啮合点偏差,单位为 mm

图 10 成形零件三维激光扫描与数模误差对比

4 结 论

(1)针对 U 型变截面零件辊弯成形工艺要求,提出了变截面辊弯成形机的机构模型。以某型轿车的 B 柱加强板的变截面辊弯成形加工为工程实例,获得了变截面辊弯成形过程中各个驱动轴位移仿真曲线变化情况,仿真得出的运动规律与设计的运动规律相一致,表明装备设计方案可行。

(2)对变截面辊弯成形机进行运动学分析,求解了符号形式的运动学逆解,根据运动控制周期将关节轨迹离散化得到关节位置序列,即为变截面辊弯成型装备的运动控制量,将离散后运动控制量输入到运动控制系统中,从而可实现板材的变截面辊弯成形机的运动控制。

(3)获得了变截面辊弯成形机各个驱动轴的运动特性(位移、速度及加速度)与末端轧辊路径的几何特性、机床结构参数以及加工速度之间的数学表达式,从理论上阐明了可以通过优化末端轧辊路径的几何特性、机床结构参数以及加工速度来改善变截面辊弯成形机的运动特性,为变截面辊弯成形机的运动控制和结构优化设计提供了理论依据。

(4)基于新方案进行了变截面辊弯成形零件的成形加工实验,结果表明,设计方案能够完成板材的进给、拉伸和折弯操作,实现连续变截面辊弯成形加工。

参考文献:

[1] GROCHE P, BREITENBACH G, JÖCKEL M, et al. New tooling concepts for future roll forming applications [C] // Proceedings of 4th International Conference on Industrial Tools. Celje, Slovenia; TECOS.

Slovenian Tool and Die Development Centre, 2003; 121-126.

[2] ONA H. Study on development of intelligent roll forming machine [C] // Proceedings of 8th International Conference on Technology of Plasticity. Verona, Italy; Padova. Edizioni Progetto, 2005; 503-504.

[3] ONA H, SHO R, NAGAMACHI T, et al. On development of flexible cold roll forming machine [C] // Proceedings of 9th International Conference on Technology of Plasticity. Gyeongju, Korea; Hanrimwon Publishing Co., 2008; 2021-2025.

[4] ONA H, SHOU I, HOSHI K. On strain distributions in the formation of flexible channel section development of flexible cold roll forming machine [J]. Advanced Materials Research, 2012, 576; 137-140.

[5] GROCHE P, HENKELMANN M, GÖTZ P, et al. Cold rolled profiles for vehicle construction [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, 28 (3); 31-38.

[6] 李新亚, 王德成, 刘丰, 等. 先进成形技术与装备发展道路刍议: 先进成形技术与装备发展现状与趋势 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 100-104.

LI Xinya, WANG Decheng, LIU Feng, et al. Visioning future of advanced manufacture technology & equipment: present situation & tendency of advanced forming technique & equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 100-104.

[7] LINDGREN M, INGMARSSON L. 3D roll-forming of hat-profile with variable depth and width [EB/OL]. [2015-05-20]. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:522033/FULLTEXT01.pdf>.

[8] SEDLMAIER A, HENNING R. Making tubes discontinuous cross sections by means of 3D roll forming [C] // Beijing Tube International Technical Conference. Beijing, China; International Tube Association, 2010; 31-36.

[9] 景作军, 张若青, 艾正青. 变截面辊弯成形试验 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19(16): 23-27.

JING Zuojun, ZHANG Ruqing, AI Zhengqing. Experimental study on variable cross section roll forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(16): 23-27.

[10] 韩飞, 王世鹏. 变截面辊弯成形边波机理 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20(5): 117-121.

HAN Fei, WANG Shipeng. Research of edge-wave mechanism in flexible roll forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(5): 117-121.

(下转第 144 页)