DOI: 10.3901/JME.2014.10.040

拼焊板 V 形自由弯曲精确回弹控制技术研究*

段永川 官英平

(先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室(燕山大学) 秦皇岛 066004)

摘要: 在平截面和平面弯曲等假设条件下, 建立拼焊板 V 形可适于小曲率自由弯曲回弹的解析预测模型, 所建立的回弹预测模型将成形过程分段研究, 即区分为贴模阶段和未贴模阶段。分别根据贴模态和未贴模态拼焊板弯矩分布特点, 构建两种状态下的曲率分布方程。在自由弯曲卸载分析阶段, 引入两母板间相互作用的弯矩, 同时考虑弹性模量随塑性变形变化的影响, 基于单一母板求解拼焊板母板回弹后的弯曲角。基于 2D 单应矩阵变换法实现拼焊板回弹后端面弯曲角的在线测量。针对板料中材料参数的波动性问题, 基于正交表构建最佳行程预测的神经网络模型的训练样本。根据软硬件接口基于 LabVIEW 软件平台开发可在线学习的拼焊板 V 形自由弯曲回弹控制系统软件。设定目标回弹后弯曲角分别为 140°和 100°时, 跟踪在线成形试验结果, 成形第 5 周期最大点误差可分别达到 1.42%和 2.01%。

关键词: 拼焊板; 自由弯曲; 回弹控制

中图分类号: TG386

Development of Precise Spring-back Control System of Tailor Welded Blanks Air Bending Process

DUAN Yongchuan GUAN Yingping

(Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science(Yanshan University),
Ministry of Education of China, Qinhuangdao 066004)

Abstract: The analytical springback prediction model of tailor welded blanks(TWBs) for air bending process is put forward for small curvature bending, the forming process is divided into no warp-around condition and warp-around condition respectively. At the air bending unloading phase, the interaction moment of the two parent blanks is introduced to the model in which the variable modulus is included with plastic deformation proceeding, the unloaded angle is obtained based on a single parent plate in the analytical model. An online method for measuring unloaded angle is used based on two dimension homography matrix transformation method. In the springback control system, the training set is constructed using orthogonal table to include the material parameter fluctuation. The TWBs springback control system is developed using LabVIEW software platform. In the springback control system, the target unloaded angles 140° and 100° are set, the maximum manufacturing errors are decreased to 1.42% and 2.01% respectively by tracing the online results after 5 cycles.

Key words: tailor welded blanks; air bending; springback control

0 前言

板材弯曲是板材冲压成形常见的加工工序之一, 自由弯曲工艺零件的形状精度和角度精度是可以通过控制凸模的位移来实现的, 大大减少了更换模具的次数^[1-2]。在拼焊板 V 形自由弯曲工艺中, 同材差厚拼焊板截面的几何形状和异材拼焊板截面

的材料非均质分布都会造成成形力学行为的非对称性, 加之焊缝、热影响区以及高强钢卸载过程中应力和变形的非线性效应^[3-5], 使回弹控制更加困难。

20 世纪 80 年代后期, GOSSARD 等^[6]将自适应控制系统应用于数控折弯, 这种自适应控制法可以获得很高的折弯精度, 但是成本高、生产效率低。STELSON^[7]提出了一种混合型控制方法, 该方法首先获得弯曲成形的初始阶段力位移曲线, 将此信息用于计算板材的厚度和材料的性能, 从而计算出回弹量和凸模预定行程。YANG 等^[8]对数控折弯自适应

* 国家自然科学基金(51275444)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20121333110003)资助项目。20130515 收到初稿, 20131225 收到修改稿

应控制系统进行了较深入的研究, 提出了基于试验数据库和模糊推理模型的自由弯曲的实时工艺控制系统。KWOK 等^[9]提出了一种基于机器视觉系统的自适应控制法, 将提取出来的信息输入控制系统的折弯模型中计算出上模的行程。FORCELLESE 等^[10]提出了基于人工神经网络的回弹控制系统。在拼焊板回弹预测方面, 姜银方等^[11]在假设拼焊板两母板的几何中心重合的条件下, 研究拼焊板 V 形弯曲回弹预测的解析方法。笔者考虑了截面几何的非对称性, 建立了纵向焊缝拼焊板 V 形自由弯曲回弹的预测模型, 该模型在未贴模弯曲中计算精度较高^[12]。但模型中未考虑模量变化对回弹的影响, 模型不适于小曲率弯曲回弹预测。CHANG 等^[13]应用试验研究的方法分别对纵向焊缝和横向焊缝的拼焊板的 U 形弯曲回弹进行研究, 分别在不同板厚组合和不同的凸模圆角半径的情况下进行 U 形弯曲和回弹试验。

本文建立了拼焊板 V 形可适于小曲率自由弯曲回弹的解析预测模型, 所建立的回弹预测模型将成形过程分段研究, 即区分为贴模阶段和未贴模阶段。在自由弯曲卸载分析阶段, 引入了两母板间相互作用弯矩, 同时还考虑了弹性模量随塑性变形变化的影响。基于 2D 单应矩阵变换法实现了拼焊板回弹后端面弯曲角的在线测量。针对板料中材料参数的波动性问题, 基于正交表构建了最佳行程预测的神经网络模型的训练样本。根据软硬件接口基于 LabVIEW 软件平台开发了可在线学习的拼焊板 V 形自由弯曲回弹控制系统软件。

1 解析分析

在拼焊板成形过程中, 随着凸模弯曲行程的增加, 凸模下方板料的最小弯曲半径逐渐减小, 成形过程中未出现贴模区域状态如图 1a 所示, 成形过程中出现贴模区域状态如图 1b 所示。

图 1 中参数具体含义参见图 2。本文中回弹预测模型分别根据两种状态分情况建立解析模型。

对于拼焊板 V 形自由弯曲解析预测模型做如下假设。

(1) 平截面假设。

(2) 拼焊板板料宽度方向的变形忽略不计, 变形区处于平面应变状态。

(3) 拼焊板弯曲为平面弯曲, 不考虑中性层的转动。

(4) 纵向拼焊板模型的两差厚板为几何连接, 不考虑焊缝和热影响区的影响。

(5) 变形区应变采用式(1)近似表达

$$\varepsilon = \ln \left(1 + \frac{y}{\rho} \right) \approx \frac{y}{\rho} \quad (1)$$

式中 ε ——板料的截面切向应变;

y ——截面上质点至中性层的距离;

ρ ——中性层曲率半径。

(6) 自由弯曲过程板料厚度方向的应力 $\sigma_y \approx 0$ 。

(7) 材料符合幂指数硬化模型, 即 $\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^n$, 其中, K 为拼焊板母板的强度系数, n 为拼焊板母板的硬化指数。

纵向拼焊板的截面几何形状如图 2 所示, 在建立的回弹预测模型中, 未考虑焊缝及热影响区的影响, 为了便于在力学模型中讨论问题, 假设 $\delta_1 > \delta_2$ 。

图 2 纵向拼焊板截面形状

图 2 中, δ_1 为厚侧母板的厚度, $\bar{y}$ 为应力中性层的位置坐标。对于指数硬化模型, 厚侧母板的内力和薄侧母板的内力在 x 处的弯矩 M_1 和 M_2 分别为

$$M_1 = \int_{S_1} \sigma_x y dA = \frac{b_1 K_1 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n_1+1}}{(n_1+2) \rho_x^{n_1}} y^{n_1+2} \Big|_{-\bar{y}}^{\delta_1-\bar{y}} \quad (2)$$

$$M_2 = \int_{S_2} \sigma_x y dA = \frac{b_2 K_2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n_2+1}}{(n_2+2) \rho_x^{n_2}} y^{n_2+2} \Big|_{\delta_1-\delta_2-\bar{y}}^{\delta_1-\bar{y}} \quad (3)$$

式中 K_1 ——拼焊板厚侧母板的强度系数;

n_1 ——拼焊板厚侧母板的硬化指数;

K_2 ——拼焊板薄侧母板的强度系数;

n_2 ——拼焊板薄侧母板的硬化指数;

ρ_x ——拼焊板应力中性层曲率半径;

b_1 ——拼焊板厚侧母板的宽度;

b_2 ——拼焊板薄侧母板的宽度;

S_1 ——厚侧母板的横截面积;

S_2 ——薄侧母板的横截面积。

为了便于后续解析公式简化,定义中间变量 A_1 和 A_2 , 其表达式定义如式(4)、(5)所示

$$A_1 = \frac{b_1 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n_1+1}}{n_1 + 2} y^{n_1+2} \Big|_{-\bar{y}}^{\delta_1 - \bar{y}} \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{b_2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n_2+1}}{n_2 + 2} y^{n_2+2} \Big|_{\delta_1 - \delta_2 - \bar{y}}^{\delta_1 - \bar{y}} \quad (5)$$

通过定积分运算后,由式(2)和式(3)可解得拼焊板弯曲过程中的任意 x 点处的曲率

$$\frac{1}{\rho_x} = \left(\frac{M_1}{K_1 A_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} = \left(\frac{M_2}{K_2 A_2} \right)^{\frac{1}{n_2}} \quad (6)$$

1.1 自由弯曲未贴模成形过程解析

假设作用于纵向拼焊板纵向的弯矩呈线性分布,在距离 O 为 x 处的板料截面弯矩为 M_x , 则

$$M_x = \frac{N(l-x)}{\cos \theta} \quad (7)$$

当 $n_1 = n_2$, $K_1 = K_2$ 时,根据同材差厚纵向拼焊板任意一点 x 处的弯矩分布与其薄侧板和厚侧板关系(式(6)),可得出厚侧母板在任意一点 x 处的曲率^[12]

$$\frac{1}{\rho_x} = \left[\frac{(l-x)N}{K_1(A_1 + A_2)\cos \theta} \right]^{\frac{1}{n_1}} \quad (8)$$

定义拼焊板厚侧母板的质点在 x 处的曲率为 K_x ($K_x \geq 0$), K_x 数学表达式为

$$K_x = \frac{1}{\rho_x} = \frac{|y''(x)|}{[1 + y'^2(x)]^{3/2}} \quad (9)$$

$$\frac{dy}{dx} = \tan \alpha \quad (10)$$

由纵向拼焊板对齐面朝向凸模的几何关系可得,凸模的位移

$$h = \int_0^l \frac{dy}{dx} dx + (r_d + \bar{y})(1 - \cos \theta) \quad (11)$$

1.2 自由弯曲含贴模成形过程解析

当拼焊板厚侧板料几何中心的弯曲半径减小到 $\rho_{\min} = r_p + \delta_1 - \bar{y}$ 时,拼焊板开始出现贴模区域,其贴模分界点的坐标为 x_c ,在厚侧母板和薄侧母板

贴模段的弯矩分别为 M_{c1} 和 M_{c2} 。在纵向拼焊板对齐面朝向凸模时,其值可以通过式(12)、(13)计算

$$M_{c1} = \frac{K_1 A_1}{(r_p + \delta_1 - \bar{y})^{n_1}} \quad (12)$$

$$M_{c2} = \frac{K_1 A_2}{(r_p + \delta_1 - \bar{y})^{n_1}} \quad (13)$$

厚侧母板截面上任意一点 x 处的弯矩

$$M_1 = \begin{cases} M_{c1} & x \in [0, x_c] \\ M_{c1} \frac{l-x}{l-x_c} & x \in (x_c, l] \end{cases} \quad (14)$$

薄侧母板截面上任意一点 x 处的弯矩

$$M_2 = \begin{cases} M_{c2} & x \in [0, x_c] \\ M_{c2} \frac{l-x}{l-x_c} & x \in (x_c, l] \end{cases} \quad (15)$$

当 $x = x_c$ 时,在纵向拼焊板对齐面朝向凸模时有

$$M_{x_c} = \frac{N(l-x_c)}{\cos \theta} = M_{c1} + M_{c2} \quad (16)$$

可以计算得到

$$x_c = l - \frac{K_1(A_1 + A_2)\cos \theta}{N(r_p + \delta_1 - \bar{y})^{n_1}} \quad (17)$$

1.2.1 贴模区域弯矩及曲率的计算

在板料的质点在 $x \in [0, x_c]$ 段,其成形弯矩为定值,根据任意一点 x 处的弯矩分布与其薄侧板和厚侧板关系(式(6)),可得出厚侧母板在任意一点 x 处的曲率

$$\frac{1}{\rho_x} = \frac{1}{r_p + \delta_1 - \bar{y}} \quad x \in [0, x_c] \quad (18)$$

1.2.2 未贴模区域弯矩及曲率的计算

在板料的质点在 $x \in [x_c, l]$ 段,其成形弯矩为线性过度,曲率方程如式(19)所示

$$\frac{1}{\rho_x} = \left(\frac{M_{c1}}{K_1 A_1} \frac{l-x}{l-x_c} \right)^{\frac{1}{n_1}} \quad x \in [x_c, l] \quad (19)$$

此时凸模位移

$$h = \int_0^{x_c} \frac{dy}{dx} dx + \int_{x_c}^l \frac{dy}{dx} dx + (r_d + \bar{y})(1 - \cos \theta) \quad (20)$$

1.3 纵向拼焊板 V 形自由弯曲变弹性模量弹复过程分析

通过单向拉伸试验,可以得出在卸载阶段其应力应变关系表现为非线性,可以将回弹应变分为两部分,其分量如式(21)所示

$$\varepsilon_{sp} = (\sigma_0 - \sigma_1) / E_0 + \varepsilon_{mp} \quad (21)$$

式中 E_0 ——初始弹性模量;

σ_0 ——卸载前应力;

σ_1 ——回弹后残余应力;

ε_{mp} ——微塑性回复, 是弹复应变的非线性部分。

本文参考了文献[14], 将弹性模量以指数形式描述为全量应变的函数, 如式(22)所示

$$E_u = E_0 - (E_0 - E_a)[1 - \exp(-\xi\varepsilon)] \quad (22)$$

根据式(22), 可以得出在弯矩 M 的作用下, 回弹曲率与弯矩的关系为

$$M = 2 \int_0^{\delta/2} E_u \frac{y^2}{\rho_x''} b' dy \quad (23)$$

式中 ρ_x'' ——弯矩 M 卸载后, 任意一点 x 处的曲率半径的变化量;

δ ——板厚。

回弹后曲率的变化可进一步表达为

$$\Delta K = \frac{1}{\rho_x''} = \frac{M}{E_a I + (E_0 - E_a) I'} = \frac{M}{W} \quad (24)$$

$$\text{式中 } I' = 2b' \left(\frac{\delta^2 B}{4A} - \frac{\delta B}{A^2} + \frac{2B}{A^3} - \frac{2}{A^3} \right);$$

$$A = -\xi / \rho_x;$$

$$B = \exp A\delta/2。$$

为了便于分析较为复杂的拼焊板弯曲回弹过程, 首先假设纵向拼焊板母板弯曲变形后无焊缝处相互牵制, 拼焊板两母板可以单独进行回弹变形, 回弹前后构形如图 3 所示, 拼焊板弯曲回弹后厚侧板的构形为 A , 弯曲回弹后薄侧板的构形为 B 。

图 3 拼焊板 V 形自由弯曲回弹分析

在不考虑焊接工艺对材料性能产生影响的情况下, 拼焊板两母板进行焊接后的构形为 C , 两母板焊接后会在 $x \in [0, x_{sm}]$ 段产生相互作用的弯矩, 并假设相互作用的弯矩 ΔM 线性分布, 焊接后的曲率为 $1/\rho_x''$ 。根据拼焊板的变形牵制关系, 分别对厚侧母板和薄侧母板应用卸载定律得

$$\frac{M_1 + \Delta M}{W_1} = \frac{1}{\rho_x} - \frac{1}{\rho_x''} \quad (25)$$

$$\frac{M_2 - \Delta M}{W_2} = \frac{1}{\rho_x} - \frac{1}{\rho_x''} \quad (26)$$

根据拼焊板两母板变形前后的曲率半径, 可得出拼焊板薄侧母板与厚侧母板间相互作用弯矩, 将其代入式(25)可得拼焊板厚侧母板任意一点 x 处回弹后曲率半径

$$\frac{1}{\rho_x''} = \frac{1}{\rho_x} - \frac{M_1}{W_1} - \frac{M_2 W_1 - M_1 W_2}{W_1 (W_1 + W_2)} \quad (27)$$

式中, W_1 和 W_2 可由式(24)计算得到。根据式(27)回弹后曲率半径, 通过积分可以得到回弹后弯曲角度值, 应用此模型可以构造后续控制系统的神经网络预测模型的训练样本。

2 在线学习回弹控制系统

2.1 基于机器视觉的角度测量模块

在实际工业应用中, 基于机器视觉的非接触测量方式提供了更多的灵活性, 图像传感器属于精密测量设备, 并且由于模具安装、移动等生产需要的调整, 使得图像传感器光轴不能与被测物体平面保持垂直, 需要标定板对传感器进行标定, 本文选用二维标定板, 二维标定板上的任意目标点 Q 的齐次坐标与像素坐标之间的关系^[15]为

$$sm = A(Rt)M \quad (28)$$

式中 M —— Q 点在世界坐标系中的齐次坐标, $(X, Y, Z, 1)^T \in R^4$;

m —— Q 点在图像坐标系中像素的齐次坐标, $(u, v, 1)^T \in R^3$;

s ——与齐次世界坐标 M 有关的比例缩放因子;

R, t ——从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矢量, 即摄像机的外参数;

A —— 3×3 摄像机内参数矩阵。

设二维标定板的世界坐标系的原点 Z 分量为零, 且 Z 轴的方向与此平面垂直, 则二维标定板上目标点 Q 的世界坐标简化为 $(X, Y, 0, 1)^T \in R^4$, 将其代入式(28)中, 并进行整理后得到

$$sm = H\tilde{M} \quad (29)$$

式中 $\tilde{M}$ —— Q 点在标定平面上的齐次坐标, $(X, Y, 1)^T \in R^3$;

H —— 2D 单应矩阵, $H \in R^{3 \times 3}$ 。

通过式(30)由摄像机的内、外参数矩阵计算得到

$$H = A(r_1 \ r_2 \ t) \quad (30)$$

式中 r_1, r_2 ——旋转矩阵 R 的前两列矢量, $r_1 \in R^3$, $r_2 \in R^3$ 。

因此,对于标定板上的任意目标点,单应矩阵 H 为不变量。在标定过程中,首先将标定板放于拼焊板端面内,通过控制程序触发传感器采集标定板图像,在像素坐标系中齐次坐标 m 通过角点识别程序读取,如图 4 所示。标定板上二维坐标 $\tilde{M}$ 为已知,根据图 4 中四个图像匹配点,通过式(29)计算出单应矩阵。根据单应矩阵可以计算出目标平板面内点与图像坐标系下点的对应变换关系。拼焊板端面图像中像素点通过单应矩阵变换后可能出现非整数坐标分量,本文利用双线性插值法建立两空间图像像素点的灰度对应关系,双线性插值法的卷积核采用三角形函数,其表达式为

$$W(x) = 1 - |x| \quad 0 \leq |x| \leq 1 \quad (31)$$

变换前图像中 4 个原始点对变换后目标点 P 所作贡献的权值构成一个 2×2 的二维卷积核权矩阵 W ,则目标点 P 的灰度值可以通过式(32)计算得到

$$I(P) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 I(i, j) W(i, j) \quad (32)$$

式中 $I(i, j)$ ——插值点邻近的四个点的灰度值;

$W(i, j)$ ——邻近点对 P 点的权值。

利用双线性插值算法计算,得到变换后图像如图 5 所示,矩形角点为变换后二维标定板角点。

图 4 控制系统获取变换前图像

图 5 控制系统获取变换后图像

利用中值滤波法对变换后的图像进行滤波处理,应用 Canny 算子进行边缘提取,利用 Hough 变换得到拼焊板回弹后直边段像素集,利用最小二乘法拟合直边段,控制系统程序计算两直线夹角如图 6 所示。为了验证本文采用的在线图像法测量角度的测量精度,同步采用了美国星科公司(CimCore)生产的 3000iTM 系列柔性三坐标测量系统,使用 PowerINSPECTTM 测量软件联合三坐标测量工具对拼焊板 V 形弯曲卸载后的弯曲角度进行点接触式检测,两结果对比其误差为 0.01%,本文采用的图像法可以满足试验和工程需要。

图 6 控制系统获取变换后角度测量图像

2.2 基于神经网络的行程预测模块

本文利用解析方法建立了拼焊板 V 形自由弯曲回弹预测模型,所建立的解析模型中存在迭代计算,对弯曲回弹的行程预测应用到在线系统中较为困难,而且解析模型没有适应和学习的能力,在拼焊板弯曲件控制系统中,对工艺参数的预测是通过建立神经网络的模型来实现的。实际生产所用板料由于生产卷次或生产批次的不同,板料的力学性能参数和成形性能也存在波动性,这种波动性将导致不同批次或不同卷次的板料在同样的生产工艺中,成形后零件的形状不一致,因此,本文分别从三个不同卷次的板坯中制作单向拉伸试件,应用力尔公司生产的 WDD-LCJ-150 型电子拉扭多功能材料试验机进行单向拉伸试验,获得的材料加载波动参数如表 1 所示。通过反复加载卸载,将卸载段的多组应力应变点进行拟合,得到材料弹性模量随应变的变化规律。进一步应用指数形式表达式(式(22))拟合出的材料卸载波动参数如表 2 所示。

表 1 拼焊板母板材料参数

板料 牌号	屈服强度 σ_s/MPa	弹性模量 E/GPa	强度系数 K/MPa	硬化指数 n
STG350	392.69 ± 25.87	195.06 ± 15.32	836.42 ± 50.61	0.781 ± 0.036

表 2 拼焊板母板卸载弹性模量参数

初始弹性模量 E_0/GPa	饱和弹性模量 E_∞/GPa	模量率 ξ
205.06 ± 15.32	138.34	25

BP 神经网络模型经过本批次板料所构建的样本集训练后可以预测最佳的弯曲行程, 为了包含范围全面的样本点, 应用正交试验法设计样本点材料参数组合, 选用四因素三水平的正交表构建波动范围内的材料参数组合, 组合情况如表 3 所示。应用解析模型可以计算出表 3 中各材料参数组合下的工艺参数, 将所有组合构成 BP 神经网络的样本集。为了反映材料参数的波动影响, 在弯曲过程中前期力和行程的关系应用式(33)描述

$$F = a + b \exp(ch) \quad (33)$$

式中 F ——弯曲力;

h ——弯曲行程;

a, b, c ——拼焊板母板拟合后的材料系数。

表 3 因素及水平表

水平	因素			
	屈服强度 σ_s/MPa	弹性模量 E/GPa	强度系数 K/MPa	硬化指数 n
1	418.56	210.38	887.03	0.817
2	392.69	195.06	836.42	0.781
3	366.82	179.74	785.81	0.745

回弹控制系统所采用的 BP 神经网络网络含有一个输出节点: 最佳控制行程 h 。神经网络的 6 个输入参数分别为拼焊板母板拟合后的材料系数, 拼焊板厚侧母板厚度(δ_1), 拼焊板薄侧母板厚度(δ_2), 拼焊板自由弯曲目标成形后弯曲角(α_T)。

网络模型的隐含层数的选择和隐含节点的选择是一个较为复杂的过程, 增加隐含层数虽然可以降低误差, 提高精度, 但是也使网络复杂化, 同时增加了网络权值和阈值的训练时间。根据样本数据在 Matlab 程序中进行网络的训练和仿真, 确定网络层数为 3 层, 隐层节点数为 10 个节点。确定的网络结构如图 7 所示。本程序采用 LM 算法应用表中材料参数组合下的工艺参数集对 BP 网络进行训练,

图 7 神经网络最佳行程预测模型

LM 算法的权值调整率如式(34)所示^[16], 各参数的含义见文献[16]。

$$\Delta w = (J^T J + uI)^{-1} J^T e \quad (34)$$

2.3 在线回弹控制系统硬件组成与控制流程

本研究开发了拼焊板 V 形自由弯曲的回弹控制试验系统, 试验控制系统采用计算机控制自制液压机进行拼焊板 V 形自由弯曲试验, 本文基于 LabVIEW 的 G 语言开发了回弹控制软件, 回弹控制系统计算机硬件组成结构如图 8 所示, 软件系统的控制流程如图 9 所示。在试验系统中, 在压机活动横梁上安装磁致位移传感器, 在凹模模座下安装力传感器, 应用研华公司生产的 1713 数据采集卡进

图 8 回弹控制系统硬件及接口组成

行数据采集。控制软件通过 COM 接口向 STC89C52 单片机控制器发送指令, 利用单片机的通信端口的中断处理程序将传送指令按预定协议进行解码, 并与之前发送的神经网络预测最佳行程进行比较, 当从指令中解码的行程达到预测行程时, 通过单片机控制继电器动作, 使电磁换向阀的电磁铁得电, 液压缸反向运动。延迟一定时间后触发 USB 接口的图

图 9 神经网络最佳行程预测模型

像传感器采集图像, 进行回弹后弯曲角度的测量, 一次成形结束。

可在线学习的拼焊板 V 形自由弯曲回弹控制软件系统, 在成形初期, 应用缓冲存储器存储采集的数据点, 当达到预设行程 h_0 后, 进行拼焊板母板材料参数的拟合, 应用图 7 中的神经网络最佳行程预测模型预测成形行程, 根据成形行程控制系统控制液压机的反向运动。反向运动后, 将图像传感器所测量的回弹后弯曲角 α 与目标回弹后弯曲角 α_T 进行比较, 当误差小于预设误差 δ 时, 可以进行下一次成形。当误差超出预设误差时, 进行补充弯曲成形, 将两次获得的在线工艺参数补入样本集中, 完成样本集重构, 进行下一次成形。

3 结果与讨论

本文所建解析预测模型在文献[12]基础上考虑了成形过程中的贴模和拼焊板母板材料模量随塑性变形变化的影响。由上述的解析分析可以得出, 凸模圆角半径、凹模圆角半径和凹模跨度都会对成形过程中力行程曲线和回弹后弯曲角产生影响, 而本文旨在开发可以容纳拼焊板母板材料波动性的回弹控制系统, 为了验证系统的控制精度, 采用一套模具对拼焊板 V 形自由弯曲回弹控制进行试验研究, 模具的几何尺寸如表 4 所示。选用一种料厚比为 0.586/0.9 的拼焊板进行试验, 其中板宽为 50 mm, 板长为 150 mm。利用型号为 HC-W300 自动激光焊接机焊接两母板, 此焊接机最大激光输出功率为 300 W, 激光波长为 1 064 nm。采用的焊接电流为 120 A, 焊接速度为 150 mm/min, 焊缝位于板宽中心。

表 4 模具的几何尺寸

凹模圆角半径 R_d/mm	凸模圆角半径 R_p/mm	凹模跨度 L/mm	模具宽度 b/mm
1	20	80	50

本文通过自制液压机对两种目标回弹后弯曲角进行试验研究, 其中系统所设置误差为 $\pm 2^\circ$, 目标回弹后弯曲角分别为 140° 和 100° 。试验现场如图 10 所示。

通过试验跟踪实际成形回弹后弯曲角随成形次数增加的变化曲线, 目标回弹后弯曲角为 140° 和 100° 时, 随成形次数的增加, 实际回弹后弯曲角变化曲线如图 11 所示。从图 11 中的前几次成形可以看出, 文中所建拼焊板 V 形自由弯曲解析模型构建的样本数据和材料参数波动性带来了实际成形中零

图 10 拼焊板弯曲回弹控制系统现场

图 11 回弹后弯曲角随成形次数变化曲线

件几何形状误差的随机性, 并且拼焊板中存在激光焊接工艺留下的热影响区和残余应力, 这些影响因素未被量化耦合加入解析模型中, 也带来了拼焊板 V 形自由弯曲回弹控制系统成形零件误差的随机性, 而随着成形次数的增加, 回弹后弯曲角逐渐收敛于定值。对于目标回弹后弯曲角为 100° 的情况, 同样得出上述规律, 而在成形初期, 角度波动收敛速度高于目标回弹后弯曲角为 140° 的情况, 两种目标回弹后弯曲角随成形次数的增加总体呈现降低趋势, 在成形第 5 周期时, 实际加工最大误差点分别为 1.42% 和 2.01%。经在线反馈训练控制系统控制后, 提高了拼焊板 V 形自由弯曲回弹后弯曲角的控制精度。

4 结论

(1) 本文建立了拼焊板 V 形可适于小曲率自由弯曲回弹的解析预测模型, 所建立的回弹预测模型将成形过程分段研究, 即区分为贴模阶段和未贴模阶段。分别根据贴模态和未贴模态拼焊板弯矩分布特点, 构建了两状态下的曲率分布方程。

(2) 在自由弯曲卸载分析阶段, 考虑了两母板间相互作用弯矩, 同时还考虑了弹性模量随塑性变形变化的影响, 基于单一母板求解了拼焊板母板回弹后的弯曲角。

(3) 基于机器视觉的 2D 单应矩阵变换法实现了拼焊板回弹后弯曲角的在线测量。图像法测量拼焊板回弹后端面弯曲角最大误差为 0.01%, 可满足工程与试验需要, 同时也使传感器不受空间位置限制。

(4) 针对板料中材料参数的波动性问题, 基于正交表构建了最佳行程预测的神经网络模型的训练样本。根据软硬件接口基于 LabVIEW 软件平台开发了可在线学习的拼焊板 V 形自由弯曲回弹控制系统软件。设定目标回弹后弯曲角分别为 140° 和 100°, 跟踪了在线成形试验结果, 成形第 5 周期, 最大点误差可分别达到 1.42% 和 2.01%。

参 考 文 献

- [1] CRANDALL S H, DAHL N C. Introduction to the mechanics of solids[M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [2] 官英平, 赵军, 苏春建. 宽板 V 形自由弯曲智能化控制过程材料参数识别及最优工艺参数预测术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 199-202.
GUAN Yingping, ZHAO Jun, SU Chunjian. Material parameter identification and optimal technological parameter prediction for intelligent control of V shape free bending process of wide sheet metal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 199-202.
- [3] 姜银方, 丁新立, 袁国定, 等. 差厚激光拼焊板的拉伸切边回弹特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 203-207.
JIANG Yinfang, DING Xinli, YUAN Guoding, et al. Investigation of draw-trimming springback of laser tailor-welded blanks[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 203-207.
- [4] 童正国, 林建平, 田浩彬, 等. 直线焊缝差厚拼焊板的成形规律[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 215-219.
TONG Zhengguo, LIN Jianping, TIAN Haobin, et al. Formability principles of linear-weld-line tailor-weld blank (TWBs) with different thickness ratios[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 215-219.
- [5] 王梦寒, 周杰, 何春妃, 等. 差厚拼焊板盒形件成形影响因素及焊缝移动规律[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 234-238.
WANG Menghan, ZHOU Jie, HE Chunfei, et al. Weld-line movement and factors affecting formability for different thickness tailor-welded blanks of square cup[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 234-238.
- [6] GOSSARD D C, ALLISON B T. Adaptive brake forming[C]//Proceeding of 8th North American Research Conference, 1980: 252-256.
- [7] STELSON K A. An Adaptive pressbrake control for strain-hardening materials[J]. Journal of Engineering for Industry, 1986(108): 127-132.
- [8] YANG M, MANABE K I, NISHIMURA H. Development of real-time process control system for precision and flexible V-bending with an on-line database[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60(1): 249-254.
- [9] KWOK S K, LEE W B. The development of a machine vision system for adaptive bending of sheet metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 48(1): 43-49.
- [10] FORCELLESE A, GABRIELLI F, RUFFINI R. Effect of the training set size on springback control by neural network in an air bending process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80: 493-500.
- [11] 姜银方, 袁国定, 杨继昌. 拼焊板弯曲回弹的理论与试验研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 200-204.
JIANG Yinfang, YUAN Guoding, YANG Jichang. Springback in the bending of tailor welded blanks in theory and experiment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 200-204.
- [12] 段永川, 官英平, 赵军. 拼焊板宽板 V 形自由弯曲回弹预测及试验验证[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 63-69.
DUAN Yongchuan, GUAN Yingping, ZHAO Jun. Prediction and experiment verification of spring-back of tailor welded blanks air bending process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 63-69.
- [13] CHANG S H, SHIN J M, HEO Y M, et al. Springback characteristics of the tailor-welded strips in U-bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 131: 14-19.
- [14] YOSHIDA F, UEMORI T, FUJIWARA K. Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain[J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18(5): 633-659.
- [15] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] MORE J J. The Levenberg Marquardt algorithm implementation and theory[J]. Numerical Analysis, 1978, 630: 105-116.

作者简介: 段永川, 男, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为拼焊板冲压成形。

E-mail: yongchuan.duan@ysu.edu.cn

官英平(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为拼焊板冲压成形。

E-mail: gyp@ysu.edu.cn