

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.055

连续平压机入口角度动态控制方法*

张国梁^{1,2} 瞿国富³ 侯晓鹏¹ 刘鑫钰³ 朱军³ 周玉成¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 河北农业大学林学院, 保定 071000;

3. 中国福马机械集团有限公司, 北京 100029)

摘要: 基于钢材弯曲变形的特点, 提出一种矩形截面的入口上热压板弯曲变形来调节入口角度的方法。在分析上热压板弯曲变形原理并推导曲率半径与拉弧高度几何关系的基础上, 仿真计算上热压板弯曲强度, 构建基于现场总线的分布式系统和人机交互控制系统, 设计油缸位移梯度渐进算法并在国产连续平压机上实现控制。研究结果表明: 入口上热压板弯曲变形满足弯曲强度要求, 入口角度调节方法及控制算法能够实现油缸位移梯度变化的渐进性和入口角度调节的动态性; 当入口曲率半径 R 为 100 000 mm 时, 入口上热压板拉弧高度理论值与实际值最大偏差为 0.4 mm, 横向实际值最大偏差为 0.6 mm, 达到控制精度要求。

关键词: 连续平压机 入口角度 弯曲变形 拉弧高度 动态控制

中图分类号: TS64; TB114.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0372-07

Dynamic Control Method of Infeed Angle for Continuous Flat Press

Zhang Guoliang^{1,2} Qu Guofu³ Hou Xiaopeng¹ Liu Xinyu³ Zhu Jun³ Zhou Yucheng¹(1. *Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*2. *College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China*3. *China Foma(Group) Co., Ltd., Beijing 100029, China*)

Abstract: Adjustability of infeed angle is of great importance to design and use of the whole continuous flat press which is used to produce wood-based panels. Based on the capability of bending deformation of the steel, a method using bending deformation of integral infeed upper hot platen shaped as rectangular in cross section to adjust infeed angle was put forward. On the basis of analyzing curving principle of bending deformation and deducing geometrical relationship between radius of curvature and height of curving, bending strength of infeed upper hot platen was calculated by simulation and a distributed system as well as human-computer interaction control system based on fieldbus was established. Displacement gradient progressive-approximation algorithm used for hydraulic cylinders was set up and the system was applied to continuous flat press designed in China. The results showed that bending deformation of upper hot platen met requirements of bending strength, the method of adjusting infeed angle and the control algorithm could be used to achieve progressivity of displacement changing for hydraulic cylinders and dynamic adjusting of infeed angle, and the control precision could be reached by field debugging. The maximum error was 0.4 mm between theoretical and practical value, and maximum horizontal difference was 0.6 mm when radius of curvature was 100 000 mm.

Key words: Continuous flat press Infeed angle Bending deformation Curving height Dynamic control

收稿日期: 2014-06-08 修回日期: 2014-06-30

* 科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2013EG135240)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFINT2009K07)和河北省自然科学基金资助项目(E2015204039)

作者简介: 张国梁, 博士生, 河北农业大学讲师, 主要从事木材和人造板加工机械性能设计与控制研究, E-mail: guoliang2871@163.com

通讯作者: 周玉成, 研究员, 博士生导师, 主要从事复杂过程分析与控制研究, E-mail: zhouyc@caf.ac.cn

引言

随着我国人造板产业的快速发展,连续平压机以其生产效率高、产品质量优得到了越来越广泛的应用^[1-2]。连续平压机的进给装置是整机作业的关键结构,为保证板坯能够顺利进入平压机,进给装置的入口应成类似“喇叭口”的形状,入口上、下热压板之间的夹角称为入口角度。为保证不同铺装厚度的板坯能够顺利进入平压机,进给装置的入口角必须能按板坯厚度进行合理调节^[3-4]。针对这一要求,不同的连续平压机制造商设计的入口角度调节机构及控制方法也不尽相同。上海人造板机器厂有限公司依靠固定于上热压板上不同规格的燕尾定位板和下热压板上的矩形定位板调节入口角度^[5],此种结构调节入口角度时需更换定位板,比较费时费力。敦化市亚联机械制造有限公司采用非线性梯度入口舌头板,采用阶梯式结构形式并加长入口舌头板的长度^[6],虽然此结构能够较为方便的调节入口角度,但由于入口舌头板采用3种阶梯式组合形式,结构复杂。中国福马机械集团有限公司在首台中密度纤维板连续平压机的入口设计中使用本身带弧形的上热压板,此结构对入口角度的调节范围有限^[7]。为简化进给装置结构并提高工作性能,本文提出一种矩形截面的整块入口上热压板弯曲变形来调节入口角的结构方法,在不超过材料弯曲强度极限的前提下,通过改变入口上热压板曲率半径达到入口角度的无级柔性调节。通过研究弯曲变形原理和相关计算,设计控制系统和算法,达到对连续平压机入口角度变化的动态控制,并将其应用到国产连续平压机的设计和现场调试。

1 平压机入口上热压板弯曲变形原理和相关计算

1.1 弯曲变形原理

平压机入口结构如图1所示。上热压板与热压板的联接在第3排油缸与第4排油缸之间;上热压板与上进给头、第1排油缸、第2排油缸和第3排油缸相联接,且此3排油缸的上端与机架联接;上进给头由支撑油缸和进给丝杠支撑;下热压板通过下进给头与机架联接。从进料方向看,上进给头左右对称布置着支撑油缸和进给丝杠。

由于下热压板固定不动,因此调节入口角的关键是入口上热压板的弯曲变形。根据工艺要求,上热压板在变形过程中以第3排油缸为支点,变形主要动力来自于支撑油缸或进给丝杠。定义进料方向为纵向,垂直于进料方向为横向,上热压板纵向上另

两施力点为第1和第2排油缸。上热压板弯曲变形原理模型如图2所示。

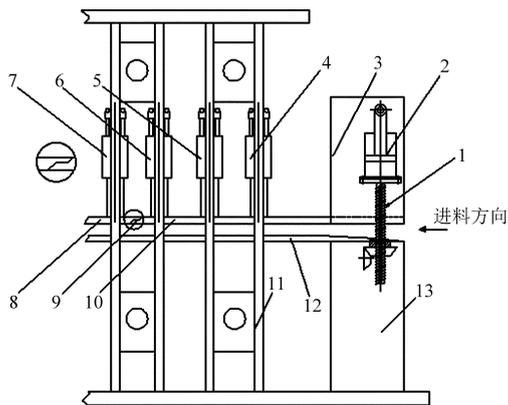


图1 连续平压机入口结构

Fig. 1 Model of infeed unit used in continuous flat press
1. 进给丝杠 2. 支撑油缸 3. 上进给头 4. 第1排油缸 5. 第2排油缸 6. 第3排油缸 7. 第4排油缸 8. 热压板 9. 热压板联接位置 10. 上热压板 11. 机架 12. 下热压板 13. 下进给头

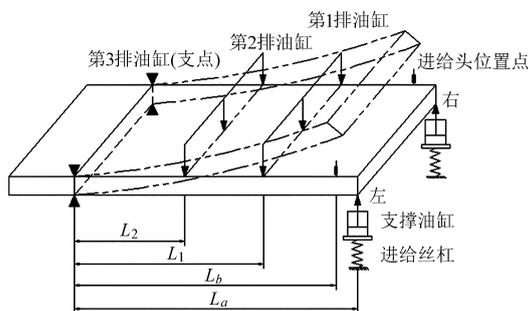


图2 上热压板变形原理模型

Fig. 2 Model of curving principle of upper hot platen

图2中,4个位置点距变形支点的距离分别为 L_a 、 L_b 、 L_1 和 L_2 ,第1排和第2排油缸数量为3,进给头位置点位于支撑油缸和第1排油缸之间。为控制上热压板纵向第1排和第2排油缸位置点的变形高度,此两排油缸需施加大小和方向即时变化的力,从而使该两点在上热压板变形过程中向变形高度点靠近并最终维持在要求的高度,如图2中双点划线所示。理论上,上热压板弯曲变形结束,支撑油缸或进给丝杠施加的力使其成圆弧状,第1、2排油缸位置点的变形高度固定,不需在此两位置点施加力。但考虑实际的液压系统,第1、2排油缸不可能“随动”,只要所有油缸的活塞杆伸缩速度一致,此两排油缸不会对入口角变化产生负作用。考虑到上热压板质量较大,第1、2排油缸施力对上热压板的弯曲变形和变形高度的保持是有利的。

横向上,根据工艺要求,上热压板左、右变形高度差不大于1 mm,以满足横向上变形高度的控制精度。

平压机入口角用上热压板弯曲变形的曲率半径

或变形高度度量,控制变形高度即可控制入口角。在人造板行业,入口上热压板的弯曲变形通称为拉弧形,并以拉弧高度表示变形高度。

1.2 曲率半径与拉弧高度关系

不同的入口角对应上热压板不同的曲率半径或拉弧高度。由于入口角难以测量,实际上以控制进给丝杠和油缸的行程来实现曲率半径的调节。上热压板曲率半径与拉弧高度间的关系如图3所示。

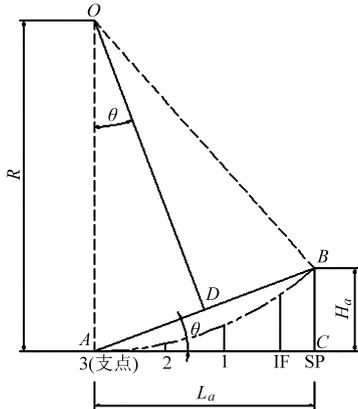


图3 曲率半径与拉弧高度关系

Fig. 3 Relationship between radius of curvature and height of curving

图3中,第3排油缸定义为支点3,SP、IF、1和2分别表示支撑油缸、进给头位置点、第1和第2排油缸。设拉弧形后上热压板的曲率半径为 R ,支撑油

表1 不同曲率半径下位置点的拉弧高度

Tab. 1 Curving heights of corresponding points with different radiuses of curvature

曲率半径 R	支撑油缸/进给丝杠		进给头		第1排油缸		第2排油缸	
	L_a	H_a	L_b	H_b	L_1	H_1	L_2	H_2
80 000	2 480	38.45	2 200	30.26	1 410	12.43	705	3.11
100 000	2 480	30.75	2 200	24.20	1 410	9.94	705	2.49
120 000	2 480	25.63	2 200	20.17	1 410	8.28	705	2.07

角度(θ)的无级柔性调节。

1.3 上热压板弯曲强度分析

上热压板拉弧形时应满足其弯曲强度要求。根据生产工艺^[8-9],为保证平压机生产2.5~40 mm厚度板材,入口曲率半径变化范围为 $40\ 000\text{ mm} \leq R \leq 150\ 000\text{ mm}$ 。当 $R = 40\ 000\text{ mm}$ 时,根据式(5)计算出支撑油缸位置点拉弧高度 $H_a = 76.95\text{ mm}$ 。基于实际几何尺寸,建立上热压板实体模型。上热压板以第3排油缸作为支点产生弯曲,简化为左端面为固定端约束梁的弯曲变形^[10],最大弯曲挠度为

$$Y = \frac{FL^3}{3EI} \quad (7)$$

式中 Y ——支撑油缸位置点最大挠度,mm

F ——支撑油缸推力,N

L ——支撑油缸位置点到支点距离,mm

缸相对于支点3的拉弧高度为 H_a ,支撑油缸与支点3在纵向上相距 L_a ,弦切角为 θ (入口角另一种度量方式)。根据弦切角定理, $\angle DOA$ 的角度等于 θ 。

在 $\triangle ABC$ 中

$$\sin\theta = \frac{H_a}{\sqrt{H_a^2 + L_a^2}} \quad (1)$$

在 $\triangle DOA$ 中

$$\sin\theta = \frac{\sqrt{H_a^2 + L_a^2}}{2R} \quad (2)$$

联立式(1)和式(2),得

$$H_a^2 - 2RH_a + L_a^2 = 0 \quad (3)$$

$$\text{解得} \quad H_a = R \pm \sqrt{R^2 - L_a^2} \quad (4)$$

根据生产工艺,对于厚度很小的薄板,上热压板可能向下弯曲变形(称下压弧)。结合实际工艺要求和程序编制方法,制定如下规则:

(1) 如果上拉弧,则 $R > 0$,且

$$H_a = R - \sqrt{R^2 - L_a^2} \quad (5)$$

(2) 如果下压弧,则 $R < 0$,且

$$H_a = R + \sqrt{R^2 - L_a^2} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6),可得支撑油缸位置点的拉弧高度,同理可得进给头、第1、2排油缸位置点的拉弧高度,见表1。入口曲率半径 R 可根据需要任意调节,即拉弧高度连续变化,从而达到对平压机入口

E ——上热压板弹性模量, N/m^2

I ——上热压板横截面惯性矩, mm^4

上热压板材料为Q235碳钢板,长2 400 mm,宽2 450 mm,厚60 mm,材料特性及弯曲参数见表2。

表2 上热压板材料特性和弯曲参数

Tab. 2 Material properties and bending parameters of upper hot platen

参数	数值
$E/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	2.05×10^{11}
I/mm^4	4.41×10^7
L/mm	2 480
屈服极限/MPa	282.68

根据式(7)和表2,得 $F \approx 1.37 \times 10^5\text{ N}$ 。

上热压板在压机入口的最前端与上进给头连接,上进给头面积 $S = 5.39 \times 10^5\text{ mm}^2$,均布载荷 $p \approx$

2.54 × 10⁵ Pa。上热压板静态应力分析结果见图4。

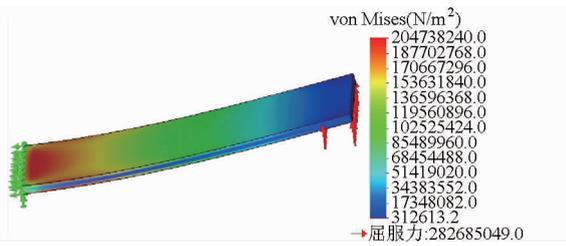


图4 上热压板静态应力分析

Fig.4 Static stress analysis of upper hot platen

由图4可得,上热压板最大等效应力为204.7 MPa,发生在支点位置,小于屈服极限。因此上热压板在最大拉弧变形过程中满足弯曲强度要求。

2 控制系统组成和功能的实现

2.1 控制系统组成

以西门子PLC为控制器,变频调速电动机控制进给丝杠;采用ET200M构建支撑油缸及前3排油缸油路阀的分布控制系统;主从PLC间通过DP-DP Coupler通讯;PLC与工控机间采用工业以太网。拉弧高度控制系统总体结构如图5所示。

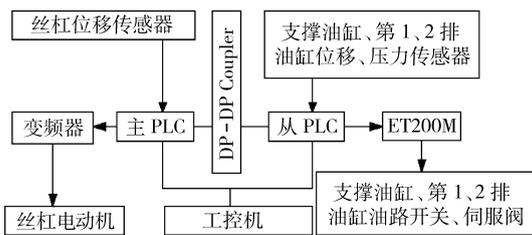


图5 拉弧高度控制系统总体结构

Fig.5 Overall structure of control system for curving height

2.2 人机交互界面

人机交互界面如图6和图7所示。

图6中,曲率半径R根据实际生产工艺设定,

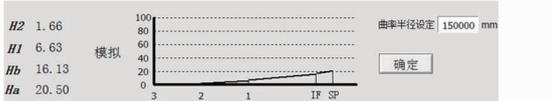


图6 曲率半径设定和拉弧曲线模拟界面

Fig.6 Interface of radius setting of curvature and curving line simulation

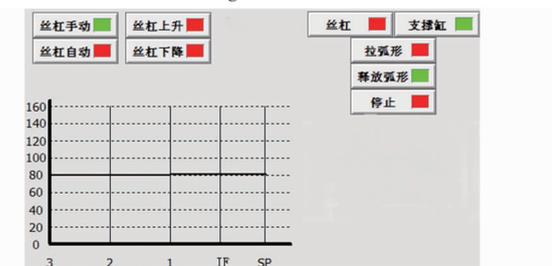


图7 拉弧命令操作界面

Fig.7 Interface of curving commands

点击“确定”按钮在模拟曲线图中显示上热压板在不同曲率半径R下的弧形曲线。

进给丝杠的动作可自动也可手动,如图7所示。手动状态下,点击“丝杠上升”按钮则丝杠电动机正转提升上进给头;点击“丝杠下降”按钮则丝杠电动机反转降低上进给头。正常情况下,使用进给丝杠对上热压板拉弧形时,应选择“丝杠自动”。拉弧形方式的选择依靠“丝杠”和“支撑缸”两个保持按钮;拉弧形命令包括“拉弧形”、“释放弧形”和“停止”。曲线图用于监测拉弧形时不同位置点的实际位移变化。

2.3 位移梯度渐进算法设计

基于以上分析,控制4个位置点的实际位移即可调节平压机入口角度。拉弧形时,4个位置点的位移设定值应等于由式(5)或式(6)所得拉弧高度与左支点油缸位移实际值之和;释放弧形时,位移设定值为左支点油缸的位移实际值。如果将位移设定值直接作为支撑油缸、第1、2排油缸位移的跟踪目标,则运动行程较大,一方面由于拉弧形或释放弧形历时过短,导致上热压板应力变化过快,对机械结构和材料使用寿命不利;另一方面由于液压系统中伺服阀的响应速度和精度不同^[11-13],无法保证拉弧形和释放弧形过程中位移的控制精度。

设计位移梯度渐进算法,在每一循环周期计算出油缸位移新的跟踪目标值,此目标值随循环迭代将逐次逼近位移设定值,从而使油缸实际位移渐进变化,保证拉弧形和释放弧形的平稳运行^[14-17]。定义变量 Dst_Set 为油缸位移设定值,mm; Dst_Act 为油缸位移实际值,mm; k 为位移梯度渐进速度,mm/ms; $cycle_time$ 为控制系统循环周期,ms; $S(n)$ 为第 $n+1$ 个循环周期油缸位移梯度,mm, $n \geq 0$; $S_inc(n)$ 为第 $n+1$ 个循环周期油缸位移梯度增加值,mm, $n \geq 0$; Dst_3 为左支点油缸位移实际值,mm。

位移梯度渐进算法实现的流程如图8所示,按4个过程描述算法流程。

过程1:上拉弧。条件:“拉弧形”命令使能且曲率半径 $R > 0$ 。在第1个循环周期内,锁存 Dst_Act 并赋值给 $S(0)$,即

$$S(0) = Dst_Act \quad (8)$$

经过 n 次循环迭代,第 $n+1$ 个循环周期内的位移梯度为

$$S(n) = S(n-1) + k \cdot cycle_time \quad (9)$$

在每一个循环周期内,检测 $S(n) \geq Dst_Set$ 是否成立,如果成立,则令

$$S(n) = Dst_Set \quad (10)$$

此时,上拉弧的迭代过程结束。

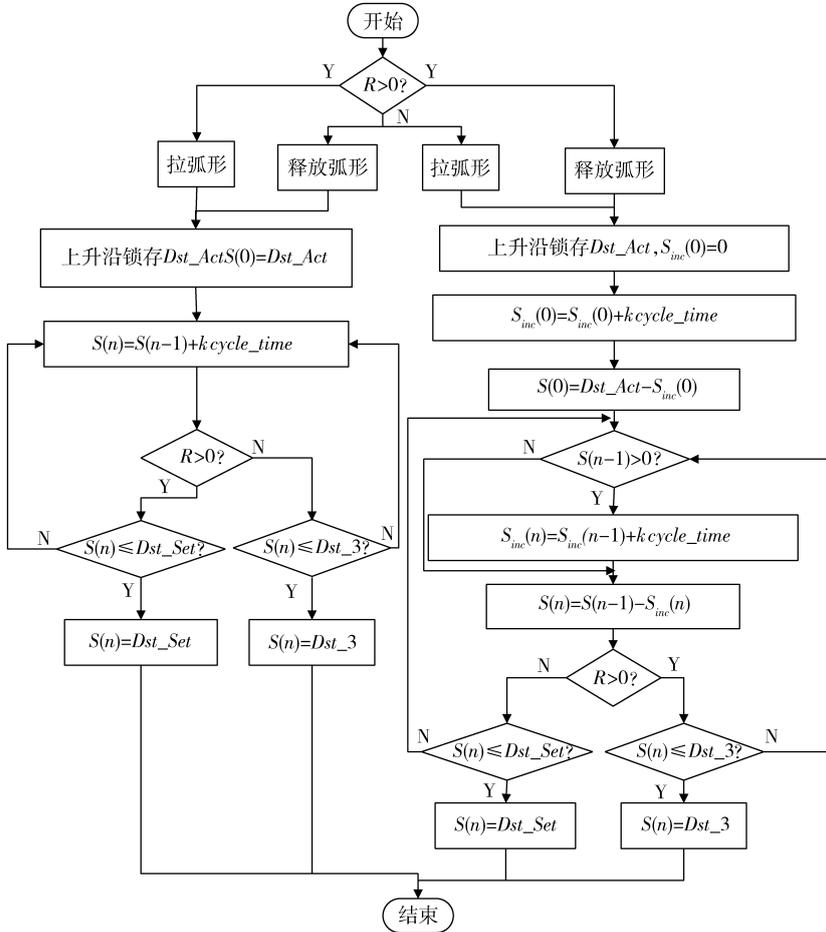


图8 位移梯度渐进算法流程

Fig. 8 Process of displacement gradient progressive-approximation algorithm

过程2:上拉弧释放。条件:“释放弧形”命令使能且 $R > 0$ 。在第1个循环周期内,锁存 Dst_Act ,同时首先令第1个循环周期油缸位移梯度增加值的初值 $S_{inc}^0(0) = 0$,然后计算

$$S_{inc}(0) = S_{inc}^0(0) + k cycle_time \quad (11)$$

则第1个循环周期内位移梯度为

$$S(0) = Dst_Act - S_{inc}(0) \quad (12)$$

经过 n 次循环迭代,在第 $n+1$ 个循环周期内,首先检测第 n 个循环周期内位移梯度 $S(n-1) > 0$ 是否成立,如果成立,则第 $n+1$ 个循环周期油缸位移梯度增加值为

$$S_{inc}(n) = S_{inc}(n-1) + k cycle_time \quad (13)$$

由此第 $n+1$ 个循环周期内位移梯度为

$$S(n) = S(n-1) - S_{inc}(n) \quad (14)$$

在每一个循环周期内检测 $S(n) \leq Dst_3$ 是否成立,若成立,则

$$S(n) = Dst_3 \quad (15)$$

此时,上拉弧释放的迭代过程结束。

过程3:下压弧。条件:“拉弧形”命令使能且曲率半径 $R < 0$ 。算法描述与上拉弧释放过程类似,区别是在每一个循环周期内检测 $S(n) \leq Dst_Set$ 是否成立,若成立,则

$$S(n) = Dst_Set \quad (16)$$

此时,下压弧的迭代过程结束。

过程4:下压弧释放。条件:“释放弧形”命令使能且 $R < 0$ 。算法描述与上拉弧过程类似,区别是在每一个循环周期内,检测 $S(n) \geq Dst_3$ 是否成立,如果成立,则令

$$S(n) = Dst_3 \quad (17)$$

此时,下压弧释放的迭代过程结束。

按上述4个过程计算出每一循环周期的位移梯度 $S(n)$,将 $S(n)$ 传递给对应支撑油缸和第1、2排油缸的位移分步跟踪值,驱动对应的伺服阀调整开度。由于 k 值不变,所有油缸的活塞杆伸缩速度一致,因此第1、2排油缸不会对入口角度变化产生负作用。

2.4 总体程序

拉弧形结束或释放弧形结束,上热压板处于拉弧形或释放弧形的保持状态,而不是停止状态^[18-20]。作为保护环节,能够随时停止上热压板弯曲变形动作是必要的。设计弧形停止子程序使丝杠电动机停止运动并将支撑油缸和第1、2排油缸进出油口封闭,这里不再陈述其过程。总体程序流程如图9所示。

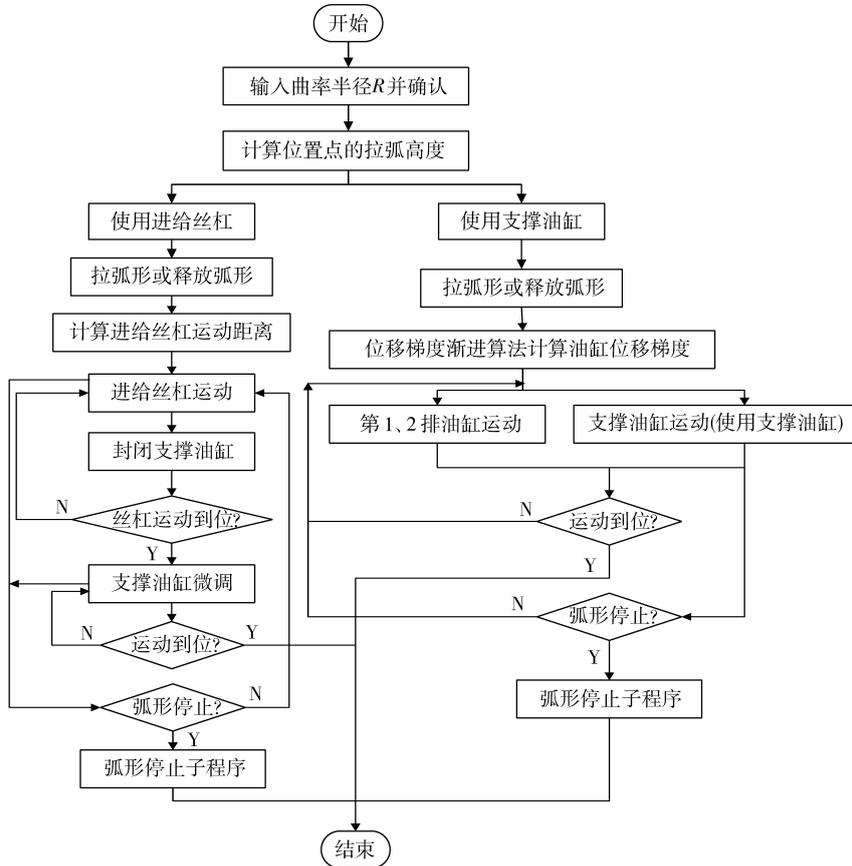


图 9 拉弧高度控制总体程序流程

Fig. 9 Overall program process of curving height

3 现场调试

为检验入口角度调节方法和拉弧高度控制系统的有效性,于中国福马机械集团有限公司设计的连续平压机上进行应用。以支撑油缸为例,监测的位移梯度变化如图 10 所示,上热压板拉弧形运行效果如图 11 所示。

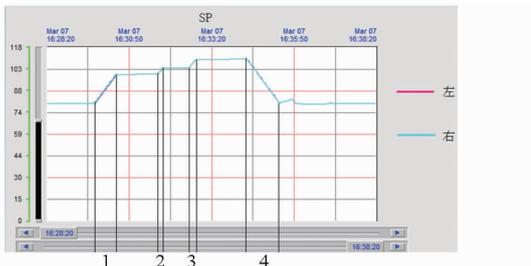


图 10 支撑油缸位移梯度变化曲线

Fig. 10 Curve of displacement changing for supporting cylinders

图 10 表明,在多次拉弧形和释放弧形过程中,左右支撑油缸位移梯度变化曲线基本重合,实现了左右支撑油缸同步拉弧。1、2 和 3 表示对应 3 个曲率半径 R 的支撑油缸位移梯度的渐进变化;4 表示释放弧形过程中支撑油缸位移梯度的渐进变化。由于位移梯度渐进速度 k 不变 ($k = 0.5 \text{ mm/s}$),因此 4

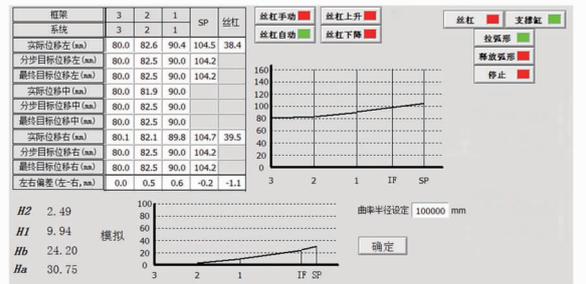


图 11 曲率半径为 100 000 mm 时支撑油缸拉弧效果

Fig. 11 Result of curving using supporting cylinders when radius of curvature was 100 000 mm

段倾斜曲线的斜率绝对值相等。由此表明,可即时调整曲率半径使油缸位移渐变到最终设定值并保持稳定,从而达到对平压机入口角度的实时动态调节。

图 11 中,左支点油缸实际位移为 80 mm,处于中间位置的位移曲线表明上热压板已经向上弯曲。需说明,由于使用支撑油缸对上热压板拉弧形,因此进给丝杠不动作,理论上的 H_a 值没有意义。支撑油缸和第 1、2 排油缸位置点的拉弧高度横向偏差最大为 0.6 mm,满足横向精度要求。拉弧高度理论值与实际值比较见表 3。表 3 中实际数值分别取支撑油缸左、右,第 1 排和第 2 排左、中、右油缸位移平均值。当入口曲率半径 $R = 100\ 000 \text{ mm}$ 时,理论值与

实际值最大偏差为 0.4 mm。

表 3 不同位置点拉弧高度控制结果

Tab.3 Controlling result of curving height for corresponding points

	mm		mm	
	支撑油缸/ 进给丝杠	进给头	第 1 排 油缸	第 2 排 油缸
理论值	30.75	24.20	9.94	2.49
实际值	—	24.60	9.86	2.20
差值	—	0.40	0.08	0.29

4 结论

(1)提出了以截面为矩形的入口上热压板弯曲变形来调节连续平压机入口角度的方法;曲率半径

和拉弧高度的改变能够正确描述平压机入口角度的变化,通过控制拉弧高度可调节入口角度;入口上热压板弯曲变形满足弯曲强度要求。

(2)设计了上热压板拉弧高度即平压机入口角度控制系统和人机交互界面;设计了油缸位移梯度渐进算法和总体程序,并详细阐述了拉弧形和释放弧形过程的算法流程,从而实现了油缸实际位移的渐进变化。

(3)将该控制方法应用到中国福马机械集团有限公司设计的连续平压机中,调试结果表明该方法实现了拉弧高度即入口角度的动态控制;当入口曲率半径 $R = 100\ 000$ mm 时,入口上热压板拉弧高度理论值与实际值最大偏差为 0.4 mm,横向实际值最大偏差为 0.6 mm,达到控制精度要求。

参 考 文 献

- 张荣其,罗丽萍.我国现有人造板连续压机的调查与分析[J].中国人造板,2010(9):7-10.
Zhang Rongqi, Luo Liping. Survey and analysis on the current continuous press for wood-based panels production in China[J]. China Wood-based Panels, 2010(9):7-10. (in Chinese)
- 俞敏.连续压机的中国创新[J].中国人造板,2012(12):7-14.
Yu Min. The innovation of continuous press in China[J]. China Wood-based Panels, 2012(12):7-14. (in Chinese)
- 张荣其.双钢带连续压机的基本组成、要求和工作原理[J].中国人造板,2011(10):19-22.
Zhang Rongqi. Basic composition, requirement and principle of double steel-belt continuous press [J]. China Wood-based Panels, 2011(10):19-22. (in Chinese)
- 罗丽萍.双钢带连续压机的板坯进给技术[J].中国人造板,2011(6):21-26.
Luo Liping. Mat-feeding technology realized by feeding from double steel-belt continuous press [J]. China Wood-based Panels, 2011(6):21-26. (in Chinese)
- 上海人造板机器厂有限公司.平压式连续压机中热压板的定位方法及定位板结构:中国,200510030044.X[P].2006-05-10.
- 敦化市亚联机械制造有限公司.双钢带压机:中国,200920093743.2[P].2010-02-17.
- 中国福马机械集团有限公司.压制人造板的方法和用于实施该方法的连续平压热压机:中国,201010117774.4[P].2010-03-02.
- 华毓坤.人造板工艺学[M].北京:中国林业出版社,2002:242-252.
- 王恺,王天佑.木材工业实用大全:纤维板卷[M].北京:中国林业出版社,2002:352-380.
- 刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2003:176-196.
- Ali Sadeghieh, Hadi Sazgarb, Kamyar Goodarzi, et al. Identification and real-time position control of a servo-hydraulic rotary actuator by means of a neurobiologically motivated algorithm[J]. ISA Transactions, 2012, 51(1):208-219.
- Li S, Song Y. Dynamic response of a hydraulic servo-valve torque motor with magnetic fluids [J]. Mechatronics, 2007, 17(8):442-447.
- 朱玉川,李跃松.射流伺服阀用放大大型超磁致伸缩电-机转换器建模及分析[M].航空学报,2014,35(6):1-8.
Zhu Yuchuan, Li Yuesong. Modeling and analysis for amplified giant magnetostrictive actuator applied in jet-pipe electro-hydraulic servo valve [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6):1-8. (in Chinese)
- 刘俭,许忠华,郭颖.液压缸同步控制的应用研究[J].控制理论与应用,2002,21(4):13-14.
Liu Jian, Xu Zhonghua, Guo Ying. Synchronous control of hydraulic cylinder [J]. Control Theory and Applications, 2002, 21(4):13-14. (in Chinese)
- 黄镇海,刘芳璇,王桂荣,等.多泵控制液压系统的同步设计[J].液压与气动,2012(10):80-82.
Huang Zhenhai, Liu Fangxuan, Wang Guirong, et al. Synchronization design of multi-pump controlled hydraulic cylinder system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012(10):80-82. (in Chinese)
- 杨树军,夏怀成,韩宗奇,等.基于同步信号的液压机械无级传动控制器硬件在环仿真[J].农业工程学报,2012,28(4):33-38.
Yang Shujun, Xia Huaicheng, Han Zongqi, et al. Controller hardware-in-loop simulation of hydraulic mechanical transmission based on sync signal [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4):33-38. (in Chinese)

87-92.

- 11 Rao A R M. MPI-based parallel finite element approaches for implicit nonlinear dynamic analysis employing sparse PCG solvers [J]. *Advances in Engineering Software*, 2005, 36(3):181-198.
- 12 Chen P, Zheng D, Sun S, et al. High performance sparse static solver in finite element analyses with loop-unrolling [J]. *Advances in Engineering Software*, 2003, 34(4):203-215.
- 13 Skogestad J O, Keilegavlen E, Nordbotten J M. Domain decomposition strategies for nonlinear flow problems in porous media [J]. *Journal of Computational Physics*, 2013, 234:439-451.
- 14 Kurc O. Workload distribution framework for the parallel solution of large structural models on heterogeneous PC clusters [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2010, 24(2):151-160.
- 15 Kraus J. Additive Schur complement approximation and application to multilevel preconditioning [J]. *Siam Journal on Scientific Computing*, 2012, 34(6):A2872-A2895.
- 16 Kocak S, Akay H. Parallel Schur complement method for large-scale systems on distributed memory computers [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2001, 25(10):873-886.
- 17 Carter W T, Law K H. A parallel finite element methods and its prototype implementation on a hypercube [J]. *Computer & Structures*, 1989, 31(6):921-934.
- 18 Intel Math Kernel Library—Fastest and most used math library for Intel and compatible processors [EB/OL]. [2014-05-03]. <http://software.intel.com/en-us/intel-mkl/>.

(上接第 364 页)

- 7 Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm [C] // *Proceedings of the Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001:145-152.
- 8 Zhu L, Barhak J, Srivatsan V, et al. Efficient registration for precision inspection of free-form surfaces [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 32(5-6):505-515.
- 9 Maurer J R, Aboutanos C R, Dawant G B, et al. Registration of 3-D images using weighted geometrical features [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1996, 15(6):836-849.
- 10 Zinsler T, Schmidt H, Niermann J. A refined ICP algorithm for robust 3-D correspondences estimation [C] // *Proceedings of International Conference on Image Processing*, 2003:695-698.
- 11 Stewart C V, Tsai C L, Roysam B. The dual bootstrap iterative closest point algorithm with application to retinal image registration [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2003, 22(11):1379-1394.
- 12 Chetverikov D, Stepanov D, Krsek P. Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23:299-309.
- 13 程云勇, 张定华, 卜昆, 等. 涡轮叶片形状检测中的模型配准控制点集选取 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(11):240-246.
Cheng Yunyong, Zhang Dinghua, Bu Kun, et al. Model registration control point set selection for turbine blade shape inspection [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11):240-246. (in Chinese)
- 14 Bing Jian, Baba C Vemuri. Robust point set registration using Gaussian mixture models [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(8):1633-1646.
- 15 Tsin Y, Kanade T. A correlation-based approach to robust point set registration [C] // *8th European Conference on Computer Vision*, 2004, 1:558-569.
- 16 Per Bergstrom, Ove Eklund. Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares [J]. *Computational Optimization and Applications*, 2014, 58(3):543-561.

(上接第 378 页)

- 17 苗虎, 周玉成, 盛振湘, 等. 连续平压机热压板升降系统控制算法 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7):333-339.
Miao Hu, Zhou Yucheng, Sheng Zhenxiang, et al. Design and application of a control algorithm for hydraulic lifting system of the hot platen in continuous flat press [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7):333-339. (in Chinese)
- 18 张健, 肖兴明. 基于 LabVIEW 的螺旋给料机状态监测与变频调速反馈控制系统设计 [J]. *矿山机械*, 2013, 41(6):103-106.
Zhang Jian, Xiao Xingming. Design of condition monitoring and frequency conversion speed feedback control system for screw feeder based on LabVIEW [J]. *Mining & Processing Equipment*, 2013, 41(6):103-106. (in Chinese)
- 19 刘宝, 宗力, 张东兴. 锤片式粉碎机空载运行中锤片的受力及运动状态 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7):123-128.
Liu Bao, Zong Li, Zhang Dongxing. Force and motion states of hammer mill at unloaded running [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7):123-128. (in Chinese)
- 20 陈君梅, 赵喜祥, 陈嘉琪, 等. 水田激光平地机非线性水平控制系统 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7):79-84.
Chen Junmei, Zhao Zuoxi, Chen Jiaqi, et al. Design of nonlinear leveling control system for paddy land leveler [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7):79-84. (in Chinese)