

基于力补偿控制的三辊卷板机预弯剩余直边抑制方法研究

王修山¹, 李冰^{2*}, 吕飞¹, 冯志¹, 袁立鹏³, 王愉翔¹

¹江苏一重数控机床有限公司, 江苏 扬州

²扬州职业技术大学机械工程学院, 江苏 扬州

³哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年2月6日; 录用日期: 2026年2月28日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

针对对称式三辊卷板机在卷制中存在的剩余直边难题, 及其导致的材料浪费、结构强度不足、装配受阻等问题, 文章提出了一种基于力补偿控制的预弯抑制方法。首先, 分析剩余直边产生机理与回弹力学特性, 揭示力位参数与回弹量的非线性耦合关系。其次, 基于弹塑性弯曲理论、卸载弹性回复原理, 区分平面应力与平面应变状态并修正力学模型参数, 构建融合板材参数、设备参数与加工参数的回弹量预测模型, 进而设计“参数初始化-补偿量优化-闭环调控”的力位混合补偿策略, 通过动态调整预弯力与位移参数补偿回弹误差, 为闭环调控设计激光三角测距式实时曲率检测方案, 明确硬件布局与测量精度特性。最后, 通过仿真与物理样机实验验证表明, 该方法可将回弹量降低98.8%以上, 筒节直径偏差控制在极小范围, 显著优于传统方法。该方法无需更换专用设备, 适配中小型企业现有生产条件, 兼顾加工精度与成本控制, 为机械制造、船舶工程等领域中厚板高精度卷制提供可靠技术支撑, 具有重要的工程应用价值。

关键词

三辊卷板机, 剩余直边, 回弹量, 预弯, 力补偿控制

Research on the Method of Suppressing Residual Straight Edge in Pre-Bending of a Three-Roller Plate Bending Machine Based on Force Compensation Control

Xiushan Wang¹, Bing Li^{2*}, Fei Lyu¹, Zhi Feng¹, Lipeng Yuan³, Yuxiang Wang¹

*通讯作者。

文章引用: 王修山, 李冰, 吕飞, 冯志, 袁立鹏, 王愉翔. 基于力补偿控制的三辊卷板机预弯剩余直边抑制方法研究[J]. 力学研究, 2026, 15(1): 78-90. DOI: 10.12677/ijm.2026.151009

¹Jiangsu Yizhong CNC Machine Tool Co., Ltd., Yangzhou Jiangsu

²School of Mechanical Engineering, Yangzhou Polytechnic University, Yangzhou Jiangsu

³School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

Received: February 6, 2026; accepted: February 28, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

In response to the problem of residual straight edges existing in the rolling process of symmetrical three-roll plate bending machines, as well as the resulting problems such as material waste, insufficient structural strength, and assembly obstacles, this paper proposes a pre-bending suppression method based on force compensation control. First, based on the elastoplastic bending theory and the principle of elastic recovery upon unloading, the plane stress and plane strain states are distinguished, and the mechanical model parameters are corrected. A rebound prediction model integrating the parameters of the sheet material, equipment, and processing is constructed. Second, a force-position hybrid compensation strategy of “parameter initialization, compensation quantity optimization, closed-loop control” is designed. By dynamically adjusting the pre-bending force and displacement parameters, the rebound error is compensated. A laser triangulation-based real-time curvature detection scheme is designed for closed-loop control, clarifying the hardware layout and measurement accuracy characteristics. Finally, simulation and physical prototype experiments have verified that this method can reduce the rebound amount by more than 98.8%, and the diameter deviation of the cylinder section can be controlled within a very small range, which is significantly superior to traditional methods. This method does not require the replacement of special equipment, is compatible with the existing production conditions of small and medium-sized enterprises, takes into account both processing accuracy and cost control, provides reliable technical support for the high-precision rolling of medium-thick plates in fields such as mechanical manufacturing and ship engineering, and has important engineering application value.

Keywords

Three-Roll Plate Bending Machine, Residual Straight Edge, Rebound Value, Pre-Bending, Force Compensation Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在机械制造、船舶工程、压力容器加工等高端装备领域，三辊卷板机作为金属板材弯卷成形的核心通用设备，其加工精度直接决定了后续零部件的装配质量与服役性能[1][2]。该设备通过上辊垂直移动与两下辊同向旋转的协同作用，使板材发生塑性弯曲，进而成形为筒体、锥体等各类曲面构件；凭借结构简单、操作便捷、通用性强的优势，广泛应用于中厚板弯卷加工场景[2]-[4]。然而，对称式三辊卷板机在实际卷制过程中存在一个普遍性技术瓶颈——剩余直边现象，即板材端部因无法通过辊系最大弯矩区域、不具备双支点梁弯曲条件，难以实现充分塑性变形，最终残留一段无法弯卷的直边[5]。

剩余直边的存在会引发一系列工程问题，严重制约卷板加工的精度与效率：其一，直边区域通常需后续手工切除，不仅造成金属材料的浪费，还会因切口不均匀导致纵缝组对间隙难以保证，增加工人劳

动强度[6]；其二，剩余直边会使筒体纵焊缝处产生附加周向应力，其值可达筒体周向应力的 50%左右，影响构件的结构强度与稳定性[7]；其三，对于无波纹、无环筋的非标准筒体，剩余直边会导致工件失圆，甚至阻碍后续装配与使用，如盛装硅胶产品的钢桶会因直边凹陷导致挤出盘无法正常作业，还可能刮擦内涂层造成货物污染[8]。据工业实践数据，标准 200 L 钢桶卷制时，剩余直边宽度可达 50~100 mm，随辊子直径变化而波动，已成为高端板材成形加工中亟待解决的关键难题[9]。

为抑制剩余直边，国内外学者与企业已开展大量研究，形成了多种技术方案，主要可分为三类：一是预弯工艺法，通过压力机模压、托板辅助预弯等方式，提前对板材端部进行弯曲处理，但其需配备专用模具或辅助设备，且针对不同规格板材需更换辅助工具，存在加工成本高、生产率低的局限[1] [10]；二是结构改进法，如采用非对称式三辊卷板机，通过调整辊系布局减小剩余直边长度，但该类设备操作复杂，且仍无法完全消除直边，不适用于部分中小企业的现有生产条件[11] [12]；三是工艺优化法，包括两次卷制、下料尺寸调整、合口焊接后再加工等方式，虽能在一定程度上减少直边残留，但增加了加工工序与计算难度，且对板材材质、厚度的适应性较差[13] [14]。此外，双辊卷板机虽能实现无直边卷制，但存在无法加工厚板、不适合多品种小批量生产的缺陷，难以满足中厚板高端加工需求[2]。

更为关键的是，现有各类压弯抑止剩余直边的技术方案，均普遍忽视了板材弯曲成形过程中的核心特性——回弹现象。金属板材在压弯作用下会同时产生弹性变形与塑性变形，当压弯载荷卸除后，弹性变形会自行恢复，导致板材弯曲角度、曲率发生偏移，这种回弹效应会进一步加剧剩余直边的不规则性，使得直边长度控制难度大幅提升，即便采用上述预弯、结构改进等方法，也难以实现剩余直边的精准抑制，甚至会因回弹误差导致后续纵缝组对、工件成形的精度进一步下降，无法满足高端装备领域对板材弯卷成形的严苛要求[15]。针对这一技术短板，结合对称式三辊卷板机的结构特性与板材弯卷成形机理，本文提出了一种力补偿控制方法，通过实时检测板材压弯过程中的应力-应变状态，精准识别回弹趋势与回弹量，动态调整辊系作用力参数，以补偿回弹带来的成形误差，实现剩余直边的高效、精准抑制，同时兼顾加工效率与成本控制，适配中小型企业现有生产设备与多规格板材加工需求。

2. 三辊卷板机剩余直边预弯力学特性分析

2.1. 对称式三辊卷板机预弯工作原理

如图 1 所示，对称式三辊卷板机(下辊可调但中心距固定)在预弯时(坐标 xy 平面上)，板材由下辊 A、下辊 B 支撑，且夹上辊 C 与两下辊之间。首先，通过调整上辊与下辊的间距(其值为 b)，使板材固定于上、下辊之间且能够随上辊 C 的转动而平移；然后将下辊 A 移至 A_1 ， A_1 顶部与板材需要预弯的位置 L_1 相切， L_1 为剩余直边，其值为板厚 b 的 2~4 倍；其次，根据推导的公式(1)将上辊 C 下移至 C_1 ，从而对板材进行预弯。同理，在预弯板材的另一边时，移动下辊 B 至板材另一端剩余直边所在位置，其余步骤一致。

$$CC_1 = \frac{d}{2} - \left[\sqrt{OA_1^2 - (A_1E + EE_1)^2} - \left(\frac{D}{2} + b \right) \right] \quad (1)$$

其中： $OA_1 = 0.5D + b + 0.5d$ ； $A_1E = L_1 = (2 \sim 4)b$ ； $EE_1 \approx k * AB$ ， k 是结合大量的实践数据利用最小二乘法得到的参数，其表达式可表示为 $k = -0.000026 * AB + 0.127737$ ， AB 为下辊中心距； O 点表示钢板预弯圆的圆心。该经验系数 k 为下辊中心距对预弯接触偏移量的修正系数，物理意义为下辊中心距 AB 每变化 1 mm，预弯过程中板材与辊系的接触偏移量 EE_1 的线性变化率，其本质是对辊系间隙、板材弹性变形及设备安装误差的综合补偿系数，取值为负表明下辊中心距 AB 增大时，接触偏移量 EE_1 呈线性减小趋势。对 k 进行敏感性分析可知： k 的斜率系数为 -0.000026 ，表明 AB 在工业常用范围(500~3000 mm)内变化时， k 的变化幅度为 $-0.078 \sim -0.013$ ，变化率约为 83.3%，但因斜率绝对值极小， AB 对 k 的影响呈弱

预弯过程可分为三个阶段：弹性弯曲阶段、弹塑性弯曲阶段和卸载回弹阶段。在弹性弯曲阶段，上辊施加的弯矩较小，板材仅产生弹性变形，此时移除载荷后板材将完全恢复原状；随着上辊继续下压，弯矩增大，板材表层应力达到屈服强度，进入弹塑性弯曲阶段，此时板材同时产生弹性变形和塑性变形；预弯完成后，移除预弯力，板材中的弹性变形恢复，产生回弹现象，最终形成具有一定残余曲率的预弯直边。

2.2. 剩余直边产生机理

剩余直边的产生是三辊卷板机结构特性和板材受力特点共同作用的结果。三辊卷板机的上辊与两下辊呈等腰三角形布置，由于板材两端在卷制过程中，受到的弯曲力矩小于塑性弯矩，无法达到充分塑性弯曲，这将导致剩余直边的出现。在卷制过程中，板材边缘的弯曲区域长度 L 与弯曲半径 ρ 满足几何关系：

$$L = \sqrt{\rho^2 - (\rho - b)^2} \quad (2)$$

当板材的卷制弯曲半径远大于板材厚度时：

$$L \approx \sqrt{2\rho b} \quad (3)$$

当弯曲区域长度 L 小于某一临界值时，板材边缘无法形成充分弯曲，会产生剩余直边 L_1 。结合塑性弯曲临界曲率半径 ρ_p ，可得临界弯曲区域长度 L_p ：

$$L \approx \sqrt{2\rho_p b} \quad (4)$$

其中，塑性弯曲临界曲率半径 ρ_p 可根据材料力学塑性弯曲理论，当板材发生塑性弯曲时，其横截面的应力分布为线性分布(平截面假设)，屈服极限处的应力达到材料的屈服强度 σ_s ，对于矩形截面板材(宽度 k 、厚度 b)，其塑性弯矩 M_p 可表示为：

$$M_p = \frac{\sigma_s k b^2}{4} \quad (5)$$

同时，弯曲曲率与弯矩的关系为：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (6)$$

其中， ρ 为弯曲曲率半径， M 为弯曲力矩， I 为板材横截面惯性矩，对于矩形截面， $kb^3/12$ 。当板材刚好达到塑性弯曲时，弯曲力矩 M 等于塑性弯矩 M_p ，此时对应的曲率半径为塑性弯曲临界曲率 ρ_p ，代入上式可得：

$$\frac{1}{\rho_p} = \frac{3\sigma_s}{Eb} \quad (7)$$

因此，将式(7)代入式(4)得临界弯曲区域长度 L_p ：

$$L_p \approx b \sqrt{\frac{2E}{3\sigma_s}} \quad (8)$$

根据文献[13]并结合图1所示，在实际预弯过程中，由于辊系结构的限制，实际弯曲区域长度受上下辊直径的影响，其最大值为：

$$L_a = \sqrt{\frac{(d + d_n)b}{2} + \frac{b^2}{4}} \quad (9)$$

当实际弯曲区域长度 L_a 小于临界弯曲区域长度 L_p 时, 则剩余直边长度 L_1 为两者之差:

$$L_1 = L_p - L_a \quad (10)$$

另外, 剩余直边的长度主要受三辊卷板机的结构参数和板材规格影响。设备方面, 上辊直径、下辊直径、辊轮间距等参数决定了板材与辊轮的接触范围; 板材方面, 厚度、宽度、弹性模量等参数影响板材的弯曲刚度, 进而影响剩余直边的长度。一般来说, 上辊直径越大、板材厚度越厚、弹性模量越高, 剩余直边长度越长。为保证后续卷制工序的精度, 结合公式(10)可知, 板材的剩余直边长度通常需要控制在板材厚度的 2~4 倍以内, 因此必须通过预弯加工对剩余直边进行处理。

2.3. 回弹现象力学机理

回弹现象的本质是板材在预弯过程中产生的弹性变形在卸载后恢复的结果, 其力学机理可通过弹塑性力学中的应力 - 应变关系进行解释。在预弯加载阶段, 板材截面产生弹塑性弯曲, 表层金属进入塑性状态, 应力达到屈服强度。从表层到中性层, 应力逐渐减小, 中性层处应力为零。此时, 板材中同时存在塑性变形和弹性变形, 其中塑性变形是不可逆的, 而弹性变形在卸载后将逐渐恢复。

卸载阶段, 预弯力消失, 板材内部的弹性应力释放, 产生与预弯方向相反的回弹弯矩, 导致板材发生回弹变形。回弹量的大小取决于弹性变形的比例, 弹性变形占比越大, 回弹量越大。影响回弹量的因素主要包括以下几个方面:

- 1) 板材材质: 不同材质的板材弹性模量、屈服强度、泊松比等力学参数存在差异, 弹性模量越大、屈服强度越高, 回弹量越小; 泊松比越大, 回弹量越大。
- 2) 板材规格: 板材厚度对回弹量影响显著, 厚度越大, 弯曲刚度越大, 弹性变形占比越小, 回弹量越小; 板材宽度对回弹量的影响相对较小, 但宽度越大, 边缘效应越明显, 回弹量略有增大。
- 3) 预弯参数: 预弯力越大, 板材塑性变形越充分, 弹性变形占比越小, 回弹量越小; 预弯位移越大, 弯曲程度越大, 回弹量也随之变化, 但存在最优预弯位移使回弹量最小。
- 4) 设备参数: 上辊直径、下辊直径影响板材与辊轮的接触应力分布, 辊轮直径越大, 接触面积越大, 应力分布越均匀, 回弹量越小; 设备刚度越大, 加工过程中的变形越小, 对回弹量的影响越小。

2.4. 力位参数与回弹量的非线性关系

预弯力和预弯位移是影响回弹量的核心加工参数, 两者与回弹量之间呈现复杂的非线性关系。单一改变预弯力或预弯位移, 回弹量的变化规律并非线性, 且两者之间存在显著的耦合效应。

当预弯位移固定时, 随着预弯力的增大, 板材的塑性变形逐渐增加, 弹性变形占比减小, 回弹量呈现先快速减小后趋于稳定的变化趋势。当预弯力较小时, 板材主要发生弹性变形, 回弹量较大; 随着预弯力增大, 表层金属进入塑性状态, 回弹量快速减小; 当预弯力达到一定值后, 板材截面大部分区域进入塑性状态, 弹性变形占比极小, 回弹量趋于稳定。

当预弯力固定时, 随着预弯位移的增大, 板材的弯曲程度逐渐增大, 预弯半径减小, 回弹量呈现先减小后增大的变化趋势。存在一个最优预弯位移, 此时回弹量最小。当预弯位移小于最优值时, 板材弯曲程度不足, 弹性变形占比大, 回弹量较大; 当预弯位移大于最优值时, 板材内部产生过大的残余应力, 卸载后残余应力释放导致回弹量增大。

此外, 预弯力和预弯位移的耦合效应使得两者的组合对回弹量产生显著影响。不同的预弯力与预弯位移组合可能产生相同的预弯效果, 但回弹量存在差异。因此, 单一的力控或位控补偿方法难以精准控制回弹量, 必须采用力位混合补偿方式, 通过协同调整预弯力和预弯位移, 实现对回弹量的精准补偿。

3. 回弹量预测模型的构建

3.1. 模型构建理论基础

基于板材弹塑性力学理论，区分平面应力与平面应变状态的适用场景并修正对应力学参数，结合板材平面应力弹性塑性弯曲理论、卸载弹性回复原理及截面惯性矩守恒方程，构建剩余直边预弯回弹量预测模型，实现回弹量的精准预判。

3.1.1. 弹塑性弯曲理论

弹塑性弯曲理论是分析板材预弯变形和回弹现象的核心理论基础。板材预弯过程中，截面产生弹塑性弯曲，其应力 - 应变分布遵循弹塑性力学基本规律。板材弯卷成形中平面应力与平面应变状态的区分依据为板材厚宽比(b/B)：当 $b/B < 1/10$ 时，板材厚度方向的应力可忽略，为平面应力状态，适用于薄板弯卷；当 $b/B \geq 1/10$ 时，板材厚度方向的应变受到辊系与板材自身的约束，无法自由变形，为平面应变状态，适用于本文研究的中厚板弯卷场景。对于矩形截面的中厚板材，在平面应力假设下，如图 3 所示，弯曲应力沿截面厚度方向的分布满足以下规律，且平面应变状态下的等效弹性模量修正为 $E = E_L/(1 - u^2)$ ；其中， E_L 为板材原来的弹性模量， u 为板材泊松比，该修正使弹性模量考虑了厚度方向的应变约束，更贴合中厚板弯卷的实际力学特性：

板材在弹性区域(距中性层距离 $y_s \leq y$ ， y_s 为弹性区与塑性区的分界点距离)，应力与应变满足胡克定律： $\sigma = E\varepsilon = Ey/R_1$ ，其中： R_1 为预弯时的瞬时曲率半径。

板材在塑性区域(距中性层距离 $y_s > y$)，应力达到屈服强度 σ_s ，应变继续增大但应力保持不变： $\sigma = \sigma_s/\sqrt{1 - u + u^2}$ (平面应变状态下的屈服强度修正，贴合中厚板塑性变形特性)。

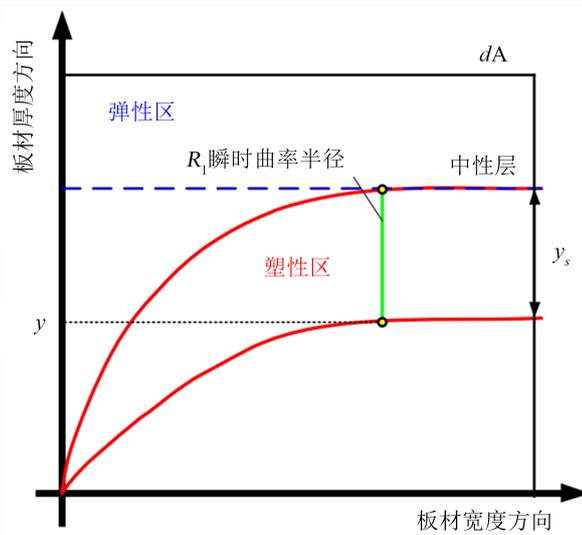


Figure 3. Center-of-mass state planning diagram
图 3. 质心状态规划图

根据截面内力平衡条件，预弯弯矩 M 等于应力沿截面宽度和厚度的积分： $M = \iint \sigma y dA$ ，其中： dA 为微元面积。通过积分计算可得到预弯弯矩，表示为： $M = FL$ ；其中，预弯力 F 作用于板材边缘，力臂 L 为设备固有参数(辊子长度)。

板材预弯时，截面产生弹塑性弯曲，表层应力达到屈服强度 σ (修正后为 $\sigma = \sigma_s/\sqrt{1 - u + u^2}$)，中性层(板材厚度中心)应力为 0。根据塑性弯曲理论，平面应变状态下预弯时的总曲率 k_1 由塑性曲率 k_p 和弹性

曲率 k_e 叠加:

$$k_1 = k_p + k_e = \frac{2\sigma}{Eb} + \frac{M}{EI} \quad (11)$$

其中, 1) 塑性曲率可表示为:

$$k_p = \frac{2\sigma}{Eb} \quad (12)$$

它由表层屈服应力决定, 表征塑性变形的不可逆曲率。

2) 弹性曲率可表示为:

$$k_e = \frac{M}{EI} \quad (13)$$

它由预弯弯矩 M 产生, 表征弹性变形的可逆曲率。

3) 根据公式(13)可知需要获得截面惯性矩, 其截面惯性矩可表示为:

$$I = \frac{b^3}{12} \quad (14)$$

由于曲率定义为半径的倒数($k = 1/R$), 故 $R_1 = 1/k_1$ 。

3.1.2. 卸载弹性回复原理

卸载过程中, 板材内部的弹性应力释放, 产生弹性回复变形, 即回弹。卸载弹性回复原理指出, 卸载过程中的应力 - 应变变化遵循弹性规律, 与加载过程中的弹性变形路径相反。因此, 回弹过程可以视为在预弯后的残余应力基础上, 施加一个与预弯弯矩方向相反的弹性弯矩, 使板材产生弹性回复变形。

平面应变状态下回弹后的曲率半径 R_2 与预弯时的瞬时曲率半径 R_1 之间的关系可通过卸载弹性回复原理推导。在卸载阶段, 预弯弯矩 M 消失, 弹性变形完全回复, 产生与预弯方向相反的回弹曲率 k_2 。回弹曲率仅由弹性变形决定, 与塑性变形无关, 回塑性变形已不可逆, 其大小等于预弯阶段的弹性曲率 k_e , 即:

$$k_2 = k_e = \frac{M}{EI} = \frac{12FL}{Eb^3} \quad (15)$$

回弹的残余曲率 k_2 为预弯总曲率 k_1 与回弹曲率 k_2 的差值:

$$k_2 = k_1 - k_2 = \frac{2\sigma}{Eb} \quad (16)$$

故回弹后的残余半径为:

$$R_2 = \frac{1}{k_2} \quad (17)$$

因此, 回弹性 ΔR 是“回弹后的残余半径 R_2 与预弯时的瞬时半径 R_1 的差值”:

$$\Delta R = R_2 - R_1 = \frac{1}{k_1 - k_2} - \frac{1}{k_1} \quad (18)$$

3.1.3. 回弹量与预弯位移的耦合修正

预弯位移 S 表征板材边缘的压缩量, 与预弯半径 R_1 满足几何关系。在小角度假设下, 预弯角度 $\theta \approx b/R_1$, 根据弧长公式, 预弯位移 S 与预弯角度 θ 、预弯长度 L 关系为:

$$S = L\theta \approx \frac{Lb}{R_1} \quad (19)$$

整理式(19)可得:

$$R_1 = \frac{Lb}{S} \quad (20)$$

将式(20)代入回弹量定义式, 结合平面应变状态下的等效弹性模量 E , 得到剩余直边预弯回弹量:

$$\Delta R = \frac{6FL^2}{\sigma S b} \quad (21)$$

3.2. 模型输入输出变量确定

根据三辊卷板机剩余直边预弯的力学特性分析, 回弹量受板材基础参数、设备参数和预弯加工参数的综合影响。为构建精准的回弹量预测模型, 需筛选关键影响因素作为模型输入变量, 以回弹量作为输出变量。

3.2.1. 输入变量

1) 板材基础参数: 板材材质决定了其力学性能, 不同材质的平面应变状态下的等效弹性模量 E 、屈服强度 σ_s (带入到修正后的 $\sigma = \sigma_s / \sqrt{1-u+u^2}$), 泊松比 u 存在显著差异; 板材厚度 b 直接影响弯曲刚度和应力分布, 是影响回弹量的关键参数。因此, 选取板材厚度 b 、弹性模量 E 、屈服强度 σ_s 作为板材基础参数输入。

2) 预弯加工参数: 预弯力 F 和预弯位移 S 是直接控制板材变形的加工参数, 与回弹量呈现复杂的非线性关系, 是模型的核心输入变量。

3) 设备与目标参数: 三辊卷板机的上辊直径 D_1 、下辊直径 D_2 影响板材与辊轮的接触应力分布; 预弯后直边的目标曲率半径 R_0 、预弯长度 L 决定了预弯加工的目标要求, 对初始力位参数的计算具有重要影响, 因此也作为模型输入变量。

3.2.2. 输出变量

回弹量 ΔR 定义为预弯时的瞬时半径 R_1 与回弹后的残余半径 R_2 的差值, 即 $\Delta R = R_1 - R_2$ 。回弹量直接反映了预弯加工后板材实际曲率与目标曲率的偏差, 是补偿方法设计的核心依据, 因此作为模型的输出变量。

综上, 考虑平面应变修正的回弹量预测模型的表达式为: $\Delta R = f(b, L, \sigma_s, u, F, S)$ 。在实际应用中, 设备参数 D_1 、 D_2 和目标参数 R_0 、 L 为已知固定值, 因此模型可简化为 $\Delta R = f(b, L, \sigma_s, u, F, S)$ 。

4. 三辊卷板机力位混合补偿策略设计

三辊卷板机力位混合补偿策略设计围绕预弯加工精度提升目标, 按“参数初始化 - 补偿量优化 - 加工闭环调控”的逻辑有序推进, 具体实施如下: 首先进行初始力位参数确定, 依据预弯加工目标参数、板材基础参数, 结合平面应变修正后的三辊卷板机力学模型, 精确计算出预弯初始力 F_0 与预弯初始位移 S_0 ; 随后开展力位混合补偿参数计算, 先将预弯初始力 F_0 、预弯初始位移 S_0 输入平面应变修正后的回弹量预测模型, 得到初始回弹量 ΔR_0 , 再以目标曲率半径 R_0 与初始回弹量 ΔR_0 为核心依据, 构建力 - 位补偿目标函数, 该函数以补偿后的回弹量 $\Delta R' = 0$ 为约束条件, 其中函数涉及的弯曲弹性刚度 K 由适用于卷板机预弯模型的简支梁模型构建, 考虑平面应变状态与中厚板特性, 对弯曲弹性刚度表达式为:

$$K = \frac{4EbB^3}{L^3} \quad (22)$$

式中, $E = E_L/(1 - \nu^2)$, 且 E_L 为板材原来的弹性模量, ν 为泊松比; K 代表弯曲弹性刚度; B 板材宽度。同时, 结合根据胡克定律推导得出的力 - 位转换模型表达式为:

$$F = -KS \quad (23)$$

将上述两个模型与 ΔR 的推导式进行融合, 共同构建起关于 ΔR 的力 - 位补偿目标函数, 进而求解出最优力补偿量 ΔF 与最优位移补偿量 ΔS 。

最后进入预弯加工与实时反馈调整阶段, 按照预弯初始力 F_0 、预弯初始位移 S_0 及求解得到的最优力补偿量 ΔF 、最优位移补偿量 ΔS , 控制三辊卷板机上辊执行下压预弯作业, 加工过程中采用激光三角测距法实现实时曲率半径 R_1 的高精度检测, 以下为该检测手段的硬件布局、测量原理与精度分析:

1) 硬件布局: 在三辊卷板机机架两侧对称安装 2 台高精度激光三角测距传感器(型号选取工业级激光位移传感器, 测量量程 0~500 mm, 采样频率 100 Hz), 传感器安装高度与板材预弯区域中心齐平, 安装距离距板材表面 300 mm, 且传感器发射的激光束垂直于板材预弯区域的切向方向; 同时, 在卷板机控制系统中配置数据采集卡(采样精度 16 位), 实现激光传感器的距离数据与卷板机的力、位移数据同步采集; 传感器与机架之间采用防震支架固定, 避免辊系旋转与设备振动对测量的干扰。

2) 测量原理: 激光三角测距传感器向板材预弯表面发射激光束, 激光束经板材表面反射后被传感器的接收端捕捉, 根据反射光点在接收器上的位置, 结合 2 台传感器的安装间距 L_0 , 通过圆的几何拟合公式计算出板材预弯区域的实时曲率半径 R_1 , 拟合公式为: $R_1 = \left(d_1^2 + (L_0/2)^2 \right) / (2d_1)$ (d_1 为两传感器测量距离的差值)。

3) 测量精度分析: 该检测方案的系统误差主要来源于传感器安装误差($\leq \pm 0.02$ mm)、激光束入射角误差($\leq \pm 0.01$ mm), 总系统误差 $\leq \pm 0.03$ mm; 随机误差主要来源于设备振动($\leq \pm 0.01$ mm)、板材表面反光($\leq \pm 0.01$ mm), 总随机误差 $\leq \pm 0.02$ mm; 综合测量精度 $\leq \pm 0.05$ mm, 曲率半径测量分辨率达 0.01 mm, 完全满足中厚板预弯加工中曲率半径的实时检测要求; 若测量过程中出现数据跳变, 采用滑动平均滤波算法对采集数据进行滤波处理, 进一步降低随机误差。

通过上述激光三角测距法实时采集预弯力 F_1 、预弯位移 S_1 及实际曲率半径 R_1 , 通过公式 $\Delta R_1 = R_1 - R_0$ 计算实际回弹量 ΔR_1 , 若 ΔR_1 的绝对值大于允许误差阈值 ε , 则动态调整力补偿量 ΔF 与位移补偿量 ΔS , 直至 ΔR_1 的绝对值小于等于 ε , 其中实时反馈调整的具体规则为: 当 $\Delta R_1 > \varepsilon$ 时, 调整量按 $\Delta F' = q_1 \Delta R_1$ 、 $\Delta S' = q_2 \Delta R_1$ 计算; 当 $\Delta R_1 < -\varepsilon$ 时, 调整量按 $\Delta F' = -q_1 |\Delta R_1|$ 、 $\Delta S' = -q_2 |\Delta R_1|$ 计算, 式中 q_1 、 q_2 为预设比例系数。

5. 实验分析

为验证本文提出的“基于力补偿控制的三辊卷板机预弯剩余直边抑制方法”的可行性和有效性, 分别采用仿真分析和实验分析两种方法进行对比分析。

5.1. 卷板成型仿真实验分析

仿真实验分析采用 Matlab 编写的 m 文本程序进行仿真实验, 主要设置两种仿真工况进行对比分析, 分别为正常预弯下压卷制方法和本文研究的预弯下压卷制方法。为保证仿真结果的真实性、可靠性, 且能与后续实物实验数据形成有效对标, 仿真所采用的三辊卷板机核心参数与后续实验所用真机参数保持完全一致, 其中上辊直径设定为 600 mm, 下辊直径为 540 mm, 上下辊中心距控制在 600 mm。仿真所用板材参数贴合实际实验工况, 选取 Q235 普通碳素结构钢板材, 其厚度为 25 mm, 板宽 450 mm, 厚宽比 $b/B = 25/450 \approx 1/18$, 虽小于 1/10, 但为贴合中厚板工业加工习惯, 仿真中仍采用平面应变状态的等效弹性模量修正($E = 2.1 \times 10^{11}/(1 - 0.3^2) \approx 2.35 \times 10^{11}$ Pa), 目标卷制直径为 1200 mm。通过对两组仿真工况的

计算结果进行分析，最终得到的仿真对比结果如图 4 所示。

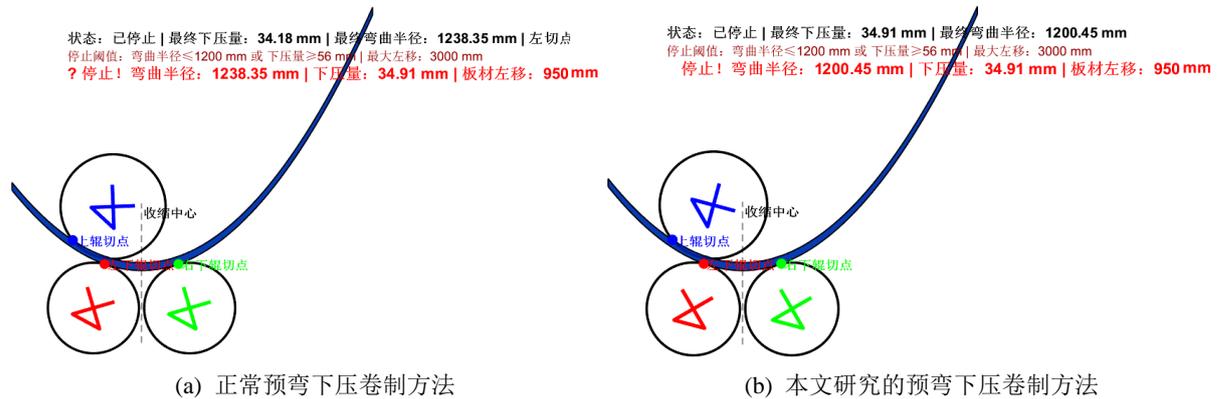


Figure 4. Analysis chart of simulation experiment results

图 4. 仿真实验结果分析图

从图 4(a)可以看出，采用正常预弯下压卷制方法，仿真板材停止弯曲时弯矩半径为 1238.35 mm，相较于目标弯曲半径 1200 mm 存在 38.35 mm 的回弹量，预弯回弹偏差较为明显，这会直接导致卷制构件的成型精度不足，影响后续装配与使用性能。而图 4(b)本文研究的预弯下压卷制方法，在相同的条件下，停止弯曲时的弯曲半径仅为 1200.45 mm，与目标弯曲半径的差值仅为 0.45 mm，回弹量较常规方法降低了约 98.8%，成型精度得到了大幅提升。这一结果充分表明，本文研究的预弯下压卷制方法通过优化预弯下压策略，有效抑制了板材弯曲后的弹性回复行为，显著改善了回弹控制效果，解决了常规方法回弹量大、成型精度难以保障的问题，验证了本文提出的三辊卷板机预弯下压卷制方法的可行性。

5.2. 卷板成型物理样机实验分析

为进一步验证上节仿真实验分析，本节进行卷板成型物理样机实验分析。实验用卷板机采用江苏一重数控机床有限公司生产的卷板机，如图 5 所示。其中，配备了上述激光三角测距实时曲率检测系统，包括曲率测量仪器。另外，三辊卷板机的主要部件、板材参数与仿真分析一致。



Figure 5. Experimental three-roll plate rolling machine

图 5. 实验用三辊卷板机

实验过程采用传统的正常预弯方法和本文研究的预弯方法进行对比分析, 实验结果如图 6 所示。

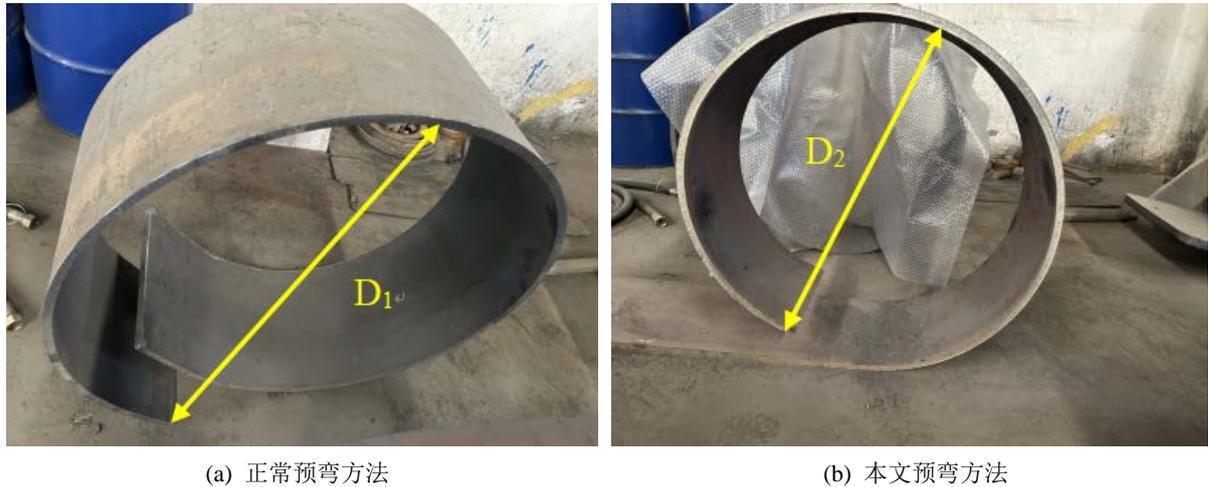


Figure 6. Physical diagram of comparative experiment results

图 6. 对比实验结果实物图

结果分析: 从图 6 中可以看出, 传统预弯方法的直径 D_1 要明显大于 D_2 , 通过激光三角测距检测系统与高精度曲率测量仪器对两组试样进行实测, 得到 D_1 约为 1042 mm, D_2 约为 1008 mm, 二者差值达到 34 mm。物理样机实验情况与仿真实验基本一致, 具体如图 7 所示。

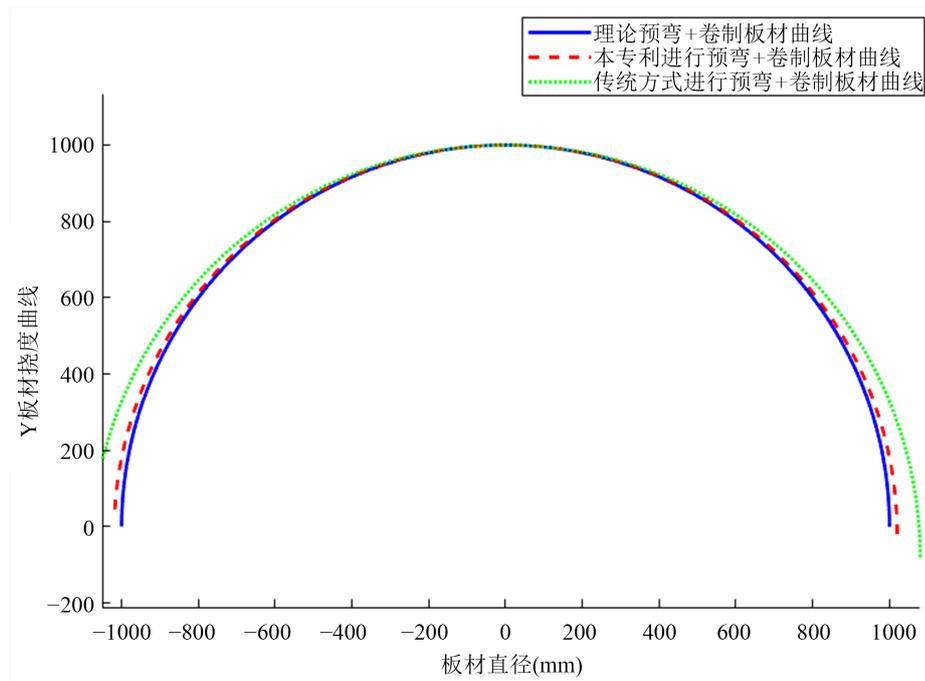


Figure 7. Comparison experiment analysis results graph

图 7. 比对实验分析结果图

传统预弯方法在板材预弯阶段, 由于未充分考虑金属板材弹塑性变形后的回弹特性, 预弯曲率与目标曲率存在固有偏差, 卷制后回弹效应累积, 最终导致筒节实际直径偏大。而本文提出的预弯方法, 通

过引入平面应变修正的回弹量预测模型和精准的回弹补偿机制,结合激光三角测距式实时曲率闭环检测,在预弯阶段就对板材的回弹量进行预判与主动控制,有效抵消了卷制过程中回弹带来的直径偏差。

实验数据充分表明,本文研究的方法能够将筒节直径偏差控制在更小范围,显著提升了卷制精度,降低了因回弹导致的尺寸超差风险。这一结果验证了本专利方法在减小板材预弯回弹误差、提高卷制筒节尺寸精度方面的有效性,为大型筒节类构件的高精度卷制提供了可靠技术支撑,具备较高的工程应用价值。

6. 结论

针对对称式三辊卷板机卷制过程中存在的剩余直边难题,本文提出一种基于力补偿控制的预弯抑制方法。通过分析剩余直边产生机理与回弹力学特性,构建了融合板材参数、设备参数与加工参数的回弹量预测模型,揭示了力位参数与回弹量的非线性耦合关系。在此基础上,设计了“参数初始化-补偿量优化-闭环调控”的力位混合补偿策略,为闭环调控设计了激光三角测距式实时曲率检测方案,明确了硬件布局、测量原理与综合测量精度($\leq \pm 0.05$ mm),实现对回弹误差的精准抵消。仿真与物理样机实验验证表明,该方法可将回弹量降低 98.8% 以上,筒节直径偏差控制在极小范围,显著优于传统预弯方法;且其无需更换专用设备或模具,适配中小型企业现有生产条件,兼顾加工精度与成本控制,有效解决了剩余直边导致材料浪费、结构强度不足及装配难题,为机械制造、船舶工程等领域的中厚板高精度卷制提供了可靠技术支撑,具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] 李想. 基于工艺计算模型和机器视觉的四辊滚弯工艺改进研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学机械工程, 2025.
- [2] 黎仕, 钱应平, 张东桥, 匡佳维, 方文康, 姚主林. 考虑回弹的水平上调式三辊卷板机卷圆精度研究[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(2): 66-75.
- [3] 邹涛, 朱军, 张伦伟, 陈建平, 米智楠. 三辊卷板机变频调速液压系统[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(2): 29-30+28.
- [4] 邹涛, 朱军, 张伦伟, 陈建平, 米智楠. 三辊卷板机电液无级调速系统[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(1): 90-91+96.
- [5] 吴松林, 叶凡, 张玉祥, 何磊, 张常乐, 韩亦瑞, 郭子蒙. 下压参数对高强钢厚板滚弯成型尺寸影响的数值模拟分析[J]. 模具技术, 2025(5): 33-40.
- [6] 王广林, 王新海, 张涛. 三辊对称卷板机薄壁圆筒成型工艺方法[J]. 设备管理与维修, 2022(24): 91-92.
- [7] 马晨波, 张子恒, 张玉言, 孙见君, 李想. 四辊卷板机弯卷成形工艺的研究进展[J]. 锻压技术, 2024, 49(5): 1-12.
- [8] 郭宏彪. W11S-140×4000 型水平下调式三辊卷板机卷板能力计算[J]. 工程机械, 2025, 56(6): 98-101.
- [9] 王秋实, 张野, 马池. 浅谈三辊卷板机加工圆筒时出现扭斜的处理方法[J]. 内燃机与配件, 2021(23): 62-63.
- [10] 姚智中. 三辊卷板机卷圆半径计算[J]. 工程机械文摘, 2020(3): 9-10.
- [11] 王国强. 数控四辊卷板机数学模型设计及其应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2025, 60(4): 50-53.
- [12] 黎仕, 钱应平, 薛行, 匡佳维, 方文康. 水平上调式三辊卷板机卷圆成形控制系统设计[J]. 液压与机床, 2024, 52(10): 104-109.
- [13] 王艳, 崔西民, 许光辉, 李曙生, 朱新庆, 李德茵. 三辊滚弯成形过程的回弹研究与试验分析[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(5): 44-51.
- [14] 任育红. 三辊卷板机运动结构和控制系统设计[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(7): 72-75.
- [15] 袁理智. 三辊弯板机卷圆快速定位装置的研究[J]. 内燃机与配件, 2021(10): 64-65.