基于环件偏移量和圆度误差的轧辊运动轨迹自适应控制

魏宽居[1,2] 李大永[3] 顾天虹[2] 杨雨童[1*] 万剑平[4] 黄诗尧[1]
1.长三角先进材料研究院,苏州,215000
2.西交利物浦大学理学院,苏州,215123
3.上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室,上海,200240
4.无锡派克新材料科技股份有限公司,无锡,214161

摘要:针对环件轧制过程中的失稳、失圆问题,提出一种基于环件偏移量和圆度误差的轧辊运动轨迹自适应控制方法。首先建立环轧有限元模型,计算环件偏移量和圆度误差;随后对现有软件进行二次开发,设计了基于偏移量的导向辊控制器、基于圆度误差的芯辊控制器、基于圆度误差的锥辊控制器,以及基于三种辊的综合控制器。结果分析表明,综合控制方法能克服单一控制的局限性,显著减小偏移量和圆度误差,有效提高环件轧制的稳定性。

关键词:环件轧制;轧辊;自适应控制;偏移量;圆度误差
中图分类号:TP182
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.026 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Adaptive Control of Roll Motion Trajectory Based on Ring Offset and Roundness Error

WEI Kuanju[1,2] LI Dayong[3] GU Tianhong[2] YANG Yutong[1*] WAN Jianping[4] HUANG Shiyao[1]
1.Materials Academy, JITRI, Suzhou, Jiangsu, 215000
2.College of Science, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, Jiangsu, 215123
3.State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240
4.Wuxi Parker New Material Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214161

Abstract: To mitigate instability and out-of-roundness in ring rolling processes, this paper presents an adaptive control approach for roll motion trajectory using ring offset and roundness error as feedback. A finite element model was established to compute these two parameters. Through secondary development of existing software, separate control strategies for guide roll, mandrel, and axial roll were designed, together with an integrated control scheme combining all three rolls. Experimental results demonstrate that the integrated method overcomes the limitations of individual strategies, substantially reduces both offset and roundness error, and effectively improves rolling stability.

Key words: ring rolling; rolls; adaptive control; offset; roundness error

0 引言

环件轧制是一个复杂的非对称动态成形过程,环件的转动惯量和刚度在轧制后期呈指数级变化,导致失稳、失圆等异常频发,严重影响成形质量。

偏移量和圆度误差是衡量环件-轧制稳定性的关键指标。偏移量过大会导致环件壁厚不均匀,圆度误差会使环件截面形状偏离理想圆形。两者超标将引发环件受力不均、振动加剧,甚至导致轧制失败[1]。以有限元法为代表的数值模拟方法能预测上述误差[2],因此,有限元软件二次开发实现的轧辊运动控制是提高轧制稳定性的有效途径[3-4]。

偏移量控制方面,郝用兴等[5]研究了导向辊的运动规律,并通过优化其运动轨迹使环件轧制过程中的偏移量小范围波动。杨红丽等[6]研究了导向辊的闭环运动控制对异形环件成形质量的影响,通过导向辊与环件的紧密贴合实时矫正环件的位置,减小环件偏移量。圆度误差控制方面,HUA等[7]在有限元仿真中研究了导向辊对环件

收稿日期:2025-07-17
基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3705500);江苏省产业前瞻与关键核心技术项目(BE2022159)

圆度误差的影响，建立了导向力调控的方法。PENG等[8]在环件有限元仿真中对导向辊和锥辊的运动进行实时控制与调整，减小环件在不同阶段的圆度误差，使轧辊运动较好匹配环件扩展。王雨等[9]研究了芯辊运动的自适应控制算法，通过轧制缺陷反馈机制控制芯辊运动，减小轧制过程中的圆度误差。文献[10-11]制定了基于导向力反馈和锥辊转速模糊调节的控制方法，以减小环件轧制过程中的环件偏移量和圆度误差。值得注意的是，偏移量与圆度误差虽然相互关联却并非完全同步变化。已有研究表明，锥辊转速模糊调节虽然减小了轧制全程的平均偏移量，但会大幅增大轧制后期的圆度误差[10]。上述研究大多没有同时考虑环件的偏移量和圆度误差在轧制过程中的变化，因此，同步优化偏移量与圆度误差、揭示不同轧辊控制方法的作用规律是当前亟待解决的关键问题。

本文首先在ABAQUS软件中构建环件轧制的有限元模型。随后利用Python对该软件进行二次开发，建立轧制自适应运动轨迹的控制系统，并在此系统中设计基于偏移量的导向辊运动控制器、基于圆度误差的芯辊运动控制器、基于圆度误差的锥辊运动控制器，以及基于偏移量和圆度误差的导向辊、芯辊和锥辊综合控制器。最后对比分析了不同控制方法对环件偏移量和圆度误差的优化效果。

1 方法

1.1 环件轧制有限元模型

Al-Zn-Mg-Cu合金环件的轧制模型如图1所示，其中，驱动辊、下锥辊主动转动，上锥辊主动转动并轴向进给。轧制过程中，随着环件径向尺寸的逐渐扩大，锥辊会水平后退。两个导向辊从环件的上下底面将其“抱住”，并分别以各自的固定点为轴心做圆弧摆动，使环件轧制时的径向受力均匀，保障轧制过程的稳定。芯辊在轧制过程中的径向进给速度影响环件的塑性变形与轧制稳定性。模型的主要几何参数详见表1。

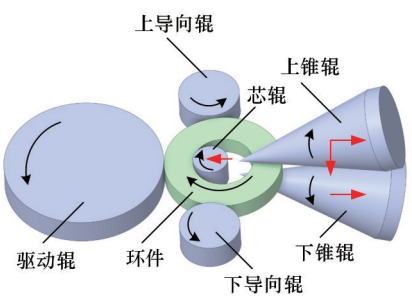


图1 环件轧制的模型

Fig.1 The model of ring rolling

表1 环件轧制建模主要参数

Tab.1 Main parameters of ring rolling modeling

参数名称	数值	参数名称	数值
环件目标内直径/mm	395	导向辊半径/mm	200
环件目标外直径/mm	775	锥辊底半径/mm	275.6
环件目标轴向高度/mm	125	锥辊顶角/(°)	32
环坯初始轴向高度/mm	140	锥辊侧边长/mm	1000
环坯初始外直径/mm	680	芯辊半径/mm	115
环坯初始内直径/mm	250	驱动辊半径/mm	525

建立有限元模型时，驱动辊、芯辊、导向辊、锥辊设为刚体，参照喷射成形Al-Zn-Mg-Cu合金设置环件的材料参数[12]。轧制温度设为450 ℃，忽略温度梯度对金属流动的影响。材料的化学成分如表2所示。材料由ϕ500 mm×1200 mm的大型喷射成形坯料通过线电极切割而成。坯料在350 ℃下均匀化5 h、在470 ℃下均匀化24 h后风冷至室温，以便均匀析出Al_3Zr，减小晶粒尺寸的不均匀性[13]。材料在450 ℃热压缩试验的真应力-应变曲线见图2。

表2 Al-Zn-Mg-Cu合金的成分(质量分数)

Tab.2 Mass fraction of composition in Al-Zn-Mg-Cu alloy %

w(Zn)	w(Mg)	w(Cu)	w(Zr)	w(Fe)	w(Al)
10	2.3	1.2	0.15	0.05	Bal.

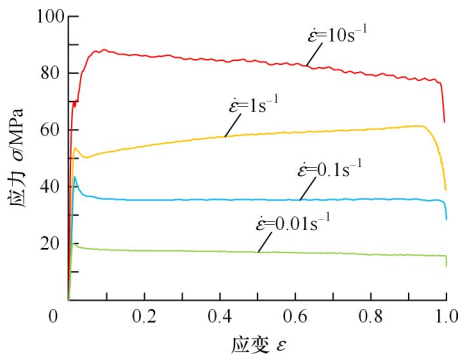


图2 Al-Zn-Mg-Cu合金450 ℃热压缩试验的真应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves of hot compression test for Al-Zn-Mg-Cu alloy at 450 ℃

环件与驱动辊、锥辊、导向辊、芯辊的摩擦因数分别设为0.45、0.40、0.30、0.35。采用C3D6楔形单元对有限元模型进行网格(尺寸为2 mm)划分，生成25 871个节点，如图3所示。为确保网格在轧制过程中不发生过度畸变，采用基于等势算法改进、以长宽比为优先级的ALE(arbitrary Lagrangian Eulerian)自适应网格划分策略。

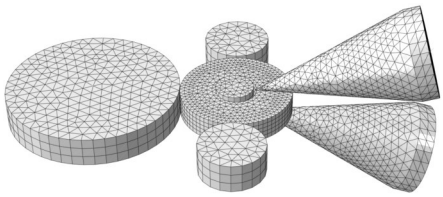


图3　环件轧制前的有限元模型

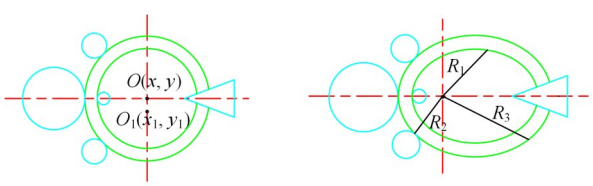
Fig.3　Finite element model of ring rolling before rolling

模型初始规划的边界条件如下：驱动辊转速为1.4 rad/s；仿真时间为135 s；上锥辊在轧制30 s后开始轴向进给，进给速度恒定，90 s时停止的进给量为15 mm；锥辊转速为2 rad/s；导向辊随芯辊进给同步后退；芯辊在轧制开始后均速径向进给，125 s时停止的进给量为25 mm。

1.2　环件圆心偏移量和圆度误差的计算方法

本文以环件圆心偏离驱动辊与芯辊中心连线的瞬时偏离值为环件圆心的瞬时偏移量，以环件瞬时最大半径和最小半径之差表示该时刻的环件圆度误差。有限元模拟中，测量环件尺寸的方法主要是测量辊的间接测量与在环件外径上设置虚拟传感器的直接测量。直接测量具有高精度、实时响应以及能全面获取信息的优点，能更好捕捉环件的细微变化。因此，本文采用直接测量并每秒取样一次，具体操作如下：

轧制过程中，获取环件所有节点和圆心的实时坐标。对比轧制过程的环件圆心实时坐标与初始圆心坐标，得出轧制过程中的环件圆心偏移量，如图4a所示。稳定轧制过程中，环件圆心的平面坐标应为(x,y)。轧辊速度不合理会导致环件作用力不平衡，造成环件圆心偏离驱动辊与芯辊中心的连线。环件圆心移动到$O_1(x_1,y_1)$时，y与y_1的差值为环件的偏移量。得到环件圆心的实时坐标后，计算环件外侧面均匀分布的若干节点到圆心的实时距离。如图4b所示，R_1、R_2、R_3为计算所得的环件外半径，将所有计算得到的外径均值作为该时刻环件的等效半径，并将同一时刻的最大半径与最小半径之差定义为圆度误差[10]。这种方法能充分捕捉环件尺寸的变化特征，准确反映环件实际尺寸在轧制过程中的演变。



(a)环件圆心的偏移　　(b)环件圆度误差

图4　环件的偏心和圆度误差示意图[14]

Fig. 4　Schematic diagram of the offset and the roundness error of the ring

1.3　自适应模型

为减小环件轧制过程中的偏移量和圆度误差，基于有限元模型和二次开发python脚本建立环件轧制自适应控制的仿真模型，流程如图5所示。首先建立环件轧制的有限元模型，设定环件轧制时的最大偏移量和最大圆度误差、最大迭代次数、优化步长。本研究中，最大迭代次数设为100，最大偏移量设为10.5 mm，最大圆度误差设为20.5 mm。随后通过自适应模型初始化轧制参数，进行有限元模拟，并在模拟结束后自动计算环件轧制过程中的环件偏移量和圆度误差。每次计算结束后判定收敛性，若不收敛或误差不满足设定阈值，则通过模型内的轧辊运动控制器，根据环件的偏移量和圆度误差计算导向辊、芯辊、锥辊的新运动轨迹，生成新的环轧有限元模型，再次进行有限元模拟。通过多次迭代实现环件轧制过程的闭环控制和工艺参数优化。达到最大迭代次数或最大偏移量和最大圆度误差同时小于设定值时，程序停止运行，并输出最佳运动轨迹的数据。

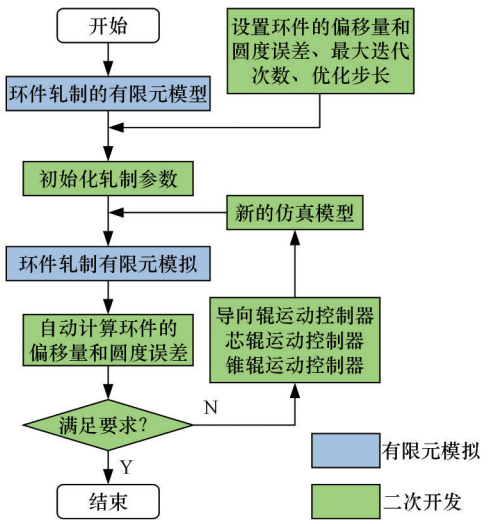


图5　环件轧制过程自适应控制流程图

Fig.5　Adaptive control flowchart of the ring rolling process

自适应程序中，运动控制器通过控制轧辊的位移来控制环件轧制的工艺参数。运动控制器的调整逻辑对优化效率有较大影响。导向辊运动控制器基于环件的偏移量y'控制上下导向辊。将下导向辊到上导向辊的中心连线方向选为正方向（参考图1），通过上一次迭代同一时刻上下导向辊的位移A'_{g1}、A'_{g2}(mm)、偏移量y'(mm)和导向辊调整步长ΔU_g(mm)控制本次模拟的导向辊运动轨迹。本次迭代计算的上下导向辊位移A_{g1}、A_{g2}分别为

$$A_{g1}=\begin{cases}A'_{g1}-\Delta U_g & y'>0\\ A'_{g1}+\Delta U_g & y'<0\\ A'_{g1} & y'=0\end{cases} \tag{1}$$

$$A_{g2}=\begin{cases}A'_{g2}+\Delta U_g & y'>0\\ A'_{g2}-\Delta U_g & y'<0\\ A'_{g2} & y'=0\end{cases} \tag{2}$$

$$\Delta U_g=\begin{cases}0 & 0<|y'|\leqslant 2.5\\ 0.000\,005 & 2.5<|y'|\leqslant 5.0\\ 0.000\,025 & 5.0<|y'|\leqslant 7.5\\ 0.000\,250 & 7.5<|y'|\leqslant 10.0\\ 0.000\,750 & 10.0<|y'|\leqslant 15.0\\ 0.002\,500 & 15.0<|y'|\end{cases} \tag{3}$$

芯辊运动控制器基于环件的圆度误差e(mm)控制芯辊的进给运动,芯辊的瞬时位移为

$$A_m=\begin{cases}A'_m+\Delta U_m & e>5.0\\ A'_m-\Delta U_m & e<2.5\\ A'_m & \text{其他}\end{cases} \tag{4}$$

$$\Delta U_m=0.001(1-e^{-0.1e'}) \tag{5}$$

式中:A'_m为上一次迭代同一时刻的芯辊位移,mm;ΔU_m为芯辊的调整步长,mm。

锥辊运动控制器基于环件的圆度误差e控制锥辊转速,锥辊的瞬时位移A_a为

$$A_a=\begin{cases}A'_a+0.0001 & e>5.0\\ A'_a-0.0001 & e<2.5\\ A'_a & \text{其他}\end{cases} \tag{6}$$

式中:A'_a为上一次迭代同一时刻芯辊的位移,mm。

2 结果与分析

2.1 初始规划的有限元模拟结果分析

采用1.1节给定的边界条件模拟环件的轧制过程。环件成品的外径和高度如表3所示,其中,外径是环件上表面边缘均布的71个点与环件中心距离的均值,高度是环件上端面圆周上均布的12个点到下端面的轴向距离均值。由表3可知,模拟值接近设计值,但环件存在明显的圆度误差。

表3 环件成品的尺寸和误差

Tab.3 Comparison of finished ring size and error mm

	设计值	模拟值	节点误差的标准差
外径	775.00	773.15	13.34
高度	125.00	125.81	3.12

如图6所示,网格在轧制过程中发生局部畸变,但未出现严重扭曲,表明网格质量仍处于可接受范围。动能峰值86 MJ与内能2680 MJ之比为0.032(3.2%),小于5%的准静态分析阈值,因此惯性效应可忽略。沙漏能55.2 MJ与内能之比为0.021(2.1%),小于5%的临界值,表明减缩积分单元引入的数值失真得到有效控制[14-16],验证了数值模型的可靠性。尽管轧制过程中存在网格畸变,但能量指标和最终几何尺寸与其理论值的相对误差在可控范围内,因此模拟结果具有良好的收敛性与物理可靠性。

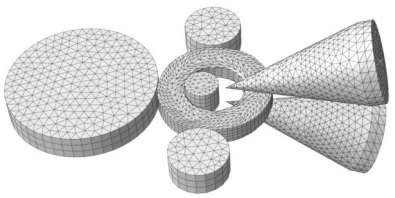


图6 环件轧制后的有限元模型

Fig. 6 The finite element model of the ring after rolling

环件外径扩展曲线见图7。轧制仿真过程中,轧辊与环件的碰撞导致环件外径在增大时出现振荡。

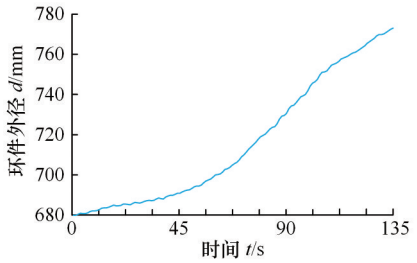


图7 环件外半径扩展曲线

Fig. 7 The expansion curve of the outer radius of the ring

采用初始规划获得的圆心偏移量和圆度误差如图8所示。轧辊与环件的作用力和作用点随轧辊的旋转和进给而变化,引起偏移量和圆度误差的振荡及增大。这是因为在轧制初期,环件尺寸较小,与轧辊的相互作用平稳,受力较平衡,偏移量和圆度误差较小。随着环件半径r的增大,环件转动惯量I增大,改变环件旋转状态所需力矩τ也增大,使轧制后期的力矩更难控制,影响环件变形协调性[17-18]。随着壁厚h的减小,环件刚度K减小,削弱了环件在轧制过程中的动态稳定性,使其易发生不均匀变形,进一步增大偏移量和圆度误差[19]。轧制全程的圆度误差、偏移量的均值分别为13.23 mm和6.20 mm,轧制最后10 s的圆度误

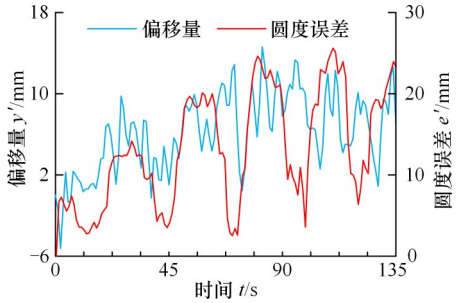


图8 环件轧制初始规划控制的圆心偏移量与圆度误差

Fig. 8 The offset and roundness error of initial planning control of ring rolling

差、偏移量的均值分别为20.32 mm和6.95 mm，可以看出，在轧制后期，偏移量和圆度误差显著增大。

2.2　环件自适应优化结果分析

为探究轧辊对环件的偏移量和圆度误差的影响，设计了基于偏移量的导向辊运动控制器、基于圆度误差的芯辊运动控制器、基于圆度误差的锥辊运动控制器、基于偏移量和圆度误差的轧辊综合控制器（同时控制导向辊、锥辊和芯辊的运动）。图9所示分别为平滑处理后的环轧过程偏移量与圆度误差。4种控制方法均在一定程度上减小了环件的偏移量和圆度误差，其中，轧辊综合控制方法的效果最显著，其他控制方法次之，初始规划方法最差。

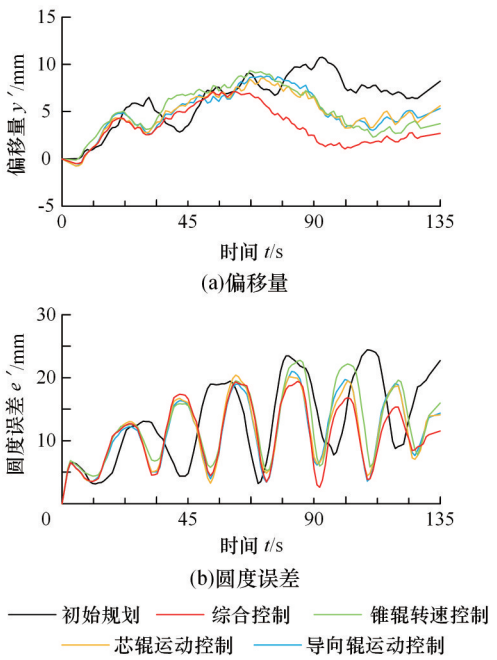


图9　环件轧制过程中的偏移量与圆度误差

Fig. 9　The offsets and roundness errors during the ring rolling process

为探究环件几何尺寸变化对环件稳定性的影响，对比了5种控制方法在全程和最后10 s的偏移量与圆度误差。如表4所示，导向辊运动控制中，轧制后期的偏移量和圆度误差均有一定程度的增大；芯辊运动控制中，轧制后期的偏移量有一定程度的增大，但圆度误差略微减小；锥辊运动控制中，轧制后期的偏移量显著减小，圆度误差略微减小；轧辊综合控制中，轧制后期的偏移量有大幅度减小。由此可知，在环件轧制过程中，不同控制方法对环件偏移量和圆度误差的优化效果存在差异。这主要归因于导向辊、锥辊和芯辊在轧制过程中的不同作用，以及它们在不同阶段对环件影响的差异。

表4　不同控制方法的环件偏移量与圆度误差

Tab.4　The average values of offsets and roundness errors of different control methods　mm

控制方法	偏移量		圆度误差	
	轧制全程	轧制后期	轧制全程	轧制后期
初始规划	6.20	6.95	13.23	20.32
导向辊运动控制	4.90	5.19	11.47	12.01
芯辊运动控制	4.81	5.43	11.58	11.31
锥辊运动控制	4.99	3.99	12.66	12.35
轧辊综合控制	3.33	2.69	10.98	10.42

导向辊主要约束环件的径向位置与径向变形，通过双侧夹持限制环件的自由膨胀，维持轧制的稳定性，影响环件的圆心偏移量及圆度误差。优化过程中，调整导向辊位置可改变径向接触力分布，形成非对称压力场，产生矫正力矩，抑制环件中心的偏移，限制径向非均匀变形，减小偏移量与圆度误差[20]。因此，通过控制导向辊的运动轨迹能减小偏移量和圆度误差，抑制两者在轧制后期的增大。然而，随着环件半径的增大，导向辊对环件的径向约束能力逐渐减弱，难以有效克服环件的惯性力与变形力，导致偏移量有所增大[21-22]。此外，导向辊侧重于调控环件的径向位置，对周向变形的控制有限，所以轧制后期的圆度误差略大于轧制全程的圆度误差。如图10所示，在轧制后期，随着环件径向尺寸的扩大、壁厚减小，转动惯量增大，刚度降低，环件的径向稳定性变差，环件的实际偏移量和圆度误差均增大。

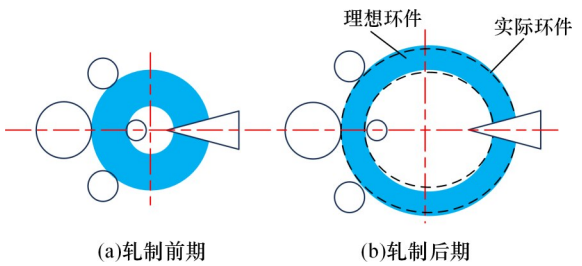


图10　环件轧制示意图

Fig. 10　Schematic diagram of ring rolling

芯辊主要控制环件的径向压下量，进而决定壁厚减小程度和变形速率。芯辊进给速度不合理将导致环件变形不均匀，增大偏移量与圆度误差。优化芯辊速度，使其与环件变形需求匹配，可调控环件等效应变率张量的分布特性。优化后的芯辊速度通过实时反馈调节稳定中性层的偏移量，间接改善几何对称性，减小偏移量与圆度误差。芯辊位于环件中心，无法直接控制环件的径向位置，因此调控环件径向位置的能力较弱[23-24]。优化过程中，芯辊减小了环件轧制过程中的偏移量和圆度误差，但轧制后期的环件径向尺寸增大与环件径向稳定性变差导致偏移量有所

增大。这说明芯辊运动控制对环件径向位置调控能力有限，轧制后期会出现偏移量增大的问题。

锥辊主要起轴向约束作用，调控环件的轴向应变分布[25]。锥辊的轴向进给速度是影响环件轴向应变率的关键因素。依据体积不变原理，轴向应变的改变会影响周向应变。轧制过程中，锥辊在水平方向和垂直方向协同移动，如图11a所示，可有效控制环件的高度，确保环件端面的平行度；锥辊旋转时，环件端面施加的摩擦力矩与主辊提供的驱动力矩共同作用（图11b），成为驱动环件绕自身轴线连续旋转的关键动力源[26]。稳定的自转速度确保环件能持续、均匀地通过由主辊-芯辊构成的径向轧制区和由锥辊构成的轴向轧制区，保证周向变形均匀，有效控制环件的偏移量和圆度误差。合理调整锥辊转速可影响环件的周向延伸，抑制周向残余应力分布的谐波分量，减小周向变形不均匀性及局部应力集中，进而减小环件的偏移量与圆度误差。锥辊通常配备独立的驱动系统，其转速可独立灵活调节，适应性强，能根据环件的转动惯量和刚度等因素的变化进行调整[27-28]。因此，锥辊在轧制后期对环件施加适当的约束力可有效抑制偏移量和圆度误差的增大。锥辊主要提供环件轴向约束和周向旋转驱动，对径向位置的直接影响有限，单独依赖锥辊控制难以实现环件径向位置的精确调节，导致整个轧制过程中的偏移量和圆度误差的优化效果不如综合控制方法。

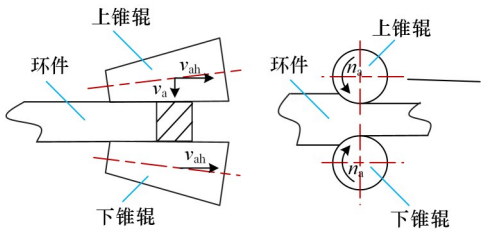


图11 锥辊示意图[26]

Fig. 11 Schematic diagram of the axial roll[26]

轧辊综合控制可充分发挥各轧辊优势，全面控制环件的径向位置、壁厚及周向变形，有效克服了单一控制方法的局限，增加了控制系统的自由度。各轧辊的协同作用优化了环件受力，显著减小轧制过程中的环件所受不平衡力，从而显著减小偏移量和圆度误差。与初始规划的计算结果相比，轧辊综合控制方法使轧制后期的偏移量减小61.29%，圆度误差减小48.72%。

为验证自适应模型的泛化能力，将轧制时间延长至160 s，但各辊转速、上锥辊的轴向进给条件不变，芯辊在仿真开始后即均速进给，其中，进给时间为150 s，总进给量为30 mm。轧制全程和轧制后期的环件偏移量和圆度误差如表5所示。由表5可看出，轧制时间、芯辊进给时间延长且总进给量增大的情况下，环件的偏移量和圆度误差减小。该现象出现的原因是，尽管芯辊进给量的增大导致环件壁厚减薄量有所增大，使环件刚度出现一定程度的减小，但芯辊进给速度恒定与进给时间延长促使更多的材料进入稳态蠕变阶段[29]。该过程显著提高了材料变形的均匀性，有效减少局部应力集中，使环件的偏移量和圆度误差减小。此外，随着轧制时间的延长，环件与各辊接触的接触弧长也有所增大，有助于增强各辊对环件的约束作用，进而抑制环件失圆现象的发生，提高轧制稳定性[22]。

表5 初始规划和轧制时间延长方案的偏移量和圆度误差

Tab.5 Offset and roundness error of initial planning and rolling time extension scheme mm

参数	轧制全程	轧制后期
初始规划的偏移量	6.20	6.95
初始规划的圆度误差	13.23	20.32
轧制时间延长的偏移量	4.56	4.92
轧制时间延长的圆度误差	11.08	12.56

轧制时间延长后，运用轧辊综合控制的自适应模型优化环件轧制模型。如表6所示，与无优化的轧制时间延长方案结果相比，优化后的偏移量和圆度误差均出现不同程度的减小。轧制后期，优化后模型的环件偏移量减小42.07%，圆度误差减小39.89%。这表明该自适应模型依然能有效提升环件的轧制稳定性，进而验证了该自适应模型的适用性。

表6 轧制时间延长方案的优化前后误差

Tab.6 The errors before and after the optimization of the rolling time extension scheme mm

		轧制全程	轧制后期
偏移量	优化前	4.56	4.92
	优化后	2.79	2.85
圆度误差	优化前	11.08	10.54
	优化后	12.56	7.55

3 结论

1）运用ABAQUS有限元软件构建了环件轧制的有限元模型，并借助该模型分析了环件轧制过程中的偏移量和圆度误差。随着轧制的进行，环件的壁厚与刚度逐渐减小，转动惯量增大，导致轧制后期的偏移量和圆度误差显著增大。

2）建立了环件轧制的自适应模型，并提出4

种自适应控制方法。相较于仅控制导向辊、芯辊和锥辊的方法，控制三者的综合方法能更有效减小轧制过程中的环件偏移量和圆度误差。

参考文献：

[1] XIE Dan, OUYANG Qiuyue, HE Luoyu, et al. Feed Curves for Controlling Ring Rolling Stability in Large-scale Flat Ring Rolling Process[J]. Materials, 2023, 16(9): 3383.

[2] GUO Lianggang, YANG He. Towards a Steady Forming Condition for Radial - Axial Ring Rolling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53(4): 286-299.

[3] JENKOUK V, HIRT G, FRANZKE M, et al. Finite Element Analysis of the Ring Rolling Process with Integrated Closed-loop Control[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 267-270.

[4] 钱东升，田汉，邓加东. 面向极大尺度环件径-轴向稳定轧制的环件匀速长大状态精准闭环控制方法[J]. 机械工程学报，2023，59(10)：85-95.
QIAN Dongsheng, TIAN Han, DENG Jiadong. Towards Extremely Large-scale Radial-axial Ring Rolling for Constant Ring Growth State with Accurate Closed-loop Control Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(10): 85-95.

[5] 郝用兴，张红艺，王超峰，等. 基于ABAQUS的导向辊运动优化控制[J]. 河南科技，2017，44(1)：64-66.
HAO Yongxing, ZHANG Hongyi, WANG Chaofeng, et al. The Optimal Control of the Guide Roller Motion Based on ABAQUS[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2017, 44(1): 64-66.

[6] 杨红丽，冯耿，吕鑫，等. 高铁轴承内圈冷辗扩导向辊闭环控制的研究[J]. 机械制造，2016，54(1)：37-39.
YANG Hongli, FENG Geng, LYU Xin, et al. Study on Closed-loop Control of Guide Roller for Cold Rolling of High-speed Rail Bearing Inner Ring[J]. Machinery, 2016, 54(1): 37-39.

[7] HUA Lin, DENG Jiadong, QIAN Dongsheng, et al. Modeling and Application of Ring Stiffness Condition for Radial-axial Ring Rolling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 110: 66-79.

[8] PENG W F, NIU B K, ZHANG J H, et al. A 3D-FEM of Adaptive Movement Control of Guide and Conical Rolls in Ring Rolling Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9): 3287-3298.

[9] 王雨，谢丹，何珞玉，等. 大型异形环件径-轴向轧制芯辊运动自适应控制[J]. 塑性工程学报，2021，28(12)：81-89.
WANG Yu, XIE Dan, HE Luoyu, et al. Motion Self-adaptive Control of Mandrel Roll in Radial-axial Rolling for Large Profiled Ring[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(12): 81-89.

[10] 宁湘锦，汪小凯，华林，等. 超大型环件径轴向轧制过程稳定性与圆度自适应控制方法研究[J]. 中国机械工程，2022，33(11)：1353-1360.
NING Xiangjin, WANG Xiaokai, HUA Lin, et al. Research on Stability and Roundness Adaptive Control Method of Radial and Axial Ring Rolling Processes of Super Large Rings[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(11): 1353-1360.

[11] ZHANG Ke, WANG Xiaokai, HUA Lin, et al. Numerical Simulation of Intelligent Fuzzy Closed-loop Control Method for Radial - Axial Ring Rolling Process of Super-large Rings[J]. Materials, 2022, 15(14): 5084.

[12] ZHANG Zhiwu, LIU Ruxue, LI Dayong, et al. Investigation on Deformation Behaviors and Dynamic Recrystallization Mechanism of Spray Formed Al - Zn - Mg - Cu Alloy under Hot Compression[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 4401-4416.

[13] XIE Zhiqiang, JIA Zhihong, XIANG Kaiyun, et al. Microstructure Evolution and Recrystallization Resistance of a 7055 Alloy Fabricated by Spray Forming Technology and by Conventional Ingot Metallurgy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(10): 5378-5388.

[14] 钱东升，时大方，华林，等. 大型风电轴承套圈滚道轧制数值模拟与实验[J]. 塑性工程学报，2013，20(2)：51-56.
QIAN Dongsheng, SHI Dafang, HUA Lin, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on Raceway Rolling of Large Wind Power Bearing Ring[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(2): 51-56.

[15] Systèmes Dassault. Abaqus Analysis User's Guide (Section 6.3.3: Explicit dynamic analysis)[S]. 2022.

[16] 曹金凤，石亦平. ABAQUS有限元分析常见问题解答[M]. 北京：机械工业出版社，2009：204-210.
CAO Jinfeng, SHI Yiping. Answers to Frequently Asked Questions in ABAQUS Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 204-210

[17] 汤翼，华林，赵玉民，等. 立式轧环机轧制中环件运动学规律[J]. 中国机械工程，2006，17(3)：287-290.
TANG Yi, HUA Lin, ZHAO Yumin, et al. Kinematics Law of Ring in the Ring Rolling Process on a Vertical Ring Rolling Mill[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(3): 287-290.

[18] 潘利波，李汉，左治江. 环件径轴向轧制过程锥辊旋转运动学分析[J]. 机械设计，2021，38(8)：80-83.
PAN Libo, LI Han, ZUO Zhijiang. Kinematic Analysis on the Conical Roll's Rotation during the Process of the Ring's Radial-axial Rolling[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(8): 80-83.

[19] 徐如涛，黄海玲，王克鲁，等. 基于Deform-3D的径轴向环轧有限元模拟时的导向辊约束[J]. 热加工工艺，2012，41(3)：87-88.
XU Rutao, HUANG Hailing, WANG Kelu, et al. Bound of Guide Roll in Radial-axial Ring Rolling Finite Element Simulation Based on Deform-3D[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(3): 87-88.

[20] ZHOU G, HUA L, QIAN D S. 3D Coupled Thermo-mechanical FE Analysis of Roll Size Effects on the Radial-axial Ring Rolling Process[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(3): 911-924.

[21] HUA Lin, PAN Libo, LAN Jian. Researches on the Ring Stiffness Condition in Radial - Axial Ring Rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2570-2575.

[22] UTSUNOMIYA H, et al. Harmonic analysis of residual stress distribution in rolled rings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 715-723.

[23] 漆良涛，肖旻，郑银霞. 深沟球轴承内圈冷辗扩过程中环件直径增长规律研究[J]. 机械工程与技术，2020(3)：219-225.
QI Liangtao, XIAO Min, ZHENG Yinxia. Research on the Diameter Growing Law of the Inner Ring of the Deep Groove Ball Bearing during the Cold Rolling Process[J]. Mechanical Engineering and Technology, 2020(3): 219-225.

[24] 华林，左治江，兰箭，等. 环件冷辗扩芯辊进给速度规范设计[J]. 中国机械工程，2006，17(9)：953-957.
HUA Lin，ZUO Zhijiang，LAN Jian，et al. Control Method Design for Feed Rate of Idle Roller in Cold Ring Rolling [J]. China Mechanical Engineering，2006，17(9)：953-957.
[25] 黄林松，程明忠，黄孝卿，等. J307轮箍径-轴向轧制变形分析[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版)，2023，40(2)：126-132.
HUANG Linsong，CHENG Mingzhong，HUANG Xiaoqing，et al. Deformation Analysis of Radial-axial Rolling Process of J307 Railway Tyre[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)，2023，40(2)：126-132.
[26] ZHOU Guang，HUA Lin，QIAN Dongsheng，et al. Effects of Axial Rolls Motions on Radial-Axial Rolling Process for Large-scale Alloy Steel Ring with 3D Coupled Thermo-mechanical FEA[J]. International Journal of Mechanical Sciences，2012，59(1)：1-7.
[27] ALLWOOD J M，TEKKAYA A E，STANISTREET T F. The Development of Ring Rolling Technology [J]. Steel Research International，2005，76(2/3)：111-120.
[28] DENG Jiadong，DI Liang，YUAN Tian，et al. A Novel Constrained Ring Rolling Process of Deep-groove Rings by Coordinate Controlling the Roller Motion[J]. International Journal of Material Forming，2025，18(1)：20.
[29] MONTMITONNET P. Hot and Cold Strip Rolling Processes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering，2006，195(48/49)：6604-6625.

(编辑 张 洋)

作者简介：魏宽居，男，1999年生，博士研究生。研究方向为铝合金塑性成形。E-mail：Kuanju. Wei17@student. xjtlu. edu. cn。杨丽童*(通信作者)，男，1994年生，博士。研究方向为高端金属结构材料的成分设计、微观组织与变形机理。E-mail：yangyt@mat-jitri. cn。

本文引用格式：
魏宽居，李大永，顾天虹，等. 基于环件偏移量和圆度误差的轧辊运动轨迹自适应控制[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1763-1770.
WEI Kuanju，LI Dayong，GU Tianhong，et al. Adaptive Control of Roll Motion Trajectory Based on Ring Offset and Roundness Error [J]. China Mechanical Engineering，2026，37(7)：1763-1770.

(上接第1762页)

[17] KANG K，TAN B Q，ZHONG R Y. Multi-attribute negotiation mechanism for manufacturing service allocation in smart manufacturing[J]. Advanced Engineering Informatics，2022，52：101523.
[18] YANG Dong，LIU Qidong，LI Jia，et al. Multi-objective Optimization of Service Selection and Scheduling in Cloud Manufacturing Considering Environmental Sustainability [J]. Sustainability，2020，12(18)：7733.
[19] LIU Xin，REYNOLDS A C. Gradient-based Multi-objective Optimization with Applications to Waterflooding Optimization [J]. Computational Geosciences，2016，20(3)：677-693.
[20] HUANG La，CHEN Jiawei. Weighted Robust Optimality of Convex Optimization Problems with Data Uncertainty [J]. Optimization Letters，2020，14(5)：1089-1105.
[21] KUMAR R A，KARTHEEBAN K. Resource Allocation Using Dynamic Pricing Auction Mechanism for Supporting Emergency Demands in Cloud Computing[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing，2021，158：213-226.
[22] ZHU Qinghua，TANG Huan，HUANG Jiajie，et al. Task Scheduling for Multi-cloud Computing Subject to Security and Reliability Constraints[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica，2021，8(4)：848-865.
[23] SUN Hao，WU Tingying，BAI Qinyang，et al. Improved Adaptive Large-scale Neighborhood Search Algorithm for Electric Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Linear Weight-related Discharging[J]. Expert Systems with Applications，2025，280：127344.
[24] YANG Senyan，ZHANG Ruiyan，MA Ying，et al. Adaptive Large Neighborhood Search Incorporating Mixed-integer Linear Programming for Electric Vehicle Routing Problem with Mobile Charging and Nonlinear Battery Degradation[J]. Applied Soft Computing，2025，175：112988.
[25] HE Pengfei，CHEN Wenchong，WU Qinghua，et al. Capacitated Profitable Tour Problem with Cross-docking[J]. Computers & Operations Research，2025，181：107077.
[26] HE Lei，GUIJT A，de WEERDT M，et al. Order Acceptance and Scheduling with Sequence-dependent Setup Times：a New Memetic Algorithm and Benchmark of the State of the Art[J]. Computers & Industrial Engineering，2019，138：106102.

(编辑 张 洋)

作者简介：陈文冲，男，1990年生，副教授。研究方向为工业互联网平台运营、制造服务供需匹配。发表论文20余篇。E-mail：wcchen@hdu. edu. cn。刘洪伟*(通信作者)，男，1971年生，教授。研究方向为智能制造、工业工程与管理。E-mail：1016209007@tju. edu. cn。

本文引用格式：
陈文冲，吕雪婷，戚杰辉，等. 考虑制造资源竞拍方案组合的平台订单接收与调度优化[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1763-1771.
CHEN Wenchong，LYU Xueting，QI Jiehui，et al. Optimization of Platform Order Acceptance and Scheduling Considering the Portfolio of Manufacturing Service Resource Bidding Options[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(7)：1763-1771.