

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.02.005

冷弯成形轧辊快换机组设计

程深圳^{1,2}, 蒋毅^{1,2*}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122;
2. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:针对更换轧辊过程中存在劳动强度大、效率及调节精度低等问题,课题组设计了一种冷弯成形轧辊快换机组。该机组采用PLC作为系统控制器,结合传感器检测信号与人机交互界面指令信号设计了轧辊位置自动调节系统,通过控制伺服电机驱动左轮转盘装置旋转来实现换辊过程,并利用槽销连接实现装置周向固定;利用伺服电机驱动蜗轮减速器运动,进而使得丝杠带动左轮转盘装置上下移动产生位移;采用限位开关标定转盘零点位置,通过位移传感器监控轧辊移动距离并构成闭环控制系统,从而精确调节轧辊间距;对机组关键部分进行了选型与有限元强度校核。结果表明:该机组能显著提高换辊精度及效率,提高自动化水平。该机组能完成6种规格轧辊的自动更换过程及辊缝精确调节,为冷弯成形机组的设计与改进提供了新的思路。

关键词:冷弯成形;轧辊快换机组;PLC;调节精度;有限元分析

中图分类号:TS103;TH39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)02-0029-06

Design of Roll Quick Changing Unit for Cold Bending Forming

CHENG Shenzhen^{1,2}, JIANG Yi^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity, low efficiency and low adjustment accuracy in the process of roll replacement, a cold bending forming roll quick-changing unit was designed. The roll position automatic adjustment system was designed by adopting PLC as the system controller, combining the sensor detection signal and human-machine interaction interface command signal. The roll changing process was realized by controlling the servo motor to drive the rotation of the left wheel device, and the slot pin connection was used to realize the device circumferential fixation. The servo motor was used to drive the worm gear reducer, and the displacement of the lead screw driven left wheel turntable device to move up and down was achieved. A limit switch was used to calibrate the zero position of the turntable, and a closed-loop control system was constructed to monitor the roll moving distance through a displacement sensor, so as to accurately adjust the distance between rolls. The key parts of the unit were selected and the finite element strength was checked. The results show that the unit can significantly improve the precision and efficiency of roll change and improve the level of automation. The machine can complete the automatic change process of six kinds of rolls and the precise adjustment of roll gap, and provides a new idea for the design and improvement of cold forming machine.

Keywords: cold bending forming; roll quick changing machine; PLC (Programmable Logic Controller); adjustment accuracy; FEA (Finite Element Analysis)

冷弯成形,即板材在轧辊模具的挤压作用下发生塑性变形从而生成指定形状产品的过程^[1]。冷弯成形是一种高效、节能、节材和环保的金属成形技术,应用领域广泛,已成为大批量金属板材加工生产的主要

收稿日期:2022-09-03;修回日期:2022-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675233)。

第一作者简介:程深圳(1997),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究方向为辊弯成形关键技术。通信作者:蒋毅(1981),男,江苏无锡人,博士,副教授,研究生导师,主要研究方向为智能制造、机电控制。E-mail:30178632@qq.com

方法之一^[2]。然而冷弯成形机组在实际生产中却存在换辊步骤繁琐、轧辊更换效率低下、调试过程精度不高、可靠性及自动化程度低等缺点^[3]。具体体现在以下方面:工人需要根据订单需求确定轧辊数量及规格,换辊过程中往往需要4~5人手动完成并通过目测和已有经验进行机组调试。用时3~4h,精度和效率都很难得到保证。针对以上问题,课题组设计了一种新型轧辊快换装置:将6组适用于不同规格的轧辊组布置在左轮转盘上,通过旋转左轮转盘进而更换轧辊。考虑到PLC具有可靠性强、抗干扰能力强、维护方便及能耗少等优点^[4-7],以PLC作为上位机控制轧辊位置的移动,用限位开关标定换辊的零点位置,通过人机交互界面及PROFINET网络通信实现对轧辊快换系统的自动控制及实时监测。该装置可实现轧辊的快速更换及辊缝位置的精确调整,为提高辊弯成型自动化水平提供设计思路。

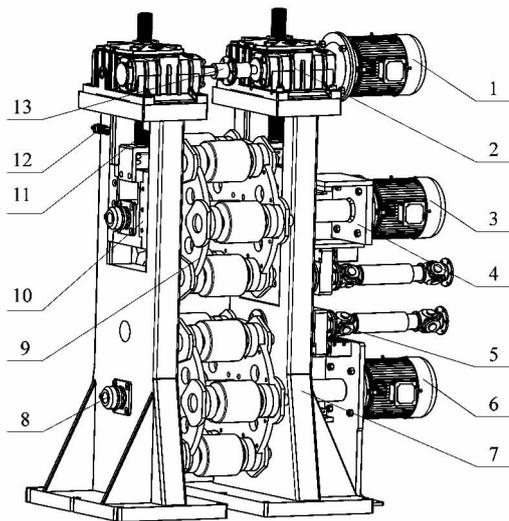
1 机械结构设计

1.1 装备整体机械设计

针对当前成形机组更换轧辊存在的问题,课题组设计了冷弯成形轧辊快换机组,如图1所示。轧辊快换机组机械部分主要由左右支撑机架、左轮转盘、左轮转盘驱动装置、快换接头装置、滑块-丝杠装置、角度传感器、位移传感器、限位开关和气缸等组成。支撑机架通过地脚螺栓固定在地面的钢板上。左轮转盘装置共2个,呈上下布置;上左轮转盘装置与滑块-丝杠装置连接,可随滑块-丝杠装置一起上下移动。下左轮转盘装置两端的轴承固定在左右立柱孔中,使得该转盘装置只能绕自身轴线旋转而不能上下移动。

1.1.1 滑块-丝杠装置

伺服电机1驱动蜗轮减速器运动,经丝杠传递动力带动滑块-丝杠装置做直线运动。两侧滑块与支撑机架凹槽相接触处形成滑动副,滑块-丝杠装置带动左轮转盘装置上下移动。滑块上方安装有拉线式位移传感器,实时监控滑块-丝杠装置行程,并发送信号至PLC通过变频器调节伺服电机1的转速、转向及开停。机架上安装有限位开关,用以标定左轮转盘的零点位置。依靠蜗轮减速器具有的自锁性,可实现滑块-丝杠装置的自锁。



1—伺服电机1;2—蜗轮减速器;3—伺服电机2;4—左轮转盘驱动装置;5—快换接头装置;6—伺服电机3;7—支撑机架;8—角度传感器;9—左轮转盘装置;10—滑块-丝杠装置;11—位移传感器;12—限位开关;13—联轴器。

图1 轧辊快换装置整体设计

Figure 1 Overall design of quick roll changing machine

1.1.2 左轮转盘装置

6对快换轧辊组均匀布置并固定在左右支撑板边缘,相距60°。为减少装置工作时的振动,在支撑板外侧和滑块间加入平衡套筒。平衡套筒上开有销钉孔,更换轧辊完成后可通过槽销连接实现滑块与平衡套筒的固定,进而固定左轮转盘装置。转盘主轴上安装有角度传感器,当旋转角度与预设角度一致时,PLC发出指令,控制左轮转盘驱动装置中的伺服电机2和伺服电机3停止转动。

1.1.3 左轮转盘驱动装置

左轮转盘驱动装置控制左轮转盘装置的旋转,用以更换轧辊。左轮转盘装置旋转至合适位置后,PLC发出指令控制气缸带动槽销运动。驱动装置的连接侧板固定在滑块-丝杠装置中,随滑块一起上下移动。

1.1.4 快换接头装置

主要由快换接头、气缸和轴承组件组成,用来对接轧辊轴与快换接头,并通过联轴器将动力传递给轧辊。气缸固定在左轮转盘驱动装置中的连接底板上,与滑块-丝杠装置保持相对静止。三轴气缸推杆部分与轴承密封件固连,快换接头穿过轴承密封件并通过快换

套筒与万向节联轴器相连。左轮转盘旋转完毕并实现周向位置后,PLC发出指令,气缸带动快换接头沿轴向运动,与轧辊轴实现对接及动力传递。

1.1.5 轧辊组

6对轧辊组均匀布置在转盘上,相邻2轧辊组相隔为 60° 。

1.2 轧辊快换工作流程

冷弯成形轧辊快换装置在工作时,考虑到换辊精度,采用限位开关标定轧辊零点位置并要求每次换辊前装置必须进行复位处理。由于轧辊在转盘上均匀布置,可通过控制伺服电机的转速及转动时间精确控制转盘旋转角度,从而达到更换另一规格轧辊的目的,具体工作流程如图2所示。

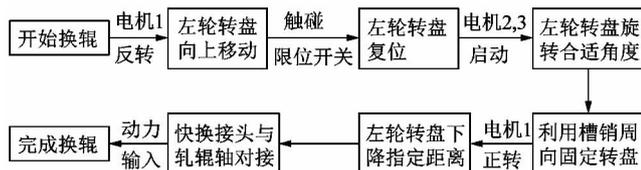


图2 工作流程图

Figure 2 Flow chart of work

2 选型与计算

2.1 滑块-丝杠装置核算

在冷弯成形轧辊快换装置中,左轮转盘装置的升降机构即滑块-丝杠装置是机组设计的核心问题。将滑块-丝杠装置简化为滚珠丝杠升降台,针对结构的现有参数及工作进行参数计算及选型。在对滚珠丝杠升降机的计算中,应首先明确工作参数要求。轴向工作载荷为 $F_e = 4 \text{ kN}$,支撑距离为 $H = 40 \text{ mm}$,螺母有

表1 JWB-MULI4 滚珠丝杠升降机相关参数

Table 1 Related parameters of JWB-MULI4 ball screw lift

最大载荷/kN	丝杠直径 d_0 /mm	导程 S_0 /mm	减速比 i	平均效率 $\eta/\%$
50	40	7	7:1	21~26
容许最大功率 P_a /kW	空转转矩 $M_0/(N \cdot m)$	容许输入转矩 $T_a/(N \cdot m)$	保持转矩 $T_0/(N \cdot m)$	输入轴每转一圈对应丝杠轴向位移量/mm
2.1~4.0	0.25~0.35	84	18	0.71

2.2 转盘主轴校核

左轮转盘装置两端由轴承支撑,结构上可视为齿轮轴结构^[9],图3为转盘主轴的结构图。由图可知,左

效行程 $S = 300 \text{ mm}$,导程 $L = 10 \text{ mm}$,丝杠平均转速 $n = 60 \text{ r/min}$ 。由参考文献[8]知,当滚珠丝杠副在受到轴向载荷 F_e 的作用时,会在滚珠丝杠的公称直径 d_0 处产生螺纹转矩 M ,当丝杠螺母不存在预紧力且忽略轴承力矩的条件下,可将螺纹转矩 M 视为驱动转矩 M_T ,即

$$M_T = M = F_e \tan(\lambda + \rho_d) = \frac{F_e \cdot P}{2\pi\eta} \quad (1)$$

由于摩擦及预紧力的存在,可将式(1)改写成式(2)更符合实际驱动驱动,即在原来的基础上引入传动比及空转驱动转矩。

$$M_T = \frac{F_e}{2 \cdot \pi \cdot \eta} \cdot \frac{P}{i} + M_0 \quad (2)$$

式中: F_e 为作用在丝杠直线推杆的实际作用力,kN; P 为丝杠导程; λ 为螺纹升角, $\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi d_0}\right)$; η 为传动效率, $\eta = \frac{\tan \lambda}{\tan(\lambda + \rho_d)}$; i 为传动比; M_0 为空转驱动转矩, M_0 是在室温下用液体润滑脂润滑并短暂运行后进行测量的数值。

需要注意的是,通过公式计算出的 M_T 为连续运转时所需转矩,启动转矩(起步转矩和加速转矩)比连续运转时所需转矩大得多,初始启动转矩约为额定转矩的3~5倍。

经过计算,可得驱动转矩为 $2.02 \text{ N} \cdot \text{m}$,启动转矩为 $8.04 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。选用JWB-MULI4型梯形丝杠蜗轮升降机,该升降机的相关参数如表1所示。通过对比该升降机的参数可知,该升降机的最大载荷、保持扭矩等参数均符合工作条件,可完成提升任务。

右两侧平衡套筒的重心位置分别为 X_1 和 X_2 ,左轮转盘安装位置跨距为 Y 。在更换轧辊时主轴会受到扭矩和弯矩的共同作用,主轴的强度和刚度决定了装置工

作时的可靠性与准确性,因此有必要使用 ANSYS 软件对主轴进行有限元静力学分析。

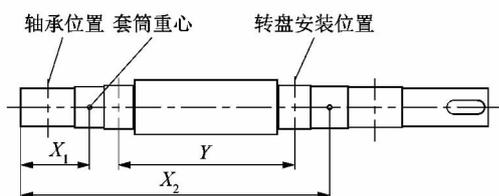


图3 左轮转盘主轴结构

Figure 3 Main shaft structure of revolver wheel

选用 Workbench 材料库中的碳素结构钢作为左轮转盘主轴材料,其材料属性如表 2 所示。为便于有限元分析计算,有必要做出以下简化:平衡套筒简化为质点,左轮转盘简化为等效圆盘,并忽略一些细小特征(过渡圆角,退刀槽,倒角等)。在有限元分析过程中,网格精度决定了计算精度。采用 Multizone 网格划分方式,将有限元模型划为六面体网格单元,节点数为 682 530,单元数为 365 250。最小网格单元设置为 1 mm,满足计算精度要求。

表2 碳素结构钢材料属性

Table 2 Material properties of carbon structural steel

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
7 850	200	0.3	250

平衡套筒简化为质点,在 SolidWorks 中对其赋予材料属性即可自动计算出套筒质量及沿各个方向的转动惯量。左轮转盘布置在主轴上,可根据力平衡及力矩平衡条件,将其等效为相应力载荷。主轴与轴承接触处的边界条件设置为仅压缩支撑。对主轴施加扭矩载荷,大小由系统惯性载荷决定。

Workbench 对有限元模型求解完成后,可得到主轴的应力云图,如图 4 所示。由图 4 可知,左轮转盘主轴的最大应力出现在轴端面处,为 32.16 MPa,小于材料的屈服极限 250 MPa,可以保证主轴在更换轧辊过程中的安全性及稳定性。

3 轧辊快换装置的自动控制方案

3.1 控制方案总体设计

为精准高效调节轧辊辊缝距离,考虑到 PLC 具有可靠性高、维护方便、容易改造等特点,选用西门子

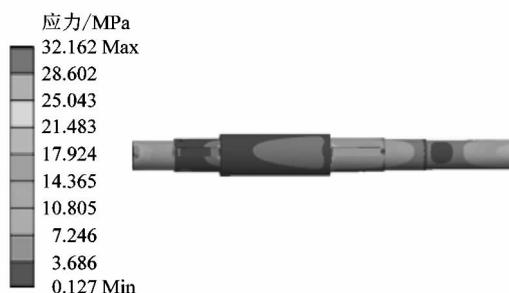


图4 主轴应力云图

Figure 4 Stress cloud chart of spindle

PLC 作为工控机控制伺服电机来驱动蜗轮减速器,从而带动左轮转盘装置上下移动来调节上下轧辊辊缝距离。在左轮转盘装置上安装角度传感器,实时检测左轮转盘装置的旋转角度;在机架孔内安装限位开关,用来标定左轮转盘零点位置;在滑块装置上方安装距离检测传感器实现对左轮转盘位移的实时监控进而提高轧辊快换精度;选用气缸驱动快换接头动作,实现快速对接。

3.2 控制方案硬件设计

根据控制系统总体设计方案,选用西门子 S7-1500 型 PLC 控制器作为主控 PLC,选用 IM 155-6 PN HF I/O 拓展模块作为从控 PLC。PLC 的输入信号来自开关、报警信号以及经过逻辑电路运算处理得到的传感器信号,输出信号主要用来控制气缸、伺服电机驱动器及传感器等,系统硬件结构图如图 5 所示。

为提高调辊精度并考虑到现场安装环境油污较为严重,选用金属式限位开关,最小触发距离为 1.2 mm。选用的拉绳式位移传感器其钢丝绳在自卷弹簧作用下始终处于拉紧状态,可通过钢丝绳的直线位移转化为旋转量从而测量出左轮转盘装置的下降位移。选用高精度角度传感器,角度量程可达到 $\pm 2\ 000^\circ$,测量精度为 0.001° 。

3.3 系统控制软件设计

依据控制方案总体设计和硬件组成进行了控制系统软件和触摸屏界面的设计^[10-11],系统主程序换辊流程图如图 6 所示。换辊开始时左轮转盘进行复位,限位开关被激活并向 PLC 发出信号,经 PLC 程序处理及运算后,进行逻辑控制。位移传感器、角度传感器的测量数据以模拟量电信号进入 PLC,从而决定伺服电机

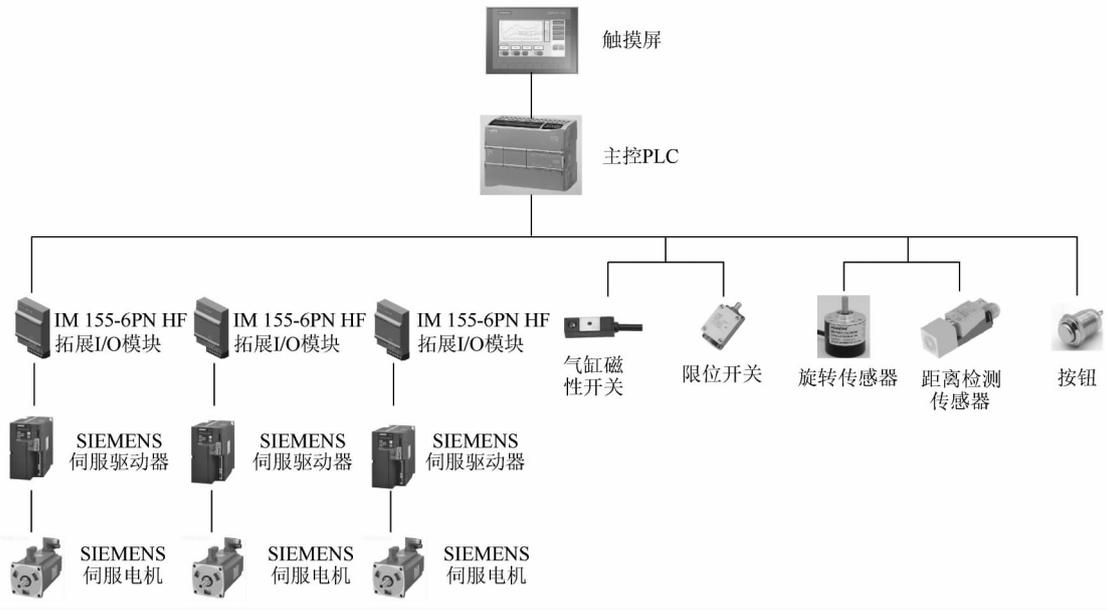


图5 系统硬件结构图

Figure 5 System hardware structure diagram

的转速、转向以及启停。在装置工作过程中,PLC 控制电器进行运行状态监控、实时数据采集、意外事故报警,控制相应电机和设备停止,并输出故障结果。

人机交互界面包括系统主界面、产品选型界面、故障报警界面、工作轧辊参数显示界面、轧辊库界面、轧辊数据实时监控界面、工艺调试界面和权限登录界面。其中系统主界面可显示装备当前运行状态、成型主机状态信号、生产计划及报警信息等。人机交互界面系统设计如图7所示。

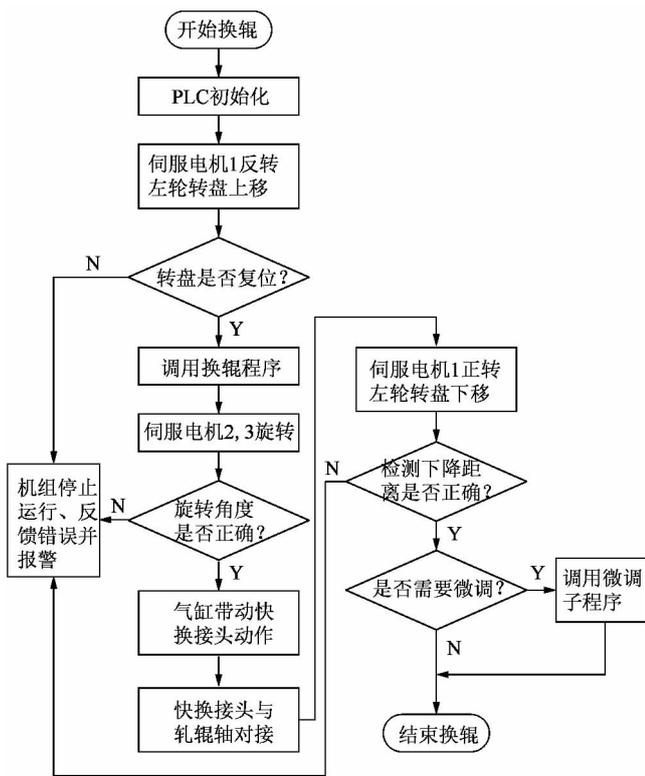


图6 PLC控制软件流程图

Figure 6 Flowchart of PLC control software

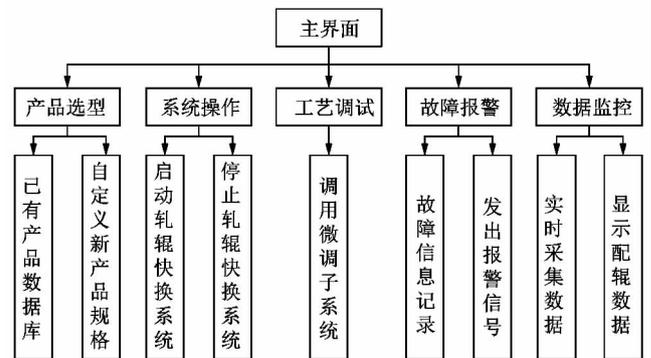


图7 人机交互界面系统设计

Figure 7 Design of human-computer interaction interface system

4 结论

课题组提出了一种冷弯成形轧辊快换装置的设计方法,并将滑块-丝杠装置简化为滚珠丝杠升降机、左轮

(下转第41页)