

装备与成套技术

精锻机专用控制系统的设计与实现

马鹏举¹, 兰小龙¹, 王文杰¹, 刘 勇², 田 洁²

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 西安创新精密仪器研究所 技术部, 陕西 西安 710300)

摘要: 提出了一套完善且实用的精锻机专用控制系统研发方案, 包括开发润滑系统以保护主机锻造箱和操作机夹头等关键部件, 设计液压辅助系统为精锻机提供稳定的源动力。同时, 基于精锻机高频旋转锻造原理规划了锤头锻打、夹头旋转和操作机进给等运动控制系统。在此基础上, 采用工业控制计算机和4类多功能控制卡的控制模式对专用控制系统进行具体实现。以Python作为软件开发工具, 利用多功能控制卡、PLC和中间继电器实现了稳定的软硬件通讯, 很好地实现了对精锻机各子系统的高精度控制。研发了具有自主知识产权的精锻机专用数控系统, 为精锻机的应用和继续改进奠定了基础。

关键词: 精锻机; 润滑; 运动控制; 多功能控制卡; 数控软件开发

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.019

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 02-0149-12

Design and realization on special control system for precision forging press

Ma Pengju¹, Lan Xiaolong¹, Wang Wenjie¹, Liu Yong², Tian Jie²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Engineering Department, Xi'an Innovation Precision Instrument Research Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract: A complete and practical research and development scheme for the special control system of precision forging press was proposed, including the development of a lubrication system to protect key components such as main engine forging box and manipulator chuck etc., and the design of a hydraulic auxiliary system to provide a stable source of power for precision forging press. Moreover, the motion control systems such as the forging of hammer head, the rotation of chuck and the feeding of manipulator were planned based on the principle of high-frequency rotary forging for the precision forging press. On this basis, the special control system was realized by the control mode of industrial computer and four multi-function control cards. Using Python as a software development tool, the multi-function control card, PLC and intermediate relays were used to realize the stable software and hardware communication and the high-precision control of each subsystem for the precision forging press. Thus, the special numerical control system for precision forging press with independent intellectual property rights was developed which lays the foundation of the application and continuous improvement of precision forging press.

Key words: precision forging press; lubrication; motion control; multi-function control card; NC software development

精锻机, 国外又称“径向锻机”, 是由对称分布的4个锤头对自旋转锻件进行高频往复锻打的一种大型工业锻造设备^[1-3], 其4个锤头的同步锻打使得锻件承受三向压应力, 可焊合内部金属铸造组织空洞型缺陷^[4], 且其旋转锻造方式使锻件圆周面得到均匀加工, 大大提高了表面精度^[5]。

精锻机具有加工自动化程度高、生产效率高

和锻透性好的特点^[6], 广泛应用于国防工业、航空航天、汽车制造等重要领域^[7-8]。锻造产品包括炮管和速射武器、机床切削刀具、特种钢、铁路车轴、飞行器密封接头、球形高压储气罐和火箭喷管^[9-10]等关键零部件, 是不可或缺的大国重器。

精锻机非常契合于我国锻造业的发展, 但该设备集电气、机械以及液压等综合技术于一体, 内含的多个机械部件协同工作共同实现锻造功能, 控制难度高。首先, 精锻机运行环境恶劣, 容易产生高频锻打噪声、机器振动与液压管路油液泄漏污染等

收稿日期: 2022-04-19; 修订日期: 2022-07-20

基金项目: 国家科技重大专项 (2019ZX04018001-9)

作者简介: 马鹏举 (1962-), 男, 博士, 副教授

E-mail: lanxlbuaa@126.com

问题^[11]。其次,精锻机锻造过程涉及温度、轴向进给速度、径向压下率和锻造比等参数,其中,锻件温度过高会造成纤维组织不均匀,轴向进给速度过高不利于去棱且影响应力分布,径向压下率增大会粗化晶粒,锻造比控制不当会出现心部锻不透现象,每个参数控制不当均会对锻件质量产生巨大的影响^[12]。并且,精锻机各部件常处于高速、高压的工作状态,这需要对润滑油液的压力和温度精确控制,对各类电气液压设备的启停顺序也要严格要求,只有各项条件满足后整机才能运行正常,达到良好的锻造工艺效果^[13-14]。因此,精锻机控制系统可称为精锻机的“心脏”,决定着精锻机整机的功能运转和可靠性。

国际通用的机械式 SX 型、SKK 型精锻机由奥地利公司独家研发,液压式 SMX 型精锻机由德国 SMS MEER 公司自主研发^[15-18]。截至目前,上述设备的开发技术依旧处于封锁阶段,其控制原理和实现方法也从未公开。

近年来,国内有研究人员陆续开展了精锻机控制系统的探索。最初,介绍了有关监测系统,该系统由 GFM 公司开发,借助传感器对工件位移、速度、主机电流和功率等工艺参数进行监测,逐步排查出故障点并进行有效的信息提示^[19]。王飞伟^[20]自主设计了一套精锻机锻造功率监测系统,在功率波动超过上限时会发出报警信息,再经工作人员手动调整恢复正常。

也有研究是基于精锻机的各个执行动作控制与实现来展开。暴怀乾等^[21]应用 PLC 实现了锤头调整和夹头进给的控制,结果表明其具有较好的锻造精度。陈殿领^[22]对老旧精锻机电气系统进行数控化改造,利用 SIMOTION C 核心控制器和 PROFIBUS 工业现场总线搭建了控制系统。李显通^[23]进行了精锻机电控系统的改造,重点阐述了液压传动控制系统、人机接口系统、温度测量系统和多频制动系统的改造过程。苏振华等^[24]基于 3 MN 液压式精锻机设计了一种 PID+前馈的控制方式来调节锤头位移,选择 RMC75E 运动逻辑控制器来负责液压油缸精密定位和力控制,以及多油缸协调同步和协调加载的控制。上述研究为探究精锻机专用控制系统提供了良好的设计思路,但多以实用性为主,缺少智能化处理且开发成本较高。本文针对精锻机高频旋转锻造的运行原理,提出了专用控制系统的详细设计方案和具体实现方法,开发出先进的工业软件,控制精锻机平稳高效运行,发挥其锻造性能和优势,为

后续精锻机的国产化应用及改进奠定了良好的基础。

1 精锻机结构及运行原理

精锻机主要由位于中间位置的主机锻造箱和两侧的操作机组成,如图 1 所示。

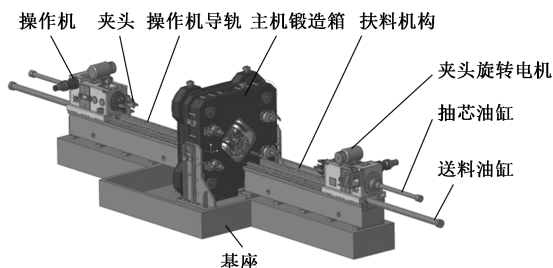


图 1 精锻机整机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overall structure for precision forging press

位于中间位置的主机锻造箱负责执行高频锻打任务,其外有壳体保护,内部由空间对称布置的 4 个锤头、驱动齿轮和偏心轴运动的连杆等机构组成。齿轮组将电机动力传递至 4 个锤头,实现径向同步锻打。

操作机位于主机锻造箱两侧,其一端为用于夹持工件的夹头,另一端为用于抽芯与送料进给的油缸,整机可沿导轨前进与后退。操作机顶部有一台夹头旋转电机,在导轨中间靠近主机锻造箱位置处置有扶料机构,防止热锻件因自重等因素弯曲而影响锻件成品质量。

精锻机工作时,操作机夹头夹持锻件沿导轨方向轴向进给,将其送入主机锻造箱进行高频锻打,同时在锤头锻打间歇完成自旋转,最终实现均匀锻造^[25]。

根据精锻机的运行原理,提出完善的精锻机专用控制系统方案,划分为辅助控制系统与运动控制系统两大类,辅助控制系统包括润滑系统和液压系统等,运动控制系统包括锤头锻打控制、锤头位置调节、夹头旋转控制和操作机进给控制等,具体子系统如图 2 所示。通过各子系统的协作配合,精锻机能够安全运行,实现锻造需求。

2 辅助控制系统

工业中因机器润滑保养不当而导致生产事故的情况时有发生,机器缺少润滑极易造成接触面磨损,还会发出噪声甚至产生大量铁屑,使系统整体运行受阻,严重时甚至造成机器损毁。

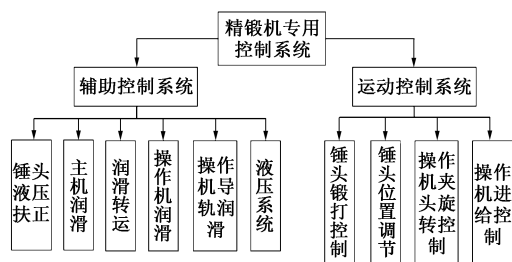


图2 精锻机控制子系统分类示意图

Fig.2 Schematic diagram of control subsystem classification for precision forging press

精锻机各机械部件造价成本高,装配复杂,且在锻造过程中又容易发生磨损,其性能、精度均会不同程度地降低。因此,设计一套可靠的润滑系统具有十分重要的意义,系统对机械部件进行润滑保养,以延长设备的使用寿命。

润滑系统中油的质量为首要条件,润滑油质量差不仅起不到润滑作用,还会腐蚀机械部件的表面。其次,润滑油温度是系统正常工作的关键,润滑油温度过高会促使油液变质,还会稀释油液降低粘性,加大油的泄漏;润滑油温度过低,则会产生较大的吸油阻力,不便于电机启动抽油泵,系统的压力损失也会增大。此外,管路中油液的清洁十分重要,油液内部产生的杂质颗粒将会划伤、磨损零件,严重时出现卡死现象,使润滑系统无法正常工作。

2.1 主机润滑及润滑转运系统

主机润滑系统的功能非常强大。首先,对主机锻造箱内的偏心轴及铜套进行可靠润滑,防止铜套发热抱死,减少精锻机高频锻打运行时的摩擦阻力;其次,对齿轮箱的各个联动齿轮进行润滑,减小齿轮转动摩擦,保证4个锤头同步动作;此外,循环流动的润滑油能够确保金属表面不被腐蚀,形成润滑保护层,同时带走锤头锻打过程中产生的机械摩擦热量,冲洗掉机械零件接触面磨损产生的铁屑,降低功率的消耗。主机润滑系统液压原理图如图3所示。

主机润滑系统运行时,润滑电机5控制润滑泵的启动,带动整个主机润滑系统工作;液位继电器4负责检测润滑油箱液位,液位过低则报警停机;温度传感器2安置在油箱不同点位用以检测润滑油温,油温过低,便启动加热器1,过热即报警并发出信号提示现场人员启动冷却操作;管路过滤器8则负责滤除润滑油在机体循环流动时混入的机械杂质,以及受温度波动内部产生化学反应后的炭渣质等,防止出口堵塞;压力传感器10确保润滑泵出口侧油液压力正常。上述各硬件配合使用以保证润滑

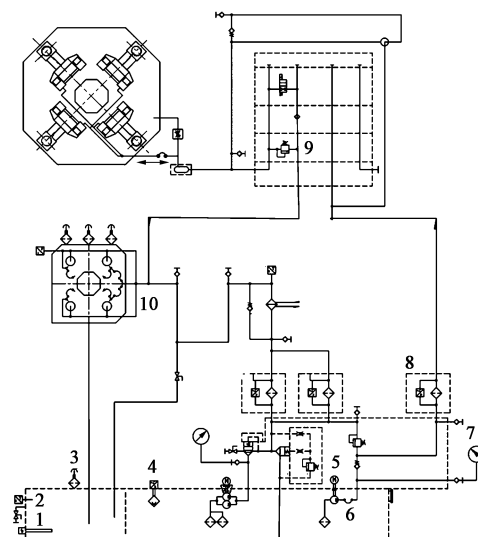


图3 主机润滑系统液压原理图

1. 加热器 2. 温度传感器 3. 加油口 4. 液位继电器
5. 润滑电机 6. 齿轮泵 7. 压力表 8. 管路过滤器
9. 叠加式溢流阀 10. 压力传感器

Fig.3 Hydraulic principle diagram of main engine lubrication system

油液以合适的温度进入主机锻造箱内完成润滑任务。

为了配合主机润滑系统完成整机的润滑工作,还需设计润滑转运系统,与主机润滑系统形成闭环控制。润滑转运油箱安装在低处,润滑油在流经主机锻造箱对所有机械部件进行充分润滑和散热后,由于重力作用自然流入润滑转运油箱进行储存,转运油箱可对润滑油掺入的铁屑杂质进行沉淀,然后利用转运电机带动抽油泵将润滑油液送回润滑油箱,完成润滑油的转运循环。类似地,润滑转运系统配有液位继电器,可实时监测转运油箱液位,液位过高时主机润滑和润滑转运系统均会停止工作。

实际工况下,精锻机完成锻造任务后,主机锻造箱内的润滑油液会慢慢沉积在转运油箱内,短时间内无法完全清空,因此,在下次启动主机润滑系统前,需要先启动润滑转运系统将该部分油液送回润滑油箱,保证润滑油箱内有足够的润滑油完成润滑工作。

2.2 操作机及导轨润滑系统

精锻机在实际生产工作中,其两侧的操作机负责夹头夹紧、松开和旋转启停,以及抽芯、送料等多个控制动作,需要其内部各机械部件得到充分润滑,保证各项控制动作均能正常实现。操作机润滑系统即负责操作机的安全动作,其润滑原理图如图4所示。

操作机润滑系统启动电机带动抽油泵,将操作机内部油箱的专用润滑油(无需加热,较润滑油更

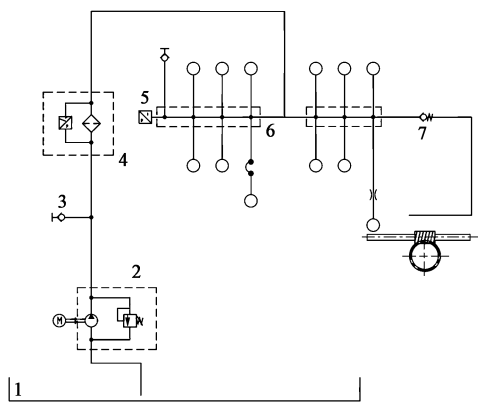


图 4 操作机润滑系统液压原理图

1. 油箱 2. 润滑泵 3. 测压接头 4. 管路过滤器 5. 过渡块
6. 压力传感器 7. 单向阀

Fig. 4 Hydraulic principle diagram of operating machine lubrication system

粘稠) 抽出, 经多路油管送至内部各机械零部件摩擦点位, 包括带动夹头旋转的关键部件“蜗杆蜗轮”, 减少转动磨损, 并散去其动作时产生的摩擦热量, 提高操作机内部零部件的使用寿命。

此外, 操作机进给或回退运动十分频繁, 若导轨某处摩擦力过大, 容易发生大幅度波动, 对其送料速度和送料位置的精确控制均有较大的影响, 不利于精锻机均匀锻造的实现。

操作机导轨润滑系统可实现对导轨的充分润滑, 其过程比较简洁, 仅需对位于操作机内部的润滑器供电, 便可在送料过程对接触导轨进行润滑, 保证操作机进给速度平稳。

2.3 其他重要辅助系统

精锻机在工作过程中, 有多个动作均采用液压驱动方式, 包括锤头的行程调节、操作机的抽芯送料和操作机夹头的夹紧松开等。因此, 液压系统为精锻机的动力之源, 是非常重要的辅助系统。液压系统输出固定压力的油液, 经输油管路连接至油缸和液压马达等执行机构, 实现平移或旋转动作。液压站的组成原理图如图 5 所示。

液压油路对油屑污染非常敏感, 严重时会造成堵塞, 造成液压油传输停滞, 最终致使整机无法正常运行。因此, 系统在液压站的回油管路末端安装多个吸油过滤器 13 和管路过滤器 15, 其作用是把系统内产生或侵入的污染物在返回油箱前过滤掉。液压站同样配置压力表 7 和溢流阀 9, 负责提供稳定的出口液压压力, 而当油液过热导致流通不畅时, 则需手动启动水冷却器。

除了液压系统外, 还有一个重要的辅助系统为

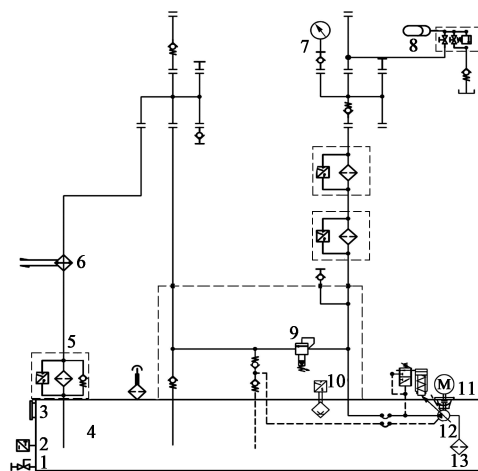


图 5 精锻机液压站组成原理图

1. 安全阀 2. 温度传感器 3. 液位计 4. 油箱 5. 管路过滤器
6. 水冷却器 7. 压力表 8. 蓄能器 9. 溢流阀 10. 液位继电器
11. 液压电机 12. 变量柱塞泵 13. 吸油过滤器

Fig. 5 Principle diagram of hydraulic station composition for precision forging press

锤头扶正液压系统。锤头扶正液压系统常与润滑系统配合使用。

精锻机最关键的动作是主机锻造箱内 4 个锤头的高频往复运动。自然状态下, 锤头进锤时偏心轴运动方向和自然重力方向一致, 会产生较大推力; 退锤时偏心轴运动方向和重力方向相反, 产生的推力较小, 锤头难以保持同样的退锤速度。因此, 设计主机锤头扶正液压系统, 提供稳定的锤头回程压力, 以实现 4 个锤头平稳往复运动动作。

当锤头扶正液压系统启动后, 将特定压力的油液输送至 4 个锤头的特定部位, 叠加式溢流阀则负责维持压力平衡, 最终产生合适的退锤力, 克服系统阻力推动锤头做返程运动。

3 运动控制系统

辅助控制系统是精锻机运行的前提保障, 待所有辅助控制系统均启动且正常工作后, 精锻机运动控制系统才能发挥作用, 其具体运动分为锤头高频锻打、夹头旋转和操作机进给 3 大部分。

3.1 锤头锻打及行程调节系统

本文精锻机属于通用的 SX 型全机械式, 即采用偏心锻打模式^[26]。精锻机主机锻造箱结构如图 6 所示。

系统采用三相异步电机驱动齿轮箱, 利用齿轮系机构将电机动力同步传递给偏心机构, 偏心轴旋

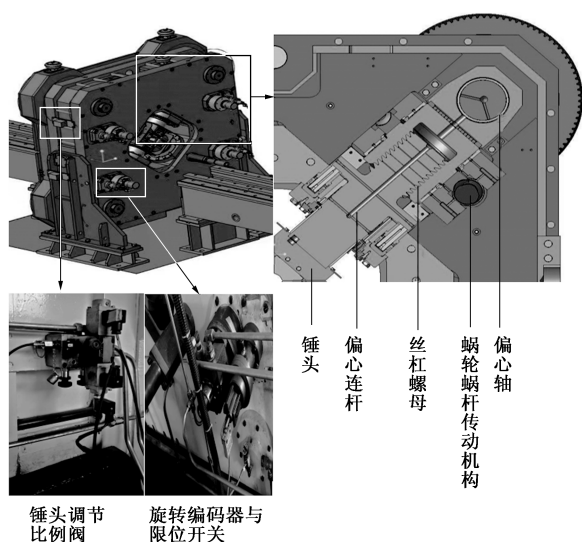


图6 精锻机主机锻造箱结构组成图

Fig. 6 Structural composition diagram of main engine forging box for precision forging press

转联动偏心连杆，从而带动锤头高频往复运动。

基于精锻机的偏心锻打原理，设计出主机锻打系统对其进行控制。主机锻打系统负责实现4个锤头的高频率、短冲程同步运动。由于与偏心轴齿轮直连的锻打主电机功率过大，不宜直接启动；当锻造锻件的两个端部时，被锻处温差较大也会导致锻造功率有所波动。因此，采用变频器启动方式，通过变频器实时调整电机运行参数，确保电机输出功率保持在合理范围。

主机锻打系统的启动前提为4个锤头润滑点的油液压力温度均符合锻造要求，因为精锻机的锻打频率很高，需定时监测4个锤头润滑油液压力和温度，确保铜套、齿轮、偏心轴和连杆等机构表面充分润滑和散热，时刻保证主机工作时机械部件的安全。当油液温度压力不在正常范围时则不能启动锤头锻打，若已启动锻打也需要立刻停机。

为了最大程度发挥精锻机的锻造优势，还需要对锤头的位置精确调节以适应不同的锻造工艺。精锻机锤头位置调节系统，即负责实现4个锤头的零点位置标定和锤头位置调节2个功能。

精锻机4个锤头同步运动是锻造精度的保障，在锻造过程中必须保证锻造中心不变，闭合直径无偏差^[27]。因此，其各个锤头的初始零点位置必须通过人工标定，其零点位置是偏心轴处于下死点时锤头距离锻造中心最近的极限机械位置，该位置为精锻机所能锻造锻件的最小尺寸。为了防止锤头移动距离过长损坏机械部件，在锤头到达零点前装有机

械接触式限位开关，对锤头进行更为可靠的硬件保护，并实现超限报警功能。

零点的设置需要人工参与，可采取长按手动粗调和单次点动微调修正的模式，通过闭环控制液压马达精确转动，最终使锤头停在期望位置。零点设定完毕后，锤头的所有锻打位置的调节，均可以该零点为基准，依靠增量式旋转编码器反馈脉冲量，获得锤头的移动距离，进而转化为坐标系中的绝对位置，实现将4个锤头的位置调节至所需要的锻造尺寸的功能。

锤头位置调节系统由比例换向阀及液压马达组成的电液伺服系统驱动实现，4个锻打单元内部具有液压马达和蜗轮-蜗杆机构，通过控制比例换向阀的开度使液压马达转动，经蜗轮带动锤头丝杠螺母旋转，进而使锤头发生轴向运动。锤头实时位移和液压马达的旋转圈数成线性关系，可由旋转编码器记录到的数据间接计算得到。

锤头位置调节的精度要求很高，尺寸公差控制在 $\pm 1\text{ mm}$ 以内才能发挥设备的优良性能。可采用常规的减速比算法，克服机械运动中的惯性，在最短的时间内完成定位动作，稳定且无超调量。

3.2 操作机夹头旋转系统

位于主机锻造箱两侧的操作机为精锻机重要的辅助机械设备，主要包括旋转动力电机、机械手夹头、抽芯油缸和送料油缸等结构。其中操作机夹头最为关键，主要实现夹持工件间歇自旋转功能。夹头需要设置合适的夹持直径以适应工件，提供足够的夹持力量以实现轴向大范围进给，还需具有高频制动松开功能和定位夹紧功能，匹配主机锤头锻打频率实现工件的旋转^[28]。夹头结构具体组成如图7所示。

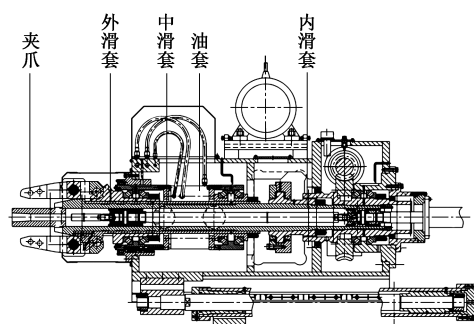


图7 精锻机夹头结构组成图

Fig. 7 Structure composition diagram of chuck for precision forging press

夹头的夹紧、松开动作依靠中滑套、外滑套和

夹爪实现。当有夹紧命令时,电磁换向阀通电以改变油缸进油量,此时外滑套向前运动,中滑套向后运动,通过斜面使夹爪沿支点旋转夹紧锻件,松开工件时动作相反。此外,夹头的夹紧、松开分为高速和低速两档,用于锻造过程中需要立刻松开或立刻夹紧的场合,该功能依靠电控减压阀实现。

夹头的旋转功能则依赖于夹头内滑套。操作机顶部动力电机在锻造过程中持续工作,电机通过轴输出扭矩,经皮带轮降速,驱动同轴蜗杆转动,动力通过蜗轮蜗杆机构传递给蜗轮,带动蜗轮旋转,而蜗轮又与内滑套固连,使得内滑套旋转,进而实现夹头旋转。夹头的动力电机可采用变频器启动方式,实时控制其旋转速度,同时实现双侧夹头的平稳同步旋转。

3.3 操作机进给控制系统

精锻机正常工作时,夹头夹持工件一边自旋转,一边沿导轨匀速轴向进给,在必要时执行扶料、抽芯操作,将工件以合适的速度送至主机锻造箱进行锻造^[29]。操作机整体结构三视图如图 8 所示。

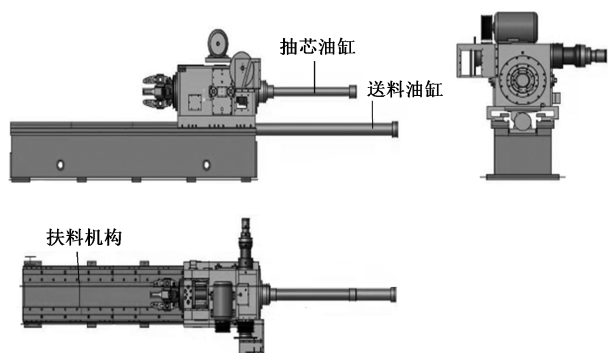


图 8 精锻机操作机整体结构三视图

Fig. 8 Three views of manipulator overall structure for precision forging press

设计操作机进给控制系统对操作机的各个动作进行控制,共分为扶料、抽芯和送料进给 3 大主要部分。

抽芯用于锻造固定尺寸的空心零件,根据特定的锻造工艺,上料后锻造前芯杆伸出,锻造完成后芯杆退回。抽芯控制较为简单,由电磁换向阀通断控制,一般为手动操作。

为防止锻件在锻造中因自重产生弯曲,在导轨中间部分设扶料机构,完成锻件的支撑功能。其由支承辊轮、支承臂以及控制支承臂升降的电磁换向阀组成,系统通过电磁换向阀控制扶料机构的上升和下降,同时配置光电开关负责检测扶料机是否下降至最低处,形成闭环控制。

操作机的送料控制为重难点。众所周知,精锻机经常用于锥度轴和台阶轴的锻造,因此,对操作机送料速度和位置的控制要求非常严格。

操作机由油缸推动进给,当锻件被双夹头夹持进行锻造时,一侧送料油缸产生推动力,对侧油缸产生拉退力。为保证操作机进给速度和位置控制的精确性,采用磁致伸缩位移传感器^[30],该传感器与导轨不接触无磨损,模拟信号量与实际位置之间线性度高、响应快、稳定可靠。

系统基于磁致伸缩位移传感器的反馈信号实时调节比例换向阀的开度,改变进油量,从而实现对操作机速度和位移的精确控制,此控制过程需要尽可能地保持匀速,同时,保证其在最短时间内完成定位动作且保证符合规定精度要求。此外,还在每个操作机液压管路加装压力传感器,及时检测送料油缸压力并显示,保证送料过程平稳进行。

4 精锻机专用控制系统的工程实现

4.1 专用控制系统硬件框架

国内现有精锻机大多为 20 世纪引进的,其控制系统多采用 PLC 梯形图编程控制模式,虽然具有较高的控制稳定性,但是控制精度低、缺少智能化处理、人机交互和界面显示方面亦有所欠缺。

本文中精锻机总体控制方案采用工业控制计算机和多功能控制卡模式,其中,控制信号的输入、输出通信基于先进的数据采集控制卡和其配套的多种传感器联合实现。此模式下专用控制系统实时性高且具有良好的扩展性。搭建的专用控制系统硬件组成如图 9 所示。

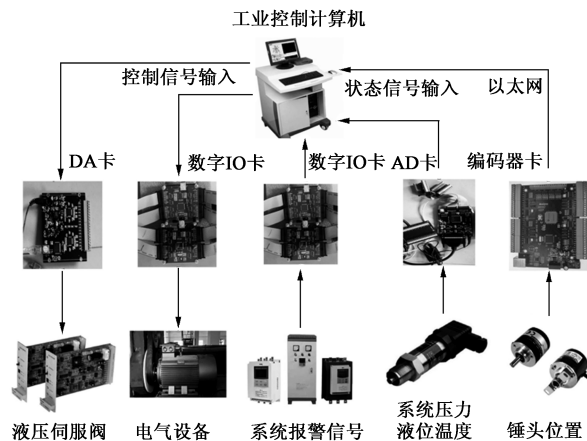


图 9 精锻机专用控制系统硬件结构组成

Fig. 9 Hardware structure composition of special control system for precision forging press

工业控制计算机作为上位机，同时配置数字化高清显示屏与键盘鼠标等输入、输出设备，完成对精锻机专用控制系统的各项手动功能操作，实现控制与管理生产过程、维护设备等任务。工业控制计算机操作界面可以协助用户对工艺参数进行设置和控制，对各系统设备当前状态进行实时监测，既能使设备控制处于自动模式运行，又能在必要时进行必要的人工干预，一旦出现问题时能够迅速帮用户确认故障点位，进行停机维护和安全性检查。

多功能控制卡则承担了软硬件接口任务，负责将控制命令转换为模拟或数字信号，承担弱电侧信号量输入输出作用。多功能控制卡均为基于 STM32

系列单片机开发的具有特定功能的模块，将各类复杂的操作封装为第三方动态链接库函数形式供上层调用，具有很高的可靠性和快速性。

多功能控制卡具体可分为 4 类。

(1) 多功能数字 IO 采集卡。控制系统存在大量的数字输入、输出信息，由多功能数字 IO 采集卡实现。IO 采集卡接收精锻机整机运行时的温度、液位、压力报警反馈信号，同时，输出信号控制各类电机的起停和各类电磁换向阀的通断，例如电机具有启动、停止、报警 3 种控制，启动和停止通过 IO 采集卡输出高低电平驱动，报警则为 IO 采集卡读取热继电器发出的开关量信号。所有数字量输入、输出接口信息统计如图 10 所示。

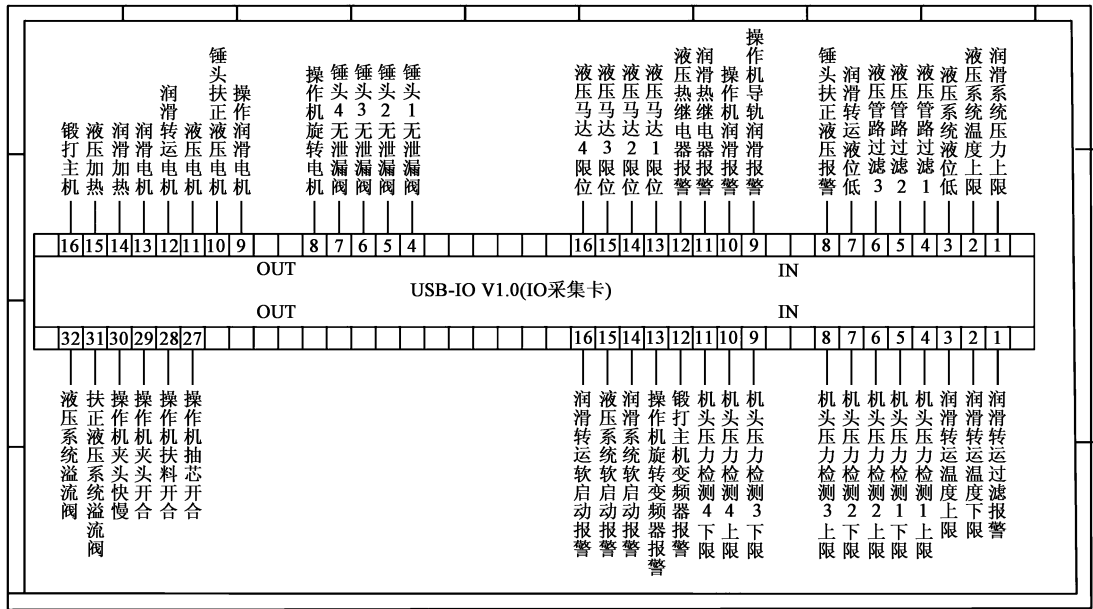


图 10 系统多功能数字 IO 采集卡示意图

Fig. 10 Schematic diagram of system multi-functional digital IO acquisition card

除了数字信号，控制系统中还存在多个模拟量数据，分别由其他 3 种多功能控制卡实现。

(2) 数据采集 AD 控制卡。AD 控制卡可以实现温度、压力、液位传感器和磁致伸缩位移传感器等模拟电压量采集。传感器输出 4~20 mA 的电流信号，经电流转电压转化模块，转化为 0~10 V 的信号，送入 AD 控制卡。基于此工业控制计算机能够读取到精锻机温度、液位、压力等数据，便于界面显示，同时读取操作机实时位移，形成闭环反馈。

(3) 编码器控制卡。编码器控制卡配合旋转编码器读取精锻机 4 个锤头的位移数据，信息基于路由器局域网传递至工业控制计算机，实现锤头位置调节闭环。

(4) 模拟量输出 DA 控制卡。DA 控制卡实现

对比例换向阀、变频器等的应用控制，用于调节控制送料和锤头移动的比例换向阀开度等。

上述 3 种多功能控制卡的所有模拟信号采集信息接口分配如图 11 所示。

值得注意的是，为了保证多功能控制卡的输出信号与电气设备的驱动信号一致，需要采用中间继电器和电流电压转换板卡必要设备。而电气执行设备产生的报警信号通常具有较大的不稳定性，也需采用 PLC 作为中间过渡设备，使 IO 采集卡能够准确无误地接收。

根据精锻机专用控制系统的设计方案已经完成了现场电柜的组装，如图 12 所示。与电柜配套的所有设备如表 1 所示。

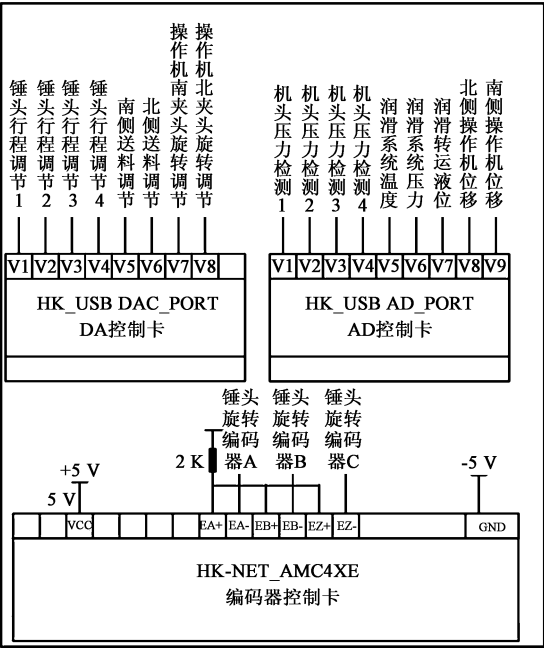


图 11 控制系统模拟信号采集卡示意图

Fig. 11 Schematic diagram of analog signal acquisition card for control system

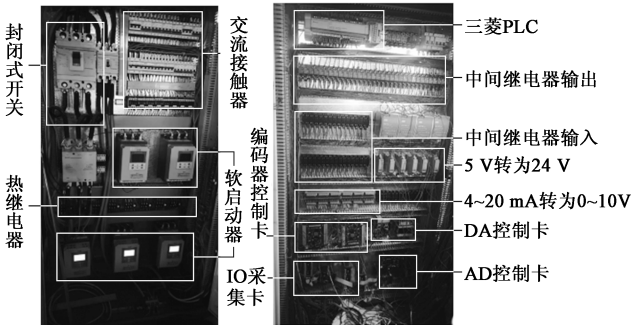


图 12 精锻机电柜组成实物图

Fig. 12 Composition physical diagram of electric cabinet for precision forging press

本文自主研发的精锻机为机械式 SX 型，其现场装配图如图 13 所示。将电柜及电气设备全部连线后进行调试，设备通过电柜由上位工业控制计算机直接控制。

开启润滑调试后，主机润滑电机、润滑转运电机和锤头扶正电机均通过软启动器正常启动，润滑油流经精锻机主机形成完整闭环，转运油箱液位稳定在 200 mm 左右，主机锻造箱内 4 个锤头的润滑点位压力维持在 0.4 MPa，符合精锻机运行标准。

液压电机启动后，双侧操作机进给、回退能够通过液压油缸手动或自动运行，磁致伸缩位移传感器测量其自动运行速度可控制在 $8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，进给位移误差为 2 mm。夹头夹持松开和导轨扶料通过电控减压阀通断控制可完全实现。基于比例换向阀控

表 1 精锻机设备分配

Table 1 Equipment allocation of precision forging press		
类别	设备名称	型号
电机	锻打主机	YXT2-315L1-4
	润滑电机	HM2-180M-4
	转运电机	HM2-180M-4
	锤头扶正电机	HM2-180M-4
	夹头旋转电机	YXT2-160M-4
传感器	液压电机	Y2-200L-4
	液位传感器	PS3000-13010G14MA3P
	温度传感器	T80/21G14MS50
	压力变送器	PD50-GB160BG14M4B
	磁致伸缩位移传感器	MTM 系列
软启 动器	旋转编码器	TRD-2T2500BF
	大功率电机	KPR5 电机软启动器
	夹头旋转电机调速	台达变频器
液压 元件	锻打电机调速	英威腾 Goodrive20 系列
	锤头比例换向阀	HD-4WREE6E32-10B
	操作机比例换向阀	HD-3DREP6C-10B

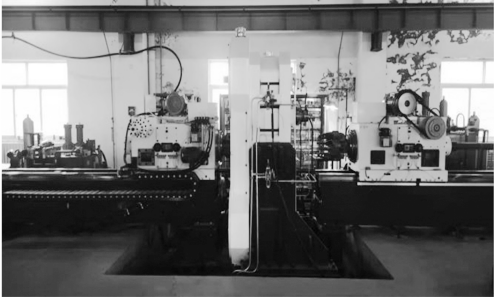


图 13 精锻机现场装配图

Fig. 13 Site assembly drawing of precision forging press

制的 4 个锤头位置调节成功实现，旋转编码器可精准反馈液压马达旋转圈数，实时测量锤头调节速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，位置控制误差为 0.5 mm。

夹头旋转电机通过变频器启动后，夹头实时转速可达 $20\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，锻打主机通过变频器启动后锻造频率接近 $100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，基本符合精锻机空载运行情况。

经过上述调试，精锻机已经在空载工况下完成了所有必要动作，测试过程中控制信号能够从工业控制计算机精准发出，经多功能采集卡快速传输至执行设备，有效地避免了液压驱动调节的滞后性和复杂电柜内的电磁干扰，验证了工业控制计算机和多功能控制卡组合控制模式的简洁性、快速性和稳定性，为后续的工艺实现奠定了良好的基础。

4.2 软件的设计

传统的系统软件通常采用 VC++、VB、C 等作为开发工具，开发时间长、代码复杂、效率不高。

相比之下，本文精锻机专用控制系统软件采用 Python 作为开发语言，该语言具有开源免费、可移植性好、方便维护等优点，不仅便于在工业现场实现，而且有利于降低开发成本。基于 Python 的精锻机专用控制系统软件开发，是对原有控制模式作智能化、现代化、可视化的升级。

软件设计底层为动态链接 DLL 库函数层，基于多功能控制卡驱动，调用动态链接库进行用户侧两次应用程序接口开发，将基于 C 语言编写的控制卡接口转换为兼容的 Python 编程接口，用户即可调用成熟稳定的库函数。针对多功能控制卡提供的各类封装函数，设计面向用户需求的控制卡类，最终实现对模拟及数字信号的输入输出功能。

软件设计中层为类函数层，将底层设计好的控制卡类实例化，针对不同控制系统的需求建立实例对象，并调用相应类函数，完成对应电气液压设备的输出控制和现场信号采集功能。

软件设计上层为用户层，用户通过上位机图形化操作界面，按照工艺控制要求，对精锻机各子控制系统进行参数设置，通过手动点击控件即可激发

槽函数发出相应指令。同时也可将运行状态实时返回，并显示在主界面上进行监测，针对报警故障做出合理的应急措施。

软件界面的设计与开发采用业内成熟的 PyQt 库，界面刷新、控件操作由内置线程实现，显示代码与逻辑代码分离。精锻机各子系统的启动及运行，包含顺序控制和并行控制，后端程序采用多线程处理，多个子系统在自动运行时可共享内存及数据，也能够实现实时通信功能。

基于上述开发步骤，该软件可通过界面手动调试精锻机各子系统的功能，还可通过配置加工参数文件，实现精锻机自动化锻造功能，下面以操作机送料进给和锤头调节为例，介绍软件使用的具体流程。

操作机进给控制系统界面如图 14 所示，分为抽芯、扶料和送料 3 个子系统，抽芯操作只需控制芯杆前进后退即可；扶料子系统则包括扶料高度设置、启动扶料和光电开关检测是否扶料成功 3 个部分，整体形成闭环反馈；送料子系统最为复杂，其中，手动控制下细分为单次点动和长按手动模式，自动模式下则为送料方向及送料模式选择、进给量和进给速度设置、光栅尺实时位置反馈和送料油缸压力监测 4 个部分组成，共同实现对操作机进给速度和进给位移的高精度控制。

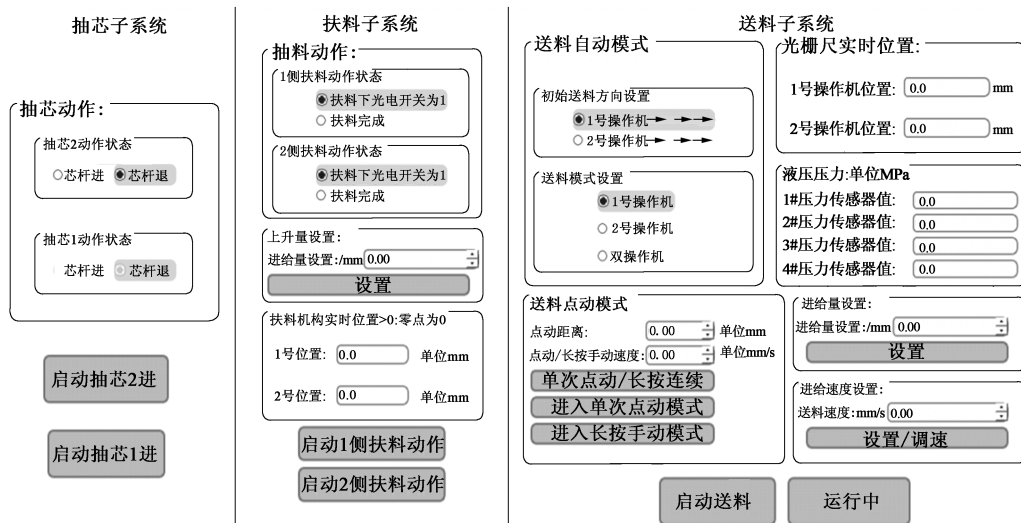


图 14 操作机进给控制系统界面图

Fig. 14 Interface diagram of feeding control system for manipulator

图 15 为锤头调节控制系统的软件界面，首先对锤头各监测的润滑压力监测，这是启动锤头的前提。然后对锤头零点位置进行标定，基于手动模式实现，对 4 个锤头分别采用点动模式，使之能够处于闭合直径无偏差的绝对零点，与操作机进给类似，锤头

行程调节分为锤头模式选择、锤头速度及位移设置、实时位置反馈几大部分，同样实现锤头位置的精确控制。

4.3 子系统协作控制流程

为了实现精锻机的高质量和高精度锻造，各个

锤头锻打行程调节系统

液压力设置和实时状态:

1#压力传感器值: 单位: bar

2#压力传感器值: 单位: bar

3#压力传感器值: 单位: bar

4#压力传感器值: 单位: bar

1234压力上限: 单位: bar

1234压力下限: 单位: bar

设置

1234号状态

☒ 正常 ☐ 上限报警 ☐ 下限报警

锤头行程设置:

行程设置: 单位: mm

脉冲个数: 行程对应

方向设置:

☒ 退锤 ☐ 进锤

设置

锤头调速设置:

锤头速度: 单位: mm/s

设置/调整

模式设置:

☒ 四锤头同步 ☐ 1号锤头工作 ☐ 2号锤头工作 ☐ 3号锤头工作 ☐ 4号锤头工作

锤头实际位置反馈: 零点为0, 实时位置>0

1号锤头实时位置:

2号锤头实时位置:

3号锤头实时位置:

4号锤头实时位置:

☒ 单位: /mm ☐ 单位: /脉冲个数

开机自检

启动锤头锻打行程调节系统

故障

锤头点动设置和操作:

1锤 / 2锤 / 3锤 / 4锤

☒ 退锤 ☐ 进锤

1号锤头点动/长按

点动距离: 单位: mm

点动/长按手动速度: 单位: mm/s

进入单次点动模式 **进入长按手动模式** **设置零点位置※**

图 15 精锻机锤头调节控制系统界面图

Fig. 15 Interface diagram of hammer head adjustment control system for precision forging press

子系统需要密切配合, 协同动作。

主机锻造箱的润滑和操作机的润滑互不影响, 相互独立, 主机润滑系统和润滑转运系统作为一个整体闭环启动, 必须在锻造前启动。锤头扶正液压系统辅助完成锤头锻打及行程调节动作, 可随主机润滑系统同时启动。

操作机润滑系统及操作机导轨润滑系统属于开环控制, 在操作机进给、夹头旋转的动作之前启动即可。液压系统为精锻机实现多个动作的动力系统, 同时与其他辅助控制系统互不干扰, 可在需要时启动。

具体实现步骤包括: 第 1 步, 电柜中 PLC 和多功能控制卡等设备上电; 第 2 步, 进行开机自检, 检测润滑系统的温度、液位、压力状态是否正常, 确保各类机器满足良好的开机条件; 第 3 步, 开启润滑系统和润滑转运系统, 对主机锻造箱内的重要机械部件进行充分润滑, 监测润滑油箱和转运油箱的实时液位以保证整机润滑实现闭环, 同时开启锤头液压扶正系统, 通过调节润滑油液出口压力保证主机锻造箱内部各点位润滑到位; 第 4 步, 开启液压系统, 调节液压系统出口处油压以满足锤头位置调节和操作机进给的要求。

待所有辅助系统均运行正常后, 方可启动相关运动控制系统。首先, 根据锻造工艺启动锤头位置调节系统, 控制锤头移动至期望位置。然后, 启动操作机夹头夹紧工件沿导轨送进, 最后, 启动锤头锻打控制系统, 开始锻造工作。

锻造过程需考虑夹头旋转与锤头锻打的协同动作, 夹头在锤头锻打期需要停止旋转, 而在锻打间歇则需快速恢复旋转; 同时, 考虑伸长量随动补偿与锤头锻打的协同动作, 工件在锻造时受三向应力而产生不规则的形变, 需要双侧操作机实时改变进给速度补偿锻造产生的伸长量, 两侧夹头需协同动作, 确保工件轴向伸长自由, 始终处于零压力; 改变期望锻造半径后在不停机的情况下需要同步精确调节 4 个锤头至新的位置。上述过程均实现闭环控制, 最终形成一套实用的自动化加工专用控制系统, 如图 16 所示。

5 结论

(1) 结合现代信号处理技术与先进的控制算法, 根据精锻机预期功能提出了集运动控制、过程控制和在线监控等为一体的专用控制系统设计方案, 合理划分辅助控制系统和运动控制系统, 各子系统之间相互协作, 共同完成锻造功能, 控制效果良好。该控制系统的开发在国内尚属首次。

(2) 辅助控制系统包括润滑和液压系统, 润滑系统可降低高温、高速和高压的复杂运行环境对锻件表面质量的影响, 能够最大程度地保护关键机械部件。液压系统为精锻机的各个动作提供持续稳定的动力, 同时具有快速精准的调节功能, 保证精锻机的锻造精度。

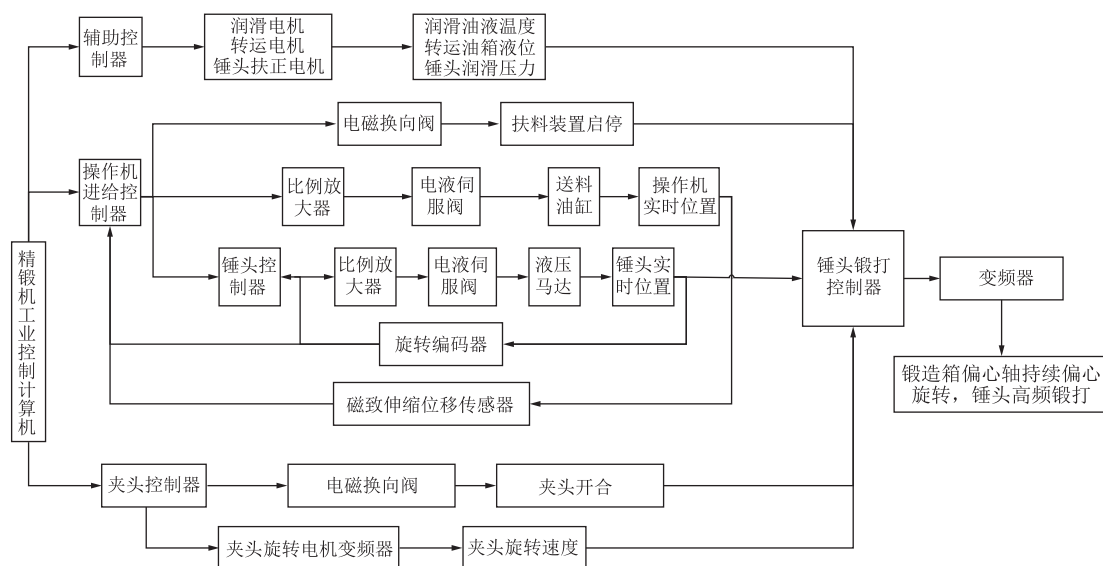


图16 精锻机协作控制原理图

Fig. 16 Principle diagram of cooperative control for precision forging press

(3) 运动控制系统主要负责实现锤头高频锻打和夹头夹持工件轴向进给、周向旋转的复合运动过程。选取电机驱动的偏心锻造模式,提高了整体锻造效率。锤头位置调节和操作机进给均采用液压驱动,夹头旋转则由电机带动蜗轮蜗杆传动实现,所有动作得到了平稳、有效、高精度控制。

(4) 精锻机专用控制系统的实现依赖于硬件的高精度和软件的完备性。使用以 STM32 为核心的 4 类多功能控制卡进行系统开发,使得控制系统软硬件接口的应用开发简单且高效。现场各类传感器数据读取、数字与模拟量控制功能经少许联机测试便可直接应用。电柜内部采用模块式单元化设计,增加了控制系统的可靠性。依托完全开源免费的 Python 语言,控制系统操作界面开发成本低、算法编程效率高、软件代码维护方便。系统可通过采集精锻机在实际生产运行后的各类数据,做相应的算法优化、效率分析等,为进一步设计出智能可靠的自动化控制系统打下坚实基础。

(5) 精锻机控制系统软件虽已应用于企业实际生产,但其可靠性还需经过长期的检验,结合生产实际定期改进升级。同时,精锻机许多控制理论限于机械设计与系统实现成本高昂无法应用,也有一些理论在实现时效效果并不理想,有待对现场数据做更多分析,并对控制算法做进一步优化。

参考文献:

- [1] Hsiang S H, Ho H L. A study on the warping problems of thin flange under the radial forging processes by FEM and experiments [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26 (1/2): 47-55.
- [2] 杨华,高俊峰,何琪功,等. 径向锻造机的几种典型主机结构分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 16-32.
Yang H, Gao J F, He Q G, et al. Analysis of several typical main engine structures of radial forging machine [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 16-32.
- [3] 杨震,王炳正,宋道春,等. 径向锻造设备与工艺综述 [J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53 (6): 27-30.
Yang Z, Wang B Z, Song D C, et al. Overview of radial forging equipment and process [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2018, 53 (6): 27-30.
- [4] 曹明,韩笑宇,栗文锋. 四砧径向锻造工艺研究 [J]. 大型铸锻件, 2015, (4): 4-7.
Cao M, Han X Y, Li W F. Research on four hammer radial forging process [J]. Heavy Casting and Forging, 2015, (4): 4-7.
- [5] 李建军,黄茂林,彭谦之,等. 锻造技术的发展现状及趋势 [J]. 热处理技术与装备, 2015, 36 (3): 57-62.
Li J J, Huang M L, Peng Q Z, et al. Development status and trend of forging technology [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2015, 36 (3): 57-62.
- [6] 牛勇,权晓惠,张营杰,等. 现代自由锻造装备技术研究现状与发展趋势 [J]. 精密成形工程, 2015, 7 (6): 17-24.
Niu Y, Quan X H, Zhang Y J, et al. Current development of free forging equipment [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7 (6): 17-24.
- [7] 黄雷. 不锈钢身管弹膛精锻成形分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
Huang L. Precision Forging Forming Analysis of Stainless Steel Body Tube Bore [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [8] 邹景峰,马立峰,朱艳春,等. 径向锻造成形技术及其在镁合金锻造中的应用 [J]. 轻金属, 2018, (5): 48-52.

- Zou J F, Ma L F, Zhu Y C, et al. The application of radial forging forming technology to magnesium alloy forging [J]. *Light Metals*, 2018, (5): 48-52.
- [9] 王艳芳. 精锻机锻造车轴工艺余量研究 [J]. *内燃机与配件*, 2018, (24): 20-21.
- Wang Y F. Research on process allowance of forging axle for precision forging machine [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2018, (24): 20-21.
- [10] 张超, 赵升吨, 母东. 航空锻件用径向锻机液压驱动方式合理性探讨 [J]. *液压与气动*, 2014, (6): 13-16.
- Zhang C, Zhao S D, Mu D. Study of hydraulic driving radial forging machine for aeronautic products [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2014, (6): 13-16.
- [11] Fan L X, Wang Z G, Wang H. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16 (2): 329-334.
- [12] 韩风, 胡强. 径向锻造工艺参数对 Mg-8Al-0.6Zn-0.3V 镁合金棒材性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (17): 115-117.
- Han F, Hu Q. Effect of radial forging process parameters on performance of Mg-8Al-0.6Zn-0.3V magnesium alloy bars [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (17): 115-117.
- [13] Panov D, Pertsev A, Smirnov A, et al. Metastable austenitic steel structure and mechanical properties evolution in the process of cold radial forging [J]. *Materials*, 2019, 12 (13): 2058-2076.
- [14] Huang J L, Slater C D, Mandral A, et al. A dynamic model for simulation of hot radial forging process [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207 (9): 478-483.
- [15] Darki S, Raskatov E Y. Analysis of the hot radial forging process according to the finite element method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110 (3/4): 1061-1070.
- [16] Koppensteiner R, Auer M. New Forging drive system for radial forging based on double stroke mechanism [J]. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 2018, 63: 361-366.
- [17] Koppensteiner R, Auer M, Fair B, et al. GFM radial forging machines for the titanium market [A]. *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium [C]*. California, 2016.
- [18] Glushenkova S G, Polozhentsev K A, Dmitriev A I, et al. Development of a technology for a hydraulic radial forging machine at the elektrostal metallurgical plant [J]. *Metallurgist*, 2017, 61: 394-399.
- [19] 夏波. RF70 精锻机在线监测与故障分析 [J]. *设备管理与维修*, 2013, (12): 58-59.
- Xia B. RF70 fine forging machine online monitoring and fault analysis [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2013, (12): 58-59.
- [20] 王飞伟. 精锻机锻造功率监测系统研究 [J]. *设备管理与维修*, 2018, (18): 25-27.
- Wang F W. Research on forging power monitoring system of fine forging machine [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2018, (18): 25-27.
- [21] 暴怀乾, 赵洪章, 刘永平. 基于 PROFIBUS-DP 的 PLC、HMI 控制系统在径锻机中的应用 [J]. *宁夏工程技术*, 2014, 13 (2): 170-173.
- Bao H Q, Zhao H Z, Liu Y P. Application of PROFIBUS-DP PLC, the HMI control system based on the radial forging machine [J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2014, 13 (2): 170-173.
- [22] 陈殿领. 利用西门子电气对 1400 t 精锻机进行电气及数控化改造 [J]. *制造技术与机床*, 2011, (9): 133-135, 150.
- Chen D L. The electrical and NC transformation for 1400 t precision forging machine using SIEMENS electric [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2011, (9): 133-135, 150.
- [23] 李显通. SXP-130 卧式精锻机电控系统改造 [J]. *设备管理与维修*, 2019, (1): 88-89.
- Li X T. Transformation of SXP-130 horizontal precision forging electromechanical control system [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2019, (1): 88-89.
- [24] 苏振华, 张营杰, 冯东晓, 等. 基于 PID+前馈的 3 MN 径向锻造机控制系统研究 [J]. *重型机械*, 2020, (3): 44-47.
- Su Z H, Zhang Y J, Feng D X, et al. Research and development of the control system based on PID closed-loop control plus feedforward for 3 MN radial-direction hydraulic forging machine [J]. *Heavy Machinery*, 2020, (3): 44-47.
- [25] 葛鹏. 1.6 MN 精锻机主机设计 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- Ge P. Design of 1.6 MN Fine Forging Machine [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [26] 李佳, 何雪龙, 黄艳龙, 等. 径锻机锤头调节过程分析 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2016, 51 (6): 28-29.
- Li J, He X H, Huang Y L, et al. Analysis on adjustment process of hammer head of diameter forging machine [J]. *China Metal-forming Equipment & Manufacturing Technology*, 2016, 51 (6): 28-29.
- [27] 武哲. 径锻机四锤头液压伺服系统的同步特性研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.
- Wu Z. Research on Synchronous Characteristics of Four Hammer Hydraulic Servo System of Diameter Forging Machine [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015.
- [28] 李阳, 白景年, 王飞云, 等. 精锻机夹头结构及运行原理研究 [J]. *机械工程师*, 2014, (1): 173-174.
- Li Y, Bai J N, Wang F Y, et al. Study on chuck structure and function theory of forging machine [J]. *Mechanical Engineer*, 2014, (1): 173-174.
- [29] 赵玮. 精锻机随动控制系统的设计 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
- Zhao W. Design of Servo Control System for Fine Forging Machine [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [30] 王飞伟, 朱秦岭, 杨鹏飞, 等. 磁致伸缩位移传感器在精锻机夹头中的应用 [J]. *中国设备工程*, 2018, (18): 201-203.
- Wang F W, Zhu Q L, Yang P F, et al. Application of magnetostrictive displacement sensor in chuck of fine forging machine [J]. *China Plant Engineering*, 2018, (18): 201-203.