

## 棒材热轧设备液压系统的优化设计与能效提升研究

蒋海涛

江阴兴澄特种钢铁有限公司，江苏 江阴 214400

[摘要]棒材热轧设备液压系统存在能耗高、效率低等状况，文章针对这些问题给出一种优化设计方案，先对现有液压系统工作原理与能量流动过程加以分析以找出系统能耗高的主因，接着提出包含优化泵站设计、改进蓄能器结构、运用变频调速等优化措施，还建立液压系统数学模型并在 MATLAB/Simulink 里做仿真分析来验证优化方案的可行性，最后在某钢铁企业棒材生产线上进行实际应用测试，结果显示优化后液压系统能耗降低 15%、系统响应速度提高 20%且生产效率提升 10%，这一研究给棒材热轧设备液压系统节能降耗和性能提升带来新思路新方法，对提升钢铁行业能源利用效率意义重大。

[关键词]棒材热轧；液压系统；优化设计；能效提升；仿真分析

DOI: 10.33142/ec.v8i10.18270 中图分类号: TP2 文献标识码: A

## Research on Optimization Design and Energy Efficiency Improvement of Hydraulic System for Bar Hot Rolling Equipment

JIANG Haitao

Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin, Jiangsu, 214400, China

**Abstract:** The hydraulic system of bar hot rolling equipment has high energy consumption and low efficiency. This article proposes an optimization design scheme to address these issues. Firstly, the working principle and energy flow process of the existing hydraulic system are analyzed to identify the main cause of high system energy consumption. Then, optimization measures including optimizing pump station design, improving accumulator structure, and using variable frequency speed regulation are proposed. A mathematical model of the hydraulic system is also established and analyzed in MATLAB/Simulink. We conducted simulation analysis to verify the feasibility of the optimization plan, and finally conducted practical application tests on a bar production line of a certain steel enterprise. The results showed that after optimization, the energy consumption of the hydraulic system decreased by 15%, the system response speed increased by 20%, and the production efficiency increased by 10%. This research brings new ideas and methods for energy conservation, consumption reduction, and performance improvement of the hydraulic system of bar hot rolling equipment, which is of great significance for improving energy utilization efficiency in the steel industry.

**Keywords:** hot rolling of bar materials; hydraulic system; optimization design; energy efficiency improvement; simulation analysis

### 引言

国民经济的基础产业钢铁工业，其能源消耗和环境影响长期受关注。最新统计数据表明，2020—2023 年全球钢铁行业能源消耗占工业总能耗的 15%~18%且中国钢铁行业能耗占全国工业能耗的 16%。棒材热轧在钢铁生产工艺里是重要成形工序，设备能源效率直接关系到整条生产线的能源消耗与生产成本，而且棒材热轧时液压系统能耗占总能耗的 30%~35%，是主要能耗单元之一。中国钢铁工业协会发布的《2022 年中国钢铁行业发展报告》显示，这几年钢铁企业虽不断推动节能降耗技术改造，但棒材热轧设备液压系统能效还有很大提升空间，系统效率

大多在 55%~65% 之间，比国际先进水平的 75%~85% 低不少。

棒材热轧设备液压系统当下普遍存在能耗大、效率低、响应速度慢、稳定性差等状况，致使企业生产成本增加且与国家节能减排政策相悖。按照《“十四五”节能减排综合工作方案》，钢铁行业为重点节能领域，到 2025 年单位产品能耗需降低 10% 以上，在此情况下研究棒材热轧设备液压系统优化设计以提升能效和性能，对推动钢铁行业绿色发展、达成碳达峰碳中和目标有着重要现实意义。本文深入剖析棒材热轧设备液压系统工作原理和能量流动过程，找出能耗高的关键要素并提出有针对性的优化设计

方案，再经仿真分析和实际应用验证优化成效，目的在于给棒材热轧设备液压系统节能降耗与性能提升提供新技术路径和方法，助力钢铁行业实现高质量低碳发展并提供技术支持<sup>[1]</sup>。

## 1 棒材热轧设备液压系统现状分析

### 1.1 传统液压系统的结构与工作原理

传统棒材热轧设备的液压系统主要由动力元件、执行元件、控制元件和辅助元件这四大块构成，其中液压泵站属于动力元件且承担着把机械能转变为液压能的任务，而液压缸和液压马达是执行元件用来完成直线运动与旋转运动的，各类像方向阀、流量阀、压力阀等阀门都归于控制元件以控制液压油的流向、流量和压力，此外油箱、过滤器、蓄能器、冷却器之类的部件作为辅助元件来确保系统的正常运转。

传统液压系统的定量泵是恒速驱动的，这是其工作原理，并且当系统需要大流量时多台泵一块儿工作，需求变小后部分泵还接着运行，多余的油液经溢流阀回到油箱，这种时候系统压力由溢流阀来定，实际工作压力和设定压力有差值从而造成能量损失，2022年某钢铁企业实测过，传统系统里大概40%的输入能量转化成热能就浪费了，而且传统系统普遍存在着油温升高快、系统响应慢的问题，这对设备的工作精度和寿命有影响。

### 1.2 现有系统的主要问题与挑战

棒材热轧设备液压系统现今面临着诸多问题与挑战，其中能源利用率低这一问题最为凸显，中国机械工程学会2021年调研报告表明国内棒材热轧设备液压系统平均能源利用率为50%~60%，而国际先进水平为70%~80%，两者差距明显，并且该系统响应速度慢、稳定性差，无法满足现代高速轧制要求，在快速换辊、紧急停机等情况下，液压系统动态特性直接关系到生产安全与产品质量。

液压系统故障率高是急需解决的问题，统计数据表明棒材热轧设备总故障中液压系统故障占比约35%，常见的是泄漏、污染、元件损坏等情况，这既增大维护成本又让设备停机时间变长且使生产效率降低，并且传统液压系统普遍存在噪声大、污染严重等环境方面的问题，不符合国家越来越严格的环保要求，2023年施行的《工业节能监察规范》对钢铁企业噪声控制和油污处理要求更高，这对传统液压系统来说是严峻挑战。

### 1.3 液压系统优化的必要性与意义

在钢铁行业提质增效方面，棒材热轧设备液压系统的优化已成为关键领域，这几年全球钢铁业受能源成本攀升、

环保压力加剧的双重考验，国际钢铁协会（World Steel Association）2022年的数据表明液压系统能耗大概占钢铁生产总能耗的12%~15%，中国是世界最大的钢铁生产国，2023年中国钢铁行业能源消耗量占全国总能耗的16.1%，棒材热轧设备液压系统的效率大多不到65%，而发达国家平均在75%~80%，所以优化液压系统不但能直接削减能源消耗、降低成本，在提高设备可靠性与生产效率、延长设备寿命、减少维护费用上也有作用，并且“碳达峰、碳中和”战略背景下，每吨钢材通过液压系统优化可减排二氧化碳5~8公斤，这对钢铁行业绿色低碳转型意义非凡，而且工业4.0和智能制造发展起来后，优化液压系统能让棒材热轧生产线智能化升级有基础，从而让企业在全球市场的核心竞争力得到提升。

## 2 液压系统优化设计方案

### 2.1 系统结构优化

棒材热轧设备液压系统结构优化主要在多级压力供给与能量回收这两个方面进行，先是把传统的单一压力供给方式改成多级压力供给系统，该系统能根据不同的工况实际需求提供相应压力的液压油，避免高压供给低压使用的能耗浪费情况，具体操作时把系统分成高压区（28MPa）、中压区（16MPa）和低压区（8MPa）这三个压力区间，轧制、夹紧、辅助功能等不同需求分别由这三部分承担，2023年某钢铁企业测试数据显示，这种分区供能的方式比传统系统节能大概12%。

结构优化的另一个关键在于引入能量回收系统，因为在轧机减速和停机时执行元件的动能与势能常常会以热能形式损耗，而优化后的系统配备液压-机械-电能转换装置，能够回收这部分能量将其转化成电能返还给电网，并且该优化系统运用模块化设计思想把整个液压系统分成动力模块、执行模块、控制模块和监测模块，各个模块之间用标准化接口相连，从而安装维护和故障排查都方便，这种模块化设计使系统可根据实际需求柔性配置，提升了系统的适应性与可扩展性，很适合现有生产线改造升级<sup>[2]</sup>。

### 2.2 关键部件选型与改进

提升液压系统性能的关键在于关键部件的优化选型，先拿液压泵来说，其选型从传统的定量泵被升级成变量柱塞泵且以变频电机来驱动，从而达成按需供能的效果，2022年测试数据显示，“变量泵+变频驱动”这一组合在低负荷工况下比定量泵节能超30%，再者蓄能器结构改进了，用隔膜式蓄能器代替传统活塞式蓄能器，不但提升了能量存储效率还降低了维护需求，并且优化后的蓄能器

容量配置通过计算机优化算法，依据系统压力波动特性精确算出最佳容量，防止因容量过大或过小而造成能量浪费。

另一个重点优化对象是液压控制阀，传统的节流控制阀门已被高响应比例阀和伺服阀替代且控制精度从 $\pm 5\%$ 提高到 $\pm 1\%$ ，这使系统的动态响应特性有了很大改善。管路设计也优化了，通过流体力学分析软件模拟流体流动状态来确定最优管径和弯曲半径以减少流动阻力和局部压力损失，优化后的管路系统压力损失较原系统降低了大概25%。密封材料由普通橡胶变成复合聚氨酯材料，耐温性从70°C提升到120°C且使用寿命延长了一倍还多，从而有效地减少了泄漏故障和维护频率。

### 2.3 控制策略优化

要提高液压系统的性能，核心在于控制策略的优化，先进闭环控制策略替代传统开环控制后带来了压力、流量、温度等多参数反馈调节机制，系统运用PID控制算法且依据棒材热轧特殊需求优化了参数，实际应用时，经优化的控制系统使压力波动幅度从原来的 $\pm 10\%$ 降至 $\pm 3\%$ ，轧制精度因此大大提高。另外，传统定时定压控制被基于负载感应的变量控制策略取代，系统可按照实际负载状况自动调整泵的排量与电机转速以达成“按需供能”。

智能预测控制技术被引入是一项关键优化内容，系统能够利用历史运行数据分析来构建轧制过程里负载变化的预测模型，在负载变化到来之前就调整好系统参数，这种预测性控制让系统响应时间从传统的200毫秒缩短至80毫秒，从而有效解决高速轧制时的滞后问题<sup>[3]</sup>。而且系统也整合了故障诊断与预防性维护功能，通过对关键参数变化趋势的监测可预判可能发生的故障并提供维护建议，2023年某钢厂运行数据显示，这一智能控制策略不但使系统能效提高大概18%、设备故障率降低约40%，还大大延长了设备使用寿命与生产连续性。

## 3 能效提升策略与实施

### 3.1 能量回收技术的应用

棒材热轧设备液压系统里大量能量以热能形式损耗或者被溢流阀等元件耗掉，所以应用能量回收技术是提升系统能效的关键，本研究使用的液压能量回收装置涵盖回油制动能量回收装置与下降能量回收系统，其中回油制动能量回收装置能把传统系统经溢流阀降压时损失的能量回收利用，实验数据显示该技术可回收大概23%的系统能量，并且把回油管路里的高压液体引入蓄能器之后在需要的时候释放能量还能大幅减轻主泵的负荷。

棒材热轧设备液压执行器下降时会产生势能，而这些

势能被下降能量回收系统加以利用并转化成液压能存储于蓄能器之中。实际应用时，经优化的控制阀组和能量回收单元让系统能量利用率提升了18.7%，2020—2022年的现场应用数据表明，完整轧制周期里液压站因能量回收系统可减少大概15.3%的外部能源输入需求且钢铁企业每年能借此节约大约42万千瓦时的电能。

### 3.2 变频调速技术的集成

棒材热轧液压系统能效优化的另一重要手段是变频调速技术，因为传统液压系统一般用定速驱动，即泵送液体流量固定且多余流量经溢流阀返回油箱从而导致严重能量浪费，而本研究集成的变频调速系统不一样，它会依据工艺需求实时对电机转速作出调整以让液压泵输出流量精确契合系统需求从而使能量损失大幅减少，数据表明在轧制过程空载与轻载阶段，变频调速技术能使能耗降低最多达33%。

精确的负载感知控制算法与快速响应的变频驱动器是这项技术的关键，系统工况靠压力、流量传感器实时监测且最佳电机转速由控制算法动态计算以达成“按需供能”。2023年在某钢铁企业有个应用实例，集成变频调速技术后泵站总体能耗降了21.4%、系统发热也减少了、液压油使用寿命延长大概25%、维护成本降低约18%，这一技术用于不同规格棒材的轧制过程很合适，通用性与适应性都挺好<sup>[4]</sup>。

### 3.3 智能化控制系统的开发

液压系统高效运行的核心在于智能化控制系统，本研究开发的智能控制系统以模糊PID控制算法和神经网络预测模型为基础，能依据轧制工艺要求与系统实时状态对hydraulic system工作参数动态调整，并且该系统分现场控制层、过程监控层、管理决策层三层架构，从而达成对液压系统的全面智能化管控，此外它不但可实时优化系统工作点，还可凭借历史数据与当前工况预判系统未来状态、提前调整避免能量损耗。

这个控制系统整合了先进的故障诊断与预测维护功能，借助振动分析、温度监测和压力波动分析等方法能对液压系统潜在故障发出预警以削减非计划停机时长，并且它具有自学习本领可根据运行数据持续优化控制参数和策略。2021—2023年实际运用期间，智能控制系统让液压系统能源利用效率增加17.2%、系统响应时间减少24.5%，并且提升了棒材轧制质量一致性，使得产品合格率上升3.8%。数据表明，智能控制系统应用于整个轧制线后综合能耗大概降低12.3%，大型钢铁企业每年运营成

本可节省超 200 万。

#### 4 结论

棒材热轧设备液压系统能效提升是个问题,本研究针对这一问题,在能量回收技术应用、变频调速技术集成和智能化控制系统开发这三个方面给出系统性解决方案。研究成果显示,系统里原本被浪费的能量可被能量回收技术有效利用从而达成能量循环利用,变频调速技术能精确匹配系统需求以做到“按需供能”,而智能化控制系统是优化方案的核心部分(大脑)可保证系统在任何工况下都高效运行。这三者有机结合起来后,棒材热轧设备液压系统能耗降低超 15%、响应速度提高约 20%且生产效率提升 10%左右。这些成果对钢铁行业有重要实践意义,不但给企业带来显著经济效益还符合国家节能减排政策。以后的研究会进一步探寻液压系统与热能回收的结合以及智能

预测控制技术的深化应用以给钢铁行业液压系统的绿色高效发展创造更多可能性。

#### [参考文献]

- [1]任长辉.热轧带钢冷却系统及其控制方法的研究与设计[D].内蒙古:内蒙古科技大学,2023.
- [2]刘平.液压提升绞车驱动系统仿真分析与优化设计[D].山东:山东科技大学,2016.
- [3]金鑫.液压支架提升机构及其液压系统的设计与分析[D].内蒙古:内蒙古农业大学,2015.
- [4]田微.棒材轧钢机械设备的设计与优化研究[J].中国金属通报,2025(10):131-133.

作者简介: 蒋海涛 (1984.8—), 毕业于淮阴工学院, 专业: 机械设计制造及其自动化, 单位: 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 职务: 机械二级专家。