

The Application of Servo Hydraulic System in Cold Continuous Rolling Mill AGC

Mingchen Zhao

Steel Research Institute Engineering Design Co., Ltd., Beijing, 100081, China

Abstract

Hydraulic AGC technology, with its advantages of smooth transmission, rapid response and high control accuracy, has become a key technology in the continuous rolling production line of plate and strip steel. However, traditional hydraulic systems have the drawbacks of low transmission efficiency and serious energy waste. With the gradual maturation and cost reduction of servo motor technology, the servo-hydraulic system that integrates permanent magnet synchronous servo motors and hydraulic systems Relying on the high efficiency and high power density features of the motor, as well as the energy-saving control method of “pressure closed-loop control + accumulator energy replenishment”, the problems of traditional systems can be effectively solved. The article selects a 1450mm six-stand six-roll cold continuous rolling mill as a case. After optimizing the pump set configuration, valve set matching and control mode of the servo hydraulic system, it achieved an overall energy-saving effect of 44% with only a 10% increase in the comprehensive cost. This translates to an energy-saving cost of 1 yuan per ton of steel and an annual energy-saving cost of over 1 million yuan. It provides an effective technical approach for energy conservation, carbon reduction and enhancing competitive strength in the cold continuous rolling industry.

Keywords

Servo hydraulic system; Cold continuous rolling saves energy; Hydraulic AGC

伺服液压系统在冷连轧机 AGC 中的应用

赵明臣

钢研工程设计有限公司, 中国 · 北京 100081

摘 要

液压AGC技术凭借传动平稳、响应迅速、控制精度高的优势,已然成为板带钢连轧生产线的关键技术,然而传统液压系统有传动效率低、能耗浪费严重的弊端,伴随伺服电机技术渐趋成熟、成本降低,把永磁同步伺服电机和液压系统整合起来的伺服液压系统,依靠电机具备的高效率、高功率密度特点,以及“压力闭环控制+蓄能器补能”的节能控制手段,切实化解传统系统的难题。文章选取某1450mm六机架六辊冷连轧机组作为案例,该伺服液压系统经对泵组配置、阀组搭配及控制模式加以优化,在综合成本只增加10%的情形下,取得44%的整体节电成效,折合吨钢节能成本1元,一年节电费用超100万元,为冷连轧行业节能降碳、提升竞争实力提供了有效技术途径。

关键词

伺服液压系统; 冷连轧节能; 液压AGC

1 引言

液压传动控制以其传动平稳、调速方便、功率体积比大、精度高响应快等诸多优点在许多领域得到了广泛的利用,尤其是在力能参数较大的冷轧板带领域,应用十分广泛,当前的板带钢连轧生产线基本全部采用液压 AGC 技术。

液压传动也有一定的缺点,主要是整体传动效率较低,运行过程能量浪费比较严重,因此液压传动系统的节能研究一直备受重视,这对于企业节约成本至关重要。伴随着伺服电机技术日益完善以及成本的不断降低,在传统的液压节能

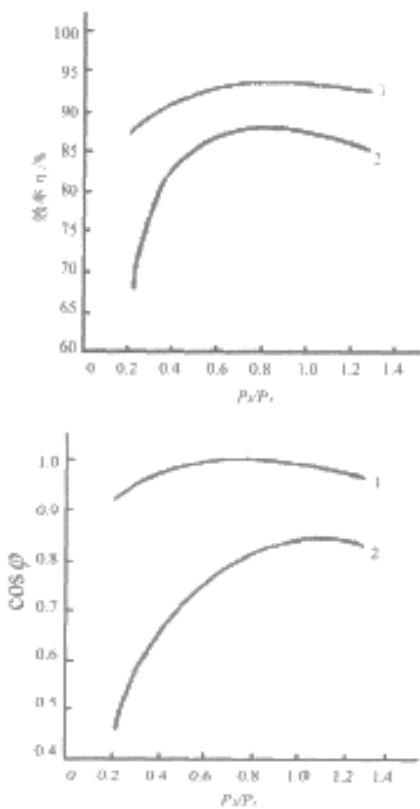
增效已经很少有新的成果的情况下,将伺服电机应用于液压系统的伺服液压系统不断出现,在液压传动节能领域开拓出一片天地。

2 伺服电机驱动的液压系统介绍

伺服电机即永磁交流电动机,学名为永磁同步电机,它的主要特点有:(1)高效率:这是其最核心的优势。转子磁场由永磁体提供,不需要从电网汲取电流来励磁,因此没有转子铜耗(这是异步电机的主要损耗之一)。这使得它在很宽的转速和负载范围内都能保持极高的效率,尤其是在部分负载工况下,优势更加明显。而异步电机在低于额定功率后效率急速下降。(2)高功率密度:由于永磁体提供了强大的磁场,可以在更小的体积和更轻的重量下输出更大的

【作者简介】赵明臣(1981-),男,中国北京人,本科,高级工程师,从事轧钢专业研究。

功率。这对于空间和重量都极其敏感的应用（如电动汽车）至关重要。（3）高功率因数：伺服电机作为永磁同步电机在正常运行时功率因数很高，甚至可以接近1。高功率因数意味着减少了无功功率的消耗和供电线路的损耗。在同样容量的电网下，可以驱动更多或更大功率的设备。（4）优异的调速性能和控制精度，通过伺服控制器结合，可以实现非常精确的转速和转矩控制。（5）响应速度快，动态性能好，能够快速跟随指令变化，从启动到额定转速仅需20ms左右。（6）过载能力突出，可以长时间过载20%运行，瞬时允许过载100%。下图为具有相同功率的伺服电机和普通三相异步电动机的效率及功率因数的曲线对比。



液压系统通过采用伺服电机驱动定量齿轮泵的方式，并配置多组蓄能器，泵出口装有压力传感器，由伺服控制来实现压力闭环控制。相较于变量柱塞泵通过调整倾斜角度来调整输出流量，伺服电机通过转速来调整流量的方式响应更迅速。利用伺服电机启动迅速并可以频繁启停的特点，在压力闭环系统中，当系统压力达到设定上限压力后，伺服电机可以减速运行甚至停止，由蓄能器维持执行机构的运动，当系统压力低于下限压力后，伺服电机迅速启动，使系统压力恢复。这样就避免了由电机空转所带来的能耗。

综上，由于伺服电机本身的节能特性与节能的控制方式为伺服液压系统节能提供很大空间，尤其是在执行机构间歇运动的情况，节能效果更加明显。根据有关改造项目实际对比，应用伺服液压系统相较于传统的液压系统可以节能40%-60%。

3 伺服液压系统在冷连轧机 AGC 中的应用

冷轧机 AGC 液压系统为冷轧机压下油缸提供动力，压下油缸内置位移传感器，自动化系统控制压下油缸活塞的位置，即实现某一设定辊缝，控制系统通过闭环控制实现辊缝根据带钢出口入口的厚度、速度、加速度等参数变化进行快速动态调节。这种调节要求响应极快，但一般都是进行微调，当入口厚度变化不大时，油缸的微调量在 $\pm 0.01\text{mm}$ 范围内，稳定状态下几乎为零，这时整个液压系统的流量消耗是很小的。而连轧机由于采用无头轧制微调状态可以占到生产时间的90%左右。这样的工况是非常适用于伺服液压系统的。

下面我们以某1450mm六机架六辊冷连轧机组为例，介绍一下冷连轧 AGC 的伺服液压系统。

3.1 总体参数介绍

该1450mm六机架六辊冷连轧机组共配置12只压下油缸（每台轧机2只），由一个集中液压站提供油源，每台轧机的2只油缸通过一套独立阀组实现精准控制，核心参数如下：压下油缸直径 $\phi 800\text{mm}$ ，行程250mm，内置高精度位移传感器（测量精度 $\pm 0.001\text{mm}$ ），确保辊缝调节精度；系统额定压力25MPa，适配冷轧轧制力需求，避免油缸过载；控制响应要求 AGC 微调时阀组频响 $\geq 100\text{Hz}$ ，确保快速补偿带钢厚度波动。

3.2 确定系统总流量

系统流量配置要兼顾“常态微调低流量”和“峰值工况大流量”这两项需求，当轧制过程稳定下来，6台轧机 AGC 微调所需总流量仅为50-80L/min，伺服电机大多处于怠速运行或者间歇性工作状态；快速换辊期间，单台轧机油缸的最大运动速度为5mm/s，所需流量约200L/min；紧急卸荷时，辊缝开启速度会超过20mm/s，单台轧机所需流量约400L/min。

经综合测算，系统将额定总流量设定为1250L/min，采用“五用一备”泵组配置，即时最大流量可达到1800L/min，可充分应对六机架同时快速下压（最高速度5mm/s）、三机架同时下压（最大速度15mm/s）以及紧急卸荷等极限工况，维持生产的连续性。

3.3 泵组与蓄能器匹配设计

想要实现“按需供能”，关键是对泵组和蓄能器进行合理匹配，要依据流量需求和压力稳定性要求开展设计。

泵组所选的5台工作泵皆由110KW汇川伺服电机带动日本住友内啮合齿轮泵运转，泵的排量为125ml/r，电机额定转速为2000rpm，单台泵在额定转速的状态下输出流量达：单台泵以125ml/r排量、2000rpm转速运行时流量为250L/min，5台工作泵的总额定流量达1250L/min，契合系统需求；电机处于最高转速状态下，单泵流量可提升到375L/min，以满足峰值流量补充要求，相较传统变量柱塞泵，运行噪音低（ $\leq 75\text{dB}$ ），维护周期达8000小时，可减少液压站运维成本。

通过系统压力波动允许的范围 ($\pm 0.5\text{MPa}$) 与间歇工况下的流量缺口计算蓄能器配置, 一共配置 8 组 100L、工作压力 25MPa 的皮囊式蓄能器, 分成 2 组以并联方式接入主油路, 每一组蓄能器均设置压力继电器与安全阀, 若单组蓄能器压力出现异常, 会自动截断油路并报警, 防止对整个系统造成影响。系统实际运转过程中, 一旦系统进入 AGC 微调工况, 蓄能器能使压力稳定维持 15 - 20 秒, 此阶段伺服电机无需开启, 从而再降低怠速能耗; 当处于峰值流量工况时, 蓄能器能协助泵组迅速补充能量, 防止系统压力急剧下降, 保证油缸运动的平稳性。

3.4 阀组配置与功能分工

为达到“大流量快速响应”与“小流量精准控制”的目标, 且平衡好成本与性能, 每只压下油缸都配备了“伺服阀 + 比例阀 + 插装阀”的复合阀组。小流量伺服阀采用 MOOG D661 型伺服阀 (额定流量 60L/min, 频率响应达 150Hz, 用于稳定轧制时开展 AGC 微调工作, 此时插装阀关闭, 油液仅经伺服阀流入油缸, 依靠伺服阀的高频率响应特性, 完成 $\pm 0.01\text{mm}$ 的辊缝微调, 保证板带厚度精确性, 该型号的伺服阀采用电反馈构造, 控制精度可达 $\pm 0.5\%$, 可有力弥补油温变化对阀流量特性造成的影响。

采用 Rexroth 4WRZE32W8 型大流量比例阀 (额定流量 300L/min, 控制精准度达 $\pm 1\%$, 承担快速换辊、紧急卸荷等大流量场景的工作, 这时插装阀打开, 比例阀调节大流量的油液, 使油缸快速动作, 比例阀配备内置压力补偿装置, 能够在系统压力波动期间维持流量的稳定, 防止油缸运动速度骤然变化。

采用通径 $\phi 32\text{mm}$ 的二通式电磁插装阀作为插装阀, 充当油路切换的开关, 由 PLC 按工况自动调控通断, 其切换响应时间不超过 20ms, 保障两种控制模式实现无缝切换, 杜绝油液串扰情况, 于插装阀的入口配置过滤精度达 $10\mu\text{m}$ 的过滤器, 杜绝杂质进入油缸而破坏密封件, 增加油缸使用期限。与“全大流量伺服阀”设计相比, 能让阀组采购成本降低 50%, 还能防止大流量伺服阀在小流量微调时出现“大马拉小车”情况, 增强控制精度并延长阀件寿命。

3.5 工作控制模式

系统实施“压力闭环为主、流量补偿为辅”的控制策略, 依据工况动态调节泵组运行状况。常态轧制 (AGC 微调) 期间, 5 台工作泵全部进入压力闭环控制模式, 使系统压力维持在 22MPa - 25MPa; 若单台或两台轧机需做微调, 若流量需求不超过 100L/min, 优先由蓄能器进行补能, 泵组仅让 1 - 2 台电机以 800 - 1200rpm 的低速转动, 其他电机停止

工作, 此时系统能耗仅为传统系统的 30% - 40%。

在多机架协同动作情形下, 若 3 台及以上轧机同时开展快速压下或卸荷动作, 若系统流量需求超过 750L/min, 控制器借助 CAN 总线发出命令, 促使 5 台工作泵均以 125% 额定转速 (2500rpm) 开展运行, 使总输出流量提至 1562.5L/min, 保证油缸运动速度契合工艺要求; 蓄能器同步降压, 减少系统压力构建时长。

若检测到辊缝异常、带钢跑偏等故障, 系统即刻自动开启备用泵, 6 台泵 (其中 5 台工作、1 台备用) 都以 125% 转速运作, 实现输出流量达 1875L/min, 借助快速卸荷阀让辊缝开启速度超过 20mm/s, 保证 1 秒内实现安全卸荷, 保障设备和人员的安全。单台轧机的油缸要以 0.5 - 1mm/s 的速度缓慢伸出或缩回, 系统转换为“流量控制模式”, 通过调整电机转速让泵的输出流量稳定在 200L/min, 并且开启油缸缓冲功能, 防止油缸运动冲击对换辊装置 (如辊缝测量仪) 造成损坏。

3.6 投资成本对比

相较于传统的冷连轧机采用普通异步电机驱动恒压变量柱塞泵 (Rexroth 的 A4V 系列), 1450mm 六机架六辊冷连轧机组的 AGC 伺服液压系统在伺服电机和伺服驱动器方面提高了成本, 同时蓄能器的数量也有所增加, 但是选用的内啮合齿轮泵相较于恒压变量柱塞泵却能节省很多, 综合下来, 1450mm 六机架六辊冷连轧机组的 AGC 伺服液压系统相较传统配置成本提高仅 10%。

3.7 节能效果

通过与相同产线的常规 AGC 液压系统对比, 1450mm 六机架六辊冷连轧机组的 AGC 伺服液压系统整体节电率达到 44%, 折合到每吨带钢成品约 1 元 / 吨。节能效果明显, 年节电超 100 万元。

4 结语

伺服电机技术已经在全社会广泛应用, 作为能耗大户的轧钢行业也要与时俱进, 不断应用新的节能技术, 减少碳排放, 降低成本, 从而提高自身的竞争力。伺服液压系统在冷连轧机 AGC 中的应用取得了很好的节能增效的效果, 是成功的。笔者希望通过以上应用介绍给予读者一些借鉴。

参考文献

- [1] 贾永峰. 永磁同步电机驱动的液压动力系统设计与实验分析. 中国机械工程, 2012, 23(3): 286.
- [2] 刘宝权. 冷轧机液压 AGC 系统动态模拟. 鞍钢技术, 2006(2): 26
- [3] 连家创, 刘宏民. 板厚板形控制. 北京: 兵器工业出版社, 1996.
- [4] 邱春来等. 节能伺服油源控制系统. 工程与试验, 2024, 64(02).