

# 冷轧关键电气节能改造技术及工程实践

褚国杨

上海宝钢节能环保技术有限公司, 上海

收稿日期: 2026年4月20日; 录用日期: 2026年6月2日; 发布日期: 2026年6月9日

## 摘要

冷轧关键设备电气系统能耗高、负荷波动大, 在节能减排和成本控制要求下亟需系统化改造。文章从变频调速、无功补偿与谐波治理、再生能量回收、智能控制等常用手段切入, 提出以液压伺服系统为重点的电气节能优化思路, 梳理液压伺服系统的能耗特征、节能机理与实施路线, 并结合精整机组改造实践进行阐释。通过建立伺服液压系统数学模型并设计PID控制策略, 深化了节能改造的理论基础。研究认为, 采用电气与液压协同优化策略, 可在保证产品质量与设备稳定性的前提下降低能耗、提升运行效率和可维护性, 为冷轧生产线节能改造提供可推广的技术路径。

## 关键词

冷轧关键电气, 节能改造技术, 工程实践

# Key Electrical Energy-Saving Retrofitting Technologies and Engineering Practice for Cold Rolling Process

Guoyang Chu

Shanghai Baosteel Energy Tech Co., Ltd., Shanghai

Received: April 20, 2026; accepted: June 2, 2026; published: June 9, 2026

## Abstract

The electrical systems of key cold rolling equipment exhibit high energy consumption and significant load fluctuations, necessitating systematic upgrades to meet energy conservation, emission reduction, and cost control requirements. This study explores conventional solutions including variable

frequency drive speed regulation, reactive power compensation with harmonic mitigation, energy recovery systems, and intelligent control technologies. By establishing a mathematical model of the servo-hydraulic system and designing a PID control strategy, the theoretical foundation of energy-saving retrofits is enhanced. It proposes an electrical energy optimization strategy centered on hydraulic servo systems, detailing their energy consumption characteristics, energy-saving mechanisms, and implementation pathways, supported by practical refinishing line retrofitting case studies. Research findings demonstrate that integrated electrical-hydraulic optimization strategies can effectively reduce energy consumption while maintaining product quality and equipment stability, enhancing operational efficiency and maintainability. This approach provides a scalable technical pathway for energy-efficient retrofits in cold rolling production lines.

## Keywords

Key Electrical Systems for Cold Rolling, Energy-Saving Retrofitting Technology, Engineering Practice

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冷轧生产线是钢铁制造流程末端的关键环节，承担薄板质量控制和表面精整任务，其电气驱动与液压控制设备长期处于高负荷、频繁调节状态，能耗在钢铁企业能源结构中占比较高。近年来，变频调速、无功补偿与谐波治理、再生能量回收等电气节能技术逐步成熟，智能控制策略也得到初步应用[1]。然而，现有研究多聚焦于单一设备或子系统优化，对电气与液压系统间的能量耦合关系关注不足，主要体现在液压伺服节能改造多停留在泵控替换层面，缺乏从控制理论角度对伺服系统响应特性与能耗关系的深入解析，导致改造方案在不同工艺阶段的适应性难以预判[2]。为此，本文在梳理常用电气节能技术的基础上，重点针对液压伺服系统，通过建立其数学模型并设计 PID 控制策略，结合精整机组改造实践，探索电气-液压协同优化的系统化节能路径。

## 2. 常用电气节能改造技术综述

### 2.1. 变频调速节能改造技术

变频调速的核心是通过变频器调整电机频率和电压，使电机输出与负载需求动态匹配，减少低负荷工况下的能量浪费。冷轧设备存在频繁启停与速度调整，传统恒速驱动效率低[3]。采用变频调速可实现柔性控制，降低机械冲击和启动电流，提高系统稳定性。

### 2.2. 无功补偿与谐波治理节能技术

该技术用于改善功率因数与波形质量，降低线路损耗。冷轧大容量电机及变频装置易产生无功功率与谐波电流，导致电压波动和设备发热。配置无功补偿装置可快速提供无功支持，谐波治理则降低电流畸变，减少附加损耗和故障[4]。

### 2.3. 再生能量回收与利用技术

该技术将轧机减速、制动时产生的能量回收利用。传统方式中回馈能量通过制动电阻消耗为热量，

造成浪费。采用再生能量回收装置可将能量反馈至电网或储能系统，减轻电网负荷波动，提升整体供电效率。

## 2.4. 智能控制系统节能优化技术

智能控制通过数据采集与策略优化实现设备运行状态动态调整。冷轧工艺环节复杂，单一设备优化效果有限。智能控制可实时监测负荷变化，实现电机转速、液压压力等的优化控制，使能源供应与实际需求精准匹配。

## 2.5. 液压伺服节能技术

液压伺服节能技术将电气驱动与液压执行高效结合，解决传统恒压供油能量浪费问题。冷轧精整设备需高精度压力控制，传统节流方式产生大量损失。采用液压伺服技术可通过电机变速驱动泵源，实现流量与压力的按需供给，提高控制精度[5]。

## 3. 液压伺服节能技术特点及实施

### 3.1. 液压伺服系统组成与能耗特点

系统由伺服电机、液压泵、控制阀、执行机构、传感器与控制器等构成。传统液压系统采用定速电机驱动定量泵，溢流和节流损失严重。液压伺服系统通过伺服电机驱动变量泵，实现流量和压力随负载实时调整，减少无效能耗。

### 3.2. 液压伺服系统数学模型与控制策略

为深入揭示节能调控机理，建立泵控缸系统数学模型。伺服电机驱动液压泵，输出流量  $Q_p = D_p n - C_{ip} p_L$ ；流量连续性方程：

$$Q_p = A \frac{dx}{dt} + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dp_L}{dt} + C_{ip} p_L \quad (1)$$

力平衡方程：

$$A p_L = m \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx + F_L \quad (2)$$

拉普拉斯变换后得开环传递函数：

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K_q/A}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi h}{\omega h} s + 1 \right)} \quad (3)$$

采用 PID 控制器改善动态性能，参数整定采用临界比例度法： $K_p = 0.6K_{cr}$ ， $K_i = 0.5T_{cr}$ ， $K_d = 0.125T_{cr}$ 。实际调试中结合精整工艺要求，确保压力波动控制在  $\pm 0.1$  MPa 以内。

### 3.3. 液压伺服节能改造原理与技术路线

液压伺服节能改造原理是以按需供能为核心，通过伺服电机驱动泵源实现流量与压力的动态匹配，减少节流和溢流造成的能量损耗。技术路线通常从系统负载特性分析入手，确定液压系统在不同工况下的压力和流量需求，并在此基础上选择适配的伺服电机与液压泵组合。如图 1 所示，改造过程中需要将传统的恒压供油方式调整为变量供油方式，并通过压力与速度闭环控制保持执行机构的稳定性与精度。

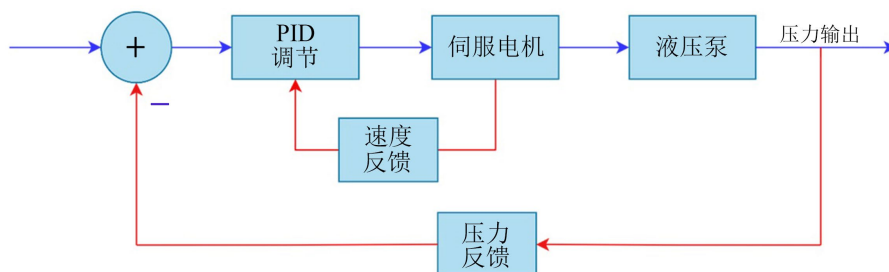


Figure 1. Block diagram of hydraulic servo energy-saving renovation system

图 1. 液压伺服节能改造系统框图

### 3.4. 液压伺服节能技术优势与实施要点

在冷轧关键电气节能改造中，“电气-液压协同节能”通过深度融合电气控制的高动态响应与液压执行的大推力特性，形成了区别于传统单系统优化的显著优势。其核心在于以“按需供能”为纽带，电气系统实时采集冷轧工艺负载特性，通过算法解析压力-流量需求包络线，精准驱动伺服电机带动变量泵源，使液压系统摆脱传统恒压供油的“大马拉小车”困境，实现流量与压力的毫秒级动态匹配——既消除节流阀调压、溢流阀卸荷造成的30%~70%无效能耗，又借电气闭环控制保障轧机辊缝定位精度与带钢板形质量。液压伺服系统采用闭环控制能够提高执行机构的位置和压力控制精度，适应冷轧生产对板形和张力的严格要求，保证产品质量一致性。

## 4. 精整机组液压伺服节能改造

### 4.1. 工程改造项目概况

本项目针对 C373 精整机组进行液压伺服节能改造，解决传统液压站能耗高、响应慢问题。原系统采用“定速电机+定量泵”供油，低负荷下仍高功率运行，油温高、噪声大。改造以节能降耗和可靠性提升为目标，引入液压伺服节能技术及压力闭环 PID 控制策略。

### 4.2. 节能改造技术实施方案

节能改造技术实施方案以精整机组液压伺服节能改造为主线，首先对 C373 液压站的三组泵进行伺服电机驱动改造，将原有工频电机更换为响应快、调速范围大的伺服电机，使泵组输出流量和压力随负载实时调整，从源头减少无效供油。

以 C373 液压站为例，改造前该站配置油泵 3 台，运行方式为“二用一备”，油泵品牌为 REXROTH，型号为 A4VSO180DR/30R-PPB13N00，系统压力 14.0 MPa、泵排量 180 cm<sup>3</sup>/r、泵额定转速 1500 rpm；驱动电机采用 ABB 品牌 M2QA280S4A 型号，额定功率 75 kW、额定电压 380 V、额定转速 1475 rpm。可按已知参数先计算电机扭矩需求： $T = 0.159 \times 14 \times 180 / 0.85 = 471.39 \text{ Nm}$ ，因此选用额定扭矩大于 471.39 Nm 的电机即可满足工况；同时考虑功率冗余和与原异步电机功率基本一致的原则，最终选用 MV21-26G75D15CD-A3A1F 型伺服电机，其额定功率 75 kW、额定扭矩 478 Nm、额定转速 1500 rpm、最大扭矩 690 Nm、额定电流 135 A、峰值电流 223 A，能够满足现场液压油泵驱动需求。伺服驱动器选型 ES660T170-C1/90 kW，可满足现场使用。

为获取改造前对比数据，在相同工况(平整速度 120 m/min、张力设定 8 kN、连续运行一个完整换辊周期 4 小时)下，对原工频驱动系统进行实测。采用 Fluke 435-II 电能质量分析仪，采样频率 1 Hz，记录三相有功功率。测得改造前平均有功功率为 42.5 kW，系统油温稳定在 52℃~56℃，压力响应时间(从指

令到稳态值 90% 的上升时间)约 0.32 s。

### 4.3. 改造后能耗数据监测与效果分析

改造后, 在伺服驱动器直流母线侧接入功率采集模块(采样频率 1 kHz, 记录瞬时功率并计算秒平均值), 同时通过 PLC 采集系统压力、油温及机组运行状态信号。测试工况与改造前保持一致(平整速度 120 m/min、张力设定 8 kN、连续运行 4 小时), 确保数据可比性。能耗计算采用基于完整周期的时间积分法:  $E = \int_0^T P(t)dt$ , 其中  $T$  为测试周期时长,  $P(t)$  为瞬时功率。通过数值积分(梯形法则)计算总电能消耗, 再除以周期时长得到平均功率。

如表 1 所示, 改造后测得平均有功功率为 25.4 kW, 系统油温下降至 42℃~46℃, 压力响应时间缩短至 0.18 s。运行过程中未出现影响工艺节拍的异常现象, 表明 PID 控制策略( $K_p = 85, K_i = 0.3, K_d = 0.02$ )与原有生产控制系统的协同良好, 系统稳定性和可维护性得到提升。根据积分法计算节电率:

$$\eta = (P_{before} - P_{after}) / P_{before} \times 100\% = (42.5 - 25.4) / 42.5 = 40.24\%$$

与基于空载估算的结果(40.18%)高度吻合, 验证了数据的可靠性。按年运行时间 8400 h 计算, 年节电量约为  $(42.5 - 25.4) \times 8400 = 143640$  kWh。

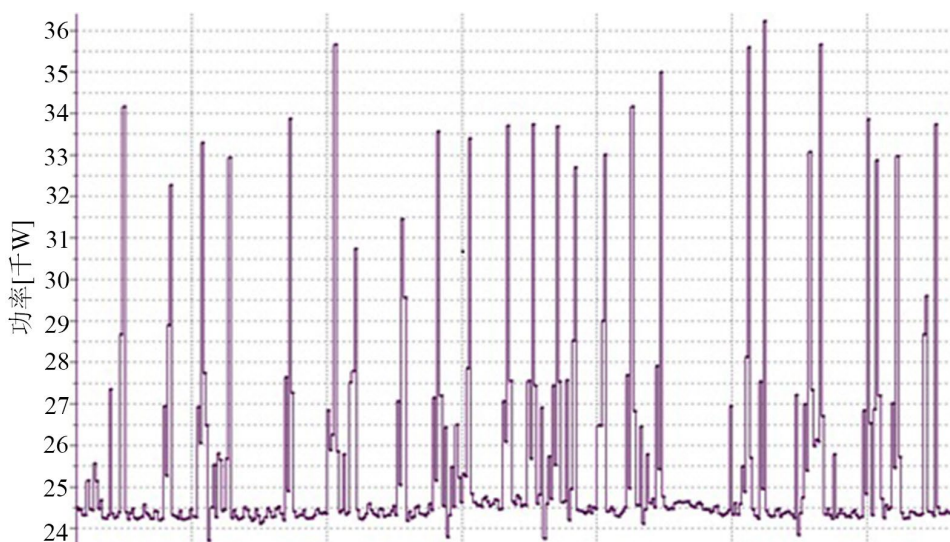


Figure 2. Power waveform of No.1 motor at C373 station

图 2. C373 站 1#电机功率波形图

Table 1. Comparison of key performance indicators before and after renovation

表 1. 改造前后关键性能指标对比

指标	改造前(工频驱动)	改造后(伺服驱动 + PID)	变化
平均有功功率/kW	42.5	25.4	-40.2%
待机功耗/kW	24.3	1.5	-93.8%
峰值功率/kW	75.0 (启动冲击)	52.0 (平滑启动)	-30.7%
系统油温/℃	52~56	42~46	-10℃
压力响应时间/s	0.32	0.18	-43.8%
噪声/dB (A)	88	76	-12 dB

对图 2 波形进行分段解读：0~60 s 对应“待机阶段”，伺服电机以约 1.5 kW 功率维持待命，远低于改造前工频空载功率(24.3 kW)；60~120 s 为“加速 - 恒速”阶段，功率随负载需求上升至 40~50 kW 峰值后稳定在 25~30 kW，对应平整轧制与张力建立过程；120~180 s 为“减速 - 保压”阶段，功率快速回落至 5~10 kW，此时系统仅需补充泄漏流量以维持保压。各阶段功率包络线与工艺负载精确匹配，体现了按需供能的节能本质。

#### 4.4. 经济效益与推广应用价值

改造后节能率达 40.2%，按需供油减少空载运行，伺服电机在无负载时待机，工况改变时快速启动。油温降低延长了密封件和泵阀寿命，减少了维护成本，具有明确的经济回报和推广价值。

### 5. 结束语

本文系统梳理了冷轧电气节能改造技术路径，针对液压伺服系统建立了数学模型，设计了 PID 控制策略，并在 C373 精整机组中成功应用。改造后节电率 40.2%，响应时间缩短 43.8%，油温下降 10℃，实现了电气 - 液压协同优化目标。本研究的局限性在于：结论基于特定机组，模型参数在不同设备间存在差异，向其他冷轧设备推广需重新整定参数。本文的贡献聚焦于：将伺服液压节能技术与控制理论相结合，成功应用于冷轧精整机组，并通过实测数据量化了显著效果，为同类改造提供了可复现的技术范式。

### 参考文献

- [1] 刘云. 不锈钢冷轧工艺中电气控制系统的稳定性分析与改进[J]. 特钢技术, 2025, 31(4): 59-62.
- [2] 赵贺. 节能技术在建筑电气照明系统施工中的实践研究[J]. 中国建筑金属结构, 2026, 25(5): 127-129.
- [3] 李永. 机械设备电气工程自动化供配电节能控制技术[J]. 中国科技信息, 2026, 38(6): 138-140.
- [4] 江知航. 基于电气自动化技术的冷轧轧钢生产线自动控制研究[J]. 邯郸职业技术学院学报, 2023, 36(3): 31-32+45.
- [5] 吴涛. 冷轧厂电气设备的维护与管理分析[J]. 电子技术, 2022, 51(10): 212-213.