

# 液压技术在自动化生产线中的集成与控制方法分析

方应好

南水北调中线信息科技有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4964

**[摘要]** 随着工业4.0和智能制造的深入推进,自动化生产线对执行机构的动力性能、响应速度、控制精度及系统可靠性提出了更高要求。液压技术凭借其功率密度大、响应快、易于实现直线运动和力控制等固有优势,在重型、高负载、高动态响应的自动化生产场景中依然占据不可替代的地位。本文旨在系统性地分析液压技术在现代自动化生产线中的集成模式与先进控制方法。首先,阐述了液压技术的基本原理及其在自动化领域的核心优势;其次,深入探讨了液压系统与PLC、工业总线、MES/ERP等上层信息系统的多层次集成架构;再次,重点剖析了从传统比例/伺服阀控制到基于模型预测控制(MPC)、自适应控制及智能算法的先进液压控制策略。研究表明,通过深度集成与智能化控制,液压技术正焕发新的活力,为构建高效、柔性、可靠的下一代自动化生产线提供关键支撑。

**[关键词]** 液压技术; 自动化生产线; 系统集成; 先进控制; 智能制造

**中图分类号:** TH137 **文献标识码:** A

## Analysis of Integration and Control Methods of Hydraulic Technology in Automated Production Lines

Yinghao Fang

South-to-North Water Diversion Middle Route Information Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** With the deepening advancement of Industry 4.0 and intelligent manufacturing, automated production lines have placed higher demands on the power performance, response speed, control accuracy, and system reliability of actuators. Hydraulic technology, with its inherent advantages of high power density, fast response, ease of achieving linear motion, and force control, still occupies an irreplaceable position in heavy-duty, high-load, high-dynamic response automated production scenarios. This paper aims to systematically analyze the integration modes and advanced control methods of hydraulic technology in modern automated production lines. First, it expounds on the basic principles of hydraulic technology and its core advantages in the automation field. Second, it deeply explores the multi-level integration architecture of hydraulic systems with upper-level information systems such as PLC, industrial bus, and MES/ERP. Third, it focuses on analyzing advanced hydraulic control strategies ranging from traditional proportional/servo valve control to model predictive control (MPC), adaptive control, and intelligent algorithms. Research shows that through deep integration and intelligent control, hydraulic technology is gaining new vitality, providing key support for building efficient, flexible, and reliable next-generation automated production lines.

**[Key words]** hydraulic technology; automated production line; system integration; advanced control; intelligent manufacturing

### 引言

自动化生产线是现代制造业核心,其技术水平关乎产品质量、效率及企业竞争力。追求更高柔性、速度和精度时,生产线执行单元需强大动力与精准控制。电动驱动虽广泛应用,但在处理巨大负载、要求极高动态响应的工况下,液压技术凭借高功率密度、直接平稳输出直线运动、方便无级调速和过载保护等特

性,仍具无可比拟优势。然而,传统液压系统存在高能耗、高噪音、控制精度不足、维护复杂等问题,源于早期控制方式及缺乏与上层信息系统交互<sup>[1]</sup>。工业4.0时代,智能制造体系要求液压执行器成为智能节点,能感知、通信、分析并自主优化。因此,如何深度融合液压技术与现代信息技术、先进控制理论,实现其在自动化生产线中的高效、智能、绿色集成,是极具现实意义的

研究课题。本文将围绕此问题展开论述,介绍液压技术原理、适用场景、集成架构、控制方法、应用效果及未来趋势。

## 1 液压技术的基本原理与自动化应用优势

### 1.1 液压传动基本原理

液压技术基于帕斯卡定律,即在密闭容器内的静止流体中,施加于任何一点的压力,将以同等大小向各个方向传递。一个典型的液压系统由五大基本部分构成:(1)动力元件(液压泵):将原动机(通常是电动机)的机械能转换为液体的压力能。(2)执行元件(液压缸、液压马达):将液体的压力能转换为机械能,驱动负载做直线往复运动(液压缸)或旋转运动(液压马达)。(3)控制元件(各种阀类):用于控制液体的压力、流量和流动方向,从而控制执行元件的力、速度和运动方向。其中,比例阀和伺服阀是实现连续、精确控制的关键。(4)辅助元件(油箱、滤油器、蓄能器、管路等):保证系统正常工作所必需的部件。(5)工作介质(液压油):传递能量、润滑、冷却和防锈。

### 1.2 在自动化生产线中的核心优势

相较于气动和电动驱动,液压技术在特定自动化应用场景中具有显著优势:(1)高功率密度:液压执行器能在极小的体积和重量下输出巨大的力或扭矩,这对于空间受限但负载巨大的自动化设备(如汽车车身焊装夹具、大型压力机)至关重要。(2)优异的力/扭矩控制能力:通过调节系统压力,可以非常容易且精确地控制输出力或扭矩,这在需要恒定压装力、夹紧力或材料成型力的工艺中(如轴承压装、复合材料热压罐)是电动驱动难以企及的。(3)良好的动态响应特性:现代电液伺服系统具有极高的频宽,能够实现毫秒级的快速响应和复杂的轨迹跟踪,满足高速、高精度自动化作业的需求。(4)过载保护与安全性:液压系统天然具备过载保护能力(通过溢流阀),当负载超过设定值时,系统压力不再升高,从而保护设备和工件安全。(5)易于实现直线运动:液压缸可直接输出大推力的直线运动,省去了电动系统中常用的丝杠、齿轮齿条等中间转换机构,简化了机械结构,提高了系统刚度和可靠性。

## 2 自动化生产线中液压系统的多层次集成架构

### 2.1 物理层与控制层的集成(PLC/DCS层面)

这是最基础也是最关键的集成层次。可编程逻辑控制器(PLC)或分布式控制系统(DCS)作为生产线的“大脑”,负责协调各工序的逻辑顺序和实时控制。液压系统的集成主要体现在以下几个方面:(1)I/O信号集成:液压系统的状态信号(如压力开关、位置传感器、温度传感器、液位开关的数字量或模拟量信号)通过硬接线接入PLC的输入模块。PLC根据预设的逻辑程序,输出控制信号(如启动/停止泵、切换电磁换向阀)至液压系统的输出模块。(2)现场总线集成:随着现场总线技术(如Profibus-DP, CANopen, EtherCAT, Profinet)的普及,越来越多的智能液压元件(如带集成电子放大器的比例/伺服阀、智能液压泵)支持总线通信。这极大地减少了布线成本,提高了数据传输速率和抗干扰能力。PLC可以通过总线直接读取液压阀的实时流量、压力、阀芯位置等参数,并下发设定值,实现更精细的闭环控制<sup>[2]</sup>。(3)

运动控制集成:对于需要高精度同步或多轴协调的复杂液压应用(如多缸同步顶升、机器人液压关节),专用的运动控制PLC或运动控制器(Motion Controller)会介入。它们利用高速总线(如EtherCAT)与液压伺服驱动器通信,执行复杂的运动规划(如S形加减速、电子凸轮),并将指令转化为精确的电流信号驱动伺服阀。

### 2.2 监控层的集成(SCADA/HMI层面)

监控与数据采集系统(SCADA)和人机界面(HMI)构成了操作员与生产线交互的窗口。液压系统的集成在此层面表现为:(1)可视化监控:HMI上可以实时显示液压系统的各项关键参数,如系统压力、油温、油箱液位、各执行器的位置和速度、报警信息等。操作员可以直观地了解液压单元的工作状态。(2)远程诊断与维护:通过SCADA系统,工程师可以在中央控制室甚至远程对液压系统进行诊断。系统可以记录历史数据,分析压力波动、温度异常等趋势,实现预测性维护,避免非计划停机。(3)参数在线调整:在授权情况下,操作员或工程师可以通过HMI在线修改液压控制回路的PID参数、压力设定值、速度曲线等,无需停机或打开控制柜,大大提升了生产线的柔性。

### 2.3 管理层的集成(MES/ERP层面)

在工业4.0的语境下,液压系统产生的数据最终需要向上汇聚到制造执行系统(MES)和企业资源计划(ERP)系统,以支持更高层次的决策优化。(1)OEE(设备综合效率)计算:液压系统的故障停机时间、性能损失(如因压力不足导致的速度下降)等数据可以被MES系统采集,用于精确计算OEE,识别生产瓶颈。(2)能源管理:液压系统是生产线的主要能耗单元之一。通过集成智能流量/压力传感器,可以实时监测液压单元的能耗,并将数据上传至能源管理系统。管理者可以据此分析能耗模式,优化生产调度,或评估变频驱动、负载敏感等节能技术的投资回报率。(3)全生命周期管理:液压元件的运行小时数、启停次数、油液污染度等数据可以与MES中的设备档案关联,为备件库存管理、维修计划制定和设备报废决策提供数据支持。

## 3 液压系统在自动化生产线中的先进控制方法分析

控制策略是决定液压系统性能上限的核心。随着微电子技术和控制理论的发展,液压控制已从简单的开关控制发展到高度智能化的先进控制。

### 3.1 经典控制方法

#### 3.1.1 开关控制

使用普通的电磁换向阀,执行器只有“全开”或“全关”两种状态。控制简单、成本低,但无法调节速度和位置,冲击大,仅适用于对精度要求不高的场合。

#### 3.1.2 比例控制

采用比例电磁铁驱动的换向阀或节流阀,阀的开口度与输入电信号(通常是±10V或4-20mA)成比例<sup>[3]</sup>。通过调节输入信号,可以连续控制执行器的速度和方向。配合位置或压力传感器,可以构成简单的闭环系统,提高控制精度。

#### 3.1.3 伺服控制

电液伺服阀(EHSV)具有极高的响应频率和控制精度。它通常采用喷嘴挡板或射流管原理,配合高增益的伺服放大器,能够实现微米级的位置控制和毫秒级的动态响应。经典的PID(比例-积分-微分)控制器是伺服系统中最常用的控制算法,通过调节P、I、D三个参数来平衡系统的响应速度、稳定性和稳态精度。

### 3.2 先进控制方法

面对非线性、时变、存在强干扰的复杂液压系统,经典PID控制往往难以满足高性能需求。为此,一系列先进控制方法被引入:

#### 3.2.1 自适应控制(Adaptive Control)

液压系统的参数(如负载质量、粘性阻尼系数、油液弹性模量)会随工况变化而改变。自适应控制器能够在线辨识这些未知或时变的参数,并实时调整控制器自身的结构或参数,以保证在不同工况下都能获得优良的控制性能。例如,模型参考自适应控制(MRAC)通过让被控对象的输出跟踪一个理想参考模型的输出来实现自适应调节。

#### 3.2.2 鲁棒控制(Robust Control)

针对系统中存在的不确定性(如建模误差、外部干扰),鲁棒控制器(如 $H_\infty$ 控制)旨在设计一个固定参数的控制器,使其在所有可能的不确定性范围内都能保证系统的稳定性和一定的性能指标。这对于工作环境恶劣、干扰源众多的工业现场尤为重要。

#### 3.2.3 滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)

SMC是一种变结构控制方法,通过设计一个特殊的切换面,迫使系统状态在有限时间内到达该面,并沿此面滑向平衡点。其最大优点是对匹配的不确定性和外部干扰具有完全的鲁棒性。尽管存在“抖振”问题,但通过边界层法等改进策略,SMC在高精度液压伺服系统中得到了成功应用。

#### 3.2.4 模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)

MPC是一种基于模型的最优控制方法。它利用系统的动态模型,在每个采样时刻在线求解一个有限时域的开环最优控制问题,并将得到的最优控制序列的第一个元素作用于系统。MPC能够显式处理系统的约束(如最大压力、最大速度),非常适合多变量、强耦合的复杂液压系统(如多自由度液压机器人)<sup>[4]</sup>。随着计算能力的提升,MPC在工业实时控制中的应用越来越广泛。

### 3.2.5 智能控制方法

近年来,人工智能技术为液压控制开辟了新路径。(1)模糊控制(Fuzzy Control):利用专家经验构建模糊规则库,处理系统中存在的不确定性和非线性,尤其适用于难以建立精确数学模型的场合。(2)神经网络控制(Neural Network Control):利用神经网络强大的非线性映射和自学习能力,可以用于系统辨识(建立液压系统的黑箱或灰箱模型)、自适应律的设计,甚至直接作为控制器(如RBF神经网络控制器)。(3)强化学习(Reinforcement Learning, RL):作为一种新兴的机器学习范式,RL通过智能体与环境的不断交互来学习最优控制策略。在仿真环境中,RL已被用于训练复杂的液压系统控制策略,未来有望在真实工业场景中实现自优化控制。这些先进控制方法并非相互排斥,常常需要根据具体应用场景进行组合或融合,以达到最佳的综合性能。

## 4 结语

本文系统剖析了液压技术在现代自动化生产线中的集成与控制方法,指出其通过与多种系统深度纵向集成,已从孤立动力单元转变为智能制造信息流关键一环;先进控制策略的应用也克服了传统短板,释放了其高功率密度等潜力。展望未来,液压技术将深度智能化,AI和大数据分析会广泛用于健康监测等方面;数字孪生将赋能,构建高保真模型实现虚实互动优化;绿色液压成为趋势,多种节能技术将成标配;标准化与开放性增强,统一通信架构打破设备壁垒。尽管面临电动驱动竞争,但液压技术凭借重载、大力领域优势,拥抱数字化等必将在高端自动化生产线中持续发挥关键作用。未来挑战在于降低系统复杂性、提升可靠性,培养复合型人才以推动其迈向新高峰。

### [参考文献]

- [1]孔繁清.机械自动化生产中现代液压技术的应用探析[J].时代汽车,2025(6):31-33.
- [2]和红波.液压系统智能化控制技术在机械加工中的应用[J].中国信息界,2025(11):201-203.
- [3]朱亚明.液压技术在机械中的应用[J].商情,2021(17):140.
- [4]庄志鑫.现代液压技术在机械自动化生产中的应用[J].中国高新科技,2023(3):115-117.