
浙江大学杨华勇院士团队——一种利用并联辅助泵的隧道掘进机液压缸慢响应自适应补偿算法

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39076.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

浙
江大
学杨华勇
院士团队——一种

利用并联辅助泵的隧道掘进机液压缸慢响应自适应补偿算法。论文标题：Adaptive Compensation Algorithm for Slow Response of TBM Hydraulic Cylinders Using a Parallel Auxiliary Pump

论文链接：<https://doi.org/10.3390/act15010063>

期刊名：Actuators

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/actuators>

创新性

1. 提出了双泵-单缸协同驱动新架构：从系统层面入手，通过并联一个辅助泵来弥补传统单泵系统在启动时的流量能力不足，为解决液压系统响应迟滞问题提供了一种新颖且工程可行的硬件解决方案，而非局限于控制算法的增量改进。

2. 开发了面向动态误差的自适应补偿算法：区别于传统的固定流量分配策略，该算法使辅助泵的输出能够根据位移误差和速度误差等实时状态自适应调整。这种按需补偿机制精准地解决了启动阶段的流量缺口，实现了快速与平滑的统一，并通过试验台实验验证了其在真实工况下的有效性

1. 研究背景

近年来，隧道工程越来越多地进入跨山铁路、煤矿巷道、输水等硬岩应用场景。隧道掘进机（TBM）是唯一能在硬岩中进行全断面开挖的大型装备，因此，实现高效、安全、经济的掘进至关重要。

推进系统是TBM向前掘进的核心：多个液压油缸并联工作以驱动机器前进。TBM操作可分为启动阶段和稳态推进阶段。在启动阶段，机器状态的快速变化和强烈的岩机相互作用使得不良启动对姿态控制、地层扰动和设备安全带来极高风险。例如，在软硬交错地层、砂砾混合物或高含水

量等复杂条件下，液压缸出现的速度滞后、超调或压力尖峰等启动问题，极易诱发盾体振动、放大同步误差并导致异常载荷路径，最终使TBM偏离设计轴线。在此背景下，本文聚焦于液压系统响应迟缓所引发的启动阶段延迟和误差累积问题，旨在开发一种能同时实现快速响应和强鲁棒性的推进执行架构与控制策略。

2. 研究方法

本文的研究方法核心在于提出一种新颖的双泵-单缸系统架构及其配套的自适应补偿控制算法。

2.1 双泵-单缸系统架构

为从根本上突破传统单泵-单缸系统因主泵流量能力限制而导致的启动响应慢的瓶颈，本文提出了一种系统级优化方案。如图1所示，该系统在保留原有大排量主泵的基础上，并联引入了一个小排量辅助泵，形成了双泵-单缸的供油架构。

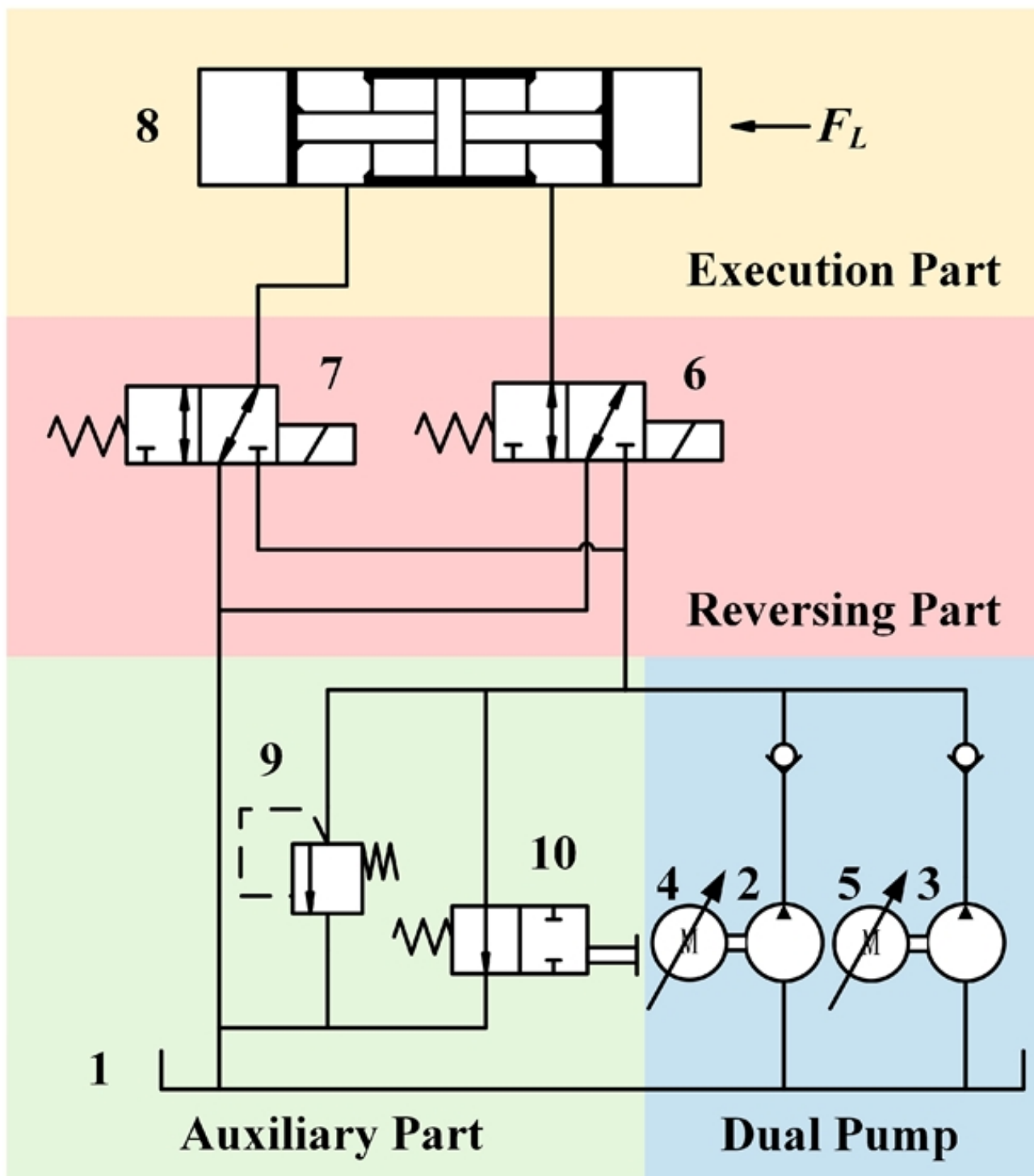


图1. 推进油缸液压系统图。1.油箱；2.大排量泵（主泵）；3.小排量泵（辅助泵）；4.电机1；5.电机2；6.二/三通换向阀1；7.二/三通换向阀2；8.液压缸；9.溢流阀；10.手动卸荷阀。

该架构的工作原理是：

- 主泵：负责提供满足目标速度所需的基础流量。

- 辅助泵：作为补偿单元，其快速响应的特性被用来动态补偿启动瞬间主泵供油能力的不足，弥补流量缺口。

此架构通过硬件层面的协同，旨在从根本上解决启动阶段的流量缺失问题，而非仅仅依赖算法对既有系统进行优化。该系统的状态空间模型综合考虑了机械动态、液压动态（含油液可压缩性、泄漏）以及泵侧驱动动态。

2.2 自适应补偿控制算法

基于上述硬件架构，本文的核心创新在于为辅助泵设计了一种自适应补偿算法。该算法与主泵的控制（负责跟踪目标流量）并行工作，其核心思想是：辅助泵的输出不依赖于预设的固定流量分配比，而是根据系统的实时动态误差进行自适应调整，以提供按需的精确补偿。

算法的具体构成如下：

1. 误差特征提取：实时计算系统的跟踪性能指标，主要包括位移误差和与速度相关的误差分量（如速度误差）。这些指标反映了当前系统对目标轨迹的偏离程度。
2. 补偿增益更新：设计自适应律，根据提取的误差特征，在线动态更新辅助泵的补偿增益。当启动初期误差较大时，增益自动增大，辅助泵输出更多补偿流量以加速启动，减少滞后；当系统接近稳态、误差变小时，增益自动减小，避免过度补偿引发振荡或超调。
3. 工程约束处理：算法中考虑了辅助泵的物理能力限制（如最大流量、响应速率），确保计算出的补偿指令在硬件可实现范围内，保证算法的工程实用性。

如表1所示，与传统双泵方法（主、辅泵按固定比例分担目标流量，补偿效果有限）相比，本文提出的方法是一种面向补偿的主动策略，能够突破元件固有动态的限制，实现更优的瞬态跟踪性能。

表 1. 传统双泵控制与本文提出方法的对比

特征	传统双泵控制方法	本文提出的自适应补偿方法	核心思想
主泵跟踪目标流量	主泵跟踪目标流量	主泵跟踪目标流量	主、辅泵按固定比例分担目标流量
性能瓶颈	受限元件固有动态，补偿能力有限	突破元件动态限制，主动补偿启动滞后	辅助泵角色：分担部分目标流量，动态误差补偿器
适用阶段	重点优化启动阶段及大动态误差过程	全程	适用阶段

3. 实验验证与结果分析

为验证所提出的双泵-单缸架构及自适应补偿算法的有效性，本文搭建了专门的液压实验台进行测试，并与传统单泵方案进行了对比。

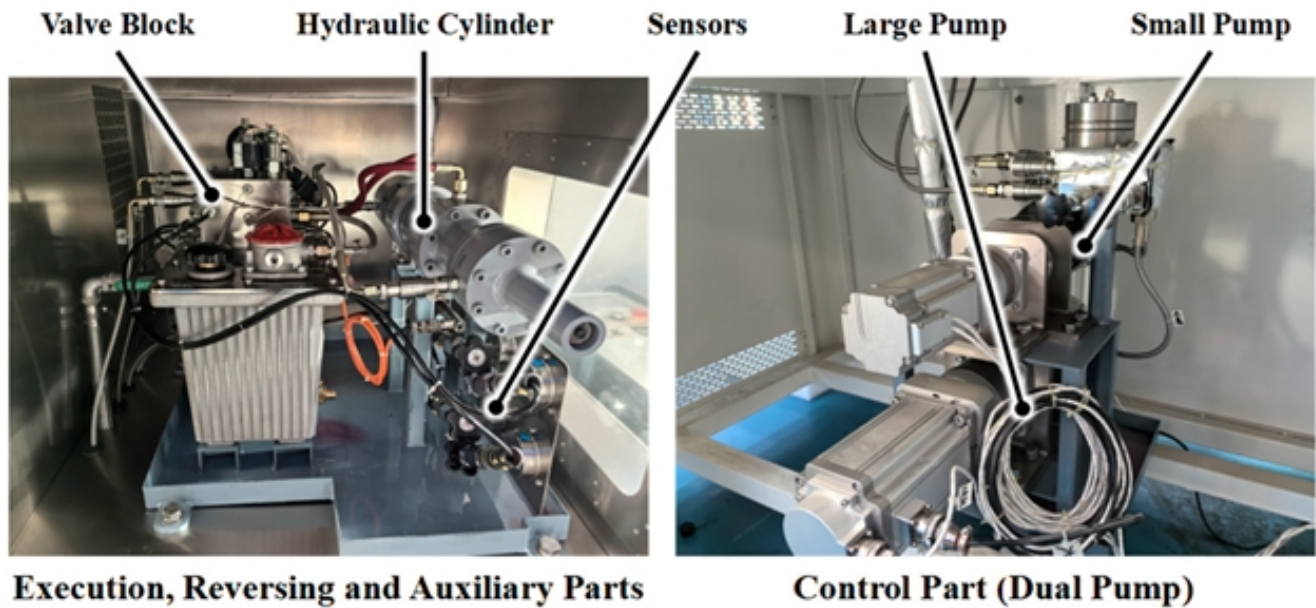


图3. 双泵控制实验设备

实验结果表明，所提出的方法成功实现了快速与平滑的统一。与单泵方案相比，它在显著加快启动速度的同时，并未牺牲运动的平稳性，反而有效抑制了超调和振荡。这充分验证了双泵-单缸硬件架构与自适应补偿算法相结合的有效性和工程实用性。

4. 结论

本文针对TBM推进油缸启动响应慢的问题，提出了一种结合硬件架构创新与智能控制算法的综合解决方案。

- 方法：通过构建双泵-单缸的并联供油系统，从硬件上提供了快速补偿流量的能力；在此基础上，为辅助泵设计了基于系统动态误差（位移、速度误差）的自适应补偿算法，使其能够在线调整输出，精确弥补启动过程中的流量缺失。
- 主要效果：对比仿真与试验台实验结果一致表明，与传统的单泵方案相比，本文提出的方法能够显著缩短启动响应时间，同时有效抑制了位移超调和压力振荡，使启动过程既快速又平滑。这证明了该算法在提升瞬态性能和跟踪精度方面的优越性。
- 价值与意义：本研究为提升TBM液压系统在复杂工况下的启动性能提供了一种新颖、有效且面向工程实践的技术路径。通过系统级架构的微小调整与智能算法的结合，巧妙地平衡了快速性与平滑性之间的矛盾。
- 未来工作：后续研究将重点关注该方法在更复杂负载场景（如强冲击负载）下的适应性与鲁棒性验证，并探索其在多缸同步控制中的应用潜力，以进一步服务于TBM整机性能的提升。

Yang, S.; Han, D.; Jiang, L.; Jia, L.; Zheng, Z.; Tan, X.; Yang, H.; Hu, D. Adaptive Compensation Algorithm for Slow Response of TBM Hydraulic Cylinders Using a Parallel Auxiliary Pump. *Actuators* 2026, 15, 63. <https://doi.org/10.3390/act15010063>

Actuators期刊介绍

主编：Kenji Uchino, The Pennsylvania State University, USA

Norman M. Wereley, University of Maryland, USA

Actuators期刊涵盖与执行器和控制系统相关的科学与技术,期刊下设包括执行器材料、航空执行器、机器人执行器、控制系统等10个专题,为执行器和控制系统的科学和技术提供了一个先进的论坛。

2024 Impact Factor 2.3 2024 CiteScore 4.3 Time to First Decision 20.9 Days Acceptance to Publication 2.7 Days

来源：Actuators

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有, 请勿用于商业用途, [爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发