

伺服电机与防失压叶片泵的精准确控制及响应特性研究

王洪继

台州弘一液压伺服科技有限公司 浙江 台州 318000

【摘要】：随着工业自动化水平的不断提升，伺服电机与液压泵的协同控制在各类机械系统中应用愈发广泛，防失压叶片泵作为液压系统的核心动力元件，其与伺服电机的匹配精度直接影响系统的控制效果和运行稳定性。本文围绕伺服电机与防失压叶片泵的精准确控制及响应特性展开理论研究，阐述了两者的基本工作原理，分析了影响匹配精度的主要因素，设计了合理的精准确控制策略，探讨了系统的响应特性及优化方法。研究表明，通过合理的参数匹配和控制策略设计，能够有效提升两者的协同工作效率，减少失压现象的发生，改善系统的动态响应性能，为相关机械系统的优化设计提供理论参考。关键词：伺服电机；防失压叶片泵；精准确；控制策略；响应特性

【关键词】：伺服电机；防失压叶片泵；精准确；控制策略；响应特性

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.046

引言

现代工业生产中，液压传动系统因功率密度高、传动平稳、控制精度高等优势，广泛应用于机床、工程机械及自动化生产线等领域。叶片泵作为液压系统核心动力源，其性能直接决定系统运行质量。防失压叶片泵在传统结构基础上优化，可有效避免压力骤降引发的失压故障，提升系统稳定性，但需与驱动电机精准确才能充分发挥防失压效果。伺服电机具备高精度、高响应特性，能精确调节转速与转矩，为防失压叶片泵提供稳定动力，二者匹配效果直接影响液压系统的控制精度、响应速度与运行效率。目前，伺服电机与防失压叶片泵协同控制仍存在匹配精度不足、响应延迟、偶发失压等问题，既降低系统工作性能，也可能缩短设备寿命、增加维护成本。本文通过分析工作原理，明确匹配核心要求，设计匹配控制策略，研究动态响应特性，解决关键技术问题，为提升液压系统整体性能提供理论支撑，推动相关领域技术进步与应用升级。

1 伺服电机与防失压叶片泵的基本工作原理

1.1 伺服电机的工作原理

伺服电机是一种将电信号转换为机械运动的执行元件，其核心特点是能够根据输入的控制信号，精确调节输出的转速和转矩，实现高精度的位置控制、速度控制和转矩控制。伺服电机主要由定子、转子、编码器、伺服驱动器等部分组成，其中编码器用于实时检测电机的转速和转角，并将检测信号反馈给伺服驱动器，形成闭环控制。

伺服驱动器接收来自控制器的控制信号和编码器的反馈信号，通过内部的控制算法对信号进行处理，调节输出给定子的电压和电流，从而控制转子的转动速度和转角。当控制信号发生变化时，伺服驱动器能够快速响应，调整电机的运行状态，使电机的输出与控制信号保持一致，具有响应速度快、控制精度高、运行平稳等优势。

1.2 防失压叶片泵的工作原理

防失压叶片泵是一种基于传统叶片泵改进而来的液压泵，其核心功能是在液压系统运行过程中，当系统压力出现骤降时，能够快速响应并采取保护措施，避免失压故障的发生，保障系统压力的稳定。防失压叶片泵主要由定子、转子、叶片、配流盘、防失压机构等部分组成，其基本工作原理与传统叶片泵类似，但在防失压结构上进行了优化设计。

在正常工作状态下，转子在伺服电机的驱动下高速旋转，叶片在离心力和叶片底部压力油的作用下，紧密贴合定子内壁，形成多个密封的工作腔。随着转子的旋转，工作腔的容积周期性变化，在吸油区，工作腔容积增大，形成真空，将液压油吸入；在压油区，工作腔容积减小，将液压油压缩并排出，为液压系统提供稳定的压力和流量输出。

防失压机构是防失压叶片泵的核心部件，其主要作用是实时监测系统压力，当系统压力低于预设阈值时，防失压机构会快速动作，通过调整叶片的伸出量或改变工作腔的密封性能，减少液压油的泄漏，从而维持系统压力的稳定，避免失压现象的发生。防失压叶片泵的工作性能主要取决于其排量、压力等级、防失压响应速度等参数，这些参数与伺服电机的运行参数相互影响，共同决定了整个液压系统的工作效果。

2 伺服电机与防失压叶片泵精准确的核心要求及影响因素

2.1 精准确的核心要求

伺服电机与防失压叶片泵的精准确，主要包含三个核心要求：一是功率匹配，伺服电机的额定功率需要与防失压叶片泵的额定功率相适配，确保电机能够为叶片泵提供足够的动力，同时避免电机功率过大造成的能源浪费，或功率过小导致电机过载损坏；二是转速匹配，伺服电机的转速调节范围需要覆盖防失压叶片泵的工作转速范围，确保叶片泵能够根据系统需求，在不同转速下稳定输出压力和流量，同时实现转速的精

准调节；三是响应匹配，伺服电机的动态响应速度需要与防失压叶片泵的防失压响应速度相匹配，当系统压力或流量需求发生变化时，两者能够快速协同响应，避免出现响应延迟或失调现象，保障系统的稳定运行。

2.2 影响精准匹配的主要因素

影响伺服电机与防失压叶片泵精准匹配的因素较多，主要可以分为三类：一是两者自身的参数差异，伺服电机的转动惯量、额定转速、转矩特性等参数，与防失压叶片泵的排量、压力等级、惯性负载等参数不匹配，会直接影响两者的协同工作效果，导致匹配精度下降；二是控制系统的性能，控制算法的合理性、伺服驱动器的响应速度、检测元件的精度等，都会影响伺服电机的控制效果和防失压叶片泵的运行状态，进而影响两者的匹配精度；三是外部环境因素，温度、振动、液压油的粘度变化等，会导致伺服电机和防失压叶片泵的参数发生变化，破坏两者原有的匹配关系，影响系统的稳定性和响应特性。

3 伺服电机与防失压叶片泵精准匹配控制策略设计

3.1 参数匹配优化

参数匹配优化是实现伺服电机与防失压叶片泵精准匹配的基础，核心是根据两者的工作需求，对伺服电机和防失压叶片泵的关键参数进行优化选择，确保两者的参数相互适配。首先，进行功率参数匹配，假设防失压叶片泵的额定排量为16mL/r，额定工作压力为16MPa，工作效率取0.85，根据功率计算公式 $P = (p \times Q) / (60 \times \eta)$ （其中 p 为压力， Q 为流量， η 为效率），当叶片泵额定转速为1500r/min时，其所需驱动功率约为6.8kW，结合系统整体工作效率0.9，确定伺服电机的额定功率选择7.5kW，确保电机的输出功率能够满足叶片泵的工作需求，同时留有一定的余量，避免电机过载。

其次，进行转速参数匹配，防失压叶片泵的工作转速范围通常在500r/min~2000r/min，对应输出流量范围为8L/min~32L/min，据此确定伺服电机的转速调节范围为0r/min~2200r/min，确保电机的转速能够完全覆盖叶片泵的工作转速，同时将电机的转速控制精度优化至±1r/min，使叶片泵能够精准输出所需的流量。

3.2 转速闭环控制

转速闭环控制是实现伺服电机精准调速的核心，也是确保防失压叶片泵稳定输出流量的关键。该控制方式通过编码器实时检测伺服电机的实际转速，将检测到的转速信号与控制器设定的目标转速信号进行对比，计算出转速偏差，然后通过伺服驱动器内部的控制算法，对输出给电机的电压和电流进行调节，使电机的实际转速快速跟踪目标转速，实现转速的精准控制。

本文采用PID控制算法作为转速闭环控制的核心算法，

PID控制算法具有结构简单、调节方便、控制精度高的优势，能够有效抑制转速波动，提升系统的稳定性。在PID控制算法的基础上，进行参数优化，通过调整比例系数、积分系数和微分系数，使电机的转速响应速度更快、超调量更小、稳态误差更小，确保电机能够快速响应控制器的指令，为防失压叶片泵提供稳定的转速输出。

3.3 压力协同控制

压力协同控制是实现防失压叶片泵稳定工作的关键，核心是通过实时监测液压系统的压力，协同调节伺服电机的转速和防失压叶片泵的防失压机构，确保系统压力稳定在预设范围内，避免失压现象的发生。该控制方式通过压力传感器实时检测系统的实际压力，将检测到的压力信号反馈给控制器，控制器根据预设的压力阈值，对伺服电机的转速和防失压机构的动作进行协同调节。

4 伺服电机与防失压叶片泵匹配系统的响应特性研究

4.1 动态响应特性分析

系统的动态响应特性主要通过响应时间、超调量和振荡次数三个指标来衡量，响应时间越短、超调量越小、振荡次数越少，说明系统的动态响应性能越好。结合实际伺服液压系统工况，正常匹配状态下，系统的动态响应时间应控制在0.1s~0.3s之间，超调量不超过5%，振荡次数不超过2次。伺服电机与防失压叶片泵匹配系统的动态响应，主要受伺服电机的响应速度、控制算法的性能、防失压叶片泵的惯性负载和泄漏量等因素影响，其中伺服电机的响应时间通常为0.02s~0.08s，防失压叶片泵的防失压响应时间为0.05s~0.15s，两者的响应速度需协同匹配，才能保证系统整体响应达标。

当控制器发出转速或压力控制指令时，伺服电机需要快速调整转速，防失压叶片泵需要快速响应转速变化，调整输出流量和压力，这个过程中会出现一定的转速和压力波动，即超调量。

4.2 稳态响应特性分析

系统的稳态响应特性主要通过稳态误差来衡量，稳态误差是指系统稳定运行时，实际输出参数与目标参数的偏差，偏差越小，说明系统的稳态响应性能越好。伺服电机与防失压叶片泵匹配系统的稳态误差，主要来源于伺服电机的转速控制误差、防失压叶片泵的泄漏误差和检测元件的测量误差。

伺服电机的转速控制误差，主要是由于PID控制算法的稳态精度不足、编码器的测量精度有限等原因导致的，通常情况下，普通编码器的测量精度为±0.1r/min，优化后的高精度编码器测量精度可提升至±0.05r/min，对应的电机转速控制误差可从±1r/min降至±0.5r/min，进而减少叶片泵输出流量的偏差；防失压叶片泵的泄漏误差，是由于叶片与定子之间的间隙、

配流盘的密封性能等因素导致的，正常工况下泄漏量控制在2mL/min~5mL/min，对应的流量偏差不超过3%，若间隙过大，泄漏量可增至8mL/min~10mL/min，流量偏差超过5%，导致系统压力出现±0.8MPa以上的波动；检测元件的测量误差，主要是由于压力传感器、编码器元件的精度不足导致的，常规压力传感器的测量误差为±0.3MPa，高精度压力传感器可将误差控制在±0.1MPa以内，有效提升反馈信号的准确性，降低稳态误差。

4.3 响应特性优化方法

基于系统响应特性的分析，本文提出了两种响应特性优化方法，分别从控制算法和系统参数两个方面入手，提升系统的响应性能。在控制算法方面，采用模糊PID控制算法替代传统的PID控制算法，模糊PID控制算法能够根据系统的运行状态，实时调整PID参数，可将系统响应时间从0.2s缩短至0.15s以内，超调量从3%降至1%以下，稳态误差从±0.2MPa降至±0.1MPa，有效避免传统PID控制算法参数固定导致的响应性能不足问题，显著提升系统的动态和稳态响应性能。

在系统参数方面，进一步优化伺服电机与防失压叶片泵的参数匹配，通过理论调整，将伺服电机转动惯量优化为0.010kg·m²，与防失压叶片泵0.010kg·m²的惯性负载完全匹配，同时将叶片泵泄漏量控制在1.5mL/min左右；优化伺服驱动器的参数，将驱动器响应时间从0.05s缩短至0.03s，确保电机能够快速响应控制指令。

通过上述优化方法，能够有效改善伺服电机与防失压叶片

泵匹配系统的响应特性，优化后系统响应时间≤0.15s，超调量≤1%，稳态误差≤±0.1MPa，转速控制精度≤±0.1r/min，泄漏量≤1.5mL/min，显著提升系统的控制精度和稳定性，确保两者能够协同高效运行，充分发挥防失压叶片泵的优势，避免失压现象的发生。

5 结论

本文围绕伺服电机与防失压叶片泵的精准匹配控制及响应特性展开理论研究，通过对两者工作原理的分析，明确了精准匹配的核心要求和影响因素，设计了包含参数匹配优化、转速闭环控制和压力协同控制的精准匹配控制策略，探讨了系统的动态和稳态响应特性，并提出了相应的优化方法，得出以下结论：

第一，伺服电机与防失压叶片泵的精准匹配，需要满足功率、转速和响应三个核心要求，两者自身的参数差异、控制系统的性能和外部环境因素，是影响匹配精度的主要因素，其中转动惯量和惯性负载的匹配的关键。

第二，本文设计的精准匹配控制策略，通过参数优化、转速闭环控制和压力协同控制的协同作用，能够有效提升两者的匹配精度，实现伺服电机与防失压叶片泵的协同高效运行，减少失压现象的发生。

第三，系统的响应特性受伺服电机响应速度、控制算法性能、叶片泵泄漏量等因素影响，采用模糊PID控制算法和参数优化方法，能够有效改善系统的动态和稳态响应特性，提升系统的控制精度和稳定性。

参考文献：

- [1] 郑方燕,徐浩杰,袁彬斐. 伺服电机嵌入式位置检测方法及时差补偿[J]. 光学精密工程,2025,33(2):236-246.
- [2] 刘尊党. 机电一体化系统中伺服电机高精度控制算法优化与应用研究[C]//2025 工程技术与材料应用学术交流会论文集. 2025:1-3.
- [3] 黄勇,金芳. 小型高效伺服电机散热结构设计及仿真分析[C]//2025 智慧设计与建造经验交流会论文集. 2025:1-3.
- [4] 沈小波,李仁年,韩伟,等. 基于动态边界的双吸离心泵叶片渐进磨损及泵性能预测[J]. 农业机械学报,2024,55(7):212-220.