

注塑机液压与机电混合驱动系统设计与性能分析

吴敏迪¹ 田文状²

1. 海天塑机集团有限公司 浙江 宁波 315000

2. 宁波海天智联科技有限公司 浙江 宁波 315000

摘要：注塑机液压与机电混合驱动系统融合液压、机电驱动优势。设计时依据注塑工艺确定功率分配与系统布局，设计液压、机电系统及协调控制策略。性能分析显示，该系统在效率能耗、动态响应、精度重复性及故障诊断容错方面表现出色，既满足注塑机高负载、高精度需求，又降低能耗、增强可靠性，为注塑生产提供高效稳定驱动方案。

关键词：注塑机液压；机电混合驱动系统；性能分析

1 注塑机液压与机电混合驱动系统设计基础

1.1 注塑机工作原理及结构特点

注塑机作为塑料制品成型的核心设备，其工作原理是将粒状或粉状塑料原料通过加热使其熔融，然后借助高压快速注入闭合的模具型腔中，经冷却固化后，开模取出成型的塑料制品，整个过程主要包括合模、注射、保压、冷却、开模、顶出制品等步骤。从结构上看，注塑机主要由合模装置、注射装置、液压传动系统、电气控制系统等部分组成。合模装置用于实现模具的启闭和锁紧，保证在注射和保压过程中模具的紧闭，防止塑料溢出，常见的合模结构有曲肘式、直压式等；注射装置负责将塑料原料塑化并注入模具型腔，它由料筒、螺杆、加热装置等部件构成，螺杆的旋转与往复运动是实现塑料塑化和注射的关键；液压传动系统为注塑机各部件提供动力，通过液压泵、液压缸、液压阀等元件的协同工作，控制各机构的运动和压力；电气控制系统则对整个注塑过程进行精准控制，包括温度、压力、速度、时间等参数的设定与调节，以及各动作的顺序控制^[1]。注塑机的结构特点决定了其工作过程需要强大的动力输出、精确的运动控制和稳定的性能。强大的合模力和注射压力要求驱动系统具备高负载能力；复杂的工艺过程需要系统能够实现多种动作的快速切换和精准控制；长时间连续生产则对系统的可靠性和稳定性提出了严格要求。

1.2 液压与机电混合驱动系统概述

液压驱动系统因功率密度大、响应迅速、控制精度较高，在传统注塑机中应用广泛。它通过液压泵将机械能转化为液压能，经管路输送至液压缸和液压马达，驱动注塑机合模、注射等动作，还能通过调节液压阀开度实现无级调速，满足不同工艺阶段对速度和压力的要求。不过，其能量损耗大，部分负载下溢流阀溢流浪费

能量；油温变化会影响油液粘度，干扰系统性能；且存在泄漏风险，增加维护成本与环境污染隐患。机电驱动系统以伺服电机为核心，借助滚珠丝杠、同步带等传动机构将旋转运动转为直线运动，驱动注塑机部件。该系统具备响应快、定位准、能效高、运行稳、噪音低等优点，适用于高精度注塑工艺。但在合模、注射等高负载环节，其功率输出能力有限。液压与机电混合驱动系统融合两者优势，在合模、注射等大负载工况由液压系统主导供能；顶出制品、模具调模等对精度要求高、负载小的动作，则由机电系统精准控制。这种驱动方式兼顾高功率输出与高精度控制，有效提升系统能量效率，是注塑机驱动系统的重要发展方向。

1.3 设计目标与原则

注塑机液压与机电混合驱动系统的设计目标是在满足注塑工艺要求的前提下，提高系统的整体性能和效率，降低能耗和运行成本，增强系统的可靠性和稳定性。具体而言，需要保证系统能够提供足够的合模力和注射压力，满足不同塑料制品的生产需求；实现各动作的快速响应和精确控制，确保制品的成型质量；降低系统的能量损耗，提高能源利用效率；具备良好的故障诊断和容错能力，减少设备停机时间，提高生产效率。在设计过程中，应遵循以下原则：首先是功能性原则，系统的设计必须完全满足注塑机的各项工艺要求，确保能够稳定、可靠地完成塑料制品的成型过程；其次是经济性原则，在保证系统性能的前提下，尽量降低设计和制造成本，减少设备的运行和维护费用；再者是可靠性原则，通过合理的结构设计、选用优质的零部件以及采用先进的控制策略，提高系统的抗干扰能力和故障应对能力；最后是先进性原则，积极引入新技术、新方法，使系统在性能和技术水平上保持一定的前瞻性，适应行业

的发展趋势。

2 注塑机液压与机电混合驱动系统设计

2.1 系统总体方案设计

注塑机液压与机电混合驱动系统总体方案的设计需要综合考虑注塑机的工作要求、性能指标以及液压和机电驱动的特点。首先,根据注塑机的最大合模力、注射量等参数,确定液压系统和机电系统的功率分配。对于大型注塑机,由于合模和注射过程所需的力较大,液压系统在这些阶段承担主要的动力输出任务;而对于一些小型注塑机或者对精度要求较高的辅助动作,机电系统可以发挥更大的作用^[2]。在系统布局方面,合理规划液压泵站、伺服电机、传动机构等部件的位置,确保液压管路和电气线路的布置简洁、合理,减少相互干扰。同时考虑到系统的散热和维护方便性,将发热较大的部件如液压泵、伺服驱动器等放置在通风良好的位置,并预留足够的维护空间。为实现液压与机电系统的协同工作,设计专门的控制系统。该控制系统通过传感器实时采集系统的压力、位移、速度等参数,根据预设的工艺流程和控制策略,对液压系统和机电系统进行协调控制。

2.2 液压系统设计

液压系统设计是注塑机混合驱动系统的重要组成部分。在动力源设计上,选择合适的液压泵,根据系统所需的最大流量和压力,确定泵的型号和规格。常用的液压泵有齿轮泵、叶片泵和柱塞泵,对于注塑机这种需要较大压力和流量变化范围的设备,柱塞泵因其能够提供较高的压力和较大的流量调节范围而被广泛应用。液压回路的设计需要满足注塑机各动作的要求,合模回路采用比例换向阀控制液压缸的运动方向和速度,通过调节比例阀的输入电流,可以实现合模过程的慢速闭模、快速闭模和高压锁模等不同阶段的速度和压力控制;注射回路采用电液比例调速阀和压力阀,精确控制螺杆的注射速度和注射压力,以保证塑料能够均匀、稳定地注入模具型腔;保压回路通过蓄能器和压力继电器保持系统压力的稳定,在保压阶段为模具提供持续的压力,防止塑料倒流;冷却回路则通过冷却器将液压油的温度控制在合理范围内,避免因油温过高导致油液粘度下降和系统性能恶化。为提高液压系统的可靠性和稳定性,还需设置过滤装置,去除液压油中的杂质,防止液压元件磨损和堵塞;安装安全阀,防止系统压力过高,保护液压元件和设备安全。

2.3 机电系统设计

机电系统设计的核心是伺服电机及其传动机构的选型与设计。根据注塑机各动作的负载要求和运动参数,

选择合适功率、转速和扭矩的伺服电机。例如,在顶出制品动作中,根据顶出力和顶出速度的要求,选择具有相应输出能力的伺服电机。考虑到电机的响应速度和定位精度,选择合适的编码器,以实现精确的位置反馈和控制。传动机构的设计直接影响机电系统的性能,对于需要直线运动的部件,如顶出机构、模具调模机构等,常采用滚珠丝杠传动。滚珠丝杠具有传动效率高、定位精度高、摩擦力小等优点,能够将伺服电机的旋转运动高效地转化为直线运动。在设计滚珠丝杠时,需要根据负载大小、行程长度和精度要求,确定丝杠的直径、导程和精度等级。同步带传动也常用于一些对精度要求相对较低、负载较小的场合,它具有传动平稳、噪音低、成本低等特点。电气控制系统是机电系统的大脑,通过PLC(可编程逻辑控制器)或运动控制器对伺服电机进行控制。控制系统根据预设的程序和传感器反馈的信号,实时调节伺服电机的转速、位置和扭矩,实现各动作的精确控制。电气控制系统还具备故障诊断和报警功能,能够及时发现和处理机电系统的故障。

2.4 混合驱动系统协调控制策略

为实现液压与机电混合驱动系统的高效运行,需要制定合理的协调控制策略。基于工况的切换控制策略是其中的关键。在注塑机的工作过程中,根据不同的工艺阶段,如合模、注射、保压、冷却、开模、顶出等,判断系统当前所处的工况,然后自动切换液压系统和机电系统的工作模式。例如,在合模阶段,优先启动液压系统,快速实现模具的闭合和锁紧;当模具锁紧后,在保压阶段,适当降低液压系统的压力,同时根据需要启动机电系统进行一些微调动作,如模具的微量调整,以保证制品的尺寸精度^[3]。在协调控制过程中,采用传感器融合技术获取系统的实时状态信息。通过压力传感器、位移传感器、速度传感器等多种传感器,实时采集液压系统的压力、流量,机电系统的位置、速度等参数,并将这些信息传输给控制系统。控制系统利用先进的控制算法,如模糊控制、PID控制等,对液压系统和机电系统进行协同调节,实现系统的稳定运行和精确控制。

3 注塑机液压与机电混合驱动系统性能分析

3.1 系统效率与能耗分析

系统效率和能耗是衡量注塑机液压与机电混合驱动系统性能的重要指标。通过对系统各部件的能量损耗进行分析,可以找出系统能量浪费的环节,从而提出改进措施。在液压系统中,能量损耗主要来自液压泵的容积损失和机械损失、液压阀的节流损失以及管路的沿程损失和局部损失等。通过优化液压泵的选型和设计,提

高泵的效率;合理设计液压回路,减少不必要的节流和溢流,降低液压阀的能量损耗;采用优质的液压管路和接头,降低管路损失。机电系统的能量损耗主要包括伺服电机的铜损、铁损以及传动机构的摩擦损失等。通过选择高效的伺服电机和优化传动机构的设计,可以降低机电系统的能量损耗。在混合驱动系统中,通过合理的功率分配和协调控制策略,使液压系统和机电系统在不同工况下都能工作在高效区域,从而提高系统的整体效率,降低能耗。可以通过搭建实验平台,对系统在不同工况下的输入功率和输出功率进行测量,计算系统的效率,分析能耗分布情况,并与传统液压驱动注塑机和纯机电驱动注塑机进行对比,验证混合驱动系统在节能方面的优势。

3.2 动态响应与稳定性分析

动态响应和稳定性是评价注塑机混合驱动系统性能的关键因素。动态响应主要指系统在受到外部干扰或输入信号变化时,能够快速、准确地调整输出,达到新的稳定状态的能力。通过阶跃响应实验,给系统施加一个阶跃输入信号,如突然改变注射速度或合模力的设定值,观察系统的输出响应曲线,分析系统的上升时间、峰值时间、调节时间和超调量等指标,评估系统的动态响应性能。系统稳定性是指系统在各种工况下能够保持稳定运行,不出现振荡或失控现象的能力。采用频域分析方法,对系统的传递函数进行分析,计算系统的幅值裕度和相位裕度,判断系统的稳定性。在实际运行过程中,模拟各种干扰因素,如电网电压波动、负载突变等,观察系统的运行状态,验证系统的抗干扰能力和稳定性。通过优化控制系统的参数和控制策略,提高系统的动态响应速度和稳定性,确保注塑机能够在各种复杂工况下稳定运行。

3.3 精度与重复性测试

精度和重复性是保证塑料制品成型质量的重要指标。精度测试主要包括位置精度和压力精度测试。在位置精度测试中,利用高精度的位移传感器,对注塑机各运动部件的实际位置与设定位置进行对比,测量其位置偏差。例如,在模具调模过程中,设定模具的开合距离,然后测量实际开合距离,计算位置误差,分析系统的位置控制精度。压力精度测试则通过压力传感器测量

液压系统在不同工况下的实际压力与设定压力的差值,评估系统的压力控制精度。重复性测试是在相同的工艺条件下,多次重复注塑过程,测量制品的关键尺寸和性能参数,计算其偏差和标准差,评估系统的重复性。通过优化液压系统和机电系统的控制算法,提高传感器的精度和可靠性,以及加强机械部件的制造和装配精度,可以提高系统的精度和重复性,保证塑料制品的质量一致性。

3.4 故障诊断与容错能力验证

故障诊断和容错能力是提高注塑机可靠性和生产效率的重要保障。建立故障诊断模型,利用传感器采集的系统运行数据,结合故障诊断算法,对系统的故障进行实时监测和诊断。例如,通过分析液压系统的压力、流量变化曲线,判断液压泵是否出现故障;通过监测伺服电机的电流、温度等参数,诊断电机是否存在异常^[4]。在容错能力验证方面,人为设置一些故障,如模拟液压管路泄漏、伺服电机故障等情况,观察系统的响应和处理能力。通过设计合理的冗余结构和容错控制策略,当系统某一部件发生故障时,能够自动切换到备用部件或调整控制策略,保证系统的继续运行,减少设备停机时间。通过不断完善故障诊断和容错技术,提高注塑机液压与机电混合驱动系统的可靠性和稳定性,降低生产风险。

结束语

本文完成注塑机液压与机电混合驱动系统设计与性能分析,实现了高效协同与精准控制,提升了系统综合性能,对推动注塑机技术发展、提高塑料制品生产质量与效率意义重大。未来,随着技术进步,该系统有望在智能化、节能化等方面取得突破,为注塑行业带来更多创新与发展机遇。

参考文献

- [1]李光明,王莺洁.基于网络的注塑机液压远程监控系统研究[J].机床与液压,2022,50(6):92-97
- [2]杨成刚,赵红美,张春辉,等.液压系统数据采集与故障预测研究[J].工业技术与职业教育,2022,20(3):19-24
- [3]高俊,韩昌.电控双泵液压源在注塑机上的节能研究[J].液压与气动,2021(1):122-127
- [4]汪宇航.飞机液压系统故障分析及维修[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(4):090-093.