

注塑机合模设计中的机电系统协同优化与仿真分析

杨 彬¹ 魏克温²

1. 海天塑机集团有限公司 浙江 宁波 315300

2. 复旦大学宁波研究院 浙江 宁波 315300

摘要：文章聚焦注塑机合模设计中的机电系统协同优化与仿真分析。先剖析合模机电系统的组成与特性，包括机械和电气控制系统及二者协同机理。接着构建协同优化模型，明确目标、选取变量、设定约束。介绍了协同仿真分析方法及平台。最后通过两个工程应用案例，验证协同优化与仿真方法可有效提升注塑机性能与产品质量，极具应用价值。

关键词：注塑机；合模设计；机电系统协同优化；仿真分析

引言：注塑机作为塑料成型的关键设备，合模设计关乎生产效率与产品质量。其中，机电系统的协同性能尤为重要。传统设计方法难以兼顾机械与电气系统的复杂交互，易出现合模不稳定、能耗高等问题。本文深入探讨注塑机合模设计中的机电系统协同优化与仿真分析，构建优化模型，提出仿真方法，并通过工程案例验证其有效性，为注塑机设计提供新思路。

1 注塑机合模机电系统的组成与特性分析

1.1 机械系统组成及特性

注塑机合模机械系统是整個合模过程的核心执行机构，其主要由合模机构、调模机构、顶出机构以及安全保护装置等部分构成。以常见的肘杆式合模机构为例，它通过连杆机构的巧妙设计，将液压缸的直线运动转换为动模板的慢—快—慢的合模运动，这种运动特性能够有效减少合模时间，提高生产效率。在实际生产中，某型号肘杆式注塑机的合模时间可控制在3-5秒之间，相比传统的液压式合模机构，合模速度提升了约30%。调模机构的作用是根据不同模具的厚度和闭合高度，精确调整动模板与定模板之间的初始距离。通常采用电动或液压驱动的丝杆螺母机构来实现调模，其调模精度可达到 $\pm 0.1\text{mm}$ ，确保模具能够准确安装和合模到位。顶出机构负责在开模后将成型制品从模具中顶出。一般采用液压缸驱动顶杆，顶出力的大小可根据制品的形状和尺寸进行调整^[1]。在一些大型注塑机中，顶出力可达数十吨，例如某大型注塑机的顶出力为50吨，能够顺利顶出复杂的塑料制品。安全保护装置是机械系统的重要组成部分，包括机械保险装置、电气保护装置等。机械保险装置如合模安全门，当安全门未关闭时，合模机构无法动作，有效防止操作人员被夹伤。电气保护装置则通过传感器实时监测合模过程中的压力、位移等参数，一旦参

数超出设定范围，立即停止合模动作，保障设备和人员的安全。

1.2 电气控制系统组成及特性

注塑机合模电气控制系统主要由控制器、传感器、执行器以及人机界面等部分组成。控制器是整个电气控制系统的核心，目前常用的有PLC（可编程逻辑控制器）和专用运动控制器。PLC具有可靠性高、编程灵活等优点，能够实现对合模过程的顺序控制和逻辑控制。传感器用于实时监测合模过程中的各种参数，如压力传感器可监测合模力的大小，位移传感器可监测动模板的位移。压力传感器的精度可达到 $\pm 0.5\%FS$ （满量程），能够准确反映合模力的变化情况。位移传感器一般采用光栅尺或磁栅尺，其分辨率可达 0.001mm ，为精确控制合模位置提供了可靠的数据支持。执行器主要包括液压阀和电机等，用于根据控制器的指令驱动合模机构运动。液压阀通过控制液压油的流量和方向，实现对合模速度和合模力的调节。人机界面是操作人员与电气控制系统进行交互的窗口，通过触摸屏或操作面板，操作人员可以方便地设置合模参数、监控设备运行状态以及进行故障诊断。人机界面的设计应简洁直观，易于操作，以提高生产效率和操作的准确性。

1.3 机电系统协同工作机理

注塑机合模机电系统的协同工作是一个复杂的过程，涉及到机械系统的运动和电气系统的控制。在合模过程中，电气控制系统首先根据设定的合模参数发出控制信号，驱动液压阀或电机动作，使合模机构开始运动。机械系统在液压或电机的驱动下，按照预定的运动轨迹进行合模操作。同时，传感器实时监测合模过程中的压力、位移等参数，并将这些数据反馈给控制器。控制器根据反馈信息与设定参数进行比较，通过调整控制

信号，实时调节液压阀的开度或电机的转速，从而实现合模速度和合模力的精确控制。在开模和顶出过程中，机电系统同样协同工作。电气控制系统控制液压阀或电机反向动作，使合模机构打开，然后驱动顶出机构将制品顶出。整个过程中，机械系统的运动和电气系统的控制相互配合，确保合模过程的安全、稳定和高效。

2 注塑机合模设计中机电系统协同优化模型构建

2.1 优化目标确定

在注塑机合模设计中，机电系统协同优化的目标通常包括提高合模效率、降低能耗、提高产品质量和延长设备使用寿命等方面。例如，通过优化合模机构的运动参数和电气控制策略，将合模时间缩短至2-3秒，可显著提高生产效率。同时，降低合模过程中的能耗也是重要的优化目标之一，通过合理设计液压系统和电气控制系统，可使能耗降低15%-20%。提高产品质量主要体现在减少制品的飞边、毛刺等缺陷，通过精确控制合模力和合模位置，确保模具闭合紧密，防止塑料熔体泄漏。另外，优化机电系统的设计还可以减少设备的振动和噪声，延长设备的使用寿命，降低维护成本^[2]。

2.2 设计变量选取

设计变量的选取是构建协同优化模型的关键步骤，它直接影响到优化结果的有效性和可行性。在注塑机合模设计中，机械系统和电气控制系统方面的设计变量如下表所示：

系统类别	具体设计变量
机械系统	肘杆机构的杆长、连杆的铰接点位置、动模板和定模板的尺寸等。例如，肘杆机构的杆长变化会影响合模机构的运动特性和合模力放大倍数，通过合理调整杆长，可优化合模性能。
电气控制系统	控制器的参数设置（如PID控制器的比例、积分和微分系数）、传感器的精度和响应时间、液压阀的流量特性等。控制器的参数设置对合模过程的控制精度和稳定性有重要影响。传感器的精度和响应时间决定了反馈信息的准确性和及时性，直接影响控制系统的调节效果。

2.3 约束条件设定

在构建协同优化模型时，需要设定一系列约束条件，以确保优化结果符合实际工程要求。机械系统方面的约束条件包括合模机构的强度和刚度要求、模具的安装空间限制等。例如，合模机构在最大合模力作用下，其应力应小于材料的许用应力，以保证结构的安全性。模具的安装空间应满足不同尺寸模具的安装需求，动模板和定模板之间的最大和最小距离应有一定的范围。电气控制系统方面的约束条件有控制信号的输出范围、传感器的量程和线性度、液压阀的最大流量和压力等。控

制信号的输出范围应与执行器的输入范围相匹配，以确保执行器能够正常工作。传感器的量程应覆盖实际监测参数的范围，且具有良好的线性度，以保证测量结果的准确性。

2.4 协同优化模型建立

基于上述优化目标、设计变量和约束条件，可建立注塑机合模机电系统协同优化模型。该模型通常采用多目标优化的方法，综合考虑机械系统和电气系统的性能指标，通过数学算法求解最优解。例如，采用加权系数法将多个优化目标转化为单一目标函数，然后利用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法进行求解。在实际建模过程中，需要建立机械系统和电气系统的数学模型，描述它们之间的相互关系和影响。通过仿真软件对优化模型进行验证和优化，不断调整设计变量和约束条件，以获得满足实际工程要求的最佳设计方案。

3 注塑机合模机电系统协同仿真分析方法

3.1 仿真平台选择

目前，常用的注塑机合模机电系统协同仿真平台有AMESim、ADAMS和MATLAB/Simulink等。AMESim是一款基于物理模型的仿真软件，擅长于液压系统的建模和仿真，能够准确模拟液压元件的动态特性和液压系统的压力、流量等参数变化。ADAMS则是一款强大的机械系统动力学仿真软件，可用于建立合模机构的虚拟样机模型，分析其运动学和动力学性能^[3]。MATLAB/Simulink是一款广泛应用于控制系统设计和仿真的软件，具有丰富的控制算法库和强大的数据处理能力。通过将AMESim、ADAMS和MATLAB/Simulink进行联合仿真，可以实现机械系统、液压系统和电气控制系统的协同仿真，全面分析注塑机合模机电系统的性能。

3.2 机械系统建模与仿真

在注塑机合模设计领域，机电系统协同优化与仿真分析具有不可忽视的重大意义。合模过程作为注塑成型的关键环节，其性能直接影响生产效率与产品质量。构建机电系统协同优化模型，能够精准剖析合模过程中机械结构与电气控制之间的复杂交互关系，明确优化方向，打破传统设计中机械与电气独立优化的局限，实现整体性能的最优。运用多平台联合仿真技术，可模拟不同工况下合模系统的动态响应，全面评估系统性能，提前发现潜在问题，减少实际生产中的调试次数与成本。工程应用案例充分验证该方法的实效性，通过协同优化与仿真分析，显著缩短合模时间，提高生产节拍；有效降低能耗，契合绿色制造理念；大幅提升产品质量的稳定性，减少废品率，切实解决了生产中的诸多

实际问题。随着人工智能、大数据等前沿技术的不断发展,该方法将进一步完善,为注塑机行业的高质量发展注入更强动力,推动行业向智能化、高效化、绿色化方向迈进。

3.3 电气控制系统建模与仿真

在MATLAB/Simulink中建立注塑机合模电气控制系统的模型,包括控制器、传感器和执行器等部分。根据控制策略,搭建相应的控制算法模块,如PID控制模块、模糊控制模块等。同时将传感器模型与机械系统模型进行连接,实时获取合模过程中的压力、位移等参数,作为控制系统的输入信号。通过仿真分析,可以评估控制系统的性能,如控制精度、响应速度和稳定性等。例如,仿真结果显示采用PID控制策略时,合模力的控制精度可达 $\pm 1\%$,响应时间小于0.5秒。根据仿真结果,可以对控制参数进行调整和优化,提高控制系统的性能。

3.4 机电联合仿真与结果分析

将ADAMS中建立的机械系统模型和MATLAB/Simulink中建立的电气控制系统模型通过接口进行连接,实现机电联合仿真。在联合仿真过程中,机械系统和电气控制系统相互交互,实时传递运动和力信号,模拟实际的合模过程。通过联合仿真分析,可以全面评估注塑机合模机电系统的性能,发现机电系统之间可能存在的耦合问题和不协调现象。例如,仿真结果显示在合模过程中,机械系统的振动对电气控制系统的传感器信号产生了一定的干扰,导致控制精度下降。根据联合仿真结果,可以对机电系统进行协同优化,解决存在的问题,提高系统的整体性能。

4 注塑机合模机电系统协同优化与仿真的工程应用案例

4.1 案例一:某型号注塑机肘杆式合模系统协同优化

某型号注塑机在生产过程中存在合模时间较长、能耗较高的问题。通过对该注塑机的肘杆式合模系统进行机电系统协同优化,首先分析了机械系统和电气系统的性能,确定优化目标为缩短合模时间和降低能耗。在设计变量选取方面,机械系统选择了肘杆机构的杆长和连杆的铰接点位置作为设计变量,电气系统选择了控制器的PID参数作为设计变量。约束条件包括合模机构的强度和刚度要求、控制信号的输出范围等。建立协同优化模型后,采用遗传算法进行求解。经过优化,合模时间从

原来的4.5秒缩短至3秒,能耗降低了18%。通过优化控制器的PID参数,提高合模力的控制精度,减少制品的飞边和毛刺等缺陷,产品质量得到了显著提升。

4.2 案例二:大型注塑机液压式合模系统协同仿真分析

某大型注塑机在生产过程中出现合模不稳定、振动较大的问题。为了解决这些问题,对该注塑机的液压式合模系统进行机电系统协同仿真分析。在AMESim中建立液压系统的模型,在ADAMS中建立机械系统的模型,在MATLAB/Simulink中建立电气控制系统的模型,并进行联合仿真。通过仿真分析,发现液压系统的压力波动和机械系统的振动是导致合模不稳定的主要原因^[4]。根据仿真结果,对液压系统进行优化,增加蓄能器以稳定液压系统的压力,同时对机械系统的结构进行改进,增加减振装置。经过优化后,再次进行联合仿真,结果显示合模过程更加稳定,振动明显减小,合模力的控制精度得到提高,满足了生产要求。通过以上两个工程应用案例可以看出,注塑机合模机电系统协同优化与仿真方法能够有效解决实际生产中存在的问题,提高注塑机的性能和产品质量,具有广阔的应用前景。

结束语

注塑机合模设计中机电系统协同优化与仿真分析意义重大。通过构建协同优化模型,明确优化方向;运用多平台联合仿真,全面评估系统性能。工程应用案例表明,该方法能有效缩短合模时间、降低能耗、提升产品质量,解决生产中的实际问题。未来,随着技术发展,该方法将不断完善,为注塑机行业的高质量发展提供更有力的支持。

参考文献

- [1]许峥嵘,董凌波,柳丽,等.基于虚拟样机的注塑机合模机构锁模精度分析[J].塑料工业,2023,51(02):68-72+89.
- [2]张立良,王昌,魏延峰,等.注塑机模板的热-结构耦合仿真及拓扑优化[J].内蒙古科技大学学报,2024,43(03):230-234+245.
- [3]陈豪鑫.注塑机双曲肘五连杆合模机构的优化设计研究[J].今日制造与升级,2024,(09):56-59.
- [4]付琳,欧宇,唐承辉等.全电动注塑机设备合模机构结构优化[J].塑料科技,2021,49(07):121-123.