

多组分精馏过程的模拟与优化控制技术研究

曹志佳 王东旭 杨祉琦 安奕南

辽宁北方华锦五洲化工工程设计有限公司 辽宁盘锦 124000

摘要: 精馏技术广泛应用于化工、石油、制药及食品工业中,用于分离多组分混合物,传统的精馏操作依赖于经验调节和静态优化控制,难以满足现代工业对高效、节能和智能化控制的需求。本文结合模拟方法,研究多组分精馏的特性,并探讨提高精馏过程的稳定性和经济性的具体方法。

关键词: 多组分精馏; 动态模拟; 优化控制

前言

多组分精馏作为化学工业中最重要的分离手段之一,广泛应用于石油化工、制药、精细化工和食品工业等领域。由于多组分精馏涉及复杂的物理化学过程,包括热质交换、相平衡、传质效应和能量消耗,其优化控制一直是工业界和学术界研究的重点。传统的精馏过程控制大多依赖经验操作和PID等经典控制方法,但由于精馏塔具有强非线性、时变性和多变量耦合的特点,传统控制方式在应对动态扰动时存在较大的局限性,导致系统响应滞后、稳态误差大、能耗高等问题。化工模拟,为精馏塔的优化设计和控制提供了强有力的理论保障,使研究人员能够分析不同操作变量对系统性能的影响,进而为控制优化提供数据支持。

一、石油化工装置常见精馏过程

(一) 精馏原理

在化工生产过程中,利用混合物中各组分挥发度不同,在精馏塔内通过气液两相逆流接触,进行相际传热传质。液相中的易挥发组分进入气相,气相中的难挥发组分转入液相,从而在塔顶得到几乎纯的易挥发组分,塔底得到几乎纯的难挥发组分。

(二) 基本精馏设备

通常,按混合物组分分为二元精馏和多组分精馏。在实际应用中,以多组分精馏较为常见。精馏设备通常由精馏塔及塔底再沸器、塔顶冷凝器组成。精馏塔是供汽液两相接触进行相际传质的场所,常见的有板式精馏塔和填料精馏塔。再沸器位于塔底,使液体部分汽化,蒸气沿塔上升,余下的液体作为塔底产品。冷凝器位于

塔顶,使蒸气得到部分冷凝,部分凝液作为回流液返回塔顶,其余馏出液即为塔顶产品。

(三) 精馏过程重点控制变量

(1) 温度:它是衡量塔内组成分布的重要指标。精馏塔内各塔板的温度会因物料组成和气液平衡状态而异,灵敏板温度的变化能及时反映塔内组成的改变,需严格控制,以保证产品质量。比如在分离不同烃类混合物时,温度的精准控制能有效分离出不同沸点的烃类产品。

(2) 压力:塔内压力影响着物料的沸点和气液平衡。压力波动会改变组分的相对挥发度,进而影响精馏效果。稳定的压力是保证精馏过程稳定运行的关键,如采用压力控制系统来维持精馏塔的操作压力稳定。

(3) 回流比:是回流流量与塔顶产品采出量的比值。增大回流比可提高精馏效果,使产品纯度增加,但会增加能耗;回流比过小则产品纯度难以保证。需根据产品质量要求和能耗综合考虑,选择合适的回流比。

(4) 进料流量和组成:进料流量的变化会影响塔内气液负荷,流量波动过大可能破坏塔的稳定操作。进料组成的变化直接影响产品质量和精馏操作条件,需要对进料流量进行均匀控制,并根据进料组成的变化及时调整操作参数。

(5) 塔底液位:塔底液位需保持在一定范围内,液位过高可能导致再沸器效果下降,液位过低则可能使泵抽空,影响塔底产品的稳定采出和塔的正常运行。

(6) 塔顶产品采出量:采出量应根据进料量、组成以及塔的分离能力来确定。采出量过大可能导致产品质量不合格,采出量过小则会影响生产效率和经济效益。

二、多组分精馏过程建模

多组分精馏主要用于将含有三种或以上组分的混合物通过蒸馏方式进行分离。相较于二元精馏,多组分精馏的过程更加复杂,涉及多个组分的挥发度差异、相平

作者简介: 曹志佳(1986.06--),女,汉族,辽宁盘锦人,硕士研究生,工程师,研究方向:化工工艺设计。

衡关系以及热量和质量的耦合传递。为了准确描述其物理和化学特性，在塔精馏过程中，需要建立数学模型，包括质量守恒、能量守恒和相平衡方程等，质量守恒方程用于描述各组分在精馏塔中的传输情况。在每一个理论塔板上，组分的积累率等于进料量与出料量之差，这可以用以下表达式表示：

$$\frac{dM_i}{dt} = F_i - L_i - V_i$$

其中， M_i 为塔板上的物料量， F_i 为进料流量， L_i 和 V_i 分别为液相和气相流量。对于多组分精馏，每个组分的物料平衡需要进一步细分，即每种成分的流入与流出必须满足守恒。相平衡方程用于描述液相和气相之间的组分分布。通常，利用亨利定律或活度系数模型（如NRTL，Wilson或UNIQUAC模型）计算各组分在液相和气相中的平衡关系：

$$y_i = K_i x_i$$

其中， y_i 和 x_i 分别表示第*i*组分在气相和液相中的摩尔分数， K_i 为相平衡常数，该值取决于温度，压力和混合物的性质。此外，能量守恒方程用于描述系统的热平衡情况，包括每一塔板的热输入，热输出以及传热损失：

$$\frac{dH_i}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + W$$

H_i 为系统的总焓， Q_{in} 和 Q_{out} 分别为热量输入和输出， W 代表功的输入，如再沸器的加热功率或冷凝器的冷却负荷，通过合理的能量平衡计算，可以确定系统的最佳操作温度，以提高分离效率。

三、多组分精馏过程的模拟方法

(一) 模型建立

在多组分精馏的动态模拟中，准确的数学模型是分

析系统动态特性的基础。首先，需要确定精馏塔的结构，包括塔板数、进料位置、回流比、塔顶冷凝器和塔釜再沸器的热负荷等参数。以某多组分精馏塔为例，塔板数设定为40，进料位于第20块塔板，处理甲醇、乙醇和丙醇三组分混合物，进料流量设定为100 kmol/h，进料温度为70℃。在建模过程中，采用Aspen Plus软件进行模拟，选择NRTL（非随机两液模型）作为热力学计算模型，以便更精确地预测液相非理想混合行为。模型中包含以下主要方程：1）质量守恒方程：描述各组分在不同塔板上的浓度变化；2）能量守恒方程：计算热量输入、输出与系统能量平衡；3）相平衡方程：采用气液平衡常数（ K 值）计算各组分的汽化程度。

为了确保模型的准确性，采用稳态模拟作为初始条件，使塔顶和塔釜的产品浓度分别稳定在98%甲醇和95%丙醇。仿真结果表明，在稳态条件下，塔顶温度稳定在65℃，塔釜温度约为110℃，说明模型能够合理反映精馏过程的特性，为后续的动态模拟奠定基础。

(二) 工况分析

在实际化工装置生产中，进料流量、组成和回流比等操作条件的变化会直接影响精馏塔的性能，在本研究中，模拟了两种典型操作工况，以分析其对系统动态响应的影响。假设在第500秒时，进料中甲醇的比例由50%突增至60%，其余组分比例相应减少。仿真结果表明：1）500秒时，塔顶产品纯度由98%下降至94%，随后逐渐恢复至97%（稳定时间约为120秒）。2）塔釜温度由110℃上升至113℃，由于轻组分含量增加，蒸发量提高，导致热负荷增加。3）回流比在初期短暂上升（由2.5增至3.0），随后自动调整至2.7，以稳定产品纯度。

在800秒时，回流比由2.5减少至2.0，仿真结果表

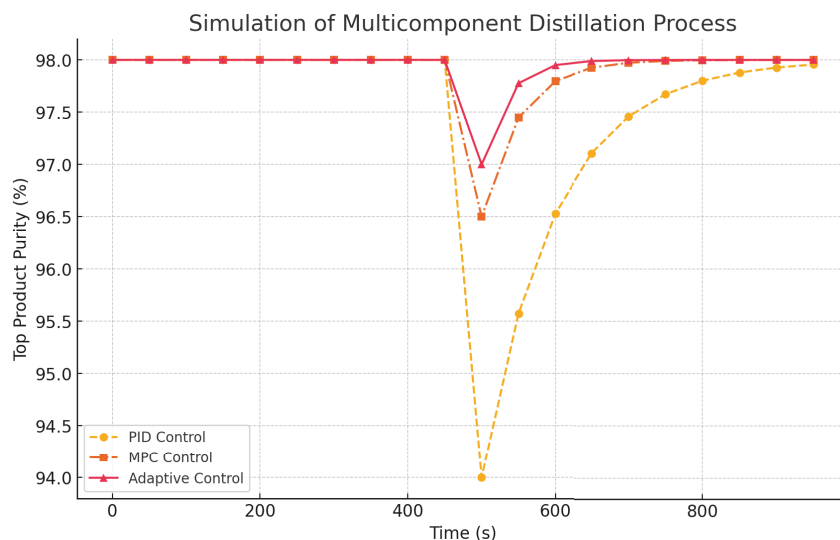


图1 分析结果

明塔顶甲醇浓度由98%下降至92%，随后缓慢恢复至94%，塔釜温度略有下降（由110℃降至108℃），说明塔底重组分的积累减少，由于回流减少，塔板上气液接触时间缩短，导致分离效率降低。

（三）分析结果

分析结果如图1所示。

从仿真结果可以看出，在500秒时进料组成发生突变（甲醇含量从50%上升至60%），导致塔顶产品纯度急剧下降。PID控制策略在扰动发生后出现明显的超调和较大的波动，塔顶纯度一度下降至94%，并且需要约200秒才能逐渐恢复到97%。这种控制方法在非线性系统中适应性较差，调整时间长，稳定性较低。相比之下，MPC控制通过预测未来系统状态并优化控制输入，表现出更好的动态响应特性。在相同扰动条件下，MPC控制的塔顶产品纯度下降幅度较小，仅降至96.5%左右，并且在约80秒内恢复至设定值98%，波动范围明显小于PID控制。最优的控制策略是自适应控制，其塔顶产品纯度在进料扰动后下降幅度最小，仅降至97%左右，并且能够在50秒内快速恢复到98%，波动幅度最小。这表明自适应控制能够实时调整控制参数，快速响应系统变化，提高了精馏过程的稳定性和抗扰动能力。

四、多组分精馏过程优化控制技术

（一）基于MPC的智能优化控制

模型预测控制（MPC）是一种基于数学模型的优化控制技术，能够通过预测系统未来状态，优化控制变量的调整，从而提升精馏塔的稳定性和控制精度。在实际应用中，MPC能够实时计算最优操作策略，以最小的能耗维持产品质量的稳定性。与传统PID控制相比，MPC能够同时处理多个变量，例如回流比、塔顶温度、塔釜热负荷等，从而提高控制的整体效果。仿真结果表明，当进料组成波动时，MPC控制的塔顶产品纯度下降幅度小于PID控制，且恢复时间更短，这说明MPC能够在非线性系统中实现更优的控制性能。MPC的优势在于其能够结合预测模型，在外界扰动发生之前提前做出调整，从而减少控制系统的超调现象。在精馏过程中，不同组分的挥发度差异较大，回流比的变化会影响整体的分离效果，因此MPC能够根据实际生产数据动态调整控制参数，使精馏塔在不同工况下都能保持最优运行状态，MPC还能够根据当前生产需求优化能耗，使得单位产品的能量消耗最小化，提高系统的经济性。

（二）自适应控制与机器学习算法结合的优化策略

在精馏过程中，由于物料组成和工艺条件可能发生变化，固定参数的传统控制方式难以满足高精度分离的需求，而自适应控制能够通过实时调整控制器参数，使

精馏塔在不同工况下都能保持稳定运行。仿真结果表明，自适应控制的塔顶产品纯度波动范围最小，且在扰动发生后恢复速度最快，这说明该控制策略具有更强的抗扰动能力和适应性。结合机器学习算法，自适应控制可以进一步提升精馏塔的控制精度。

（三）数据驱动的多目标优化控制技术

在现代工业控制领域，数据驱动的优化控制技术正逐步取代传统的经验控制方法。通过大数据分析和人工智能算法，可以在精馏过程中实现更加精准和高效的控制。精馏塔的优化目标不仅仅是提高产品纯度，还包括降低能耗、减少生产波动、提高设备使用寿命等，因此多目标优化成为了精馏过程优化控制的核心方向。仿真结果显示，自适应控制和MPC相比PID控制在产品纯度和能耗之间取得了更优的平衡，这表明数据驱动的优化策略能够有效提升生产效能。数据驱动的多目标优化控制技术主要依赖于数据挖掘和机器学习算法，例如遗传算法、粒子群优化算法等，用于寻找最佳操作参数，可以收集大量历史数据，并利用统计分析方法，可以建立精馏过程的最优控制策略，在能耗优化方面，可以通过数据分析找出最低能耗的操作条件，并动态调整再沸器和冷凝器的热负荷，从而在保证产品纯度的前提下，最大程度地降低能源消耗。数据驱动的优化控制技术还可以结合工业4.0的智能制造体系，通过云计算和边缘计算技术，实现精馏过程的远程监测和自适应优化。

结语

多组分精馏过程的优化控制技术是提高分离效率、降低能耗、增强系统稳定性的重要研究方向。本文通过建立精馏塔的数学模型，并进行动态模拟，分析了不同操作条件对系统的影响，并探讨了三种优化控制策略的应用。仿真结果表明，传统PID控制在非线性动态系统中表现出较大的稳态误差和响应滞后，而模型预测控制（MPC）和自适应控制能够更有效地优化精馏过程，使系统在面对进料波动等扰动时能够更快恢复稳定，并减少能耗损失。

参考文献

- [1] 司美玉, 陈艳丽, 芦亚宁, 等. 水-乙醇-环己醇三元体系精馏分离工艺模拟及优化[J]. 精细石油化工, 2021, 38(05): 42-46.
- [2] 张钰萍, 王贤书. 多组分精馏相平衡 Aspen 模拟案例教学探讨[J]. 广州化工, 2015, 43(12): 178-182.
- [3] 王伟文, 王文建, 李建隆. 多组分精馏序列综合的研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30(S2): 258-262. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2011.s2.005.