

模块化设计工艺在化工生产应用

王 钰

宁夏工业设计院有限责任公司 宁夏 银川 750000

摘要: 模块化设计工艺凭借单元独立、接口标准、组装灵活等特征,已成为化工生产装置建设的重要技术手段。本文梳理了模块化单元划分依据、核心流程及关键要素,阐述了该工艺在原料处理、化学反应、产物分离提纯及成品储存输送各环节中的具体应用方式,分析了模块化装置运行保障与人员管控的实施路径,并从工艺适配调整、单元迭代完善及拓展应用三个维度提出了优化方向,为化工生产装置模块化建设提供了系统性技术参考。

关键词: 化工生产;模块化设计;单元集成;工艺优化

引言:化工生产工艺流程冗长、参数耦合紧密,传统整装式建设模式在施工周期与质量控制方面面临诸多瓶颈。模块化设计工艺将整套装置拆解为若干功能独立的标准化单元,在工厂内完成预制与调试后运至现场快速拼装,有效缩短了建设工期并提升了工程质量。围绕模块化设计的基础构成、各环节应用、运行保障及优化方向展开系统梳理,对推动化工生产装置向集约化、柔性化方向转型具有显著的工程实用价值。

1 模块化设计工艺的基础构成

1.1 模块化单元的划分依据

化工生产装置的模块化单元划分并非随意拆解,而是建立在工艺功能独立性与结构完整性双重准则之上。设计人员依据各工段所承担的化学反应类型、物料传递方式及能量转换特征,将整套装置拆分为若干具备独立运行能力的功能模块^[1]。反应器模块以反应机理与操作条件为划分标准,凡涉及同一反应体系且工艺参数相近的设备归入同一模块单元。换热与分离模块则依据流体介质的热交换需求及组分分离原理进行归并,确保模块内部物流走向清晰、功能边界明确。管道与仪表控制模块的划分以信号传递路径与控制回路为依据,将关联紧密的检测点与执行机构归入同一控制模块。接口标准化是模块划分必须遵循的另一项重要准则,各模块间的连接点需在几何尺寸、流体参数及电信号制式上保持统一,以便在现场实现快速对接与可靠密封。功能独立性保证了单个模块在脱离整体装置后仍能完成预定工艺操作,为后期的独立制造与灵活组装奠定了结构基础。

1.2 模块化设计的核心流程

模块化设计遵循从功能解析到集成验证的递进式流程。初始阶段需对化工生产全流程进行功能分解,明确各工艺节点的输入输出关系与操作约束条件,形成完整的功能矩阵。在功能分解基础上,设计人员开展模块组

合方案的多轮比选,综合考量制造可行性、运输限制及现场安装空间等约束因素,确定最优模块划分方案。各模块的详细设计阶段需分别完成结构计算、材料选型及接口设计,确保模块在独立制造后能够满足强度、刚度及密封性要求。模块制造完成后进入集成验证环节,通过工厂内的预组装试验检验模块间接口的匹配精度与密封可靠性,发现并消除潜在的干涉与泄漏隐患。整条流程强调各阶段之间的信息传递与反馈修正,前一阶段的设计输出直接作为后一阶段的输入依据,避免因信息断层导致的设计返工。

1.3 模块化设计的关键要素

模块化设计工艺能否在化工生产中顺利落地,取决于若干关键要素的协同配合。接口标准化程度直接影响模块间的连接效率与密封质量,统一的法兰规格、管道口径及电气接头制式可大幅缩短现场拼装耗时。模块结构的刚度与强度需满足运输吊装及长期运行的力学要求,设计中应充分考虑运输振动与工况载荷对模块变形的影响。材料选用需兼顾耐腐蚀性与加工工艺性,化工介质的侵蚀特性要求模块壁板与内件材料具备足够的抗腐蚀裕度。公差控制是保证模块互换性的技术前提,制造环节需对关键接口尺寸实施严格的公差管理,确保不同批次制造的模块能够无差异对接。

2 模块化设计工艺在化工生产各环节的应用

2.1 原料处理环节的模块化设计

原料处理环节涉及物料的输送、粉碎、混合及预热等多道工序,模块化设计将各工序封装为独立功能单元,使每道工序均可在工厂内完成预制与调试。原料输送模块依据物料的物理形态与输送量要求,选用专用泵送设备或气力输送装置集成于统一框架之上,管道接口采用标准化法兰连接,便于与上游仓储设施及下游处理工序快速对接^[2]。粉碎与混合模块将破碎机、筛分机及混

合机集中布置于同一钢结构底座上,各设备之间通过短接管道或溜槽直接连通,省去了现场大量焊接与管道敷设工作。预热模块则将换热器与温控仪表集成于封闭箱体之内,热媒管道与原料管道在箱体外部完成标准化接口预留,运抵现场后仅需接入公用工程管线即可投入运行。各模块在出厂前已完成单机调试与联动试运行,到达施工场地后按工艺流程依次就位拼接,大幅压缩了原料处理工段的现场施工周期。

2.2 化学反应环节的模块化设计

化学反应环节是化工生产的关键工段,模块化设计将反应器、搅拌系统、加热冷却系统及在线检测仪表集成于统一反应模块之中。反应器模块依据反应类型与操作压力选定釜体或管式结构,内部配置搅拌器、挡板及导流筒等内件,所有内件与釜体的连接均在工厂内完成焊接与检漏。加热与冷却模块将换热夹套、外循环换热器及温控阀门组装为独立单元,通过标准化热媒接口与反应模块对接,实现反应温度的精准调控。在线检测模块将温度传感器、压力变送器及成分分析仪表集中安装于反应模块顶部,信号线缆通过统一的电气接口与上层控制系统连通。各反应模块之间通过物料管道与控制线缆串联,构成完整的反应工段,单个模块出现故障时可整体吊出更换,不影响其余模块的正常运行。

2.3 产物分离与提纯环节的模块化设计

产物分离与提纯环节包含蒸馏、萃取、过滤及干燥等多种单元操作,模块化设计将每种操作封装为独立的分离模块。蒸馏模块将塔体、再沸器、冷凝器及回流罐集成于统一框架之上,塔板或填料在工厂内完成安装与水压试验,塔体与附属设备之间的管道均在出厂前完成预组装。萃取模块将混合器与分离器组合为一体,两台设备之间通过重力流管道直接连通,减少了中间泵送环节与管道泄漏风险。过滤模块将过滤机、洗涤装置及滤饼输送机构安装于同一底座上,滤布更换与设备清洗均可在模块内部完成,避免了拆解管道带来的繁琐操作。干燥模块将干燥器、热风循环系统及粉尘收集装置集成封闭,热风管道与物料管道均采用快拆式法兰连接,便于模块的快速拆卸与替换。各分离模块按照工艺顺序排列布置,模块间通过标准化管道与仪表接口实现流体与信号的顺畅传递。

2.4 成品储存与输送环节的模块化设计

成品储存与输送环节的模块化设计侧重于储罐、输送泵及分装设备的集成化封装。储罐模块将罐体、液位计、呼吸阀及进出料管道预装于统一支架之上,罐体内部防腐涂层在工厂内完成施工,避免了现场高空作业带

来的质量隐患。输送泵模块将泵体、电机、联轴器及底座组装为整体撬装单元,进出口管道配带标准化法兰,运抵现场后直接与储罐出口及下游管网对接即可运行。分装模块将计量秤、灌装头、封口机及输送带集成于同一操作平台上,各设备之间通过短距离管道或机械传动连接,形成从计量到包装的完整作业链。成品储存区域的多个储罐模块呈矩阵式排列,通过管廊连接各模块的进出料口,管廊上的阀门与仪表均采用统一规格,便于后期检修与扩建时的快速切换。

3 模块化设计工艺的运行保障

3.1 模块化单元的日常维护

模块化单元的日常维护是保障装置长期稳定运行的基础环节。维护工作围绕各功能模块的机械部件与控制元件展开,针对反应器模块中的搅拌装置、密封结构及换热管束,需定期实施磨损检测与腐蚀排查,及时更换老化密封件与腐蚀管段,防止介质泄漏对装置运行造成干扰^[3]。换热模块的维护重点在于清洗管程与壳程的结垢层,恢复换热效率,避免因传热性能下降导致工艺参数偏离设定范围。管道与仪表模块的维护需对各类阀门、传感器及执行机构进行动作灵敏度校验,清除仪表探头上的附着物,确保信号采集与传输的准确性。各模块的维护作业均依据预设的周期计划执行,维护人员凭借标准化的检修手册逐项操作,降低人为疏漏带来的设备隐患,使每一功能模块始终处于良好的工作状态。

3.2 模块化系统的衔接管控

模块化系统的衔接管控是维持多模块协同运行的关键手段。衔接管控的重点在于模块间接口的密封性与信号传递的可靠性。管道接口需定期进行压力试验与泄漏检测,法兰连接处的垫片需按周期更换,防止因密封失效导致介质串漏。电气接口的管控侧重于线缆接头的紧固状态与绝缘性能,操作人员需定期检查接线端子的松紧程度,清除接头表面的氧化层,保障控制信号在模块间的顺畅传递。各模块控制系统之间的数据交互需保持一致的通信协议与数据格式,管控人员需定期校验通信链路的畅通性,排除因信号丢包或延迟导致的控制失调。衔接管控工作贯穿装置运行的全过程,任何一处接口出现异常均需立即处置,避免局部故障向相邻模块蔓延,确保整套装置的运行连贯性。

3.3 模块化设计操作人员的管控

模块化设计操作人员的管控直接关乎装置运行的安全性与规范性。操作人员需经过系统化的技能培训,熟练掌握各功能模块的操作要领与故障处置方法,能够在模块出现异常时迅速定位问题并采取应对措施。岗位管

理制度需明确各操作人员的职责范围与操作权限,防止越权操作引发安全事故。日常操作中需严格遵循标准化操作流程,每一步操作均需经过确认与记录,确保操作行为可追溯。管控人员定期组织技能考核与安全演练,强化操作人员对模块化装置特性的认知,提升面对突发状况的应急处置能力。通过制度化的人员管控,使操作团队与模块化装置之间形成良好的配合关系,为装置的安全高效运行提供人力保障。

4 模块化设计工艺的应用优化方向

4.1 模块化设计与化工工艺的适配调整

模块化设计与化工工艺之间的适配程度直接影响装置运行的稳定性与经济性。工艺参数的波动会对模块性能提出差异化要求,设计人员需根据反应热效应、传质阻力及物料腐蚀性等工艺特征,动态调整模块的结构尺寸与材料选型^[4]。当工艺路线发生变更时,模块的划分方案与接口配置也应作出相应修正,确保模块功能与工艺需求保持一致。适配调整还体现在控制策略的优化上,各模块的控制回路需依据工艺参数的变化趋势进行重新整定,使控制指令能够精准响应工艺工况的转变。工艺工程师与模块设计人员之间的信息交互需保持畅通,工艺变更信息应及时传递至模块设计端,避免因沟通滞后导致模块与工艺脱节。通过持续的适配调整,模块化装置能够灵活应对化工生产中工艺条件的变化,维持装置的高效运转。

4.2 模块化单元的迭代与完善

模块化单元的迭代与完善是推动化工装置性能持续提升的重要途径。制造环节积累的加工数据与安装经验为模块改进提供了客观依据,设计人员可根据实际运行中暴露出的密封泄漏、结构变形及接口错位等问题,对模块结构进行针对性优化。材料选用的迭代尤为关键,新型耐腐蚀合金与高强度复合材料的引入,可显著提升模块在恶劣工况下的使用寿命。连接方式的改进同样值得关注,快拆式法兰与自密封接头的推广应用,缩短了现场拆装耗时,降低了接口泄漏概率。控制系统的迭代侧重于算法升级与通信协议优化,使模块间的数据交互

更加高效稳定。每一轮迭代均以运行反馈为驱动,将现场问题转化为设计改进的方向,推动模块化单元在精度、可靠性与适应性方面不断提升。

4.3 模块化设计的拓展应用路径

模块化设计的拓展应用为化工生产开辟了新的技术空间。在环保处理领域,废水、废气及固废处理装置可采用模块化封装方式,将各类处理单元集成于独立模块之中,实现环保设施的快速部署与灵活调整。能源管理领域,蒸汽发生、余热回收及动力分配等系统均可依托模块化设计实现集约化管控,提升能源利用效率^[5]。物料储运系统的模块化拓展将仓储、输送及计量功能封装为独立单元,便于根据产能变化进行快速扩容或缩减。检修维护领域,模块化设计使故障单元的整体更换成为可能,大幅缩短非计划停机时间。

结束语

模块化设计工艺贯穿化工生产装置建设与运行的全生命周期,从原料处理到成品储运,各工段均已实现独立封装与标准化集成。核心设备与控制技术构成了模块化体系的硬件与软件基础,日常维护与衔接管控则为多模块协同运行提供了可靠保障。工艺适配调整与单元迭代完善使模块化装置能够灵活应对生产条件的变化,环保与能源管理领域的拓展应用进一步拓宽了该工艺的覆盖范围,为化工企业实现高效、安全、集约化生产奠定了坚实的技术基础。

参考文献

- [1]徐敏.LNG液化工厂的工艺设计研究与模块化建造技术[J].石油化工建设,2024,46(8):14-16.
- [2]崔良,刘晨,孙芹刚,等.中大型化工工厂模块化建造结构预制施工工艺[J].山东化工,2025,54(7):210-214.
- [3]杨帅敏.浅析模块化设计在化工装置中的应用[J].工程建设与设计,2023(3):160-162.
- [4]林旭添.化工装置的模块化及标准化设计[J].大众标准化,2025(9):34-36.
- [5]沈斌.石油化工装置模块化设计探究[J].石油化工设计,2022,39(4):9-12.