

面向柔性生产的可重构机电系统模块化设计方法

徐 祺

北京吉星工程项目管理有限公司 北京

【摘要】面向柔性生产的制造需求，传统机电系统在结构刚性和功能固化方面表现出明显局限，难以满足动态变化的生产任务要求。围绕可重构性展开的模块化设计策略，通过机械结构解耦、控制系统开放以及信息与能源传输标准化，构建出具备灵活配置能力的系统架构。模块化设计不仅提高了系统的适应性与扩展性，也在典型制造场景中展现出良好的应用效果。研究揭示了模块化机电系统在提升生产柔性和运行效率方面的潜力，为现代制造系统的升级提供了理论依据与技术支撑。

【关键词】模块化设计；可重构系统；柔性生产；机电系统；功能单元

【收稿日期】2025 年 2 月 20 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250095

Modular design method for reconfigurable mechatronic systems oriented towards flexible production

Qi Xu

Lucky Star Project Management Co., Ltd., Beijing

【Abstract】In response to the manufacturing demands of flexible production, traditional mechatronic systems exhibit significant limitations in structural rigidity and functional inflexibility, making it difficult to meet the requirements of dynamically changing production tasks. A modular design strategy centered on reconfigurability constructs a system architecture capable of flexible configuration through mechanical decoupling, open control systems, and standardized information and energy transmission. Modular design not only enhances the adaptability and scalability of the system but also demonstrates strong application performance in typical manufacturing scenarios. This study reveals the potential of modular mechatronic systems in improving production flexibility and operational efficiency, providing theoretical foundations and technical support for the upgrading of modern manufacturing systems.

【Keywords】Modular design; Reconfigurable system; Flexible production; Mechatronic system; Functional unit

引言

制造业正经历由大规模标准化向小批量个性化转变的关键阶段，柔性生产成为提升企业竞争力的核心方向。在此背景下，传统机电系统因结构固定、功能单一而难以满足频繁变更的工艺需求，亟需具备快速重构能力的新一代系统支持。模块化设计理念通过将复杂系统拆分为标准化功能单元，为实现系统的灵活组合与高效运行提供了可行路径。围绕可重构性展开的模块化设计已成为提升机电系统适应性的关键技术趋势，对推动制造系统向智能化、柔性化发展具有重要意义。

1 柔性生产对机电系统的动态需求特征

随着制造业向多品种、小批量、个性化方向发展，柔性生产逐渐成为制造系统演进的重要趋势。在此背景下，机电系统作为实现生产自动化的关键载体，其功能结构和运行方式面临新的挑战。柔性生产要求机电系统能够快速响应产品类型、工艺流程以及产能规模的变化，从而实现设备资源的高效复用与灵活配置。这种变化不仅体现在机械结构的可调整性上，更对控制系统、信息交互机制以及整体系统架构提出了更高的动态适应性要求。

在柔性生产模式下，机电系统的动态需求特征主要体现在任务多样性、响应实时性和功能可扩展性等方面。任务多样性意味着系统需要支持多种加

工对象与工艺参数的切换,传统固定式结构难以满足频繁变更的作业要求。响应实时性则强调系统在面对生产计划调整或突发扰动时,能够迅速完成配置更新与状态切换,以维持生产的连续性与稳定性。功能可扩展性则表现为系统应具备模块化接口与标准化通信协议,便于功能单元的增减与重构,从而提升系统的适应能力与生命周期利用率。

柔性生产还推动了机电系统从单一功能执行向多维度协同控制转变。现代制造环境下的机电系统需集成传感、执行、控制与决策等多个层级的功能,并通过数据驱动的方式实现智能化运行。这种复杂性使得系统在保持高性能运行的同时,还需具备良好的开放性与兼容性,以便与其他设备或平台进行高效联动^[1]。因此,传统的刚性集成设计已无法满足当前制造场景中不断演变的技术需求,系统结构亟需向更具弹性和适应性的方向转型。

2 传统机电系统在结构与功能上的局限性

传统机电系统多基于固定化设计理念构建,其结构布局和功能配置通常针对特定生产任务进行定制。这种设计方式在产品种类稳定、生产流程单一的环境下具有较高的效率和可靠性。然而,在当前制造需求日益多样化和动态化的背景下,传统系统的刚性特征逐渐暴露出诸多不足,尤其在结构适应性和功能扩展性方面表现明显滞后。从结构层面来看,传统机电系统往往采用集成式或半集成式架构,各子系统之间通过专用接口连接,机械部件与控制单元高度耦合。

这种紧密绑定的设计虽然有利于提升系统的整体刚度和运行精度,但也导致系统重构难度大、周期长。一旦生产工艺发生变更,原有设备难以快速调整以适应新的作业要求,常常需要更换整套设备或进行大规模改造,造成资源浪费与成本上升。由于缺乏统一的模块划分标准和接口规范,不同厂商设备之间的兼容性较差,限制了系统在跨平台环境下的灵活部署。在功能实现方面,传统机电系统主要依赖预设程序完成固定任务,控制系统多为封闭式结构,缺乏对外部变化的自适应能力。

随着柔性生产对实时响应和智能决策的需求不断增强,这类系统在面对复杂工况或任务切换时表现出明显的迟滞性。控制系统难以根据外部输入动态调整执行策略,导致系统灵活性受限,无法满足现代制造中多任务并行、工艺参数频繁调整的实际需求。同

时,传统系统的信息采集与处理能力有限,数据流难以实现高效闭环管理,影响了系统整体的协同效率与运行智能化水平^[2]。更进一步地,传统机电系统在维护与升级方面的局限性也日益凸显。由于硬件与软件深度绑定,系统维护往往需要停机较长时间,且故障排查依赖专业技术人员,增加了运维成本。

3 面向可重构性的模块化设计策略

为应对柔性生产对机电系统日益增长的动态适应能力要求,模块化设计成为实现系统可重构性的关键技术路径。该设计策略以功能解耦和结构标准化为核心,通过将复杂系统划分为若干具有独立功能、统一接口的功能单元,使系统具备快速重组与灵活配置的能力。模块化不仅是物理结构上的拆分与组合,更涉及控制逻辑、信息交互以及能源传输等多个层面的系统性规划。在机械结构方面,模块化设计强调各部件之间的接口标准化与几何参数规范化,确保不同模块之间能够实现物理层面的快速连接与分离。这种设计方式打破了传统机电系统中机械结构高度集成、难以调整的局限,使得系统可以根据任务需求的变化,灵活地替换、扩展或重新排列执行机构、传动装置及支撑结构等关键组件。同时,基于统一安装基准与通用连接方式的设计理念,有助于提升模块间的互换性与装配效率,降低设备更换与维护成本。

在控制系统层面,模块化设计倡导软硬件解耦与协议开放,推动控制器、传感器与执行器等功能单元具备独立运行与协同工作的双重能力。每个功能模块配备标准化通信接口与数据交换格式,支持即插即用与自动识别功能,从而实现控制系统的快速组态与动态重构。模块内部嵌入的智能控制算法可在不依赖主控系统的情况下完成局部决策,提升整体系统的响应速度与容错能力。能源与信息流的模块化整合也是可重构性设计的重要组成部分。模块间需建立统一的能源供给通道与数据通信网络,确保在不同组合形态下,系统仍能维持稳定的信息交互与能量传输。

为此,采用分布式供电架构与无线通信技术成为提高系统灵活性的有效手段。这些技术的应用不仅减少了布线复杂度,也增强了模块在空间布局上的自由度,使系统能够在多种工况下保持高效运行^[3]。为了保障模块化系统的整体性能,还需建立一套涵盖功能定义、接口规范、集验证在内的系统化设计框架。该框架应覆盖从模块划分、接口设计到系统集成的全过程,并引入模型驱动开发方法,借助

仿真工具对模块组合后的系统行为进行预测与优化。这不仅提升了设计的科学性与前瞻性，也为后续系统的实际应用提供了可靠的技术支撑。

4 模块化架构在典型场景中的应用验证

模块化架构的可重构特性在实际制造环境中展现出良好的适应能力，尤其在多品种混线生产、设备柔性集成以及快速产线重组等典型应用场景中，其优势得到了充分验证。通过构建具备标准化接口与功能解耦特征的系统单元，模块化机电系统能够在不改变整体控制逻辑的前提下，实现设备层级的功能切换与结构重排，从而有效提升生产线的响应速度与资源利用率。在多品种混线生产场景中，产品类型频繁切换对设备的适应性提出了更高要求。模块化架构通过更换执行末端模块或调整控制参数，使同一设备平台能够支持多种工艺流程的连续运行。

不同功能模块可在短时间内完成物理连接与通信配置，确保系统在面对任务变更时仍能维持高效运行。控制系统可根据当前任务需求自动识别接入模块，并动态加载相应的操作逻辑，实现真正意义上的“即插即控”。在设备柔性集成方面，模块化设计为异构设备之间的协同提供了统一的技术基础。由于各功能单元均遵循相同的机械安装规范与通信协议，使得来自不同厂商或不同技术体系的设备可以无缝对接，形成跨平台的集成系统^[4-8]。这种开放性不仅提升了设备间的互操作性，也为制造企业在构建柔性生产线时提供了更灵活的选择空间。模块化的数据采集与反馈机制支持实时状态监控与远程诊断，进一步增强了系统的可控性与维护效率。针对快速产线重组的应用需求，模块化架构展现出较强的环境适应能力。

传统产线调整通常涉及大量硬件改动与程序重写，而基于模块化设计理念的系统则可通过功能模块的重新组合与网络拓扑的动态调整，在较短时间内完成产线布局优化。这种灵活性特别适用于季节性产能波动较大或订单驱动型生产模式下的设备部署。与此同时，模块化系统支持分布式控制架构，避免了集中式控制带来的瓶颈问题，提高了系统在复杂工况下的稳定性与扩展潜力。为进一步提升模块化架构的实际应用效果，相关验证工作还涵盖了模块间连接可靠性、信息同步精度以及能耗管理等多个维度。通过对模块装配误差的容差设计、通信延迟的补偿机制以及能源分配策略的优化，系统在长期运行中的稳定性和一致性得到保障。

5 结语

模块化架构为实现机电系统的可重构性提供了有效路径，显著提升了制造系统在多变生产环境下的适应能力。通过结构标准化、功能解耦与控制开放化的设计策略，系统具备了快速响应、灵活配置与持续优化的特性。实际应用场景验证了该架构在提升设备利用率、缩短产线调整周期及增强系统扩展性方面的优势。未来，随着智能制造与工业互联网技术的发展，模块化机电系统将进一步融合数据驱动与智能决策能力，推动制造装备向更高层次的柔性化、智能化方向演进。

参考文献

- [1] 陈晓明,陈大川,赵玉倩,等.面向海滩环境监测的绳驱柔性骨骼仿生蟹机器人[J].东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(10):1443-1451.
- [2] 徐坤,岳磊,栗培龙,等.面向道面开裂防控的高填方道基柔性枕梁处治技术研究[J].交通节能与环保,2024,20(06): 169-173.
- [3] 罗文超.面向大规模应用的柔性超薄石墨烯霍尔传感器制备技术研究[C]//广东省真空学会(Guangdong Vacuum Society),广东省真空产业技术创新联盟,暨南大学.第八届粤港澳真空科技创新发展论坛暨2024年广东省真空学会学术年会论文集.深圳技术大学,2024:39.
- [4] 刘龙胤,潘慎逸,陈垚岗,等.面向超洁净流控的基于磁性薄膜标记柔性隔膜变形场重构方法研究[J].液压与气动,2024,48(11):94-100.
- [5] 罗梓琿.面向柔性生产的工业物联网资源调度方法研究[D].北京邮电大学,2024.
- [6] 姚盼,尹佳,贾保国,等.航空复杂结构件柔性生产工艺设计[J].金属加工(冷加工),2024,(06):63-65.
- [7] 郭廷山.面向产线的智能机器人柔性生产远程维护系统研发[J].今日制造与升级,2024,(05):127-129.
- [8] 康立军,刘欢,代永强,等.面向柔性生产资源的分布式农机生产调度优化[J].计算机工程与应用,2024,60(19): 363-374.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS