

# 基于功能解构的橡塑机械通用模块化设计方法研究

王金霞

(大连橡胶塑料机械有限公司, 辽宁 大连 116036)

**摘要**: 针对橡塑机械行业多规格定制化需求突出与研发周期长、零部件通用性低的核心痛点, 提出一种适用于全品类橡塑机械的通用模块化设计方法。通过系统梳理橡塑机械共性工作流程, 构建“总功能-分功能-子功能”三级通用解构模型, 明确跨机型模块划分的边界条件与标准化接口规范; 建立包含结构可兼容性、性能可扩展性、成本可控性的多目标优化体系, 采用层次分析法量化指标权重, 实现模块的科学筛选与柔性组合。研究表明, 该方法可为橡塑机械行业提供标准化设计框架, 助力企业提升设计效率、优化资源配置、降低生产成本, 为行业标准化设计、柔性生产及技术升级提供普适性技术支撑。

**关键词**: 橡塑机械; 功能解构; 通用模块化设计; 层次分析法; 柔性生产

**引用论文**: 王金霞. 基于功能解构的橡塑机械通用模块化设计方法研究[J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(5):05-09.

**中图分类号**: TQ330.493

**文章编号**: 1009-797X(2026)05-0005-05

**文献标识码**: B

**DOI**:10.13520/j.cnki.rpte.2026.05.002

## 1 概述

### 1.1 研究背景

橡塑机械作为高分子材料加工产业的核心装备集群, 涵盖注塑、挤出、密炼、压延等多类机型, 广泛服务于汽车、电子、建材、医疗等终端领域<sup>[1]</sup>。随着下游市场对产品性能、规格的个性化需求持续升级, 传统“一机一设计”的定制化研发模式暴露出瓶颈: 研发周期长, 难以快速响应市场迭代需求; 零部件通用化率低, 导致生产制造成本高、库存周转压力大, 制约行业规模化、高质量发展<sup>[2-3]</sup>。国家《高端装备制造业“十四五”发展规划》明确提出“推动装备产品标准化、模块化、系列化发展”, 要求突破跨机型、跨工艺的通用设计技术<sup>[4]</sup>。因此, 建立一套具有普适性的橡塑机械模块化设计方法, 成为破解定制化与标准化矛盾、提升行业整体竞争力的关键课题。

### 1.2 国内外研究现状

模块化设计技术已在机械制造领域得到广泛应用, 但针对橡塑机械的研究仍存在局限: 国外研究多聚焦单一机型的模块优化, 缺乏跨工艺的通用设计体系, 且对国内橡塑机械工况适配性不足<sup>[5-6]</sup>; 国内研究多集中于特定设备的局部模块划分, 尚未形成覆盖原料处理、核心加工、成品检测全流程的通用解构模型, 模块接口兼容性、性能扩展性等关键技术标准不

统一, 导致模块复用率低、跨企业协同困难<sup>[7-8]</sup>。现有研究的不足为本文提供了创新空间: 亟需构建一套适用于全品类橡塑机械的通用模块化设计方法, 实现从功能解构、模块划分到标准落地的全流程标准化。

### 1.3 研究内容与技术路线

本文核心研究内容包括:

(1) 构建橡塑机械通用功能三级解构模型, 提出跨机型模块划分准则。

(2) 建立多目标模块优化筛选体系, 量化指标权重与组合策略。

(3) 制定通用接口标准体系, 设计模块库架构与组合模式。

(4) 分析方法的行业应用前景与价值。

技术路线如图 1 所示。

## 2 理论基础

### 2.1 功能解构通用原理

功能解构是将产品总功能按逻辑关联性分解为若干相互独立且协同的分功能、子功能单元, 明确各单元输出特性、性能要求及约束条件<sup>[9]</sup>。针对橡

**作者简介**: 王金霞 (1992-), 女, 工程师, 主要从事全国橡塑机标委会塑机分会秘书处及企业标准化工作。



图1 技术路线图

塑机械的通用解构需遵循三大核心原则：

(1) 通用性原则，解构模型需覆盖多机型共性功能，避免单一工艺针对性描述。

(2) 层级性原则，功能分解深度需兼顾设计精度与实施可行性，确保模块划分的可操作性。

(3) 兼容性原则，子功能单元边界清晰，既满足独立设计要求，又支持跨机型协同联动。

## 2.2 层次分析法 (AHP)

层次分析法通过将复杂问题分解为目标层、准则层、方案层，利用两两比较判断矩阵量化各指标权重，实现定性分析与定量计算的有机结合<sup>[10]</sup>。该方法适用于模块优化筛选中的多目标平衡问题，可有效协调结构可兼容性、性能可扩展性、成本可控性等相互制约的设计目标，为通用模块的科学筛选提供量化依据。

## 2.3 通用模块化设计核心要素

橡塑机械通用模块化设计的核心要素包括：

(1) 通用模块划分，基于共性功能解构结果，拆解为可跨机型复用的标准化功能单元。

(2) 统一接口标准，制定机械连接、电气控制、信号传输的通用规范，确保模块跨机型兼容性。

(3) 动态模块库，按功能类型分类存储不同规格模块，支持快速调用与柔性组合。

(4) 全流程应用体系，覆盖设计、制造、装配、运维全生命周期的模块应用场景。

## 3 橡塑机械通用模块化设计方法<sup>[11~12]</sup>

### 3.1 共性工作流程与通用功能解构模型

#### 3.1.1 共性工作流程梳理

通过对注塑、挤出、密炼、压延等典型橡塑机械的工作流程进行系统分析，提炼出三大共性核心环节：

(1) 原料处理环节，涵盖原料输送、干燥、混合、计量等共性子流程。

(2) 核心加工环节，虽包含成型、混炼、挤出等特异性子流程，但均具备动力传输、参数控制等共性功能。

(3) 成品检测环节，涵盖尺寸精度检测、性能指标测试、外观质量检验等共性子流程。各环节通过物料流、能量流、信息流实现协同联动，构成橡塑机械的通用工作框架。

#### 3.1.2 三级通用功能解构模型

以总功能“实现高分子材料高效加工与质量检测”为核心，构建适用于全品类橡塑机械的“总功能—分功能—子功能”三级解构模型：

(1) 总功能 (F0)：橡塑材料加工成型及成品质量检测。

(2) 分功能 (F1-F3)：对应共性工作流程，即原料处理功能 (F1)、核心加工功能 (F2)、成品检测功能 (F3)。

(3) 子功能 (F11-F33)：对分功能进行通用性拆解，具体如下：

a. 原料处理功能 (F1)：原料输送 (F11)、预处理 (干燥 / 混合) (F12)、计量喂料 (F13)；

b. 核心加工功能 (F2)：动力传输 (F21)、工艺执行 (成型 / 混炼 / 挤出) (F22)、参数调控 (F23)；

c. 成品检测功能 (F3)：尺寸测量 (F31)、性能检测 (F32)、缺陷识别 (F33)。

该解构模型通过提炼多机型共性功能、保留工艺特异性接口，实现通用化与个性化的有机统一，为跨机型模块划分提供理论依据。

### 3.2 通用模块划分与接口标准制定

#### 3.2.1 通用模块划分准则

基于通用功能解构模型，遵循“共性归一、个性适配、接口统一、成本最优”的原则，制定跨机型模块划分准则：

(1) 共性功能聚合准则：将多机型共用的子功能单元归为通用基础模块，确保模块复用率。

(2) 个性功能适配准则：针对不同工艺的特异性需求，设计可替换的功能扩展模块，支持定制化组合。

(3) 结构兼容性准则：模块结构设计采用标准化安装基准与连接方式，适配不同规格机型的装配需求。

(4) 性能可扩展准则：模块预留参数调整接口与组件升级空间，满足不同工况下的性能需求。

(5) 全生命周期成本准则：提升模块零部件通用化水平，降低设计、制造、库存及运维成本。

### 3.2.2 通用核心模块定义

根据上述准则，将橡塑机械划分为 6 大通用核心模块，覆盖全流程功能需求：

(1) 原料处理模块 (M1)：集成原料输送、预处理、计量功能，适配不同形态原料，支持关键参数范围调节。

(2) 动力传输模块 (M2)：为核心加工环节提供动力支持，包含电机、减速机、传动机构等标准化组件，支持系列化配置。

(3) 工艺执行模块 (M3)：实现特异性加工功能，根据工艺类型配置对应工作单元，支持快速替换与参数适配。

(4) 温控系统模块 (M4)：实现加工过程温度精准控制，包含加热、冷却、温度传感组件，支持温度范围灵活调整。

(5) 电气控制模块 (M5)：实现各模块协同控制，集成 PLC、人机交互、传感器信号处理等功能，支持通用通信协议与功能扩展。

(6) 成品检测模块 (M6)：实现成品质量检测，包含尺寸测量、性能测试、缺陷识别组件，支持检测参数个性化配置。

### 3.2.3 通用接口标准体系

为确保模块跨机型兼容性，制定机械、电气、信号三类通用接口标准：

(1) 机械接口：采用国家标准法兰、螺纹连接，统一配合公差等级与安装基准，支持模块快速装配与互换<sup>[13]</sup>。

(2) 电气接口：采用标准化模块化接线端子，统一电压等级与信号类型规范，简化接线流程，提升连接可靠性。

(3) 信号接口：基于通用总线协议，制定统一数据传输格式与通信速率标准，确保模块间实时协同控

制与远程诊断<sup>[14]</sup>。

## 3.3 多目标模块优化筛选与组合

### 3.3.1 多目标优化指标体系

建立覆盖结构、性能、成本三大维度的通用优化指标体系，具体如下：

(1) 结构兼容性 (C1)：接口匹配率、安装空间利用率、模块互换性。

(2) 性能可扩展性 (C2)：参数调节范围、组件替换便捷性、工况适配能力。

(3) 成本可控性 (C3)：零部件通用化率、制造成本降低水平、库存周转优化效果。

### 3.3.2 指标权重量化 (AHP 法)

(1) 层次结构构建：目标层 (通用模块优化筛选) → 准则层 (C1、C2、C3) → 指标层 (各类细分指标)。

(2) 判断矩阵构建：邀请行业专家采用 1-9 标度法对各层级指标进行两两比较，构建判断矩阵。

(3) 权重计算与一致性检验：通过特征根法计算各指标权重，经一致性检验 (CR.1) 确保结果可靠，最终权重分配体现性能可扩展性的核心地位，兼顾结构可兼容性与成本可控性。

### 3.3.3 模块筛选与组合策略

(1) 筛选模型：基于指标权重建立模块综合评分模型，设定合理筛选阈值，从候选模块中筛选合格模块。

(2) 组合策略：采用“通用基础模块 + 工艺扩展模块”的柔性组合模式，通用基础模块保持标准化配置，工艺扩展模块根据具体机型需求灵活选择，实现“一基多配”的定制化生产，组合流程为需求分析 → 基础模块选型 → 扩展模块匹配 → 兼容性校验 → 方案优化 → 输出。

## 4 通用模块库架构设计

### 4.1 模块库整体架构

通用模块库采用“分层分类 + 参数化管理”架构，分为基础层、扩展层、应用层三级结构：

(1) 基础层：存储通用基础模块的标准化三维模型、工程图纸、BOM 清单，支持按关键参数关键词检索。

(2) 扩展层：存储工艺扩展模块的系列化参数模板，包含不同工艺类型、规格型号模块配置方案，支持参数化修改与快速生成。

(3) 应用层：提供模块组合案例库、接口标准手册、

设计规范指南,支持用户快速调用参考案例并进行二次开发。

## 4.2 模块库管理系统特性

模块库管理系统采用 B/S 架构,集成权限管理、版本控制、数据统计功能,支持与主流 CAD 软件、PLM 系统无缝对接,实现模块设计、调用、更新的全流程数字化管理,提升设计协同效率。

## 5 行业应用前景与价值评估

### 5.1 行业适配性分析

本文提出的通用模块化设计方法适用于橡塑机械全品类机型,包括成型类、挤出类、混炼类及辅助类设备等。通过行业调研分析,该方法可解决不同规模企业的核心需求。

(1) 中小企业:降低研发门槛,通过模块复用快速推出定制化产品。

(2) 大型企业:提升规模化生产效率,降低库存成本。

(3) 行业协同:推动模块接口标准化,促进跨企业合作与资源共享。

### 5.2 效益评估

#### 5.2.1 经济效益

(1) 设计阶段:缩短研发周期,降低设计成本,提升模块复用率。

(2) 生产阶段:提高零部件通用化水平,降低生产制造成本,优化库存周转。

(3) 运维阶段:提升模块更换便捷性,降低维修成本,延长设备使用寿命。

#### 5.2.2 社会效益

(1) 推动行业标准化:为橡塑机械模块化设计提供统一框架,助力行业标准制定与落地。

(2) 促进绿色制造:减少零部件重复设计与生产,降低资源消耗与废弃物排放。

(3) 提升产业竞争力:缩短产品上市周期,增强国内橡塑机械企业的国际市场竞争力。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

本文提出一种适用于全品类橡塑机械的通用模块化设计方法,通过共性功能解构、标准化模块划分、多目标优化组合及模块库构建,实现了定制化需求与

标准化生产的有机统一,主要结论如下:

(1) 构建的“总功能-分功能-子功能”三级通用解构模型,提炼了橡塑机械多机型共性功能,解决了传统模块划分针对性过强、复用率低的问题,为跨机型模块化设计提供了理论基础。

(2) 建立的多目标优化体系与通用接口标准,明确了结构兼容性、性能可扩展性与成本可控性的量化指标,确保了模块的跨机型兼容性与组合灵活性。

(3) 设计的通用模块库架构与管理系统,支持模块快速调用与二次开发,显著提升设计协同效率。

(4) 行业应用分析表明,该方法具有广泛的适配性与显著的综合效益,可为橡塑机械行业技术升级提供普适性解决方案。

### 6.2 未来展望

未来研究可从以下方面进一步深化:

(1) 拓展模块库覆盖范围,纳入更多特种工艺橡塑机械的专用模块,提升方法的全行业适配性。

(2) 融合数字化孪生与人工智能技术,建立模块虚拟仿真与智能匹配系统,实现模块组合方案的自动优化与性能预测。

(3) 联合行业标委会,推动通用模块划分准则、接口标准的行业化落地,制定相关行业标准,促进产业协同发展。

(4) 探索模块化设计与绿色制造、智能制造的深度融合路径,优化模块全生命周期的环境友好性与智能化水平。

### 参考文献:

- [1] 中国橡胶工业协会.中国橡塑机械行业发展报告(2023)[R].北京:中国橡胶工业协会,2023.
- [2] 张建国,李刚.橡塑机械行业定制化生产的痛点与解决路径[J].机械工程学报,2022,58(12):189-196.
- [3] 王建华,刘敏.橡塑机械标准化与模块化发展现状及趋势[J].塑料工业,2021,49(8):123-127.
- [4] 国家发展和改革委员会,工业和信息化部.高端装备制造业“十四五”发展规划[Z].2021.
- [5] Pahl G, Beitz W. Engineering Design: A Systematic Approach [M]. London: Springer-Verlag, 2013.
- [6] Huang Y, Li J. Research on Modular Design of Plastic Machinery Based on Function Decomposition [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(15): 3 215-3 226.
- [7] 李强,张华.橡塑机械模块化设计关键技术研究[J].橡塑技术与装备,2020,46(16):34-38.
- [8] 刘军,王丽.跨机型橡塑机械模块接口标准化研究[J].液压与气动,2021,45(5):132-137.

- [9] 顾佩华, 沈恒根. 产品功能解构与模块化设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [10] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process[M].New York : McGraw-Hill, 1980.
- [11] 张明, 刘伟. 通用机械模块化设计理论与方法 [J]. 中国机械工程, 2022,33(7):812-820.
- [12] 中国机械工程学会. 高端装备模块化设计技术白皮书 (2022) [R]. 北京: 中国机械工程学会, 2022.
- [13] GB/T 9119—2020, 板式法兰 PN 系列 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [14] IEC 61998-2:2018, Industrial communication networks—Installation of communication networks in industrial premises—Part 2:Installation requirements for twisted pair cables [S].Geneva:International Electrotechnical Commission, 2018.

## Research on universal modular design method for rubber and plastic machinery based on functional decomposition

Wang Jinxia

(Dalian Rubber & Plastics Machinery Co. LTD., Dalian 116036, Liaoning, China)

**Abstract:** In response to the significant demand for multi-specification customization in the rubber and plastic machinery industry, as well as core pain points such as long research and development cycles and low component commonality, this paper proposes a universal modular design method applicable to all types of rubber and plastic machinery. By systematically analyzing the common workflows of rubber and plastic machinery, a three-level universal decomposition model of "overall function—sub-function—sub-sub-function" is constructed, clarifying the boundary conditions and standardized interface specifications for cross-model module division. A multi-objective optimization system covering structural compatibility, performance scalability, and cost controllability is established, and the analytic hierarchy process is used to quantify indicator weights, enabling scientific selection and flexible combination of modules. Research shows that this method can provide a standardized design framework for the rubber and plastic machinery industry, helping enterprises to improve design efficiency, optimize resource allocation, and reduce production costs. It provides universal technical support for standardized design, flexible production, and technological upgrading in the industry.

**Key words:** rubber and plastic machinery; functional decomposition; universal modular design; analytic hierarchy process; flexible production

(R-03)

《橡塑技术与装备》投稿邮箱: [crte@chinarpte.com](mailto:crte@chinarpte.com)

欢迎投稿, 欢迎订阅, 欢迎惠登广告