

基于模块化设计的电力电子硬件产品生产管理研究

杨伟茂

绵阳大慈科技有限公司，四川 绵阳 621000

DOI:10.61369/ME.2025030039

摘 要： 随着电力电子技术的广泛应用，产品种类不断扩展，对生产效率与响应速度提出更高要求。模块化设计作为一种面向产品结构 with 功能重构的工程方法，正逐步渗透至电力电子硬件的开发与制造流程。本文从模块化设计的原理出发，探讨其在电力电子硬件生产管理中的应用优势与实践路径，分析模块划分策略、装配流程优化及协同制造机制，旨在提升产品交付效率、柔性制造水平和质量可控能力，为行业提供可复制的生产管理优化模式。

关 键 词： 模块化设计；电力电子；生产管理；产品架构；柔性制造

Research on Production Management of Power Electronic Hardware Products Based on Modular Design

Yang Weimao

Mianyang Digital & Clever Technology Co.,Ltd.Mianyang, Sichuan 621000

Abstract： With the widespread application of power electronics technology, the variety of products continues to expand, placing higher demands on production efficiency and response speed. Modular design, as an engineering approach focused on restructuring product architecture and functions, is gradually being integrated into the development and manufacturing processes of power electronic hardware. Starting from the principles of modular design, this paper explores its application advantages and practical approaches in the production management of power electronic hardware. It analyzes module partitioning strategies, assembly process optimization, and collaborative manufacturing mechanisms, aiming to improve product delivery efficiency, enhance the level of flexible manufacturing, and strengthen quality control capabilities. The goal is to provide a replicable production management optimization model for the industry.

Keywords： modular design; power electronics; production management; product architecture; flexible manufacturing

引言

电力电子硬件产品在电网、工业自动化、新能源等领域具有广泛应用，其设计与制造面临品种多样、需求定制、周期压缩等挑战。传统线性设计生产模式难以有效支撑高效、低成本的大批量定制化需求。模块化设计通过将产品分解为标准化模块，可在设计、采购、制造、装配等环节实现并行化与标准化协同，有效提升生产管理水平。本文聚焦模块化设计在电力电子硬件产品生产管理中的集成实践，系统探讨关键设计原则、模块划分方法及生产组织优化路径。

一、电力电子硬件产品的模块化设计基础

（一）电力电子产品的结构复杂性与设计需求特征

电力电子硬件产品通常由整流模块、逆变模块、控制单元、散热系统和保护电路等多个功能子系统构成，整体具备高度集成性和复杂的电气结构。在广泛应用于工业自动化、电力输配、新能源等场景的背景下，下游行业对产品的电压等级、电流容量以及控制策略提出了更为多样化和个性化的技术需求。这要求产品在结构设计上不仅要满足基本功能，还需具备良好的可扩展性与

定制兼容能力，以实现快速适配不同应用场景。

传统的“一机一型”开发模式依赖定制化整机设计，已难以适应当前市场对快速响应、柔性制造与批量定制的要求。这种方式往往导致产品开发周期长、零部件复用率低、物料编码繁杂，带来制造成本提升与管理难度加剧的问题。产品在交付一致性、维护便利性及生命周期管理方面也面临明显短板。为应对上述挑战，电力电子企业亟需引入模块化、标准化的系统设计理念，以建立结构清晰、接口统一、易于迭代的产品开发模式，实现产品研发、生产与服务体系的协同优化。

（二）模块化设计原理与在电力电子产品中的适配性

模块化设计是一种基于功能与结构解耦的产品开发理念，强调将整体产品划分为若干具有独立性的标准模块，每个模块围绕特定功能单元进行设计，并通过统一的物理与电气接口实现快速组合与协同集成。这种模块划分方式在电力电子产品中尤为适用，通常依据电气特性、热管理要求和控制逻辑，将产品结构划分为功率模块、控制模块、通信模块、散热模块等若干子系统。模块之间相对独立、互不干扰，既提升了系统的结构清晰度，也为后续的扩展、升级和维护提供了便利条件。

这种设计方法显著提升了模块间的可重用性与技术复用效率，有效降低了新产品研发的成本与周期。标准化模块在制造与装配过程中能够实现工序复用与装配模板化，进一步提高了生产效率与质量一致性。在检测与运维阶段，模块化结构便于实现分单元的性能测试与故障隔离，提升了产品的可维护性与系统可靠性。通过构建模块化架构，电力电子企业可实现产品平台化开发与多型号快速切换，满足市场对高定制、高可靠与快速交付的工程化需求。

二、模块化设计在电力电子产品生产管理中的集成应用

（一）模块划分与标准件管理对生产计划的支撑作用

在电子产品模块化设计体系中，BOM（物料清单）结构的优化是实现精准化生产计划管理的重要基础。传统以整机为中心的BOM结构在面对多规格电子产品并行生产时，常因物料层级不清、模块边界模糊而导致计划响应迟滞。电子模块化设计要求以功能单元（如信号处理模块、通信接口模块、电源管理模块等）为核心，对BOM进行分层拆解，构建逻辑清晰、可配置性强的模块化BOM体系^[1]。这种结构不仅能够反映电路板级、单元级的物料归属，还支持独立模块的计划制定与版本控制，使企业可在计划层面实现基于模块维度的排产排料。模块BOM还可作为电子产品研发、仿真、制程工艺编制与配置管理的数据基准，提升产品开发到量产过程的信息一致性和工艺复用效率，有效缩短新产品导入周期。

在标准件管理方面，模块化理念推动电子制造企业构建以通用化与标准化为核心的物料策略体系。对常用标准件如高速连接器、EMI屏蔽壳、MCU主控芯片等进行统一选型和规格限定，不仅提升了物料的复用率，也为预采购、ABC分类库存管理等提供了数据支撑。标准件的集中管理可显著压缩料号数量，降低库存冗余与采购成本，同时降低了生产计划对长交期器件的依赖。更重要的是，模块复用和接口标准化显著简化了PCBA装配流程，便于实现多品种共线制造与自动化装配工位的快速切换，提升产线柔性 with 产能利用率，形成以电子模块为单元的高响应制造管理机制。

（二）基于模块装配流程的柔性制造体系建设

在电力电子产品的制造过程中，模块化设计为构建柔性制造体系提供了关键的物理单元与流程逻辑支撑。不同于传统整机装

配模式，模块装配流程以功能模块（如整流模块、逆变单元、电源驱动板等）为单位进行产线划分与布局，构建多个独立或并行的子装配单元^[2]。这种布局方式有效减少了工序串联对节拍的制约，提升了整体制造系统的解耦性与灵活性。通过标准化接口与可插拔结构设计，各模块在完成子装配与功能调试后可迅速集成至整机平台，极大缩短了换线时间与装配切换复杂度。工艺配置则围绕电力电子模块的热管理、电磁兼容、接插件匹配等关键工艺特性进行工装夹具、测试平台与自动搬运通道的布局优化，实现模块协同装配条件下的工艺稳定与节拍控制。

标准化作业流程是支撑模块装配柔性制造的技术核心。企业需围绕模块功能单元构建一体化的数字化作业指导系统，明确装配步骤、检测参数、工艺容差与质控节点。在重复性高或精度要求高的模块装配工位，如驱动单元芯片焊接、散热片装配、电感插装等，优先部署自动化装配平台与机器视觉系统，实现精密定位与过程控制，显著降低人工干预带来的质量波动。结合模块结构的高度可配置性，企业还可借助MES系统对生产工艺参数与设备配置进行在线调整，满足不同规格产品在同一产线上小批量、高频率切换的需求。该柔性制造体系的建立，不仅增强了企业在快速交付、个性化定制方面的市场竞争力，也为电力电子行业向智能制造与精益生产深度融合奠定了坚实基础。

（三）模块化设计推动质量控制与可追溯性管理升级

在电子产品模块化设计体系中，产品结构被划分为具备独立功能的电子单元，如功率模块、信号处理板、控制逻辑模块等，为质量控制提供了颗粒度更细的操作基础。每一电子模块都可建立专属的检测标准和验证流程，从元器件级别的参数筛选，到组装过程的功能测试，再到最终出厂前的全性能验证，形成模块级的进出检闭环机制^[3]。这种层级分明的质控方式，有效防止了性能瑕疵在整机集成过程中的累积与掩盖，尤其在高压、高频、高精度要求的电力电子产品中，模块试验数据的精确记录对整机电气一致性控制起着决定性作用。同时，模块功能的边界清晰，有助于将质量责任落实至具体工序、具体岗位，为建立高可靠性的质量管理体系奠定了基础。

在追溯性管理方面，模块化设计为故障分析与责任溯源提供了高度结构化的数据支撑。每一个电子模块在生产过程中均绑定唯一编码，关联其装配数据、测试结果、元器件批次与操作人员信息，形成可回溯的完整履历链。一旦产品运行中出现异常，可通过故障码与模块序列号快速追踪至具体环节，提升了维修响应效率与责任判定的精准性。进一步接入MES系统后，可实现模块数据在整个电子制造过程中实时采集、自动分析与智能预警，构建数字化质量闭环。此外，系统还能基于历史缺陷模式，推送可视化趋势报告与工艺优化建议，辅助设计端调整电路布局或选型策略。模块化设计与智能制造系统的深度融合，推动了电子行业质量控制模式由“检测后补救”向“预警式预防”转型，显著提升了产品可靠性和生产透明度。

三、电力电子企业模块化生产管理的优化策略与实践案例

（一）基于模块化的供应链协同机制建设

模块化设计推动了供应链从整机管理向模块单元管理的深度

转型，使设计、采购与制造等核心环节之间的数据协同成为实现高效运作的关键支撑。在模块化框架下，产品结构被拆解为功能明确、接口标准的独立模块，物料需求也随之模块化分层，便于各职能部门在统一平台上开展协同工作。设计部门负责输出标准模块的接口规范与参数配置，采购部门据此制定相应物料策略，结合通用件与定制件进行差异化管理，制造部门则依据模块 BOM 开展计划排程与产能组织，实现从设计端到制造端的信息闭环与快速响应^[4]。此种模式可有效减少因信息孤岛带来的计划偏差与资源浪费，提升组织间的协同效率与决策执行力。

在外协与供应链管理方面，模块化为企业优化资源配置与供应商协作模式提供了结构化抓手。企业可将非核心模块或具备成熟技术路线的模块外包给能力匹配的专业供应商，通过模块的标准化接口实现无缝对接与质量保障。在供应商管理中，可按模块特性进行分级管理，针对高精度、高复杂度模块配置重点合作方，建立相应的质量验收机制与交付考核标准。同时，对于通用模块或使用频率较高的标准件，建议设立安全库存机制，并引入多渠道供应策略，以提高供应链系统的稳定性与抗风险能力。这种以模块为单位的供应链协同体系，不仅增强了企业在面对突发事件时的韧性，还有效提升了资源整合能力和运营效率，为模块化制造体系的稳定运行提供了强有力支撑。

（二）模块化驱动下的数字化管理平台构建

模块化设计的深入实施要求企业在产品全生命周期内构建统一的数据逻辑与管理体系，以支撑模块在设计、生产、运维各环节的高效协同。PLM 系统作为产品生命周期管理的核心平台，应与模块化架构深度融合，构建以模块为单元的配置模型、设计变更流程与技术文档管理机制。通过建立模块级的物料编码规则、版本控制体系及标准化接口数据集，企业可实现模块配置的灵活组合与精确追溯，提升研发与制造环节间的信息一致性与响应效率^[5]。同时，PLM 平台应支持模块与工艺流程、试验数据及可靠性评估指标的关联，实现设计与制造之间的技术闭环，并为产品后续升级与模块复用积累技术资产。

在业务系统集成方面，ERP 系统需围绕模块化需求进行功能扩展，将模块编码、库存信息、工艺参数与成本数据实现统一管理。通过模块化 BOM 结构与库存控制机制，提升物料流转的精准性与可视化水平；并在此基础上，联动 MES、WMS 等子系统，实现模块级的生产执行、质量检测、在制品管理与物流调度

的全流程数字化管理。结合模块运行过程中的质量数据与现场环境监测信息，企业还可进一步构建数据驱动的预测性维护体系，对关键模块开展寿命评估与性能趋势分析，从而提前识别潜在故障并制定相应的维保策略。这一以模块为核心的数据化管理平台，不仅支撑企业实现精细化运营与快速响应，更为柔性制造与智能决策提供了稳定、可控、可追溯的技术基础。

（三）典型企业案例分析：模块化提升生产效能的实践路径

深圳市英威腾电气股份有限公司（英威腾）针对其模块化 UPS、电力模块与变频器产品，自 2022 年以来系统推进模块化设计与生产体系。公司将功率单元、控制核心板、通信接口等功能单元划分为标准模块，建立统一技术接口和模块 BOM 库，并在 PLM/ERP/MES 系统中实现模块编码、版本管理与生产计划联动。在装配线上设立模块预装、功能测试与整机调试工位，通过标准化接口实现模块间高效集成；同时构建模块级质量检验体系，对模块进行独立测试与数据登记。英威腾还与供应商协同优化“模块—组件”加工与交付过程，建立模块级物料追踪机制，确保数据透明与环节可控。

根据公司公开披露，模块化 UPS 产品使单位模块复用率显著提升，公司模块化 UPS 市场占有率稳居全国第二。与此同时，基于模块化设计的研发模式，有效缩短了新品开发周期，提升了研发效率；模块共线生产模式与快速切换机制增强了对多品种订单的响应能力，改善了产线运行节奏；模块级质量控制与可追溯体系则增强了质量管控的颗粒度，使故障定位更为高效，整机系统稳定性与供电可靠性持续增强。这些成果充分验证模块化设计结合数字化制造策略，在推动电力电子企业提质增效、加快市场响应和构建高标准质量体系方面的重要价值。

四、总结

模块化设计在电力电子硬件产品的生产管理中展现出显著优势，不仅优化了设计流程、提升了制造效率，还增强了质量控制与柔性响应能力。通过合理的模块划分、标准化管理及数字系统支撑，电力电子企业可实现从研发到制造全过程的高效协同。随着智能制造与绿色设计理念的深入融合，模块化方法将在产业数字化转型中扮演更加核心的角色，为电力电子产业链的高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 王宁. 多端口电力电子变压器硬件在环实时仿真技术的研究 [D]. 山东: 青岛科技大学, 2021.
- [2] 田丽媛, 林乃奇, 张赢, 等. 一种用于计量表箱物联状态感知的电子式电能表 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(4): 137–138, 158.
- [3] 易磊, 张蓉, 邓春花, 等. 基于双向 DC-DC 变换器的电力电子创新实验平台设计 [J]. 实验科学与技术, 2023, 21(5): 143–148. DOI: 10.12179/1672-4550.20220064.
- [4] 袁俊义. 基于 OMAPL138+Spartan6 的电力电子控制平台研究 [D]. 陕西: 西安电子科技大学, 2022.
- [5] 王紫璐. 模块化多端口能量路由系统及其高频隔离变压器电磁设计研究 [D]. 河北: 燕山大学, 2024.