

支持复杂产品系统创新的集成制造管理研究

——以 CRRC-TRV 公司为例

薄洪光, 刘海丰, 李龙龙

(大连理工大学 管理与经济学部, 辽宁 大连 116023)

摘要: 集成制造管理平台构建已经成为支撑复杂装备制造企业产品技术升级的关键。通过对 CRRC-TRV 公司面向 CRH3 高速动车组产品系统创新的集成制造管理平台建设的案例研究分析, 构建了集成制造管理与复杂产品系统创新的一致性匹配过程模型和面向复杂产品系统创新的集成制造管理平台构建模型, 深入揭示了集成制造管理与复杂产品系统创新之间的关联关系及动态一致性匹配作用机理; 综合分析两者之间的交互耦合作用关系, 进一步总结了复杂产品系统集成制造管理平台构建及其促进产品创新能力提升的客观规律。

关键词: 复杂产品系统; 高端轨道装备; 集成制造管理; 产品创新

中图分类号: F273.1

文献标识码: A

1 引言

复杂产品制造业不同于传统意义上的机械产品加工行业, 它是集机械制造、信息科学、材料科学、管理科学等多学科领域最新研究成果于一体的新技术与新兴工业综合体^[1]。以高新技术为引领, 具有知识、技术密集特征和高附加值特征, 处于价值链顶端和产业链核心环节的高端装备制造业^[2]是复杂产品制造行业的典型代表。

目前, 我国的高端装备制造业仍然存在着支持企业自主创新的集成化支撑环境不完备、复杂装备产品研制过程的制造管理技术手段相对落后、产品维护服务与设计制造管理处于流程割裂状态等若干问题, 这也成为了导致我国高端装备制造业自主创新能力薄弱、核心关键零部件技术发展滞后等一系列问题出现^[2]的重要诱因。实现制造与管理的过程集成是解决上述问题的主要途径^[3], 集成制造管理 (Integrated Manufacturing Management, IMM) 平台的科学构建已经成为了支撑复杂装备制造企业进行产品技术升级的关键。本文针对复杂产品系统创新过程中的集成制造管理问题, 结合高端轨道交通装备制造企业——CRRC-TRV 公司展开案例研究, 探索集成制造管理平台构建及其促进产品创新能力提升的客观规律, 揭示集成制造管理与复杂产品系统创新之间的关联关系及作用机理。

2 理论综述

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“面向复杂计划与设备状况的钢铁生产调度知识自动化系统设计方法与应用验证”(61533005); 国家科技支撑计划项目“面向高铁列车高效生产的新一代认知型制造执行系统研究与应用示范”(2015BAF08B02); 国家社科基金项目“资源回收政策下闭环供应链定价及契约协调机制研究”(14BGL063); 教育部人文社会科学研究青年基金项目“基于干扰管理的生产重调度方法研究”(11YJC630005); 中央高校基本科研业务费专项项目“面向订单生产型钢铁企业干扰管理重调度方法”(DUT14RW101)。

作者简介: 薄洪光, 男, 辽宁葫芦岛人, 博士, 大连理工大学管理与经济学部工商管理学院副教授, 研究方向: 生产运作与供应链管理、企业管理; 刘海丰, 男, 山东安丘人, 大连理工大学管理与经济学部工商管理学院硕士研究生, 研究方向: 生产运作与供应链管理; 李龙龙, 男, 河南安阳人, 大连理工大学管理与经济学部工商管理学院硕士研究生, 研究方向: 生产运作与供应链管理。

复杂产品系统 (Complex Product Systems, CoPS) 概念最早是由世界著名科技创新与政策研究机构——英国 Sussex 大学科技政策研究所 (SPRU) 提出的。与基于标准零部件规模化生产的传统产品制造系统不同^[4], 复杂产品制造过程包含了产品研发 (设计、工艺等)、产品生产 (加工、装配等)、产品服务 (监测、维修等) 的全部流程^[5], 需要由多个专业化部门或企业密切合作、协同完成。复杂产品系统一般由多个子系统或部件组成, 又涉及到相当数量的新材料、新技术、新方法综合运用, 为了解决复杂产品系统创新过程各个环节的集成管理问题, 需要将产品制造过程与管理组织过程进行深度的业务融合^[6]。

集成制造 (Computer Integrated Manufacturing, CIM) 是一种企业生产制造与生产管理进行优化的哲理。20 世纪 70 年代, Joseph Harrington 博士深刻领悟到整合的重要性与价值, 在《Computer Integrated Manufacturing》一书中首先提出计算机集成制造的概念, 包括了两个基本观点: 一是企业生产的各个环节是统一不可分割的整体, 另一是生产制造过程实质上也是信息的收集、传递和加工处理过程^[7]。在此基础上, Beasley^[8]等人又从集成制造系统的角度强调了集成制造环境下企业的系统性和信息化。

通过对计算机生产企业技术集成能力培养的深入研究, Marcolansiti^[9]系统地提出了技术集成理论, 将技术集成定义为通过组织过程实现对资源、工具和方法等的综合应用, 强调技术集成要将多个领域知识资源集成为支持产品创新的系统知识, 并指出技术集成为提高企业研发能力提供了巨大的推动力。作为产品系统创新的前提, 集成从管理角度来说是一种创造性的融合过程, 即在各要素的结合过程中注入创造性的思维^[10]。

随着集成制造的不断发展, 现代集成制造系统 (Contemporary Integrated Manufacturing System) 成为计算机集成制造系统新的发展阶段, 在继承计算机集成制造系统优秀成果的基础上, 从信息集成、过程集成向企业集成方向迅速发展^[11]。Hansen^[12]等人从成本管理和运营管理的角度, 认为集成制造管理开始侧重于产品和服务的横向流动。通过对集成制造研究的进一步深入, 集成制造系统的技术架构和体系设计开始越来越被研究者所关注, Asif^[13]等人提出了集成管理系统的过程嵌入式设计。Scheer^[14]认为集成制造不仅影响着企业的制造效率和生产结构, 而且还更深层次地提高企业的竞争力, 带来巨大的成本优势和制造柔性。现代集成制造管理不仅仅体现在先进制造能力和先进制造技术的集成, 而且还体现在对管理模式、组织架构和决策准则等方面的改变和影响^[15]。

国内对集成制造管理的研究起步较晚。吴澄院士^[16]等指出以计算机集成制造理论为基础, 在企业生产过程中融入业务流程重组、全面质量管理、最优生产技术等先进管理理论方法, 可以将计算机集成制造模式进一步发展成为更加适合中国企业管理业务实践需求的现代集成制造模式。李伯虎^[17]等认为集成制造是一种组织、管理与运行企业的理念, 其综合并发展了企业生产各环节有关的技术, 形成了基于传统制造技术、信息技术、管理技术、自动化技术、系统工程技术的综合技术。许庆瑞院士^[18]撰文强调要从根本上改变技术创新与管理的传统视角, 必须以系统的观点、组合与集成的角度来分析企业的技术创新行为。复杂产品创新过程的集成管理借助创造性思维和内在的竞争合作机制, 推进整个产品创新过程资源要素的优化组合, 实现相对独立的阶段、活动的有效整合和并行进行, 是整合的、一体化的产品创新管理方式^[19]。

通过对已有文献分析可以看出, 现有研究集中在复杂产品系统创新的集成制造管理基本结构体系方面, 且对系统创新与集成制造管理作用机理的揭示多是单向研究, 而从整体上系统性揭示复杂产品系统创新与集成制造管理闭环动态一致性匹配作用机理的文献则较少。本文在复杂产品系统创新集成制造管理基本结构体系的基础上, 构建了集成制造管理与复杂产品系统创新的一致性匹配过程模型和面向复杂产品系统创新的集成制造管理平台构建模型, 从整体上系统性地揭示了集成制造管理与复杂产品系统创新之间的关联关系及动态一致性匹配作用机理, 并总结了复杂装备制造企业的管理创新实践经验。

3 研究设计

考虑到案例研究法更加适合对嵌入在现实情景中的事件现象进行深度考察,有利于全面地收集素材、客观地展现事实和发现探索性规律^[20],本文采用基于案例的研究方法。

3.1 案例选取

案例样本的选取主要遵循了特色性和典型性的原则,即一方面是案例企业在其行业中具有特色;另一方面是案例企业所属的行业具有典型性。CRRC-TRV 公司作为轨道交通装备制造企业,属于机械产品制造业,长久以来,我国的机械产品制造业处于较低的发展水平,技术能力不足,资源组织协调混乱,自动化信息化程度低,集成管理缺失等问题严重制约机械产品制造业的发展。近年来,随着工业化的逐步推进及完善,机械产品制造业有了长足的进步,复杂装备制造业作为机械产品制造业高端领域的一支,更是达到了国际先进水平。本文选取的案例企业 CRRC-TRV 公司,其技术创新、制造特点和运作模式等方面有别于传统的机械产品制造企业,具有技术体系与制造过程复杂、产品创新及快速响应能力要求高等特点,这体现了案例样本选择的特色性。此外,本文针对该企业承担的中国高速铁路(China Railways High-speed, CRH)动车组产品化项目,详细跟踪了项目执行全过程中样本企业的业务技术与管理组织能力的演化历程,其中也包含了对同行业多个相关企业的业务背景分析,CRRC-TRV 公司存在的问题在同行业企业中也较为普遍,且其应用的集成制造管理技术在同行业企业中也收到了良好的效果,这体现了案例样本选择的典型性。

3.2 数据收集

本文的案例企业业务梳理和数据收集等工作主要通过半结构化访谈和系统实施过程采集的方式进行。针对半结构化访谈方式,首先,在现场考察之前,我们通过 CRRC-TRV 公司网站、公司相关新闻报道及公司相关研究文献采集企业的基础数据,归纳总结研究需要探究的问题,相应地设计出半结构化访谈调研提纲;其次,对 CRRC-TRV 公司的产品研制相关责任部门(项目管理部、产品技术中心、生产制造部、质量管理部、检修事业部、生产分厂/车间等)的业务专家、管理专家和工作人员进行深入访谈,征得同意并全程录音,其中对产品技术中心、生产制造部相关负责人的访谈记录在整个数据收集中起到了支撑作用;最后,需要指出的是,为了保证信息收集的广度,CRH3 高速动车组产品制造管理过程的访谈设置为开放性访谈,以便厘清案例企业的业务流程和存在的主要管理问题。

针对系统实施过程采集方式,CRRC-TRV 公司集成制造管理信息化系统的实施过程中,笔者保持了持续的跟踪参与,收集了企业制造管理过程的运行数据,记录了出现的问题和解决方案,并重点对业务管理问题数据进行了积累和保全。在此过程中,也不断与企业专家进行沟通交流和讨论分析,以保证所收集数据的信息一致性和问题分析归纳的准确性。

3.3 数据处理

为了保证信息的精准和细化,在数据采集之余,同企业项目管理部、产品技术中心、生产制造部、质量管理部、检修事业部等部门的相关人员进行了多轮电话交流,形成反馈。

数据处理方面,将定量信息和定性信息归类处理,更进一步地,对数据进行横向或者纵向的汇总,横向如不同型号机车的运维数据,纵向如相同一个型号机车的各类型数据;对不一致性信息进行管理层、技术层、操作层多方位的校对核实;对争议信息进行剔除;对保密信息进行合理的修饰和隐藏,考虑真实性、全面性、宜用性等多方面因素,最终处理得到本文的数据。

4 案例分析

根据《中国铁路中长期发展规划》，到 2020 年，为满足快速增长的旅客运输需求，建立省会城市及大中城市间的快速客运通道，规划“四纵四横”铁路快速客运通道以及四个城际快速客运系统，建设高速铁路客运专线 1.2 万公里以上。高速铁路（简称高铁），一般是指列车运行时速达到 200 公里以上的铁路，它是由适合于高速运行的基础设施、固定设备、移动设备、完善且科学的安全保障系统和运输组织方法有机结合起来的庞大的系统工程。

高铁系统的核心移动设备是高速动车组，其产品结构和技术构成极其复杂。高速动车组为典型复杂产品，涵盖了列车总成、车体、牵引、制动、转向架、列车网络及控制六大关键系统技术，轮轨关系、流固关系、弓网关系、噪声控制等专业技术，以及铝合金焊接、集成调试等制造技术，其设计制造难度大；高速动车组产品生产周期长，涉及多家国内外零部件/物料供应商，需要调试的子系统和调试内容繁多，生产和调试过程难于精确管控；高速列车运行环境恶劣，引发故障和事故的潜在因素多、事故的灾难性后果严重，对其产品质量和可靠性要求极高，高速动车组故障检测与诊断服务系统是高铁系统不可或缺的组成部分。目前，我国铁路使用的高速动车组产品的主要包括表 1 所示的四个系列五类主力车型。

表 1 中国高速动车组技术引进情况表

Tab.1 Technology introduction by CRH

动车组型号	CRH1 系列	CRH2 系列		CRH3 系列	CRH5 系列
		普通型	改进型		
主要用途	城际客座	长途客座	高速客座	高速客座	客座/客卧
技术提供	加拿大 Bombardier	日本 Kawasaki	日本 Kawasaki	德国 Siemens	法国 Alston
引进型号	出口瑞典 ReginaC2008 型	出口芬兰 国铁 SM3 型	日本新干线 E2-1000 型	德国 ICE-3 型	出口意大利 ETR 600 型
最高时速	250 公里	250 公里	380 公里	380 公里	250 公里
营运时速	200 公里	200 公里	300 公里	300 公里	200 公里
国内厂商	中国南车集团 青岛四方庞巴迪	中国南车集团 青岛四方机车	中国南车集团 青岛四方机车	中国北车集团 唐山轨道客车	中国北车集团 长春轨道客车

CRRC-TRV 公司（中国中车股份有限公司 TRV 有限责任公司）始建于 19 世纪 80 年代，是中国最早的轨道装备制造企业之一，也是国内引进 300 公里/小时高速动车组整体技术的骨干企业。该公司已形成研发与设计为一体的综合性研发设计中心，具备新产品研发和既有产品的改进设计能力，产品开发涉及轨道交通装备产品的各个方面，包括高速动车组、城铁、城际车、中低速普通客车以及特种车辆等 4 大类、80 多个系列、200 多个品种。该公司拥有铝合金车体和碳钢车体两条独立的轨道客车生产线，构建了设备通用化、工装柔性化、模具专业化的制造技术平台，形成了车体、涂装、组装、调试、物流、转向架等六大核心制造能力，目前产能达到年产高速动车组 768 辆、城轨车 800 辆和碳钢车 1000 辆。同时，该公司具有目前铁路主型客车、发电车、特种车、高级公务车、动车组、城轨车、地铁车辆的检修和改造能力，直接生产台位 132 个，年修造能力 1000 辆。

2005 年 11 月，铁道部向德国西门子公司和 CRRC-TRV 公司订购 CRH3 高速动车组 60 列，西门子在德国本土制造首批 3 列整车和一些重要部件，并向中方合作伙伴提供技术支持和技术转让，CRRC-TRV 公司承担其余 57 列整车的生产任务，第一阶段国产化率为 30%，第二阶段提高到 50%，最终能够达到 70%。CRH3 高速动车组的原型为德国铁路的 ICE-3 列车（西门子 Velaro），我国按照“引进、消化、吸收和再创新”方式引进西门子产品技术，由 CRRC-TRV 公司在国内生产实现国产化。CRH3 高速动车组为 4 动 4 拖 8 辆编组，采用

电力牵引交流传动方式，由 2 个牵引单元组成，每个牵引单元按两动一拖构成，具有良好的气动外形，其载客速度为 350 公里/小时，最高试验速度为 404 公里/小时；CRH3 车体强度按 EN12663 标准进行设计，采用大型挤压中空铝型材焊接而成，司机室采用弯曲铝型材梁和板状铝型材作蒙皮的焊接结构；CRH3 转向架采用性能优良的 SF500 转向架，为适应车体的加宽和速度的要求，仅对枕梁、减振器、弹簧参数、传动比等进行了适应性的改变和优化；CRH3 牵引系统与 Velaro E 动车组基本相同，牵引功率为 8800kw。CRH3 高速动车组产品由 102 万个零件组成，国内外上千家企业参与研发制造，生产工艺和物流过程都异常复杂，任何微小差错都将引起列车运行中致命的安全隐患。

CRH3 高速动车组产品系统创新能力是复杂装备制造技术能力与企业管理组织能力深度融合的集中体现。在适应 CRH3 高速动车组产品高度复杂性、制造过程精益化和在线维护特殊性等需求方面，CRRC-TRV 公司与西门子等国外先进制造企业相比，仍存在有一定的技术差距，表现为研发、生产、维护各系统的内部集成度和外部耦合度不足。为了形成高速动车组产品技术“引进、消化、吸收和再创新”的能力支撑体系，CRRC-TRV 公司构建了如图 1 所示的 CRH3 高速动车组产品系统创新集成制造管理平台。

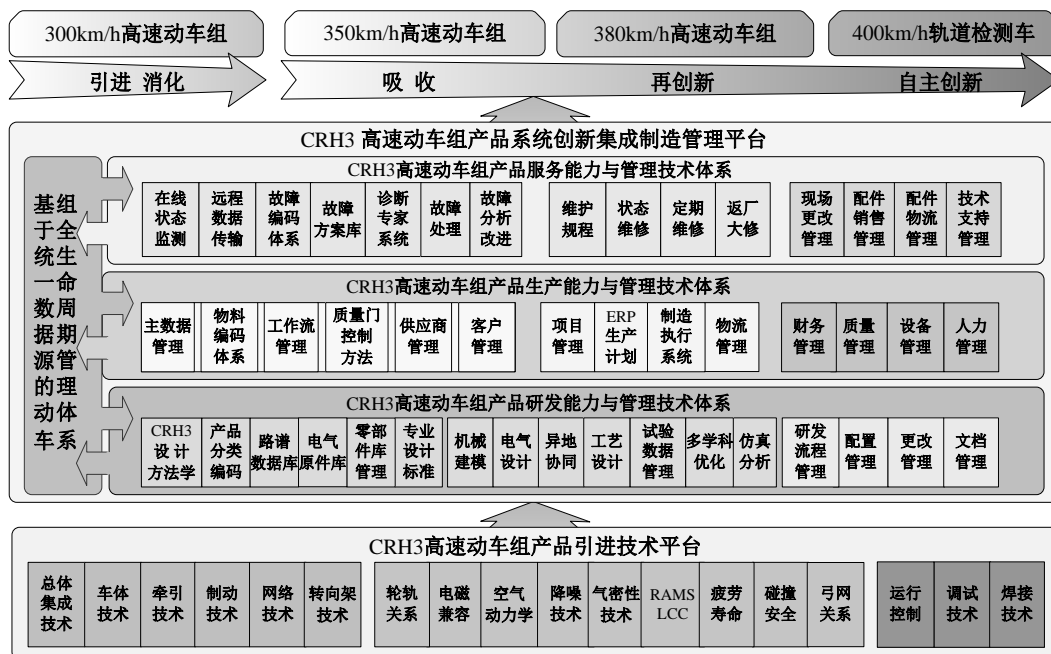


图 1 CRH3 高速动车组产品系统创新集成制造管理平台

Fig.1 CRH3 product systematic innovation integrated manufacturing management platform

上述平台由 4 个核心部分构成：基于多企业产品协同设计方法的研发能力与管理技术体系；基于 PM/ERP/MES 集成的批量定制环境下项目计划分级管控的生产能力与管理技术体系；基于远程状态监测和故障智能诊断的产品服务能力与管理技术体系，即 CRH3 高速动车组产品维护-维修-运行（Maintenance, Repairing & Operation, MRO）技术能力体系；基于统一数据源的高速动车组研发、生产、维护过程集成的产品全生命周期管理技术体系。

针对 CRH3 高速动车组复杂产品的异地协同设计和多学科优化等研发过程管理的需求，CRRC-TRV 公司建立了如图 2 所示的多企业产品协同设计过程管理技术体系，并重点解决了研发知识体系、设计优化平台和系统集成三个问题。(1)高速动车组研发知识体系：采用逆向工程对 300km/h 动车组多达 8755 张设计图纸及大量技术资料进行还原设计，完善基于全生命周期配置管理技术的产品研发流程，提出基于车辆方向定义的自顶向下和自底向上的三维建模混合设计方法；构建 CRH3 系列编码体系，实现产品结构、功能和位置的多维度定义；依托智能化零部件管理系统，建立全球供应商支持下的零部件库，把供应商产品的

2D/3D 模型、技术参数等信息纳入到 CRH3 研发环境中。(2)基于 CProject/CFolder 的异地协同设计和优化平台：在研发过程中应用协同项目管理(CProject)技术形成了 CRRC-TRV 公司与 CRRC-CRV 公司、中车联合设计中心等异地协同设计体系，也实现了与清华大学(MDO)、西南交通大学(空气动力学)以及中科院等科研院所的多学科协同优化。(3)基于 PLM 的多设计工具和系统的集成：在 PLM 系统的基础上，实现 PDM 以及多种 CAD 设计工具及系统的集成，满足 CRH3 的面向产品全生命周期设计，为研发/生产/服务系统的集成管理奠定基础。

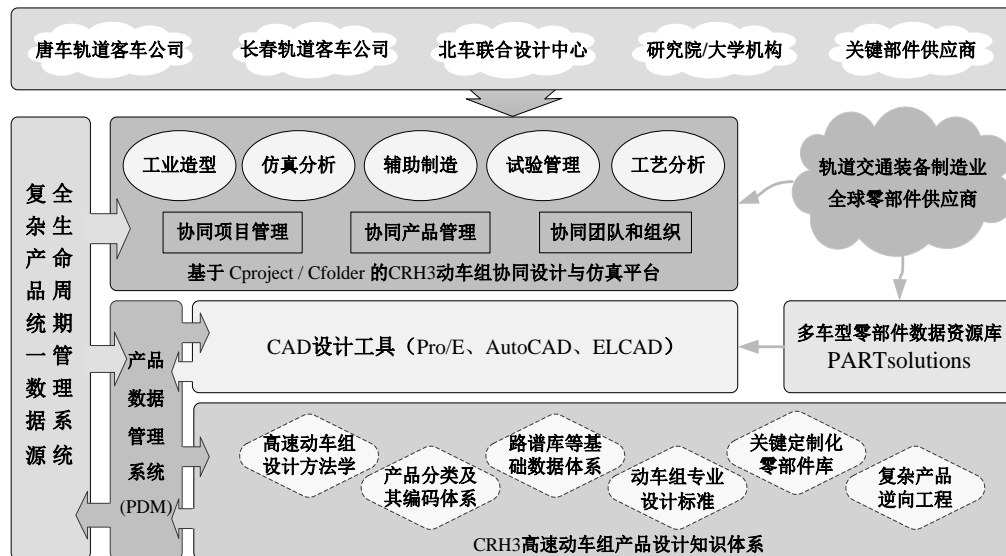


图 2 多企业产品协同设计过程管理技术体系

Fig.2 Multi-enterprise products collaborative design process management technology system

CRH3 高速动车组的 BOM 节点数量多达 10 万个以上，具有不确定性的调试项目多，涉及多家国内外物料供应商。针对上述特征，在 PM、ERP 和 MES 等管理技术的基础上，CRRC-TRV 公司构建了如图 3 所示的面向高速动车组批量定制的项目计划分级管控技术体系，并重点解决了多级计划协同、制造执行管理和多层集成技术三个问题。(1)基于 PM/ERP 的多级协同生产计划体系：采用 PM 控制大部件节点计划，发挥其在一些不确定性环节上的管理优势，如动车组调试以及交货提前期较长的物料供应等，同时为 ERP 系统形成主生产计划；ERP 系统则形成物料需求计划，并形成了 PM 的网络计划与 MRP 计划相结合以及 PM 的关键件能力平衡与 ERP 的能力平衡相结合双反馈计划控制机制。(2)面向车间生产的调度排产和作业现场控制系统(MES)：基于遗传算法和启发式算法设计了面向车间生产控制的高级计划和排产算法，实现了按照工序级调度方式组织现场生产的功能，提高了计划执行性。(3)PM/ERP/MES 的集成技术：通过集成接口的设计和开发，实现 PM/ERP/MES 的高度集成，使得 ERP 中完善的物料管理、质量管理等技术在 PM 和 MES 中得到无缝集成应用。

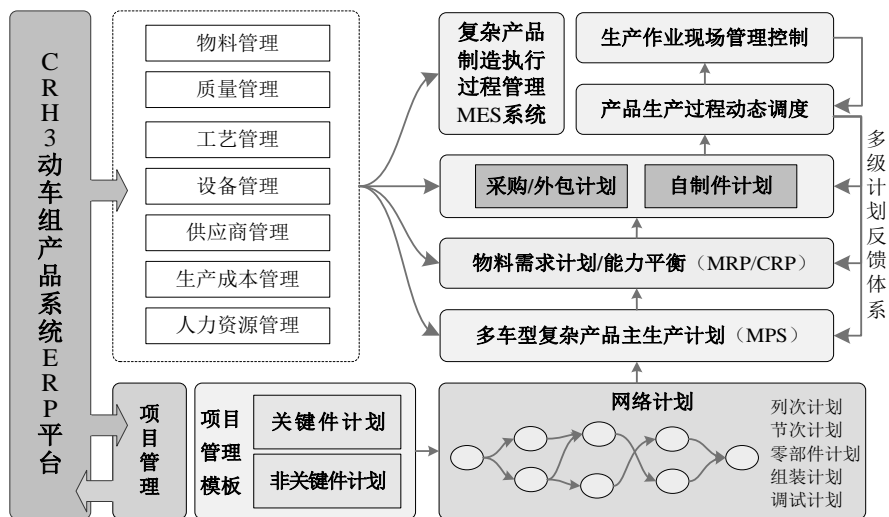


图3 动车组批量定制环境下项目计划分级管控技术体系

Fig.3 Project plan hierarchical control technological system under the environment of CRH batch customization

针对 CRH3 高速动车组安全运营的管理要求，CRRC-TRV 公司设计了如图 4 所示的基于远程状态监测和故障智能诊断的产品服务管理（MRO）体系，并重点解决了在线状态监测、故障诊断、故障处理和分析改进四个问题。(1)在线状态监测（OM）：高速动车组设计有完善的系统状态监测系统，用来监视如转向架系统、牵引和制动力系统等运行参数的变化情况，并把各种故障信息通过列车总线收集起来。(2)智能故障诊断（ID）：遵循与高速动车组研发知识体系编码标准统一的原则，形成设备编码、分布定位编码、故障编码等编码体系以及运行/维护策略和故障历史数据库，并在此基础上构建了故障诊断系统，能快速实现故障定位和诊断，并形成故障排除策略。(3)多种故障处理（AT）模式：①实时在线故障排除：在故障诊断系统形成的故障排除策略支持下，自动或帮助司乘人员现场快速解决列车运行方面的故障；②离线故障排除：通过状态监测、故障诊断和维修管理相结合，实现列车的状态维修、定期维修和可靠性维修。(4)故障分析与研发制造改进（AI）：在故障数据分析和挖掘的基础上，帮助工程人员查明缺陷，改进 CRH3 高速动车组的研发和制造工艺。

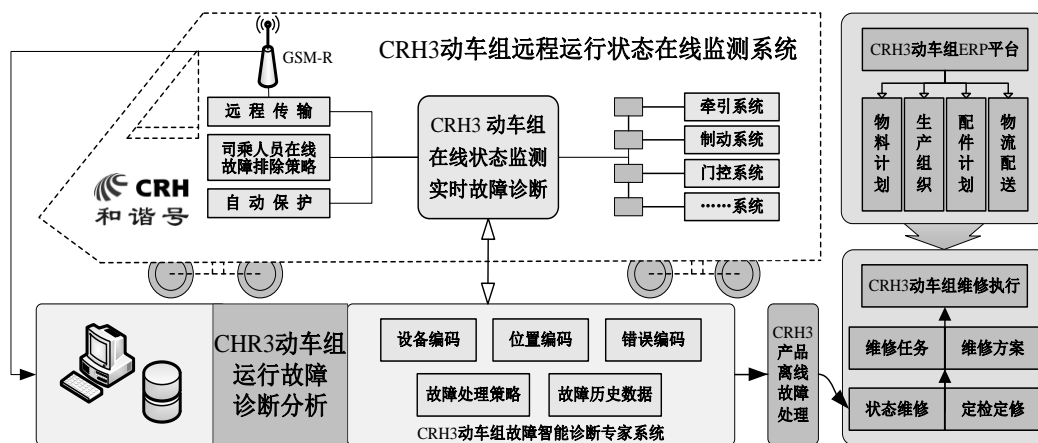


图4 基于远程状态检测和故障智能诊断的MRO技术体系

Fig.4 MRO technology system based on the remote condition detection and fault intelligent diagnosis

在复杂产品系统创新集成制造管理平台的支持下，CRH3 技术引进及新一代 350km/h、380km/h 高速动车组的自主研发工作取得了圆满成功。目前，CRH3 高速动车组在京津城际铁路投用 20 列，占运营车辆总数的 100%；在广深高铁投用 7 列，占运营车辆总数的 100%；

在武广和广深高铁投用 53 列，占运营车辆总数的 67%；新一代 CRH380BL 高速动车组已在京沪、沪杭、武广等高铁投用 35 列；自 CRH3 高速动车组在京津城际铁路、武广高速铁路等投入运营以来，年新增运力 1 亿人次以上。集成制造管理技术应用使 CRRC-TRV 公司显著缩短了设计周期（由 18 个月缩短至 10 个月）、提高了制造效率、保证了产品安全，实现直接经济效益 5.17 亿，新增税收 7.33 亿，获得总值 400 亿元的动车组订单，月增产值 4 亿元，CRH3 市场占有率达 50%，已累计安全运行 700 万公里。该技术在中国北车集团所属的长客股份公司、齐齐哈尔轨道装备公司等企业进行了转让和推广，培养了大量专业人才，提高了我国轨道交通装备制造企业的自主创新能力和集成制造管理水平。

5 研究发现

5.1 集成制造管理与复杂产品系统创新一致性匹配

集成制造管理与复杂产品系统创新之间表现为战略一致性匹配和动态一致性匹配关系。一方面，复杂产品研发、生产和服务过程集成管理方法体系的贯彻实施依赖于先进的信息化技术手段，融合了集成制造管理理论思想的 IT 系统战略与企业复杂产品系统的创新战略具有高度的一致性，符合战略一致性匹配模型（Henderson 和 Venkatraman）^[21]。另一方面，集成制造管理（IMM）平台的系统基础架构和业务流程，应该与复杂产品系统的组织结构变革和业务流程重组保持动态一致性（张玉林和陈剑）^[22]，通过这种动态柔性匹配方式能够增强企业的快速响应创新能力。同时，集成制造管理与产品创新的战略一致性和动态一致性匹配执行过程是一个不断迭代的循环过程，复杂产品系统创新的业务需求作为企业业务领域与 IMM 系统领域之间的沟通桥梁，不断带动上述两个一致性匹配过程的螺旋式提升。集成制造管理与复杂产品系统创新的一致性匹配过程模型如图 5 所示。

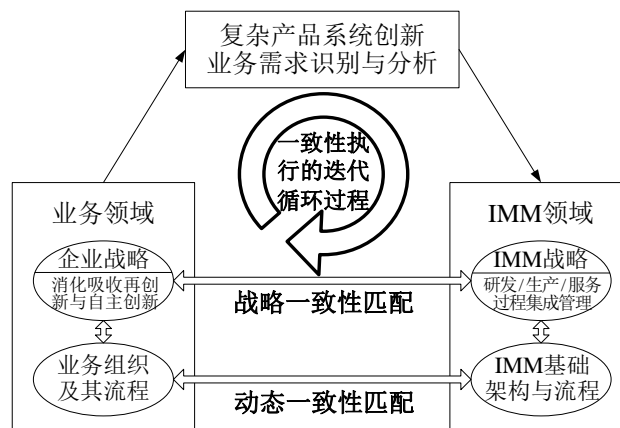


图 5 集成制造管理与复杂产品系统创新的一致性匹配过程模型

Fig.5 Consistency matching process model of integrated manufacturing management and complex product systematic innovation

CRRC-TRV 公司按照国务院做出的“引进先进技术、打造中国品牌、实现自主创新”战略部署，通过深入剖析西门子 300km/h 高速动车组产品的研发设计思路、制造加工工艺以及维护服务流程，制定了与“引进技术消化、吸收、再创新与自主创新”相匹配的 CRH3 高速动车组产品“研发-生产-服务”过程集成管理战略。针对 CRH3 高速动车组产品构成复杂、技术难度大、制造周期长、运行安全性要求高等特点，集成制造管理平台的基础架构规划与流程设计充分考虑了设计/工艺/制造/维护业务流程一体化、多企业协同研发与集成优化、PM-ERP-MES 多级资源协调配置等多维因素，保证了集成制造管理与产品创新过程的动态一致性匹配。基于一致性匹配和循环迭代提升的集成制造管理体系，为 300km/h 高

速动车组的研制生产和 350km/h 以上高速动车组的自主研发提供了集成技术支撑环境。

5.2 复杂产品系统创新驱动集成制造管理平台构建

传统单一的生产组织方式不能适应当今复杂产品创新的需求,导致企业的市场快速响应能力下降,甚至陷入经营窘境。复杂产品系统创新要求实现制造和管理模式的历史性变革^[23],成为了驱动制造与管理过程集成的源动力。支持复杂产品系统创新的集成制造管理平台是一个十分复杂的人机系统,体现在功能复杂性、对象复杂性、系统随机性和目标/约束多样性等多个方面。面向复杂产品创新的集成制造管理框架不能只限于某一层面,其构建方案应充分反映过程融合的管控思想,集成制造管理平台构建模型如图 6 所示。

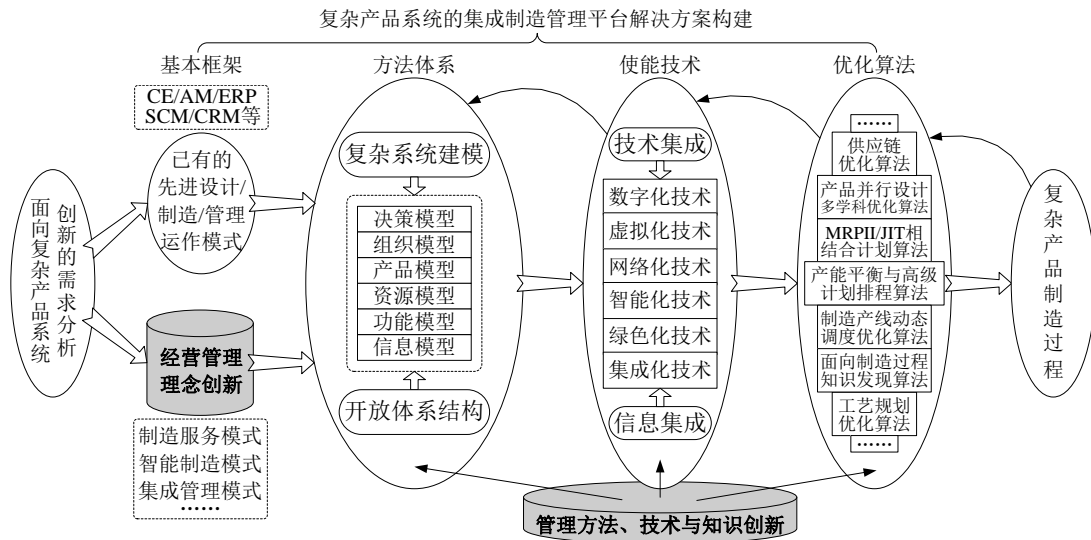


图 6 面向复杂产品系统创新的集成制造管理平台构建模型

Fig.6 Integrated manufacturing management platform building model oriented to complex product systematic innovation

图 6 所示的构建模型主要包括基本框架、方法体系、使能技术和优化算法。解决复杂产品系统创新问题首先需要在制造管理模式上创新,采用先进经营管理理念构建基本框架;方法体系层面采用定性方法从“宏观-中观”视角分析问题;使能技术层面则从“中观-微观”视角给出实现技术与方法;优化算法层面进一步从运筹学等理论工具层面对问题进行“微观-细观”的理论分析和综合求解。

在高端轨道交通装备引进技术及产品系统创新需求的驱动下,CRRC-TRV 公司搭建了满足 CRH3 高速动车组集成制造管理目标要求的产品研发能力与管理技术平台、产品生产能力与管理技术平台和产品服务能力与管理技术平台,主要建设工作包括:构建了适应 300km/h 高速动车组研制的制造技术标准体系、质量保障体系、分供方培育体系和专业人才培养体系;建立了 300km/h 高速动车组建模与仿真优化一体化系统、设计-工艺-制造-维护一体化系统、企业经营管理一体化系统和生产执行管理一体化系统;形成了基于 CAD/CAE/CAPP/CAM/PDM 集成的 300km/h 高速动车组研发能力平台、基于 PM/ERP/MES/DNC 集成的 300km/h 高速动车组生产能力平台和基于 OM/ID/AT/AI 集成的 300km/h 高速动车组服务能力平台。复杂产品系统创新需求发挥了对企业集成制造管理体系建设的驱动作用。

5.3 集成制造管理拉动复杂产品系统创新能力提升

复杂产品系统创新与集成制造管理之间的关系,不仅反映在产品创新对集成制造管理平

台构建的推动作用，也表现为集成制造管理对复杂产品系统创新能力提升的拉动作用，如图7所示。复杂产品系统创新通常是功能创新、形式创新、服务创新多维交织的组合创新^[9]，产品创新过程贯穿需求分析、产品设计、工艺规划、试制批产、销售服务的生命周期全过程。复杂产品系统创新活动需要由企业内多个部门，以及相同/不同行业的多个企业共同承担，参与产品创新的各个主体承担的任务在业务逻辑上错综复杂，在产品制造过程中也存在着涉及多部门、多企业的频繁的工程变更。为了克服单纯的集成制造模式（注重产品制造数据及业务集成）或集成管理模式（注重经营管理数据及业务集成）产生的制造与管理衔接脱节问题，集成制造管理模式将制造过程与管理过程在业务层面进行融合，通过业务活动协作和业务过程重组，增强各项活动之间、部门/企业之间的快速响应协调能力和协同创新能力。

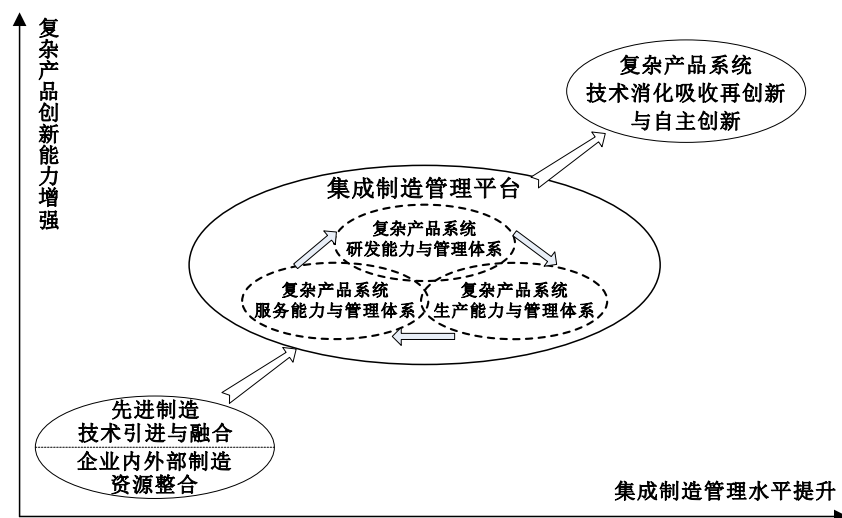


图7 集成制造管理拉动复杂产品系统创新能力提升过程

Fig.7 The process of integrated manufacturing management promoting complex product systematic innovation

在 CRH3 高速动车组研制过程中，CRRC-TRV 公司利用集成制造管理平台，通过研发能力与管理技术体系进行动车组物理性能仿真，加快、加深了对引进技术的消化理解；通过工艺性能仿真分析，将引进技术融入到自主设计、工艺和制造中，为在技术引进基础上实现再创新奠定基础；通过基于多学科协调的轻量化设计和多学科多领域性能的协同仿真，为获得我国高速动车组的最优总体性能提供了技术支持；在集成制造管理平台支撑下，形成了面向 CRH3 产品全生命周期的研发、生产、服务流程闭环管控技术体系。CRRC-TRV 公司通过对德国西门子技术的引进学习和消化吸收，快速积累了高速动车组产品的制造技术能力；通过集成制造管理平台的构建，促进了 CRRC-TRV 公司衍生出自主的核心零部件设计与制造工艺技术，使企业具备了 380km/h 高速动车组和 400km/h 轨道检测车的独立研制能力。

6 结论

本文针对支持复杂产品系统创新的集成制造管理问题，通过对高端轨道交通装备制造企业 CRRC-TRV 公司 CRH3 高速动车组产品研制的案例研究，深入分析了集成制造管理与复杂产品系统创新之间的交互耦合作用关系，构建了集成制造管理与复杂产品系统创新的一致性匹配过程模型和面向复杂产品系统创新的集成制造管理平台构建模型，进一步总结了复杂产品系统集成制造管理平台构建及其促进产品创新能力提升的客观规律，揭示了集成制造管理与复杂产品系统创新之间闭环动态一致性匹配作用机理，阐明了集成制造管理对复杂产品系统创新的支撑促进作用及复杂产品系统创新对集成制造管理平台构建的驱动作用。同时本文揭示了复杂产品系统集成制造管理平台的构建策略及其实现产品创新能力提升的必要条

件,支持复杂产品系统创新的集成制造管理体系,需要以集成制造管理与复杂产品创新的战略一致性和动态一致性匹配为前提。

已有关于复杂产品系统创新的集成制造管理的研究多集中在基本结构体系方面,且对复杂产品系统创新与集成制造管理作用机理的揭示多是单向研究,并不能完全适用于分析和指导复杂产品系统创新的集成制造管理实践活动。本研究从复杂产品系统层面拓展了集成制造管理理论,并通过案例研究探索了集成制造管理平台构建及其促进产品创新能力提升的客观规律,揭示集成制造管理与复杂产品系统创新之间的关联关系及作用机理,对复杂产品系统制造企业实现产品系统创新的集成制造管理提供了理论基础,并对未来复杂产品系统创新与集成制造管理作用机理的研究给予了新的视角。尽管集成制造管理对于复杂装备制造企业产品技术升级的重要性已经得到学者的普遍认同,但是对于复杂装备制造企业而言,如何通过集成制造管理驱动其产品系统创新尚未有明确的结论。本文研究表明,支持复杂产品系统创新的集成制造管理体系,需要以集成制造管理与复杂产品创新的战略一致性和动态一致性匹配为前提,复杂装备制造企业应在引进、消化、吸收、融合先进制造技术和充分整合企业内外部制造资源的基础上,以满足企业的复杂产品系统创新需求为目标,综合运用现代管理理念与技术方法,逐步建立和完善集成制造管理平台,进而发挥集成制造管理平台对复杂产品系统创新的拉动作用。

本文主要针对高端轨道交通装备制造企业,研究成果对于提高我国复杂装备企业的制造管理水平具有较好现实意义,但不同行业企业的生产组织与管理模式有一定差别,全面揭示复杂产品系统集成制造管理平台构建的特殊过程及影响因素,也是需要深入研究的内容。另外,本文采用单案例研究存在研究广度不足的缺陷,研究结论的普适性仍需要通过多案例的研究进一步验证。

参考文献:

- [1] 杨瑾. 复杂产品制造业集群供应链系统组织模式研究[J]. 科研管理, 2011, 32(1): 153-160.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部.《高端装备制造业“十二五”发展规划》[EB/OL]. 2012.
- [3] 张华胜, 薛澜. 技术创新管理新范式: 集成创新[J]. 中国软科学, 2002, 12: 6-22.
- [4] Mike H. Product complexity, innovation and industrial organization[J]. Research Policy, 1998, 27(26): 689-710.
- [5] 王先逵. 广义制造论[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 86-94.
- [6] 胡树华, 李必强, 海丰. 面向产品创新的管理集成[J]. 中国软科学, 2000, 4: 87-89.
- [7] Harrington J. Computer integrated manufacturing [M]. New York: Industrial Press, 1973: 9-19.
- [8] Beasley T B, Cearley T W, Chandler D A, et al. Computer integrated manufacturing system: U.S. Patent 4,827,423[P]. 1989-5-2.
- [9] Marcolansiti, I. Technology integration: making critical choice in a dynamic world [M]. Harvard Business School Press, 1998: 15-20.
- [10] 欧光军, 王治, 陈勇. 面向产品创新的集成管理体系研究[J]. 科研管理, 2004, 25(5): 8-11.
- [11] Vernadat F B. Enterprise modelling and integration[M]. Springer US, 2003.
- [12] Hansen A, Mouritsen J. Management accounting and operations management: understanding the challenges from integrated manufacturing[J]. Handbooks of Management Accounting Research, 2006, 2: 729-752.
- [13] Asif M, de Bruijn E J, Fisscher O A M, et al. Process embedded design of integrated management systems[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2009, 26(3): 261-282.
- [14] Scheer A W. CIM. Computer Integrated Manufacturing: Towards the Factory of the Future[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] Computer-integrated manufacturing handbook[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [16] Wu Cheng, Li Bohu. Manufacturing system automation in China: from computer integrated manufacturing to contemporary integrated manufacturing[R]. Beijing: IFAC World Congress, 1999: 5-20.
- [17] 许庆瑞, 刘景江, 赵晓庆. 技术创新的组合及其与组织、文化的集成[J]. 科研管理, 2002, 23(6): 38-44.

- [18] 李伯虎, 吴澄. 现代集成制造的发展与 863/CIMS 主题的实施策略[J]. 计算机集成制造系统, 1998, 4(5): 7-15.
- [19] 赵志, 孙林岩, 汪应洛. 面向产品创新的过程再造与集成管理研究[J]. 管理科学学报, 2001, 4(6): 24-30.
- [20] Eisenhardt K M. Building Theories from Case Study Research[J]. The Academy of Management Review, 1989, 14(4): 532-550.
- [21] Henderson J C, Venkatraman N. Strategic alignment: leveraging information technology for transforming organizations[J]. IBM Systems Journal, 1993, 32(1): 4-16.
- [22] 张玉林, 陈剑. 企业信息化战略规划的一种新的分析框架模型[J]. 管理科学学报, 2005, 8(4): 88-98.
- [23] 汪应洛. 支持快速产品创新的先进制造模式及其管理研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1-2): 86-88.

Integrated Manufacturing Management Supporting CoPS innovation: A Case Study of CRRC-TRV Co., LTD

BO Hong-guang, LIU Hai-feng, LI Long-long

(Faculty of Management and Economics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The construction of the integrated manufacturing management platform has been a crucial issue for the product technology upgrade in complex equipment manufacturing enterprises. Based on the analysis of the integrated manufacturing management framework for the CRH3 Electrical Multiple Unit (EMU) product system innovation in CRRC-TRV Co., LTD, this paper builds a consistency matching process model of integrated manufacturing management and complex product system innovation and the integrated manufacturing management platform building model oriented to complex product systematic innovation. The paper also explores the dynamic consistency-matching mechanism and correlation between integrated manufacturing management and complex product innovation, as well as the mutual-promoting functions between them; then based on the comprehensive analysis of the interaction between them, further summarized the construction of integrated manufacturing management platform in complex product systems and how it improves the innovative ability of the manufacturing enterprises.

Key words: CoPS; high-end railway equipment; Integrated Manufacturing Management; product innovation