

复杂系统（产品）集成制造工程的技术研究与应用

夏国洪¹，李伯虎¹，唐晓青²，朱文海¹，柴旭东¹

(1. 中国航天科工集团公司，北京 100037；2. 北京航空航天大学，北京 100083)

[摘要] 基于现代集成制造的理念、方法、技术、工具，结合实践，提出并研究了一种能改善复杂产品研发时间(T)、质量(Q)、成本(C)、服务(S)的系统工程——称为“复杂系统(产品)集成制造工程”(简称COSIME)。阐述了它的内涵、系统框架和技术体系，并给出了其中具有特点的6类关键技术的阶段研究成果，包括基于人制管理及有关先进制造模式的复杂产品集成制造系统的经营管理模式；基于项目管理理念的异地企业间并行工程方法与技术；复杂产品虚拟样机工程方法与技术；基于分布仿真技术的复杂产品概念设计与性能评估系统；复杂产品质量控制与管理系统；基于PLM及网格技术的两种复杂产品全生命周期活动集成制造支撑平台等。

[关键词] 复杂系统(产品)集成制造工程；复杂产品虚拟样机工程；网格计算；人制管理

[中图分类号] TP391.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)09-0049-07

1 引言

21世纪制造业面临的新形势是：知识-技术-产品的更新周期越来越短；客户对产品研发时间(T)、质量(Q)、成本(C)、服务(S)要求越来越高；全球化的协同制造与竞争；产品知识含量不断增高；实现绿色制造的呼声越来越高；先进制造技术与应用发展迅速等。纵观近年来各国的战略报告，对未来制造企业面临的挑战可概括为精良、高效；以客户为中心；内部、外部无缝互连；有效知识管理；绿色制造；善于应用新技术等*。

研究复杂系统(产品)集成制造工程(COSIME)的目的是为了提升企业国际竞争力，提高我国的集成制造能力，发展国民经济和加强国防实力。因为国家的国力强弱在某种程度上决定于企业P(新产品)、T、Q、C、S、E(环境清洁)和K(知识含量)。

复杂系统(产品)制造包括产品从规划到报废全生命周期的全部活动。复杂系统(产品)指的是客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、制造流程复杂、制造管理复杂的一类系统(产品)，如航天器、飞机、汽车、船舶、复杂机电产品等。

2 COSIME 的内涵 系统框架和技术体系

2.1 COSIME 的体系结构

COSIME是一个复杂的系统，它采用系统的观点，从经营理念、运行模式和全生命周期的制造要素与活动等多个方面进行综合分析和研究。COSIME体系由项目主管企业、协作企业、供应商和客户的企业集成制造系统(EIMS)的集群组成。其中，EIMS由虚拟样机设计、生产、试验、经营决策与管理四个分系统和一个支撑分系统组成(见图1)。

* IMTI, Inc., Integrated Manufacturing Technology Roadmapping, Project, 2000

[收稿日期] 2005-05-20; **修回日期** 2005-06-20

[作者简介] 夏国洪(1939-),男,江苏常州市人,中国航天科技集团公司研究员

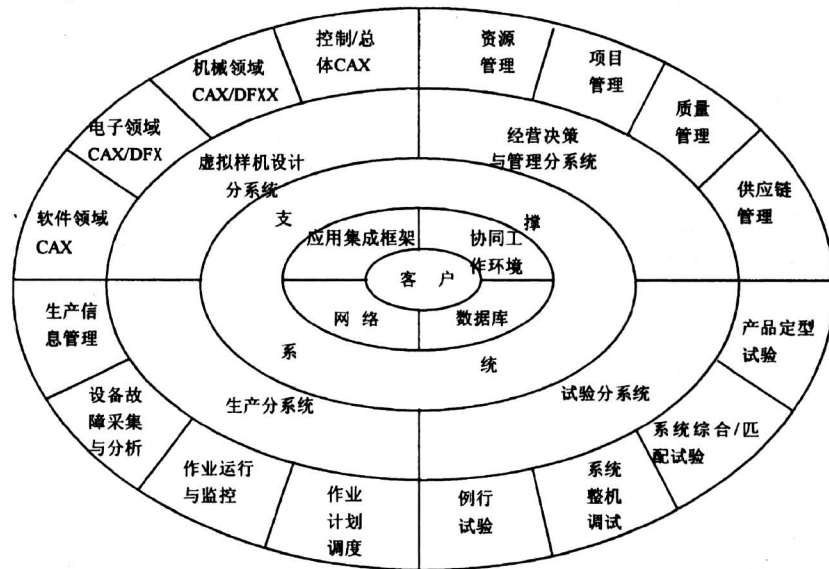


图1 企业集成制造系统 (EIMS)

Fig.1 Enterprise integrated manufacture system

2.2 COSIME 的技术体系

COSIME 的技术体系是对现代集成制造系统技术体系的进一步发展^[1]。

1) 总体技术包括系统总体运营模式；系统集成方法论；系统集成技术；标准化技术；企业建模和仿真技术及系统开发与实施等技术。

2) 产品设计技术包括 CAX/DFX 技术，如 CAD、CAE、DFA（面向装配的设计）、DFM（面向制造的设计）等技术；SBD（基于仿真的设计）；多学科虚拟样机设计；逆向工程；绿色设计；网络设计；智能设计及面向大规模定制生产模式的设计等技术。

3) 经营管理与决策系统技术包括项目管理；MIS；OA；MRP II（制造资源规划）、SCM（供应链管理），CRM（客户关系管理），ERP（企业资源规划），DEM（动态企业建模），质量管理及电子商务等技术。

4) 试验技术包括计算辅助测试、虚拟测试、试验信息综合管理、试验建模、试验评估技术等。

5) 加工生产与装备技术包括数控机床；数控加工中心；工业机器人；FMC（柔性制造单元）；FMS（柔性制造系统）；VM（虚拟制造）；可重组机器/装备及 RPM（快速成形制造）等技术。

6) 系统支撑环境技术包括网络、数据库、集成平台/框架，计算机辅助软件工程，PDM（产品数据管理），计算机支持协同工作，人/机接口及网络等技术^[2]。

3 关键技术

复杂系统（产品）制造工程的关键技术很多，笔者近年来重点研究与探索的有以下成果。

3.1 基于人制管理的 COSIME 经营管理模式

航天器（飞船、卫星、导弹）、飞机这一类复杂系统（产品）的研制、生产和管理，是一项周期长、投资大、技术复杂、协调面广、风险高的系统工程，它与一般的机电产品完全不同，参加研制生产管理的人员成千上万甚至更多，涉及的企事业单位成千上万户。其中一个参研参试人员的过失，一个元器件损坏，一个研制生产配套单位的不配合都会严重影响产品的 TQCS，甚至引起产品试验的失败，造成重大损失。本文第一作者总结中国航天 40 多年的成功经验和沉痛教训，用系统工程的方法，提出了集用人/制度创新/科技创新/质量制胜等为一体的“人制管理”理念^[3,4]（见图 2），解决军工体制层次多、不协调问题，运用合作、竞争、激励约束和评价等机制调动了广大科研人员的积极性、创造性，建立覆盖分布在全国的 180 多个单位的广域网，实现了数字化加工、联网，启动了 COSIME，培育了企业、质量文化，使集团公司产

* 十五 863/CIMS 主题专家组。十五 863/CIMS 主题计划，2001

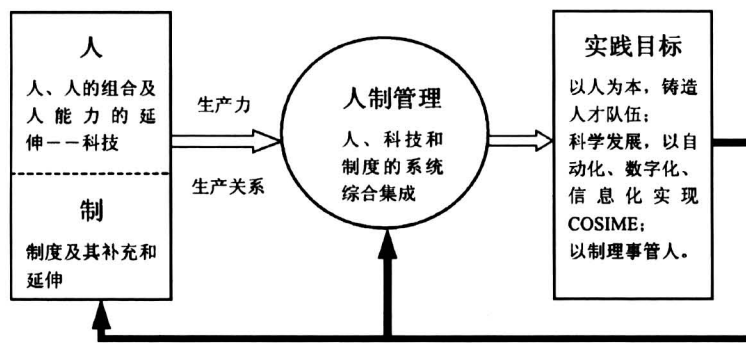


图2 人制管理理念基本框架体系

Fig.2 The basic framework of personnel systems management theory

品的 TQCS 有了大幅度的提高。

实践表明，成功的 COSIME 需要现代的管理理念、先进的经营管理模式包括并行工程、精益制造、基于仿真的采办、敏捷制造和结合我国国情提出的现代集成制造系统等。

3.2 基于项目管理理念的企业间并行工程方法与技术

复杂系统（产品）制造全生命周期各类活动的复杂性对并行工程的理念、方法、技术、工具及其实施应用提出一系列新的要求，笔者及其同事们近年来在学习、消化、吸收国外的新方法和新技术的基础上，在复杂产品并行工程系统体系结构、基于项目管理理念的企业间集成产品团队的组织、管理与过程重组、复杂产品虚拟样机工程方法与技术、基于分布仿真技术的复杂产品概念设计系统、复杂产品建模/仿真方法与技术、基于网格技术的复杂产品并行工程的支撑平台及等方面进行了大量的研究，取得重要进展，其中，基于项目管理理念的企业间并行工程的核心可归纳如下：

- 1) 以项目为核心，实施项目管理。采用项目管理的各种技术改善项目进度、成本、质量等；
- 2) 由来自价值链上联盟企业的相关人员组成的多学科集成产品团队（IPT）；
- 3) 普遍采用 BPR 技术、工具，根据项目内容、活动结构、国际性和复杂性进行流程再造，实现流程优化；
- 4) 多层次采用并行工程；
- 5) 对信息技术、CAX/DFX 工具依赖更强，强调系统无缝集成，在分布的集成环境中团队成员协同工作；
- 6) 生命周期采用多学科建模、仿真与优化技

术，特别重视早期概念设计。

3.3 复杂产品虚拟样机工程方法与技术^[5~9]

复杂产品虚拟样机技术是在各领域 CAx（如 CAD, CAM, CAE 等）/ DFx（如 DFA, DFM 等）技术基础上进一步融合先进建模/仿真技术、现代信息技术、先进设计制造技术和现代管理技术，将这些技术应用于复杂产品全生命周期、全系统、并对它们进行综合管理，强调虚拟化和从系统的层面来分析、模拟复杂产品的一种系统化的工程设计与管理方法。

复杂产品虚拟样机工程的开发与实施涉及许多关键技术与相关研究领域，如系统总体技术、复杂产品虚拟样机建模技术、复杂产品协同仿真技术、复杂产品虚拟样机管理技术、样机总体概念设计与总体性能评估技术、虚拟环境技术（包括环境仿真模型、环境效应的模拟和虚拟现实 VR 技术）、模型 VV&A（校验、验证和确认）技术和支撑平台/框架技术等（见图 3）。

3.4 基于分布仿真技术的复杂产品概念设计与性能评估系统

自 1983 年 SIMMNET (SIMulator NETworking) 计划实施以来，分布仿真技术得到了飞速的发展，并在应用中形成了一系列的分布交互仿真标准与协议，极大地促进了新一代仿真技术的发展及其在军事和民用上的应用。以美国为代表的世界发达国家，非常重视将仿真技术用于武器型号的研制、训练和作战等全寿命周期。通过建立各种高性能的仿真系统和复杂系统的虚拟样机，在前期规划阶段就重视其概念设计和总体性能指标的论证，并考虑后期的使用与整体性能的评估。

复杂产品虚拟样机总体概念设计与总体性能评

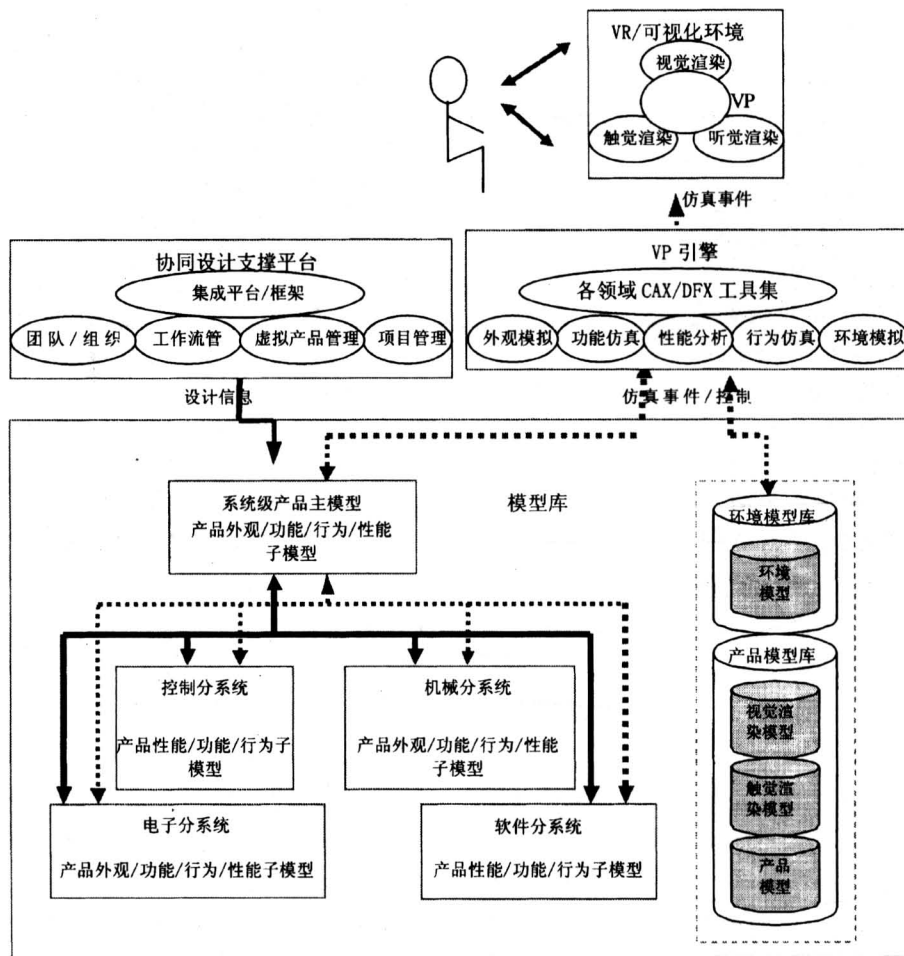


图3 复杂产品虚拟样机工程系统的体系结构

Fig.3 The architecture of virtual prototyping engineering system for complex product

估技术涉及综合仿真环境的开发实施技术、虚拟样机的性能分析与评估技术、以及与虚拟样机的中期设计、分析阶段的集成技术等。

笔者及其同事研制成功的综合仿真环境 SSE 系统（见图 4）就是基于先进分布交互仿真技术和虚拟现实技术的综合仿真系统^[10]，在逼真的综合仿真环境下，支持航天产品的系统总体研制和效能的评估。

3.5 复杂产品质量控制与管理系统^[11]

复杂产品制造企业具有管理上的多层次、地域与职能上的分布性与独立性，要实现产品全生命周期质量管理，其质量管理体系在组织框架、运行机制与功能构成上较之一般企业更为复杂，必须用系统工程的方法解决。因此，质量系统总体方案采用多层次、分布式的系统架构，包含集团级综合质量管理体系以及一系列企业级质量管理体系，并通过

广域集成架构加以整合，覆盖多级质量管理体系，提供跨企业、跨管理层次的广域信息集成、信息发布与协同工作支持，实现贯穿各级管理层次以及产品生命周期全过程的集成与优化（见图 5）。

采用的技术有 QFD（质量功能部署）；质量数据采集、统计/分析；成本管理；遵照 ISO9000 系列标准的全面质量体系及产品检测、质量控制、制造过程诊断与控制等。

3.6 基于产品全生命周期管理（PLM）及网格技术的复杂产品全生命周期活动集成制造支撑平台

一个支持复杂产品全生命周期中相关人员/组织、管理、技术等诸多要素集成优化的协同支撑环境是支持优质、高效实施 COSIME 的重要保证。随着网格技术的发展与应用，下一代互连网技术可以实现网上各种资源（如计算资源，存储资源，数

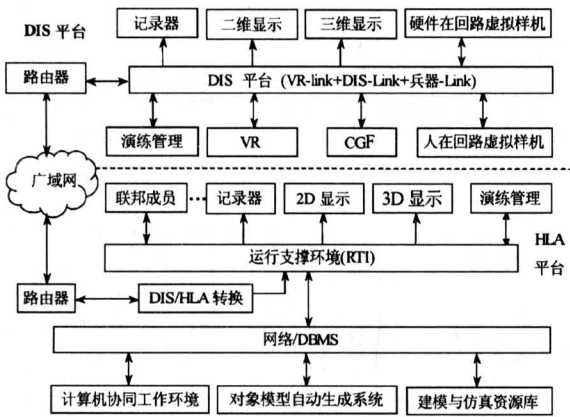


图 4 基于综合仿真环境的复杂虚拟样机性能分析与评估

Fig.4 The performance analysis and evaluation for complex virtual prototype based on the synthesized simulation environment

据资源，信息资源，知识资源等)的全面动态共享与协同应用，这将极大地推动支撑技术的发展与应用。

一个复杂系统（产品）集成制造支撑环境（见图 6）应具备如下技术特点：

- 1) 支持建模与仿真在复杂产品全生命周期、采办全过程中的协同应用；
- 2) 支持基于虚拟样机技术的复杂产品全生命周期虚拟采办；
- 3) 支持并行工程开发模式；
- 4) 支持以项目管理为核心的复杂产品采办全生命周期的技术、组织与过程的集成管理；
- 5) 支持各类仿真资源的管理、共享与重用，

支持 SOS (system of systems) 模式；

6) 支持跨地域、跨企业、跨组织、跨学科的协同与互操作；

7) 支持应用各类先进的中间件/集成平台/集成框架技术、协同技术、可视化技术、各类工具引擎技术、模型技术等；

8) 基于各类标准与规范，具有良好的开放性、安全性、可扩展性和通用性；

4 应用范例

中国航天科工集团公司是国有特大型独资企业，拥有 180 多个下属企事业单位。承揽了“高新工程”和国家金税、金卡、金盾等工程的研制生产任务。

在总结航天过去成功经验的基础上，从 2000 年开始，实施 COSIME。在体制、机制上进行大胆变革、创新，扩建了覆盖全国 22 个省市的集团内部网络，购置、升级了 PDM、ERP 系统、各类 CAX（机械、电子、软件、控制、微波、光学等）、DFA/DFM 工具软件，扩充和完善了集团公司管理、设计、试验、生产集成系统，在集团公司管理、产品设计、试验、生产全生命周期实现了数字化、虚拟化，将集团公司分散的内部单位聚合为高效运行的整体，全面提高集团公司的研制和生产能力，降低了运营成本 20%，缩短了产品开发周期 30%~50%，新产品试验成功率显著提高（1999 年 79%，2001 年以来一直保持在 92% 以上），圆满地完成了国家交给的任务，使集团公司向敏捷、柔性、虚拟化方向迈进了一步。

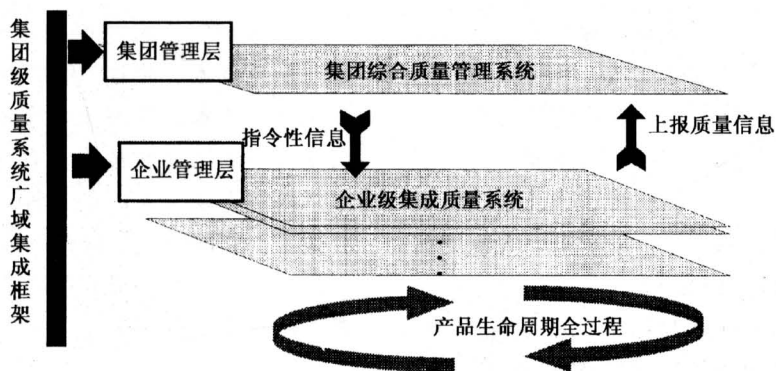


图 5 多层次集成质量系统概念模型

Fig.5 The concept model for multi-layered integration quality system

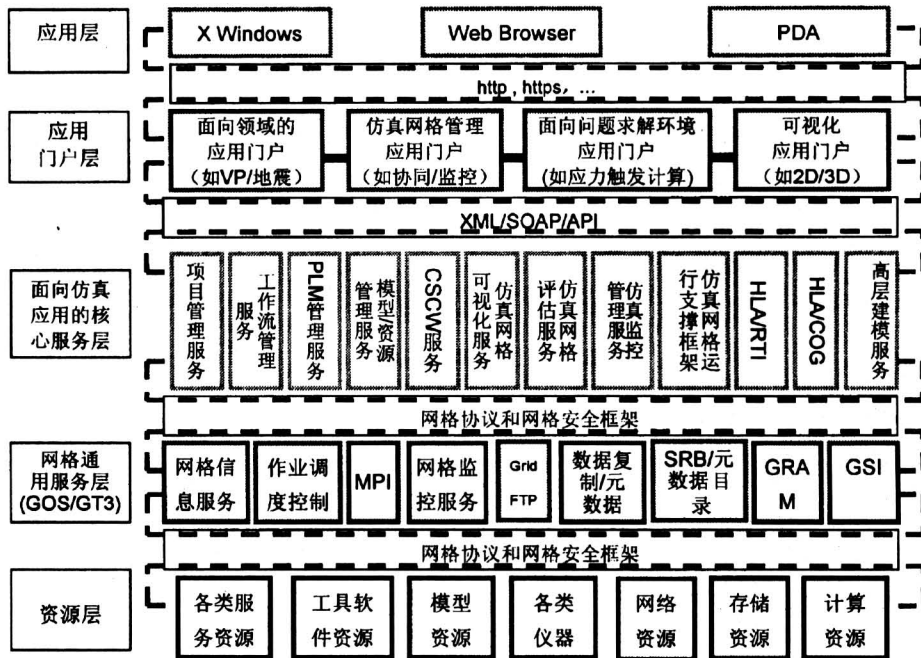


图 6 基于 PLM 和网格技术的复杂产品集成制造平台体系结构
Fig.6 PLM and Grid technologies based architecture of integrated manufacture platform for complex product

5 研究方向

“制造网格”技术被认为是极具发展前景的复杂产品设计制造技术与工具，它以应用领域需求为背景，综合应用复杂产品模型技术、先进设计制造技术、先进分布仿真技术/VR 技术，网格技术、管理技术、系统工程技术及其应用领域有关的专业技术，实现制造网格/联邦中各类资源（包括模型、计算、存储、数据、信息和知识、与应用相关的物理效应设备及仿真器等）安全地共享与重用、协同互操作、优化调度运行，从而对工程与非工程领域内已有或设想的复杂产品进行论证、研究、设计、加工、试验、运行、评估、维护和报废等全生命周期活动的一门多学科的综合性与重要工具。制造网格技术是军民两用技术，它将对当前建模仿真的应用模式、管理模式和支撑技术带来巨大的变革与创新，产生重大的社会和经济效益。

笔者及其同事们下一步将结合工程实际应用，深入研究复杂产品协同制造网格的相关关键技术，进一步完善、优化集成平台功能。重点研究：

- 1) 基于网格中间件的集成平台/框架技术；
- 2) 多学科虚拟样机协同设计优化的技术；

3) 多学科、异地协同、数字化、智能化、虚拟制造平台技术；

4) 基于知识库的全生命周期产品数据管理与企业资源的动态管理与优化平台技术；

5) 多项目、多指标的项目管理及 SCM/CRM/ERP/电子商务一体化管理平台技术；

6) 动态联盟内全生命周期的全面质量管理平台技术等。

6 结论

COSIME 技术是融合产品有关的专业领域技术、信息技术、建模/仿真技术、系统技术、工艺加工生产技术、管理技术等多学科技术为一体的一门发展中的综合性技术。它是 21 世纪先进制造技术学科的重要分支，是武器装备跨越发展的一项重要技术。它的研究、应用与发展不仅能增强企业新产品开发的能力，提升核心竞争力，同时必将推动先进制造技术及相关学科的发展。

致谢：笔者对所有参与复杂产品集成制造工程项目研究与开发的人员表示真诚感谢。

参考文献

- [1] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海. 复杂产品集成制造系统技术[J]. 航空制造技术, 2002, (12): 17~20
- [2] Foster I, Kesselman C, Nick J, et al. The physiology of the grid: an open grid services architecture for distributed systems integration [EB/OL]. <http://www.globus.org/research/papers/ogsa.pdf>. January, 2002
- [3] 夏国洪著. 人制管理[M]. 北京: 经济科学出版社, 2002. 14~19
- [4] 夏国洪, 齐二石, 霍艳芳, 等. 军工企业人制管理模式研究[J]. 计算机集成制造系统——CIMS, 2004, (4): 361~366
- [5] 李伯虎, 柴旭东. 复杂产品虚拟样机工程[J]. 计算机集成制造系统——CIMS, 2002, 8(9): 678~683
- [6] 李伯虎, 柴旭东. 航天CIMS研究、实践与发展[J]. 制造业自动化, 2001, 23(1): 1~10
- [7] Bo Hu Li, Xudong Chai, Guangleng Xiong, et al. Research and application on virtual prototyping engineering for complex product [A]. The Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference [C]. 2002: Session 4. 12~19
- [8] Bo Hu-Li, Xu Dong-Chai, Chun Lai-Quan, et al. Research on tools suit for collaborative virtual prototyping engineering [A]. Proc. of EUROSIM 2001 [C]. Editors: Arnold Heemink, Len Dekker, et al., Delft, the Netherlands, 2001; No.167. 1~7
- [9] 李伯虎, 柴旭东, 等. 复杂产品虚拟样机工程的研究与初步实践[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 336~341
- [10] 李伯虎, 等. 综合仿真系统研究[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 429~434
- [11] 王洪, 唐晓青. 面向质量设计的质量评估集成模型[J]. 计算机集成制造系统——CIMS, 2002, (2): 122~125

Research and Application of Technologies for Complex System (Product) Integrated Manufacturing Engineering

Xia Guohong¹, Li Bohu¹, Tang Xiaoqing², Zhu Wenhai¹, Chai Xudong¹

(1. *China Aerospace Science & Industry Corporation, Beijing 100037, China*;

2. *Beihang University, Beijing 100083, China*)

[Abstract] Based on the theories, methods, technologies and tools of contemporary integrated manufacturing, the Complex System (Product) Integrated Manufacturing Engineering (COSIME) is presented and researched, aiming to improve the T (Time to market), Q (Quality), C (Cost), S (Service) of the complex product development. The connotation, system framework and technology system of COSIME are given. Furthermore, the phased research results of six key technologies are introduced: (1) the management mode of the complex product integrated manufacturing system based on the theory of the "management of person with ability and institution" and the advanced manufacture patterns; (2) the concurrent engineering methods and techniques for the enterprises dispersed at different sites based on the theory of the project management; (3) the means and technologies of the virtual prototyping engineering for complex product; (4) the concept design and performance evaluation system for complex product based on the advanced distributed interactive simulation technology; (5) the quality control and management system for complex product; (6) the two integrated manufacturing infrastructures for the all lifecycle activities of complex product based on PLM and the grid computing technologies.

[Key words] complex system integration manufacturing engineering; virtual prototyping engineering for complex product; grid computing; management of person with ability and institution