

# 产品开发中可生产性分析 技术综述

北京航空航天大学 郑联语 魏 丽



郑联语:

2001年北京航空航天大学机械制造及自动化专业毕业,工学博士。先后在香港城市大学和英国巴斯大学留学,从事合作研究,现为北航机械学院副教授。多年来一直从事数字化工艺准备、计算机集成制造及数字企业技术与工程等科研、教学工作,先后主持或参与多项总装预研、国防基金、国家863、国防基础科研及企业应用项目,发表论文近40篇。曾获部级科技进步三等奖和北京市青年优秀论文奖

面对不可预测、持续发展、快速多变的市场需求,传统的串行产品开发模式已经不能适应要求,因为许多设计问题往往要到设计的最后阶段,甚至到实际生产制造过程中才会暴露出来,这样,回过头来再去修改设计势必造成成本的上升、上市时间的延长和质量的不稳定。新技术和新制造

在产品开发过程中进行可生产性分析是一种降低产品成本、缩短上市时间、提高产品质量的有效方式,也是产品开发中的重要指标。在航空航天等复杂军工产品的研制中,加强设计及研制阶段的可生产性分析,实施可生产性的保障系统是一项重要的系统性工作,必须给予足够的重视

理念的出现改变了传统的产品开发模式。现代产品开发(研制)包括以下几种模式:集成产品开发、并行产品开发、协同产品开发和虚拟产品开发等。为了满足T(Time)、Q(Quality)、C(Cost)、S(Service)要求在产品开发中应充分考虑从用户需求到生产制造、使用、维修和回收的全生命周期中的技术条件、经济效益和社会效益。在产品开发过程中需要考虑可制造性(Manufacturability)、可装配性(Assemblability)、可检测性(Testability)、可生产性(Producibility)、可靠性(Reliability)、可维修性(Maintainability)和可回收性(Recyclability)等因素,而且要尽量在产品开发早期进行。

可生产性比可制造性、可装配性和可检测性的范围更广。可制造性、可装配性和可检测性主要是从技术的角度考虑设备及工艺装备的工艺能

力,看一个产品能否和是否容易制造、装配出来,并且可以检测。而可生产性除了可制造性、可装配性和可检测性这一层含义外,还包括产品在按要求的批量和上市时间生产时,企业在设备生产能力和人员能力上能否达到要求。因此,可生产性考虑的是整个生产制造过程中的问题,它包括可制造性、可装配性和可检测性<sup>[1]</sup>。

在设计阶段考虑生产系统的工艺能力、生产能力、生产效率和质量,以及人员能力等生产制造中的问题,是降低产品成本、缩短上市时间、提高产品质量所必须的和非常有效的技术手段<sup>[1]</sup>。特别是对于武器装备这种复杂产品的设计开发过程来说,可生产性分析和论证是装备全生命周期中各个决策里程碑或节点处的重大系统工程问题。在设计产品方案时,具备能够制造出满足任务要求的各种硬件产品的能力与具备能够正确确定并

表1 DFM、DFA、DFP的基本思想

名称	基本思想	主要目标	侧重点
DFM	在产品的设计时不但要考虑功能和性能要求,而且要同时考虑制造的可能性、高效性和经济性,即产品的可制造性	在保证功能和性能的前提下使制造成本最低	工艺能力、成本
DFA	在产品的设计阶段考虑并解决装配过程中可能存在的配合、定位、装配方向和装配角等问题,以确保零部件快速、高效、低成本地进行装配	使产品易于装配,即装配顺序达到优化和装配的时间消耗为最少;使产品具有最少的零部件数量,优化产品结构,提高产品质量	装配时间、质量
DFP	分析一个制造系统是否具有足够的达到预期产量的生产能力,并提出估算制造周期的方法	评估制造系统可以生产多少零件和每个工序需要多少时间,即评估生产能力和估算制造周期	生产能力、上市时间

设计出这些硬件的能力几乎同样重要。因此,可生产性分析就成为复杂产品系统工程分析中不可分割的一部分,包括可制造性/可装配性/可检测(试)性分析、生产系统对产品效能的影响分析、权衡分析、制造风险分析、全寿命费用分析以及对各种设备、工装、人员和加工工序等的考虑,必须尽早判定关键的可生产性要求,把它们纳入设计过程。

### 可生产性的定义

“Producibility”中文意思是“可生产性”,有的文献译成“生产性”,我国习惯上称为“工艺性”,本文沿用美国国防部的术语——“可生产性”一词<sup>[2]</sup>。关于可生产性的定义还没有统一规定,以下是几种关于可生产性的定义:

(1) 美国海军的BMP(Best Manufacturing Practices, BMP)计划通过识别、研究、应用最优的加工实践、方法和过程,使企业高效运转。此计划专门就可生产性问题进行了研究和总结,1999年发表的技术文档“Producibility System Guidelines—The Five Steps To Success”,其中对可生产性的定义是:通过质量、时间和成本等指标衡量产品被制造出来的相对容易程度<sup>[1]</sup>。

(2) 美国国防部组织编制的军标手册——《产品设计生产性指南》对可生产性的定义是:可生产性系一项设计和生产规划的若干特征或要素的组合,它能使设计所规定的产品,按

规定的产量,经过一系列权衡之后,以最少的费用,最短的时间制造出来,并符合必须的质量和性能要求<sup>[2]</sup>。

(3) Priest的专著《Product development and design for manufacturing: a collaborative approach to producibility and reliability》中对可生产性的定义是:可生产性是一个规范,利用现有的制造能力满足设计需求<sup>[3]</sup>。

(4) 美国防务系统管理学院在1989年曾对可生产性给出这样的定义:给定制造技术、可用的器材和劳力及总费用的情况下,重复生产产品的能力程度<sup>[4]</sup>。

(5) 从以上可生产性定义可见,可生产性(分析)与众多文献中有关面向制造的设计(Design for Manufacturing, DFM)、面向装配的设计(Design for Assembly, DFA)、面向生产的设计(Design for Produc-

tion, DFP)以及其他DFX等概念的目标是一致的,只是它们考虑生产制造的侧重点不同(见表1)。可生产性分析把这些概念、有关的技术和工具统一在一起<sup>[3]</sup>,是一个范围更广、更综合的概念。

尽管以上可生产性的定义各不相同,但是本质相同,即可生产性分析是一种产品设计哲理,目标是以一种最快、最有效的方式开发高质量、低成本、低风险的产品<sup>[3, 5-6]</sup>。

### 可生产性分析的任务

可生产性分析必须集成到产品开发过程中,而且要把可生产性作为一个很重要的指标来改进和支持产品开发。产品开发过程一般分成4个阶段:需求分析、概念设计、详细设计和产品试制,如图1所示<sup>[1-6]</sup>。可生产性分析是一个连续的过程,在需求分析时开始,直到生产初期才结束。图1中

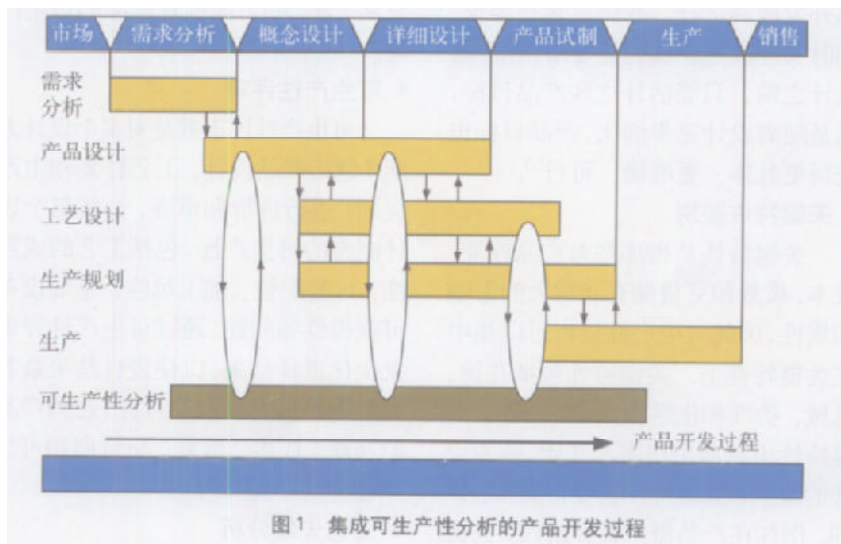


图1 集成可生产性分析的产品开发过程

的环形箭头表示可生产性分析不是一种简单的、一次性的分析,而是需要多次反复、不断地分析决策才能满足设计要求并达到各方面的指标。

在现代产品开发中,可生产性分析又是一个信息密集型的分析过程,需要必要的信息支持环境,而且只有集成产品开发团队(IPT)才能胜任此项复杂工作。此外,要在产品开发中进行可生产性分析,相应的管理措施、人员培训等也是必须的。可生产性分析的主要任务如图2所示<sup>[1-6]</sup>。下面对可生产性分析的各项任务的内容和分析工具作简要介绍。

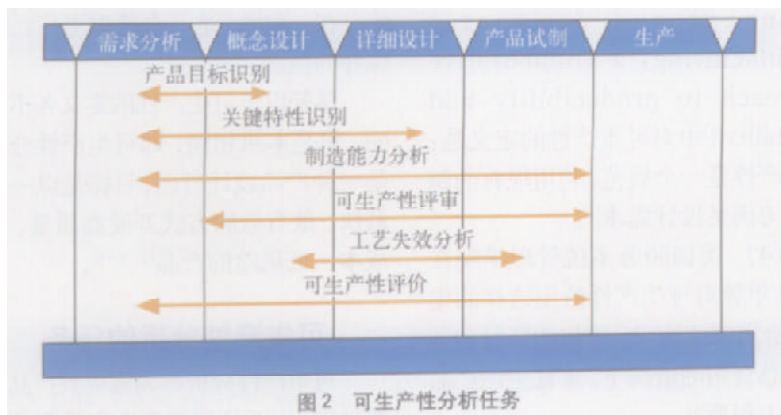


图2 可生产性分析任务

### 1 产品目标识别

产品目标包括功能、成本、质量和交货期等。识别产品目标需要与客户一起根据企业和供应商的能力确定可以达到的产品目标。只有确定适当的和可实现的产品目标,才能指导产品开发顺利进行,既满足客户要求,同时又能满足企业利益要求。在产品的设计之前,只能估计这些产品目标,但是随着设计逐步细化,产品目标也变得更具体、更准确、可行<sup>[1]</sup>。

### 2 关键特性鉴别

关键特性是指那些对产品性能、成本、质量和交货期有非常大的影响的属性,因此可生产性分析可以集中在关键特性上。关键特性包括几何、机械、物理和化学特性4个方面。关键特性识别从用户需求开始,随着设计的深入,关键特性也变得具体、详细。例如在产品概念设计阶段,关键

特性是材料、产品要求、产品特征等,具体的公差、加工方法、资源等需要在详细设计阶段才能确定<sup>[1]</sup>。

### 3 制造能力分析

制造能力分析是可生产性分析的关键,因为它是多个设计方案评审的基础,是各种设计方案决策的依据。它不仅要分析企业现有的能力,也要预测将来的能力,还要分析主要供应商的当前和将来的能力<sup>[1-6]</sup>。制造能力包括两个方面:

(1)工艺能力:是从设备、工艺方法的技术性能的角度,衡量一个产品是否能够加工出来,即保证产品质

量的能力。它从“质”的方面衡量产品的可生产性。

(2)生产能力:主要指产品在需要按要求的批量和制造周期生产时,企业在设备生产能力、人员能力、以及资源的可获得性上能否达到要求。它从“量”的方面衡量产品的可生产性。

### 4 可生产性评审

可生产性评审就是对多个设计方案(包括产品设计、工艺计划和生产规划)进行评价和审查,分析每个设计概念的可生产性,包括工艺的成熟性、可装配性、加工风险、重要设备可获得性等问题。通过可生产性评审来优化设计结果,以使设计结果最有效地满足所有的产品目标,达到产品的功能、成本、质量、交货期和可生产性等的平衡<sup>[1-2]</sup>。

### 5 工艺失效分析

可生产性评审从正面分析能不能生产此产品,而工艺失效分析则从生产中出现问题出发,从反向分析产品设计和工艺设计的可行性。工艺失效分析支持产品设计与工艺设计的逆向思维,文献<sup>[1]</sup>、<sup>[3]</sup>强调了这种分析方法的重要性。

失效模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)是一种可以事前识别、分析最可能发生的生产与使用过程中的不良情况或故障,以便产品开发时采取预防对策,从而保证产品质量的方法<sup>[7]</sup>。FMEA一般分为3类:系统失效模式与影响分析(System FMEA, SFMEA)、设计失效模式与影响分析(Design FMEA, DFMEA)和工艺失效模式与影响分析(Process FMEA, PFMEA, 这里简称工艺失效分析),分别应用于产品开发中产品规划、产品设计及工艺设计阶段<sup>[7]</sup>。工艺失效分析伴随着整个工艺设计过程,它不仅有助于优化工艺方案,也有助于改进产品设计方案。

### 6 可生产性评价

只有通过可生产性评价,才能反映出产品是否能和是否容易在企业的制造能力下被生产出来。可生产性的评价伴随着整个可生产性分析过程,而且随时可以进行,不只是在产品设计方案确定以后。可生产性评价分成3个层次<sup>[1-3, 8-10]</sup>:

(1)工艺过程评价:指了解工艺能力并控制工艺波动来保证高质量产品。工艺波动会导致产品的不稳定,因此有效的工艺过程评价、数据分析和工艺调整可以保证工艺可控制、工艺波动在设计允许的范围內。

(2)产品评价:指评价产品是否满足客户要求,如质量、成本和交货期等,同时又满足企业内部的目标;如尽量减少所有产品的开发成本,增加利润空间。

(3)可生产性体系评价:指在整个企业范围内,针对每个研制(新开

表2 可生产性分析的主要技术工具

工具 / 技术 (表示在此任务中采用了此工具、技术)	可生产性分析阶段和任务																		
	基础设施					工艺能力		概念设计				详细设计		可生产性评价					
	实行责任管理	组织集成产品开发团队	实行风险管理	结合可生产性的产品策略	使用可生产性设计规范	实行最优方法哲学	了解目前的制造能力	预测将来的制造能力	识别产品目标	识别关键特性	多方案比较评定	制定加工计划	执行复杂性分析	可生产性评审	防差错设计	优化制造	过程评价	产品评价	可生产性体系评价
基准比较(Benchmarking)																			
成本工具																			
数据库管理系统																			
决策支持工具																			
D F M A																			
试验设计(DOE)																			
设计失效模式与影响分析																			
工艺失效模式与影响分析																			
集成产品过程开发(IPPD)																			
集成产品开发团队(IPT)																			
基于知识的系统																			
制造计划工具																			
制造仿真																			
建模与仿真																			
可生产性评价表(PAW)																			
原型技术																			
质量功能配置(QFD)																			
快速原型技术																			
风险管理工具																			
根源分析(RCA)																			
6西格玛																			
统计过程控制(SPC)																			
统计质量控制(SQC)																			
公差分析																			

发或改型)产品所进行的可生产性分析工作成效的综合评价。它需要在收集已有多个型号的产品、工艺、生产数据的基础上,采用基准评定法对比世界级或行业领先企业的可生产性保证水平和效益,对可生产性分析的组织、人员、执行制度、所采取的技术规范和工具、数据库和知识库等多方面的综合测定。其目标是为了连续改进和完善企业的可生产性保证体系,就像企业质量保证体系一样。可

生产性体系评价可以帮助识别体系的哪些部分或环节需要改进、加强,以便提高后续开发的产品的可生产性。

### 可生产性分析的技术工具

文献[1]对众多企业成功的可生产性分析项目进行了调研分析,并认为一个成功的可生产性系统的建立和维持需要5个基本步骤或方面,分别是建立可生产性分析的基础设施、确定制造能力、概念设计阶段实施可生产

性分析、详细设计阶段实施可生产性分析和可生产性评估。各阶段所用的可生产性分析技术工具见表2<sup>[1]</sup>。

### 可生产性分析技术的发展历史与现状

第二次世界大战时,很多装备系统由于在设计时未考虑产品的可生产性问题,使组织社会大生产时产生困难,造成制造周期延长、成本提高或是材料供应困难。因此,工业发达国

家开始进行可生产性研究,并编制了专门的手册、指南等。目前,在军工行业特别是航空航天领域以及复杂产品设计时都把可生产性作为产品研制的重要指标。

(1) 1984年美国国防部组织编制了《产品设计生产性指南》的军标手册,该指南中指出可生产性考虑的主要工作是在论证和设计阶段进行的,在这一阶段考虑可生产性所取得的效益也最显著。该手册对可生产性分析工作的组织、一般步骤、共性的生产性考虑、各种制造工艺(机加、钣金、焊接、装配、电装、检测等)下常见的可生产性问题等进行了全面的归纳总结<sup>[2]</sup>。

(2) 1984年至1985年,美国国家科学院的国家研究委员会(NRC)应美国海军的要求,组织力量就如何提高美国造船工业的生产效率开展了调查研究。随后,海军海上系统司令部(NAVSEA)组织海军、造船厂等方面有关人员组成可生产性研究组,以期达到使舰船可生产性融合到NAVSEA的舰船设计过程中的目标。研究组提出了把可生产性能融入舰船设计与建造过程中的一个系统化的决策过程框架<sup>[4]</sup>。

(3) 自1985年开始,由美国海军牵头实施了BMP(最佳制造实践)计划,该计划有很多企业、研究院和学校参与,例如波音、雷神、TRW、摩托罗拉、NIST、马里兰大学等。此计划专门就可生产性问题进行了研究和总结,并发表了两个重要技术文档,即1992年的“Producibility Measurement for DoD Contracts”<sup>[8]</sup>和1993年的“Producibility Measurement Guidelines/Methodologies NAVSOP-3679”<sup>[9]</sup>。这两个技术文档详细介绍了可生产性的技术和方法,并且帮助了很多公司应用可生产性分析工具,但是文档中没有强调应该把可生产性分析集成到整个产品开发过程中。因此,1997年BMP计划提交了

早期可生产性指导规范,解释了如何建立和维护一个成功的可生产性系统,并于1999年发布了技术文档“Producibility System Guidelines—The Five Steps To Success”<sup>[11]</sup>。笔者认为,该计划的成果对企业,特别是国防行业的设计院所和研制生产企业如何全面系统地开展可生产性分析工作,保障武器的可生产性具有重要的指导意义和参考价值。

(4) FIPER(Federated Intelligent Product Environment)项目是NIST先进技术项目(Advanced Technology Program, ATP)的一部分。FIPER的目的是通过集成不同的分析任务(例如成本分析、试验设计、优化等),在短时间获得高性能、高质量、低成本的产品设计。FIPER提供的可生产性服务包括:干涉分析、公差分析、工艺能力分析、 workflow分析、装配分析、过程模拟和可使用性分析,目前这些分析都集中在产品的详细设计阶段<sup>[10]</sup>。

(5) Prist的著作《Product development and design for manufacturing: a collaborative approach to producibility and reliability》也强调了可生产性分析是产品设计过程中的一个不可分割的组成部分。此专著主要回顾了工业中已被证明了的可以设计出具有可生产性和可靠性产品的方法和技术,包括技术风险管理、可生产性评价、DFMA工具、田口方法、6西格玛、快速原型法、自诊断法及自维持法等<sup>[3]</sup>。

(6) 国内关于产品开发中的可生产性研究不够全面,朱嘉龙的文章中强调了可生产性是集成产品开发的一个重要原理,要贯彻于设计的全过程,特别是在设计的初始阶段<sup>[4]</sup>。张德智等一直进行可生产性设计和评价指标系统的建立和分析,并提出了详细的引信评价指标树<sup>[11]</sup>。目前,大部分学者都集中在DFM、DFA的研究

上。上述国内研究主要还是学术性成果,要在产品开发(研制)中产生实际效果,还需要结合产品研制在理论和实践上进一步深入开展工作,从而形成完整的可生产性分析与保障技术体系。

## 可生产性分析工程 在美国国防工业中的实施实例

美国海军一直非常重视可生产性的研究,并已在“海狼”级核潜艇和“LPD17”两栖船坞登陆舰等军船的设计中,以及双壳体油船和一些小型船舶的设计中融入可生产性分析,并取得成效<sup>[4, 12-13]</sup>。目前,美国海军正在进行的DD(X)计划是DD-21计划经过调整并更名而来的,正在研发的DD(X)是美国海军未来驱逐舰。有关此计划的报告中分别列举了复合材料甲板室、外围垂直发射系统(PVLS)、透波倾斜船体(WPTH)三大部件的可生产性分析实例<sup>[14]</sup>。

波音公司作为世界上最大的航空航天公司和美国航空航天局(NASA)最大的承包商,从90年代开始就利用多功能小组来评价和提高零件设计的可生产性<sup>[6]</sup>。F/A-22的产品改进项目(Product Improvement Program, PIP)中把改进飞机的可生产性作为一个非常重要的内容,通过可生产性改进降低了生产成本和生产时间<sup>[15]</sup>。后来的联合攻击战斗机JSF更采用3D建模与仿真技术、虚拟现实技术、激光制导工具、通用设计数据库及集成的计算机辅助评价系统等工具来提高可生产性,从而使JSF的废品率达到YF-22的80%,成本也比YF-22减少了75%,装配时间大大缩短<sup>[16]</sup>。此后,波音已经把JSF的技术和方法扩展到其他项目,例如无人战斗航空器、F/A-18E/F“超级大黄蜂”及商业飞机波音777。2003年,波音公司向美海军交付了第一架经过改进的F/A-18E/F“超级大黄蜂”战斗机,这次改进的内容是对F/

A-18E/F的前机身重新进行设计,新机身自概念设计到详细设计、生产都考虑了可生产性因素。新的前机身较老机身的零件减少40%、紧固件数量减少51%,制造时间缩短31%,因而大大节省了成本,而且使用寿命是设计要求的3倍<sup>[17]</sup>。

除战斗机外,可生产性分析在其他武器系统中也发挥了重要作用。1996年波音交付给美国空军的第一批AGM-86C空射巡航导弹(Conventional Air Launched Cruise Missile, CALCM)经过可生产性改进,比第0批CALCM的精确性和弹头有效性提高了1倍<sup>[18]</sup>。

### 产品开发早期可生产性分析的关键技术

以上应用实例已经说明,可生产性是产品开发中非常重要的指标,在产品开发过程中进行可生产性分析是一种降低产品成本、缩短上市时间、提高产品质量非常有效的方式。各种研究都强调了要把可生产性分析集成到整个产品开发过程,特别是在产品开发早期,但是目前关于可生产性的研究和应用都只集中在产品的详细设计阶段,也就是针对DFM、DFA、工艺能力的研究。图3说明了产品开发早期可生产性分析的重要性<sup>[1]</sup>。可生产性活动轮廓表明,随着产品的逐步形成,虽然可生产性活动越来越多,但是影响可生产性的能力却逐步下降,也就是说早期的可生产性分析对产品的可生产性最有影响力,因此可生产性研究的重点应该集中在产品开发早期。

在概念设计阶段,只能提供产品的总体结构、外形尺寸和关键特征等粗略信息。多数以特征信息为基础的分析、评价工具都不能使用,因此,

此阶段可生产性分析难度比较大。此阶段可生产性分析的特点是<sup>[1-6]</sup>:

(1)除了产品需求信息外,可以提供的信息比较少,而且不完整,不确定性明显;

(2)可生产性分析涉及到多个功能领域,需要多领域的专家协同决策;

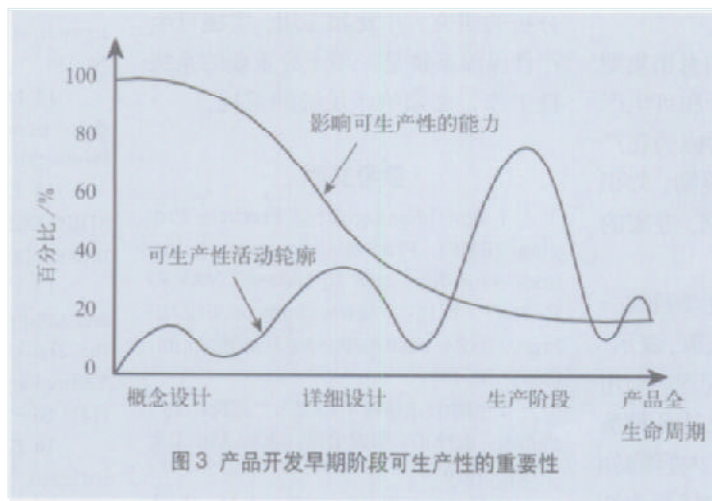
(3)需要反复、不断地对设计结果进行分析,为决策者提供参考;

(4)产品开发早期存在着大量的不确定因素,因此降低风险是可生产性分析的核心内容;

(5)可以利用的规则、知识比较少,只能利用历史数据、专家经验等;

(6)详细设计阶段的可生产性分析工具比较成熟,而产品开发早期的可生产性分析工具却很有限;

(7)支持早期可生产性分析的数据和知识比较匮乏,因此应该加强此阶段的数据和知识的收集、分析和应用。



由于早期可生产性分析具有以上特点,除了职能组织、制度健全等管理问题外,产品开发早期进行可生产性分析还存在如下问题。

#### 1 产品信息模型

产品开发中,为了方便各功能小组间的数据交换,需要统一的信息模型。产品开发早期可生产性分析的输入信息,有些是定性的描述,或者是一个范围,但是一般的产品信息模型

都集中在特征描述上,也就是对最终设计结果的描述,无法表示设计的中间结果,即不同成熟度下的产品信息。因此建立一个可以描述中间状态的信息模型,是早期可生产性分析中非常重要的问题。

#### 2 制造能力分析

制造能力分析是多个设计方案评审的基础,也是各种设计决策的依据,特别是在产品开发早期,只有准确了解企业的生产能力和工艺能力才能准确决策,例如,哪些零部件需要从市场购买、转包或者协作,以及是否需要引进新技术等,这些决策都要尽早决定,才能缩短交货期。

目前关于制造能力的研究都局限在具体加工方法、工艺能力的研究上。在产品开发早期,制造能力分析的关键在于如何根据有限的输入信息来分析企业是否具有足够的制造能力。通常,制造能力信息通过有效的过程评价和过程控制来获得,要针对

不同的工艺、产品、企业制定不同的制造能力信息表示规则,以及制造能力的范围、限制等。制造能力信息是在生产阶段总结的,如何与早期设计阶段的信息进行互动还需要进一步研究。

#### 3 可生产性评价

可生产性评价问题包括确定评价指标和评价方法。可生产性评价的指标一般包括:成本,时间,质量和风险。其中质量一项,在产品开发后期和生产与检验阶段一般采用缺陷数、废品率、工序能力指数等指标;在产品开发早期则使用顾客满意度、竞争能力等指标。由于质量评价指标不统一,存在着前后质量不可比的问题。

可生产性评价方法,一般用于详细设计阶段的比较多,而且准确度都比较高。产品开发早期的评价方法都

存在着一定的缺陷,例如回归分析法、类推法和人工神经网络法等,都有一定的适用范围,而且这些方法也要依赖于对历史数据的收集、整理和分析。因此,如何在产品开发早期准确评价各项指标还是一个亟需解决的问题。

#### 4 制造风险分析

产品开发中的种种不确定性,导致了风险的存在。制造风险(包括进度风险、成本风险、技术风险)分析也是可生产性分析非常重要的内容。

产品开发是一个不确定性逐渐减少的过程,随着产品设计逐渐细化,产品的风险源随时间延续和决策问题的减少呈现递减规律。因此产品开发早期必须进行制造风险分析,提高产品的可生产性。

目前关于制造风险的研究只限于对具体的加工、装配工艺的风险分析,而对整个产品设计方案和工艺方案的风险分析还比较困难。

#### 5 知识工程应用

可生产性分析是一个信息密集型的分析过程,制造能力分析和可生产性评价都需要大量的数据。因为在产品开发早期,可以利用的规则、知识比较少,只能利用历史数据、专家的经验等。

知识工程作为人工智能学科的一个分支,主要研究知识的获取、表示、传播,以及知识的组织、管理、利用等,其特点是:处理的对象从各种类型的数据转变为具有丰富内容的知识;处理的形态从数据结构转变为知识的表示;处理的过程从算法指导转变为演绎与推理指导;处理的结果从静态的文本格式转变为动态的多模式链接。

因此,在产品开发早期的可生产性分析中,可以利用知识工程的方法对历史数据和专家的经验进行处理,并成为可以被利用的知识。如何有效地利用知识工程的方法,也是产品开发早期的可生产性分析的关键。

### 结束语

国外军工行业特别是航空航天和船舶等复杂工程产品的研制中都非常重视可生产性分析,并在很多实际应用中取得显著效果。如前所述,早期的可生产性分析对产品的可生产性最有影响力,但是目前关于可生产性的研究和应用都只集中在对DFM、DFA、工艺能力的研究上,因此可生产性研究和应用的重点应该向产品开发早期阶段推进。由于产品开发早期可以提供的设计信息比较少,而且不完整,不确定性明显,导致此阶段的可生产性分析难度比较大,因此还存在许多问题需要进一步研究,其中不同成熟度下的产品信息模型、制造能力分析、可生产性综合评价方法、制造风险分析、知识工程应用是今后应该重视的几个关键技术问题。

在航空航天等复杂军工产品研制中,加强设计及研制阶段的可生产性分析的研究、开发和应用,实施可生产性保障系统是一项十分重要的系统性工作,必须给予足够的重视。

### 参考文献

- 1 Best Manufacturing Practices Program (BMP). Producibility system guidelines—the five steps to success, NAVSO P-3687. <http://www.bmpcoe.org/library/books/navso%20p-3687/index.html>, [2003-10-23]
- 2 国防技术情报中心(美). 产品设计生产性指南. 张纯正, 张国梁译. 北京:航空工业出版社, 1990
- 3 Priest J W, Sánchez J M. Product development and design for manufacturing: a collaborative approach to producibility and reliability. New York: Marcel Dekker, 2001
- 4 朱嘉龙. 船舶设计中生产性问题的探讨. 造船技术, 2001(3): 1~4
- 5 Mathieu L, Marguet B. Integrated design method to improve producibility based on product key characteristics and assembly sequences. Annals of the CIRP, 2001, 50(1): 85~88
- 6 Subramaniam B L, Ulrich K T.

Producibility analysis using metrics based on physical process models. Research in Engineering Design, 1998, 10(4): 210~225

7 魏丽, 郑联语. 支持产品开发的工艺失效模式与影响分析工具. 计算机集成制造, 2003, 8(1): 74-79

8 Best Manufacturing Practices Program (BMP). Producibility measurement for DoD contracts. <http://www.bmpcoe.org/library/books/producibility/index.html>, [2003-10-23]

9 Best Manufacturing Practices Program (BMP). Producibility measurement guidelines/methodologies, NAVSO P-3679. <http://www.bmpcoe.org/library/books/navso%20p-3679/index.html>, [2003-10-23]

10 Beiter K A, Ishii K. Integrating producibility and product performance tools within a web-service environment. Proceedings of the 2003 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2003

11 张德智, 张锡安, 王健等. 引信可生产性设计评价指标体系的建立及分析. 探测与控制学报, 1999, 21(2): 3~8

12 Daidola J C, Parente J, Robinson W H. Producibility of double hull tankers. Journal of Ship Production, 1996, 12(1): 20~38

13 Leake J M, Calkins D E. Small ship producibility. Journal of Ship Production, 1996, 12(1): 126~140

14 Dilisio Scott. DD(X) Program SHIPTECH 2003. [www.nsrp.org/st2003/presentations/dilisio.pdf](http://www.nsrp.org/st2003/presentations/dilisio.pdf), [2004-03-05]

15 F/A-22 Raptor Team. Quality and producibility ensure air dominance for the 21st century. Aviation Week & Space Technology Market Supplement, 2002, 157(14): S1~S6

16 Boeing. Boeing JSF showing significant producibility improvements, stonecipher says. [http://www.boeing.com/news/releases/2000/news\\_release\\_0006160.htm](http://www.boeing.com/news/releases/2000/news_release_0006160.htm), [2004-3-5]

17 Boeing. Boeing delivers super hornets with lower life-cycle costs and redesigned forward fuselage. [http://www.boeing.com/news/releases/2003/q3/nr\\_030905m.html](http://www.boeing.com/news/releases/2003/q3/nr_030905m.html), [2004-03-05]

18 Boeing. CALCM scores precision strike in air force flight demonstration. <http://www.boeing.com/news/releases/1996/news.release.961219c.html>, [2004-03-05]

(责编 根山)