

8-7-2020

Process Model of Complex R & D Project Based on Design Structure Matrix

Baosen Yang

Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

Kejun Zheng

Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

Lai Ling

Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Process Model of Complex R & D Project Based on Design Structure Matrix

Abstract

Abstract: Since complex product R&D project is characteristic with more stochastic factors, a process model was established for complex product R&D project. *The model made a comprehensive description of complex information dependencies between activities, timing between the upstream and downstream, feedback iterative relationship, parallel overlapping relationship, constraints and process parameters (time parameters, cost parameters, rework probability, rework impact, learning curve, etc.) by multi-view approach.* Some case studies were proposed in detail to illustrate the modeling process. This provides new ways and means of the simulation for the complex product R&D project risk analysis.

Keywords

complex product, process model, design structure matrix, risk analysis

Recommended Citation

Yang Baosen, Zheng Kejun, Lai Ling. Process Model of Complex R & D Project Based on Design Structure Matrix[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2187-2193.

基于设计结构矩阵的复杂研发项目过程模型

杨宝森, 郑柯君, 来玲

(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: 对复杂产品研发过程进行了分析, 基于复杂产品研发过程随机因素多的特点, 建立了复杂产品研发项目基于设计结构矩阵(DSM)的过程模型; 该模型采用多维 DSM 方式表示复杂产品研发项目活动之间的信息依赖关系、返工概率及返工影响、学习曲线改进率、并行重叠程度、约束情况等, 通过案例说明了建模过程, 为进一步开发复杂产品研发项目风险分析仿真系统提供了必要的前提条件。

关键词: 复杂产品; 过程模型; 设计结构矩阵; 风险分析

中图分类号: TP391.9; N945.13 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 09-2187-07

Process Model of Complex R & D Project Based on Design Structure Matrix

Yang Baosen, Zheng Kejun, Lai Ling

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Since complex product R&D project is characteristic with more stochastic factors, a process model was established for complex product R&D project. *The model made a comprehensive description of complex information dependencies between activities, timing between the upstream and downstream, feedback iterative relationship, parallel overlapping relationship, constraints and process parameters (time parameters, cost parameters, rework probability, rework impact, learning curve, etc.) by multi-view approach.* Some case studies were proposed in detail to illustrate the modeling process. This provides new ways and means of the simulation for the complex product R&D project risk analysis.

Keywords: complex product; process model; design structure matrix; risk analysis

引言

“复杂产品(Complex Product, CP)”是指“客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、制造流程复杂、试验维护复杂、项目管理复杂、工作环境复杂的一类产品”, 如航天器、飞机、汽车、船舶、复杂机电产品等均属于复杂产品^[1], 此外一些大型 IT 软硬件产品也具有复杂产品的特征。复杂产品研发项目的管理涉及很多学科, 包括机械工

程、工业工程、数学和系统科学、管理科学等, 其复杂性不仅来自技术上的复杂性, 更来自管理的复杂性, 这种复杂性表现在研发过程中会出现不同领域学科的相互交叉和相互作用。

产品研发过程研究的首要问题就是过程建模^[2]。目前国内外在过程建模的研究方面已取得了不少有效的研究成果, 总结起来, 过程建模方法可以分为两类: 图形法和数学法。图形法包括: 有向图^[3], IDEF^[4-6], Petri-Net^[7-8], PERT^[9], CPM^[10]以及工作流建模^[11-12]等。数学法包括公理化设计模型^[13]和设计结构矩阵模型(DSM)^[14]等。DSM 是一种对项目各活动之间关联信息进行分析处理的有效方法, 虽然关于 DSM 研究已经有二十多年了,



收稿日期: 2015-05-12 修回日期: 2015-07-10;
基金项目: 国家自然科学基金(71171146);
作者简介: 杨宝森(1965-), 男, 河北枣强, 博士, 副教授, 研究方向为信息系统项目实施与管理; 郑柯君(1964-), 女, 河北南皮, 学士, 研究方向为工商管理及项目管理; 来玲(1966-), 女, 河北香河, 硕士, 研究员, 研究方向为信息系统项目开发与实施。

<http://www.china-simulation.com>

• 2187 •

作为系统建模工具特别是用于系统分解和集成方面一直很流行，但对于复杂产品研发过程建模来说，目前经典的 DSM 建模工具还不能完整地描述复杂产品研发过程，本文通过扩展 DSM 建模工具，将其应用于复杂产品研发过程，通过多维的 DSM 表达复杂产品研发项目活动间的信息依赖关系、时间费用参数、返工概率、返工影响系数、学习曲线、并行重叠信息、层次信息和约束情况等，为进一步进行复杂产品研发项目过程仿真和优化奠定了基础^[15-16]。

1 复杂产品研发过程的特点

与一般的产品研发过程相比，复杂产品设计过程具有以下特点：

(1) 层次复杂性

复杂产品研发项目通过逐层分解形成系统、子系统、子子系统和成千上万活动或任务，这些活动不仅数量庞大且层次结构复杂。例如像飞机、火车这样需要几万种零部件的复杂产品系统需要集成大量的设计过程，每个亚系统甚至每个单项设计都要根据其特定的性质经过一系列的项目管理活动过程，这样一个系统就被分解成成千上万个组件(活动)。因此，复杂产品研发项目的活动数量是非常庞大的，随之而来的是活动之间数倍于活动数量的相互关系变量数目。

(2) 信息耦合与协同性

复杂产品的设计是一个跨越多学科的、跨越多组织、复杂且高度迭代的过程，这个过程涉及到多专业信息的集成、多学科团队的协同设计，因此各种设计因素(如设计零部件、设计活动等)之间的相互耦合严重，产品设计过程中要产生和使用大量的设计信息，信息传递纵横交错。必须采用有效的方式描述和协调这些信息，才能提高设计的效率和质量，降低进度费用方面的风险。

(3) 研发过程的反复、迭代及活动工期和费用的不确定性

复杂产品研发项目由于周期长项目需求经常会发生变化。这种变化一般来自 2 个方面：(1)客户需求发生变更；(2)因技术问题无法克服，重新调整技术和功能指标。需求变化会引起研发活动反复迭代，导致活动工期和费用的不确定性。

(4) 活动重叠与并行工程

项目经理为赶工期，将前后序活动部分重叠甚至完全并行。通常前序活动称为上游活动，后序活动称为下游活动。相对抛过墙式的顺序方式，如果策略得当，通过活动重叠，可以取得工期缩短的效果。但在这个过程中，可能因技术不确定而带来返工风险，反而延长了工期，欲速则不达。

2 基于 DSM 的过程模型

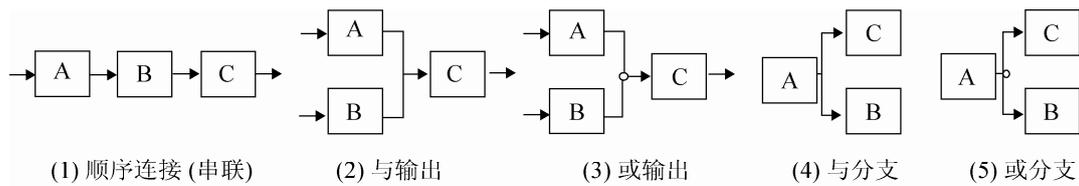
通过综合和改进已有的过程模型，本文构建了一个基于 DSM 的复杂产品研发过程模型。该过程模型包括：关系、迭代模型、重叠模型、约束模型、层次模型等。其中，重叠模型和迭代模型都可以由关系模型扩展而成，三者构成过程模型的核心，为进一步开发复杂产品研发项目过程仿真系统提供了可以标准化的基础数据模型。

2.1 关系模型

关系模型描述活动间的相互关系。在研发过程中，活动间存在大致的前后次序，DSM 中对角线上的元素表示活动自身的属性，并按大致的前后次序排列。通常越靠左上的元素代表活动越早执行，越靠右下的元素代表活动越晚执行，但最终执行的顺序是由约束模型确定。活动间可能的关系有以下五种，如图 1 所示。

图 1 中，假设有活动 A, B, C，用有向图表示的关系如图 1(a)所示，其对应的 DSM 表达由图 1(b) 表示。

(1) 顺序连接关系(串联活动,图 1(1)):活动 A, B, C 按先后次序执行，后续 B 活动依赖前导活动 A 的输出信息。在 DSM 中，若活动 i 与活动 j 是顺序连接关系，则 $DSM(j, i)=1$ ；



a) 活动关系的有向图表示

b) 活动关系的DSM表示

	A	B	C
A	A		
B	1	B	
C		1	C

	A	B	C
A	A		
B		B	
C	1	1	C

	A	B	C
A	A		
B		B	
C	0.5	0.5	C

	A	B	C
A	A		
B	1	B	
C	1		C

	A	B	C
A	A		
B	0.5	B	
C	0.5		C

图 1 5 种活动关系

(2) 与输出并行关系(图 1(2)): 表示多个活动一起输出到下游活动, 只有 A, B 都完成 C 才开始, A, B 相互独立, 可并行。在 DSM 中, 若活动 i 与活动 j 是与输出并行关系, i, j 完成后 k 才开始, 即 k 依赖 i, j 活动, 则 $DSM(k, i)=1, DSM(k, j)=1$;

(3) 或输出关系(图 1(3)): 表示多个活动有且只有一个输出到下游活动, 即异步排斥关系, 图中只有 A、B 之一输出到 C。在 DSM 中, 若活动 i 与活动 j 只有一个执行, 完成后 k 就开始, 即或输出关系则 $DSM(k, i)=0.5, DSM(k, j)=0.5$, 这里用 0.5 表示 j, k 各有 50% 的执行概率;

(4) 与分支并行关系(图 1(4)): 表示一个活动完成后同时启动多个并行的下游活动, 图中 A 完成后 B, C 即开始, B, C 相互独立, 可并行。在 DSM 中, 若活动 i 输出到活动 j 和 k , 即 j, k 依赖 i 活动, 即与分支并行关系则 $DSM(j, i)=1, DSM(k, i)=1$;

(5) 或分支关系(图 1(5)): 表示一个活动完成后有且只能有一个下游活动得到输出, 图中 A 完成后, 输出到 B 或 C。在 DSM 中, 若活动 j 与活动 k 只有一个执行, 即或分支关系则 $DSM(j, i)=0.5, DSM(k, i)=0.5$, 这里用 0.5 表示 j, k 各有 50% 的执行概率(也可以取任意其他的概率数值)。

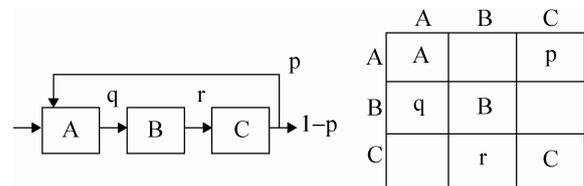
通过以上分析我们定义了 DSM 的下三角部分的数据, 其数值表示先后顺序活动关系, 而 DSM 的上三角部分表示活动的反馈, 我们将活动的反

馈和返工迭代联合在一起就形成了迭代模型, 见下节。

2.2 迭代模型

活动迭代是指由于某种原因而导致的活动重做, 即活动不是一次完成。活动迭代产生的原因很多, 目前一般认为有如下 3 个原因^[17]: 活动接收了新的信息, 即输入信息发生了改变; 上游活动重做导致下游活动也要重做; 活动自身的所需信息不能一次取得。

迭代是由下游活动反馈新信息后产生的结果, 如图 2 所示。若活动 A, B, C 顺序串行, 后续 C 活动的结果发现不符合要求, 需要反馈信息给上游活动 A, 导致活动 A 返工, 活动 A 的返工又导致 B 的返工重做, 最终 C 也可能重做, 这样就形成了串行迭代。



(a) 有向图表示 (b) DSM 表示

图 2 反馈活动的有向图表示和 DSM 表示

图 2(a)图是用有向图表示的关系图, 图 2(b)图是相应的 DSM 表示形式。为了体现迭代关系和反馈的不确定性, 采用概率方式表示这种随机性。

其中 p 是活动 C 完工后可能返回 A 的概率，还有 $1-p$ 的可能性不返回 A 直接进入 C 之后的下一个活动； q 是活动 A 重做后可能导致 B 重做的概率，有 $1-q$ 的可能性 B 不重做进入 C 之后的下一个活动； r 是活动 B 重做后可能需要 C 重做的概率，有 $1-r$ 的可能性 C 不重做直接进入 C 之后的下一个活动（如图 3）。这个过程其实是一个马尔科夫随机过程^[18-19]。 p, q, r 称作返工概率。若用 DSM 表示即为图 2(b)所示形式，称作迭代 DSM。

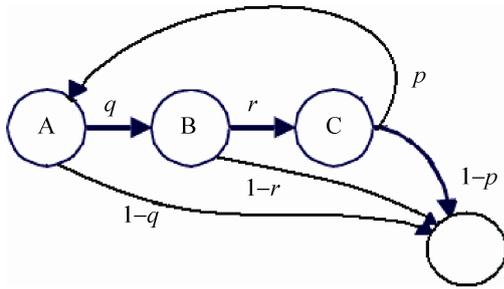


图 3 串行迭代活动状态转移的有向图表示

2.3 重叠模型

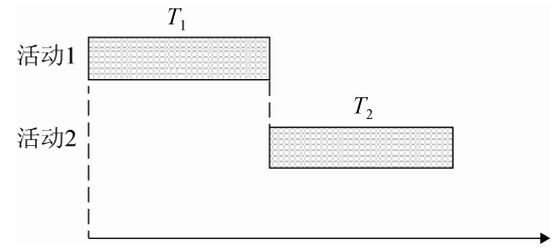
工程师和项目管理人员经常通过活动重叠来压缩研发项目工期，甚至通过提高活动的重叠程度，使之并行开发以实践并行工程的思想。

重叠程度用重叠参数来定义。如图 4 假设活动 1 是上游活动，活动 2 是下游活动，最初两活动采用紧前紧后串行模式执行(图 4(a))，这时下游活动 2 在活动 1 完成后的 t_{1f} 时刻开始执行，这种模式下两活动的执行时间和费用分别是： T_1, C_1, T_2, C_2 。如果采用重叠模式研发(图 4(b))，则下游活动 2 的启动时间提前至 $t_{2s} < t_{1f}$ 开始，此时，上下游活动有一段搭接时间 t_{12} ，为表示上下游活动的重叠程度，给出重叠参数 λ 的定义：

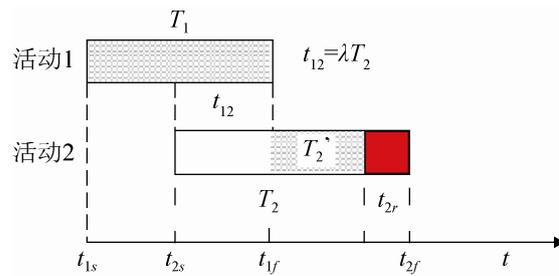
$$\text{令： } \lambda = \frac{t_{12}}{T_2} \quad (\lambda \in [0,1]) \quad (1)$$

是上游活动和下游活动的重叠参数， t_{12} 是重叠时间。

定义了重叠参数，通过它可以方便地表示活动的重叠程度即用重叠 DSM 来表示活动间的重叠关系，如图 5 所示。

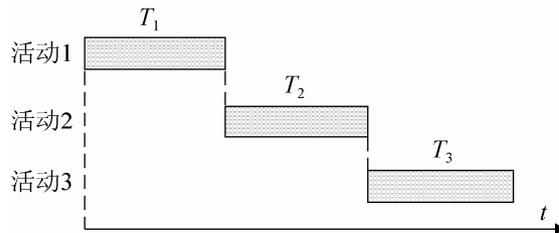


(a) 串行模式

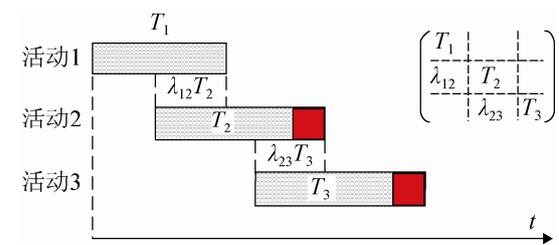


(b) 重叠模式

图 4 重叠参数 λ



(a) 串行模式



(b) 重叠模式

图 5 重叠 DSM

图 5(a)表示 3 个活动原来是串行执行关系，为了压缩工期，降低进度风险，项目管理者进行了活动重叠，如果上游活动 i 和下游活动 j 间的重叠参数是 λ_{ij} ，则重叠 DSM 矩阵元素 $DSM(i, j) = \lambda_{ij}$ ，很显然，这是一个下三角矩阵，可以用对角线元素表示活动独立执行时的工期或学习曲线改进率。关于重叠模型更详尽的分析请参考文献[19]。

2.4 上下游约束模型

上下游约束模型采用约束 DSM 矩阵表示上下游的约束关系。

在约束 DSM 矩阵中, 矩阵元素取值范围是 {0,1,2}, “0”表示所在行的活动和所在列的活动间没有直接上下游关系, “1”表示所在行的活动和所在列的活动间有明确的上下游关系, 并且所在列的活动是所在行活动的上游活动, 所在行的活动是下游活动。“2”表示所在行的活动和所在列的活动间有交互关系, 但上下游关系并不明确, 在活动网络优化时可通过变更它们的执行顺序实现网络优化。

可以看出, 相对于关系模型的 DSM 只能描述活动间的信息前馈和反馈关系而言, 约束 DSM 明确了活动的执行顺序, 如果活动位于上游, 表示它必须先开始, 不能更改活动前后执行的顺序, 但这并不排除上下游活动的重叠与迭代。

约束 DSM 是一个对称矩阵, 通常只用下三角元素表示即可。如图 6 是某产品设计活动的上下游约束 DSM。

图 6 中 D、E、F 活动之间存在信息耦合关系, 上下游关系不明确, 可以改变它们的执行顺序以实现网络优化的目的。“1”所在行的活动和所在列的活动之间存在明确的上下游关系, 任何情况下都不

能随意更改前后执行顺序, 如活动 A 和 B 必须是 A 在先 B 在后, 但这并不排除活动 A 和 B 的重叠与迭代。活动 G, H, I 之间不存在上下游关系, 因此在网络优化时允许改变它们的时序关系。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
需求研究 A	1								
产品规划 B		1							
系统设计 C			1						
子系统设计 I D				1					
子系统设计 II E					1				
子系统设计 III F						1			
装配设计 G							1		
仿真分析 H								1	
原型测试 I									1

图 6 上下游约束 DSM 表示活动间的时序关系

2.5 层次模型

由于复杂研发项目的活动繁多, 试图用单一的 DSM 矩阵表现全部活动是不现实的, 事实上, 复杂研发项目本身具有系统的层次性: 整体项目经常会被分解为几个分项目或者子系统, 子系统又会有子系统。当过程模型是由成百上千甚至上万项活组成时, DSM 简捷明了的优点就不再明显了。

分解被认为是分析大型复杂问题的最好工具, 图 7 中表现了一个 DSM 矩阵分解的实例。

活动名称	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A										
B	2									
C	1									
D			1							
(子系统) E		2								
F			1	1						
G			1	2						
H				1			1			
I					1	2		1		
J					1	1			1	

(子系统)E				
E1	E2	E3	E4	
E1				
E2	1			
E3		2		
E4	1	2		

图 7 包含子系统的 DSM 矩阵

(1) DSM 层次模型的分解方法和原则

层次分解的方法和原则可以借鉴工作分解结构(WBS)的方法, 按照系统原理和要求把项目分解成既相互独立、又相互影响、相互联系的项目单元^[21],

将其作为项目计划、实施、控制的工作对象, 通过项目管理再将多个项目单元合并成为一个整体, 以实现综合计划和控制的目标。层次建模的过程从最高级的活动层次(第一级)开始, 其中一些高级活动

可能会作为一个子系统,形成第二级的 DSM 矩阵,依此分解到最低的活动级别为止。第一级的 DSM 矩阵一般包括 10-20 个活动或过程里程碑。第二级的 DSM 矩阵涉及 200-300 项活动,即每级其子系统的活动应控制在 10-20 个之间(见表 1),依此逐级分解直到足够详细的层级。

表 1 DSM 分解的规模

规模	第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级
涉及的活动数	5-7	10-20	200-300	>1000
涉及的参加人数	10-20	200-300	3000-4000	>4000
涉及的工作范围	项目	部门	团队	个人

事实上分解还需要遵循一套严格的规范,关于这方面的分解规范可借鉴文献[21],在此不作更深入的讨论。

(2) DSM 层次模型的算法

DSM 层次模型描述了一个过程中的活动与活动之间的关系,以及与外部过程之间的联系,通过一层层分解直到网络计划的基本单元-活动(任务)。分解算法主要是 DSM 矩阵聚类分析方法,其目的是将彼此联系较多的元素尽量放在一起形成组,组内联系尽量多,组外尽量少,表现到矩阵上是非零元素尽量靠近对角线(如图 8 所示)。

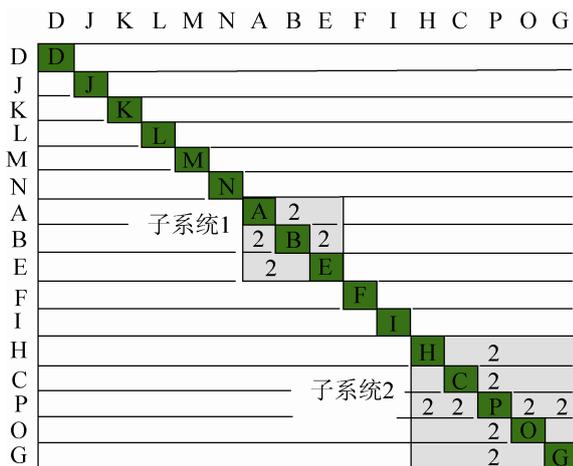


图 8 DSM 矩阵聚类分析

目前经常使用一些启发式算法如遗传算法进行聚类分析。

3 结论

过程建模是对复杂产品研发项目进行风险分析的基础。本文从复杂产品研发项目的过程特点出发,采用基于 DSM 的多维建模方法对复杂产品研发项目的活动过程进行建模。基于 DSM 的多维模型能够提供复杂产品研发项目所需要的主要信息模型,包括关系模型、迭代模型、重叠模型、约束模型和层次模型,采用 DSM 增强了对研发过程中活动关系的描述能力,能够提供一个表达活动上下游关系、迭代关系、重叠关系、约束关系和层次关系的统一的模型框架。这为进一步开发复杂产品研发项目风险分析仿真软件系统提供了必要的前提条件。

参考文献:

- [1] 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, 2002, 8(9): 678-683
- [2] 高峰. 基于过程集成的研发项目进度风险分析方法与应用 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [3] Yessine A, Falkenburg D, Chelst D. Engineering Design Management: an Information Structure Approach [J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 1999, 37(13): 2957-2975.
- [4] Mayer R J, Crump J W. Information Integration for Concurrent Engineering (IICE) Compendium of Methods Report [R]. TX, USA: Knowledge Based Systems, Inc., 1995
- [5] Mayer R J. IDEF0 Function Modeling: Are Construction of the Original Air Force report [R]. TX, USA: Knowledge Based Systems, Inc., 1990.
- [6] Busby J S, Williams G M. The Value and Limitation of Using Process Modeling to Describe the Manufacturing Organization [J]. International Journal of Production Research(S0020-7543), 1993, 31(9): 2179-2194.
- [7] 王计斌. 并行工程环境下产品开发过程研究 [D]. 北京: 清华大学, 1999.
- [8] Jensen K. Colored Petri Net: a High level Language for System Design and Analysis [C]. New York: Advances in Petrinets, 1990, 483: 342-416
- [9] Gheleb Y Abbasi, Adnan M Mukattsah. Crash PERT Networks Using Mathematical Programming [J]. International Journal of Project Management (S0263-7863), 2001, 19(2): 181-188.

- [10] 赵晋敏. 并行工程环境下的产品开发过程管理研究 [D]. 武汉: 华中理工大学, 2001.
- [11] Yang Baosen, Liu Lu. A Case Study of Enterprise Application Integration based on Workflow Management System [M]. Beijing, China: Springer, 2007: 425-431.
- [12] 范玉顺, 罗海滨, 林慧莘, 等. workflow 管理技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [13] Suh Nam P. The Principle of Design [M]. New York, USA: Oxford U. Press, 1990.
- [14] Browning T R. Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions [J]. IEEE Transactions on Engineering Management (S0018-9391), 2001, 48(3): 292-306.
- [15] 杨宝森, 刘鲁, 马晨. 基于仿真的随机活动网络进度费用联合风险 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(11): 2056-2062.
- [16] 杨宝森. 基于活动重叠的随机活动网络时间费用模型仿真研究 [J]. 系统仿真学报. 2012, 22(4): 684-687.
- [17] Cho Soo-Haeng, Eppinger S D. Product R&D Process Modeling Using Advanced Simulation [C]// Proceedings of DETC'01. ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. USA: ASME, 2001.
- [18] Lawler E. Combinatorial Optimization: Networks and Matroids [M]. New York, USA: Dover Publications, 1976.
- [19] 杨宝森, 来玲, 刘金柱. 复杂产品研发项目过程模型研究 [C]// 中国系统工程学会第十八届学术年会论文集, 北京: 中国系统工程学会, 2014.
- [20] 乐群星, 杨维垣, 宋晨英. 航天器研制项目基准工作分解结构的编制[J]. 项目管理技术, 2006, 4(10): 44-48.
- [21] 成虎. 工程项目管理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 42-49.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊（光盘版）电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心，以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源，首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》（CAJ-IJCR 年报）。第一次给出了我国 5600 余种中外文学学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标，并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序，发布了“中国最具国际影响力学术期刊”（排序 TOP5%）和“中国国际影响力优秀学术期刊”（排序 TOP5-10%），在国内外学术界产生了较大反响。之后，2013 年版年报，将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前，2014 版国际、国内年报与 TOP5% 和 TOP5-10% 期刊的遴选业已完成，《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5% 国内一流的中国最具国际影响力学术期刊，走向世界，进入国际一流，指日可待！