基于 DSM 优化的产品开发两因素风险建模及仿真

张汉鹏 邱菀华

(北京航空航天大学 经济管理学院，北京 100083)

摘 要：针对存在迭代现象的产品开发过程的风险综合测量问题，建立了风险分析模型，并给出了相应的仿真算法. 该模型分 2 个阶段构建，首先在传统设计结构矩阵理论基础上，构建了返工概率矩阵和返工冲击矩阵，由此描述产品开发过程中的进度和成本与迭代的关系；然后根据初始进度和成本不确定性、迭代的不确定性以及构建的结构矩阵，给出了产品开发风险评估模型. 同时，利用传统设计结构矩阵优化理论，提出了通过减少迭代降低进度和成本风险的思路. 利用仿真实例阐明，该模型能够测量产品开发进度和成本风险，同时能够利用设计结构矩阵优化开发顺序，从而降低产品开发风险，这为测量和控制产品开发项目综合风险提供了科学的依据.

关 键 词：产品开发；设计迭代；项目仿真；设计结构矩阵；风险管理

中图分类号：TH 166

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)05-0627-04

Product development two-factor risk model and simulation based on DSM

Zhang Hanpeng Qiu Wanhua

(School of Economics and Management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the risk measurement of product development with iterations, a modeling method to evaluate the risk of schedule and cost in product development was constructed, and a simulation algorithm was given to analysis the risk of product development process. The model was constructed by two stages, rework probability matrix and rework impact matrix were firstly established based on design structure matrix(DSM), which described the relationships between schedule, cost and iteration. The evaluation model was then set up according to schedule and cost uncertainty, iteration uncertainty and the structure matrix. At the same time, the idea to decrease schedule and cost risk of product development was introduced through reducing iterations. Finally, a case was presented to illustrate the model, which indicated the model can measure product development's schedule and cost risk, and also decrease schedule and cost risk by adopting product development sequence optimization based on DSM. This is useful to measure and control product development risk.

Key words: product development; design iterations; project simulation; design structure matrix; risk management

传统的风险分析通常利用 PERT(Program Evaluation and Review Technique)和 CPM(Critical Path Method)等理论方法对网络结构进行分析，并在此基础上利用仿真研究进度风险[1-3]. 这对一般项目来讲是适用的，然而，对产品研发并不适用，因为产品研发过程中存在大量耦合任务，由此导致迭代成为产品开发中的普遍现象. 迭代是使产品开发进度延迟，成本上升，由此导致产品开发风险上升的一个重要因素. 因此，如何在考虑迭代问题的基础上测量风险并控制风险成为产品开

收稿日期：2006-06-15

基金项目：国家自然科学基金资助项目(70372011)

作者简介：张汉鹏(1977—)，男，山东德州人，博士生，zhp@sem.buaa.edu.cn.

发过程研究的一个重要方向.

Browning[4]先是利用设计结构矩阵优化(DSM,Design Structure Matrix)来削减开发进度周期,后又考虑了迭代产生的影响,给出了进度风险和成本风险模型[5],但是,他并没有明确迭代和进度及成本的关系,而是利用改进曲线说明迭代的影响.姚咏[6]利用设计结构矩阵理论分析了产品开发过程,但他没有重点分析风险问题.

由此,本文提出了利用DSM理论对产品开发过程进行优化,降低迭代,从而降低开发进度延迟和成本上升风险的思路;同时,明确分析了迭代与进度、成本的关系.实例分析证明,该思路是可行的.同时,由于本文建立的风险分析模型考虑了迭代问题及相应的优化过程,这为评估产品开发项目风险提供了科学的决策与控制依据.

1 DSM优化及两因素风险分析模型

设计结构矩阵由一个 $N\times N$ 的矩阵表示研发过程中 N 项任务及它们之间的关系.其中,对角线上的元素代表设计任务本身,非对角线上元素代表各项任务之间的信息交流.执行顺序的不同,迭代的影响也不同,经过优化后的顺序,迭代明显减少(如图1,图2所示).对于更多任务的产品研发项目,Altus[7]给出了利用遗传算法优化执行顺序的模型,以此来达到减少迭代的目的.

	r_1	r_2	r_3	r_4
r_1			1	
r_2	1		1	1
r_3	1			
r_4	1			

图1 初始顺序

	r_1	r_2	r_3	r_4
r_1	1			
r_2	1			
r_3	1			
r_4	1	1	1	

图2 优化后的顺序

在顺序优化的基础上,考虑迭代的不确定性和初始任务执行的不确定性,分析由此导致的整个项目进度和成本的不确定性,给出两因素风险建模过程.

产品开发过程中每项任务的持续时间 $T_i,i=1,2,\cdots,n$ 都具有不确定性,通常用一定范围和概率密度函数来描述,一般采用正态分布函数、β 分布或者三角分布函数.

考虑迭代不确定性,即每项任务的返工是不确定的,由此给出返工概率矩阵定义如下:

定义1 返工概率矩阵 $\boldsymbol{D}_1$ 假定矩阵对角线元素为各项开发任务 $r_i,i=1,2,\cdots n$,矩阵中 $j>i$ 的元素 r_{ij} 表示下游任务 r_j 的完工导致上游任务 r_i 返工的概率;矩阵中 $j<i$ 的元素 r_{ij} 表示上游任务 r_j 的改动导致下游任务 r_i 返工的概率.由此建立的矩阵就是返工概率矩阵.

由于任务之间迭代强度不同,因此影响也不同,下面给出返工冲击矩阵的定义.

定义2 返工冲击矩阵 $\boldsymbol{D}_2$ 假定矩阵对角线元素为各项开发任务 $r_i,i=1,2\cdots n$,原始工作量为 W_i,矩阵中 $j>i$ 的元素 i_{ij} 表示下游任务 r_j 的完工导致上游任务 r_i 返工的工作量为原始工作量的比率;矩阵中 $j<i$ 的元素 i_{ij} 表示上游任务 r_i 的改动导致下游任务 r_j 返工工作量为原始工作量的比率.由此建立的矩阵就是返工冲击矩阵.

考虑每项任务分配的开发人员和设备不同,定义进度和成本与工作量的关系如下:

$$\left.\begin{aligned} T_i &= K_i^{\mathrm{T}} W_i \qquad i=1,2,\cdots n \\ C_i &= K_i^{\mathrm{C}} W_i \qquad i=1,2,\cdots n \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

其中,K_i^{T} 表示第 i 项任务的进度系数;K_i^{C} 表示第 i 项任务的成本系数.K_i^{T},K_i^{C} 和 W_i 由专家给出.

考虑项目整体,设 T_{E} 和 C_{E} 表示整个产品开发项目预期进度和预期成本,T 和 C 为整体进度和成本,则产品开发进度和成本的联合风险的定义可表示如下:

$$P(T_{\mathrm{E}},C_{\mathrm{E}})=1-F(T<T_{\mathrm{E}},C<C_{\mathrm{E}}) \tag{2}$$

其中 $P(T_{\mathrm{E}},C_{\mathrm{E}})$ 表示对应目标进度和目标成本的超出概率.

由于产品开发的复杂性,整体进度 T 和成本 C 与各项任务进度 T_i 和成本 C_i 之间的关系很难用解析的方法得到,由此,下面利用蒙特卡罗仿真给出求解步骤.

2 仿真算法

在进行仿真前,首先,根据Altus[6]的遗传算法优化执行顺序.仿真开始时,对每项任务根据其分布随机生成进度数据和成本数据(为了简化,本文采用三角分布函数来表示每项任务的持续时间不确定性).

仿真过程中,根据紧前约束寻找首先执行的任务,根据返工概率矩阵和返工冲击矩阵调整受该任务影响的其他任务的工作量 $\boldsymbol{W}$.然而进入下一系统状态,触发下一事件,在所有任务工作量为0时终止.

具体的单次仿真的步骤总结如下:

1) 由设计团队初始化模型中各个变量,即,K_i^{T},T_i,K_i^{C},C_i,W_i,$\boldsymbol{D}_1$,$\boldsymbol{D}_2$;

2) 对每项任务的持续时间和成本进行随机抽样;

3) 针对每个状态,设定布尔向量 $\boldsymbol{B}_n$ 表示任务是否执行;如果某项任务 r_i 还没有完工,同时不依赖其上游任务,则设其对应的布尔向量中的值为"1",表示可执行;否则为不可执行;

4) 寻找可行性任务中执行时间最短的任务 r_i,把其执行时间 t_i 加到累计时间中,同时计算累计成本,相应的,把其他同时可执行任务减去时间 t_i 对应的工作量,确定相应工作量的数值;

5) 遍历该任务在返工概率矩阵中列的数值,检查是否导致返工,如果导致其它任务返工,把返工冲击矩阵中相应的数值加到其工作向量中;

6) 返回步骤 3,搜寻新的事件点,直到工作向量全部为 0;

7) 完成后,输出整体进度 T、整体成本 C.

以上是一次仿真的具体执行步骤,为了获得稳定的分布,需要进行多次仿真,稳定的分布的评价公式如下:

$$|E(T_n)-E(T_{n-b})|/E(T_{n-b})<\alpha \quad (3)$$

$$|\sigma^2_{T_n}-\sigma^2_{T_{n-b}}|/\sigma^2_{T_{n-b}}<\alpha \quad (4)$$

其中,$E(T_n)$为运行 n 次的进度均值;$E(T_{n-b})$为运行 $n-b$ 次的进度均值;$\sigma^2_{T_n}$ 运行 n 次的进度方差;$\sigma^2_{T_{n-b}}$ 为运行 $n-b$ 次的进度方差. 在这里,假定 $b=100$,$\alpha=0.0002$[5]. 然后可以根据公式(2)计算相应的风险.

3　实例分析

考虑某机械产品开发的简化实例,该项目由 6 项任务组成. 其中,R_1 为选择初步方案;R_2 为绘制结构草图;R_3 为进行材料分析;R_4 为进行运动学分析;R_5 为进行可靠性分析;R_6 为进行详细设计.

设定工作量单位为(人·d)$^{-1}$,进度单位为 d,成本单位为万元;由设计团队给出初始工作量,进度系数和成本系数的值如下:

$$\boldsymbol{W}=(6,16,7,6,9,20)$$

$$\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}=(0.5,0.5,0.4,0.5,0.35,0.6)$$

$$\boldsymbol{K}^{\mathrm{C}}=(1.1,0.9,0.7,0.8,0.55,1.2)$$

相应的,给出各项任务的乐观值和悲观值,如表 1 所示.

图 3～图 5 为由设计团队确定的原始顺序返工概率矩阵,优化后返工概率矩阵和返工冲击矩阵.

仿真结果如表 2 所示. 从理论上分析,本文的算法是建立在已有的建模仿真理论基础上的,Browning[5] 已经对理论方法的有效性进行了验证,而结果也表明仿真结果和理论结果是相符的,因此,该仿真算法是有效的.

表 1　某机械产品开发任务的预期进度、成本和质量评价值

任务	进度/d			成本/万元		
	乐观值	可能值	悲观值	乐观值	可能值	悲观值
R_1	2.7	3	3.4	5.3	6.6	6.9
R_2	7.5	8	8.9	12.1	14.4	15.3
R_3	2.6	2.8	3.6	4.5	4.9	5.5
R_4	2.2	2.5	3.1	3.6	3.8	4.1
R_5	2.7	3.15	3.3	4.4	4.95	5.2
R_6	11.2	12	13.3	22.3	24	27.2

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
R_1	0	0.4	0	0	0	0
R_2	0.4	0	0	0	0	0
R_3	0.3	0.1	0	0.5	0	0
R_4	0.3	0.5	0.3	0	0	0
R_5	0.3	0.3	0.3	0.7	0	0.5
R_6	0.9	0.7	0.4	0.4	0.6	0

图 3　原始顺序 $\boldsymbol{D}_1$

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
R_1	0	0.4	0	0	0	0
R_2	0.4	0	0	0	0	0
R_3	0.3	0.5	0	0.3	0	0
R_4	0.3	0.1	0.5	0	0	0
R_5	0.3	0.3	0.7	0.3	0	0.5
R_6	0.9	0.7	0.4	0.4	0.6	0

图 4　优化后的 $\boldsymbol{D}_1$

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
R_1	0	0.5	0	0	0	0
R_2	0.6	0	0	0	0	0
R_3	0.5	0.4	0	0.2	0	0
R_4	0.3	0	0.3	0	0	0
R_5	0.5	0.2	0.6	0.3	0	0.2
R_6	0.8	0.6	0.5	0.1	0.5	0

图 5　优化后的 $\boldsymbol{D}_2$

表 2　某机械产品仿真结果

结果	原始进度/d	原始成本/万元	优化进度/d	优化成本/万元
理论平均值	32.36	59.14	32.08	58.22
仿真平均值	32.51	59.34	32.01	58.38

另外,图 6 和图 7 分别给出了原始顺序的进度和成本分布图和优化后的进度和成本分布图. 根据仿真结果和公式(2)计算表明,在期望进度为 33 d,期望成本为 59.5 万元的情况下,由原始顺序仿真结果计算的风险为 10.15%,优化后的仿真结果计算的风险为 1.8%. 由此可见,利用 DSM 进行优化后,可以降低整个产品研发项目的风险.

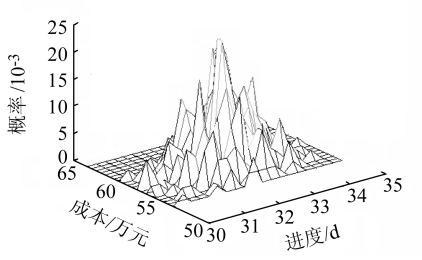


图 6 原始顺序的进度-成本分布图

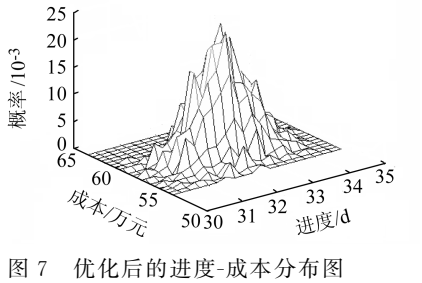


图 7 优化后的进度-成本分布图

4 结束语

本文以设计结构矩阵理论为基础，建立了产品进度和成本风险分析模型，并给出了仿真算法. 实例分析表明，该算法能够测量产品开发进度和成本风险，并能通过优化降低风险. 但是，该模型仅给出了由产品开发的各项任务到整体的分析途径，分析结果只能揭示整体的风险水平，对各项任务的评估有限，这也是该模型的局限所在.

另外，顺序优化仅仅是降低风险的一种途径，如何通过耦合任务解耦建立风险分析优化模型也有待进一步研究.

参考文献（References）

[1] 徐哲，冯允成. 网络计划进度的风险分析[J]. 系统工程理论与实践，1998，4：24－28
Xu Zhe，Feng Yuncheng. Schedule risk analysis for network planning[J]. System Engineering-Theory & Practice，1998，4：24－28(in Chinese)

[2] 钟登华，刘奎建，杨晓刚. 施工进度计划柔性网络仿真的不确定性研究[J]. 系统工程理论与实践，2005，2：107－112
Zhong Denghua，Liu Kuijian，Yang Xiaogang. Uncertainty analysis for construction scheduling with flexible network simulation[J]. System Engineering-Theory & Practice，2005，2：107－112(in Chinese)

[3] 刘煜明，王卓甫，丁尔俊. 基于一定风险水平的施工进度计划研究[J]，河海大学学报(自然科学版)，2006，3：227－230
Liu Yuming，Wang Zhuofu，Ding Erjun. Scheduling for construction under fixed risk probability[J]. Journal of Hehai University(Natural Sciences)，2006，3：227－230(in Chinese)

[4] Browning T R. Use of dependency structure matrices for product development cycle time reduction[C]// Proceeding of the Fifth ISPE International Conference on Concurrent Engineering：Research and Applications. Tokyo：Tokyo Metroplitan Insititute of Technology，1998：89－96

[5] Browning T R，Eppinger S D. Modeling impacts of process architecture on cost and schedule risk in product development[J]. IEEE Transactions on Engineering Management，2002，49(4)：428－443

[6] 姚咏，范文慧，熊光楞. 复杂产品开发过程仿真及其优化方法研究[J]. 系统仿真学报，2006，3：726－730
Yao Yong，Fan Wenhui，Xiong Guangleng. Research on complex product development process simulation and its optimization[J]. Journal of System Simulation，2006，3：726－730(in Chinese)

[7] Altus S S，Kroo I M，Gage P J. A genetic algorithm for scheduling and decomposition of multidisciplinary design problems[J]. Transactions of the ASME，1996，118(4)：486－489

（责任编辑：卢 硕）