

设计结构矩阵在复杂产品协同设计过程的应用

徐路宁^{1,2}, 张和明¹, 张永康²

(1. 清华大学国家 CIMS 工程技术研究中心, 北京 100084;

2. 江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013)

[摘要] 将矩阵方法应用到复杂产品的开发过程中, 用 DSM (设计结构矩阵) 量化表达复杂产品的设计流程, 并通过 DSM 的分析与重构进行复杂产品的协同设计规划, 以缩短产品设计周期, 降低开发成本。

[关键词] DSM (设计结构矩阵); 分析; 重构; 规划

[中图分类号] TP315 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2005) 06-0041-04

1 引言

提高制造企业的产品质量, 通常有三条途径:

a. 选择高品质的原材料; b. 改进设计; c. 改进产品开发过程。第一条路会增加成本。最直接的办法是改进设计。在复杂产品设计中, 多领域的协作开发过程是一个关键; 从过程的改进入手提高产品质量, 缩短开发周期, 近年来逐渐被重视。设计结构矩阵 (design structure matrix, DSM), 是以矩阵的形式, 在对产品开发过程建模的同时, 进行复杂产品协同设计规划; 是缩短产品开发周期的一种有效方法。

2 复杂产品的开发过程

复杂产品的开发, 首先是根据需求定义确定设计方案。由于复杂产品组成复杂、设计方法复杂、制造过程复杂、涉及领域多, 要求所有的参与部门进行协同合作, 故多领域协同设计与进行合理的协同产品设计规划, 就成为复杂产品开发的重点。

2.1 产品开发过程定义

“过程”本身是一个抽象的、普遍的概念。产品开发过程是指从产品定义到产品批量生产之前这一段时间, 包括与产品开发有关的所有相关技术活

动和管理活动, 代表了特定组织进行产品开发的行
为^[1]。产品开发过程是一个将技术、方法、工具和人员集成并付诸实施的产品开发实践活动, 它涉及技术和管理两个方面。并行工程主要关心的是产品开发阶段, 这是一种新型的产品开发模式, 这里的“并行”包含两方面的内容, 即“并发”和“协同”, 并发是指开发活动的并发进行, 协同则是指多领域开发队伍开发活动的协作。

2.2 复杂产品开发的特点^[2]

复杂产品的开发由于涉及领域多, 因此不同于简单产品的单领域开发, 其特点表现为:

1) 系统组成复杂。往往是机械、控制、动力等多个不同领域子系统的综合体。

2) 开发过程复杂。不仅包括时间纵轴上的先后设计活动, 而且包括横轴上某一时刻并发的设计任务之间的互相影响。

3) 系统行为复杂。复杂产品开发对总体性能的要求高于对单个功能模块的要求, 因而增加了产品开发的难度。

因此, 复杂产品开发对于传统的产品开发技术、管理与工具提出一系列新的挑战。

3 设计结构矩阵 (DSM)

Steward 在 1981 年引入 DSM 作为基于矩阵的

[收稿日期] 2004-10-29; **修回日期** 2004-11-29

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (60274044); 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目 (2002AA411320)

[作者简介] 徐路宁 (1977-), 女, 江苏镇江市人, 江苏大学博士研究生, 主要研究方向为 CAD/CAM 与并行工程协同设计

信息流分析框架，目前 DSM 已经发展为三种类型：**a.** 基于参数的模型；**b.** 基于任务的模型；**c.** 基于团队的模型^[3]。用基于任务的模型进行复杂产品协同设计规划，DSM 包含组成项目的各项任务及各任务间信息交换的方式，从中可以发现某项任务开始时需要哪些信息及一个任务产生的信息将提供给哪些任务。

3.1 DSM 量化表达

DSM 反映各种设计行为以及它们之间的相互关系。矩阵的维数表示设计行为的个数，对角线上的元素代表设计行为本身。DSM 的每一行表示该行为对应任务的完成需要其他各列任务的支持信息；每一列表示该列任务对其他各行任务的输出或者支持信息。如图 1 所示，给出一系列 n 个设计行为 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 构成的设计过程，则设计结构矩阵中各行各列对应的元素表示设计行为以及设计行为之间的关系；对角线元素表示设计行为本身，用 A_i 表示；矩阵中的元素 1 表示设计行为之间的信息交互，即行为 A_j 提供信息给行为 A_i ，则 $a_{ij} = 1$ ，否则 $a_{ij} = 0 (i \neq j)$ ，意味着行为 A_i 与行为 A_j 之间没有信息交互。

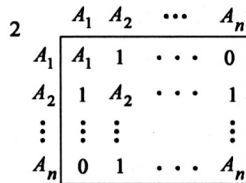


图 1 设计结构矩阵 (DSM)

Fig.1 The DSM (design structure matrix)

3.2 DSM 分类

以两个行为为例将 DSM 分成 3 类^[4]，如图 2 所示。

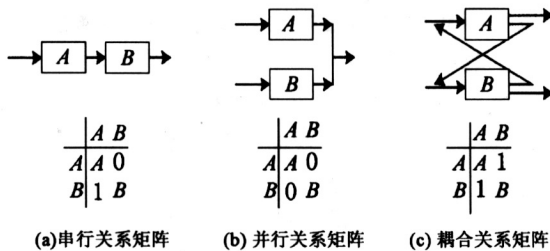


图 2 DSM 的分类

Fig.2 Three types of DSM

1) 串行关系矩阵：按行为 A 在先、行为 B 在后的顺序执行。

2) 并行关系矩阵：行为 A 与行为 B 相互独立没有信息交互。

3) 耦合关系矩阵：行为 A 的执行依赖行为 B 的结果；反之亦然，两者交互影响。

DSM 是方阵，对角线上的元素是设计行为本身，每一行中的元素“1”表示在设计过程中该设计行为对其他设计行为传递信息。不难看出，DSM 中对角线以下三角矩阵中的非零元素表示前馈信息，对角线以上三角矩阵中的非零元素表示反馈信息。下三角的设计结构矩阵为理想的设计规划矩阵，意味着串行的开发方式不需要反馈信息，这是要追求的理想状态。

4 DSM 在复杂产品开发中的应用

4.1 构建量化的设计结构矩阵

用 DSM 进行多领域协同设计规划时，第一步是将复杂产品的工作流程转化为合理的设计结构矩阵。复杂产品是指客户需求复杂、产品组成复杂、制造过程复杂、项目管理复杂的一类产品，这类产品的设计涉及机械、控制、动力等多个领域，是一个由不同领域设计者相互协作、共同完成设计任务的协同过程^[5]。以某复杂产品的设计为例，该产品涉及机械、控制、动力、液压等多个领域，图 3 所示的是其设计工作流程图。

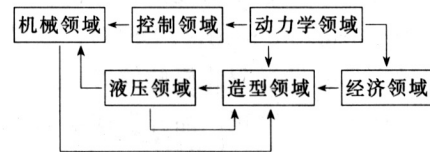


图 3 某复杂产品设计工作流程图

Fig.3 The design flow diagram for a complex product

根据 DSM 的量化，首先将各领域的设计行为置于对角线上，领域之间的信息交流用黑点表示，在矩阵中用“1”表示，前馈信息位于对角线以下的矩阵中，反馈信息位于对角线以上的矩阵中，如图 4 所示。

最后，用“0”，“1”补齐矩阵中的空缺，将工作流程图的类矩阵形式转化成完整的设计结构矩阵； A, B, C, D, E, F 分别表示机械领域、控制领域、动力学领域、液压领域、造型领域、经济领域；有信息交互的位置用“1”表示，其他位置用“0”表示，如图 5 所示。

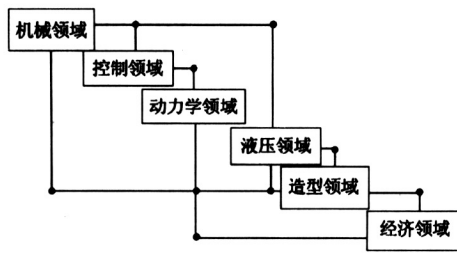


图 4 工作流程图的类矩阵表示形式

Fig.4 The kindred DSM of design flow diagram for a complex product

	A	B	C	D	E	F
A	A	1	0	1	0	0
B	0	B	1	0	0	0
C	0	0	C	0	0	0
D	0	0	0	D	1	0
E	1	0	1	1	E	1
F	0	0	1	0	0	F

图 5 某复杂产品的 DSM

Fig.5 The DSM for a complex product

4.2 DSM 分析与重构

DSM 分析的目的是获得多领域协同设计的核心，包括分析 DSM 行和列汇总数据的排序结果。行排序说明对应的设计行为对其他设计行为的依赖程度，数值越大说明其依赖程度越高，对其他设计行为的结构变更敏感；列排序表明对应的设计行为对其他设计行为提供支持程度的大小，数值越大说明影响越大。DSM 重构是通过一系列的行列变换将矩阵重置获得新的工作序列^[6]，目的是最大限度地减少未知因素，使设计过程中耦合紧密的领域结合在一起，减少由整个系统的反馈信息带来的设计重复。在不可避免的情况下，尽量将反馈信息与相应的活动接近，实现优化。

设计过程重构的目的是为了在各个设计行为中提高并行的程度，以便于减少产品设计开发的时间和成本。重构的基本原则可以归纳为：

- 1) 根据 DSM，如果矩阵中某一行元素全部为零，对应该行的设计行为应该尽可能早地执行，因为该设计行为不需要其他设计行为提供任何信息。
- 2) 根据 DSM，如果矩阵中某一列元素全部为零，对应该列的设计行为应该尽可能晚地在其他设计行为之后执行，因为该行为没有对其他设计行为

提供设计信息。

3) 相互耦合的行为在设计重构过程中被看作一个整体来执行。

4) 根据所有设计行为的顺序，设计重构的目的是进行行列变换，从而使 DSM 尽量成为下三角矩阵。

基于以上原则，将图 5 所示的 DSM 经过分析与重构，进行一系列的行列变换，获得新的矩阵排列顺序如图 6 所示。

	C	B	F	A	D	E
C	C	0	0	0	0	0
B	1	B	0	0	0	0
F	1	0	F	0	0	0
A	0	1	0	A	1	0
D	0	0	0	0	D	1
E	1	0	1	1	1	E

图 6 重构的 DSM

Fig.6 New DSM from the original DSM

对于这类小型矩阵，只要通过一系列的行列变换，就可以获得新的重构矩阵；对于大型矩阵，则可以通过相关的算法获得新的重构矩阵。

4.3 工作流程的更新

经过 DSM 分析与重构，实现设计行为的聚合与开发任务次序的规划，获得新的复杂产品设计工作流程图，如图 7 所示。

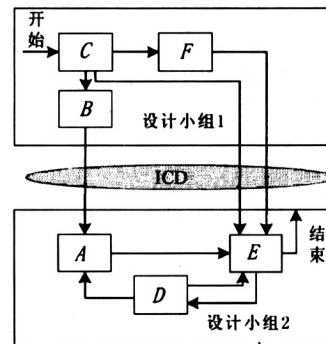


图 7 DSM 分析重构后的工作流程图

Fig.7 The new design flow diagram with new DSM

在新的设计工作流程图中，B，C 和 F 构成了一个组合，即 B，C 和 F 所代表的控制领域、动

力领域和经济领域的设计任务组合分配给设计小组1, 在这个小组中由于各领域耦合紧密, 不需要再将任务分解后并行执行。设计小组1的输出经过接口ICD输入到由A, D和E构成的组合中, 即输入到由机械领域、液压领域和造型领域的设计师们构成的设计小组2。DSM对角线上方的输入是设计反馈信息, 设计小组2存在反馈循环, 因此这个小组要在并行的环境中进行设计工作。这两个设计小组的信息通过接口ICD交互。

5 结论

复杂产品多领域协同设计是并行工程的研究热点, 用DSM的形式为复杂产品的协同设计规划提供了解决思路; 通过DSM的分析与重构最后形成的信息依赖回路, 包含了多个领域之间的协同工作; 获得的新的工作流程将紧密耦合的设计行为构成一个组合, 减少了单个耦合设计行为的数目, 缩短了开发时间, 降低了设计成本, 具有良好的应用价值。

参考文献

- [1] 熊光楞. 并行工程的理论与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
- [2] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海. 复杂产品协同制造支撑环境技术的研究 [J]. 计算机集成制造系统——CIMS, 2003, (8): 691~697
- [3] Mohan S N, Managing unmanned flight projects using methods in complex product development [J]. Aerospace Conference Proceedings, IEEE, 2002, (7): 3473~3488
- [4] David M, Idelmerfaa Z, Richard J. Organization method for complex cooperative design projects [A]. Systems, Man and Cybernetics [C]. 2002 IEEE International Conference, 2002, (4): 61~64
- [5] Acton D E, Olds J R. Computational frameworks for collaborative multidisciplinary design of complex systems [A]. American Institute Aeronautics and Astronautics (AIAA) International Conference [C], 1998
- [6] Hyun Jeong Choo, Hammond J, Tommelein I D, et al. DePlan: a tool for integrated design management [J]. Automation in Construction, 2004, (13): 313~326

DSM Applied to Planning Process in Cooperative Design for Complex Products

Xu Luning^{1,2}, Zhang Heming¹, Zhang Yongkang²

(1. National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

[Abstract] The paper applied the matrix to the cooperative design for complex products, described the design flow diagram with design structure matrix (DSM), then reset the planning process according to analyzing and partitioning the DSM in order to shorten the cycle of design and reduce the cost of development.

[Key words] DSM (design structure matrix); analysis; partition; planning