

协同设计中基于 DSM 过程重构的研究

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] 将设计结构矩阵方法应用到复杂产品的协同设计开发过程中, 通过分析设计行为之间的信息交互获得 DSM 的量化表达, 利用图论中的强连通分支问题算法识别耦合活动集, 并在此基础上根据 DSM 重构原则对 DSM 进行模块化的过程重构, 同时对块内设计任务进行聚类、撕裂, 获得协同设计开发过程中的优化重组, 为复杂产品的设计开发提供了有效的解决方法, 并通过实例说明了该方法的实用性。

[关键词] DSM (设计结构矩阵); 过程重构; 耦合; 撕裂

[中图分类号] TP315 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)05-0052-05

1 引言

复杂产品的协同设计体现在不同领域专家知识的综合, 协同设计的任务是协调各部件开发与总产品之间的关系。协同设计产品开发的本质是过程重构。在实施协同设计时, 必须先对现有的产品开发流程进行深入分析, 找到影响产品开发进展的根本原因, 重新构造一个能为相关各方接受的新模式。

多领域的协同设计主要强调产品开发过程中的物理、功能、信息、资源、组织、过程和决策等方面的协调, 对于设计中的过程重构, 目前采用的建模技术和解决方法有:

1) 美国弗吉尼亚大学的 CERC 采用了一种形式化方法^[1], 把协同设计的活动分为 5 类, 通过这 5 类活动, 为简化和优化产品开发过程提供解决方案; 通过分解关键路径来缩短产品的开发周期。

2) Eppinger 等人利用结构化建模方法来划分设计活动、规划设计过程^[2], 其优点是可以与通用的 IDEF 图等方法结合, 缺点是没有揭示问题的本质, 设计活动的划分在很大程度上是根据经验, 结论带有随意性。

3) 清华大学 CIMS 中心提出的一系列的产品开发过程集成多视图建模方法, 包括 DFD, SADT, IDEF, CIMFlow 系统, T/L 模型和 IEM 方法等^[3], 较好地反映了产品设计过程方面的信息。

“设计结构矩阵”(design structure matrices, DSM)方法最初由 Steward 提出^[4], 用来描述活动之间的联系。该方法经过多年的发展, 已成功地应用于任务规划领域, 在产品模块化设计以及族类分析中也对该方法进行了一些探讨, 但缺乏其在复杂产品多领域协同设计中的研究与应用。

笔者在分析设计结构矩阵信息交互的基础上, 利用图论中的强连通分支算法确定耦合子集, 将 DSM 模块化, 在此基础上对 DSM 中的设计模块进行聚类、撕裂, 完成 DSM 的过程重构, 实现复杂产品协同设计开发过程的优化重组, 并通过实例说明该方法的实用性。

2 设计结构矩阵方法

2.1 设计结构矩阵的概念

设计结构矩阵 (DSM) 是以矩阵的形式对产品开发过程建模, 进行并行协同产品设计规划, 设计

[收稿日期] 2005-06-03; **[修回日期]** 2005-08-22

[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

中的各种活动及其相互关系都用矩阵中元素的值相映射^[5]。矩阵的维数代表设计行为的个数，对角线上的元素代表设计行为本身，DSM 的每一行表示完成该行为所对应的任务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支持信息。图 1 为由 n 个设计行为 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 构成的设计结构矩阵，其中各行各列对应的元素表示设计任务之间的关系，“1”表示设计任务之间有信息交互，“0”表示设计任务之间无信息交互；对角线元素表示设计任务本身，用 A_i 表示^[6]。

	A_1	A_2	...	A_n
A_1	A_1	1	...	0
A_2	1	A_2	...	1
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
A_n	0	1	...	A_n

图 1 设计结构矩阵

Fig.1 The DSM (design structure matrix)

2.2 设计结构矩阵的分析

设计结构矩阵为理解和分析产品设计开发过程提供了一种简洁而直观的形式。分析 DSM 方法，可以得出 DSM 具有以下丰富的内涵：

- 1) A_1, A_2, \dots, A_n 表示与产品相关的设计任务及其顺序。
- 2) 矩阵中的元素“1”表示任务之间的信息交流及其方向。如在某设计行为对应的行与某一活动有信息反馈，则将其标识为“1”，表示该行对应的活动需要相应列的信息输入；同理，对于某一列，它同其他有信息交互的活动同样标识“1”，表示对其他活动的信息输出。
- 3) 对角线以下的元素“1”表示前馈信息，对角线以上的元素“1”表示反馈信息。
- 4) 若设计结构矩阵为下三角矩阵，则意味着产品设计是串行的开发方式，不需要反馈信息，这样的设计过程是最理想的状态。
- 5) 对矩阵进行变换处理，首先应尽可能减少反馈带来的设计重复；其次，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。

3 协同设计过程重构技术

协同设计与传统的开发方式的本质区别，在于它把产品开发的各个活动视为一个集成的过程，从

全局优化的角度出发进行管理和控制，并且对已有的产品开发过程进行不断的改进和提高。这种方法被称为产品开发过程重构 (product development process reconfiguration)^[7]。

协同设计过程重构的思想是：根据需要对产品设计过程进行重新构思和设计，以用户需求为目标，面向对象、面向制造、面向装配。因此，过程重构意味着抛弃传统串行设计方式中不符合现代设计要求的部分，是满足当前过程需要的一种创新。

协同设计过程重构需要考虑的问题有^[8]：所涉及的大量设计行为、现象；设计过程反复迭代；设计过程的并行活动和协同行为；有利于设计人员理解的直观表达形式；允许多层次的分解和改进。

在实际的产品协同设计中，由于各个设计线程相互依赖，在此之下的协同设计过程重构常常需要经过多次迭代才能获得满意的结果。在设计信息不完备的情况下开展设计活动，当所需要的信息明确后，往往引起再设计，增加了产品开发成本，延长了产品的上市周期。因此，在产品最初的设计阶段，明晰各个设计任务及其相关支持信息，有助于设计人员避免不必要的设计更迭。

4 基于 DSM 的过程重构

基于 DSM 过程重构的关键是最小化设计信息反馈及其影响，通过重新排列 DSM 的行列顺序获得块三角的 DSM，并使各模块具有相对独立性，以减少与其他模块之间的信息交流，优化重组协同设计的开发过程。DSM 建立的基础是设计行为之间的信息交流，该类信息的组成是多方面的，如功能、结构、工艺等，并且设计行为之间的关联信息是引起信息交互的源头，因此，分析这类信息交互，确定耦合识别算法，并在此基础上根据 DSM 重构原则进行模块化的过程重构，是实现复杂产品协同设计的直接有效的方法。

4.1 耦合活动的识别

耦合关系常见于设计任务中，是影响产品设计开发进度和开发质量的重要因素。交互耦合活动的识别是一个用来确定设计活动中耦合任务集的过程。耦合活动集包括具有相互依赖关系的两个活动或多个活动，表示由活动之间的信息关联所构成的信息回路。耦合活动的识别过程实际上是搜索所有信息回路的过程，可以用图论的知识将其转化为求图的强连通分支问题^[9]。

定义1 在设计矩阵 A 中,当 $a_{ij} \in A, a_{ji} \in A$, 若 $a_{ij} = a_{ji} = 1$;或者 $a_{ij} = a_{ji} = \dots = a_{mi} = 1$,则称 a_i 与 a_j 或者 a_i, a_j, \dots, a_m 等活动构成的集合为耦合活动集。

定义2 设 u, v 为有向图 G 中的两个顶点,若存在 u 到 v 的通路,则称 u 到 v 是可达的;若 G 的任意两结点都是可达的,则称 G 是强连通图。

定义3 设 $G = \langle V, E \rangle$ 是有向图,其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$,并假定结点已经有了从 v_i 到 v_n 的次序,定义 n 阶方阵 $P = (p_{ij})_{n \times n}$,其中

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & v_i \text{ 到 } v_j \text{ 至少存在一条非零长度的通路,} \\ 0, & \text{否则 } i, j = 1, 2, \dots, n, \end{cases}$$

称矩阵 P 为图 G 的可达矩阵,且 $P = A^{(1)} \vee A^{(2)} \vee A^{(3)} \vee \dots \vee A^{(n)}$ ($1 \leq j \leq n$),其中 A 为 G 的邻接矩阵; $A^{(n)}$ 为 A 的 n 次幂矩阵,如 $A^{(2)} = A^{(1)} \wedge A^{(1)}$ 。

定义4 1)布尔矩阵:给定一个矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$,如果该矩阵中的元素 r_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 全部由 0 或 1 构成,则称这类矩阵为布尔矩阵。

2)布尔运算器:“ \vee ”叫做布尔或运算器;“ \wedge ”叫做布尔和运算器。

两种运算器的运算方法分别为:

布尔或	布尔和
\vee 0 1	\wedge 0 1
0 0 1	0 0 0
1 1 1	1 0 1

3)布尔和矩阵:如果 $w_{ij} = r_{ij} \wedge s_{ij}$,则矩阵 $W = (w_{ij})_{n \times n}$ 称为 R 和 S 的布尔和矩阵,此处的 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 和 $S = (s_{ij})_{n \times n}$ 均为布尔矩阵。

4)布尔或矩阵:如果 $u_{ij} = \vee_{k=1}^n (r_{ik} \vee s_{kj})$,则矩阵 $U = (u_{ij})_{n \times n}$ 称为 R 和 S 的布尔或矩阵,此处的 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 和 $S = (s_{ij})_{n \times n}$ 均为布尔矩阵。

强连通分支问题识别算法为:设 $P = (p_{ij})_{n \times n}$ 为图 G 的可达矩阵, P^T 为矩阵 P 的转置矩阵,定义 $P \cap P^T$ 算法为

$$P \cap P^T = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix} \cap$$

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{21} & \dots & p_{n1} \\ p_{12} & p_{22} & \dots & p_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{1n} & p_{2n} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} p_{11}^2 & p_{12} \cdot p_{21} & \dots & p_{1n} \cdot p_{n1} \\ p_{21} \cdot p_{12} & p_{22}^2 & \dots & p_{2n} \cdot p_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} \cdot p_{1n} & p_{n2} \cdot p_{2n} & \dots & p_{nn}^2 \end{pmatrix}$$

如果从节点 v_i 到节点 v_j 可达,则 $p_{ij} = 1$;如果从节点 v_j 到节点 v_i 可达,则 $p_{ji} = 1$;只有 $p_{ij} \cdot p_{ji} = 1$ 时,节点 v_i 与节点 v_j 相互可达。对于 $P \cap P^T$ 矩阵,如果第 i 行的非零元素存在于第 j_1, j_2, \dots, j_k 列,则节点 $v_i, v_{j_1}, v_{j_2}, \dots, v_{j_k}$ 组成一个强连通的分支,相对应的设计行为形成一个强耦合序列。

图的强连通算法为识别设计结构矩阵耦合活动集提供了有效的代数分析方法,为下一步的过程重构做好了准备。

4.2 DSM 重构步骤

DSM 的重构是通过一系列的行列变化将矩阵重置获得新的工作序列,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重复设计;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^[10]。重构步骤如下。

第一步:将 DSM 块三角化,即尽可能将 DSM 转化为下三角矩阵,对全部的设计任务进行规划,使得相互耦合的设计任务作为一个整体来考虑,对耦合活动实行归一化操作,具体算法为:

1)对 DSM 中的空行和空列进行规划,将空行对应的设计任务排在前面,空列对应的设计任务排在后面,去除已排设计任务的影响并重复这些操作,直到没有空行和空列为止。

2)对于没有空行和空列的矩阵,采用强连通分支耦合子集识别算法确定耦合设计任务集,并运用归一操作将耦合设计任务集视为一个整体设计任务进行规划。

3)重复 1,直到全部设计任务规划完毕。

当 DSM 不能完全转化为下三角矩阵时,应尽可能使矩阵模块的大小和数量最小。

第二步:对第一步 DSM 分解形成的耦合模块进行分析,将设计任务聚类、撕裂。实现耦合块内设计任务撕裂的基本策略是:识别具有最少信息输入量

的设计任务，并将其置于耦合回路的首位；当多个设计任务具有相同的信息输入量时，向后续设计任务输出最大信息量的设计任务排在前面。采用 A. Yassine 的结构灵敏度方法分析耦合设计任务的信息依赖程度^[11]，据此给出相应的撕裂算法如下：

设 A 为耦合设计任务集合， SI_i, SO_i 分别为设计任务 $i(i \in A)$ 信息输入和输出的关联程度的度量。撕裂算法为：

- 1) 对任意一个设计任务 $i \in A$ ，计算 $W_i = SI_i/SO_i$ 。
- 2) 找出 $k \in A$ ，使得 $W_k = \min\{W_i\}$ ，如果 k 的个数大于 1，先排列 SI_i 小的设计任务，后排列 SO_i 大的设计任务。
- 3) $A = A - k$ ，若 A 为空集，结束。
- 4) 对所有的 $i \in A$ ，重新计算 $SI_i = SI_i - a_{ik}$ (a_{ik} 为 A 所对应的 DSM 中的元素)；对所有的 $j \in A$ ，重新计算 $SO_j = SO_j - a_{kj}$ ；转到 1。

5 应用实例

以某型号飞行器为研究对象，具体来看基于 DSM 的过程重构在多领域协同设计中的简单应用。飞行器的设计涉及外形、空气热力学分析、空气动力学分析、飞行轨道分析、推进设备的设计以及飞行器本身的结构设计等多个领域。首先对各领域之间的设计信息交互进行分析，选取最重要的关联最为密切的 6 个设计任务，进行协同设计，根据设计工作流程图获得完整的 DSM 量化表达，如图 2 所示。

	A	B	C	D	E	F
A 外形设计	A	0	0	0	0	1
B 空气热力学分析	0	B	0	0	0	0
C 空气动力学分析	0	1	C	0	0	0
D 飞行轨道分析	0	0	0	D	1	0
E 推进设备的设计	1	0	1	0	E	0
F 飞行器结构设计	0	1	1	1	0	F

图 2 某飞行器的设计结构矩阵

Fig.2 The DSM for an aircraft

再根据强连通分支算法，识别并确定耦合活动集，分别是 {活动 B、活动 C}，{活动 A、活动 F、活动 E}，分别称为耦合活动集 1、耦合活动集 2，归一化处理以后重新排序，得到新的设计顺序为耦合活动集 1 → 活动 D → 耦合活动集 2，如图 3 所示，其中耦合

活动集 1 与活动 D 为并行活动，并同时向耦合活动集 2 传递设计信息，协同设计中的信息流如图 4 所示。

	B	C	D	A	F	E
B 空气热力学分析	B	1	0	0	0	0
C 空气动力学分析	1	C	0	0	0	0
D 飞行轨道分析	0	0	D	0	0	1
A 外形设计	0	0	0	A	1	0
F 飞行器结构设计	1	1	1	0	F	0
E 推进设备的设计	0	1	0	1	0	E

图 3 设计结构矩阵中识别后的耦合活动集

Fig.3 The coupling activities in DSM after recognition

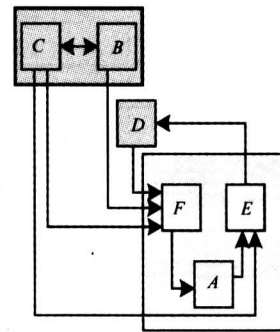


图 4 基于耦合活动的协同设计信息流

Fig.4 The cooperative design flow diagram based coupling activities

通过耦合识别，使得原来设计关系复杂的各个领域转化为耦合紧密的模块，可以在耦合模块内部进行信息交互，并行协同地进行设计，再以模块为单位进行系统层面的信息交互，减少单个领域耦合带来的影响，避免了大面积的设计反馈，缩短了产品的设计周期，保证了产品质量。

耦合活动对协同设计的影响很大，耦合模块内部的设计任务排序对于整个协同设计的过程重构也至关重要，它与飞行器设计知识密切相关，一般依据设计专家的经验确定信息输入和信息输出关联程度的大小。以耦合活动集 2 模块为例，利用撕裂算法计算 W_i ，见表 1。

由表 1 可知， W_i 值由小到大的排序为活动 F、活动 E、活动 A，其中活动 F 的 W_i 值最小，在耦合模块中应优先进行设计。依次类推其他耦合模块中的设

设计任务,获得飞行器协同设计过程中基于整个 DSM (包括耦合子集内部)设计排序后的过程重构,如图 5 所示。

表 1 W_i 的计算

Table 1 The results of calculating W_i

	SI_i	SO_i	W_i
活动 A	0.85	0.65	1.308
活动 F	0.25	0.75	0.333
活动 E	0.45	0.55	0.818

	B	C	D	A	F	E
B 空气热力学分析	B	1	0	0	0	0
C 空气动力学分析	1	C	0	0	0	0
D 飞行轨道分析	0	0	D	0	0	1
F 飞行器结构设计	1	1	1	0	F	0
E 推进设备的设计	0	1	0	1	0	E
A 外形设计	0	0	0	A	1	0

图 5 重构后的某飞行器设计结构矩阵

Fig.5 The reconfiguration DSM for an aircraft

整个飞行器的协同设计过程是采用三维 CAD/CAE 技术实现数字虚拟样机的试制,简化了设计迭代,减少了无意义的设计输出,减轻了实际生产的压力,降低了产品成本。

6 结论

在协同设计中对产品开发过程的信息交互进行分析,建立量化的设计结构矩阵(DSM),矩阵的行表示该设计行为从其他哪些活动中获得信息,矩阵的列表示该设计行为的输出将影响哪些其他活动。可以通过将矩阵变换为分块的三角矩阵形式来实现协同设计中的过程重构。先利用强连通算法获得耦合子集,再通过设计任务撕裂算法对耦合模块内部的设计行为进行排序,获得基于 DSM 的协同设计优化组合。通过这种变换,DSM 主对角线上各耦合块之间不再存在设计循环,可以并行地进行协同设计。由于设计行为的任务结构没有变化,所以设计迭代依然存在,只是这些设计迭代被包含在耦合块中。在耦合块中,存在频繁的通信联系,而在块与块之间也存在偶尔的信息交互,这种集中化是分布式协同设计的前提,其结果形成了集中在某

些确定设计行为上的信息交互和通信要求。基于 DSM 的过程重构通过分析信息交互,识别耦合活动集,撕裂块内设计任务等步骤,获得协同设计开发过程的优化重组,为复杂产品的开发提供了一种有效的解决方法。但是对于设计活动之间的重叠部分,DSM 没有能够给出清晰的解决方法,对于带有条件约束的大规模的设计行为过程重构也难以处理,这些内容有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Carter D E, Baker B S. Concurrent Engineering: The Product Development Environment for the 1990s [M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1992
- [2] Eppinger S D, Whitney D E, Smith R P. A model-based method for organizing tasks in product development [J]. Research in Engineering Design, 1994, 6 (1): 1~13
- [3] Wu Cheng. Introduction to Contemporary Integrated Manufacturing System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
- [4] Steward D V. System Analysis and Management: Structure, Strategy and Design [M]. New York: Petrocelli Books, 1981
- [5] 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, 2001, 48 (3): 292~306
- [6] 徐路宁, 张和明, 张永康. 设计结构矩阵在复杂产品协同设计过程的应用 [J]. 中国工程科学, 2005, 7 (6): 41~44
- [7] 芮延年, 刘文杰, 郭旭红. 协同设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [8] 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
- [9] 傅彦, 顾小丰. 离散数学及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1997
- [10] Smith R P, Eppinger S D. A predictive model of sequential iteration in engineering design [R]. MIT Sloan School of Management, Working Pap No 3160, Cambridge (Mass), 1996
- [11] Yassine A, Falkenburg D, Chelst K. Engineering design management: an information structure approach [J]. International Journal of Production Research, 1999, 37 (13): 2957~2975

Research on Process Reconfiguration With DSM in Collaborative Design

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**] Design structure matrix is applied to the collaborative design process for complex products. The recognition problem of coupling activities in DSM can be solved by graph theory knowledge. And a method for reconfiguration of DSM blocking is presented according to the principles. Then, reengineering for a design process is proposed by decomposing and tearing the blocked activities to shorten the cycle of design and reduce the cost of development. Finally, a case, the aircraft design process reconfiguration with DSM, is presented.

[**Key words**] DSM (design structure matrix); process reconfiguration; coupling; tearing

(cont. from p.32)

A Novel Method of Constructing Complex Information System ——Multi-living Agent Method

Wang Yue

(*Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

[**Abstract**] Based on the system theories, this paper discusses the characteristics of complex information system under the strong restraint and strong antagonism conditions and proposes a novel method of constructing complex information system, i. e. multi-living agent method (MLAM). Then, the relationship and the difference between the fundamental meaning of MLAM and the existing system theories are studied. Finally, the research scopes of MLAM are outlined and two examples are given to illustrate this method. It is hoped that the proposal of MLAM can help develop a new research field and more people devote to this field.

[**Key words**] multi-living agent; complex information system; system theory