

文章编号:1672-3961(2008)02-0037-05

一种改进的产品设计耦合活动迭代模型

张金标

(铜陵学院机械系, 安徽 铜陵 244000)

摘要:质量、成本和时间三要素在产品开发过程中是相互影响相互制约的,不能片面追求某一方面.在产品阶段,这三要素关系更是复杂,主要是因为设计过程自身存在大量的耦合活动,导致设计过程重复.因此,如何模拟设计迭代过程在满足设计资源许可的前提下平衡设计三要素已成为当前研究的一个重点.建立在工作转移矩阵(WTM)基础上的分析模型(M-WTM),分析设计活动间的相互依赖关系,模拟、评价迭代设计过程,根据设计资源许可条件,实现完全串行、完全并行和混合三种方式进行产品设计迭代.型钢产品开发设计过程的模拟仿真,验证了该模型的有效性.

关键词:产品迭代设计;混合迭代;M-WTM模型

中图分类号:TH122 **文献标志码:**A

An improved iteration model for coupled activities in product design

ZHANG Jin-biao

(Department of Mechanical, Tongling College, Tongling 244000, China)

Abstract: The three determinants for a successful product development are higher quality, lower cost and shorter time-to-market. These determinants interact with each other in the whole process of product design and the emphasis on any one of them will induce the cost of others. The needed balance among them is extremely complex, especially in the design process, which is a major part of the product development processes. The primary problems lie in that a design process inherently contains a number of coupling activities, which imply potential iteration of the process. Hence, how to model the design iterations and seek the balance on allocating limited resources to facilitate each of the three determinants for an iterative design process has become one focus of recent research. An analytical model (M-WTM) is presented for modeling design iterations and providing estimates in terms of time, costs, and resources by dint of detailed analysis of the interrelationship among design activities, which is based on the work transformation matrix (WTM). According to the resources, this model will tackle purely sequential iteration, purely parallel iteration or mixed iteration. A complicated example, profiled bar product development design, was employed to illustrate the effectiveness of M-WTM.

Key words: product design iteration; mixed iteration; M-WTM model

0 前言

作为现代集成制造业产品开发过程的重要组成

部分,产品设计已被看作是企业竞争能力高低的标志.有效的产品设计,兼顾产品的质量、成本、上市时间三要素,是新产品开发获得成功的关键之一.因此,研究者和企业都一直注重研究产品设计过程管

收稿日期:2007-03-15

基金项目:安徽省教育厅自然科学基金资助项目(2005KJ048)

作者简介:张金标(1971-),男,安徽繁昌人,副教授,硕士,研究方向为并行工程、材料成型理论与工艺.

E-mail: zhangjb093@163.com

理的理论和方法.一个复杂的产品设计过程包含多个设计活动(任务),而这些设计活动之间又存在设计信息上的依赖,部分活动还相互耦合.这种耦合将导致设计过程重复或局部重复,即设计迭代.迭代时间可占产品开发周期的三分之一^[1].因此,分析、模拟设计迭代过程是进行产品有效设计的基础. Osborne SM, Steward DV 等^[2]提出的设计结构矩阵(DSM——design structure matrix),是最早用数学方法来描述设计活动间的信息关系.肖人彬、胡长建等利用 DSM 识别耦合活动,通过并耦、断耦等操作,重构设计过程,为设计过程规划提供了一种分析模型^[3-6].工作转移矩阵(WTM——work transformation matrix)是一种量化的 DSM,它不仅能表示设计活动间信息依赖关系,而且还能定量描述信息依赖程度的大小. Eppinger SD, Smith RP, 郭伟等运用 WMT 产生了完全串行迭代模型即马尔科夫链式的迭代设计^[7]和完全并行迭代模型^[8-10],它们都有各自的特点和实用价值.分析了完全并行迭代和完全串行迭代的不足,提出了一种混合迭代设计的分析模型.它在 WTM 基础上,引入一种多参数任务转移矩阵(M-WTM——multi-parameter work transformation matrix),运用 M-WTM 模拟、分析产品设计耦合活动信息关系和执行关系,建立了并行迭代和串行迭代混合进行的一种混合迭代模型.该模型更符合先进设计理论——并行设计^[11]的要求.

1 设计活动的信息关系和执行关系

1.1 设计活动的信息依赖关系

产品设计过程的各活动存在着复杂的信息依赖关系,例如某设计过程中部分设计活动[1,2,3,4,5,6,7],DSM 如表 1 所示,矩阵中的元素 $a_{ij} = 1$ 或 0,其中 $i, j = 1, 2, 3, \dots, 7$.当活动 j 对活动 i 有信息输出时, $a_{ij} = 1$;当活动 j 对活动 i 没有信息输出时, $a_{ij} = 0$.设计活动间信息依赖关系从信息流角度看有三种形式,如图 1 所示.

表 1 DSM 示例

Table 1 An Example of DSM

ID	1	2	3	4	5	6	7
1							
2	1						
3		1					
4	1	1					
5		1	1	1		1	1
6	1	1		1	1		1
7	1				1	1	

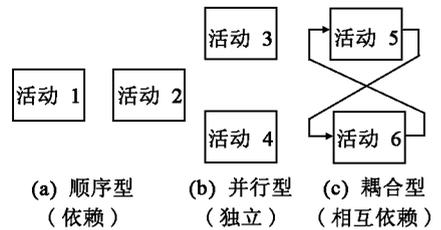


图 1 活动间的三种关系

Fig. 1 Three relations between activities

(a) 顺序型:一个活动执行需要前一活动执行后的信息输出作为输入才能开始,即活动间有先后依赖关系,如活动 2 与活动 1;

(b) 并行型:活动间可独立执行,即活动间无信息依赖关系,如活动 3 与活动 4;

(c) 耦合型:活动间存在双向信息交互,即活动间有相互依赖关系,如活动 5 与活动 6.通常这种信息双向交互需要多次反复(迭代).耦合活动是产品设计中普遍存在的,是影响产品的设计、开发进程和开发质量的重要因素^[12].

1.2 耦合活动执行方式

对于并行型、顺序型活动构成的设计过程,规划理论与技术已有很多,如关键路径法(CPM)、计划评审法(PERT)、启发式算法^[13]、遗传算法^[14]等,这里不再重述.着重研究存在耦合型活动的设计过程分析模型.这里将产品迭代设计的一个迭代过程称为一个设计阶段.在一个设计阶段内,耦合设计活动执行顺序关系定义为三种方式,如图 2 所示(以表 1 中的耦合活动 5,6,7 为例).

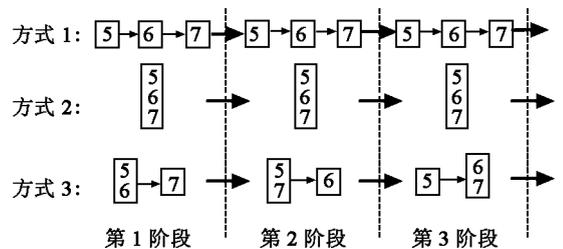


图 2 活动执行顺序

Fig. 2 The execution sequences for activities

方式 1:在一个设计阶段内依次执行完每个设计活动后,再开始下一个设计阶段,直到设计过程结束,这种方式称为完全串行迭代(简称串行迭代).这种方式对设计资源数量需求小,但设计迭代时间和产品开发周期长,不符合快速响应市场需求的现代产品开发理念.

方式 2:在一个设计阶段内所有设计活动都同时开始执行,活动全部执行结束后再进入下一个设计阶段,这种方式称为完全并行迭代(简称并行迭代).该方式迭代时间短,但对设计资源尤其对设计

人员数量需求大,对于大型产品设计过程很难实现.

方式3:在一个设计阶段内,部分活动串行执行,部分活动并行执行,这种方式称为混合迭代.混合迭代既满足设计资源约束,同时又能缩短迭代周期,充分体现并行设计思想^[15]的特点.便于描述某一设计阶段(如 k 阶段)的耦合活动执行关系,定义一个 $n \times n$ 执行状态矩阵(ESM—executing state matrix), n 是耦合活动数,各元素取值:

$$s_{ij}^k = s_{jk}^k = \begin{cases} 0, & i = j, \\ 1, & i \neq j, \text{活动 } i \text{ 和 } j \text{ 并行执行}, \\ 0, & i \neq j, \text{活动 } i \text{ 和 } j \text{ 串行执行}. \end{cases} \quad (1)$$

2 耦合活动混合迭代模型

2.1 M-WTM 数学模型

M-WTM 结构、内涵与 WTM 相似,如表2所示.在 M-WTM 中,对角元素表示设计活动独立执行时的持续时间;非对角元素是一个二元参数,如 (a_{12}^s, a_{12}^p) ,表示在串行执行或并行执行时,活动1单位工作量执行后引起活动2大小为 a_{12}^s 或 a_{12}^p 重复工作量.在相同的条件下,与串行执行相比较,两活动并行执行可以实现信息实时交互,执行后引起对方重复工作量会减小,即 $a_{12}^p \leq a_{12}^s$.

表2 M-WTM 结构示意图

Table 2 The structure Symbol of M-WTM

活动 ID	1	2
1	d_1	(a_{12}^s, a_{12}^p)
2	(a_{21}^s, a_{21}^p)	d_2

2.2 工作量计算模型

用 $n \times n$ 方阵 A_k 表示对于有 n 个设计活动的迭代设计过程,在 k 阶段结束时,各活动单位工作量引起其它活动的重复工作量矩阵,元素取值如下:

$$a_{ij}^k = \begin{cases} 0, & i = j \text{ 时, 活动自身无重复工作量}, \\ a_{ij}^p, & i \neq j \text{ 时, 活动 } i \text{ 和 } j \text{ 并行执行}, \\ a_{ij}^s, & i \neq j \text{ 时, 活动 } i \text{ 和 } j \text{ 串行执行}. \end{cases} \quad (2)$$

即

$$a_{ij}^k = s_{ij}^k \cdot a_{ij}^p + (1 - s_{ij}^k) \cdot a_{ij}^s. \quad (3)$$

k 阶段各活动的实际完成工作量、重复工作量和剩余工作量分别用向量 U_k^c , U_k^r 和 U_k 来表示.完成工作量设为前一阶段的剩余工作量,若某活动本阶段没有被执行则其完成工作量设为零.迭代设计开始前,剩余工作量向量 U_0 设为单位向量,即每个活动第一次执行前的剩余工作量大小为单位1.设重复工作量与完成工作量成线性关系.对于一个有

实际意义的产品设计过程,设计迭代过程应该是收敛的,也就是要求 U_k^r 和 U_k 收敛于零.文献[12]研究表明,只要 A_s (串行执行方式下的 A_k)的最大特征值小于1,迭代设计就能收敛.并行执行或混合执行方式下,设计信息实时交互效果增加,设计迭代过程是缩减的,因此更容易收敛. U_k^r 和 U_k 可用下式计算:

$$U_k^r = A_k U_k^c, \quad (4)$$

$$U_k = U_{k-1} + U_k^r - U_k^c. \quad (5)$$

可以看出:不同设计阶段活动执行状态不完全相同,可能存在不同的未执行活动,所以 U_k 与 U_k^r 不一定相等, U_k^r 与 U_{k-1} 不一定相等.这是混合执行方式与并行执行方式的根本不同之处.

2.3 持续时间计算模型

设耦合活动独立执行持续时间向量为 D , k 阶段并行执行的活动集合为 AP_k ,串行执行的活动集合为 AS_k .迭代时间可用下式计算:

$$l_{k,i} = \bar{\omega}_{k,i} d_i, d_i \in D, \quad (6)$$

$$L_k = \max_{i \in AP_k} \{ l_{k,i} \} + \sum_{i \in AS_k} l_{k,i}, \quad (7)$$

$$\text{Lead-time} = \sum_{k=1}^m L_k. \quad (8)$$

式中: d_i ——活动 i 独立执行时的持续时间;

$\bar{\omega}_{ki}$ —— k 阶段活动 i 的完成工作量,即 U_k^c 中相应元素;

l_{ki} —— k 阶段活动 i 执行的持续时间;

L_k —— k 阶段的持续时间;

Lead-time——产品迭代设计过程的持续时间;

m ——产品设计迭代次数.

2.4 设计费用计算模型

产品设计费用是产品开发成本的重要组成部分,降低设计费用也是产品设计过程管理追求的目标之一.这里用向量 C 表示耦合活动单位执行时间内的平均设计费用向量, $C = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_n]$.则产品迭代设计过程总费用计算如下:

$$\text{En-cost} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m l_{k,i} \cdot c_i. \quad (9)$$

式中:En-cost——产品迭代设计过程的总费用;

n ——产品设计活动数;

m ——产品设计阶段数;

$l_{k,i}$ ——第 k 阶段活动 i 的持续时间;

c_i ——活动 i 执行时的单位费用.

3 算例仿真

用本文算法模拟仿真某钢铁企业的型钢产品开

发设计过程.对工程设计人员进行调研,建立型钢新产品开发设计过程的 M-WTM,如表 3 所示.活动设计费用向量为 $C = [3, 6, 10, 8, 9, 12, 7, 8, 9, 11, 4]$, 单位:元/h.依据工程设计人员的描述,将设计活动间信息依赖度用“大”、“中”和“小”或“ b ”,“ m ”和“ s ”来表示,在串行迭代设计方式下,“大”、“中”和“小”信息依赖度将引起相应活动 0.3, 0.2 和 0.1 工作量的重复.在相同条件下并行迭代设计时信息实时交互,重复工作量下降,设为串行迭代设计的 80%.该企业有三名工程设计人员专职从事型钢产品开发设计,他们能独自承担各个设计活动.也就是说设计资

源只有一种即 $R_1 = 3$,实际设计迭代过程中任一时刻最多只能有 3 个活动并行执行.在一个设计阶段,并行设计活动集合根据设计资源利用率最大化规则随机产生.用 Matlab7.0 编程在 PC 机(Pentium IV 1.8 GHz)仿真本文算法,模拟设计活动的迭代过程,令设计过程收敛准则为

$$u_{k,i}^r < w \quad u_k^r \in U_k^r, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (10)$$

$$u_{k,i} < w \quad u_k \in U_k, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (11)$$

式中: k ——设计迭代的第 k 阶段;

w ——设计迭代精度,一个正的小数.

表 3 型钢产品开发设计 M-WTM
Table 3 M-WTM for profiled bar product development design

活动名称	ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
产品设计与分析	1	6	m						s			
轧制生产方案设计	2	m	20	s	m	s				m		
轧制生产工艺设计	3	m	s	68	m		s			s		
轧制生产设备选择	4	s	b	b	18				s	b		
孔型系统设计	5	b			s	40						
孔型配辊	6		m	m		b	20	m	m			
轧辊设计	7	s	s			s	b	72	b			
轧辊 CAE 分析	8			m	s		m	m	16			
设备 CAE 分析	9		m	s	m					19		
导卫装置设计	10	m		m		b	b				22	
CAD 绘图	11					m	m	m			s	18

仿真结果如图 3 所示:

(1) 串行迭代时:迭代持续总时间 634 h, 迭代总费用 5342 元;

(2) 并行迭代时:迭代持续总时间 195 h, 迭代总费用 6462 元;

(3) 混合迭代时:迭代持续总时间 453 h, 迭代总费用 5958 元.

是不可取的;并行迭代时间最短而费用最高;混合迭代的时间、费用都在前两者之间,是比较适中的.本例并行迭代时间比混合迭代缩短 258 h,比串行迭代缩短 439 h,工程费用却相应高出 534 元和 1120 元;另一方面,并行迭代需要与设计活动相同数目的设计人员,这对大型设计项目是难以实现的;串行迭代只需一位设计人员,可能造成人员过剩;混合迭代根据企业实际资源条件适时调整并行活动数量,是合理的.因此,根据不同的产品设计目标选用不同的迭代方式,这是本文迭代模型的特点.

4 结束语

在 DSM 和 WTM 基础上,提出一个 M-WTM 迭代设计过程分析模型.该模型体现了产品迭代设计的特性,从持续时间、工程费用和设计资源角度模拟、评估复杂产品迭代设计过程,实用而简便.M-WTM 模型能处理完全串行迭代、完全并行迭代和混合迭代三种方式下的产品迭代设计过程,充分利用已有的设计资源进行产品开发设计,最大限度的缩短设计周期、降低设计成本.算例仿真表明该模型是有效

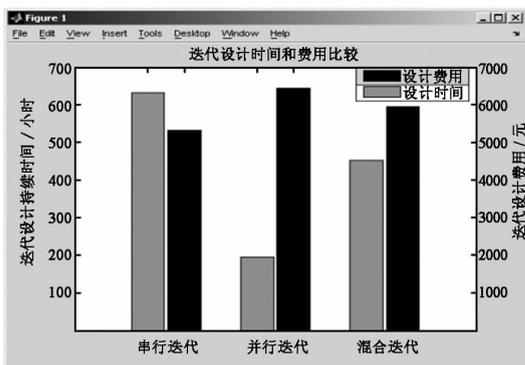


图 3 三种迭代设计时间与费用比较

Fig.3 The comparison of lead-time cost for the 3 Sequence

可以看出不同迭代方式下,产品设计过程持续时间和设计费用是各不相同的.串行迭代时间太长,

性的.基于混合迭代模型的耦合活动调度算法如遗传算法等将是进一步研究的内容,以便更好的规划耦合活动调度过程.

参考文献:

- [1] OSBORE SM. Product development cycle time characterization through modeling of process iteration[D]. Cambridge U K: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [2] STEWARD DV. The design structure system: a method for managing the design of complex system[J]. IEEE Trans Eng Manage, 1981, 28:71-74.
- [3] 肖人彬,费奇.改进的结构建模方法在煤矿综合管理中的应用[J].系统工程理论与实践,1997,(3):57-62.
XIAO Ren-bin, FEI Qi. Application of the improved method in structural modeling to comprehensive management of mine bureaus[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1997, (3):57-62.
- [4] 胡长建,郑力,杨志忠,等.设计过程信息建模及重组集成框架研究[J].中国机械工程,2003,14(20):1748-1752.
HU Chang-jian, ZHENG Li, LI Zhi-zhong, et al. A study on a integrated framework of information modeling and re-engineering for design process[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(20):1748-1752.
- [5] 张金标.铝型材产品并行开发过程的结构化模型研究[J].铝加工,2004,(6):38-42.
ZHANG Jin-biao. Research on structured model of concurrent development of aluminum profiles[J]. Aluminum Fabrication, 2004, (6):38-42.
- [6] 张东民,廖文和,罗衍领.基于设计结构矩阵的设计过程建模研究[J].应用科学学报,2004,22(4):518-522.
ZHANG Dong-min, LIAO Wen-he, LUO Yan-ling. A study on the modeling of a design process based on the design structure matrix[J]. Journal of Applied Sciences, 2004, 22(4):518-522.
- [7] SMITH RP, EPPINGER SD. A predictive model of sequential iteration in engineering design[J]. Manage Science, 1997, 43(8):1104-1120.
- [8] SMITH RP, EPPINGER SD. Identifying controlling features of engineering design iteration [J]. Manage Science, 1997, 43(3):273-293.
- [9] 鄂明成,郭伟,查建中,等.并行设计中任务量与时间模型的研究[J].计算机辅助设计与图形学报,1997,9(2):104-112.
E Ming-cheng, GUO Wei, ZHA Jian-zhong, et al. Study on task load and time model in concurrent design[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 1997, 9(2):104-112.
- [10] 郭伟,欧阳效辉,王凤歧.基于产品数据管理的设计过程分析模型研究[J].计算机集成制造系统——CIMS, 2001,7(2):30-34.
GUO Wei, OUYANG Xiao-hui, WANG Feng-qi. Analytical design process model based on PDM[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7(2):30-34.
- [11] 陈科.基于并行思维的设计理念和设计方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2001.
CHEN Ke. Study on design theory and design methods based on concurrent engineering[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2001.
- [12] EPPINGER SD. Model-based approaches to managing concurrent engineering[J]. Journal of Engineering Design, 1991, 2(3):283-290.
- [13] 张金标,林云志,张红云.模具并行开发活动规划理论和方法研究[J].锻压装备与制造技术,2005,40(1):81-84.
ZHANG Jin-biao, LIN Yun-zhi, ZHANG Hong-yun. Research on theories and methods for die and mould concurrent development[J]. China Metal forming Equipment & Manufacturing Technology, 2005, 40(1):81-84.
- [14] 张金标,林云志,张红云.基于混合遗传算法产品并行开发活动规划的研究[J].轻工机械,2007,25(2):138-141.
ZHANG Jin-biao, LIN Yun-zhi, ZHANG Hong-yun. Research on activities scheduling for product concurrent development based on hybrid genetic algorithms[J]. Light Industry Machinery, 2007, 25(2):138-141.
- [15] 张金标.基于并行工程的模具开发理论和方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2004.
ZHANG Jin-biao. Study on development theories and methods of die and mould based on concurrent engineering[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.

(编辑:陈燕)