

可变功能产品功能使用模型及基于模型的关联耦合性分析

王根华*, 邓益民*, 邹长武

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 开展可变功能产品的构件关联性与功能耦合性的研究对设计该类产品有着重要的实用价值. 针对现有研究未能考虑功能使用情况的不足, 提出了可变功能产品功能使用模型的概念, 通过对各可变功能附加使用情况信息, 构建了可用以描述同一产品不同使用情况的功能使用模型; 随后将功能使用模型与功能-构件关联矩阵相结合, 提出了一种考虑功能使用情况的构件关联性与功能耦合性的量化方法. 最后, 通过一可变功能料理机的案例, 阐述了该方法的可行性及实施过程, 并基于构件关联性和功能耦合性的求解结果, 得出了对设计面向使用的产品或对现有产品进行改进设计具有指导意义的结论.

关键词: 可变功能产品; 功能使用模型; 构件关联性; 功能耦合性

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 06-0048-05

可变功能产品是一类以更换系统构件或调整构件之间连接方式来获得多项功能的特殊产品^[1]. 该类产品的典型特点是一机多用、结构紧凑. 根据设计领域的“功能-行为-结构”及相关理论设计方法^[2-4], 功能是产品设计的总要求, 结构是产品实现功能的最终方式, 是设计的实体与本质部分. 功能的耦合性以构件的关联性为基础, 又对其产生影响. 对构件关联性的分析可以厘清各构件之间的相关性, 识别出关键构件; 而功能耦合性的研究对设计方案的形成、修改、分析等也有着重要的作用. 目前, 国内外已有较多针对功能耦合性和构件关联性的研究, 如张国军等^[5]针对复杂产品可适应设计中出现的耦合问题, 提出一种通过分解与割裂进行耦合功能规划的新方法; 陈羽等^[6]针对异构模块之间的耦合问题, 提出运用完全关联矩阵来表达参数之间关联关系的方法; 曹鹏彬等^[7-8]就公理化设计问题给出了耦合分析与解耦的方法; Chen等^[9-10]基于设计关联矩阵分析了产品内部的耦合关系, 为解决复杂产品的快速再设计问题提供了思路; 余远文等^[11]通过构建构件全关联矩阵的方法对产品各功能之间的耦合性问题进行了定量分

析. 这些研究大都不是针对可变功能产品, 所获得的构件关联性及功能耦合性结果对可变功能产品而言还存在诸多不足, 例如可变功能产品的构件关联性和功能耦合性除了受产品系统本身影响以外, 还受各功能使用情况的影响. 以一种多功能微耕机为例, 微耕机通过更改系统构件的连接方式可以实现旋耕、脱粒、抽水、喷药、发电、运输等功能, 如果该产品的旋耕与运输功能使用得相对较多一些, 则可认为在使用上这2个功能之间的耦合性较高, 与其相关的构件的关联性也更复杂.

有关可变功能产品的研究目前还较为少见, 为此, 本文在现有研究的基础上, 考虑可变功能产品的各功能使用情况, 开展更为完整的构件关联性与功能耦合性研究, 提出功能使用模型的概念及构件关联性与功能耦合性的量化方法, 进而得到一些对此类产品设计有指导意义的准则.

1 功能使用模型

对于可变功能产品而言, 其使用情况对概念设计或再设计都有重要的影响. 比如使用频率较高的两个功能其相关构件间的关联性更强, 应该

收稿日期: 2017-03-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51375246).

第一作者: 王根华(1989-), 男, 山东济宁人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计理论与方法. E-mail: wanggenhua5211@163.com

*通信作者: 邓益民(1966-), 男, 安徽舒城人, 博士/教授, 主要研究方向: 设计理论与方法、注塑成型与优化. E-mail: dengyimin@nbu.edu.cn

将其设计得更方便使用, 减少功能切换时间, 其结构及材料的可靠性应更高, 使用及维护的方便性也应更强等等. 因此, 分析可变功能产品的构件关联性与功能耦合性有必要分析各功能的使用情况.

在先前的研究中提出了功能使用度的概念^[12]. 假设可变功能产品由 m 个构件组成: $A_1, A_2, \dots, A_m$, 可以实现 n 种功能: $F_1, F_2, \dots, F_n$. 定义功能 F_i 的使用时间或次数 x_i 与该产品使用时间或次数 X (X 只对应产品的工作状态) 的比值为 F_i 的功能使用度 w_{F_i} :

$$w_{F_i} = x_i / X. \quad (1)$$

可变功能产品各功能所对应的功能使用度可能各不相同, 这一特性称为功能使用非均衡性. 为定量表述该非均衡性, 引入非均衡性指标 B ^[12]:

$$B = 1 - \sqrt{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_{F_i} - \frac{1}{n})^2}. \quad (2)$$

当可变功能产品各功能使用越不均衡(如只使用其中一个功能)时, B 值越小, 且 $B_{\min}=0$. 各功能使用越均衡时, B 值越大, 且 $B_{\max}=1$.

对产品关联耦合性分析的目的是得出有助于产品改良升级或再设计的有用结论, 而常规设计方法之中未能考虑功能使用情况对产品关联耦合性的影响, 这就可能使得所得结论不能很好地指导产品再设计. 为此, 需要将产品的功能使用情况纳入产品的常规设计信息之中. 也就是说, 传统的产品设计信息模型应该加以扩充, 形成更为全面的“设计-使用模型”. 为了解决这一问题, 本文引入广义集合的表达方法. 广义集合区别于一般集合之处在于, 在描述组成集合的元素时, 不仅列出各元素(标志)是什么, 还一并列出各元素在集合中的个数(标志值)是多少, 因而是一种描述总体(客观事物)内部某个标志(属性)的差异和对应的数量多少的统一、简练、定量的模型^[13]. 如水的化学式 H_2O 用广义集合可表示为 $A=\{2H+O\}$ (“+”无数学意义, 仅表示连接). 具有 n 种功能的可变功能产品可用广义集合表示为 $A=\{x_1F_1+x_2F_2+\dots+x_nF_n\}$, 简记为 $A=\sum_{i=1}^n x_i F_i$, 其中 $\sum_{i=1}^n x_i = X$.

借鉴广义集合表达方法并结合功能使用非均衡性的概念, 可用集合来构建功能使用模型, 即:

$$U = \{\sum_{i=1}^n x_i F_i, B\}. \quad (3)$$

2 基于功能使用模型的构件关联与功能耦合性

2.1 功能-构件关联矩阵

可变功能产品所实现的多种不同功能依赖于产品构件或连接方式的改变, 即不同功能对应不同的产品结构构成. 为了开展可变功能产品的构件关联性与功能耦合性研究, 本节首先简介一下我们在以前的研究中所提出的可变功能产品功能-构件关联矩阵^[6,11], 如表 1 所示. 该表格反映了可变功能与产品结构构件的两种关联: 直接关联, 间接关联. 若构件 A_j 直接参与了功能 F_i 的实现过程, 则二者之间的关系为直接关联关系, 记为 $\langle F_i, A_j \rangle$, 其赋值为 1.0; 间接关联记为 $\langle F_i, A_j \rangle = Q_{ij}$, Q_{ij} 介于 0~1 之间, 反映构件 A_j 对 F_i 发挥间接作用, 详见文献[11]. 功能-构件关联矩阵记录了可变功能产品各功能与构件的不同程度的关联情况并对其加以量化, 本文记之为 $G_{n \times m}$ (表 1 为一个示例).

表 1 功能-构件关联矩阵 $G_{n \times m}$

功能	A_1	A_2	$\dots$	A_m
F_1	1.0	Q_{12}		1.0
F_2	Q_{21}	1.0		Q_{2m}
			$\dots$	
F_n	1.0	Q_{n2}		Q_{nm}

2.2 构件关联性

由功能-构件关联矩阵 $G_{n \times m}$ 知, 表格中每一列对应元素表征该构件与产品各功能之间的关联情况, 但这种关联情况并未考虑到功能的使用情况. 为此, 本文将各功能的功能使用度 w_{F_i} 作为加权系数施加到关联矩阵中, 规定:

$$\langle F_i, A_j \rangle' = w_{F_i} * \langle F_i, A_j \rangle. \quad (4)$$

相应地, 将各构件的关联性定量表达为(为了方便识别对应关系, 我们直接用构件符号 A_j 表述其相对于各功能的关联值):

$$A_j = \sum_{i=1}^n \langle F_i, A_j \rangle' / \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \langle F_i, A_j \rangle'. \quad (5)$$

A_j 值 ($j = 1, 2, \dots, m$) 越大表明该构件占全部构件相对于各功能的关联性的比例越大, 对产品各功能的贡献越大, 因此设计时其结构及材料的可靠性应该更高, 使用及维护的方便性也应该更强.

2.3 功能耦合性

如前所述, 功能耦合性受两方面的影响, 包括

产品结构系统和功能使用情况. 就产品结构而言, 根据各功能实现时是否有共享构件的参与以及共享构件的共享情况, 可分为成无耦合、次耦合和耦合结构系统 3 种类型: 若各功能相互独立, 且无任何共享构件, 则为无耦合结构系统; 若功能之间有联系, 且有共享构件, 但不存在一个构件是全部功能所共享的, 则为次耦合结构系统; 若至少存在一个构件为所有功能所共享, 则为耦合结构系统. 就功能使用情况而言, 可以应用产品的功能使用模型 U 表达其对功能耦合性的作用. 产品结构的耦合性影响了产品各功能的使用情况; 反之, 产品各功能的使用情况又会对系统结构的耦合性产生一定的影响, 进而对产品构件的关联性产生影响, 具体包括 3 种情况: (1) 两功能之间共享构件数的影响. 在其余条件不变的情况下, 两功能之间存在的共享构件数量越多, 则两功能之间的耦合性越强; (2) 与两功能有直接关联关系的构件数的影响. 在两功能之间共享构件数目一定的前提下, 与两功能直接相关的所有构件的数目越少, 则两功能间的耦合性越强; (3) 两功能的使用情况的影响. 在上述两条件均一定的前提下, 两功能的功能使用度之和越大且越均衡, 则两功能之间的耦合性越强.

以一可变功能产品为例, 设其可实现功能 $F_u, F_v, u \neq v$. F_u 与 F_v 之间共享构件数为 $t, 0 \leq t \leq m$. 与 F_u 直接相关的构件数为 $r+t, 0 \leq r+t \leq m$. 与 F_v 直接相关的构件数为 $s+t, 0 \leq s+t \leq m$. 剔除共享构件, 依据 $G_{n \times m}$ 中与 F_u 和 F_v 所对应的行元素中构件进行从左到右编码, 依次记为 $A_1, A_2, \dots, A_{Rs}$, 其中 $0 \leq Rs = r+s \leq m$. 则功能 F_u 与 F_v 之间耦合度为:

$$C_{F_u, F_v} = \frac{2w_{F_u}w_{F_v}}{(Rs+t)(w_{F_u}+w_{F_v})} \left(\sum_{i=0}^{Rs} (<F_u, A_i> + <F_v, A_i>) + 2t \right) \times 100\%. \quad (6)$$

规定: 式中 $<F_u, A_0> = <F_v, A_0> = 0$. 式(6)中元素 $<F_u, A_i>$ 与 $<F_v, A_i>$ 数值需要参考编码之前的功能-构件矩阵 $G_{n \times m}$ 所对应元素值. 当两功能对应构件全为共享构件(即 $Rs=0$), 两功能的功能使用度之和最大、使用最均衡($w_{F_u} = w_{F_v} = 0.5$)时, 此时两功能耦合指标有最大值 100%.

如有下列功能-构件关联矩阵 $G_{3 \times 5}$ (见表 2), 且 $w_{F_1} = w_{F_3} = 0.3, w_{F_2} = 0.4$. 对于功能 F_1 与 F_2 来说, $t=2, r=s=1, Rs=2$. 编码后式(3)中 $<F_1, A_1>$ 对应矩阵中

$<F_1, A_2>=0.1, <F_2, A_1>$ 对应矩阵中 $<F_2, A_2>=1.0, <F_1, A_2>$ 对应矩阵中 $<F_1, A_3>=1.0, <F_2, A_2>$ 对应矩阵中 $<F_2, A_3>=0.2$.

表 2 功能-构件关联矩阵 $G_{3 \times 5}$

功能	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
F_1	1.0	0.1	1.0	1.0	0.4
F_2	1.0	1.0	0.2	1.0	0.7
F_3	1.0	0.4	1.0	0.3	1.0

据式(5)可得 $C_{F_1, F_2} = 54\%$. 依上述算法可求得可变功能产品任意两功能之间耦合性大小, 定义

$$\bar{C} = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{F_i, F_j} / (n^2 - n), \quad (7)$$

$\bar{C}$ 为系统的平均耦合性指标, 它表征了系统在考虑诸因素时系统结构紧凑性程度, 其值越大则系统越紧凑, 整体的功能耦合性越强.

3 案例分析

以常见的可变功能料理机为例(图 1), 该产品的 14 个主要构件见表 3, 通过更换构件连接方式可实现 F_1 (榨汁)、 F_2 (切菜)、 F_3 (揉面)、 F_4 (绞馅)四种功能. 通过市场调查得到下列两种功能使用模型:

$$U_1 = \{20F_1 + 10F_2 + 30F_3 + 40F_4, 0.74\};$$

$$U_2 = \{70F_1 + 10F_2 + 10F_3 + 10F_4, 0.40\}.$$



图 1 可变功能料理机产品图

表 3 可变功能料理机构件一览表

符号	构件	符号	构件	符号	构件
A_1	杯盖	A_6	切刀	A_{11}	揉面刀
A_2	推棒	A_7	刀具架	A_{12}	橙汁头
A_3	加工杯	A_8	电机	A_{13}	开关
A_4	刀架盘	A_9	底座	A_{14}	橙汁盘
A_5	传动轴	A_{10}	绞馅刀		

由式(1)得出各功能使用度值, 运用文献[6]相关方法, 通过划分传播树层次计算出功能-构件关联矩阵 $G_{4 \times 14}$, 如表 4 所示. 由式(4)和(5), 得出各构

件在考虑功能使用情况时的关联性值大小, 见表5.

表4 功能-构件关联矩阵 $G_{4 \times 14}$

功能	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}
F_1	0.2	0.3	1.0	0.6	1.0	0.5	0.7	1.0	1.0	0.3	0.1	1.0	1.0	1.0
F_2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.4	1.0	1.0	0.5	0.1	0.6	1.0	0.2
F_3	1.0	0.3	1.0	0.2	1.0	0.1	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	0.3	1.0	0.2
F_4	1.0	0.4	1.0	0.3	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.4	1.0	0.2

表5 两使用模型下各构件关联值 %

构件	U_1	U_2	构件	U_1	U_2	构件	U_1	U_2
A_1	8.6	4.4	A_6	4.4	5.2	A_{11}	4.6	2.1
A_2	4.2	3.8	A_7	9.1	7.4	A_{12}	8.6	8.4
A_3	4.1	10.1	A_8	10.3	10.1	A_{13}	10.3	10.1
A_4	4.4	5.8	A_9	10.3	10.1	A_{14}	3.7	7.7
A_5	10.3	10.1	A_{10}	6.8	4.1			

运用式(5)得到针对两使用模型时产品的各功能耦合性值, 如表6所示, 运用式(7)得系统的平均耦合性指标为 $\overline{C_1}=37.1\%$ ($\overline{C_2}=23.3\%$).

表6 产品的综合耦合性指标 $\overline{C_1}$ ($\overline{C_2}$) %

功能	F_1	F_2	F_3	F_4
F_1		22.3(29.2)	39.6(28.8)	44.8(29.4)
F_2			24.6(16.4)	27.7(17.3)
F_3				63.7(18.6)
F_4				

对同一种可变功能产品, 系统在不同使用情况下各构件的关联性情况以及功能间的耦合性、功能的平均耦合性都是不同的. 就构件的关联性而言, 共享构件(如 A_3, A_5, A_8, A_9 等)的关联性并不随产品功能使用度的不同而改变, 因为该部分构件与产品的各功能都有直接关联, 是产品实现某功能所必须的构件, 即共享构件. 因此, 这部分构件设计时应给以足够重视, 使用时应注重维护与保养, 以确保产品各功能的正常使用. 非共享构件(如 A_{11}, A_{14} 等), 其关联性随产品功能使用度的不同而不同, 且和与之直接相关的功能的使用度数值大小呈正相关, 这为根据客户的使用情况来改进设计提供了指导, 比如, 将使用频度更高的功能及结构设计在更方便使用和维护的位置上等. 就功能耦合性而言, 两功能之间耦合性在不同的使用模式下会有较大差别(如功能 F_3 与 F_4), 原因就在于两功能的使用情况不同. 再者, 在同一使用模式下

(如 U_2), 功能 F_1 与其他各功能的使用情况相同, 但功能间耦合性却不同, 原因在于 F_1 与各功能之间存在结构耦合性差异. 最后, 系统的平均功能耦合性也随产品使用模型的不同而不同, 产品的非均衡使用值越大, 平均耦合性也越大, 系统构件的利用效率也越高, 这为产品的性能评估提供了依据.

对产品不同使用模型下耦合性的分析可以指导现有的产品的改进设计. 如在使用模型 U_1 中, 功能 F_3 与 F_4 之间的综合耦合性较高. 因此, 针对该情况, 在设计过程中要注意将与 F_3 和 F_4 相关的设计要求综合考虑, 以防止出现满足了一个又不满足另一个的情况; 应注意与该两功能都有直接关联关系的构件的选择, 以防止因为一个构件发生变更进而影响两个功能的使用; 在使用模型 U_2 中, 因为功能 F_2 与 F_3, F_4 之间的综合耦合性较小, 因此在针对此类情况的改进设计时, 可进一步降低与其相关的系统结构的耦合性, 这一方面也可减小设计成本, 另一方面可防止某一功能出现故障时对系统整体性能的影响.

综上, 对可变功能产品基于功能使用模型的构件关联性与功能耦合性的分析可得: (1)由产品的功能使用模型来分析产品的构件关联情况: 使用度越高的功能, 其相关构件的关联性越高, 对共享构件应注意其设计可靠性, 对非共享构件要注重其结构合理性, 以方便客户使用和维护. (2)由功能之间的耦合性来分析设计过程中的轻重取舍: 对耦合性较高的两个或多个功能, 在设计过程中要注意综合考虑与其相关的设计要求, 注意与其都有直接关联的构件的选择; 对耦合性较低的功能, 可通过进一步降低耦合性来降低设计难度以节约设计成本. (3)由产品的功能使用模型和系统综合耦合性来分析系统性能的优劣: 针对不同消费者分析其使用情况, 并据此提出相应的使用模型, 以实现在满足使用条件的前提下对产品的综合评估, 进而指导产品的改进设计.

4 结语

可变功能产品构件关联性与功能的耦合性受产品结构及使用情况的影响. 针对产品的使用情况, 提出并构建了可变功能产品的功能使用模型, 可用以定性、定量地描述产品各功能在使用过程中

的不均衡性。基于该模型,定义构件关联性为各功能的功能使用度与功能-结构关联矩阵中该构件所在列元素的乘积之和与系统所有构件相应总量的比值。提出构件关联性越高,则设计时应注意其相关结构及材料的可靠性,使用及维护时的方便性等结论。在功能耦合性求解过程中,依据有无共享构件及共享情况,将产品系统的耦合性进一步细分为无耦合、次耦合与耦合三种情况,结合产品的使用模型,给出了考虑使用情况的产品功能耦合性计算方法,并提出平均耦合度的概念与计算方法。最后,通过案例分析总结提出了可用于面向使用的产品设计或对现有产品进行改进设计的一些指导准则。

参考文献:

- [1] 余远文, 邓益民. 基于赋权有向图的可变功能产品关键行为状态的识别[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(7): 1023-1026.
- [2] GERO J S, KANNENGLESSER U. The situated function-behavior-structure framework[J]. Design Studies, 2004, 25(4):373-391.
- [3] QIAN L, GERO J S. Function-behavior-structure paths and their role in analogy-based design[J]. Artificial Intelligence in Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 1996, 10(4):289-312.
- [4] CHEN Y, ZHANG Z, XIE Y B, et al. A new model of conceptual design based on scientific ontology and intentionality theory. Part II: The process model[J]. Design Studies, 2015, 38:139-160.
- [5] 张国军, 王翠雨, 程强, 等. 面向可适应设计的耦合功能集割裂规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(6):1-3.
- [6] 陈羽, 滕弘飞. 异构模块组合耦合分析的完全关联矩阵[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11):22-28.
- [7] 曹鹏彬, 肖人彬, 库琼. 公理设计过程中耦合设计问题的结构化分析方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3):46-55.
- [8] 蔡池兰, 肖人彬. 公理设计下基于系统创新思维的解耦方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11):184-191.
- [9] CHEN L, DING Z, LI S. A formal two-phase method for decomposition of complex design problems[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127(2):184-195.
- [10] CHEN L, MACEAN A, LI S. Model-based rapid redesign using decomposition patterns[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2007, 129(3):283-294.
- [11] 余远文, 邓益民, 杨鹏, 等. 基于全关联矩阵的可变功能机械功能耦合研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2014, 27(4):87-93.
- [12] 王根华, 邓益民, 邹长武. 可变功能机械非均衡功能使用构件重要度分析[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(6):1-3.
- [13] 张学文. 组成论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013:12.

Function usage model and model-based correlation and coupling analysis for adaptable-function products

WANG Gen-hua, DENG Yi-min*, ZOU Chang-wu

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: For the design of adaptable-function product, it is of much practical value to carry out the research on its structural correlation and functional coupling. Considering the limitation of existing studies that have failed to take into account function usage, in this paper we put forward a concept called *function usage model*. By attaching usage information at each adaptable function, the function usage model is constructed, which can be used to describe the varied function usage situations for the same product. Subsequently, by combining the model with function-component incidence matrix, a method that can be used to quantify structural correlation and functional coupling under the consideration of function usage is proposed. Finally, an adaptable cooking machine is used as a case study to illustrate the feasibility of these methods and their implementation process. Based on the results, some useful conclusions are reached, which may be applied to either usage-oriented product design or existing product upgrading-design.

Key words: adaptable-function product; function usage model; structural correlation; functional coupling

(责任编辑 韩 超)