

系统工程方法在模块化设计中的应用

王乃静, 时文庆

(山东经济学院, 济南 250014)

摘要:模块化已广泛应用于多种领域,但其理论与实践尚处在发展和完善之中。本文试从系统工程的观点出发提出模块体系的建立方法,其中包括基于等级分析法的模块结构分解和 AHP 法模块方案选优。

关键词:模块化;系统工程;等级分析法;层次分析法

中图分类号: F273.1 **文献标志码:** A

模块化思维由来已久,但比较明确的“模块”概念是由 IBM 公司首先提出,并于 1964 年付诸于生产开发(世界上最早的模块型电脑 IBM360 系统)。在电脑产业中广泛地采用模块设计的方法,戏剧性地提高了创新的速度。通过单个模块的创新,企业就可以实现产品系统的改进,从而加快新产品开发速度,降低新产品开发的成本。自此之后,模块化原理已广泛用于飞机、汽车制造业以及软件行业等领域的产品设计与生产制造中。模块化也引起了相应产业结构的巨大变化,呈现出一系列的新特点和新趋势。传统的大而全、垂直整合的经营模式越来越缺乏灵活性与应变能力,企业纷纷开始专注于自身核心能力的价值链环节(模块)。日本著名经济学家青木昌彦亦将模块化看作是新产业结构的本质。

但在模块化设计中,设计人员大多应用功能分析方法,缺乏其他科学的方法作为指导。功能分析法作为一种定性分析法,往往仅凭设计人员的经验、知识或主观判断,这导致模块化设计中的因循守旧和结果的不合理。面对这种情况,本文试从系统工程学的角度探讨如何进行模块系统结构分析和模块确立。

1 模块化与系统工程

“模块”是指半自律性的子系统,通过和其他同样的子系统按照一定的规则相互联系而构成的更加复杂的系统或过程^[1]。所谓“模块”,就是可组成系

统的,具有某种确定功能和接口的、典型的通用独立单元^[2]。“系统工程”则是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法^[3]。通过以上定义我们可以看到,系统工程是指导模块化系统开发、形成、运行、更新全过程的有效方法。

系统的结构与功能是系统科学的基本范畴,是一切系统不可分割的两个方面。系统的结构决定系统的功能,结构的变化制约着系统整体的发展变化。例如,在企业管理中,同样的劳动者、劳动手段、和劳动对象,由于企业组织形式不同,导致劳动生产率大不相同。同样,不同的模块化结构方案也是影响模块化产品整体性能的关键因素。

2 基于等级分析法的模块化结构分解

随着产品日趋复杂化,内部结构联结关系更加复杂,部件个数越来越多,但结构仍是可以进行分解和优化的。对电子产品的设计制造来说,根据模块化系统构成特点可归纳为 4 个设计层次,由低到高依次为:标准件级、元器件级、模块级和系统级。机械按结构层次可以分为:零件级、构件级、机构级和机器级。就本质来讲,可以把产品从任意层次上进行划分,形成该级别的模块。模块的层次和级别愈低,模块愈简单,通用化程度愈容易提高,但产品制造、装配的管理也愈复杂。因此,针对复杂系统的模块化设计宜从元器件级或构件级(以下统称为部件)及以上层次进行分解和组合。

收稿日期:2006-12-25

基金项目:国家软科学研究项目指令性计划(2005DGS3D076);国家自然科学基金(70671062)

作者简介:王乃静(1952-),男,山东济南人,山东经济学院教授,博士生导师,主要从事价值工程、一般均衡理论研究;时文庆(1980-),男,山东济南人,山东经济学院硕士研究生,主要从事管理理论与方法研究。

总体结构等级分析法以关联矩阵原理为依据,能够分析复杂系统中不易确定的潜在关系。这种分析方法通过关联矩阵的运算,只需两两部件间的相互关系就可以建立整个系统的模型,可以将复杂系统分解为多级递阶的等级结构,还可以识别出具有强联结的子系统(模块)。等级分析法可以为模块化设计明确模块结构和提出不同模块化结构方案。

下面应用等级分析法分析某简单系统的结构,对于复杂系统基本方法一样。本文关联矩阵计算通过 excel 能实现,对于复杂系统可借助 Matlab 等矩阵计算软件进行计算。需要指出计算过程中需做部分调整,因为上述运算均为布尔运算,即

$$0 + 0 = 0 \quad 0 + 1 = 1 \quad 1 + 1 = 1$$

$$0 \times 0 = 0 \quad 1 \times 0 = 0 \quad 1 \times 1 = 1$$

2.1 关联矩阵计算

关联矩阵主要用来描述系统内各要素之间的相互关系。在模块化产品设计中,相互关系可以理解为:位置联结关系、运动传递关系、信息传递关系、控制信号传递关系、能量传递关系等。系统要素间的关系还可以分为直接影响和间接影响,并可用邻接矩阵与可达矩阵进行量化描述。

用来表示各相关部件之间直接影响的矩阵称为邻接矩阵,它是一个布尔矩阵。矩阵中相关邻接二部件可由 S_{ij} 予以定义。现设矩阵中行元素为 S_i 列元素为 S_j 则:二值间有直接影响时,用 $S_{ij} = 1$ 表示;二值间没有直接影响时,用 $S_{ij} = 0$ 表示。

现以简单系统为例说明关联矩阵的建立过程。设某系统由 7 个部件组成,它们的关系如图 1 所示。在此需要指出,本文所采用的等级分析法只需两两部件间关系就可以描述和分析系统结构,能用于图示法描述混乱或无法用图示法描述的复杂系统。

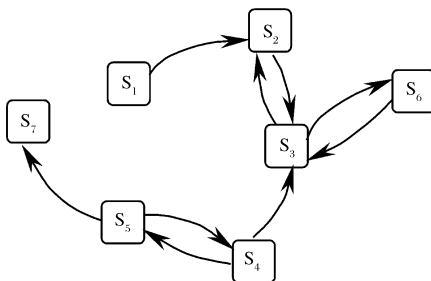


图 1 系统关系图

以上系统的邻接矩阵为:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

根据 M 矩阵可以分析 S_i 和 S_j 的直接关系,但无法表明它们的间接关系。如 $S_{12} = 1, S_{23} = 1$ 按二值关系传递规律应 $S_{13} = 1$,但实际上在 M 矩阵中 $S_{13} = 0$ 。这就需要通过可达矩阵进一步求出。

可达矩阵是用矩阵形式表示有向图中各节点之间通过一定路径可以到达(即间接影响)的程度。可达矩阵可用邻接矩阵加上单位矩阵,再经过若干次运算后求出。邻接矩阵(M)加上单位矩阵(I)形成新矩阵 A :

$$A = (M + I) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

此新矩阵还不是所求得可达矩阵,只有当依次运算到 $(M + I)^1 \neq (M + I)^2 \neq (M + I)^3 \neq \dots \neq (M + I)^r = (M + I)^{r+1}$ 时,矩阵 $(M + I)^r$ 才为可达矩阵 R 。 R 也是布尔矩阵,为 $n \times n$ 方阵。经运算图 1 模型的可达矩阵为:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1^* & 0 & 0 & 1^* & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1^* & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1^* & 1 & 1 & 1 & 1^* & 1^* \\ 0 & 1^* & 1^* & 1 & 1 & 1^* & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

矩阵中“ $*$ ”号是原矩阵 A 中所没有的,它反应出要素之间的间接关系。

2.2 等级划分

明确系统结构等级应将矩阵 R 组成两个子集合:对每一个部件 S_i 来说,可将 S_i 可能到达的一切有关部件汇集成一个集合,称它为部件 S_i 的可达

集合 $R(S_i)$ ；再将所有可能到达 S_i 的部件汇集成另一个集合，称它为部件 S_i 的前因集合 $A(S_i)$ 。从可达矩阵 R 中能比较容易地得出这两个子集合。顺着可达矩阵 R 的各行横向观察，凡是元素为 1 的列所对应的部件都在 $R(S_i)$ 子集合内；顺着可达矩阵 R 各列竖向观察，凡是元素为 1 的行所对应的部件都在 $A(S_i)$ 之中。图 1 例中各要素的 $R(S_i)$ 和 $A(S_i)$ 如下：

S_i	$R(S_i)$	$A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$
1	1, 2, 3, 6	1	1
2	2, 3, 6	1, 2, 3, 4, 5	2, 3
3	2, 3, 6	1, 2, 3, 4, 5	2, 3
4	2, 3, 4, 5, 6, 7	4, 5	4, 5
5	2, 3, 4, 5, 6, 7	4, 5	4, 5
6	6	1, 2, 3, 4, 5, 6	6
7	7	4, 5, 7	7

在一个多级结构的最上一级的要素，再没有更高级的要素可以到达，所以它的可达集合 $R(S_i)$ 中只能包括它自身和与它自身和与它同级的某些强联结要素。这个最上级的要素的前因集合 $A(S_i)$ ，则包括它自身以及可以到达他的下级各要素。这样， $R(S_i)$ 与 $A(S_i)$ 的交集对最上一级的要素来说，就和他的 $R(S_i)$ 是相同的。因此， S_i 为最上一级要素的条件为： $R(S_i) \cap A(S_i) = R(S_i)$ 。

得出最上一级部件后，可把它从表中划掉，再用同样方法求得下一级的各部件，这样一直做下去，便可一级一级地把各要素按等级划分出来

S_i	$R(S_i)$	$A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$
1	1, 2, 3	1	1
2	2, 3	1, 2, 3, 4, 5	2, 3
3	2, 3	1, 2, 3, 4, 5	2, 3
4	2, 3, 4, 5	4, 5	4, 5
5	2, 3, 4, 5	4, 5	4, 5

S_i	$R(S_i)$	$A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$
1	1	1	1
4	4, 5	4, 5	4, 5
5	4, 5	4, 5	4, 5

本例 S_6, S_7 是本系统最上位的部件集合。 S_2, S_3 为本系统的第二等级的部件集合，剩下的 S_4, S_5, S_1 就成为最下一级的部件。

2.3 模块划分

根据以上寻求结果，原来的集合 $S = \{ S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7 \}$ 被等级划分为 $S = \{ S_6, S_7, S_2, S_3,$

$S_4, S_5, S_1 \}$ ，它的可达矩阵 R 的各元素的新的排列次序如下式右侧矩阵：

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_6 & S_7 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_6 \\ S_7 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

衡量一个系统能否算作是模块化系统的主要依据，就是看系统是否具有清晰而简明的层次结构，其中的模块是否具有很强的独立性。其中，模块独立性的标志是，模块内部结合强度大，而模块间结合数少（结合强度弱），接口简单，易于组合成系统。上式用尖括号括起来的部分是两个子系统，它们各自位于主对角线上值皆为 1，这说明有循环存在的强联结。在模块化设计中，这种强联结是组成模块的重要特征。根据跨等级的联结关系，并以强联结为核心我们可将不同等级的部件统一在某一模块当中，如在上述系统中可将 S_7, S_4, S_5 划分为一个模块， S_6, S_2, S_3, S_1 划分为另一个模块。

3 模块化 AHP 方案目选优

根据等级分析法得出不同的模块化方案后，接下来就需要对各方案进行评价与选择，在此我们选用层次分析法（Analytic Hierarchy Process，简称 AHP 法）的主要思想是，首先根据问题的性质和要求达到的总目标，将问题按层次分解成不同的因素，然后再将同一层次内各个不同因素进行相对重要性的两两比较得出判断矩阵的基础上，求出各层次因素相对于上一层的单权重和对于总目标的总权重，最后，再求出方案层相对于总目标层的总权重，将各个方案按照总权重排序，就可以得到各个方案的优劣。AHP 法的基本步骤为：

3.1 建立模块化方案评价的递阶层次结构模型

模块化方案有多种评价角度，如经济性、功能性、可维修性等。本文建立模块化评价的递阶层次结构模型如图 2。

3.2 建立两两比较的判断矩阵，计算单一准则下的相对权重

为了比较同一层元素对上层次某元素的重要性，构造两两比较矩阵。一般对单一准则来说，两个

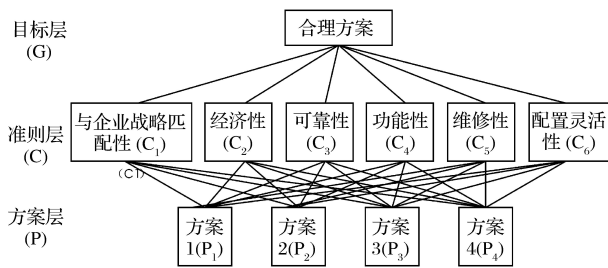


图 2 模块化方案评价的递阶层次结构模型

方案进行评比总能判断出优劣,层次分析法采用 1 - 9 标度方法,对不同情况的评比给出数量标度。判断矩阵中 a_{ij} 、 b_{ij} 值便是标度值,它们是根据资料数据、专家意见和设计人员的经验经过反复研究后确定的。

使用特征根法求得第二层 6 个准则对目标层的权重 W_i ,同样方案层 4 个元素对准则层 i 元素的权重 N_i 亦由特征根法求出。

G- C_i

G	C_1	C_2	...	C_6	W
C_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{16}	W_1
C_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{26}	W_2
...	...	...	...	...	...
C_6	a_{61}	a_{62}	...	a_{66}	W_6

C_i - P_i

C_i	P_1	P_2	P_3	P_4	N
P_1	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	N_{i1}
P_2	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	N_{i2}
P_3	b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{34}	N_{i3}
P_4	b_{41}	b_{42}	b_{43}	b_{44}	N_{i4}

在判断矩阵的构造中,并不要求判断具有传递性和一致性。但判断矩阵既是计算排序权向量的根据,那么就要求判断矩阵具有大体上的一致性。一个混乱的经不起推敲的判断矩阵有可能导致决策的失误。而且上面提到的排序向量的计算方法都是一种近似算法。当判断矩阵偏离一致性过大时,这种

近似的可靠性程度也就值得怀疑了。因此需要对判断矩阵的一致性进行检验。

$$\text{计算一致性指标 } CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR \text{ 越小,}$$

表明判断矩阵偏离完全一致性的程度越小。对于多阶判断矩阵,还需引入判断矩阵的平均随机一致性指标 RI ,查表可求出。最后计算一致性比例

$$CR = \frac{CI}{RI}。当 CR < 0.10 \text{ 时,便认为判断矩}$$

阵具有可以接受的满意的一致性。当 $CR \geq 0.10$ 时,就需要调整和修正判断矩阵,使其满足 $CR < 0.10$,从而具有满意的一致性。

3.3 计算方案层的总权重

方案 1 对于总目标的总权重 $G_1 = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^4 W_j N_{1i}$,其它方案计算方法相同。根据方案总权重的大小进行排序,权重最大的就是最优的模块化方案。

4 结束语

在模块划设计中采用系统工程方法可以分析复杂系统的层次结构,定量地划分模块结构并选择较优项目。相对传统定性以功能作为惟一标准划分模块系统,采用系统工程方法所提出的方案更具创新性、更科学、合理。

参考文献.

- [1]青木昌彦. 模块时代:新产业结构的本质[M]. 上海:上海远东出版社,2003:5 - 35.
- [2]童时中. 模块化原理设计方法及应用[M]. 北京:中国标准出版社,2000:20 - 81.
- [3]李国纲,李宝山. 管理系统工程[M]. 北京:中国人民大学出版社,1993:107 - 135.
- [4]贾延林. 模块化设计[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [5]张玉韬,吴凤平. 我国中小企业技术创新模式的选择——AHP 分析[J]. 价值工程,2006 (8):44 - 46.

The Application of Systems Engineering Method in Modularization Design

WANG Nai-jing, SHI Wen-qing

(Shandong Institute of Economics, Jinan 250014, China)

Abstract : Modularization has been applied in many fields. But its theories and practices are still under development and perfection. This paper tries to give the establishment method of module system from a systems engineering viewpoint. This method includes decompose of the modular construction decompose based on the rank analysis method and the modularization plan selection based on AHP method.

Key words : modularization; systems engineering; rank analytical method; AHP method