

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.004

可变功能机械系统概念设计的 相似模型构建研究*

赵 琳, 贺华波*, 邓益民

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对可变功能机械系统间的相似性问题,对机械系统功能、行为和结构在时间和空间上的联系,相似性的表达形式以及相似度量模型等问题进行了研究,建立了系统概念设计模型框架,提出了一种将“功能-行为-结构(FBS)”模型与相似理论结合的方法,定义了功能序结构和行为序结构,并对两者的组成关系进行了分析,得出了用于机械系统概念设计的相似表达模型,阐述了模型构建的具体步骤。研究表明,实例模型的构建符合设计认知过程,对相似性进行了可靠地描述,并实现了对各设计层相似度的衡量,验证了该方法的可行性。

关键词: 可变功能;机械系统;概念设计;相似模型

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1530-05

Similarity model of variable-function mechanical system for its conceptual design

ZHAO Lin, He Hua-bo, DENG Yi-min

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

Abstract: Aiming at the similarity in mechanical system with variable functions which has compact structure, the expression form of similarity and similarity measurement model was studied, and the relation in time and space of the function, behavior and structure of mechanical system was researched. The systematic framework model was developed by basing on the “functional-behavior-structure” design model and the similarity theory. Function sequence structure and behavior sequence structure were defined, and their relationships were analyzed, to illustrate the similarity of the conceptual design. Finally the specific steps of developing a similar model were elaborated. The results show that the instance model comply with the cognitive process of design, can measure the similarity of different design layers. The model can be used to describe the similarity of variable-function mechanical system for its conceptual design.

Key words: variable function; mechanical system; conceptual design; similarity model

0 引 言

一般的机械系统通常只具有一个或多个固定的功能,但这种系统在某些特定的情况下不能满足应用需要,如占地面积有限、资源有限以及要求使系统升

级方便的情况。本研究的可变功能机械系统是指一种通过改变系统中结构的连接或组成的方式进而获得新功能的特定的机械系统。该系统的可变是基于某些固件不变的基础上的,也就是说改变局部构件获得的新系统和之前的系统之间必定存在一定的相似性。研究可变功能机械系统的相似性,建立概念设计

收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375246)

作者简介: 赵 琳(1989-),女,河北邢台人,主要从事机械设计理论方面的研究. E-mail: 15257495674@163.com

通信联系人: 贺华波,男,副教授,硕士生导师. E-mail: hehuabo@nbu.com.cn

系统模型,为以后进行可变功能设计并将具有一定相似性的功能进行耦合提供了基础。

机械系统的概念设计是产品设计的初步也是关键阶段,可以理解为在设计约束条件下,以客户产品功能需求为输入,设计结构方案为输出的映射过程。对于概念设计模型,文献[1-2]提出了一种设计知识的表达形式,将功能、行为和结构作为设计的3个层次,基于“功能-行为-结构(functional-behavior-structure, FBS)”模型解决设计问题。功能表达的是设计目的即“做什么”,行为表达系统“如何去做”,结构说明设计系统“用什么构件或元件去做以及他们之间的连接关系”。邹光明等^[3]、金熙哲等^[4]应用了功能行为的不同表达方式,提出了行为集合的表示方法,建立了行为集合分组的规则及分组评价规则和应用功能基来表达设计问题。邓益民等^[5]将机电产品功能和行为的几种表达方法进行了总结,并按照语义表达和句法表达两个方面对其进行了分类,据此提出了研究功能与行为表达方法的发展方向。

目前,相似理论在机械设计上的研究多集中在相似系统的类比设计或仿真分析上:周美立^[6]提出了事物间的发展过程可以称为一个系统,事物的组成及发展过程都是系统要素的组成,探讨了相似现象存在的普遍性及不同系统间具有的可置换的可能性。文献[7]中提到的相似性设计目的是为了分析系统或相似部件之间的相似性,从而将已存在的系统或部件的设计应用到新的设计中。文献[8]为设计集成多样化、系列化机械产品提出相似系统设计方法即相似元化设计方法,通过相似元的数量和特征值得出相似比进行系列化和个性化设计。刘云等^[9]从系统论的角度对复杂系统的相似性原理和使用条件进行了研究,利用层次分析法对系统进行功能结构上的分解和相似性分析。文献[10-11]将相似理论分别应用在半主动悬架仿真中和建立力学相似模型进行试验上。

总体来说,目前对机械系统相似性的研究还不够深入。尤其是,针对可变功能机械系统这种特定系统而言,比较功能及行为结构的相似性不是为了置换系统中的某个部分得到类似的功能行为,让系统性能得到改变;而是根据对各功能系统的相似程度的分析,判断其将来进行可变功能设计的可能性。由此可见,本研究要进行的相似性研究面临着以下问题:

(1) 如何将可变功能机械的特征表达出来,以及它们存在着怎样的关系,即把功能行为结构在时间和空间上的联系进行表征;

(2) 相似性的表达形式,怎样利用模型来实现相似性的度量等问题。

本研究将从可变功能机械的特征出发,通过对系统模型的相似性分析,得出一套较为系统的概念表达方法。

1 可变功能机械系统概念设计模型

可变功能机械系统由不同的分功能组成,且功能间会发生耦合。笔者基于FBS概念设计模型对可变功能机械系统进行研究,先将各分功能独立,分别建立自顶向下的设计模型,即先对功能进行分解,由功能-行为映射求解得到相应的行为层级结构,分析相应的行为模型,得出映射层结构方案。

可变功能机械的FBS模型详解如图1所示。

在研究可变功能机械系统时,本研究将分功能到行为和行为到结构的映射并行研究,功能总和代表了各分功能不同模型的集合,系统实现其中一个功能时,另一个分功能处于待用模式,为加以区分,用功能符号“F”+“i”(数字)代表分功能序号,用“or”(或者)连接各分功能。之后本研究建立分功能的层级结构及相应的功能分解模型、行为过程层级结构及其行为过程模型,最后进行映射求解。

这种并列的设计过程存在交集,即这些分功能间

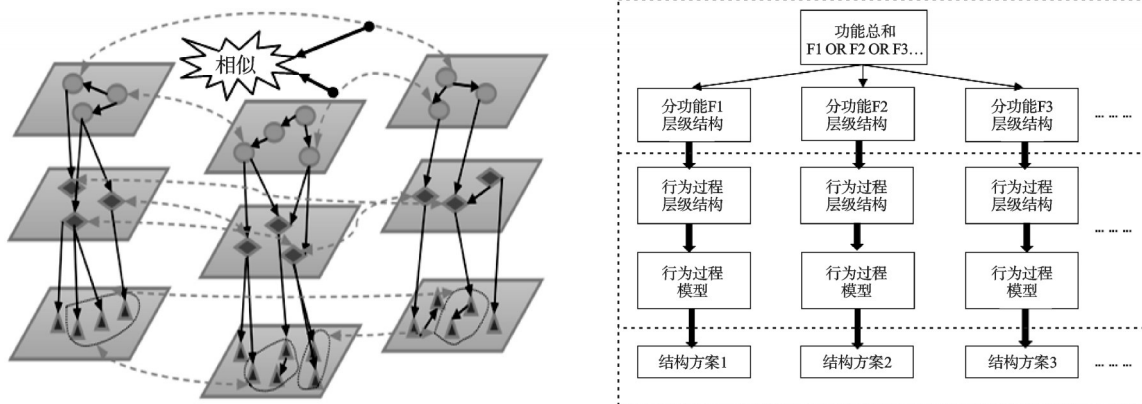


图1 可变功能机械的FBS模型详解

具有耦合性,系统的功能分解有部分相似,例如当农用拖车的连接器连接不同的耕作设备可以完成不同的生产功能,施肥机可以进行移动施肥,洒水机完成浇灌工作等,系统的动力功能和传动功能并未发生改变,改变的仅是执行端的功能。

本研究将相似的功能结构和行为结构以及方案层的具体实施构件组合用虚线连接,代表它们之间存在的特殊联系。为具体表达该设计过程中的模型联系,基于经典相似理论中对序结构的定义,本研究将系统要素按一定组成规律、一定顺序出现的序列结构称为序结构,序结构与系统有着紧密的联系。根据可变功能机械系统概念设计层次,笔者对序结构进行特征分析,分为功能序结构、行为序结构以及方案序结构。由于篇幅原因,本研究仅对功能分解和行为结构的序结构表达进行描述,并构建相似模型。

2 相似模型构建

2.1 功能序结构和行为序结构模型

相似包括功能相似以及行为相似,功能具有相同的效果不代表行为也具有相似性。研究系统相似度时需要衡量功能相似度和行为相似度不同的权重值,建立相似模型,从系统的角度将不同的功能及其行为映射用序结构表达出来,用系统要素的方式进行模型构建。

功能是表达系统特性最抽象的方式,功能的表达需满足:

(1) 能根据给定要求表示设计者的意图;

(2) 能准确描述满足设计要求的设计对象;

(3) 能被定性或者定量地评价,并可以测定设计意图的满意度。功能的系统要素为能量、物质和信息,每个功能要素都有其输入和输出,因此可以运用“输入流-输出流”的方法进行功能描述。

功能要素在时间和空间上有一定的顺序,即功能序。本研究将功能序的关系进行分类,分别有组成关系、时序关系和因果关系如图2、图3所示。时序关系又有顺序关系,并存关系。功能序是功能序结构的基础组成。



图2 功能序关系(组成关系)

在概念设计模型中,功能是一个模糊而粗糙的概念,而行为相对而言更为具体,能激发设计者的灵感,

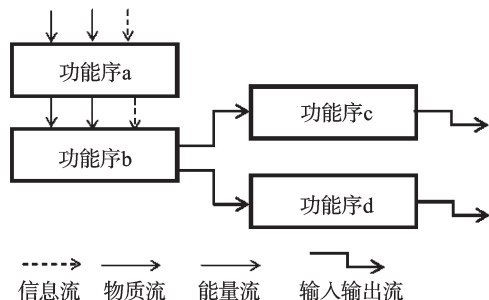


图3 功能序关系(时序关系、因果关系)

引导设计者保证三大流(即物质、能量、信息)的有序流动,不违背自然规律。行为的系统要素包括运动学要素、力学要素和能量要素。结合目前行为结构的表达方法,本研究统一用“输入流-输出流”的方式表达行为序结构。行为可以分为基本行为和组合行为。基本行为对应基本结构,较为简单;组合行为由基本行为构成,包括运动转换行为、执行行为、检测行为、控制行为等,这些基本行为通过一定的顺序连接起来形成组合行为。行为序就是指这些基本行为和组合行为间的连接,行为序结构则表达了行为序间的连接关系。

行为序结构分类如图4所示。行为序的关系有以下几种:①串联顺序关系;②并联同时关系;③选择发生关系。

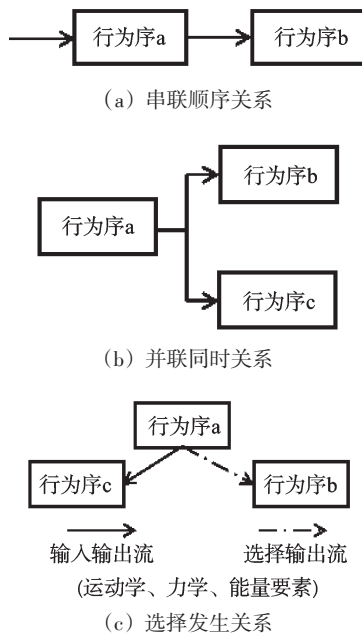


图4 行为序结构分类

2.2 基于序结构的相似模型构建

由相似第一定律即序结构定律可知,不同类型、不同层次系统存在一定的序结构,当系统序结构存在共同性时,系统之间出现相似特性,相似性大小随序结构的共同性程度增大而上升,反之则下降。上节已将可变功能机械系统概念设计中的功能层和行为层

用序结构进行表达来探索功能和行为的相似性,本节在此基础上运用数学建模对相似度进行计算。可变功能机械系统具有一定的相似性,即相似度大于零,某些功能或行为能通过改变一些系统组成就能形成新的功能系统,若是没有相似性即相似度为零,那么整个分功能系统就转变成了多功能的单个系统的集合,不在本研究的研究范围之内。

本研究将系统或者系统的一部分进行序结构构建和分析之后,为每个序进行编码,用 e_{ik} 表示序要素的集合,要素包含属性和特征值,属性由所属功能或者行为的输入输出流决定, i 是分功能编号, k 是序的编号。相似序的概念是将分功能序结构的要素和特征联系形成两两组合的有序偶,用 (e_{1k},e_{2k}) 表示。相似度由相似序的个数和相似序对相似的影响权重所决定,相似度以 q 表示,相似序个数决定的相似度为 q_1 ,影响权重决定的相似度为 q_2 ,公式如下:

$$q_1=m/(s+l-m)$$

(1)

$$q_2=w_1r_1+w_2r_2+w_3r_3+\cdots$$

(2)

$$q=q_1\times q_2$$

(3)

式中: s,l —分功能序结构所具有的序的个数; m —相似序的个数; w —影响权重; r —有序偶的特征值比。

权重的分配也是相似度的重要环节之一,主要包括主观权重分配方法和客观权重分配方法。相似序模型分析之后根据经典相似理论进行数学建模,系统的总相似度由功能、行为和结构的相似度综合得出。

本研究根据所建立的序结构进行系统知识表达,计算可变功能间的相似性,设机械系统共有两个可变分功能,特征参数取自输入输出流的类型和数值,如功能的能量类型和所代表的数值等,对整个系统进行相似模型构建,并计算相应的相似度数值。

相似求解模型如图5所示。

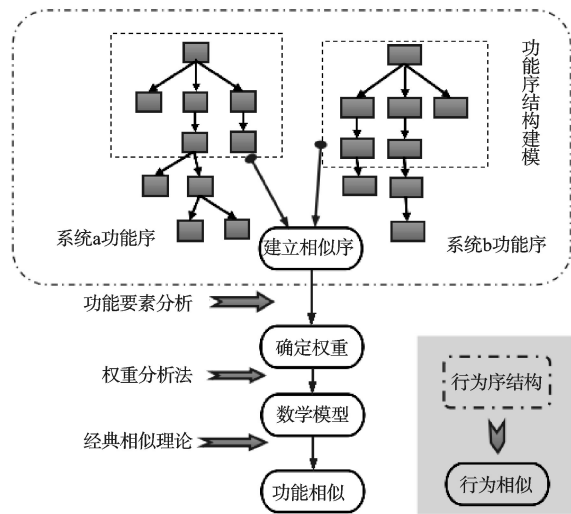


图5 相似求解模型

建模的一般步骤可表述如下:

(1) 分别对分功能系统进行层次划分,建立基于功能或者行为结构的模型。

可用输入流输出流的方式按2.1节所述分别建立分功能的具体模型,对应的序结构统计如表1所示。

表1 功能序

	功能序1	功能序2	功能序3	功能序4
F_1	e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{14}
F_2	e_{21}	e_{22}	e_{23}	e_{24}

(2) 建立相似序模型,分析要素属性并分别对序结构进行分析;用 R 代表相似序, $R_1=(e_{11},e_{21}),R_2=(e_{12},e_{22}),R_3=(e_{13},e_{23}),R_4=(e_{14},e_{24})$ 。

(3) 确定权重系数,得出相似度;权重的分配法应用比较多的有熵权法、均差法、层次分析法和专家调查法等,分为主观方法和客观方法两大类。若取均权则得到相似度 $q=[m/(4+4)]\times(1/4)\times(r_1+r_2+r_3+r_4)$ 。

(4) 结合功能行为结构各层次,获得总相似度。进行总相似度的表达时,需要将功能行为结构的各层次系统进行统一表达,并加以权重才可达到,综合各设计层相似情况如表2所示。

表2 综合各设计层相似

功能	行为	结构	相似度权重
F	B	S	$(W_1、W_2、W_3)$
Q_1	Q_2	Q_3	$W_1Q_1+W_2Q_2+W_3Q_3$

3 实例分析

笔者选取典型的可变功能机械系统进行研究,选取如图6所示的机床作为研究对象,通过更换不同的刀具执行机构可以获得钻孔,扩孔和铰孔3个不同的功能。可以看出,这是一种通过改变系统执行机构达到改变功能的情况。

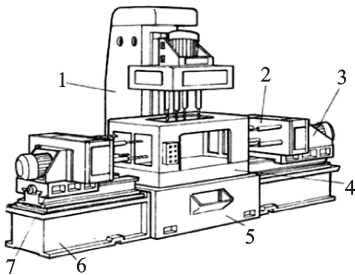


图6 可变功能机床结构图

1—立柱;2—主轴箱和刀具;3—动力箱;4—夹具;5—立柱底座;6—侧底座;7—动力滑台

本研究按上文所述的步骤进行分析,首先由系统的可变功能得到功能的序结构模型,所建立的模型如图7所示。

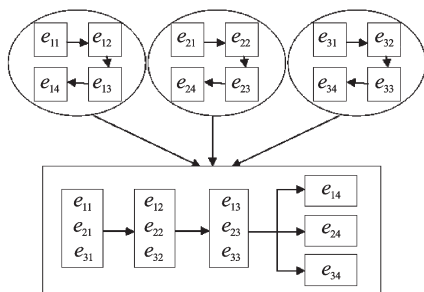


图7 相似序结构模型

e_{11}, e_{21}, e_{31} —动力箱供给动力; e_{12}, e_{22}, e_{32} —主轴箱传递功率; e_{13} —动力滑台运动到指定地点 a ; e_{14} —钻头工作进行钻孔至 φ_1 ; e_{23} —动力滑台运动到指定地点 b ; e_{24} —扩孔钻头工作进行扩孔至 φ_2 ; e_{33} —动力滑台运动到指定地点 c ; e_{34} —铰孔刀工作进行铰孔至 φ_3

将各分功能的序表示为 e_{ik} , 则可变功能机床序组成如表3所示。

表3 可变功能机床序组成

	功能序1	功能序2	功能序3	功能序4
F_1 (钻孔)	e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{14}
F_2 (扩孔)	e_{21}	e_{22}	e_{23}	e_{24}
F_3 (铰孔)	e_{31}	e_{32}	e_{33}	e_{34}

功能序1—动力执行; 功能序2—传动执行; 功能序3—工作执行; 功能序4—控制

表3所示机床的可变功能由更换执行机构来实现, 在系统层面上达到了改变功能的要求。本研究按上文所述, 根据所建立的序结构模型, 通过分析相似要素应用公式(1~3)得到系统功能级的相似度数值。

本研究根据表3对可变分功能的序进行分析, 因为可变功能数 $i=3$, 相似序分组进行表示为:

$$\begin{cases} R_{11}=(e_{11}, e_{21}), R_{12}=(e_{12}, e_{22}), R_{13}=(e_{13}, e_{23}), R_{14}=(e_{14}, e_{24}) \\ R_{21}=(e_{11}, e_{21}), R_{22}=(e_{12}, e_{22}), R_{23}=(e_{13}, e_{23}), R_{24}=(e_{14}, e_{24}) \\ R_{31}=(e_{31}, e_{21}), R_{32}=(e_{32}, e_{22}), R_{33}=(e_{33}, e_{23}), R_{34}=(e_{34}, e_{24}) \end{cases}$$

对于第一组相似序进行分析, 权重的分配采用平权, 即 $q_2 = 1/3(r_1 + r_2 + r_3)$, 经计算得到第一组功能相似度: $q = [3/(4+4+3)] \times (1/4) \times (1+1+1+1) = 0.6$ 分别对第二组和第三组进行分析, 最后取3组相似度的平均值得到功能相似度为0.6。

4 结束语

机械系统往往有很多复杂的功能系统组成, 通过系统间的协调和配合完成一定功能, 从而实现机械能

变化, 代替人类劳动的作用。可变功能机械系统正是为了更好地利用环境资源、增加设备利用率而产生, 以适应劳动过程中不同的需求。相似性是存在于大自然中最普遍的特性, 在对可变功能系统研究中, 研究者通过探索系统相似性, 建立概念设计相似模型, 可以从定量角度描述系统间的共性, 进而基于一定的相似度进行可变功能创新设计。

为此, 本研究提出了将FBS模型与经典相似理论相结合的方法构建概念设计相似系统模型, 建立了基于输入/输出流的序结构模型, 对序的概念做了进一步的阐述, 通过序结构建立相似序, 得出了构建相似系统模型的具体步骤, 并通过数学模型计算获得具体的相似度数值。

前文的分析和案例均表明, 该模型符合设计过程中设计人员的认知过程, 对相似性进行了可靠地描述, 有利于机械系统的创新设计, 为可变功能机械系统的相似度研究提供了方法和依据。

参考文献(References):

- [1] QIAN L, GERO J. Function-behavior-structure paths and their role in analogy-based design[J]. *AIEDAM*, 1996, 10(4):289-312.
- [2] 邹慧君, 梁庆华, 郭为忠, 等. 功能-运动行为-结构的概念设计模型及运动行为的多层表示[J]. *机械设计*, 2000, 11(8):1-4.
- [3] 邹光明, 胡于进, 肖文生, 等. 基于功能基的产品概念设计模型研究[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(3):20-24.
- [4] 金熙哲, 王玉新, 郭为忠, 等. 行为的定量表示与其在机械系统概念设计中的应用[J]. *机械设计与研究*, 2006, 22(11):9-12.
- [5] 邓益民, 郑堤. 机电产品功能与行为表达方法综述[J]. *工程设计学报*, 2008, 15(3):164-169.
- [6] 周美立. 相似工程学[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [7] 胡冬奎, 王平. 相似理论及其在机械工程中的应用[J]. *现代制造工程*, 2009(11):9-12.
- [8] 周美立. 单元化系统集成设计中的相似性与复杂性[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(7):42-45.
- [9] 刘云, 王艾伦. 复杂系统相似性原理与相似条件研究[J]. *系统工程学报*, 2009, 24(3):350-354.
- [10] 代芳, 王红星. 相似理论在半主动悬架仿真中的应用[J]. *噪声与振动控制*, 2010, 30(2):54-56.
- [11] 李萌, 高峰, 孙鹏, 等. 基于相似理论的月球车月面牵引性能预测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(2):230-234.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

赵琳, 贺华波, 邓益民. 可变功能机械系统概念设计的相似模型构建研究[J]. *机电工程*, 2014, 31(12):1530-1534.

ZHAO Lin, He Hua-bo, DENG Yi-min. Similarity model of variable-function mechanical system for its conceptual design[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(12):1530-1534.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>