

关于MBSE和MBD的思考

谢友柏^{1,2}

1. 上海交通大学现代设计研究所, 上海 200240

2. 西安交通大学润滑理论及轴承研究所, 西安 710049

摘要 讨论了基于模型的系统工程和基于模型的设计的重要性, 分析了其建模的差别。分析表明, 设计必须在确定的、无歧义的基础上进行, 虽然这个结果只能反复迭代得到, 否则设计将无法实施。与系统工程建模允许采用某些自然语言相比, 设计建模必须严格使用建模语言表达设计的结果。考虑到设计本质上是一个知识流动、集成、竞争和进化的过程, 又必须同时满足物质需求、精神需求和社会需求, 提出了一组关于设计功能知识分类和表达的建议: 用传递函数表达功能单元在量值方面的知识, 用由方块、输入向量、输出向量、控制向量和运算符构成的方块图表达功能单元之间的关系。传递函数由功能单元的输入和输出导出。当设计知识在分布式资源环境中由细分和专业化的设计知识服务提供时, 确定的、无歧义的行为知识和结构知识表达也往往需要。因此, 如何将上述关于功能知识表达的建议与任何系统工程建模语言的任何部分结合起来, 确定地、无歧义地表达设计中功能单元或者系统的行为知识和结构知识, 将是很有意义的研究。

关键词 系统工程; 基于模型的系统工程; 基于模型的设计

基于模型的系统工程(model based systems engineering, MBSE)是建模方法的形式化应用, 以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动, 这些活动从概念性设计阶段开始, 持续贯穿到设计开发以及后来的所有寿命周期阶段。模型是对实际事物的抽象, 在人们的生产和生活中经常出现, 因此模型非常重要。实际事物具有难以捉摸的复杂性, 不易观察其变化基本规律, 不易找到如何统一的对待办法。抽象是提取其主要共同特征, 排除构成复杂性的非主要特征, 并据以分类, 使能对具有共同特征的一类事物采用相同办法对待。这个提取物就是区别于实际事物本身的所谓模型, 而抽象的操作则称为建模。为不同目的建

模其结果不同, 例如, 玩具模型是为了愉悦儿童, 风洞模型是用于观察物体外形与流动气体之间的关系。

系统是一个由若干相关事、物构成的较为复杂的事、物^[1]。系统工程习惯上意味着一件需要对待的规模巨大的复杂事物^[2], 例如生产一种新的商用飞机就是一个系统工程^[3]。系统工程中不仅要对待许多物, 更要对待许多事, 事往往比物在系统工程中更重要和更为复杂。系统工程建模要处理的主要是系统中各个事物之间的关系, “系统工程师的技艺在于平衡复杂系统中组织与技术交互作用的艺术和科学。”^[2]系统工程在工程中有很重要的地位, 不过它的边界是模糊的, 例如它包括设计, 但是并不做设计的具体工作; 它包括制造, 但

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-12-28

基金项目: 教育部人文社会科学研究专项(17JDGC008)

作者简介: 谢友柏, 教授, 中国工程院院士, 研究方向为设计科学、摩擦学, 电子信箱: ybxie@mail.sjtu.edu.cn

引用格式: 谢友柏. 关于MBSE和MBD的思考[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 6-11; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.07.001

是也不做产品实施路径的设计和实际操作,它要做的是一个产品全生命周期中各个阶段工作的管理,属于管理学科领域。MBSE需要研究和解决的是管理上述交互作用的建模。

所谓事物难以捉摸的复杂性,除各个个体之间的差异以及其随时间和空间的变化之外,还包括人们对于其特征在感觉上的不确定性和差异,对于其特征在以各种自然语言描述和理解时的歧义和不确定性,人们自身在认知方面的矛盾和不确定性。建模的另一个重要使命就是用确定的、无歧义的方法来描述系统特征,以便此后在对待这个系统时可以采用确定的、无歧义的措施,包括随系统变化而变化的措施。于是就产生了建模和建模语言的需要,例如UML以及后来的SysML。建模语言是为了能够用确定的、无歧义的语言来表达从实际事物抽象出来的模型,不过这对于系统工程而言并非易事。

设计是为人类一切有目的活动的实施规划实施结果的面貌和实施路径^[1]。由于人或者人群的目的,也就是对一个尚不存在事物设计要满足的需求本身,常常是不明确、有歧义甚至是矛盾的,而对于实施的约束和产品生成以后所处的环境以及与环境之间的相互作用也常常是不明确、有歧义、矛盾和变化的。但是实施不能在不明确、有歧义、矛盾和无应对变化措施的情况下进行,这样实施将无所适从。设计建模就是要让上述诸方面从不明确、有歧义、有矛盾和变化的到明确、无歧义、协调一致和锁定其变化规律的转变,这也是系统工程建模要完成的任务。不过设计与系统工程不同,不能止于这些转变,还要在转变后实际制定在设计系统(即设计的对象,下同)的面貌和实施路径,以便实施能够据以操作。还要看到,这些转变不可能一步解决,必须深入到设计过程内部经过反复迭代求解,而不能在设计过程外部主观制定。系统工程是管理问题的解决而不是解决问题,主观因素太多,在不得已时允许有一定的不确定性。最终解是由设计完成,却不允许有任何的不确定性,设计给出的结果必须是确定而无歧义的,因此基于模型的设计(model based design, MBD)研究更为重要。

设计本质上是一个知识流动、集成、竞争、进化的过程,它的核心是知识的集成。没有集成,流动、竞争和进化都谈不上。系统工程的管理可以管理流动、竞争,但是它管不了集成,集成有自己确定的、无歧义的

规律。只有MBD或者基于模型的知识集成才可能以更高效率运用知识。遗憾的是支持设计知识集成的模型目前还缺乏综观全局的研究。现状是各行各业都用自己的知识模型,这就使得设计中既要满足物质需求,又要满足精神需求和社会需求的知识集成非常困难,也使得要在如图1所示的分布式资源环境中实现基于互联网的设计知识供给非常困难,从而使得“大众创业、万众创新”的实现也非常困难。

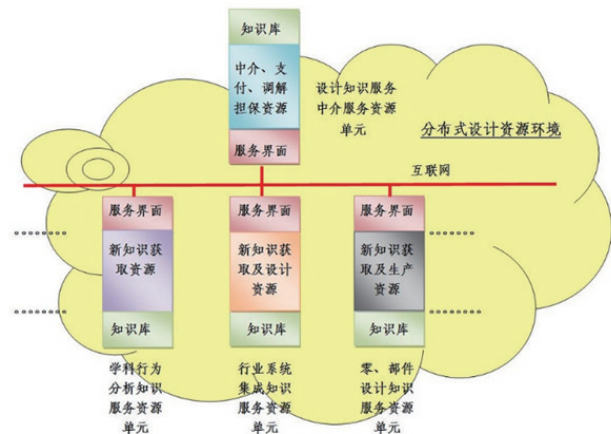


图1 分布式设计知识资源环境

传统上,设计是精英阶层的专属,不过这种情况正在改变,大众阶层将越来越多地参与设计。互联网发展到Web 2.0,个人不仅能够在互联网上读取,更可以在互联网上写入。现在每天有无数作品在微信、博客、推特、脸上出现,这些都是设计的产出,也就是说可以看到每天有众多的人在发表他们的设计。机器人的发展越来越多代替人去实施操作,那么被替换下来的人将做什么?答案只能是进入设计的竞争行列。规模竞争驱使竞争各方尽可能把精英笼络到麾下以强化自己的设计竞争力,国家之间如此,地区之间如此,企业之间更是如此。虽然其趋势目前还有增无减,不过这个时代终将逐渐过去。创新总是发生在点上,创意产生的实践性和随机性规律^[1]使得精英的数量将不再与创新的数量成比例。当社会生产从规模竞争转变为创新竞争,精英抱团的优势将不敌大众创新的优势。

当前,大众阶层设计和精英阶层设计相比,竞争力的弱势在于知识的拥有和运用能力,微信、博客、推特、脸上出现的大部分作品水平不高和一些设计者的道德低下,都说明了设计者知识不足是弱势的根源。如果能够通过分布式设计知识资源环境中基于互联网的设计知识服务,向有创意的大众阶层供给知识,以弥补

这个弱势,那么真正的创新竞争世纪就会更快到来。

设计是一个知识流动、集成、竞争和进化的过程,系统作为一个设计知识的集合,是在设计过程中反复迭代逐步形成的。图2是设计中创意产生与知识关系的一个图解^[4]。图3显示了设计知识集合形成过程与知识流动的关系^[4]。在创新竞争世纪里,竞争不能仅仅依靠设计师头脑里已经有的知识,也不能仅仅依靠团队或者公司里已经有的知识,而是需要依靠能够满足现在未能满足的需求并且此前未曾被采用过的知识^[1],这种知识更多要到分布在世界各地的知识库中去寻找,要到分布在世界各地基于互联网的设计知识服务中去寻找。现在系统工程和设计知识集成的工具,都是基于知识是在设计师头脑里、在团队或者公司的知识库里,如何表达一条知识是企业自己可以规定的,所以SysML允许在模型中部分使用自然语言^[5],例如SysML中需求图的内容可以用id和text表达^[6]。设计知识如果要到全世界去找,其不可行就显而易见。为了搜索的方便和搜索到以后能够高效集成,设计知识必须要有统一的分类和统一的表达。统一分类是方便存储和搜索的需要,统一表达是高效运用的需要,包括自动化集成的需要。

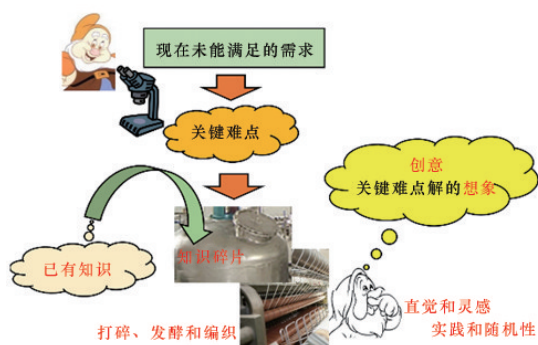


图2 设计中创意产生与知识的关系

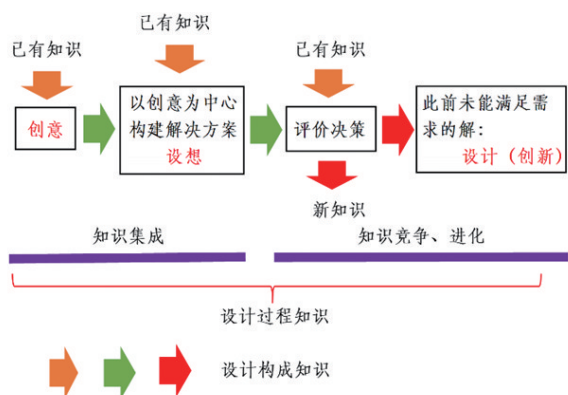


图3 设计知识集合形成过程

一种研究很长时间的设计功能知识分类和表达方法^[7-9]并没有得到广泛应用。主要缺陷是这种研究仅仅针对满足物质需求一类设计的功能知识,也就是没有考虑在创新竞争中,不仅要满足物质需求,同时还要满足精神需求和社会需求。而在实现满足物质需求的功能中,只有转变功能一类,这是不符合事实的。另外,为了统一“输入流”和“输出流”的名称,要专门制定一个分类表(taxonomy),其工作量相当于编一本包罗万象的词典,然而编辑和更新这个词典的工作量都是设计界所难以承担的^[1]。

设计是为某个目的规划实施结果和路径,实施结果要得到一个或者几个满足目的需求的系统。这种由自然语言描述的需求称为对在设计系统的功能需求(function requirement, FR),功能需求是设计的出发点。系统满足功能需求的能力称为功能(function, F),是设计要赋予一个在设计系统的属性,这个属性必须要得到明确的、无歧义的表达。FR的拟定要考虑设计目的、实施和实施结果在满足设计目的上全生命周期中可能的表现,要考虑全生命周期中的历史、环境、各种约束条件和竞争态势,包括目的完成以后产生的诸多问题,是设计过程中要在所面对的、最多的不确定、歧义和矛盾里寻求平衡的阶段,从而不得不仍旧用上一些自然语言。如果认为系统工程师是设计团队的一个组成部分,那么这一步通常是由系统工程师来走,特别是对于规模巨大的复杂系统。然后,设计师要把FR转变为F,这个转变同样要考虑已经拟定的FR的历史、环境、各种约束条件以及后继竞争的态势。将FR转变为F通常依赖于设计师或者设计团队对FR的理解和解释,也就是依赖于他或者他们拥有的知识、从外界得到的知识和运用这些知识的能力。功能知识的集合F是后继行为知识集成和结构知识集成的基础,也是后继知识竞争和进化的基础,这一点从图3可以了解。

功能知识必须有明确的、无歧义的表达,否则行为知识集成和结构知识集成将难以为继。功能知识,不论是存储在设计师头脑里的或者外部供给的,如果已经被分解成功能知识条^[1],在功能知识集成时就不需要再有图2中“打碎”这个步骤而更容易相互启发(发酵)和拼接(编织)。这时功能知识条的分类存储和明确表达就更为重要,特别是在分布式资源环境中从外部取得功能知识。

为弥补上述研究很长时间的功能知识分类和表达

方法^[7-9]的不足,提出了一个3类功能需求和4类功能知识分类和表达方法的建议^[1],将功能需求知识分为满足物质需求的、满足精神需求的和满足社会需求的,由自然语言描述。将功能知识分为实现转变功能的、实现支撑功能的、实现存储功能的和实现激励功能的,由传递函数和功能方块图表达。满足物质需求、精神需求和社会需求的知识分别来自自然科学、心理科学和社会科学的研究领域,它们之间的差异很大,研究、拥有和能够供给这些知识的团队也各不相同,将其分别放在不同的类别里是理所当然。而功能则不能只限于将输入(进入系统的物料、能量或者信号)转变为输出(排出系统的物料、能量或者信号)的一种功能,例如房梁承受梁上瓦块施加的力,瓦块并不进入房梁也不从房梁中排出。又如路边的一个告示牌,上面印有“禁止通行!”4个字和一个惊叹号,这个系统的功能是输出一个不允许行人和车辆通过的信息,却没有行人和车辆进入告示牌的输入,也不存在什么行人和车辆排出告示牌的转变。行人和车辆掉头是行人和车辆作为受体其自身系统接受告示牌上信息激励后作用的结果。

4种类型功能之间的区别^[1]可以描述如下。

转变功能:设计对象的转变功能是将输入在系统内部变为输出。输入和输出具有进入和排出设计对象的特征,满足设计所期望达到的使输入的事、物产生变化的功能需求。

支撑功能:设计对象的支撑功能是阻止某种变化。输出是输入作用的反作用,不具有进入和排出的特征,满足设计所期望达到的阻止事、物由输入导致变化或者变化发展的功能需求。

存储功能:设计对象的存储功能是将输入保存在系统内,并可原样输出。输出量不必等于输入量,但不能超过当前保存量。满足设计所期望达到的使某事、物保持原样并能够在需要时提供的功能需求。

激励功能:设计对象的激励功能是对受体施加某种作用。作用来自系统的行为或者结构而不是输入,满足设计所期望达到的驱使受体产生变化或者变化趋势的功能需求。

这4种功能,其功能知识条,或称为功能单元知识,用控制工程中的传递函数表达功能的量值,用方块图表达其与另外功能单元之间的关系^[1]。方块图采用的符号和运算关系见图4^[4]。

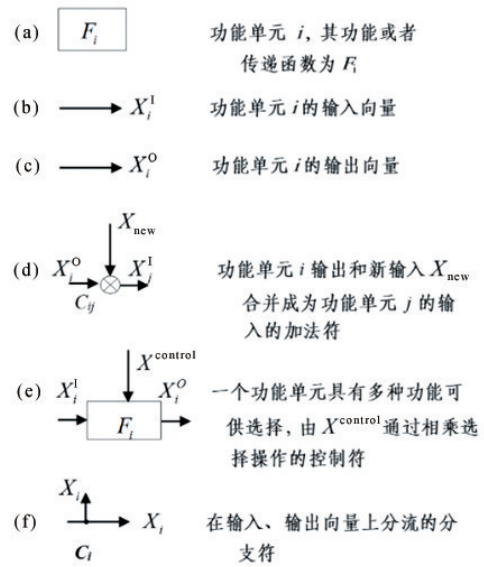


图4 功能方块图和运算符号

功能的传递函数和输入、输出之间关系满足方程

$$F_i = X_i^0 / X_i^1 \quad (1)$$

4种类型功能单元的功能方块图见图5,由功能方块图表达的功能知识集合,也就是功能方块图的应用举例如图6、图7、图8所示。

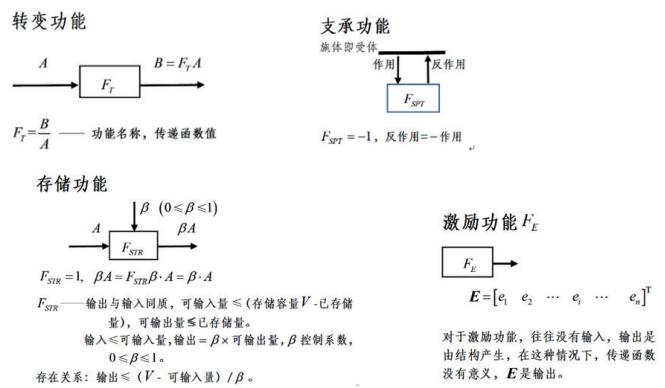


图5 4种类型功能的功能方块图及其传递函数

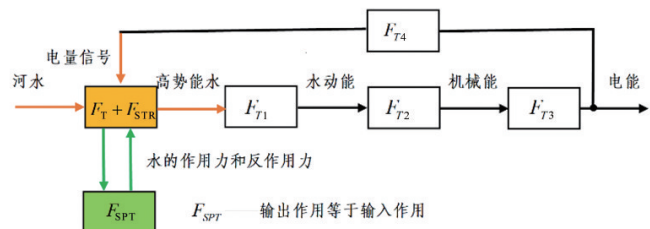


图6 功能方块图表达河水发电系统的功能集合

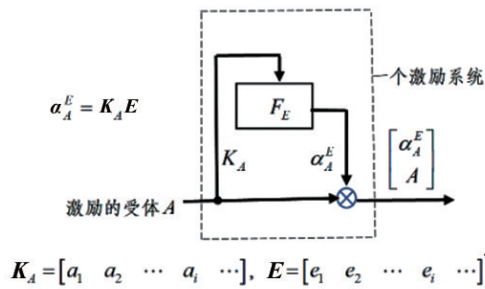


图7 激励功能单元和受体A的功能集合

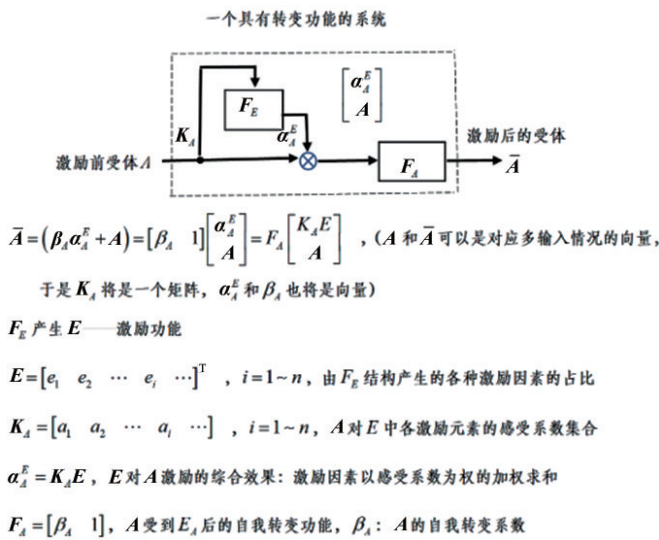


图8 激励功能单元和受体A及受体A的自我转变功能单元组成转变系统的功能集合

从以上的举例可以看到,4种功能类型可以适应各类功能需求中功能表达的应用。图6的系统具有一个转变功能,是由一系列转变功能单元、支承功能单元、存储功能单元集成实现,其中有通过分支符传递电量需求信息和控制发电量的控制符。图7表示激励功能单元往往不能单独作用,它需要受体的协同作用,不同的受体会会有不同的感受系数,由 K_A 表达, A 是将要得到激励的受体,其中用到加法符。图8更说明当需要受体发生转变时,要与受体自身转变机制联合作用,自身转变功能单元 F_A 存在于受体内部,这时整个系统的功能是一个转变功能,使受体 A 转变为 \bar{A} 。这4种功能类型的规范表达,对于3种类型的功能需求都适用。其中转变功能知识、支承功能知识和存储功能知识分别由 F_T 、 F_{SPT} 、 F_{STR} 的输入、输出表达,存储功能知识还包括它的输出控制系数 β ;而激励功能知识由于与受体的知识有关,所以与激励功能知识 F_E 的输出 E 一起还包括与受体 A 相关的受体感受系数 K_A , A 可以是一个向量,其元素可以是个体,也可以是一类群体,如果设计中要考虑

A 的转变,还要有 A 的自身转变功能知识 F_A 。这些功能知识,由细分和专业化的设计知识服务单元获取、存储、积累以后,设计知识消费方就能够根据需要,在互联网上找到和有偿使用而不需要自己在设计中特地去获取。

设计总是从功能知识集成开始,即使是继承性设计提出的要求与FR无关^[1],例如为了减轻重量、降低成本或者改变实施路径,都不能影响F的实现。为了满足这些非功能方面的需求,可以改变F的结构,改变F中的某些单元,却不能随意改变F。如图1所示,在分布式资源环境中,功能单元知识可以由零部件设计知识服务单元提供。采用建议的FR和F的分类和表达方法,可以用输入和输出的关键词方便地找到和集成需要的功能单元,而且可以由知识服务提供方同时提供一些重要特征参数作为初步筛选和行为知识集成的依据,这些参数可以是功能单元可能对应的背景实体的重量、3维尺寸、价格、对环境的要求、交货期等等。当然,知识服务提供方往往也可以在提供的功能单元知识被采用以后,提供相应的结构设计或者产品实体。因此,建议更多关注FR、F分类和表达方法在分布式资源环境中推广应用的研究。

不过仅仅有功能知识表达还不够,当不同零部件设计知识服务单元用不同的方式描述他们提供功能单元的设计或者实体的行为知识和结构知识甚至产品时,如果没有统一的、确定的、无歧义的表达,很难在设计中进行自动行为知识集成和自动结构知识集成,也难以在分布式资源环境中寻求图1中的学科行为设计知识服务,难以对集成后的方案实现评价自动化,最终设计师不得不通过自己的理解来进行人工处理,不能实现设计知识的高效运用。

是否能将关于功能知识的分类和表达建议与当前描述系统行为和结构的工具结合起来,例如与SysML进行某种程度的结合,使得分布在世界各地的设计知识服务单元都能够用统一的方式表达他们服务提供的结果。不仅按照上述建议的功能知识分类和表达提供功能单元知识,还能够以某种统一的、易于理解和方便使用、确定的、无歧义的方式表达和提供与功能单元相关的行为知识和结构知识,形成整个MBD的建模工具。这是不是MBSE的进一步发展,也是值得研究的问题。

总之,把MBD做好,在“大众创业、万众创新”的时代,是更重要的事。

参考文献 (References)

- [1] 谢友柏. 设计科学与设计竞争力[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] NASA. NASA systems engineering handbook[M]. Washington: NASA Headquarters, 2007.
- [3] Jackson S. Systems engineering for commercial aircraft: A domain-specific adaptation[M]. 2nd ed. Surrey: Ashgate, 2015.
- [4] 谢友柏. 关于《设计科学与设计竞争力》的写作[J]. 中国机械工程, 2018, 29(4): 499-503.
- [5] OMG. OMG systems modelling language(version 1.5) [R/OL]. (2017-05-01) [2018-10-01]. <http://www.omg.org/spec/SysML/>
- [6] 蒋彩云, 王维平, 李群. SysML: 一种新的系统建模语言[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1483-1492.
- [7] Hirtz J, Stone R B, McAdams D A, et al. A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts [J]. Research in Engineering Design, 2002, 13(2): 65-82.
- [8] Stone R B, Wood K L. Development of a functional basis for design[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122: 359-370.
- [9] Hirtz J, Stone R B, McAdams D A, et al. A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts: NIST technical note 1447[R]. Washington DC: US Department of Commerce, 2002.

Thinking about MBSE and MBD

XIE Youbai^{1,2}

1. Institute of Modern Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. Institute of Lubrication Theory and Bearing Research, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract The importance of MBSE and MBD together with the difference between modelling in systems engineering and modelling in design is discussed. Design has to be carried out on a deterministic and unambiguous base, even it may go through a zig-zag process. In comparison with the modelling in systems engineering which tolerates the use of some natural language, the modelling in design has to adopt modelling language rigidly to express its results. As the design is a process of knowledge flow, knowledge integration, knowledge competitiveness and knowledge evolution, and as it must simultaneously meet the requirement of function on material, the requirement of function on mental and the requirement of function on social, a set of suggestions on classifications and expressions of function knowledge in design are presented as follows. 1) transfer functions are used to express the knowledge of magnitude of function elements; 2) block diagrams formed by blocks, input vectors, output vectors, controlling vectors and operators are used to express the relationship between function elements; 3) transfer functions are derived from inputs and outputs of function elements. When the design knowledge is supplied in a distributed source environment by subdivided and/or specialized design knowledge services the deterministic and unambiguous expressions of behavior knowledge and structure knowledge are sometimes necessary. It is, therefore, meaningful to combine the previous suggestions concerning expressions of function knowledge with any part of any systems engineering modelling language which can determinately and unambiguously describe the behavior and structure of a function element or a system in design.

Keywords systems engineering; MBSE; MBD ●



(责任编辑 陈广仁)