

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.03.007

民机研制系统工程若干基本概念 的哲学思考

The Basic Concepts of the Systems Engineering Approaches for Civil Aircraft Development

陈泳¹ 田彬² 刘泽林² 谢友柏¹ / CHEN Yong¹ TIAN Bin² LIU Zelin² XIE Youbai¹

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

出于自主创新的需要,国内航空工业界已逐渐认识到系统工程方法在民机研制中的重要性。因此,越来越多的民机企业开始采用国际权威的《民用飞机与系统研制指南(SAE ARP 4754A)》来进行民机型号的研制,以确保民机型号研制过程能满足适航审查的要求。然而,由于这一指南中的一些基本概念不够清晰、逻辑也不严密,使得国内民机工程师难以准确把握系统工程的本质,进而导致他们实施系统工程方法时面临着很大的困难。从科学哲学、设计哲学等与民机研制紧密相关的学科出发,对民机研制系统工程中的若干基本概念进行了剖析,并在此基础上提出了一组更加清晰的系统工程概念(即行为、作用、功能、需求、要求等),以方便民机工程师能更好地理解系统工程方法的本质,并能在民机型号研制过程中进行应用。

关键词: 系统工程;科学哲学;设计科学;4754A;功能;行为;需求;要求

中图分类号: V37

文献标识码: A

[Abstract] To achieve the goal of independent innovation, the aircraft industry in China has increasingly realized that it is significant to implement the systems engineering approaches in the civil aircraft development process. Therefore, more and more companies are trying to adopt the *Guidelines for the Development of Civil Aircraft and Systems* (i. e., SAE ARP 4754A), which is recommended by international civil aircraft organizations (e. g., FAA, EASA) as a convincing approach for developing civil aircraft types that can meet airworthiness requirements. Since some basic concepts in the guidelines are still inexplicit, it is difficult for system engineers to explicitly understand the guidelines and to implement them in the aircraft development practice. Therefore, this paper has employed Scientific Philosophy and Design Science to analyze the shortcomings of some fundamental concepts in SAE ARP 4754A, and then proposes a new set of explicit concepts for systems engineering, including *behavior*, *action*, *function*, *need* and *requirement*. It is expected that it is easier for domestic engineers in the civil aircraft industry to understand the essence of the systems engineering approaches with such more explicit concepts, and to implement the approaches in the development of civil aircraft.

[Keywords] systems engineering; scientific philosophy; design science; 4754A; function; behavior; need; requirement

0 引言

民用飞机是一种典型的巨型复杂产品,具有系统集成度高、专业交叉度大、功能关系复杂、安全性要求高等特点。因此,民机型号研制是一项极其复杂的系统工程,通常具有周期长、投入资金大、项目风险高、管理难度大等特点。为了确保民机研制过程的顺利进行,国内外航空工业界普遍认为:民机研制必须采用系统工程方法,以确保民机型号的安全性、经济性,同时降低项目风险。为此,国际民航当局联合了波音、空客等多家民机企业编制了《民用飞机与系统研制指南》(英文名:Guidelines for the Development of Civil Aircraft and Systems,以下简称SAE ARP 4754A)^[1],并建议主制造商在民机型号研制时进行应用,以便于开展民机型号的适航审查工作。

然而,SAE ARP 4754A中的不少基本概念隐含了国外民机工程师过去的经验和直觉成分,缺乏严密的哲学和逻辑思考,因而在概念的清晰性和逻辑严密性上不可避免地存在着一些问题。例如,在SAE ARP 4754A中,功能(Function)的定义和要求(Requirement)的定义存在着逻辑上的相互嵌套问题。一方面,功能的定义依赖于需求,即功能(Function)被定义为“an intended behavior of a product based on a defined set of requirements”;而另一方面,要求的定义又反过来依赖于功能,即要求(Requirement)被定义为“an identifiable element of a function specification that can be validated”。这些问题常常使得国内民机工程师难以准确地理解和把握这些概念,进而会导致工程师在型号研制过程中难以有效地实施系统工程方法。

与技术科学中的一些相关概念(如力、电流等)已有清晰的物理定义不同,SAE ARP 4754A中的一些概念本质上不属于自然科学领域,它们有的来源于科学哲学领域(如行为 Behavior)^[2],有的来源于与技术科学紧密相关的设计科学领域(如功能 Function)^[3-5],还有的则甚至来源于心理学领域(如需要 Need)^[6-7]。因此,有必要从哲学的高度来对民机系统工程中的基本概念进行研究,以形成更加清晰、合理的基本概念体系,为建立科学的民机系统工程理论服务。在本研究中,将借助设计科学以及哲学中的科学本体论(Scientific Ontology)、主

客体关系、以及意向性理论(Intentionality Theory)等来对民机系统工程所涉及的几个基本概念(即 Behavior, Function, Need, Requirement)进行分析,并提出一组清晰、合理的民机系统工程基本概念。

1 行为与作用

系统工程中的一个基本概念是“行为(Behavior)”,这可以从4754A中关于功能的定义可以看出来。但是,4754A中并没有对行为的概念进行定义。由于很多工程师和研究人员对行为概念的认识比较模糊,因此这里借助科学本体论(Scientific Ontology)来对行为概念进行澄清。科学本体论由著名唯物主义者哲学家 Mario Bunge 所建立,从形式本体的角度对自然物理世界中的概念体系进行了定义^[2]。另外,4754A中还忽视了“作用(Action)”这个概念,很多工程师也经常把作用误解成行为。由于作用(Action)概念也是科学本体论中的一个基本概念,且在产品研制过程中经常涉及,因此这里也将对科学本体论中的作用概念进行介绍。

1.1 行为(Behavior)

根据科学本体论,行为(Behavior)是指一个客观对象(事物)的状态在一段时间内的变化过程^[2,4]。一个最简单的例子是:汽车从A地运动到B地。一种特殊的行为是静态行为,也就是对象的状态在一段时间内没有变化。根据科学本体论,行为有如下基本特征:

首先,从主客体关系来说,行为具有一个主体(Subject),但没有客体(Object)。例如,在上述汽车的运动行为例子中,汽车是主体,但没有客体。

其次,行为的描述通常由不及物动词(或短语)来完成,这与行为不涉及客体一致。在上述汽车的例子中,运动就是一个不及物动词。

再次,由于行为描述了对象在客观物理世界中的状态变化,因此它可以用客观物理变量(状态变量)从输入到输出的变化来进行结构化的表示。例如,汽车的运动可以被表示成: { Input: location (Car) = “A”; Output: location (Car) = “B” }。

最后,行为通常与一些副词短语组合在一起以描述其具体的状态变化情况。例如,汽车的运动是从A地到B地。

另外,需要说明的是:行为一般还可以被分为自发行为和受激行为。自发行为是指事物在无外

部作用(或外部作用不可知)情况下的自然状态变化,如地球的自转行为。受激行为是指事物在外部作用下展现出的状态变化,如当弹簧被施加拉力时,弹簧自身的伸长行为(长度变长)。在描述受激行为的时候,认知的主体并不关心(或忽略)行为的激励方。

1.2 作用(Action)

作用在自然界中广泛存在。根据科学本体论,作用(Action)可以被简单地认为是一个客观对象对于另一个客观对象所施加的直接影响而导致后者发生的状态变化。一个简单的例子是:电热水壶加热水。根据科学本体论,作用的概念有如下几个基本特征:

首先,从主客体关系来说,作用同时具有主体(Subject)和客体(Object)。在上述电热水壶加热水的作用中,主体是电热水壶(即其中的电热丝),客体是水。

其次,作用的描述通常需要用及物动词(或短语)来完成,如前面作用例子中的动词“加热(heat)”。这与作用需要涉及客体(即宾语)的特征保持一致,而与行为的描述需要用不及物动词完全不同。

再次,作用一般关注的客体的状态变化,这与行为概念关注主体的状态变化有着明显的区别。在“电热水壶加热水”的例子中,我们更多关注客体水的变化(温度升高),而不是电热水壶的状态变化。

最后,作用通常可以对应一定的客观物理法则,这种法则其实隐含了特定的作用方式。例如,在“电热水壶加热水”的例子中,被隐含的作用方式应该是“热传递”。因此,一种更完整(显性)的作用描述应该是:电热丝通过热传递方式加热水。

从上面的分析可以看出,作用与行为存在着根本的区别。对于产品设计而言,行为与作用常常都会出现在一个产品中,因此在系统工程中必须关注这两个概念。

2 功能

2.1 定义

在SAE ARP 4754A中,给出了一个初步的功能定义,具体如下:

A function refers to an intended behavior of a

product based on a defined set of requirements regardless of implementation.

根据这个定义,功能是指一种被想要的产品行为(Behavior),该行为以一组已定义过的要求(Requirements)为基础,且不考虑如何实施/实现(regardless of implementation)。该定义的合理性在于:它认为功能不应该考虑具体的实施方案或实现。这和设计科学中功能应该保持解中立/独立(Solution-neutral)一致的理念相符合^[3-4]。

但是,4754A中关于功能的定义存在着两大缺陷。一个缺陷是功能定义与要求(Requirement)的定义存在着逻辑上的相互引用,这在本文的引言中已经进行了分析。另一个缺陷是它把功能看成是一种行为(Behavior),但是却没有给行为一个明确的定义。根据前面的分析,行为是指一个客观对象的状态在一段时间内的变化情况。因此,功能也应该是指某个对象自身的状态变化,所以只能用不及物动词来表述。这与设计科学中的常识相违背,因为一般认为产品的功能应该用“动词+宾语”形式来描述(如电水壶的功能可以被描述成“加热水”)。

根据功能一般用“动词+宾语”语法来描述的特点,可以发现功能应该更接近于科学本体论中的作用(Action)概念,这更符合实际的逻辑。例如,通常可以说电水壶有加热水的作用,也可以说微波炉有加热食物的功能。

设计科学研究认为:产品设计过程是一个从主观意向性世界(需求)向客观物理世界(物质产品)不断演化的过程^[4,8]。其中,功能(Function)应该是一个处于这两个世界间的中间世界概念。结合工程设计学^[3]研究对于功能的理解,本研究对功能做如下定义:

一个(待设计)系统的功能是指工程师在大脑中形成的关于系统对其外部环境(对象)作用的抽象,以期望对不满意的外部环境(对象)进行改变以达到满意的状态。

2.2 概念比较分析

由于功能与作用这两个概念很相近,因此这里将先对它们进行分析比较,以明确它们之间的差异。首先,(客观物理)作用一般包含了特定的作用方式,以明确作用如何发生;功能是对作用的抽象,不包含特定的作用方式,以保持功能描述的解无关性(即独立于具体的技术原理实施)。其次,作用存

在于客观物理世界中,而功能则因为经过了人的抽象化,所以只存在于人的思维活动中,是人脑对于客观作用的抽象化概括,这也和设计科学中的 No function in structure(即物理结构本身不存在功能)理论一致。最后,功能所体现的都是对于人类有价值的作用的概括,因此不包含那些对人类无价值、甚至有害的副作用;而作用则是客观存在,它不仅包含了有利作用,还包含了那些副作用。因此,可以认为功能是一种抽象的、有价值的作用(与解无关),其描述了应该对外部对象或环境(客体)进行何种状态改变以满足人类的需要。

另外,一个值得讨论的问题是:是否有行为可以被看作功能?在缺乏对功能的哲学基础深刻认识的情况下,民机工程实践中确实存在这种情况。例如,不少人认为:飞机的一个基本功能是“飞行”。从科学本体论的角度来看,飞行应该是飞机的一个行为,因为飞行(fly)是一个不及物动词,它代表了飞机在大气中的移动行为。因此,从严格的科学本体论的角度来看,飞行不能被认为是飞机的功能。由于飞机在飞行的过程中在不断地推动空气,所以飞机在飞行时的本体功能应该是推动空气。在实际定义飞机的功能时,究竟是沿用工程习惯(如选择“飞行”),还是追求理论完美(如选择“推动空气”),是一个开放的问题,可以根据企业的实际情况来决定。作者的建议是:如果选择沿用工程习惯,那么在定义飞机功能时,应该区分作用类功能(Action-based Function,简称FA)和行为类功能(Behavior-based Function,简称FB)。并且,应该有意识地把行为类功能继续澄清为作用类功能。例如,当工程师给出了行为类功能“飞行”时,应该要求他们做严谨的本体分析,继续定义出基于本体的作用类功能“推动空气”。只有这样,才便于工程师在功能定义时判断功能之间的独立性。

3 需求

3.1 定义

严格地说,需求这个词在中文里是一个模糊的概念。“需求”中的“需”可以理解为“需要(Need)”,而“求”则可以有两种解释:“追求”或“要求”。在英文中,“追求”的本质是 want 或 desire,而“要求”则来源于 require。因此,如果“需求”是“需要”和“追求”的组合,则本质上它是两个同义词的

重叠,更适合于理解为“需要(Need)”;另一方面,如果“需求”是“需要(Need)”和“要求(Requirement)”的组合,则它是一个涉及两个概念的复合词。在民机研制系统工程中究竟用哪一种需求概念的理解,取决于大家的约定。从哲学的角度来看,笔者认为把需求理解为 Need(需要)更好,原因在于:一方面,基于这样的理解,需求的概念比较简单、清晰,不容易混淆;另一方面,在设计科学研究和工程实践中,不需要每次都反复地说明需求究竟是指需要还是指要求,因而更加方便应用。另外,简单、清晰的概念也会方便对需求进行结构化建模和表示,这对于研制下一代需求管理平台具有重要意义。因此,下面从 Need(需要)的角度来分析需求概念的内涵和特征。需要说明,4754A 中基本不涉及需求(Need),这也是4754A 作为民机系统工程指南的一个缺陷。

需求(Need)在本质上来源人的心理反应,因此需求属于心灵哲学(Philosophy of Mind)的研究范畴。注意:这里的需求不同于(市场)需求,后者是指市场上需要某种产品的数量。在设计科学中,需求被认为是驱动产品设计创新的源动力^[4-5]。设计科学研究认为:需求是指人类对于环境(或其中的对象)的不满而产生的改善环境(或其中的对象)的渴望^[3-5]。因此,这种需求也可以被称为设计需求,因为它会导致新设计的出现。显然,设计需求的满足必须依靠设计出新的产品、系统或服务来满足。

由于设计需求源于心灵哲学,在本质上是意向性(Intentionality)的体现,因此可以用心灵哲学中的意向性理论来对其进一步分析。意向性理论中的一个概念是 Inexistence,这是一个具有双重内涵的词^[6]。一方面,它可以指需求的内化存在性(In-existence),即需求存在于人的思维活动中。另一方面,它又可以指需求的不存在性(Non-existence),即需求可能并不存在于现实的物理世界。根据我们对于设计过程的研究^[4],需求的 non-existence 现象常常源于人类在最开始表达需求时对于客观物理世界的主观(扭曲的)概念化。例如,当用户在洗头后觉得头发湿而产生了干燥(湿)头发的需求时,他/她已经对客观物理世界进行了主观概念化。借用输入-输出状态转化表达,这一需求其实已经被主观的概念化为如下形式: { Input: 状态(头发) = “湿”; Output: 状态(头发) = “干” }。由于在客

观物理世界中,头发并不存在所谓的“湿”状态和“干”状态,头发就是头发,湿头发的本质是头发和水混合在一起,因此上述输入-输出状态转化已经是对头发的一种主观概念化,更客观的输入输出状态变化表示应该是: { Input: ($location(Hair) = location(Water)$); Output: ($location(Hair) \neq location(Water)$) }^[4]。这一客观的表示实际上是指在输入(开始)时头发(Hair)与水(Water)的位置是一样的(表明头发是湿的),而在输出(结束)时头发与水处在不一样的位置(表明头发已经干了)。需求的主观性这一特征是由人类认识世界的过程性所决定的,因为人类通常不是一开始就能抓住客观世界的本质,因此在发现需求时,总习惯于用主观的语言来描述需求。

需要说明:设计需求通常可以分为两类:工程技术需求和社会精神需求。显然,社会精神需求通常是主观的、模糊的。例如,“娱乐乘客”需求就是一个社会精神层次的需求,它是含糊的,因为没有点明客观、清晰的娱乐方法(如收听音乐)。另外,即便是很多工程技术需求,也并不都是清晰的、客观的,例如干燥头发的需求,飞机的导航需求等。注意:导航本身包含了一系列复杂的人、机、环交互,因此并不清晰,所以仍属于一个主观的概念。

3.2 比较分析

虽然需求与功能存在着比较大的相似性,但根据设计科学研究,这两个概念之间还是存在着比较大的差别。

首先,两个概念的主体不一样。因为需求是人类的心理活动反应的体现,所以需求的主体是人类。因此,严格意义上,只有说人有需求(例如,小王需要干燥头发)。相比较而言,功能的主体是物体(产品),因此只能说产品有功能(例如,吹风机的功能是分离头发和水)。

其次,需求描述通常是模糊的、主观的,而功能描述则应该是清晰、客观的。例如,可以说“吹干头发”是一种需求,但在严格意义上不能说“吹干头发”是一种功能(尽管在生活习惯中会这么说),因为吹干头发这样的描述并不是客观的(原因如前所述)^[4]。为了保证逻辑的连贯性、以及与生活习惯相符合,一些研究人员建议采用目的功能(Purpose Function)这个概念来描述吹风机所具有的“吹干头发”这类表述不清晰的功能。在笔者看来,为了与

Function 这一概念划分清晰,一种更合理的解决方法是用目的/目标(Purpose)来指代目的功能这样的概念。但是,这可能使工程师不习惯。具体采用 Purpose Function 还是 Purpose 可以由民机工业界自行约定。一个建议是:假定希望采用目的功能这样的概念,在使用时不要省略“目的”这个词,以与前面的功能概念相区分。

最后,需求很多时候可以不用“动词+名词”的组合来表述,而功能则必须这样。例如,飞机有安全性需求,安全性被看做是飞机的一个属性,而非一项功能。当然,在工程实践中为了确保安全性,可以用多种功能模块来确保安全性。因此,安全性是一个相对比较模糊的概念。

4 要求

4.1 定义

在 4754A 中,关于要求的定义如下:

A requirement refers to an identifiable element of a function specification that can be validated and against which an implementation can be verified.

上述定义的字面意义是:一条要求是功能规约(Function specification)中的一条可识别元素,该功能规约应该具有明确的可确认性和可验证性。在上述定义中,一个缺点是不应该把 function 放在 specification 前,因为 specification 中可以不限于 function,还可以包含行为、作用、结构等方面的、乃至逻辑关系方面的要求。从 4754A 中关于要求(Requirement)和规约(Specification)的定义来看,它是与设计科学中关于要求(Requirement)的定义是一致的。需要说明:4754A 的要求(Requirement)概念与起源于软件需求工程中的需求(Requirement)概念存在着较大的差异,尽管它们在英语中都是 Requirement。软件需求工程中的需求涉及范围很广,包含了“用户为解决某个问题或达到某个目标所需要的条件或能力”或者“一个系统或系统组件为实现某个契约、标准、规约或其它需要遵循的文件而必须满足的条件或拥有的能力”^[9]。因此,这是一个被大大泛化的概念,它涵盖了设计科学中的多种概念(如 Need, Purpose, Function, Solution 等),与 4754A 中的概念存在着比较大的差异。因此,这里仍以 4754A 中的要求概念为基础来进行讨论。

以 4754A 中的要求(Requirement)概念为基础,

可以把要求定义成关于待设计产品的特征或属性 (Attribute) 的量化约束, 这与设计科学中的概念基本保持一致^[3]。例如, 一个要求的例子是: 飞机的载客量必须达到 160 座。从设计科学的角度来看, 要求主要是指技术和经济要求, 因为只有这些要求才具有足够的可量化性。

4.2 分类

根据设计科学, 从技术上描述一个产品主要有四个方面, 功能、作用、行为和结构。因此, 要求从技术上主要可以分为功能要求、作用要求、行为要求和结构要求。另外, 还有一些与飞机全生命周期运营相关的要求, 如维修性要求 (如保养周期)、可靠性要求 (如事故率) 等。当然, 还有一些非技术要求, 如经济性要求, 这里不做探讨。

功能要求是指对于产品功能特性方面的量化技术要求。由于功能要求是对功能的量化, 因此必须和功能紧密关联。由于产品的功能主要有三方面的因素, 即输入、输出和过程, 因此产品功能要求一般有三个方面的要求: 对于输入的量化要求对于输出的量化要求以及对于功能完成过程的性能的要求。例如, 飞机有一个功能是推动空气, 那么飞机应该有一些关于推动空气的具体要求: 如对于输入空气的流量/压力要求对于输出空气的流量/压力要求以及对空气的作用力大小的要求。这些与推动空气相关的要求后续将被传递到飞机的相关系统和组件 (如发动机、机翼等) 上面。

作用要求是指对产品或系统在实现某个功能时所采用的物理作用的量化技术要求。显然, 作用要求与功能要求具有一定的重合度。但是, 作用要求又会与功能要求存在一定的差异。如前所述, 功能实现过程中不仅涉及正面作用 (直接贡献于功能的有利作用), 还经常有副作用 (其中可能有负面作用)。显然, 严格意义上的功能不会涉及这些副作用, 因此功能要求也就不应该包含那些副作用要求。例如, 飞机发动机的一个副作用是输出噪声, 显然对于发动机的噪声要求不应该被看成是对于飞机功能要求的一部分。需要说明的是: 有些工程师会把对于这类副作用的要求放在性能要求中, 但会带来如何区分功能要求、性能要求等问题。

行为要求是指对于产品行为特性方面的量化技术要求。例如, 飞机有一个行为是飞行, 那么与这个行为相关的量化技术要求就包含了: 最大飞行

距离 (航程)、最大飞行速度、最大飞行高度 (升限) 等。需要说明的是: 在一些民机工程实践中, 由于缺乏对功能和行为之间的严格区分, 行为要求也常常被归纳进功能要求中。但是, 由于行为要求不涉及输入、输出, 它与功能要求在表达的形式上会存在着较大的差异。这种差异对于研制下一代的结构化需求管理平台具有重要意义, 原因在于不同的需求类型会需要不同的结构化表达形式。

结构要求是指对于产品结构特征方面的量化技术要求。例如, 对于飞机的结构要求可以有长度要求、宽度 (翼展) 要求、高度要求等几何尺寸要求。另外, 重量要求也可以看成是结构要求。但是, 载重量 (如最大起飞重量) 不可以被看成结构要求, 因为它和飞机的载客/载货功能直接相关, 而应该看成是飞机的功能要求。

另外, 还有一种技术要求是逻辑要求, 主要描述了各种功能之间的逻辑关系, 如时序先后关系, AND/OR/关系等^[3]。限于篇幅, 这里不做赘述。

从上面的分析可以看出, 产品的要求往往很具体, 与产品的功能、行为、作用、结构等密切相关, 必须具有可验证的特征。因此, 关于产品的要求一般应该在形成产品的初步概念以后再进行定义、细化, 而不能在产品概念尚未形成时就盲目定义。

5 结论

本文对民机与系统研制的系统工程指南 (SAE ARP 4754A) 中的若干基本概念进行了分析。结果表明: 目前的系统工程指南存在着概念不够清晰、逻辑性不强以及体系不完整等问题。因此, 本文借助科学哲学和设计科学等与民机研制系统工程紧密相关的学科理论对这些概念的内涵进行了分析, 以期望为民机系统工程澄清行为、功能、要求等概念, 并从科学哲学和设计科学中引入了需求、作用等概念, 以期望弥补现有民机系统工程理论中的概念不完整问题。需要说明, 民机研制系统工程是一个非常复杂的交叉学科, 本文的研究结果仅对民机研制系统工程实践具有一定的指导意义, 民机工程师在实践时仍需要根据具体情况进行灵活调整和应用。

参考文献:

- [1] Society of Automobile Engineers. Aerospace Recommend-

edPractice (ARP-4754A): Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems [M]. Warrendale, PA, 2010.

[2] BUNGE M. (1977). Treatise on Basic Philosophy—Ontology I: The Furniture of the World [M]. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1977.

[3] PAHL G, & BEITZ W. Engineering Design: A Systematic Approach(2nd ed.) [M]. London: Springer - Verlag, 1996.

[4] CHEN Y, ZHANG Z, XIE YB, ZHAO M. A new model of conceptual design based on Scientific Ontology and Intentionality Theory [J]. Design Studies, 2015, 37: 12 – 36.

[5] 谢友柏, 陈泳. 创新思维与现代设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.

[6] JACOB P. Intentionality. The Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2010.

[7] MASLOWA H. A theory of human motivation [J]. Psychological Review, 1943, 50(4), 370 – 396 .

[8] LOVE T. Philosophy of design: a meta-theoretical structure

for design theory [J]. Design Studies, 2000, 21, 293 – 313.

[9] POHL K. Requirement Engineering: Fundamentals, Principles, and Techniques [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2010.

作者简介:

陈 泳 男, 博士, 副教授, 博士生导师。本文通讯作者, 主要研究方向: 设计科学, 系统工程, 创新设计, 知识工程等。Tel: 021 – 34206247, E-mail: mechenyong@sjtu.edu.cn

田 彬 女, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 系统工程, 需求管理, 总体设计等。Tel: 021 – 20865665, E-mail: tianbin_1978@sina.com

刘泽林 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 系统工程, 民机适航等。Tel: 021 – 20880458, E-mail: liuzelin@comac.cc

谢友柏 男, 教授, 院士, 博士生导师。主要研究方向: 设计科学, 系统工程, 创新设计, 摩擦学等。Tel: 021 – 34208037, E-mail: ybxie@sjtu.edu.cn