

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.05.015

公理化设计在可在轨组装飞行器总体设计中的应用

崔晓阳¹, 蔡远文², 史建伟¹

(1. 装备指挥技术学院 研究生院, 北京 101416; 2. 装备指挥技术学院 实验指挥系, 北京 101416)

摘要: 为有效实施在轨组装服务, 将公理化设计理论引入可在轨组装飞行器的总体设计, 给出了一种基于功能需求的结构化设计方法。基于对组装服务的需求的了解, 定义满足这些需求所需解决的问题, 通过综合分析任务需求产生或选择解决方案, 并进行工序设计。通过设计实例验证, 为可在轨组装飞行器的具体设计提供了一种新的思路。

关键词: 公理化; 在轨组装; 模块化; 设计

中图分类号: V423 **文献标识码:** A

Application of Axiomatization Design in General Design for On-Orbit Assembled Spacecraft

Cui Xiaoyang¹, Cai Yuanwen², Shi Jianwei¹

(1. College of Graduate, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;
2. Dept. of Testing & Command, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to implement the on-orbit services effectually, introduce axiomatization design into the design for on-orbit assemble spacecraft, give a design method based on function requirements. Based on the well-known about the requirement of the assemble service, and then define the works to solve the problems laid on them. The requirements were transformed into solution by analyzing, and design the manufacturing process. The design example shows that it provides a new method for designing on-orbit assemble spacecraft.

Keywords: axiomatization; on-orbit assemble; modularize; design

0 引言

在轨组装是指在空间中将不同的部件连接起来构建成一个结构、子系统或子系统的单元体等空间设施, 可在轨组装飞行器是一种新型概念的智能航天器, 具有能够接受在轨组装任务的能力。这类航天器需要从用户需求、功能设计、关键技术和总体方案等方面进行设计, 在设计原则和方法的选择上具有很强的针对性。公理化设计是一种新的概念性设计方法, 它从用户需求出发, 采用自顶向下的方式, 对于产品结构和参数能否真正满足这些功能以及满足的优良程度, 给出了确切的原则和判断标准。公理化最主要的理论就是功能独立化和信息最小化。航天活动本具有高风险、高投入的特点, 对于航天器的要求也就更加注重可靠性和效益最优化, 公理化设计的 2 大理论正符合航天器设计的基本要求。笔者将公理化设计方法引入可在轨组装飞行器的总体设计中, 使设计过程更具创新性, 能使“设计/反馈/再设计”循环迭代过程最小化, 同时减少搜索过程的随意性。

1 应用前景

随着技术的发展和空间探索活动的需求增多,

在轨组装的应用已较为普遍。例如美国的“双子星座”载人飞船计划、“阿波罗”载人登月计划、“天空实验室”、“哈勃”天文望远镜的维修; 俄罗斯的“联盟号”系列飞船、“礼炮号”系列空间站、“和平号”空间站和国际空间站的构建等活动都是在轨组装的重大事件。其任务内容可以分为航天器间的对接组合、航天器舱段的对接、飞船和实验室的在轨组装、器件维修更换、设备升级换代等。图 1 为航天员在舱外进行组装活动^[1]。

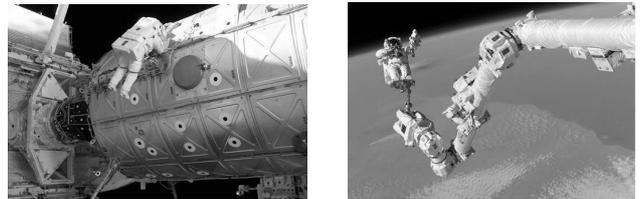


图 1 航天员舱外活动进行组装操作

无论是交会对接, 还是器件维修更换, 或者设备升级换代, 都需要被服务航天器要具有可接受在轨服务的能力^[2], 才能使在轨组装操作顺利进行, 而现行的航天器大多数是一次性使用, 在轨维护和管理、升级能力较差, 使用于在轨组装的新概念飞行器设计是亟待解决的问题。模块化航天器设计

收稿日期: 2010-12-16; 修回日期: 2011-03-02

作者简介: 崔晓阳 (1987—), 女, 山东人, 硕士研究生, 从事自动化测试与控制研究。

(modular spacecraft design, MSD) 是使航天器系统能够在轨组装、在轨接受模块更换、补加扩展和升级等服务的首要条件。

模块化航天器设计的概念是作为突破传统航天器设计局限性的一个重要创新理念和手段而被提出的，人们给予了高度的重视并进行了大量的研究^[3]。然而，模块化设计必须对系统工程原理和方法、标准化理论、模块化理论及设计方法等有相当的理解，并善于有机地加以运用，才可能设计出一个有生命力的模块化系统。所以，在进行在轨组装航天器设计时，要多关注产品设计方面行之有效的新理论和新方法。

2 公理化设计基本理论

公理化设计是美国麻省理工学院 (MIT) SUH 教授于 1990 年在《The Principles of design》一书中正式提出的，公理化设计理论是一种通用的概念设计理论，可应用在不同的设计领域中，其基本理论包括：域、映射、设计公理、域间“之”字形分解、层级、若干定理和推论^[4]。限于篇幅仅对其中的几个基本内容作简要介绍。

2.1 域的概念

域是公理化设计中最基本和最重要的概念，贯穿于整个设计过程。不同的设计任务都可用 4 个域来描述，即用户域(custom domain)、功能域(function domain)、结构域(physical domain)和工艺域(process domain)。相邻的 2 个域中，左边域是“要达到什么目标(what)”，右边的域是“选择什么方法来实现左边域的要求(how)”。

用户域刻画顾客需求(CAs)，功能域为由 CAs 转化而来的 FRs 相互独立的一系列功能需求(FRs)的最小集和约束(Cs)，在物理域中构思实现 FRs 的设计参数(DPs)，过程域中则确定实现 DPs 的工艺参数(PVs)。设计过程是 4 个域之间自顶向下的形分解映射过程。

2.2 基本公理 (详细内容见参考文献[5])

公理 1: 独立性公理

独立性公理是指保持功能要求的独立性，即在功能域中每一层分解得到的功能要求集 {FR} 中的元素要相互独立。从功能域向结构域映射得到满足功能要求 {FR} 的设计参数集, {DP} 其映射关系可用下式表示： $\{FR\}=[A]\{DP\}$ 式中， $\{FR\}=\{FR_1...FR_n\}T$ ； $\{DP\}=\{DP_1...DP_n\}T$ ； $[A]$ 为设计矩阵，可以表示为：

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $A_{ij} = \partial FR_i / \partial DP_j$ 。对线性设计， A_{ij} 是常数；而对于非线性设计， A_{ij} 是 DPs 的函数。

公理 2: 信息公理

信息公理是指在满足独立性公理条件下的最小化信息量。即满足独立公理的设计中，信息量最小的设计具有最大成功可能性，是最佳设计。从综合评价角度来说，其积极意义在于提供一个可量化的设计质量评估准则。

2.3 公理化设计中的“之”字形映射与层次结构

与其它设计理论相比较，公理化设计不是单纯在每一个设计域完成自身的设计，它是在相邻的 2 个设计域之间自上而下进行映射变换，充分考虑两者之间的相互关系，整个映射关系过程可形象地描述为“之”字形映射。

层次结构是指公理化设计中某域的层次结构树。公理化设计的整个过程就是从功能域到结构域，再到工艺域之间的映射过程。整个设计是一个从高级别的抽象概括到低级别的详细描述过程。如果把可在轨组装飞行器看成是一个系统，公理化设计的过程就是一个把系统分解为子系统，然后分解为部件，再分解为零件，最后分解为零件特征的过程。设计的最终结果得到不同层次的功能要求、设计参数和工艺变量组成的层次结构树，它非常清晰地描述了各个设计域的工作目的。

3 设计过程

公理化设计指导设计者有效地创建新设计或成功地诊断和改良已有设计的流程通常遵循图 2 所示框架。

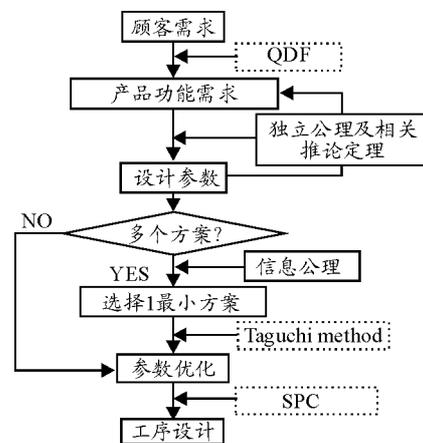


图 2 公理化设计流程

应用公理化设计, 进行可用于在轨组装飞行器总体设计的步骤为:

1) 了解组装服务的需求: 根据任务的实施环境、任务类型及任务特点, 获取“5WIH”(why、what、where、when、who、how) 等需求信息;

2) 定义满足这些需求所需解决的问题: 将任务需求转化;

3) 通过综合分析产生或选择解决方案, 将由组装服务需求转化而成的功能需求和设计参数进行“之”字型展开, 根据独立公理调整 FR 或 DP, 使得二者层级上各层次的射矩阵为对角阵或三角阵。在这个过程中, 由于技术创新或结构改进会产生多个方案可供选择, 则需要通过信息公理进行决策。另外, 在设计过程中, 需要根据不同情况恰当地运用公理化设计的推论和定理来解决问题;

4) 工序设计: 该步骤是设计参数与工序变量之间的映射, 其过程和依据原理与步骤 3 相同。

以功能域到结构域的映射为例, 设计人员首先必须明确产品应具有什么样的功能, 从而确定出产品的总功能要求 FR0。然后从总体要求出发确定满足总功能要求的总体设计参数 DP0, 当总功能要求满足后, 根据总体设计参数来进行总功能分解, 再根据子功能确定该级的设计参数, 当各子功能完全满足后, 再分解下一级子功能, 以此类推, 直至分解到子问题全部解决为止。“之”字形映射可得到功能层次结构和设计参数的层次结构树, 以及设计参数和功能要求之间的关系。功能域向结构域“之”形映射原理如图 3。同样地, 结构域到工艺域之间的映射也有类似的关系。

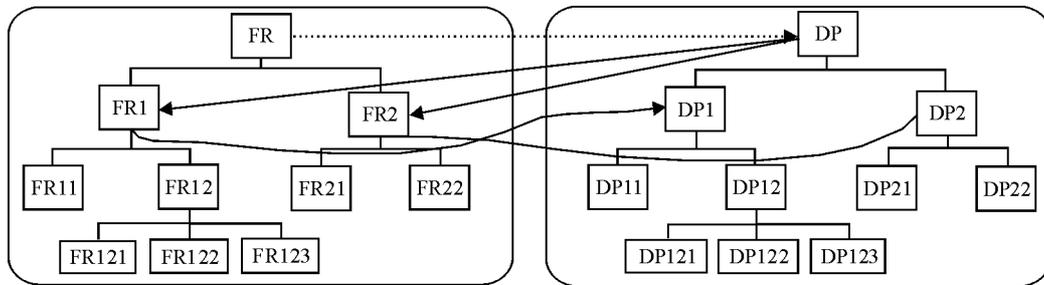


图 3 功能域和结构域的映射和层级

4 应用实例

以设计一个可用于在轨组装的通信卫星为例, 运用上述方法进行设计。由于笔者研究的是概念设计的范畴, 不涉及具体工序的操作, 所以只要设计到第 3 步即可。

图 4 是设计工程图, 下面着重进行方框内的部分设计, 运用同样的办法可以得到 DP 到 PV 的“之”字形展开。

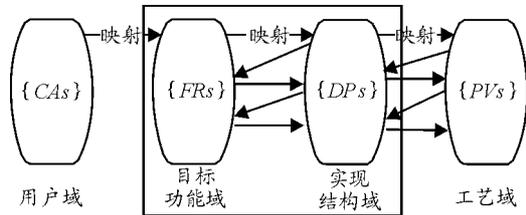


图 4 公理化设计工程图

4.1 需求、功能分析

1) 任务需求 (“5WIH”)

Why (目的): 提高在轨运行卫星的使用寿命及在轨升级的能力

What (对象): 可进行在轨组装的在轨加注、

维修升级和交会对接功能进行设计

Where (地点): 地球低轨道空间

When (时间): 卫星故障或需要进行

Who (人员): 无人

How (方法): 以在轨组装的方式由服务飞行器对目标卫星实施

2) 功能要求

① 维持通信卫星的基本结构功能^[5]: 包括通用系统和专用系统, 其中, 通用系统包括了姿态控制、电热控制、电源控制、结构、定轨; 专用系统是为了完成通信任务而具备的通信功能。

② 针对在轨组装所具备的功能: 针对通信卫星的在轨组装任务主要有交会对接、在轨燃料加注和部件维修升级等。

4.2 FR 到 DP “之” 字形展开:

“之” 字形展开是层层递进的过程, 从第 1 层的总体需求开始对应的是总体功能, 再分别就各总体功能分析对应的需求得出相应的所需功能……如此层层递进, 直至不能再分解为止。同时, 在展开

过程中,通过调整 FR 和 DP 的内容,使之适应信息公理和独立性公理的要求。

下面就以维修升级的功能的“之”字型展开为例进行详细介绍:

把下面的语言画成图。

1) FR (新型通信卫星) → DP (可在轨组装的通信卫星)

2) FR2 (可在轨组装) → DP3 (维修升级)

3) FR22 (可拆卸组装) → DP31 (各功能无耦合)、DP32 (各模块结构独立)

4) FR221 (可机械式插拔)、FR222 (不同模块可识别)

→ DP311 (插拔接口) DP312 (握取把手) DP321 (光电式标示)

其中,FR22 要求具有 DP31、DP32 的功能; DP31、DP32 又分别有 FR221、FR222 的要求;FR221 的功能要求为 DP311 和 DP312,FR222 的功能要求为 DP321。需求、功能一一对应,且同一层的需求及同一层的功能都无耦合,满足了独立性公理的要求。

遵照同样的顺序,可对其他功能要求进行“之”字型展开,具体构成不再赘述,得到的最终“之”字型展开图如图 5。

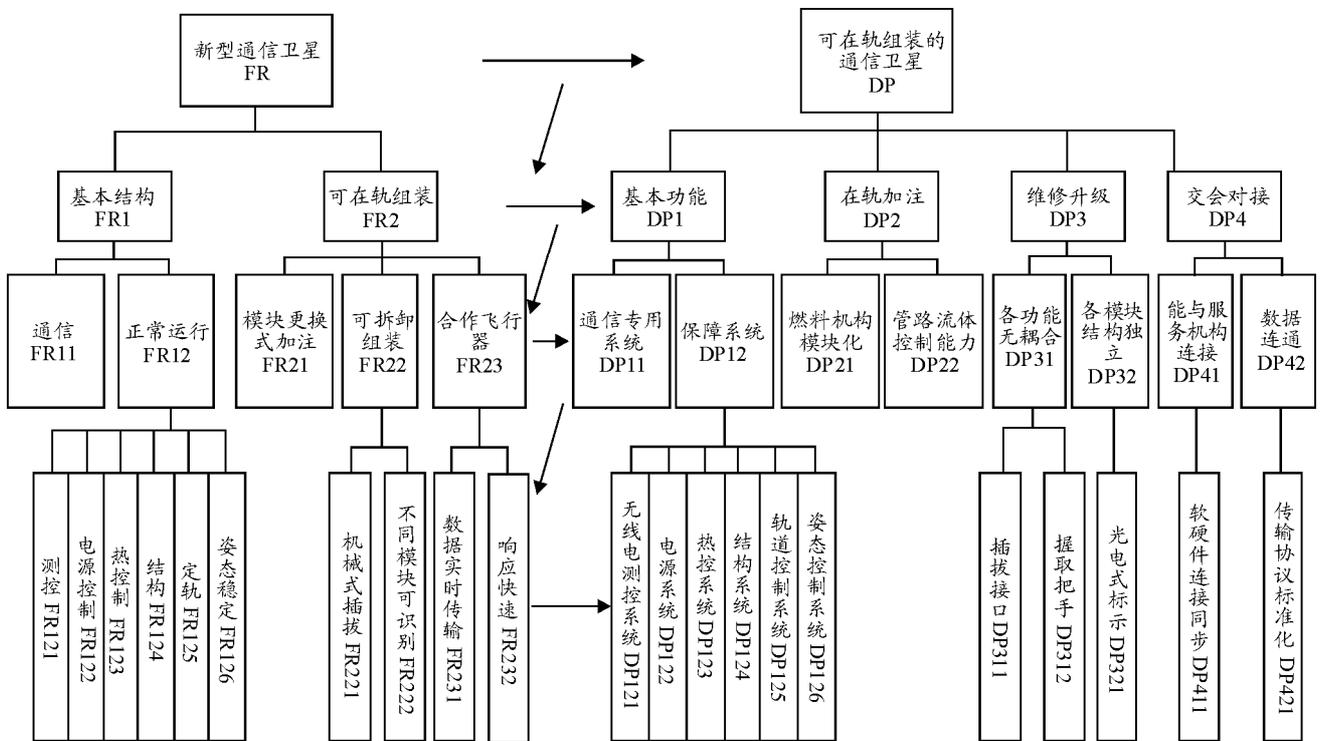


图 5 FR 到 DP 的“之”字型展开

5 结束语

新概念航天器还处在概念设计阶段,公理化设计在可在轨组装飞行器总体设计中的应用为下一步可在轨组装飞行器的具体设计提供了一种新的思路。但是限于篇幅和作者水平,仅用独立性公理对“之”字型展开进行了验证,而对信息公理的验证涉及较少,在后续工作中还要进一步深入研究。

参考文献:

[1] 陈小前,袁建平,等. 航天器在轨服务技术[M]. 北京:

中国宇航出版社,2009: 115.

[2] 朱亮,等. 航天器轨道转移与空间交会技术现状及展望[C]//863-7 领域空间在轨服务技术研讨会文集,2007: 217-222.

[3] 孙杰,孙兆伟,赵阳. 微型航天器模块化设计及其关键技术研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,12(39).

[4] 谢友柏. 现代设计理论和方法的研究[J]. 机械工程学报,2004,40(4): 1-9.

[5] Axiomatic design[D]. White Paper from axiomatic design software Inc.

[6] 陈烈民. 航天器结构与机构[M]. 北京: 中国科学技术出版社,2005.