

面向航天器舱布局 CAD 系统的公理化设计研究

张 雷^{1,2}, 樊树海^{1,2}, 季 春^{1,2}, 姚 斌^{1,2}

(1 南京工业大学 工业工程系, 江苏 南京 210009;

2 麻省理工学院信息计划“数据质量和信息安全”实验室, 马萨诸塞州 剑桥 02139)

摘 要: 航天器舱布局 CAD 系统是针对航天器舱中的各种设备和仪器进行布局以及优化的智能布局设计系统, 对航天器舱布局 CAD 系统采用公理化设计的方法进行设计, 提出了基于独立公理的设计过程, 得到了系统的功能结构表, 降低了设计的复杂性, 保证了在设计过程中能够以适当顺序做出合理的决策, 保证了该系统的高效性及合理性。

关键词: 航天器舱; CAD; 布局设计; 公理化设计

中图分类号: V221+.92

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)11—0083—04

Research on Axiomatic Design Oriented the CAD System for Spacecraft Cabin Layout

ZHANG Lei^{1,2}, FAN Shu-hai^{1,2}, JI Chun^{1,2}, YAO Bin^{1,2}

(1 Department of Industrial Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China,

2 MIT Information Program “Data Quality & Info Security” Lab, Cambridge 02139, USA)

Abstract: Spacecraft cabin layout CAD system is the intelligent layout design system that makes some layout and optimization for a variety of devices and equipment in a spacecraft cabin. In this paper, using axiomatic design method to carry on the design for the spacecraft cabin layout CAD system, and proposing the design process based on the independence axiom, getting the functional structure chart of the system, it can reduce the complexity of the design, make rational decisions with the proper sequence in the design process and ensure the efficiency and rationality of the system.

Key words: spacecraft cabin; CAD; layout design; axiomatic design

1 引言

航天器舱布局设计不但要考虑仪器设备之间、仪器设备与航天器舱之间的干涉性问题以及布局空间的利用率问题,而且还要考虑仪器设备之间的稳定性、相邻性、全舱惯性等一些性能约束条件^[1]. 航天器舱布局设计的目的是使得布局评价指标达到最优状态,要求在符合工程技术的条件下,在航天器舱内把各种设备仪器进行最优的布置^[2],航天器舱布局问题与传统的布局问题相比,是一个具有知识不完备性、不确定性、非线性等特征的性能约束布局问题,不但需要进行定性分析,而且还要进行定量计

算,因此航天器舱布局问题具有一定的困难性,再加上航天器舱设计本身的工程复杂性,使得航天器舱布局设计在理论层面上具有挑战性以及开拓性,同时在工程实践层面上具有复杂性以及困难性^[3].

航天器舱布局 CAD 系统能够运用系统工程学将建模、求解、优化、评价等一系列方法和工具加以集成^[4],通过对设计数据进行分析管理以及对布局流程进行控制协调,设计出完整的布局流程,这是针对航天器舱中的各种设备和仪器进行布局以及优化的智能布局设计系统. 本文对航天器舱布局 CAD 系统采用公理化设计的方法进行设计,提出了基于独立公理的设计过程,得到了系统的功能结构表,降

低了设计的复杂性,保证了在设计过程中能够以适当顺序做出合理的决策,保证了该系统的高效性及合理性.

2 公理设计方法

20 世纪 90 年代,美国麻省理工学院的 Nam Pyo Suh 教授以及他的同事正式提出了公理设计理论^[5],公理化设计框架中主要包含域的概念、“Z”字形映射的概念、层次结构的概念以及设计公理的概念^[6],域的概念之间的映射关系如图 1 所示.

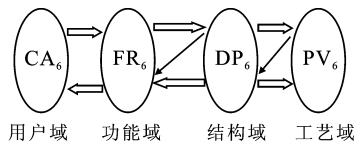


图 1 公理化设计域的概念

在公理化设计的映射过程中,必须采用两条基本的设计公理来评价系统设计方案的优劣,这两条基本公理分别是:第一公理,即独立公理;第二公理,即信息公理.

3 航天器舱布局 CAD 系统的设计

(1) 第一级分解

航天器舱布局计算机辅助系统设计主要依靠包括数学优化模型、符号模型、几何运动与动力的可视化仿真模型等数字化模型^[7]. 航天器舱布局设计的目的是使得布局评价指标达到最优状态,要求在符合工程技术的条件下,在航天器舱内把各种设备仪器最优的布置好. 航天器舱布局 CAD 系统的设计流程如下:(1)首先提出设计需求;(2)简化待布物,建立数字化模型;(3)根据设计知识和设计约束,选择初始布局;(4)从优化算法库中选择算法进行布局优化;(5)对优化布局进行评价,分析其可行性. 具体设计过程如下:FR₀=航天器舱布局 CAD 设计,要实现这个目标,必须采取的相应策略是:DP₀=航天器舱布局 CAD 系统.

FR₀能够分解成:

FR₁=简化待布物,

FR₂=确定航天器舱布局,

FR₃=评价航天器舱布局.

实现上面三个目标采取的相应策略是:

DP₁=建立数学仿真模型,

DP₂=确定航天器舱布局方案,

DP₃=选择多种航天器舱布局评价方法.

由于 FR₁ 能够由 DP₁ 独立完成,FR₂ 与 DP₁、DP₂ 有关,FR₃ 与 DP₁、DP₂、DP₃ 有关,因此,此设计属于准耦合设计,设计矩阵为下三角矩阵,其设计方程是:

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_1 \\ \text{FR}_2 \\ \text{FR}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_1 \\ \text{DP}_2 \\ \text{DP}_3 \end{bmatrix}$$

(2) 第二级分解

①FR₁能够分解成:

FR₁₁=选择数学优化模型,

FR₁₂=选择符号模型,

FR₁₃=选择可视化仿真模型.

实现上面三个目标采用的相关策略是:

DP₁₁=建立数学优化模型,

DP₁₂=建立符号模型,

DP₁₃=建立可视化仿真模型.

可得设计方程如下:

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_{11} \\ \text{FR}_{12} \\ \text{FR}_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_{11} \\ \text{DP}_{12} \\ \text{DP}_{13} \end{bmatrix}$$

②FR₂能够分解成:

FR₂₁=确定航天器舱初始布局,

FR₂₂=优化航天器舱布局.

实现上面两个目标采用的相关策略是:

DP₂₁=确定航天器舱初始布局方案,

DP₂₂=选择航天器舱布局优化方案.

可得设计方程如下:

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_{21} \\ \text{FR}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_{21} \\ \text{DP}_{22} \end{bmatrix}$$

③FR₃能够分解成:

FR₃₁=依据层次权重进行定性定量分析,

FR₃₂=用模糊数学进行总体评价,

FR₃₃=研究信息部分清楚、部分不清楚并带有不确定性现象,

FR₃₄=研究解决不相容问题.

实现上面四个目标采用的相关策略是:

DP₃₁=选择层次分析法,

DP₃₂=选择模糊评价法,

DP₃₃=运用灰色系统理论,

DP₃₄=进行物元分析.

可得设计方程如下:

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_{31} \\ \text{FR}_{32} \\ \text{FR}_{33} \\ \text{FR}_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_{31} \\ \text{DP}_{32} \\ \text{DP}_{33} \\ \text{DP}_{34} \end{bmatrix}$$

(3)第三级分解

①FR₂₁能够分解成:

FR₂₁₁ = 显示布局方案信息,

FR₂₁₂ = 获取布局方案信息.

实现上面两个目标采用的相关策略是:

DP₂₁₁ = 布局方案显示方法,

DP₂₁₂ = 布局方案获取方法.

可得设计方程如下:

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_{211} \\ \text{FR}_{212} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_{211} \\ \text{DP}_{212} \end{bmatrix}$$

②FR₂₂能够分解成:

FR₂₂₁ = 显示布局优化算法信息,

FR₂₂₂ = 选择布局优化算法.

实现上面两个目标采用的相关策略是:

DP₂₂₁ = 布局优化算法显示方法,

DP₂₂₂ = 布局优化算法.

可得设计方程如下:

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_{221} \\ \text{FR}_{222} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_{221} \\ \text{DP}_{222} \end{bmatrix}$$

(4)第四级分解

①FR₂₂₁能够分解成:

FR₂₂₁₁ = 显示启发式法信息,

FR₂₂₁₂ = 显示演化法信息,

FR₂₂₁₃ = 显示遗传法信息,

FR₂₂₁₄ = 显示模拟退火法信息.

实现上面四个目标采用的相关策略是:

DP₂₂₁₁ = 启发式算法显示方法,

DP₂₂₁₂ = 演化算法显示方法,

DP₂₂₁₃ = 遗传算法显示方法,

DP₂₂₁₄ = 模拟退火算法显示方法.

可得设计方程如下:

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_{2211} \\ \text{FR}_{2212} \\ \text{FR}_{2213} \\ \text{FR}_{2214} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_{2211} \\ \text{DP}_{2212} \\ \text{DP}_{2213} \\ \text{DP}_{2214} \end{bmatrix}$$

②FR₂₂₂能够分解成:

FR₂₂₂₁ = 采用启发式法,

FR₂₂₂₂ = 采用演化法,

FR₂₂₂₃ = 采用遗传法,

FR₂₂₂₄ = 采用模拟退火法.

实现上面四个目标采用的相关策略是:

DP₂₂₂₁ = 启发式算法,

DP₂₂₂₂ = 演化算法,

DP₂₂₂₃ = 遗传算法,

DP₂₂₂₄ = 模拟退火算法.

可得设计方程如下:

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_{2221} \\ \text{FR}_{2222} \\ \text{FR}_{2223} \\ \text{FR}_{2224} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_{2221} \\ \text{DP}_{2222} \\ \text{DP}_{2223} \\ \text{DP}_{2224} \end{bmatrix}$$

在上述过程中的设计矩阵都是上三角矩阵或者对角矩阵,设计都属于准耦合设计或者非耦合设计,满足独立公理,因而是合理的设计,表1即为公理化设计的总的功能结构表.

4 结束语

航天器舱布局设计问题十分复杂,不但要考虑仪器设备之间、仪器设备与航天器舱之间的干涉性问题以及布局空间的利用率问题,而且还要考虑仪器设备之间的稳定性、相邻性、全舱惯性等一些性能约束条件,并且直接关系到航天器的性能、可靠性等,因此航天器舱布局设计对于航天事业的发展具有十分重要的意义.航天器舱布局 CAD 系统通过简化待布物,建立数字化模型,然后根据设计知识和设计约束,选择初始布局,接着从优化算法库中选择算法进行布局优化,最后对优化布局进行评价,分析其可行性.为了保证航天器舱布局 CAD 系统设计的高效性和合理性,对航天器舱布局 CAD 系统采用公理化设计方法进行设计,提出了基于独立公理的设计过程,得到了系统的功能结构表,降低了设计的复杂性,保证了在设计过程中能够以适当顺序做出合理的决策,航天器舱布局 CAD 系统的设计理论以及方法也可以运用于机械、车辆、船舶等布局设计领域.

参考文献:

- [1] 孙治国,滕弘飞,刘占伟.航天器舱自动化布局设计的若干科学问题[J].自然科学进展,2003,13(11): 1134-1140.
- [2] 滕弘飞,张宝,刘峻,等.航天器布局方案设计[J].大连理工大学学报,2003,43(1): 86-92.
- [3] 张刚,邓克文,李火生,等.复杂结构产品虚拟布局与装配设计系统研究[J].计算机集成制造系统,2008,14(2): 209-214.
- [4] 李楠,查建中,陆一平.工程布局 CAD 系统设计与实现[J].计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(7): 939-945.

表 1 功能结构表

总功能	第一级分解	第二级分解	第三级分解	第四级分解
FR ₀ =航天器舱布局 CAD 设计	FR ₁ =简化待布物		FR ₁₁ =选择数学优化模型	
			FR ₁₂ =选择符号模型	
			FR ₁₃ =选择可视化仿真模型	
	FR ₂ =确定航天器舱布局	FR ₂₁ =确定航天器舱初始布局	FR ₂₁₁ =显示布局方案信息	
			FR ₂₁₂ =获取布局方案信息	
			FR ₂₂₁₁ =显示启发式法信息	
			FR ₂₂₁ =显示布局优化算法信息	FR ₂₂₁₂ =显示演化法信息
				FR ₂₂₁₃ =显示遗传法信息
				FR ₂₂₁₄ =显示模拟退火法信息
		FR ₂₂ =优化航天器舱布局	FR ₂₂₂ =选择布局优化算法	FR ₂₂₂₁ =采用启发式法
				FR ₂₂₂₂ =采用演化法
				FR ₂₂₂₃ =采用遗传法
				FR ₂₂₂₄ =采用模拟退火法
			FR ₃₁ =依据层次权重进行定性定量分析	
		FR ₃ =评价航天器舱布局	FR ₃₂ =用模糊数学进行总体评价	
			FR ₃₃ =研究信息部分清楚、部分不清楚并带有不确定性现象	
			FR ₃₄ =研究解决不相容问题	

[5] Nam Pyo Suh. 公理设计:发展与应用[M]. 谢友柏, 译. 北京:机械工业出版社,2004.

[6] 厉金宏,樊树海,方叶祥,等. 可重构制造系统设施布置公理化设计研究[J]. 工业工程与管理,2011,16(2): 72-76.

[7] 曾威,史彦军,滕弘飞. 卫星舱布局 CAD 系统:Pro/Engineer 二次开发若干关键技术[J]. 计算机辅助设计与

图形学学报,2005,17(11): 2575-2579.

作者简介:

张 雷 男,(1991-),研究生. 研究方向为公理化设计. E-mail:ZL859528@163. com

(上接第 82 页)

[3] 陈博文. 浮点乘加部件的自动化形式验证[J]. 计算机研究与发展,2010,47(S1):262-267.

[4] Goni O,Todorovich E. Components for Coverage-Driven Verification of floating-point units[C]// IX Southern Conference on Programmable Logic (SPL). Montpellier,France: IEEE,2014:1-7.

[5] AAR Sayed-Ahmed. Three engines to solve verification constraints of decimal Floating-Point operation[C] // Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR). Nontpellier, France: IEEE, 2010: 1153-1157.

[6] Ziv A. Solving the generalized mask constraint for test

generation of binary floating point add operation[J]. Theoretical Computer Science, 2003, 291 (2): 183-201.

作者简介:

胡广垠 男,(1993-),硕士研究生. 研究方向为集成电路设计与验证. E-mail:guangyin_hu@sina. com

王子欧 男,(1968-),副研究员,硕士研究生导师. 研究方向为纳米器件与存储系统.

吴升光 男,(1991-),硕士研究生. 研究方向为集成电路设计与验证.

王申卓 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为集成电路及 SOC 设计.