

doi: 10.7690/bgzd.2013.10.006

基于改进型公理设计的装备系统辅助概念设计方法

方峻, 桂长华, 徐诚

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为实现军事装备系统概念设计知识的重用, 提高装备系统的设计效率, 提出一种基于改进型公理设计的辅助概念设计方法。在公理设计框架的基础上, 考虑装备系统的性能指标, 建立一种适用于装备系统概念设计的功能(性能)-结构映射模型。以该概念设计模型为框架, 运用知识工程的思想, 构建装备系统的概念设计知识库和装备系统的辅助概念设计系统, 从而实现了概念设计知识的重用。以某型单兵综合作战系统为例, 详细阐述该方法的实际应用过程。实际结果表明: 该方法能避免海量设计知识的搜索, 提高系统的概念设计概率, 加快设计速度。

关键词: 装备系统; 概念设计; 公理设计; 知识重用; 单兵系统

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Aided Concept Design Method Based on Improved Axiomatic Design for Equipment System

Fang Jun, Gui Changhua, Xu Cheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to reuse the knowledge of concept design of equipment system and improve the conceptual design efficiency of equipment system, an aided design method based on improved axiomatic design was proposed. Based on the axiomatic design theory, and considering the performance index of equipment system, a kind of new mapping model-function (performance index) dedicated equipment system concept design, which is suitable for the concept design, was given. In this model, the amount of information of a system project should be provided on the basis of performance index. A conceptual design knowledge base and the aided concept design system of equipment system were created based on the mapping model and idea of knowledge engineering to realize the reusing of conceptual design knowledge. Finally, the concept design of a soldier system as an example was provided to describe the actual application process of the design method in detail. And the result shows the method can help designer avoid searching much design knowledge to improve the design efficiency of system.

Key words: equipment system; concept design; axiomatic design; knowledge reuse; soldier system

0 引言

军事装备的概念设计是从部队需求出发, 在全面考虑各种设计约束的条件下, 寻求一组能满足设计要求的原理解, 从而将系统的抽象功能转化为具体结构的设计过程。军事装备的概念设计是整个装备设计过程中最关键的设计环节, 决定着装备系统最终的使用性能。

对于概念设计方法模型的研究, 前人已经取得许多重要成果, 其中应用较为广泛的模型要数公理设计中的功能-结构概念设计模型。文献[1]以公理设计为框架, 提出了一种域结构模板并应用于平缝机的概念设计; 文献[2]将公理设计应用于特种机器人的配置设计中; 文献[3]中将公理设计方法应用于保障装备体系的需求分析中, 实现了装备体系

的合理性和创新性分析。然而, 公理设计所提供的概念设计模型中并没有涉及到性能指标, 而在实际的装备系统设计中往往需要考虑系统的性能指标, 因此笔者对其映射模型进行改进, 提出了一种适用于装备系统概念设计的功能(性能)-结构的映射模型, 同时以该映射模型为框架, 通过构建装备概念设计相关的知识库, 辅助设计人员进行装备的概念设计, 实现了军事装备概念设计知识的重用, 提高了装备概念设计的效率。

1 公理设计的映射模型及其改进

公理设计方法给出了 2 大公理: 功能独立公理和信息最小公理。在公理设计中, 概念设计体现在功能域(function domain, FR)与物理域(physical domain, DP)之间的“Z”字形映射过程, 即根据

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-06-26

基金项目: “十二五”总装预研技术支撑项目

作者简介: 方峻(1974—), 男, 江苏人, 副研究员, 硕士生导师, 从事智能 CAD 和知识工程研究。

用户需求抽象出功能要求，在物理域中搜寻能够满足功能的设计参数。

公理设计通过设计矩阵来表达产品的设计目标和设计方案。根据用户需求确定特设计目标的功能需求集，构成功能域中的 FR 向量。同样，在结构域中已经被选择来满足 FR 的设计参数集，构成了 DP 向量。为满足独立性公理，设计矩阵必须是对角矩阵或者三角矩阵，当设计矩阵 $[A]$ 为对角矩阵时，每个功能要求都能满足独立性，这样的设计称为无耦设计。当设计矩阵为三角矩阵式，只有按正确的顺序确定设计参数，才能保证功能要求之间的独立性，这样的设计称为解耦设计。

信息公理认为设计中信息量最小的设计为最佳设计。这里所说的信息量最小其实是指具有最高成功概率的设计是最好的设计。系统信息量的计算方法如式 (1)：

$$I_{\text{sys}} = - \sum_{i=1}^m \log_2 P_i \quad (1)$$

式中， P_i 是给定 DP_i 满足 FR_i 的概率或是满足多个 FR 时的条件概率，信息量的单位为 bit。当有多个概念设计方案时，需要利用式 (1) 计算各方案的信息量，根据信息量的大小来确定最佳方案^[1-2]。

装备系统的性能指标反映了系统实现其功能的

能力，最终的系统方案评估也是通过性能指标来评价的。公理设计中的映射模型仅仅从功能的角度考虑实现该功能的结构特征，其信息量是通过结构实现功能的概率来进行计算，未考虑设计对象的性能。而笔者认为，在装备系统的概念设计中应考虑装备系统的性能指标；为此，笔者对公理设计中的映射模型进行了改进，给出了由系统功能(性能)-结构的映射模型。装备系统的每个功能特征均有相应的性能指标要求，根据系统的功能要求给出相应的性能指标要求。在功能向结构映射时，需要综合考虑功能和性能指标要求，即系统的结构特征要根据系统的功能要求进行确定。在计算系统方案信息量时，要以系统结构特征能够实现其对应功能下的性能指标要求的概率为准，其计算公式仍沿用公式 (1)。在映射模型的表达上，采用树结构对系统的概念设计方案进行功能(性能)-结构的层次化描述。为了描述方便，将系统的功能、性能以及结构特征安排在同一棵树结构中，从而形成了系统的功能(性能)-结构树^[4-5]。系统的某一功能往往可由多种结构实现，且与功能特征关联的性能指标特征也会有多个，因此知识库中的映射模型与实际方案设计中的映射模型相比会有所区别，改进后的映射模型表示如图 1 所示。

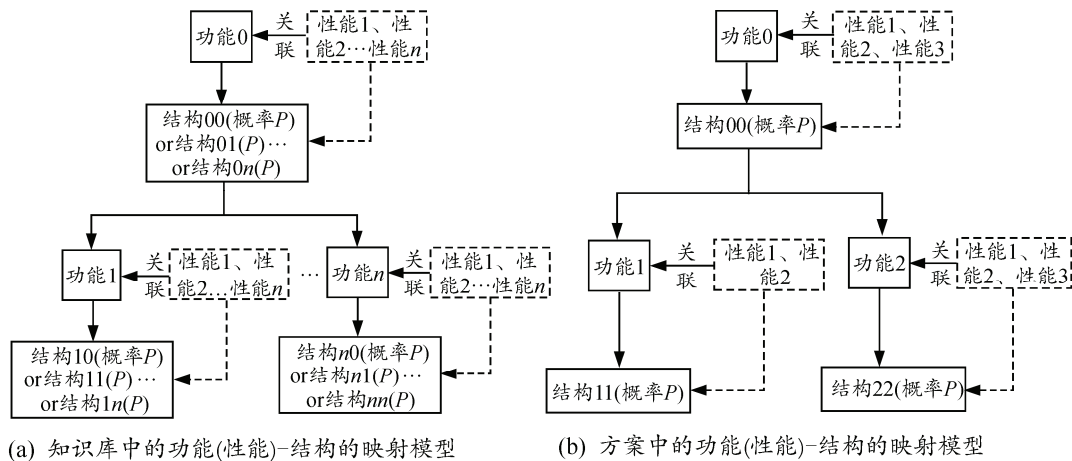


图 1 功能(性能)-结构的映射关系

2 军事装备概念设计知识的重用

军事装备往往是一个相当复杂的系统，由多个功能模块构成，在概念设计的过程中会涉及到很多的专业知识，如系统的功能特征、结构特征、性能指标特征以及相应的设计约束等。而在实际的装备系统研制过程中，大多数装备系统的概念设计都是在已有设计知识的积累与继承的基础上进行的改进

性设计；因此，需要对装备系统概念设计过程中的知识进收集与表达，以实现概念设计知识的重用，帮助设计人员提高军事装备系统的概念设计效率。

笔者在前述的概念设计模型的基础上，通过构建装备系统概念设计的相关知识库，来实现装备系统概念设计知识的继承与重用。装备系统辅助概念设计的知识库主要包括装备系统的功能-方法(结构)

映射知识库和功能方法规则库 2 类。功能方法库中包含了系统的功能特征、实现功能的结构特征、与功能特征关联的相关性能指标特征以及功能与结构间的相关描述以及结构实现性能要求的概率取值。功能方法规则库中包含了系统的功能分解映射时的相关规则，反映了功能特征间的逻辑关系，利用这些规则可对系统的功能结构模型进行检验。利用数据库对装备系统的知识进行组织和存储，为系统设计人员在进行新装备的辅助概念设计提供支撑，系统知识库的数据结构关系如图 2^[6-9]所示。

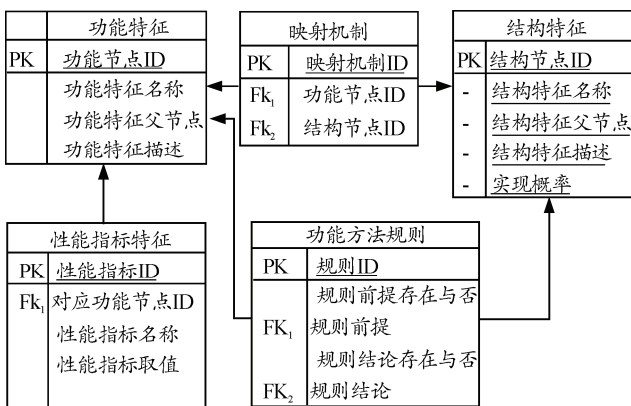


图 2 装备系统概念设计知识库的数据结构关系

3 基于改进型公理设计的辅助设计流程

基于改进型公理设计装备概念设计流程主要有以下重要步骤：

步骤 1：装备系统的功能分解与映射。装备系统的功能分解与求解过程实质是系统功能特征域向结构特征域映射的过程。设计人员根据装备系统设计任务书中的功能需求，从系统的功能特征库中选取合适的功能特征，并在系统映射机制作用下从结构特征库中搜寻合适的结构特征。通过循环映射，最终可建立装备系统层次化的功能结构模型。在功能分解映射过程中，从系统知识库中给出功能所对应的系统的性能指标特征并按任务要求给出其取值。若系统的知识库中不存在相应的功能、结构或性能指标特征，则要根据设计需要实时添加相应的特征，以实现系统特征库的不断更新。

步骤 2：装备系统功能结构模型的规则检验。利用知识库中的规则，对步骤 1 中建立的装备系统功能结构模型进行检验，检查所建立的模型是否满足装备系统的基本功能与结构要求。如某功能下是

否具备应有的子功能、某功能的实现是否是与其它功能有关系。

步骤 3：概念设计方案的设计矩阵的生成与方案合理性检验。根据装备系统的功能结构模型以及功能结构间的影响关系，生成装备系统的设计矩阵。通过判断设计矩阵的类型，从而判断系统概念设计方案是否合理。若设计矩阵为对角阵或三角阵，则认为装备系统的概念设计方案为合理方案；若为其他形式的矩阵，则需要重新进行功能-结构的映射，直到设计矩阵为对角阵或三角阵为止。

步骤 4：装备系统概念设计方案信息量的计算与方案的优选。根据建立的装备系统结构模型中的结构特征以及知识库中所提供的概率，根据式 (1) 计算设计方案的信息量。这里需要指出：对于方案中创新设计，设计者往往需要根据设计要求对相应结构特征的实现概率进行修改，即当方案中功能、结构或性能指标取值发生变化后，则要对概率取值进行重新赋值。在计算完各设计方案的信息量后，选取信息量最小的方案为系统设计的最优方案。具体的设计流程如图 3 所示。

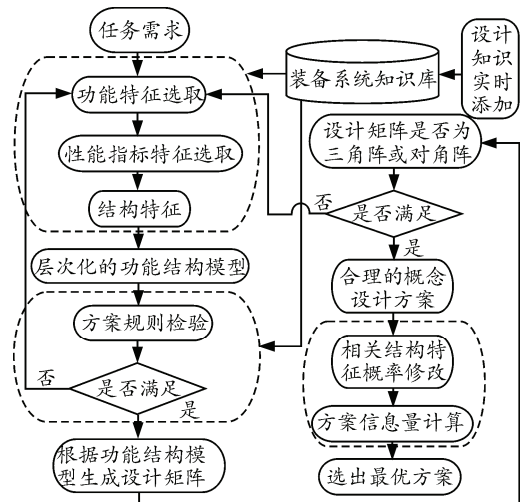


图 3 基于改进型公理设计的装备系统概念设计过程

4 实例

单兵综合作战系统是把单兵作为整个作战系统的一个武器平台，从人-机-环境整体考虑、统筹规划与设计的一个完善集成的人机系统。单兵系统功能要求多样、结构复杂，在概念设计过程涉及的专业知识繁多；因此，需要实现其概念设计知识的重用，以辅助设计人员快速进行新型号的单兵系统的概念设计^[10]。笔者以某型单兵综合作战系统为

例，详述基于改进公理设计的装备系统辅助概念设计方法。

统概念设计的知识库主要包括：系统的功能方法库和系统的功能方法规则库，如图 4，知识库的存储形式见图 2。

1) 建立单兵系统概念设计的知识库。单兵系

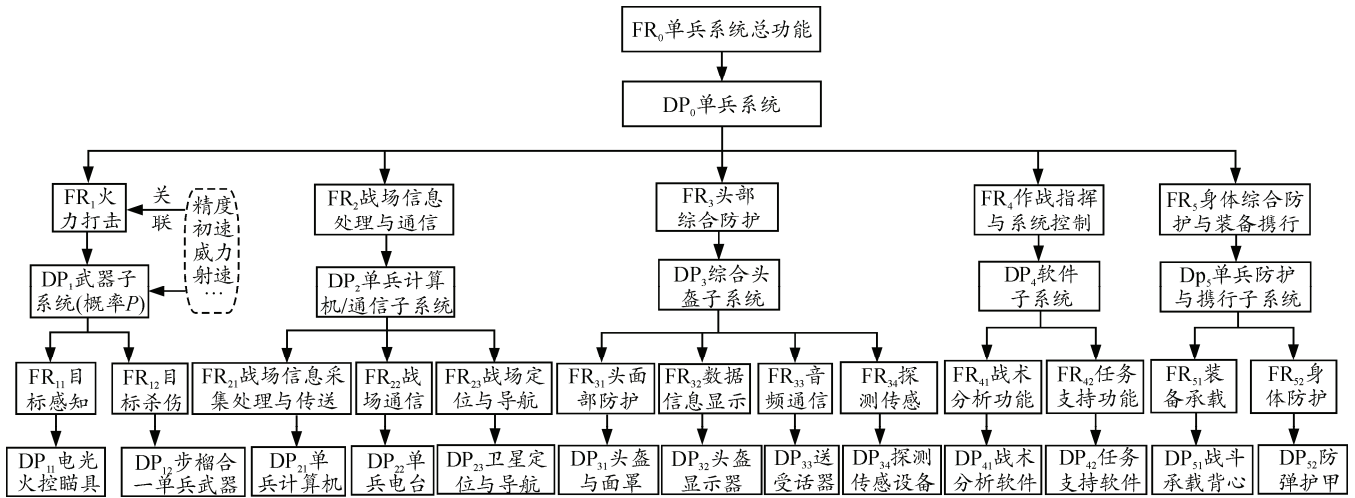


图 4 单兵系统功能(性能)-结构的映射方案

2) 根据知识库建立单兵系统的功能(性能)-结构模型。通过分析单兵综合作战系统的设计任务书，提取出单兵系统的功能需求特征以及相关的设计约束。单兵系统的功能需求主要有火力打击功能、战场信息分析处理与通信功能、头部综合防护功能、作战指挥与系统控制功能以及身体综合防护与装备携行功能等。在改进型公理设计的框架和单

兵系统的概念设计知识库的支持下，快速实现单兵系统的总功能分解以及功能特征到结构特征的映射，并确定功能特征下相应的性能指标特征。考虑到单兵系统的复杂性，这里只给出其一种方案的部分层次的功能分解与映射结果。另外，考虑到文章篇幅，这里只以火力打击功能为例，给出其相应的性能指标特征，具体过程如图 5 所示。



图 5 单兵系统辅助概念设计系统的知识库界面

3) 设计方案的规则检验。在建立单兵系统概念设计方案的功能结构模型后，需要利用知识库中的规则对模型进行检验。规则检验主要是为了验证

方案中各功能特征或结构特征之间的逻辑关系是否满足单兵系统设计的通用要求。例如若有战场信息处理与通信功能，则是否存在战场信息采集处理与

