

# 红外导引装备环境适应性智能设计方法研究

尚 超,张同贺,王军平,王明昌,魏新武

(中国空空导弹研究院,洛阳 471009)

**[摘要]** 适应性是制约红外导引装备性能的关键因素之一,其设计方法的智能化创新研究具有重要的意义。简介了基于模型的系统工程方法和人工智能方法的发展和现状,对红外导引装备环境适应性智能设计方法进行了分析,并利用 SysML 分别建立了一种 5 层的智能设计系统总体架构模型、一种智能综合推理的设计过程模型、一种面向对象的知识分类结构模型和一种用模糊神经网络抽取案例知识的行为模型,为精确制导装备智能设计系统的研发提供了有益的参考。

**关键词:** 基于模型的系统工程(MBSE); 系统建模语言(SysML); 智能设计; 环境适应性; 红外导引装备

## Research on Intelligent Design Method of Environmental Adaptability of Infrared Guidance Device

SHANG Chao, ZHANG Tonghe, WANG Junping, WANG Mingchang, WEI Xinwu

(China Airborne Missile Academe, Luoyang 471009, China)

**[ABSTRACT]** As one of the key performances of infrared guidance devices, it's of great significance to carry out innovative research on the intelligent design method of environmental adaptability. The development and present situation of MBSE and AI are briefly introduced. The intelligent design method is analyzed and five models are established by SysML, such as one intelligent design system architecture model with five levels, one reasoning process model consisting of several intelligent algorithms, one object-oriented structure model of knowledge and one activity model for extracting knowledge form the cases database using FNN approach. A useful reference for I2CAD system of precise guiding devices is provided by the research.

**Keywords:** Model-Based System Engineering (MBSE); Systems Modeling Language (SysML); Intelligent design; Environmental adaptability; Infrared guidance device

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.083

环境适应性是精确制导装备的关键质量要素,对战争胜负有重要影响,攸关国家利益和安全。1992 年发布的《美国国防部核心计划》将“环境影响”作为 11 项核心技术之一,“并认为它覆盖了 21 项关键技术,对武器系统产生全面的影响”<sup>[1]</sup>。目前的计算机辅助设计工具已经能部分地提高设计的自动化水平,在此基础上进一步开发智能化快速设计系统,已成为航空企业提升自主创新能力和核心生产力的重要手段<sup>[2]</sup>。

红外导引装备是集光、机、电和信息技术于一体的复杂系统,其环境适应性设计难度与日俱增。红外导引装备的环境适应性设计涉及多个不同专业领域、系统层次、业务流程和生命阶段,需要多个人员、小组、部门或单位分工协作。传统的基于文档的系统工程方法存在信息量极度膨胀、文档信息难以抽取、领域信息衔接困难、上下游信息沟通不畅、人工迭代效率低且成本高等问题。基于模型的系统工程(Model-Based System Engineering, MBSE)<sup>[3]</sup>和人工智能(Artificial Intelligence,

AI)<sup>[4]</sup>技术的发展为使用计算机模仿人类专家的智能思维去辅助处理或者自动处理复杂系统的模型,使计算机具有甚至超过人类专家的系统综合化设计水平提供了支撑,形成了现代智能设计方法的理论基础。

红外导引装备环境适应性智能设计方法研究可以提升装备研制的效费比和智能水平,符合智慧军工发展趋势,具有重要的军事和经济效益。

### 1 智能设计方法的发展

设计是人类利用智能思维对人造技术系统进行构思、分析并把设想需求变为制造要求的创造性活动。设计方法的智能化主要体现在设计工具在决策层面的智能化和知识处理层面的自动化,既涉及相关专业领域的设计知识建模,又涉及知识处理领域的知识。

现代工程设计领域正在推广基于模型的系统工程方法。这种方法包含建模的原则、方法、语言和工具,可贯穿于复杂技术系统的整个生命周期。系统建模语言

(systems modeling language, SysML)<sup>[5]</sup>是一种用于基于模型的系统工程方法的顶层建模语言,可以支持复杂系统的描述、设计、分析、验证等活动。图1所示为SysML模型架构。在需求方面,需求图用于描述系统需求及需求之关系。在结构方面,块定义图用于定义模块及其属性等,内部块图用于表示模块内部的子模块组成及其连接关系,参数图用于详细描述模块属性应满足的参数约束关系,包图用于模型分组管理。在行为方面,活动图用于描述系统行为的流程,序列图用于表示行为过程中模块间的交互,状态机图用于表示系统的状态转换,用例图用于表示系统的功能要求。

20世纪80年代至今,美军的装备研制方法经历了基于经验设计、基于结构设计和基于模型设计等3个阶段,形成了一套完整、成熟的复杂系统建模、分析和设计的理论体系,推动了美军装备的体系化和创新性发展<sup>[6]</sup>。国内上飞院、611所、612所等单位在航空装备领域也开展了相关研究和应用。

人工智能则是推动现代工程设计方法智能化发展的关键技术。20世纪90年代,美国学者James提出了一种3层智能模型,促进了基于计算和基于符号的各种智能理论、模型、方法的综合集成,从而发展成能够解决更复杂系统问题的智能行为。美国海军武器中心通过采用人工智能和软件工程技术建立一种基于规则的嵌入式专家系统,达到提高海军战术空空和空面导弹的自动化和可靠性水平并减少全寿命周期成本的目的。国内袁志华<sup>[7]</sup>、杨军<sup>[8]</sup>、聂永芳<sup>[9]</sup>等在导弹武器系统方案论证、总体设计、故障诊断等方面应用人工智能技术也进行了有益的探索。

智能设计作为先进制造技术的源头和核心,是航空企业实现航空产品设计创新和设计效率提升的重要支撑手段。

## 2 环境适应性智能设计分析

环境适应性设计是指为满足装备的环境适应性要求而采取的一系列措施,包括改善环境、减缓环境影响和提高装备环境耐受能力的措施<sup>[10]</sup>。

之前,红外导引装备的环境适应性设计,一般以国军标规定的环境试验条件为基础,由军方用户和工业部门一同协商确定。装备总包单位与分系统承包单位再一同协商并逐级分解获得分系统的适应性要求,最终由不同专业的设计师转换为各层级组成单元的多域设计参数之后,通过环境试验进行设计验证。在这个过程中,设计需求和设计结果基本都是采用文档或图样的形式来表示的。这种表示方式存在表述不准确、不一致、不完整、难追溯等缺点,另外非形式化的文档信息不易于计算机辅助设计工具直接提取和使用,不同学科之间的

多域设计信息差别较大,导致需求方、设计方、协作方之间存在信息鸿沟,设计过程往往依靠粗放的行业规范、设计准则和个人经验开展,造成设计约束性不强、验证不足、迭代效率低等瓶颈问题。

环境适应性智能设计就是利用基于模型的系统工程和人工智能技术,建立设计活动、过程、需求和知识的计算机模型,并且能够利用神经网络等人工智能算法指导甚至实现一定的智能策略和处理,将环境适应性需求模型自动分解、映射到底层单元的专业设计模型的过程和行为。

从基于模型的系统工程和人工智能方法的角度来看,系统架构、设计过程和领域知识的建模分析是红外导引装备环境智能设计方法的3个关键问题。

### 2.1 系统架构建模分析

红外导引装备环境适应性设计具有很强的经验性,同时又是一个严格推理和数值计算处理过程。单一的方法已经不能满足智能设计的要求,可以综合多种智能处理方法,在产品设计方案的确定、分析模型的建立、主要参数的决策、结构设计的评价选优等不能建立起精确的数学模型并用数值计算方法求解的设计活动中,利用计算机模拟人的创造力取得合理的设计结果。

此外,红外导引装备环境适应性设计过程中还存在多领域参数协同优化、部分参数(如抗干扰性能)存在模糊性、面临的攻防环境日益复杂、多因素综合评价困难等问题。因此必须引入神经网络、模糊理论和进化计算等智能方法,形成综合化的智能推理决策方法,并充分利用数据库管理工具、知识管理工具和各种专业化的计算机辅助设计工具,形成集成式模块化的智能设计系统。

图2所示为利用SysML的内部块图模型建立的一种包含用户层、综合决策层、专业处理层、数据管理层和

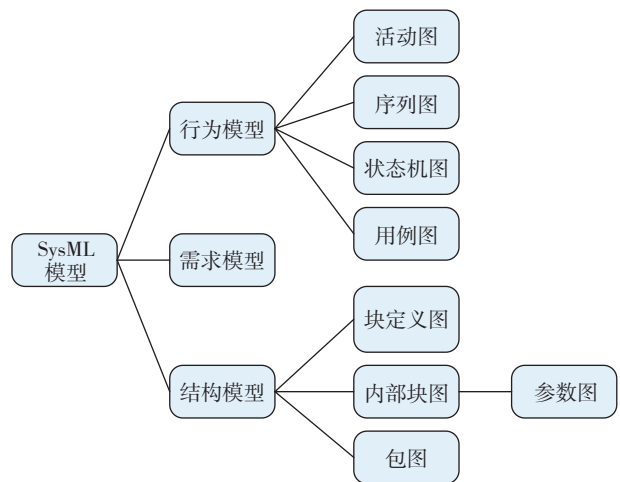


图1 SysML模型架构  
Fig.1 Architecture of SysML model

数据存储层 5 个层次的系统总体架构模型。其中的综合推理决策层根据设计任务的知识自动选择特定的推理方法,然后通过知识管理系统分类调用不同的知识和推理方法,然后根据推理结果进行集成处理,并调用必要的计算机辅助设计工具或其他推理方法进行下一步推理或者数值计算工作,然后通过综合决策单元完成系统的设计、仿真、分析、评价和决策建议,最后由用户(设计人员)确认最终的设计结果。除了作为元推理主体的基本符号推理机制需要直接集成,其他特定人工智能处理方法都是作为面向对象的知识模型的方法存储在知识库中,等待元推理机调用完成特定的处理任务。

## 2.2 设计过程建模分析

通用设计理论<sup>[4]</sup>指出设计是基于知识处理与操作的创造性活动,从知识有限性、知识拥有量有限性、知识操作速度有限性 3 个方面揭示了设计不断迭代完善的过程性特征。

红外导引装备环境适应性设计过程中,部分设计活动的推理方法非常成熟,比如功耗与温升的数值计算,但是还有一些设计活动缺乏明确的推理方法,比如环境适应性与其他性能映射关系不清晰、设计空间复杂、指标模糊量化评价、多约束多参数耦合分析、干扰独立特征抽取评价等。因此,对数据和知识进行综合的智能推理是设计过程的核心活动。

利用计算机进行智能推理需要依靠一些新的人工智能技术来模拟人类专家的智能行为,并且具有并行化与计算化等特征。人工神经网络可以通过样本数据训练逐步学习和记录样本数据中隐含的知识,并利用获取的知识进行联想和归纳有效地处理新数据,还可以通过迁移学习获得强大的泛化能力。神经网络的显著缺点是,获取的知识通过网络连接权值组合进行描述,权值数量和组合形式使人类专家难以理解这种知识的关联性和逻辑性。模糊计算理论能够处理一些纷繁复杂的逻辑问题,模糊规则的形式简化了人类专家高级逻辑知识的表达方法,但是模糊规则的制定往往依赖于专家的知识 and 归纳水平,不能直接从数据中自主获取,从而限制了模糊理论的应用。当前,各种智能方法互相渗透融合,推动人工智能技术不断突破,从而为计算机辅助设计的智能化研究提供重要的技术支撑。

图 3 所示为一种综合化的智能搜索、推理和评价设计的过程模型,图形利用的是 SysML 的内部块图模型。图 3 中,针对一般案例搜索方法存在选中案例的关键功能性能不是最优的,而且环境适应性与产品关键功能、性能的专业参数映射关系比较模糊的问题,通过使用模糊神经网络<sup>[11]</sup>技术学习并描述这种模糊关系,从而解决设计需求多域映射的模糊问题。利用该模糊模型,一

方面可以实现通过功能性能指标实现环境适应性的最优案例搜索;另一方面,可以评估环境适应性对其他关键技术指标的影响,反过来通过其他关键技术指标的设计结构对环境适应性设计进行评价。在选中的案例基础上引入了遗传算法,使用基因编码代表设计方案的集合,将设计过程映射为基因编码的复制、交叉和变异操作,通过适应度或惩罚函数调整基因样本的进化方向,从而实现环境适应性的进化设计,实现基于案例的智能自动化改进和创新设计。

除了关键的智能推理活动之外,其余的设计活动也可以利用 SysML 的结构模型或者行为模型进行建模。

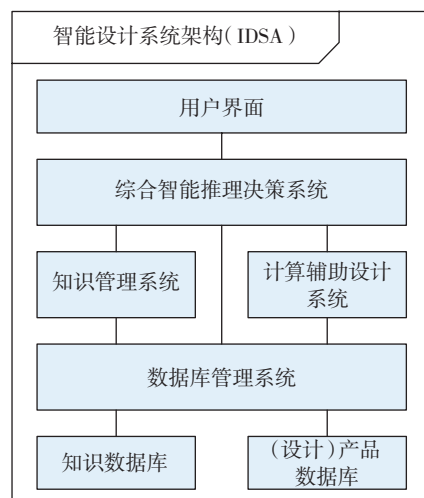


图2 智能设计系统的分层架构模型

Fig.2 Layered architecture model of intelligent design system

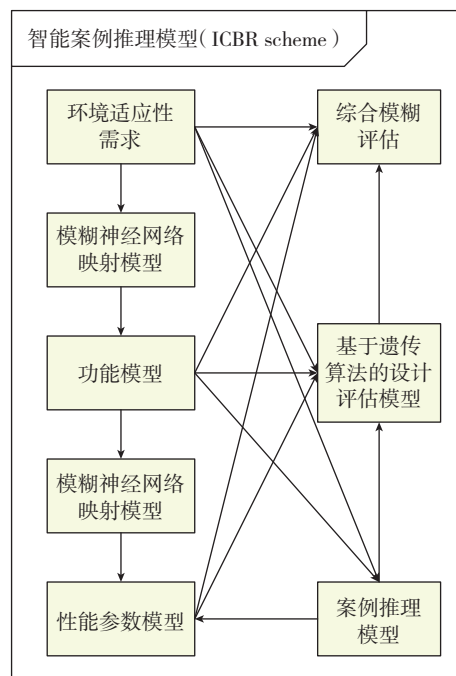


图3 综合智能案例推理过程模型

Fig.3 Process model of comprehensive intelligent case reasoning

### 2.3 设计知识建模分析

红外导引装备环境适应性设计的过程涉及很多知识领域,如机械、光学、电子、优化设计、系统工程与控制理论等。不同类型的知识,其获取、表示和利用方式不尽相同。面向对象的知识集成方法可以将多种单一的知识表示方法按照面向对象的思维和设计原则组合成一种集成知识表示形式<sup>[12]</sup>。面向对象的方法能用相互关联的类层次结构表达知识的联系,并用内部属性的数据结构代替传统知识表达的框架结构和规则结构,把对知识的操作过程等封装为方法,同时知识的获取和应用也可以封装为相应类的方法。该方法既是设计知识的表达,也可应用于设计推理过程,实现计算、推理、自学习3种能力的封装和统一。

红外导引装备的环境适应性设计知识与一组活动集合相对应。分解模型提供了设计问题的求解策略,也决定了设计知识的表达形式。分解模型假设复杂的设计问题可逐层分解为一系列具有松散耦合关系的设计子问题,针对每个子问题建立和组织知识处理对象,每个子问题的求解就是对这些对象知识模型的处理,它可能是数学模型的求解,也可能是基于知识的推理。模型分解的粒度与具体设计问题及要求有关,没有统一的划分标准。一般地,对于标准件、模块化程度高的部件宜采用较大的分解粒度,而对于非标准件、特殊或关键的部件宜采用较小的分解粒度。图4所示为部分环境适应性设计知识的一种分层结构模型,包含领域类知识、设计类知识、决策类知识和工程数据类知识等。决策类知识负责智能设计过程的控制和思维过程,负责调度设计界面类进行数据

传输、激发设计规则类提供设计的控制信号;领域类知识作为工程数据库的对外接口是设计过程的数据流动中心,并提供被规则激活的相应成员函数,如有限元分析、动态计算等完成计算任务,同时推理类监控任务的执行情况并做出响应。图4中的对象封装原则是共性的属性和方法封装于基类,个性的属性和方法封装于子类。例如,基类“红外导引装备 Chwdyt”封装的属性有:工作环境温度、振动冲击条件、电磁兼容性、抗干扰要求等参数,方便子类继承使用这些参数。各层次类属性主要为设计参数、结构参数、性能参数等;方法主要为环境适应性分析程序,如有限元方法、电磁兼容仿真、容差分析、敏感度分析等,负责完成智能系统的数值计算型任务。

神经网络具有自学习的能力,能够把新问题作为新学习样本进行迭代学习,通过修正神经网络的参数矩阵来抽取和积累隐含知识。图5所示的SysML活动图是一种设想的对案例数据隐含的知识规则进行智能抽取的过程行为模型,其中的规则抽取器采用的是基于神经网络的智能抽取方法。

### 3 结论

航空工业作为“工业之花”,其设计活动的智能化水平能够反映中国高端装备制造的智能化水平。航空精导装备的进度、质量、成本和创新性需求急剧增长,对设计理论、方法和工具的改进和创新提出了迫切的要求。利用基于模型的系统工程方法和人工智能理论,对红外导引装备的环境适应性智能设计的3个关键问题进行了初步的SysML建模分析,为提高红外导引装备环境适

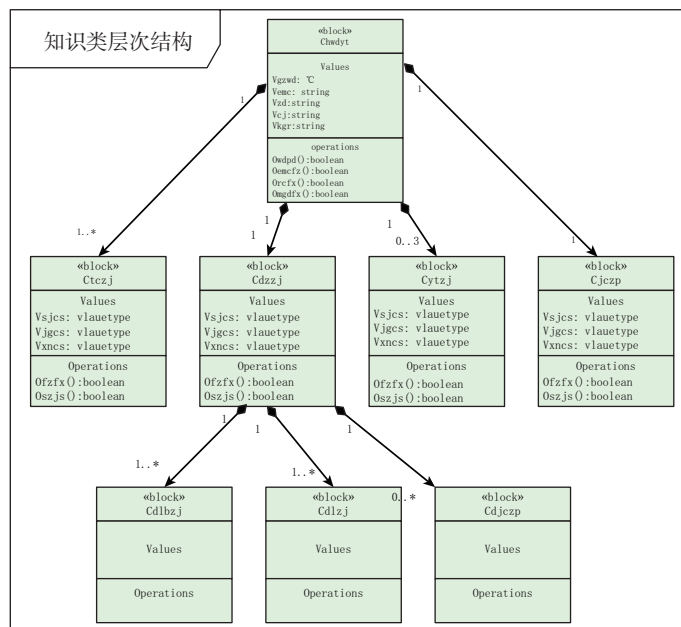


图4 部分知识类的分层结构模型

Fig.4 Layered architecture model of some classes of knowledge

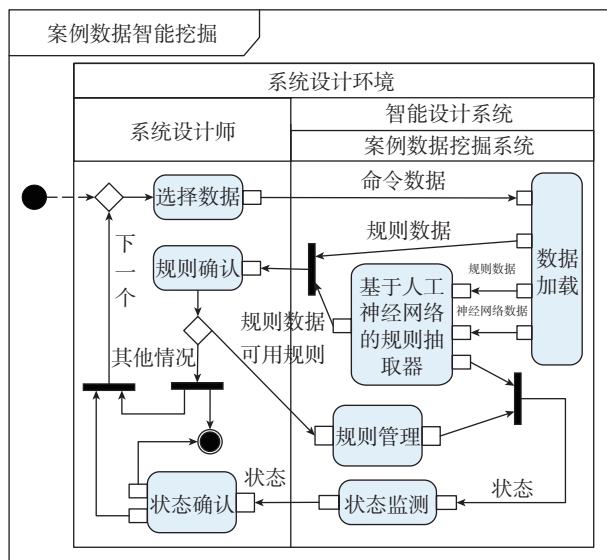


图5 智能化案例数据挖掘的行为模型

Fig.5 Behavior model of case data intelligent mining

应性设计乃至我国精确制导武器装备研制工作的智能化水平和设计效率提供了新的思路。

红外导引装备环境适应性设计是一个涉及多专业活动和知识的系统性过程,而基于 MBSE 和 AI 的智能设计方法比较适合系统层面的总体设计活动,但底层的一些具体设计活动仍然需要依赖于特定专业的计算机辅助设计软件,因此红外导引装备环境适应性智能设计方法必然会发展成为一种综合性的集成化智能计算机辅助设计方法和系统。

### 参考文献

- [1] 赵治国. 车载计算机环境适应性设计 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [2] ZHAO Zhiguo. Study on the environmental adaptability design of vehicle loaded computer system[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [3] 陈鑫, 刘献伟, 偏晓鹏. 基于 KBE 的导弹结构快速设计系统的研究与开发 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(6): 76-79.
- [4] CHEN Xin, LIU Xianwei, PIAN Xiaopeng. Research and development of rapid design system for missile based on KBE method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(6): 76-79.
- [5] FISHER J. Model-based systems engineering: a new paradigm [J]. INCOSE Insight, 1998, 1(3): 3-16.
- [6] 肖人彬, 陶振武, 刘勇. 智能设计原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] XIAO Renbin, TAO Zhenwu, LIU Yong. Principles and techniques of intelligent design[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [8] 曹悦. 基于 SysML 的多域复杂机电产品系统层建模与仿真集成研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [9] CAO Yue. Integration of system-level modeling and simulation of multi-domain complicated mechatronic product in SysML[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [10] 郑应荣. 系统级层次化测试性建模与分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [11] ZHENG Yingrong. Testability modeling and analysis of hierarchical system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

滨工业大学, 2014.

ZHENG Yingrong. Testability modeling and analysis of hierarchical system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[7] 袁志华, 郭美芳, 郝博. 榴弹总体方案智能设计专家系统技术 [J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 170-174.

YUAN Zhihua, GUO Meifang, HAO Bo. Study on high-explosive projectile expert system design[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(1): 170-174.

[8] 杨军, 赵磊. 基于 BAM 神经网络的某型车载导弹故障诊断 [J]. 兵器装备工程学报, 2012, 33(1): 1-3.

YANG Jun, ZHAO Lei. Based on the BAM neural network of a certain type of car missile fault diagnosis[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, 33(1): 1-3.

[9] 聂永芳, 蔡春涛. 导弹武器系统研制方案智能决策支持系统概念研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2003(4): 30-35.

NIE Yongfang, JIANG Chuntao. Concept of missile weapon system design scheme of intelligent decision support system research[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2003(4): 30-35.

[10] 中国人民解放军总装备部. 装备环境工程通用要求: GJB4239-2001[S]. 2001.

General Armament Department of PLA. General requirements of equipment environmental engineering: GJB4239-2001[S]. 2001.

[11] 王振雷. 模糊神经网络理论及其在复杂系统中的应用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2002.

WANG Zhenlei. Theory of fuzzy neural network and its application for complex systems[D]. Shenyang: Northeastern University, 2002.

[12] 余子开, 孙印华, 贾洪德, 等. 航天产品研制过程中的知识获取与表达技术研究 [J]. 机械工程师, 2017(1): 197-200.

YU Zikai, SUN Yinhu, JIA Hongde, et al. Research on the knowledge acquisition and representation in the aerospace products development process[J]. Mechanical Engineer, 2017(1): 197-200.

通讯作者: 尚超, 博士、高级工程师, 研究方向为红外导引技术、嵌入式系统技术, E-mail: newstarsc@163.com.

(责编 大漠)