

面向突防效能的超声速巡航导弹总体设计技术初步研究*

范玉珠^{1,2}, 张为华¹, 王中伟¹, 程见童¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 63620 部队, 甘肃 兰州 732750)

摘要: 防御系统技术的不断发展,对超声速巡航导弹设计提出了新的需求。针对以“性能”为核心的设计不能满足超声速巡航导弹设计新要求的问题,初步探讨了面向突防效能的超声速巡航导弹总体设计技术。分析了国内外导弹武器设计技术的发展,指出设计技术向着以“效能为核心”的设计方向发展;提出了面向效能的设计理念,分析指出面向效能的设计是以追求满意设计为目标的优化设计;在新的设计理念指导下提出了面向突防效能设计的技术框架,主要说明了面向突防效能的超声速巡航导弹设计框架、效能基础、技术基础、基本模式以及几项关键技术等。

关键词: 突防效能; 总体设计; 超声速巡航导弹; 技术框架; 设计优化

中图分类号: V221 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)02-0125-05

The preliminary research of supersonic cruise missile master design based on penetration effectiveness

FAN Yuzhu^{1,2}, ZHANG Weihua¹, WANG Zhongwei¹, CHENG Jiantong²

(1. College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Unit 63620, Lanzhou 732750, China)

Abstract: New requirements for design of Supersonic Cruise Missile (SCM) have been brought forward with the technology development of defense systems. The technology of SCM general scheme design centering on a core of effectiveness was discussed preliminarily in this paper, considering the deficiency of traditional performance based design method for the new design requirements of SCM. Development of design technology for missile weapons abroad was firstly analyzed, and it is pointed out that the design technology is oriented toward a direction of effectiveness-centered design; the concept of effectiveness based design is brought forward, which is a certain kind of optimal design of pursuing a satisfying design; technology frame with penetration effectiveness based design was constructed under such new design concept. Main aspects were concentrated on the penetration effectiveness based SCM design frame, foundation of the penetration effectiveness, foundation of the technology, basic modes and several key technologies, etc.

Key words: penetration effectiveness; master design; super cruise missile; technology frame; design optimization

防御系统技术的不断发展,对超声速巡航导弹设计提出了新的需求,期望设计方案的实际突防效能令决策者满意。如何综合权衡总体性能设计与突防效能需求,已成为困扰超声速巡航导弹总体技术发展的重大技术难题。新的需求表明:超声速巡航导弹的研制不能着眼于单一性能的设计,需面向效能层开展设计。

传统导弹总体设计以性能为核心,以满足性能要求的程度来衡量导弹设计水平,不能完全满足导弹武器系统效能层次的设计要求^[1];设计思想和方法仍然局限于导弹个体,没有从设计角度实现总体设计过程与突防效能分析有效统一。当防御系统发生改变或任何一种新突防设计技术采纳,将导致整个总体设计过程的反复,研制费用和

周期增加,研制风险增大,甚至影响导弹的作战效能。

就本质而言,超声速巡航导弹突防效能是其先天属性,是设计出来的,只有在超声速巡航导弹设计阶段将突防效能研究融入到总体设计过程中去,才能保证设计出来的超声速巡航导弹满足突防效能要求。本文分析了面向效能的设计概念及发展;在分析超声速巡航导弹设计需求基础上,借鉴“面向效能的设计”思想,提出了面向突防效能的超声速巡航导弹设计理念,给出了面向突防效能的超声速巡航导弹设计技术框架。

1 面向效能的设计概念提出及发展

多学科 (Multidisciplinary Design Optimization,

* 收稿日期: 2011-10-30

作者简介: 范玉珠 (1972—), 女, 山西牟平人, 博士研究生, E-mail: fanyuzhu@nudt.edu.cn;

张为华 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: zwh-kjs@163.com

MDO)技术的发展,使得导弹的设计技术进入了以计算机技术为基础的系统设计和系统集成等先进设计方法为特征的多学科综合设计阶段^[2]。但设计技术仍然采用以“性能为核心”的设计理念。系统工程理论的深入和信息化技术的发展,使导弹的设计开始探讨以面向需求为特征的均衡设计(Balanced Design),进一步拉近设计与使用之间的关系^[3-4]。特别是对面向成本设计(Design for Cost,DFC)、面向X设计(Design for X,DFX)、面向质量的功能配置(Quality Function Disposition,QFD)等设计思想的探索,标志着设计理念已经由以“性能为核心”向以“效能为核心”转变。

在设计理念和方法探讨方面,DFC、DFX、QFD等理论研究不断开展,部分成果已经成功应用于科研生产,特别是关于效能参与设计的探讨正逐步开展^[5-6]。这些探索为超声速巡航导弹的设计技术发展提供了新的思路。

2 超声速巡航导弹设计趋势及需求

2.1 超声速巡航导弹设计技术发展趋势

我国武器工业发展起步较晚,导弹设计经历了仿制与自行研发的过程,并且不断追踪国际先进的设计理念与方法,取得了骄人的成就。目前我国的巡航导弹设计技术也主要是以“性能为核心”展开的。

伴随着大系统工程理论、计算机技术、先进建模仿真技术不断进步,超声速巡航导弹设计技术必然向着高度综合和直接面向作战使用方向发展,并逐步将超声速巡航导弹的设计、生产与使用统一到同一个理论框架之内,实现面向作战需求的超声速巡航导弹高度集成与综合设计,即以“效能为核心”的综合设计。

2.2 超声速巡航导弹设计新需求

防御系统技术的不断发展对超声速巡航导弹突防效能构成威胁,必然对超声速巡航导弹设计也提出新的需求,主要体现在以下几方面:

(1)面向需求的设计。方案设计必须以满足突防作战需求,提高导弹突防能力,降低全寿命周期费用、缩短研制周期为基本目的,以满足战争的需要为根本出发点。

(2)一致性设计。将总体方案设计与满足高突防效能需求相结合,将导弹战标的合理性和先进性论证与使用结合起来,充分发挥使用部门需求的牵引作用,统一认识。

(3)系统性设计。战术技术性能指标的制定与导弹所攻击的目标密切相关,需对攻击目标攻防特性和特征进行分析,需对防御系统技术发展趋向进行分析。依据攻防特性,提出性能要求,如导弹飞行速度、飞行高度、隐身特性、机动性能等。弹道分析用于进一步验证巡航速度、巡航高度、有效射程以及导弹技术性能方面的指标。弹道设计必须考虑便于突防,需解决巡航速度、巡航高度与突防能力的关系。

3 面向突防效能的导弹总体设计理念

效能理论的产生与发展为超声速巡航导弹设计提供了新的思路^[7-8]。以一体化设计技术、近似建模技术、多学科优化技术为特征的先进设计试验手段的发展,使设计具备向体系研究拓展的可能性,为新的设计理念与方法的产生提供了设计技术基础。

导弹突防效能指导弹武器系统在预定或规定的防御环境以及所考虑的组织、战略、战术、生存与威胁等条件下,由有代表性的人员使用导弹完成规定突防任务的效能^[9]。防御环境包括雷达、预警卫星和拦截导弹等。突防效能与导弹性能指标不同,性能指标更强调其静态性,当武器系统设计生产完毕,其性能指标大多已基本确定;突防效能则强调其动态概念,它与导弹武器实际作战过程和环境密切相关,是导弹设计、生产和使用的结合点,综合体现了导弹系统性,对导弹设计改进具有指导作用。

当部队提出对导弹能力设计的期望时,同时也给出能力的适用范围;对于设计部门,部队期望就是导弹突防效能的满意值,能力适用范围就是导弹突防效能的设计约束。面向突防效能的设计是以追求满意设计结果为目的的优化设计。在面向突防效能的超声速巡航导弹设计过程中,突防效能的分析可以使超声速巡航导弹的设计需求统一在效能框架内,实现超声速巡航导弹的高度集成设计。因此,面向突防效能的设计符合超声速巡航导弹的设计需求。

4 面向突防效能的超声速巡航导弹设计技术框架

4.1 突防效能基础

与面向性能设计相比,突防效能分析是面向突防效能的设计关键环节,突防效能指标体系构建、突防效能指标量化方法、突防效能分析方法以及攻防仿真平台构成超声速巡航导弹设计的突防

效能技术条件。

(1) 突防效能指标

采用“目标层次化”和“因素分解化”方法构建超声速巡航导弹突防效能指标体系。如图1所示,该指标体系涵盖了超声速巡航导弹突防所涉及及防御武器系统,能够描述超声速巡航导弹针对防御系统的突防过程,反映了超声速巡航导弹对抗预警卫星、对抗雷达、对抗拦截弹能力。杀伤区、探测区以及红外辐射强度等性能指标不仅体现了突防效能本质,而且这些指标与突防方的飞行状态和设计参数关系密切,为揭示突防方设计方案与突防效能之间的关系奠定了基础。

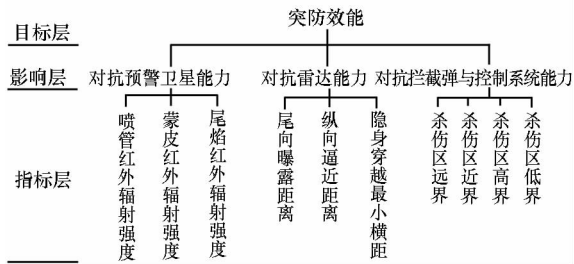


图1 超声速巡航导弹突防效能指标体系

Fig.1 Index system of penetration effectiveness to SCM

(2) 突防效能指标评估方法

突防效能指标数据提供底层支撑,突防效能指标数据获取是面向突防效能的超声速巡航导弹设计研究的重要内容,突防效能评估是获得突防效能指标数据的过程。超声速巡航导弹突防过程所涉及及防御武器实体的多样性、实体间相互关系的高耦合性、环境实体的复杂性以及各种影响因素的不确定性,单纯解析计算很难准确获得突防效能评估所需指标数据。开展攻防仿真获取指标的有效方法。

(3) 突防效能分析方法

设计过程中,突防效能分析主要是研究设计要素与突防效能指标之间的关系,并且根据突防效能指标量化结果与设计期望的对比分析,提供设计技术改进方向。突防效能分析方法是支撑这一功能的理论基础。

(4) 攻防仿真平台基础

攻防仿真平台是进行突防效能研究的前提,突防效能研究通过给定条件下超声速巡航导弹执行任务的研究而实现。对超声速巡航导弹的设计过程来说,突防效能研究的平台是效能指标构建、突防效能指标量化方法和突防效能分析方法统一的基础,一般以攻防对抗仿真平台为主。

4.2 技术基础

面向突防效能的超声速巡航导弹设计,其设

计需求高度集中。因此,需要以一体化设计方法为基础。一体化设计方法是综合考虑设计要素、生产要素和使用要素的全寿命周期设计,是不同系统层次学科优化设计。一体化技术必须以建模技术、仿真技术、多学科优化设计和验证技术为基础。

(1) 建模技术

超声速巡航导弹设计是一个复杂的多学科和跨学科系统分析问题,且涉及学科种类繁多,需建立大量用于描述系统设计性能分析和效能指标等一系列规范化模型,这些模型服务于设计决策需求过程,用模型支撑数据的获取,要求模型必须能反映其客观特性,开展模型的验证以确保数据获取的真实性。

(2) 攻防仿真技术

面向突防效能的超声速巡航导弹设计要求计算机仿真,且能够实现一定条件下的攻防对抗仿真,因此,面向突防效能的设计需要将超声速巡航导弹设计与效能评估等集成在统一的仿真技术平台。

(3) 多学科优化技术

面向突防效能的超声速巡航导弹设计优化,需借助多学科优化方法才能完成优化设计,问题核心是合理组织各学科分析并选择与之相适应的优化模式,尽可能在保证精度的前提下节约设计资源。与串行设计模式相比较,并行设计模式通过各学科高度集成,利用学科间相互耦合关系挖掘设计潜力,可有效缩短设计周期。并行设计模式主要代表是多学科设计优化。

4.3 设计的基本模式

超声速巡航导弹设计过程可划分为:概念设计、概要设计阶段和详细设计阶段、生产和使用。为便于研究超声速巡航导弹初步概要设计阶段,因超声速巡航导弹与防御系统的攻防对抗为一对一,故本文暂不考虑一对多或多对多。面向突防效能的设计模式如图2所示,该模式体现了面向效能的设计实现思路,涵盖了超声速巡航导弹设计、突防效能评估和分析、基于突防效能的优化等核心内容。首先根据任务需求和设计细节,确定设计变量的初始值及约束,进行设计方案初步计算得到性能的估计值,该过程多次反复,优化方法基于当前信息,确定搜索方向,进行新方案设计,直至性能指标和突防效能指标同时满足需求,再给出系统设计方案。

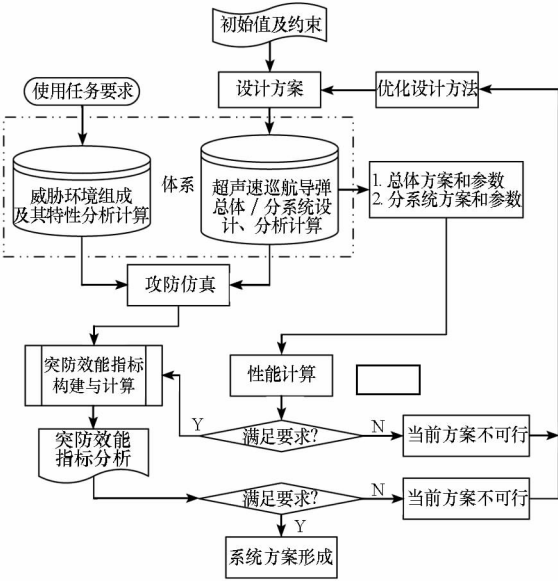


图2 面向突防效能的超声速巡航导弹设计框架
Fig. 2 Research framework of penetration effectiveness facing to SCM design

4.4 设计的关键技术和方法

(1) 突防效能指标体系与设计参数间的映射关系

超声速巡航导弹设计参数、性能指标和效能指标之间存在固有的相互关联性，它们之间通过映射机制相互制约。设计参数决定其自身性能，突防效能与系统自身性能相关，则设计参数、性能与效能指标间存在内在映射关系，简称映射关系模型。用设计参数、性能指标和效能指标间三层视图建模及其映射关系来进一步描述映射关系模型。在效能层视图中，突防效能指标依据任务不同分解成子指标，突防效能层视图与设计参数层视图相映射，即设计参数与突防效能指标间相互关联。在性能层视图中，性能由系统战技性能指标组成，性能与突防效能指标相映射。

(2) 超声速巡航导弹及防御系统各武器的建模

问题分解策略是这类复杂问题分析的最基本方法。建立面向突防效能的体系论证模型结构如图3所示。整个论证模型划分为三层，设计层对应于超声速巡航导弹工程设计方案，威胁层对应于防御系统性能分析，效能层对应于对抗防御方各武器的突防效能分析。为得到可信模型仿真结果，还需对模型进行进一步验证。

(3) 突防效能分析

面向突防效能的超声速巡航导弹设计的内在本质需求是建立设计参数与突防效能映射关系模型。鉴于超声速巡航导弹和防御系统的学科模型

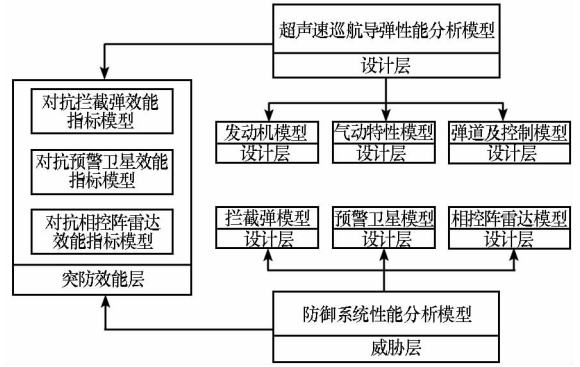


图3 模型层次关系图

Fig. 3 The relationship diagram of modeling gradation

复杂，为通过仿真获得突防效能指标数据，直接调用复杂耗时计算模型，将面临难以承受的计算复杂性问题。运用试验设计方法，基于仿真模型，获得突防效能指标大量数据，选用合理的拟合函数，获得设计指标与突防效能指标间的近似模型，分析参数对突防效能的影响。

(4) 面向突防效能的协同优化

将突防效能引入设计优化中有两种方式：一是将突防效能作为优化设计的部分目标函数；二是将突防效能作为条件约束函数。结合协同优化方法的多级协同优化思想，以三个学科为例，将突防效能作为系统级条件约束函数，面向突防效能的巡航导弹协同设计原理如图4所示。

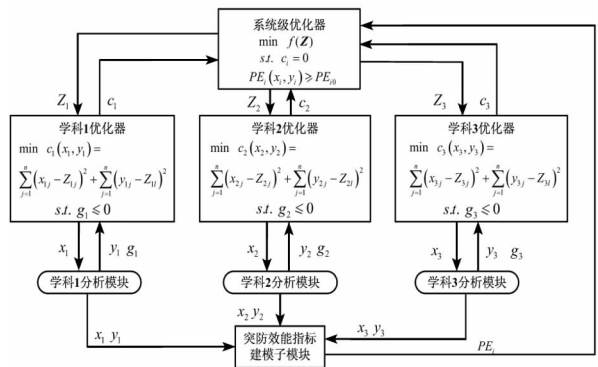


图4 面向突防效能的超声速巡航导弹协同优化原理

Fig. 4 The principle of collaborative optimization for SCM facing to penetration effectiveness

在面向突防效能的超声速巡航导弹多学科协同设计的系统级优化器中， $f(Z)$ 为系统级目标函数， Z_i 表示系统级向各学科级分配系统变量的目标值， x_i 为学科级设计变量； y_i 为耦合变量。目标函数 c_i 使设计变量 x_i 和学科间耦合变量与分配的目标值 Z_i 的差距最小，经学科级优化后，各目标函数 c_i 再传给系统级，构成系统级的一致性约束以解决各学科间耦合变量的一致性。n 为系统级分配给第 i 个学科级的设计变量个数。学科

级优化器中, $g_i(x_i)$ 为学科级自身约束条件。突防效能 $PE_i(x_i, y_j)$ 为超声速巡航导弹设计变量与突防效能间关系式。 PE_{i0} 为系统级突防效能指标, 由决策者根据需要来制定。

5 结 论

传统导弹总体设计以性能为核心, 以满足性能要求的程度来衡量导弹设计水平, 不能完全满足导弹武器系统效能层次的设计要求。本文在分析超声速巡航导弹设计基本原则基础上, 提出了面向突防效能的超声速巡航导弹设计理念, 然后通过对面向突防效能的超声速巡航导弹设计框架、效能基础、设计技术基础、基本模式和几项关键技术等问题, 进一步探讨了面向突防效能的超声速巡航导弹设计方法。以效能为核心的设计, 虽国内学术界已经提出这个问题, 但目前还没有系统深入的应用研究, 作为其中的一个分支性研究课题, 面向突防效能的设计对于工程具有深刻的意义, 值得深入探讨。

参考文献 (References)

- [1] 关成启, 杨涤. 面向 21 世纪飞航导弹总体设计思想探讨[J]. 战术导弹技术, 2001(2): 31-34.
GUAN Chengqi, YANG Di. Some New ideas for developing cruise missile to the 21st century [J]. Tactical Missile technology, 2001(2): 31-34. (in Chinese)
- [2] 蒙文巩, 黄俊. 基于多学科设计优化的飞航导弹总体设计方法研究[J]. 飞航导弹, 2006(4): 8-11.
MENG Wenkong, HUAN Jun. Research on the method of the cruise missile overall design based on multidisciplinary design optimization [J]. Cruise Missile, 2006(4): 8-11. (in Chinese)
- [3] Kitowski J V. Combat efficiency methodology as a tool for conceptual fighter design[R]. AIAA 92-1197, 1992.
- [4] Cohen P R. Effects based operations (EBD) [R]. ADA439840, 1992.
- [5] 艾剑良, 钱国红. 以作战效能为准则的攻击机概念设计原理[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(6): 36-39.
AI Jianliang, QIAN Guohong. The fundamental principle of integrating the combat effectiveness into conceptual integrated design for multi-task attackers [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(6): 36-39. (in Chinese)
- [6] 王和平. 飞机总体参数与作战效能的关系研究[J]. 航空学报, 1994(9): 1077-1080.
WANG Heping. Study of the relationship between aircraft configuration parameters and combat effectiveness [J]. Journal of Aeronautics, 1994(9): 1077-1080. (in Chinese)
- [7] 张克, 刘永才, 关世义. 关于导弹武器系统作战效能评估问题的探讨[J]. 宇航学报, 2002, 23(2): 58-66.
ZHANG Ke, LIU Yongcai, GUAN Shiyi. An investigation into the problem of evaluating combat effectiveness for missile weapon systems [J]. Journal of Aeronautics, 2002, 23(2): 58-66.
- [8] 殷志宏, 高文坤, 张克. 面向效能的精确制导武器设计技术初探[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 748-753
YIN Zhihong, GAO Wenkun, ZHANG Ke. The preliminary research on technology of design for efficiency to precision-guided weapon [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(3): 748-753. (in Chinese)
- [9] 齐照辉. 战略导弹突防效能评估方法及其应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
QI Zhaohui. Study on penetration effectiveness evaluation method and application for strategic missile [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)