高超声速飞行器关键技术量化评估方法

徐大军 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 定量分析方法是使得发展战略研究与计划项目论证更具科学性的有力手段. 在高超声速飞行器技术发展层面以及技术类别划分的基础上,归纳总结了高超声速飞行器的关键技术. 采用量化评估方法,针对提出的评价准则进行了关键技术关键度的评估,得到了高超声速飞行器关键技术量化的排序结果,结果符合该领域对关键技术的一般认识,同时也体现出层次分析法在关键技术量化评估方面有着潜在的价值和意义.

关 键 词: 高超声速飞行器; 关键技术; 量化评估

中图分类号: V 11

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010)01-0110-04

Quantificational evaluation method for key technologies of hypersonic vehicle

Xu Dajun Cai Guobiao

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To improve reasonableness in development strategic research and project argumentation, a quantificational evaluation method was brought forward. Based on divisiory development stages and technology sorts, key technologies of hypersonic vehicle were collected and classified. The quantificational evaluation method was applied with aims of proposed evaluation criteria to evaluate technology key level. Sort order by key technology quantification shows result accord with general consideration, at the same time result also proves quantificational evaluation method has potential effect and worthiness.

Key words: hypersonic vehicle; key technology; quantification evaluation

高超声速飞行器在今后相当长时间里将是航空航天技术发展的最前沿,各主要航空航天大国都在积极开展这一领域的研究工作. 由于高超声速飞行器的研制与发展牵涉到多学科多系统,是一项综合性极强的系统工作,因此各国均通过制定国家级的发展计划来部署高超声速飞行器技术的研究,如上个世纪 80年代,美国的 NASP计划,德国的 Sänger计划等, 2008年 9月美国为加强在该领域的领先地位,宣布组建 3个国家级的高超声速科学研究中心.

发展战略是发展计划的灵魂,影响和决定着发展计划的方向,因此发展战略是一项至关重要的工作. 而发展战略的研究本身就是一项错综复杂的工作,或者说是一项系统工程,不可能单凭制定者的主观经验和直觉思维的方法,必须以科学方法和技术手段为主,辅以经验判断及直觉思维来进行战略的分析和推断. 文献[1]指出在发展战略研究中,要将直觉思维方式和分析思维方式有机地结合起来灵活地运用于发展战略的研究和论证工作中. 其中分析的思维方式是指利用一些定量计算的分析结果和逻辑推理,将某些定性分析结论转化为定量分析结果. 美国佐治亚理工学院的航天系统设计实验室近年来发展了可应用于制定飞行器研制计划的关于技术确定、选择与评估的量化分析方法[2-4],使得研究计划的制定更具有科学的依据.

本文即对高超声速飞行器发展战略研究中关键技术的研究,应用分析思维的方法,将定性分析

收稿日期: 2009-01-05

基金项目: 国家 863计划资助项目(2006AA702501)

作者简介: 徐大军(1977-),男,安徽定远人,讲师, xdj@buaa.edu.cn.

转化为定量分析.使得对高超声速飞行器关键技术的认识更具全面性与科学性.

1　项目关键技术的重要性

所谓关键技术,是指在产品开发或项目工程中起着至关重要和举足轻重地位的技术,是其成败的关键所在.产品或项目工程的创新之处大多是基于其关键技术的新颖,而关键技术的革命性突破,也标志着产品或项目工程的重大突破性.

明确关键技术的意义在于:①明确了关键技术,才能明确项目开展的切入点,有的放矢;②明确了关键技术,才能有效地组织项目均衡有序地开展;③明确了关键技术,才能合理地分配研究与开发的投入.通过对高超声速飞行器关键技术的分解,以明确其各系统的技术构成、技术的难易程度,以及在发展规划中的优先顺序.

2　关键技术分解

2.1　技术层面与技术分类

按照从预先研究到型号开发的发展过程,本文研究将高超声速飞行器所涉及的关键技术分为研究设计层、试验验证层及应用发展层.

研究设计层即针对高超声速飞行器技术所进行的预先基础性研究阶段,力图在其基本原理与方法上实现突破,解决后续发展过程中最关键的的技术基础问题;试验验证层即结合即将开展的工程型号研制而进行的试验验证研究阶段,以确定部件或总体设计的可行性;应用发展层即对高超声速飞行器进行工程型号的开发与制造,并在实际的应用中不断地改进、改型,以提高其性能.进行技术发展层面的划分,能够更清楚地明确各项技术在发展规划中的轻重缓急,对于计划的安排、经费的划拨,起一定的参考作用.

按照我国学科领域的划分、航天工业部门的设置,可将发展高超声速飞行器所涉及的技术分为 6大类:即总体技术;推进技术;材料与制造工艺技术;飞行导航制导控制技术;试验验证技术;飞行演示验证技术.技术的分类为高超声速飞行器关键技术的进一步分解提供了明确的范围与方向指导,同时从整个研制发展过程中,进行关键技术的分解,有助于全面认识实现最终研制目标必须的技术构成,以避免某些技术发展的滞后,导致对整体项目发展进度的拖延.

图 1所示为高超声速飞行器技术发展层面与关键技术分类中各类技术之间的相互关系.在研究设计层,着重在于发展总体技术与推进技术,特别是推进系统与总体一体化设计的突破对于高超声速飞行器的研究起决定性的作用.在试验验证层,要进行必要的地面试验和飞行验证试验,地面试验包括超燃冲压发动机试验、一体化气动特性风洞试验等;飞行器飞行验证试验,包括飞行器机体的气动验证、发动机工作验证试验等.这两个方面的试验涉及到试验验证技术,同时部件与模型原理样机的制造涉及到材料工艺与制造技术.在应用发展层,高超声速飞行器所涉及的多数关键已得到突破,进入工程型号的开发研制阶段,材料工艺与制造技术越来越重要的作用,飞行导航制导控制技术也将起重要的作用.对于高超声速飞行器的实际应用,全系统的综合飞行演示验证,必然也将被提到研究的议事日程上来.

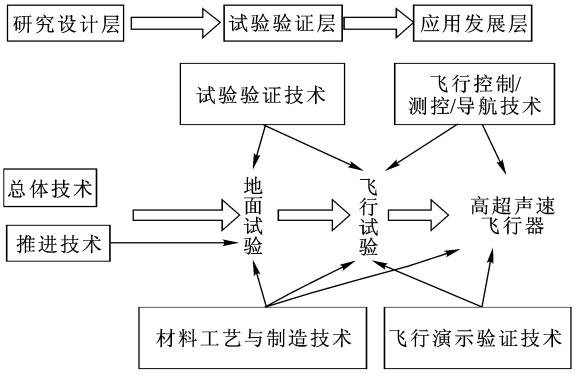


图 1　高超声速飞行器技术发展层面与技术分类

目前就世界范围内而言,美国处于高超声速飞行器技术发展的领先位置,在过去的 40多年里,开展了大量的理论与地面试验研究,并开展了数次高超声速试验飞行器的飞行试验,自 2005年 9月,X-51A项目的确立,标志着美国即将进入高超声速飞行器技术的应用发展阶段.

2.2　基于技术分类的关键技术分解

表 1是基于上述技术层面与技术分类,并参考国外有关文献[5]进行的高超声速飞行器关键技术分解.其中总体技术起着统领全局的作用.从设计概念的提出、初步设计与详细设计的进行、到工程型号的开展,总体技术无不参与其中,起着指导与统帅的作用.总体技术,既包括其总体设计的方法研究、设计的优化研究,也包括作为其基础和支撑的相关技术门类,主要有气动、结构等.对于高超声速飞行器,气动热、防热结构的设计,以及热防护系统、热管理技术等都应被提升到了一个必须在概念设计与初步设计阶段就必须加以考虑的程度.另外高超声速飞行器所要求的一体化设计思想也是有别于传统飞行器设计的一次革命性

的创新与发展.

推进技术方面超燃冲压发动机的突破是关键,以超燃冲压发动机为核心的组合推进系统也是发展的重点.高超声速飞行器的发展,必须强调"动力先行"的指导思想.超燃冲压发动机需要解决的问题很多,首先是超声速燃烧的实现,以及超燃的数值模拟等,其次是进气道、尾喷管的设计与性能计算.另外进气道与燃烧室的匹配也是研究中非常关键的问题,亚燃、超燃工作模态的转换也是需要着重加以研究的技术之一.

表 1 高超声速飞行器关键技术分解

技术分类	编号	关键技术
C1总体技术	C11	外形设计与气动力数值模拟技术
	C12	一体化设计技术
	C13	多学科设计优化技术
	C14	气动热数值模拟技术
	C15	结构设计热防护与热管理技术
	C 16	飞行仿真技术
C2推进技术	C21	超燃冲压发动机技术
	C22	组合推进系统技术
	C23	推进系统控制技术
	C24	高超推进发动机热结构与冷却技术
	C25	吸热型碳氢燃料技术
C3材料/工艺/制造技术	C31	防热与隔热材料
	C32	防热涂层材料
	C33	轻质高强度材料
	C34	异型结构设计与成型技术
	C35	部件连接、焊接与密封技术
C4试验验证技术	C41	直连式超燃燃烧室试验技术
	C42	超燃冲压发动机自由射流试验技术
	C43	组合推进系统试验技术
	C44	高超声速风洞技术
	C45	高超声速飞行器气动力试验技术
	C46	高超声速飞行器气动热试验技术
	C47	防热结构材料热环境模拟与试验技术
C5飞行导航制导与控制技术	C51	高超声速飞行器气动/推进一体化控制技术
	C52	高超声速巡航飞行器导航与控制技术
	C53	高超声速远程打击武器精确制导与控制技术
C6飞行演示验证技术	C61	飞行试验风险评估技术
	C62	空中发射技术
	C63	地面发射技术
	C64	高超声速分离技术
	C65	飞行试验遥测技术

高超声速气动加热问题给对防热材料提出了更高的要求,为了能提高装载量,在满足强度、防热要求的条件下,还需要发展轻质材料.试验验证技术是从理论迈向实际应用的关键,主要包括超声速燃烧的试验、自由射流模型发动机的试验,飞行器的气动力、气动热风洞试验等,以及相关的试验方法、数据测量与处理等若干问题.高超声速飞行器在导航制导与控制方面会遇到一些新的技术难题.飞行演示验证是高超声速飞行器发展过程中,极其重要的环节,预先研究和型号工程研究都要通过飞行演示验证来检验和发展各系统的研究工作,是各分系统、分部门研究工作的大集成与大检验.同时飞行演示验证也是高超声速飞行器发展过程中标志性和里程碑性质的一项研究工作.

上述 6大类,31项技术对于不同应用类型的高超声速飞行器而言,并不是完全涉及,如对于高超声速巡航导弹而言,精确制导技术是至关重要的,而高超声速飞机、空天飞机而言,则是不需要的;同样对于一次性使用高超声速巡航导弹,在热防护技术方面,与要求可重复使用的高超声速飞机、空天飞机显然又有不同的技术要求.

3 基于层次分析法的量化分析

本文研究采用层次分析方法,对高超声速飞行器涉及的关键技术进行量化排序.层次分析法AHP(The Analytic Hieratchy Process)是文献[6]在 20世纪 70年代提出的一种定性与定量分析相结合的多准则决策方法.它把人的思维过程层次化、数量化,并用数学为分析、决策、预报或控制提供定量的依据.层次分析法多用于方案决策以及资源分配,究其数学本质是对不同的目标项根据不同的准则给出一个综合排序的结果.层次分析法大体上分为 6个步骤:明确问题;建立层次结构;两两比较,建立判断矩阵,求解权向量;层次单排序及其一致性检验;层次总排序及其一致性检验;根据分析计算结果,考虑相应的决策.

本文研究根据基于技术分类的关键技术分解,构造了 5层的层次分析模型,如图 2所示,将层次分析划分为 2个阶段进行,首先是对 6大技术类别,进行量化分析,其次再对各技术类别中的关键技术进行量化分析.对 6个技术类别的量化评价准则为:B1:高超声速飞行器所特有的技术类别;B2:与其它技术领域有交集的技术类别(交集越大,越不重要);B3:是高超声速飞行器起点的技术类别.表 2为各技术类别对各项准则的重

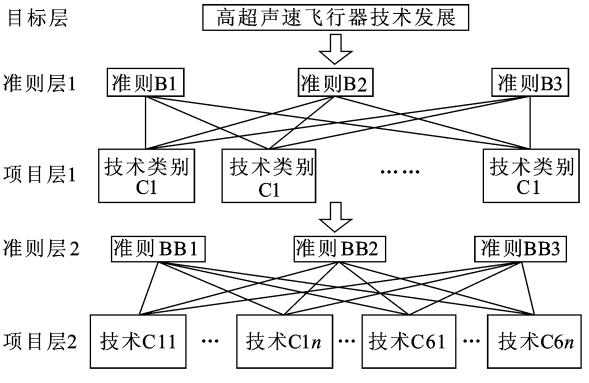


图 2 高超声速飞行器关键技术度量层次分析模型

要性次序的权值,以及总排序数值,从而得到各技术类别关键度总排序.再对各技术类别中的关键技术进行层次分析法分析,采用如下对关键技术的量化评价准则:BB1:高超声速飞行器所特有的技术;BB2:该项技术是高超声速飞行器发展所必须的,且具有较大的难度;BB3:高超声速飞行器技术发展的切入点技术.得到各项关键技术在各自技术类别组中的重要性权值后,再按照各项关键技术所在技术类别组的权重与其在组内的权重的乘积作为关键技术的关键度进行排序,获得各项关键技术总排序,如表 3所示.

表 2　各技术类别关键度排序

技术类别	B1	B2	B3	总排序 W
C1	0.1684	0.2294	0.2805	0.245533
C2	0.3232	0.2914	0.4279	0.388842
C3	0.0488	0.0323	0.0488	0.047609
C4	0.2241	0.2169	0.1466	0.173255
C5	0.0488	0.0493	0.0474	0.047922
C6	0.1866	0.1806	0.0488	0.096704

注:B1,B2,B3准则权重分别为 0.2789, 0.0719, 0.6491.

表 3　高超声速飞行器各项关键技术关键度排序

代号	关键度	关键技术名称
C21	0.16703	超燃冲压发动机技术
C22	0.08573	组合推进系统技术
C11	0.07633	外形设计与气动力数值模拟技术
C24	0.06127	高超推进发动机热结构与冷却技术
C12	0.05245	一体化设计技术
C41	0.05114	直连式超燃燃烧室试验技术
C23	0.05058	推进系统控制技术
C64	0.04842	高超声速分离技术
C14	0.04609	气动热数值模拟技术
C42	0.03625	超燃冲压发动机自由射流试验技术
C15	0.03546	结构设计热防护与热管理技术
C51	0.03424	气动/推进一体化控制技术
C13	0.02486	多学科设计优化技术
C25	0.02415	吸热型碳氢燃料技术
C45	0.02167	高超声速飞行器气动力试验技术
C43	0.01976	组合推进系统试验技术
C46	0.01974	高超声速飞行器气动热试验技术
C44	0.01738	高超声速风洞技术
C31	0.01633	防热与隔热材料
C65	0.01618	飞行试验遥测技术
C61	0.01332	飞行试验风险评估技术
C32	0.01088	防热涂层材料
C16	0.01027	飞行仿真技术
C62	0.01004	空中发射技术
C52	0.00969	导航与控制技术
C35	0.00934	部件连接、焊接与密封技术
C63	0.00870	地面发射技术
C47	0.00726	防热结构材料热环境模拟与试验技术
C33	0.00696	轻质高强度材料
C34	0.00408	异性结构设计与成型技术
C53	0.00396	精确制导与控制技术

其中超燃冲压发动机处于最高的关键技术的位置,符合对高超声速飞行器关键技术的一般认识,同时高超声速分离技术在各项技术中处于较为靠前的位置,这在过去的论证中较少被重视,但根据近年来披露的关于 X-43A 研制过程的文献[7],美国 NASA 非常重视高超声速分离问题的研究,与本文研究结论相同,说明应用层次分析法能够更加全面科学地分析高超声速飞行器的关键技术,能够获得对高超声速飞行器发展更为全局的认识.

4　结 束 语

本文阐述了在高超声速飞行器发展战略与项目计划制定中明确关键技术的重要性,并提出了高超声速飞行器技术发展层面以及技术类别的划分,在此基础上归纳总结了高超声速飞行器的关键技术.采用层次分析方法,针对所提出的评价准则进行了关键技术关键度的评估,得到了高超声速飞行器关键技术量化的排序结果,从结果来看符合该领域对关键技术的一般认识,说明该方法的正确性,同时也得到应重视高超声速分离等技术研究的结果,由此可见层次分析法在关键技术量化评估方面有着潜在的价值和意义.

参考文献 (References)

[1] 李明,刘澎. 发展系统论证方法与应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 2000: 19 - 21
Li Ming, Liu Peng. Theroy and practice of an integrated and systematic demonstration method for development of weapon and equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 19 - 21 (in Chinese)

[2] Kirby M R. A methodology for technology identification, evaluation, and selection in conceptual and preliminary aircraft design [D]. School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, 2001

[3] Kirby M R, Mavris D N. An approach for the intelligent assessment of future technology portfolios[R]. AIAA 2002-0515, 2002

[4] Mavris D N, Garcia E. Formulation of a method to assess capacity enhancing technologies[R]. AIAA 2003-2677, 2003

[5] Moses P L, Rausch V L, Nguyen L T, et al. NASA hypersonic flight demonstrators overview, status, and future plans[J]. Acta Astronautica, 2004, 55: 619 - 630

[6] 杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 9 - 33
Du Dong, Pang Qinghua. Modern synthesis evaluation method and selected cases [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 9 - 33 (in Chinese)

[7] Peebles C. Road to mach 10: lessons learned from the X-43a flight research program[M]. Reston, VA: AIAA, 2008

(编　辑:张　嵘)