

智能固体发动机概念及发展设想

叶 勋¹, 高 波², 毛成立¹, 黄江流¹, 乐 浩¹, 何 快¹

(1. 上海航天动力技术研究所, 上海 201109; 2. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘 要: 具有按需调控、自主感知与决策能力的智能动力是未来战争的核心技术。本文提出了智能固体发动机的概念和内涵, 重点阐释高适变、高效能、高矢量调控以及自主感知、自主评估以及使役状态的自主决策等特征, 探讨了智能固体发动机的技术路线, 策划了以变推力发动机、可控可熄发动机以及高效能全域矢量调控发动机为代表的产品布局。开展智能固体发动机的研究, 可引领相关基础学科和专业技术发展, 进而推动智能化武器装备发展。

关键词: 固体发动机; 智能化; 概念与内涵; 技术路线; 产品布局

中图分类号: V 11; V 435

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.03.019

Concept and Development of Intelligent Solid Rocket Motor

YE Xun¹, GAO Bo², MAO Chengli¹, HUANG Jiangliu¹, LE Hao¹, HE Kuai¹

(1. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Intelligent power with on-demand regulation, autonomous perception, and decision-making capabilities is the core technology of future warfare. In this paper, the concept and connotation of intelligent solid rocket motor (SRM) are proposed, focusing on the characteristics such as high adaptability, high energy, high vector control, as well as autonomous perception, autonomous evaluation, and autonomous decision-making. The technical route and product layout of intelligent SRM are discussed. The research on intelligent SRM can lead the development of related basic disciplines and professional technologies, and then promote the development of intelligent weapons and equipment.

Key words: solid rocket motor (SRM); intelligence; concept and connotation; technical route; product layout

0 引言

导弹武器是现代战争攻击和防御的核心装备。固体火箭发动机(以下简称固体发动机)以其结构简单、综合性能好、可靠性高、使用维护简单和可长期待机值班等特点, 已成为战略投送、快速进入空间、区域拒止与精确打击等导弹武器的最佳动力选择。据不完全统计, 目前世界有 90% 以上的战略导弹、80% 以上战术导弹均采用固体发动机作为主要动力源^[1]。

经过 60 多年自力更生和艰苦创业, 我国固体动力技术从无到有, 从弱到强, 为我国国防安全筑起

一道牢固的安全屏障。但是不可否认, 我国固体发动机技术与国外先进水平和未来发展需求仍然存在不可忽视的差距。

从技术能力上来看, 当前固体发动机发展中主要存在以下问题: 1) 无法实现全域范围内推力按需随控。固体发动机目前依靠摆动喷管、姿轨控、喉栓等技术手段可以实现一定范围内的推力调节能力, 但无法实现全域范围内(任意方向、任意大小)的精准调控。2) 无法实现可控可熄。除脉冲固体发动机外, 固体发动机属一次性工作动力装置, 一旦工作不可终止, 无法如液体发动机一样实现按需

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-04-16

作者简介: 叶 勋(1965—), 男, 本科, 研究员, 主要研究方向为固体发动机总体设计技术。

通信作者: 毛成立(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为先进固体发动机技术。

启停,导致固体发动机能量无法最优化配置。3) 无法实现服役状态自主感知。目前固体发动机不具备在服役过程中的状态实时监测能力,设计寿命到寿后继续服役能力评估是目前导弹武器面临的普遍问题,批次性、个体化寿命问题频发,对导弹武器的使役能力和威慑力造成严重影响。

针对上述问题,本文提出了“智能固体发动机”的概念,构建了完整的智能固体发动机技术路线和产品发展体系,为深入认知当前固体发动机工作过程涉及的核心基础问题提供理论和技术支撑,规划未来智能固体发动机专业技术发展路线,牵引相关学科发展和技术积累,为未来智能化装备发展铺平道路。

1 概念与内涵

智能固体发动机具有自主环境感知、自主使役能力评估以及自主工作状态决策的特征,具备高适变、高效能、高矢量调控的能力,为导弹武器提供最优化能量管理和高度的安全保障。

智能固体发动机由可变固体装药、可感知壳体、可控点火系统、全域可调喷管机构以及智能决策系统构成,如图 1 所示。通过燃烧模式变革以及能量输出方式革新,实现能量高效利用以及全域范围内推力大小和方向随控;将数字样机、大数据和虚拟试验等技术相融合的数字孪生技术,结合高精度原位监测检测系统,通过智能芯片实现对服役环境

载荷数据的自主感知,并通过数字孪生技术进行使役能力的自主评估,通过数据网络进行状态反馈,并根据安全性和目标达成能力自主决策是否进入工作状态。



图 1 智能固体发动机功能组件模块

Fig.1 Functional modules of intelligent SRM

2 发展路线

以需求牵引、技术推动为发展理念,推进智能固体发动机健康可持续创新发展。规划了以结构力学正向设计、能量释放动力学、数字样机、数字孪生等技术体系为主线的技术发展路线(如图 2 所示),涵盖了发动机设计、使用、试验、寿命中的关键技术内涵,并以此为基础,形成变推力发动机、可控可熄发动机以及高效能全域矢量调控发动机的产品发展路线,最终实现具备高适变、高效能、高矢量调控特征的智能发动机。

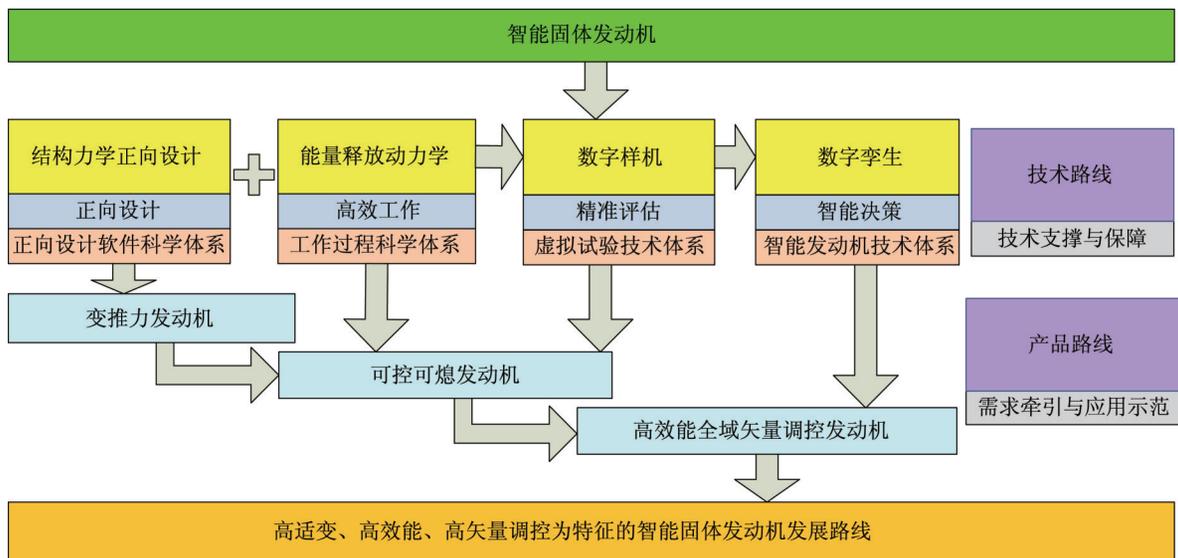


图 2 智能固体发动机发展路线规划

Fig.2 Development route planning of intelligent SRM

2.1 技术路线

2.1.1 结构力学正向设计

基于正向设计理念,从固体发动机各部件基础结构出发,构建微细观到宏观的跨尺度计算模型和方法,揭示固体发动机中力的形成—传递—演化路径和作用机制,如图 3 所示。综合考虑固体发动机全寿命周期内经受的环境载荷(温度、振

动、重力等)、结构热应力作用,从最底层的分子化学出发,到物理微结构,再到宏观结构的力学响应,构建固体装药、界面、绝热结构、复合壳体、喷管、点火装置、燃气调节机构等全系统的正向设计和跨尺度计算方法体系,形成固体发动机正向驱动的设计软件生态系统,实现固体发动机结构力学设计透明化。

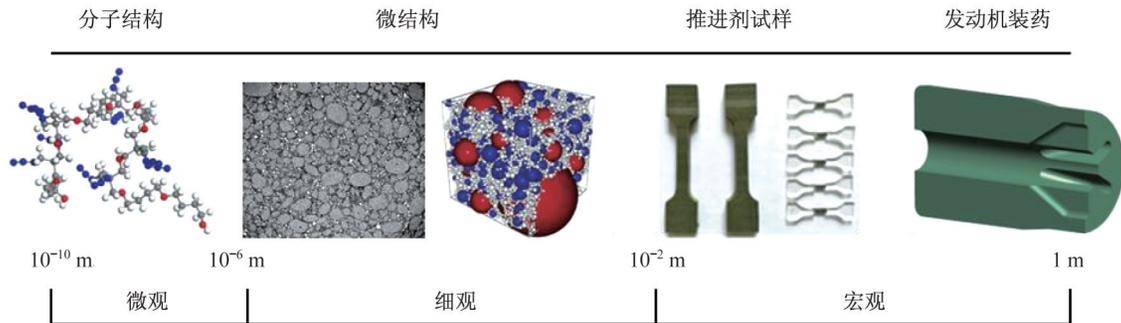


图 3 固体装药跨尺度计算

Fig.3 Cross-scale calculation of solid charge

2.1.2 能量释放动力学

系统开展固体推进剂的点火和燃烧特性研究,揭示固体推进剂点火和火焰传播机理,建立固体推进剂点火准则和火焰传播计算模型,固体推进剂燃烧过程中铝的燃烧行为如图 4 所示。构建固体推进剂微细观结构模型,解析新型高能物质的热分解机理,掌握推进剂高压燃烧化学反应动力学,解决金属基燃料分散燃烧模拟难题,建立固体推进剂跨尺度燃烧过程数值计算方法。

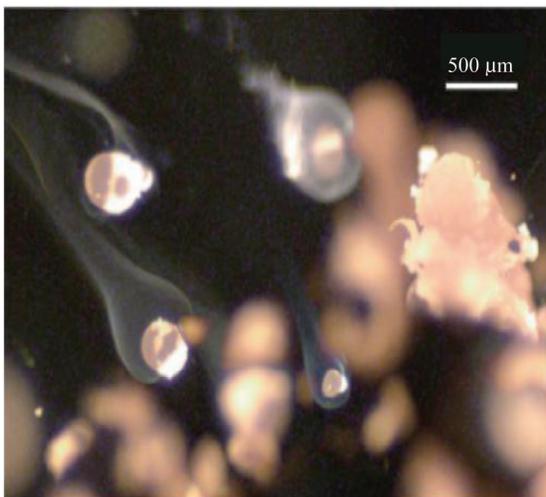


图 4 固体推进剂燃烧过程中铝的燃烧行为^[2]

Fig.4 Al combustion in solid propellant^[2]

围绕燃烧室内燃气流动、传热和能量转换过程,掌握发动机内凝相运动行为模式及多相流运输规律,重点突破燃烧室内流动过程中凝相成分的形态演化、气动力对凝相成分空间分布的影响、彻体力作用下受限空间内凝相颗粒运动及相互作用、喷管流动过程中多相燃烧产物相变动力学、多相燃烧产物在发动机内流动和演化的数值模拟等关键技术^[1],揭示多相燃烧产物作用下绝热结构失效模式与破坏机理,掌握多相燃烧产物生成与输运过程对能量转换的影响规律,建立考虑多相燃烧产物复杂流动与热力过程的内弹道计算方法。

2.1.3 数字样机

数字样机是固体发动机产品的数字化表述和工作过程数值模拟,是与固体发动机相关的所有三维数字信息构成的产品模型和算法集合。基于结构力学正向设计和能量释放动力学,重点突破多材料、多结构、多学科、跨尺度数值模拟技术,解决超大规模高效计算难题,实现虚拟试车,模拟发动机产品在真实条件下的几何特性、物理特性以及工作过程,验证现实世界中物理样机的功能和性能。在不进行点火试验的情况下,实现对发动机工作特性的高精度评判、对发动机工作过程的全方位解析。突破真实试验条件下在线测试和观测手段的限制,

实现发动机工作过程各状态点物理量的动态输出,解析发动机工作过程的薄弱点,进一步优化发动机设计,实现发动机产品工作过程的透明化。

2.1.4 数字孪生

构建固体发动机结构和性能表征参数体系,发展高精度试验测试和测量技术,获得个体化固体发动机初始真实状态,包括原材料性能、工艺参数、结构参数的真实数据和统计规律,形成个体化初始物理模型;发展基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术的固体发动机全生命周期环境载荷监测技术;基于数字样机,搭建物理空间和虚拟空间之间的数据传递与信息反馈,构建固体发动机数字孪生体,精准预示固体发动机各部件的物理、化学状态,通过高效、精准的虚拟试车,精准评估固体发动机任意时刻的使役能力;突破融合感知-评估-决策的智能芯片设计和集成技术,实现智能芯片的随弹应用,形成固体发动机自主感知、自主评估和自主决策能力。

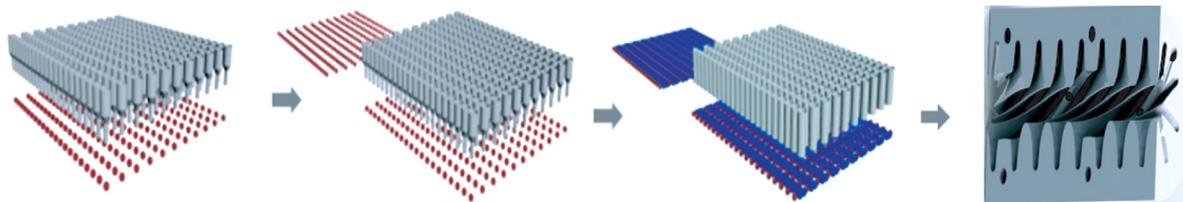


图5 固体装药跨尺度打印技术

Fig.5 Cross-scale printing of solid charge

2) 被动式喷管喉径调节技术。在发动机喷管喉部增设阀门结构的调节装置如图6所示,同时匹配高压指数固体推进剂,在燃烧室压力闭环控制系统作用下,伺服驱动系统根据指令牵引阀门轴向移动,迫使喉部面积在一定范围内发生改变,实现推力的无级调节。在此过程中喷管喉部结构不发生变化,仅仅依靠阀门机构的运动实现喉部面积调节,因此,属于被动式调节。该技术可以降低甚至消除推进剂燃速、材料烧蚀和环境温度的影响,大大提高导弹的控制精度。但需要重点解决阀门机构的热防护和抗烧蚀难题。

3) 主动式喷管喉径自适应调节技术。通过智能构件的4D打印技术(如图7所示),设计和制造主动式喷管喉径自适应调节机构,通过声、光、电、磁和热等信号使喷管喉径、喷管扩散段随着推力调控

2.2 产品路线

2.2.1 变推力固体发动机

变推力固体发动机是智能固体发动机第一个发展阶段的代表性成果,以结构力学正向设计为基础,同时融合能量释放动力学部分研究成果,精确设计固体发动机各部件,重点解决固体装药与喷管调节机构的耦合设计,突破高温、高压作用下喷管调节机构的连续精准运动控制技术,在5~7 a内实现固体发动机超高推力调节比的连续、精准调节,满足先进导弹高机动性和强突防能力对动力系统的需求。

重点关注以下技术途径:

1) 固体装药增材制造技术。固体装药增材制造技术如图5所示,将增材制造技术和跨尺度设计、计算相结合,实现装药组成、微观界面、复杂拓扑结构和性能的精确定设计与精准制造,从而打破制造技术障碍,赋予装药跨尺度的立体结构、灵活多样的能量控制方式、对战场环境和目标的自适应调节能力,显著提升装药能量利用率,满足推力调节固体发动机对推进剂燃速、压强指数、药型等的技术要求^[3]。

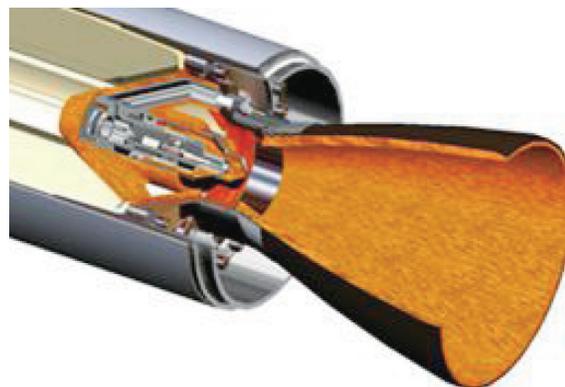


图6 喉栓调节结构

Fig.6 Throat adjustment mechanism

指令而发生自适应调节,同样能够实现发动机推力的无级连续可调,并且发动机始终处于理想膨胀状态,实现发动机能量的最优化。主动式喷管调节机

构取消了被动式喷管喉径调节阀机构,系统复杂度显著降低。当前 4D 打印技术方兴未艾、蓬勃发

展,为实现喷管喉径的 4D 打印提供了理论和技术基础。

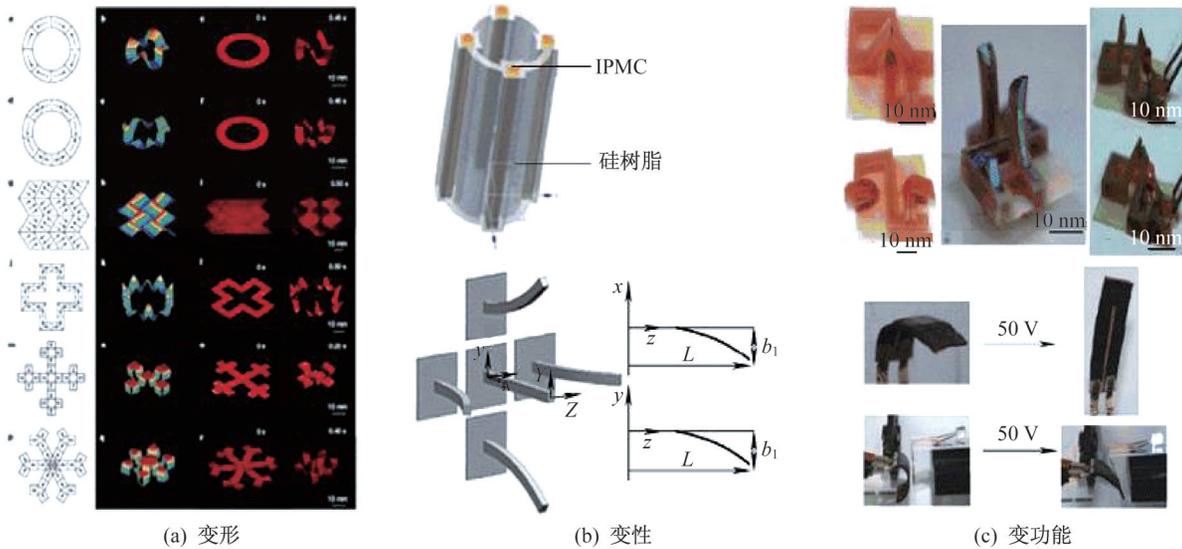


图 7 4D 打印构件变形、变性和变功能实例^[4-6]

Fig.7 Examples of deformation, degeneration, and functions of 4D printing components^[4-6]

2.2.2 可控可熄固体发动机

可控可熄固体发动机是智能固体发动机第 2 个发展阶段的代表性成果,以结构力学正向设计、能量释放动力学为基础,重点突破亚稳态固体推进剂、喷管快速调节、重复点火等技术,同时融合变推力发动机中喷管喉径调节技术,以数字样机成果为基础,实现虚拟试车,有效检验固体发动机在各种工况下的工作能力,在 10~15 a 内实现固体发动机按需启停、推力连续可调,具备与液体发动机相当的精确控制能力。重点关注以下技术途径:

1) 亚稳态固体推进剂技术。以能量释放动力学为基础,设计亚稳态推进剂,调控发动机熄火时推进剂自持燃烧过程的气相、凝相间的热反馈平衡,形成亚稳态热平衡临界燃烧状态。通过喷管开度调节,控制燃烧室内压强,实现固体燃面的稳定燃烧和熄火。当发动机需要再次启动时,通过重复点火系统输入能量,实现固体装药的再次引燃,并快速进入稳定工作状态。点火系统的能量需随固体装药的变化而适应调节。

2) 电控推进剂技术。电控推进剂具有独特的电化学特性,在外加电场作用下可以发生电解、热解反应,实现推进剂点火燃烧,产生推力;在推进剂持续燃烧过程中,通过调节电场强度控制推进剂的

燃速,实现推力大小调节^[7]。断电或调节电流低于阈值后,推进剂燃烧产生的热量不足以维持推进剂的持续分解,推进剂主动熄火,发动机停止工作;当再次输入合适的电流,推进剂再次发生电解、热解、燃烧反应,如此循环往复,实现发动机的多次启停和推力大小随控。电控可熄发动机地面试车情况如图 8 所示。



图 8 电控可熄发动机地面试车
Fig.8 Firing test of electrically controlled extinguishable engine

2.2.3 高效能全域矢量控制固体发动机

高效能全域矢量控制固体发动机是智能固体发动机的集成表现形式,是结构力学正向设计、能量释放动力学、数字样机和数字孪生基础研究的综合应用。重点突破全域喷管调节、固体装药按需输

送等关键技术,构建自主感知、自主评估和自主决策的智能化体系,研制高效智能芯片,在 20~30 a 内实现固体发动机按需启停、全域范围内推力连续可调、智能决策。重点关注以下技术途径:

1) 全域矢量调节喷管技术。基于 4D 打印智能构件技术^[8],结合新的耐高温、耐高压材料,发展新型喷管全域矢量喷管调节技术,在可控可熄固体发动机的基础之上实现喷管任意方向推力的连续可调,使固体发动机具有超强的能量管理能力,满足智能化武器装备推力矢量精确调节需求。

2) 智能感知-评估-决策技术。基于 MEMS 传感技术,发展微型化传感网络,对固体发动机全生命周期内的各种环境载荷进行监测^[9];结合数字样机和数字孪生技术,对固体发动机的使役能力进行在线评估,判断是否满足继续服役能力、是否能够满足预期投掷能力和自主决策是否继续服役或进入工作状态。

3) 固体爆轰元推进技术。固体爆轰元推进系统由爆轰元推进剂、点火装置以及供给、冷却与驱动装置组成。在供给装置驱动下,爆轰单元被传输至爆震室指定位置,控制点火方式使爆轰元发生可控爆轰反应,输出特定的推力,冷却系统控制爆震室恢复至低温低压状态。通过精准控制爆轰单元的输送,实现发动机启停、推力大小离散调节,结合全域矢量调节喷管技术,实现发动机推力的全域矢量调节。爆轰推进工作循环如图 9 所示。

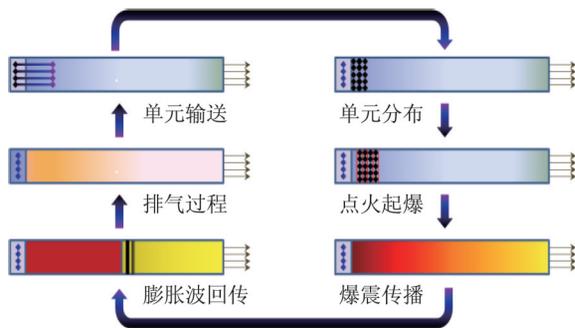


图 9 爆轰推进工作循环

Fig.9 Working cycle of detonation

3 发展设想

着眼国家发展新布局及安全形势新变化,瞄准战争制胜新机理、战略能力新要求,以智能化作为固体动力未来发展主线,统筹策划,逐步推进智能固体发动机发展。据此,提出以下发展设想:

1) 加强顶层规划,实现体系发展。注重智能固体发动机顶层规划,立足当前,着眼未来,明确发展目标,统筹装备智能化发展,体系化开展研究工作。聚焦当前固体发动机存在的瓶颈问题和未来智能武器发展需求的关键问题,构建以原始创新为先导的智能固体发动机创新体系,努力开辟新的技术发展途径,探索寻求新的技术增长点,推动固体动力技术可持续发展和跨越式发展。

2) 加强军民融合,实现开放发展。密切关注先进材料、高端制造、人工智能等相关技术领域发展动向,通过固体发动机技术与相关技术交叉配合,进行体系优化,综合集成构建智能固体发动机创新发展平台;充分引进和吸收中科院、高校、民营企业等高新技术及创新理念,建立军民融合开放式协同创新体系,形成互动、共赢的发展格局,实现军民技术融合交互,推动固体动力技术的跨越式发展。

3) 加强以点带面,实现示范发展。聚焦制约固体动力创新发展的关键问题,充分调动国内优势力量,大力加强科技攻关,突破核心关键技术,分阶段开展以变推力发动机、可控可熄发动机以及高效能全域矢量调控发动机为代表的先进固体发动机技术集成和验证,以“三点”引领基础理论、高能物质、设计生态体系的全面发展,在不同武器领域形成示范应用,推动引领性技术成果的快速转化,抢占高性能武器装备发展制高点。

4 结束语

本文阐明了智能固体发动机的概念与内涵,其同时兼具自主感知、自主评估、自主决策特征和高适变、高效能、高矢量调控的能力,是未来智能化装备发展的动力保障。智能固体发动机颠覆了现有固体发动机的设计理念、工作模式和应用方式,对智能固体发动机的深入研究必将牵引材料、力学、控制、制造和信息等学科的发展,形成全链条的原始创新体系。当前,我国固体发动机基础研究深入推进,新概念、新技术、新材料和新工艺等层出不穷,智能固体发动机的发展具有良好的发展环境。通过顶层规划、军民融合、以点带面的协同发展,将使智能固体发动机从概念逐步变为现实,为我国智能化装备发展提供坚强保障。

参考文献

[1] 吕翔,何国强,刘佩进,等.固体发动机燃烧流动基础问

- 题与研究建议[J]. 宇航学报, 2019, 40(10):1157-1166.
- [2] 金秉宁, 王志新, 刘佩进, 等. 同轴数字全息用于铝燃烧颗粒的测量研究[J]. 推进技术, 2019, 40(6): 1399-1408.
- [3] MCCLAIN M S, GUNDUZ I E, SON S F. Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37:3135-3142.
- [4] KIM Y, YUK H, ZHAO R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials [J]. Nature, 2018, 558(7709):274-279.
- [5] LIU J, WANG Y, ZHAO D, et al. Design and fabrication of an IPMC-embedded tube for minimally invasive surgery applications [C]// Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2014. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9056:90563K.
- [6] ZAREK M, LAYANI M, COOPERSTEIN I, et al. 3D printing of shape memory polymers for flexible electronic devices [J]. Advanced Materials, 2016, 28(22):4449-4454.
- [7] 程红波, 陶博文, 黄印, 等. 国外电控可熄火固体推进剂技术研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2016, 14(6):1-5.
- [8] 史玉升, 伍宏志, 闫春泽, 等. 4D打印:智能构件的增材制造技术[J]. 机械工程学报, 2020, 56(15):1-25.
- [9] 张波, 董可海, 张春龙, 等. 固体火箭发动机健康检测系统及其关键技术研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(10):88-91.

(上接第162页)

- [9] 张宙, 韩国栋. 基于自适应极化合成的球面共形相控阵波束合成算法[J]. 现代雷达, 2020, 42(8):50-55.
- [10] Aviation-unmanned aerial vehicle, studies from University of Electronic Science and Technology of China Yield New Data on unmanned aerial vehicle (wide-scanning conformal phased array antenna for UAV radar based on polyimide film) [R]. Defense and Aerospace Week, 2020.
- [11] 郭玉霞, 刘功斌, 崔炳喆, 等. 空空导弹雷达导引头信息处理智能化思考[J]. 航空兵器, 2020, 27(5):23-27.
- [12] 武江涛. 弹载智能雷达导引技术架构及处理方法综述[J]. 信息技术与信息化, 2020(7):136-138.
- [13] 陈伟, 孙洪忠, 齐恩勇, 等. 智能化时代雷达导引头信号处理关键技术展望[J]. 航空兵器, 2019, 26(1):76-82.
- [14] HE Z Y, XIE Y J. Impact of the half space on high resolution range profile [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1738:012022.
- [15] LIU Y, YANG L, ZHANG H G. Research on target detection technology based on convolutional neural network [J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1631(1): 012022.
- [16] STENO P, ALSADOON A, PRASAD P W C, et al. A novel enhanced region proposal network and modified loss function: threat object detection in secure screening using deep learning [J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77:3840-3869.
- [17] 苏炯铭, 刘鸿福, 项凤涛, 等. 深度神经网络解释方法综述[J]. 计算机工程, 2020, 46(9):1-15.
- [18] 陆峰, 刘华海, 黄长缨, 等. 基于深度学习的目标检测技术综述[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(3):1-13.
- [19] 刘朝阳, 穆朝絮, 孙长银. 深度强化学习算法与应用研究现状综述[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(4): 314-326.