



“智能弹道理论与技术”的兴起给外弹道学发展带来的问题与挑战

王中原*, 史金光, 常思江, 陈琦, 王旭刚
(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 弹道学是兵器科学与技术的基础学科之一, 同兵器技术的发展息息相关。伴随着智能弹箭的兴起和发展, 智能弹道理论与技术将是今后外弹道学发展的一个主流方向。但如何理解智能弹道的概念、内涵和功能, 智能弹道同已有弹箭的飞行弹道有何差异、所依托的关键技术有哪些、难点何在, 以及后续发展中应注意的问题等这些内容尚在探讨中。该文以展望外弹道学发展为着眼点, 以外弹道理论与技术为基础, 对上述问题展开分析和梳理, 以期后续智能弹道理论与技术的发展提供帮助。应当指出, 智能弹道理论与技术引出了众多外弹道学新问题、新概念、新术语和新技术, 需要外弹道学研究人员不断探讨, 并在发展研究中逐渐完备其理论。该文仅是抛砖引玉, 希望有更多外弹道学研究人员来开展这方面研究, 逐步形成智能弹道理论体系。

关键词: 常规兵器; 外弹道; 智能弹箭; 智能弹道; 协同弹道

中图分类号: TJ012 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-499X(2024)04-0001-10

Problems and Challenges for the Development of Exterior Ballistics Arising from Theory and Technology of Intelligent Ballistics

WANG Zhongyuan*, SHI Jinguang, CHANG Sijiang, CHEN Qi, WANG Xugang

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Ballistics is one of the foundational disciplines in weapons science and technology, closely related to the development of weapons technology. With the rise and development of intelligent projectiles and rockets, the theory and technology of intelligent ballistics will be a major direction for the future development of exterior ballistics. Nevertheless, how to understand the concept, connotation, and functions of intelligent ballistics, as well as its differences from existing projectiles and rockets in terms of flight trajectories, the key technologies it relies on, the challenges involved, and the issues that should be considered for the subsequent development, are still under discussion. Based on the theory and technology of exterior ballistics and focusing on the future development of exterior ballistics, this article tends to analyze and organize the aforementioned issues with the aim of providing assistance for the future development of intelligent ballistics theory and technology. It should be noted that the development of intelligent ballistics theory and technology has introduced numerous new problems, concepts, terminologies and technologies for exterior ballistics, which require continuous exploration, refinement, and gradual perfection by researchers in the field of exterior ballistics through ongoing research. This article merely serves as a starting point, hoping to inspire more researchers in the field of exterior ballistics to engage in

this area of study and gradually develop a theoretical framework.

Key words: conventional weapons; exterior ballistics; intelligent projectiles and rockets; intelligent ballistics; collaborative ballistics

对常规兵器弹箭,研究人员长期以来一直致力于追求实现“远、准、狠”的弹道性能。但在不同的发展阶段,反映出的主要研究问题与内容、飞行弹道的特征、弹箭的功能水平等,却有很大差异^[1-5]。

上世纪80年代之前,弹箭主要为各类无控弹箭,对应飞行弹道为无控外弹道,研究人员主要通过研究各类弹种(杀爆弹、子母弹、旋转稳定与尾翼稳定脱壳穿甲弹等)、各类增程技术(气动布局减阻、底凹减阻、底排减阻、底排与火箭复合增程等),以及提高火炮发射能量(或提高火箭发动机总冲功效)等技术途径,来提高弹箭的射程与毁伤能力;通过弹箭的各类气动力计算方法和外弹道优化设计(包括飞行稳定性设计、抗干扰能力结构设计等)、减小发射初始扰动影响等研究,来改善弹箭的气动力特性和密集度。与这些问题对应的外弹道内容是这一时期的外弹道学理论与技术发展的主流研究内容,主要特征为无控飞行弹道^[6-10]。

无控弹箭对应的外弹道研究近几十年来虽然仍在不断发展和深化,但对其飞行性能提升已难有质的飞跃。伴随着新材料、导航控制技术的不断发展和完善,研究人员大胆创新,约40年前提出,将飞行控制技术应用到弹箭,使发射出去的弹箭可根据需要进行飞行控制、调整实际飞行弹道,对应的外弹道特征出现巨大变化,弹箭的外弹道性能出现质的飞跃^[11-22]。伴随这种信息化可控制弹箭的提出,在外弹道理论与技术及其应用等方面自然会引出诸多问题,如:适配火炮发射环境条件的炮弹用导航与飞行控制器件、适配火炮发射的制导炮弹(全弹气动与飞行控制弹道)结构布局、适配炮弹飞行条件的较佳控制策略与方法、制导炮弹模拟仿真技术等。在极大提升弹箭性能的驱动下以及外弹道理论与技术发展的引领下,针对上述问题的研究非常活跃,成为这几十年外弹道理论与技术发展的主流研究内容^[23-40]。目前,各类信息化可控制弹箭的研究在常规兵器领域已较为普及,对应的外弹道理论、技术及应用也取得了突破,某些方面研究已趋于成熟。较无控弹箭,信息化可控制弹箭在综合打击效果上有了质的飞跃,极大提升了火炮在现代战场上的作战

能力。

但随着弹箭飞行控制弹道理论与技术研究的不断深入,以及各类信息化可控制弹箭应用的不断普及,常规兵器研究领域再次面临挑战:在信息化可控制弹箭之后,如何更新外弹道理论与技术以再次大幅提升弹箭性能;该如何谋划引领未来弹箭发展的外弹道学内涵。

近年来,人工智能理论与技术、信息通讯与电子技术、大数据等新技术发展应用极为活跃;同时,新材料、新的导航与控制器件及技术发展迅猛。在此背景下,国内外一些常规兵器研究机构开始致力于火炮或火箭发射智能弹箭的探索。综合分析对比未来的作战环境与任务对弹箭性能的需求,及技术发展与支撑等,可以预测智能弹箭、超远程飞行弹箭是未来弹箭领域重点发展的两大方向,由此引出的飞行弹道问题、弹道方案及技术应用也将是今后外弹道理论与技术发展的主流研究内容。本文仅就智能弹道引出的一些问题进行分析和展望,应当指出,智能弹道的研究绝非一蹴而就。

对于智能弹箭及其对应的智能弹道,需要分析和梳理以下问题:概念、内涵、特征与信息化可控制弹箭甚至无控弹箭在弹道特征上的差异,在飞行弹道上的功能,及其依托技术群的主要关键技术及难点等。在智能弹道被提出且争相开展研究的当下,分析和梳理上述问题,尽可能厘清支撑智能弹道的主要技术及其相互关系等,对今后智能弹道的有序发展十分必要。由此,本文以外弹道学理论与技术、多年来弹箭技术的发展状况为基础,对今后可能引领外弹道学发展的一个主流领域——智能弹道的研究状况进行展望,对引出的一些外弹道问题、概念等作分析与整理,以期为今后智能弹道的有序发展提供参考。

1 智能弹道的一些概念与特征

与无控弹道和信息化可控制弹箭飞行弹道相比,智能弹道更为复杂,并引出了众多新问题和一些新的弹道功能。智能弹道更加凸显出多学科融合和不同新技术的综合运用,主要体现在飞行弹道能力

上。应清楚认识到,对于其中一些新问题,需要研究人员从基础开始长期努力攻关来突破,而有一些问题则需依托相关学科人员的研究成果,探索如何在兵器环境下集成应用。智能弹道的一些新功能、新概念,与已有弹箭的一些外弹道术语概念都有关联。为此,下文针对智能弹道所涉及的一些外弹道的术语概念作出说明。

1.1 智能弹道及一些外弹道术语概念

①理论计算弹道。

依据一套外弹道运动方程组及计算方程组所需的全部参数,采用某种数学方法计算出的飞行弹道为理论计算弹道。

②设计弹道。

依据已确定技术状态的弹箭性能参数、环境条件和任务要求等,设计计算出可以满足任务要求的飞行弹道为设计弹道,也可称为方案弹道。

③实际弹道。

弹箭发射后,实际飞行所对应的弹道为实际弹道。

④预报弹道。

针对发射后的弹箭,根据其一段实际弹道的运动参数或环境条件,通过感知、辨识,获得某些特征弹道参数(它们同发射前对应计算参数有差异),并据此对后续飞行弹道进行实时计算,对应的弹道为预报飞行弹道。

⑤弹道方案。

对于研究或设计的弹箭,其技术性能状况、飞行模式等可能尚待确定,需依据弹种的任务、功能及主要弹道性能要求或期望值,在一定约束条件下,通过选择不同的发射方案、增程方案、气动布局及结构方案、控制方案、飞行模式方案等,优选出弹道性能较佳或达到期望值的方案,为弹道方案设计过程。对应上述诸方案组合中的任一具体方案,为弹道方案。

⑥协同弹道。

对发射出去的多发弹箭,各自对应的设计弹道是按某种弹道协同飞行关系而规划设计的方案弹道,以期获得更高效的作战效果。

⑦智能弹道。

根据对弹箭飞行状况、环境条件、任务要求,甚至目标动态等信息的感知、获取、辨识,自主分析、决策后可不断优化、调节设计弹道和实际飞行弹道,努力保持较佳飞行状态及能量运输来实施飞行打击,为智能弹道。

发射出去的弹箭,根据其飞行运动及环境状况等,可自主分析、决策并实施是否调整其设计弹道或改变其控制方案,是智能弹道的最基本功能要素。

1.2 不同弹箭对应的弹道特征与差异

可实现智能弹道飞行的弹箭为智能弹箭。从早期的普通无控弹箭到今天的信息化可控制弹箭,再到今后的智能弹箭,对应的弹道特征有所不同。

1) 普通无控弹箭。

作为无控弹箭,根据弹箭性能状态、环境条件和任务要求等,发射前设计、计算出可以完成任务的理论飞行弹道作为设计弹道,并据此发射弹箭。而对发射出去飞行的弹箭,由于存在各类误差,设计弹道与实际弹道必然存在差异,但对发射后的无控弹箭这种差异是无法改变的。如何尽可能减小无控弹箭设计弹道与实际弹道的这种差异,是无控弹箭外弹道学研究的一个重点方向。

2) 信息化可控制弹箭。

与无控弹箭类似,信息化可控制弹箭也对应有设计弹道和实际弹道,但内涵和功能已不同。对信息化可控制弹箭,根据弹箭性能状态、环境条件、任务要求和确定的控制策略方案等,发射前设计、计算出可以完成任务的较佳理论飞行弹道,为其设计弹道,并据此发射弹箭。发射出去飞行的弹箭,可不断感知、获取实际飞行弹道同设计弹道或目标信息的差异,进而根据确定的控制策略方案,可以对弹箭实际弹道进行控制调整,使其向设计弹道或目标逼近,其飞行弹道为信息化可控制弹箭的实际弹道。

与传统无控弹箭相比,信息化可控制弹箭一样有设计弹道和实际弹道,发射前确定设计弹道的过程基本相似,只是信息化可控制弹箭确定设计弹道更为复杂,发射后设计弹道不再改变。但其实际弹道则可以控制调整,这是一个重大改变,使信息化可控制弹箭的弹道性能有了重大突破。

3) 智能弹箭。

智能弹箭同样有设计弹道和实际弹道。发射前可同信息化可控制弹箭一样,预先设计方案弹道并按其发射,但发射后通过对飞行运动状况、环境条件的感知、辨识,以及对任务要求、目标动态信息的获取等,可以自主分析决策,并对后续设计弹道进行优化、完善和调整,为实际飞行弹道提供更为合理、高效的引导基准,此过程为智能弹箭的设计弹道,也可称为智能弹箭方案弹道。

不断感知、辨识、获取实际弹道与设计弹道或目

标信息的差异,自主选择适应的控制策略方案等,始终保持向设计弹道或目标高效追踪,其飞行弹道为智能弹箭的实际弹道。

对比不同弹箭的设计弹道、实际弹道内涵,智能弹箭的弹道特征主要表现为:

①智能弹箭的设计弹道,在飞行中可以根据需要进行实时、自主的动态规划与调整。实际上,智能弹箭的设计弹道在飞行中是一可以自主进行设计—预报—设计的反复过程。

②智能弹箭在飞行中可以依据实际环境、运动状况、需求等,自主选择、匹配较佳的控制策略方案,使实际弹道更为高效地追踪设计弹道或目标。

2 智能弹道的主要功能及支撑技术群

智能弹道除具备信息化可控制弹箭对应弹道的所有功能特征外,还具有以下主要新增功能,这些功能均有各自相应的技术群或技术研究方向为基础。当这些技术群在基础理论、技术应用和工程化所需条件等方面被深入研究并逐渐成熟后,即是智能弹道理论与技术广泛应用和成熟之时。

2.1 弹道环境感知功能

在飞行弹道上面临运动状况、环境条件状况发生变化,甚至一些特殊任务或要求变化时,智能弹箭能实时响应并调整对应弹道,自身具有较强、较完备的实时感知和辨识各类特征参数的功能,为智能弹道的自主分析与决策提供必要的依据。信息化可控制弹箭虽然也可实时感知部分运动状况,如位置、速度、姿态等,但与智能弹道自主决策所需感知的运动及环境条件、辨识各主要弹道特征参数的能力相比,还相差甚远。

该功能对应技术群中包含的主要关键技术如下:

①弹道上弹箭自身运动、环境及作用力系特征状况的实时感知与辨识技术。

表征弹箭运动状况的主要弹道参数:弹箭位置、速度、加速度、姿态、角速度、角加速度等,及环境(如气象)和作用其上的各类力系特征参数,如空气动力、弹上的一些作用力装置等,对后续飞行弹道有直接影响,是自主分析、决策优化调整设计弹道、控制实际飞行弹道的主要依据。完全依托弹上装置,较全面、实时、分门别类地测量出上述参数是不现实的。而如何依托一些基本的弹道测量信息、完备的弹道动力学方程组等,研究一套行之有效地感知、辨

识其主要弹道及作用力系特征参数的方法,为智能弹道自主决策提供依据,是智能弹道的关键技术,也是智能弹道理论与技术的基础问题。它的难点在于:实时快速、准确地根据多参数耦合影响下的弹道运动状态信息,辨识出不同的主要弹道特征参数。

针对上述关键技术及难点,可以从飞行弹道的正反算技术、分段多参数解耦迭代逼近、特征参数辨识、弹道影响当量权重匹配等技术途径着手研究。

②飞行弹道环境条件下的弹道状况实时预报技术。

弹箭飞行过程的环境与状况条件,如气象、作用力系、弹道上动力学特征等,对飞行弹道、弹上探测与控制工作状况有很大影响,是自主分析决策、实时完善设计弹道及适配控制方案的主要信息基础。弹箭通过感知、辨识出主要弹道及作用力系等特征参数,而这些参数信息在射击前是无法准确获取的,此时对应的设计弹道与实际弹道可能差异较大,需实时调整并完善。同时,根据作战任务或目标状况的变化,或许需对后续飞行弹道的一些弹道状况或时机,如某些运动或动力学特征的弹道环境,作出预报。

故根据感知、辨识出的主要弹道及作用力系等特征参数,实时、较准确地预报出后续飞行弹道及其状态,是智能弹箭自主分析决策、实时完善设计弹道及适配控制方案的重要基础,是智能弹道需要解决的基础问题。

它的难点在于:如何匹配飞行动力学方程组与辨识的多弹道特征参数,进行耦合影响下快速、准确的弹道预报解算。

③弹道故障诊断与决策处理技术。

在弹箭的飞行过程中,有时会发生诸如弹体结构损坏、弹上信息探测或控制部件异常、弹载增程装置作用异常等偶发事件,致使实际飞行弹道出现异常,而非通常各类误差引起的实际弹道与设计弹道之间差异。这种情况一旦发生,有可能会对己方设备和人员造成危害。对于弹箭出现的这种弹道异常,传统无控弹箭无能为力;某些信息化可控制弹箭在设计中可能考虑了这方面问题,但因探测与感知弹箭运动的特征能力弱,其处理能力有限,处理方式也简单。

若在智能弹道上发生上述情况,弹箭则可以根据感知、辨识出的运动状况、作用力系特征参数以及感知的信息状况的差异等,自主进行模态识别与分

析研判,将弹道异常进行故障分类、分级,并选择相应的处理方案,尽量使智能弹箭发挥作用或保障其不发生危害。

其难点在于:对弹道异常对应的故障分类、分级,建立广泛的弹道模态、判据,弹道故障的处理,如修复、补偿、销毁等。

可根据需要,今后智能弹箭在设计时可考虑是否需具备此项功能,并根据功能要求,针对性地进行智能弹道设计。

2.2 弹上实时数据通讯、飞行弹道特征匹配大数据与相关模态

要实现智能弹道飞行,弹箭必须具备在弹道上实时自主分析与决策的能力。这其中,弹箭运动状况、环境状况,获取任务要求与目标动态状况信息,不同条件下的飞行弹道特征匹配大数据等是其自主分析的基础。因此,弹箭在弹道上应具备实时数据通讯处理功能,或具有不同条件下飞行弹道大数据与相关模态库匹配能力。

该功能对应技术群中包含以下主要关键技术:

①可靠、大容量信息交互处理与远距离通讯传输技术。该关键技术涉及可靠、快速地分析处理感知或获取的各类信息,可以保持实时远距离通讯传输,为智能弹道自主分析与决策提供信息交互处理、通讯传输等保障。抗干扰、快速及大容量数据处理、低功耗远距离通讯传输及装置小型化是其难点。

②飞行弹道特征匹配大数据及相关模态库技术。该关键技术的目的是构建不同弹道环境与特征参数、任务要求、目标状况、控制方案等条件下的飞行弹道特征匹配大数据及相关模态库,为智能弹道自主分析、决策,快速确定适配的弹道方案提供依据。构建不同条件下的飞行弹道特征匹配大数据及相关模态库、弹上处理器件小型化并大容量快速运算等是其难点。

应当指出,上述关键技术中的许多研究内容,应借鉴相关学科研究成果,外弹道学研究人员主要针对这些研究成果在火炮发射及弹箭飞行环境下的应用开展研究。该功能所依托的技术主要为智能弹道的应用技术。

2.3 自主快速分析、决策及调控弹道功能

此项功能是智能弹道的核心功能,也可以说是智能弹道的标志。该功能对应技术群包含以下关键技术。

1)实时、适配的较佳设计弹道规划技术。

智能弹箭尽管在发射时也规划设计出方案弹道并按方案弹道发射(这点与信息化可控制弹箭相同),但飞行中会根据弹道的实际运动和环境条件、任务或目标的变化状况等,对预先设计弹道做出动态规划与完善调整,以保持较佳飞行引导状态,并实现高效打击效果。

此项关键技术主要包括:在充分感知并辨识出弹道上运动与作用力系特征状况、环境条件,或获知任务要求变化、目标状况等前提下,快速设计出相应的较佳后续飞行弹道,作为控制实际弹道的引导依据。它的技术难点主要包括:

①针对弹箭的不同运动及作用力系,弹道环境条件,火炮(或火箭)性能条件、任务,目标状态等状况,逐渐建立并完备较佳方案弹道模态关系与适配弹道方案形式、范围等。

②存在信息交互处理、气动或其他作用力系、弹道环境等耦合影响下的快速弹道计算,实时设计弹道优化方法等。

这项关键技术是智能弹道的理论基础。

2)弹箭可变体自适应弹道技术。

弹箭气动布局对应的气动力对飞行弹道有直接影响,同时弹箭运动状况、弹道环境条件等也对气动力性能有直接影响。理论上,弹道上较佳的气动布局(阻力较小或较佳升阻比等)应随上述状况变化而变化。但实际中,为简便起见,弹箭气动布局通常是固定不变的(外弹道设计中一般兼顾全弹道的综合平均效果),当弹箭飞行空域跨度和速度变化范围较大时,调整气动外形达到较佳状态对改善外弹道性能的潜能就非常显著。

技术不断发展,相应地,智能弹道追求全飞行弹道上的较佳性能,因此提出飞行弹道上弹箭气动外形可以变化,以满足始终保持较佳气动性能飞行,并可提高弹道上的控制能力^[41~47]。

此项关键技术的主要难点在于:在不同弹箭运动状况和环境条件下,快速自主分析并确定出相适应的较佳气动外形,并实施变化;不同气动外形结构同全弹布局结构(包括满足弹箭发射约束)的匹配性与变形范围设计等。

当然,在智能弹道发展的初期,可变体的气动结构与尺度范围、弹道上变形的离散间隔等仍较有限,但对弹箭外弹道性能提升仍不失为一大突破,使其飞行与控制性能有质的飞跃。这项关键技术是智能弹道能力扩展的技术基础,与全弹功能结构布局研

究、弹箭发射状况等关联性较强。

3) 可变体弹箭气动力计算技术。

对于自适应飞行弹道状况的可变体弹箭,相应气动外形下的气动力参数计算是弹道设计和弹道控制的依据。在弹道状况与气动力特征存在弹道耦合影响的情况下,因弹箭外形变化,在弹道上进行气动力参数计算是必不可少的。

这项关键技术的主要难点:存在弹道耦合影响下的快速、准确、较全面的气动力参数计算方法。此项技术是智能弹道的理论基础。从应用场景条件看,将气动力计算方法最终转换成工程方法可能是较有效的技术途径。

4) 较强的自主实时实际弹道调控技术。

智能弹道的设计弹道在飞行过程中存在调整变化,且智能弹道对飞行弹道性能要求更高,因此自然对实际弹道的调控能力比目前信息化可控制弹箭的要求更强。在对应不同气动外形、追踪不同设计弹道、环境状况实时变化等条件下,适配的控制策略也可能不同。要迅速、自主选择更高效、适用的控制方案,并保持稳定控制飞行,是智能弹道必须具备的能力。

此项关键技术的主要难点:逐渐建立并完备能适配不同环境、条件的控制方案模态库,能快速自主决策高效的控制方案,智能弹道飞行稳定性与操控性理论等。这些内容是智能弹道的理论与技术基础,与适配弹箭发射环境的可用信息探测与控制功能部件的发展状况相关联。

5) 智能弹道对应的弹道模态仿真与数智化技术。

对于任何弹道方案,在确定和实际应用之前,都存在相应的弹道模拟与设计过程,智能弹道也不例外,然而由于智能弹道的复杂性,在弹道模拟与仿真设计上应有相应方法,能更为科学合理、真实地再现其飞行弹道状况。

相较无控弹箭和信息化可控制弹箭,智能弹箭在弹道环境感知与辨识、自主调整气动布局、方案弹道自适应调整、实际控制弹道与可变化控制策略等方面能力更强,且都有极大不同,整个飞行过程表现出弹道阶段、弹道模式更多,影响因素、条件变化多,情况更为复杂,很难用确定的一套参数或一个飞行弹道模型就能完整地模拟仿真智能弹道,必须针对智能弹道的功能、要求、条件等,研究建立更为有效、更真实、针对性更强的弹道模拟仿真与设计方法,来

开展智能弹道仿真和设计研究,提出相应的技术设计保障,并由此检验智能弹道的适应能力,优化弹道方案。

对智能弹道的模拟仿真,可以考虑的研究途径:将全飞行过程串行构建出不同阶段环节,对应不同的环境、影响因素、特征参数等条件,辅助相关的飞行弹道模型与控制策略模态及数据库,在不同要求、约束等条件下,并行求解设计弹道与实际飞行控制弹道,开展耦合效应下的弹道方案模拟。在智能弹道的仿真、设计过程中,某些方面可以借鉴数字孪生仿真模拟过程,逐渐向数智化方向发展。

这项关键技术的主要难点:针对性地提出串行弹道阶段环节,尽可能真实地构建各影响因素、条件变化与弹道变化的过程关系,建立可变条件下的弹道模拟库,包括约束条件、环境与特征参数保障条件、能力与要求范围、适配弹道模型与控制策略范围等,快速、有效地开展并行弹道仿真求解。

此项关键技术是智能弹道的技术应用基础。

2.4 多弹协同飞行弹道规划与控制

这项功能要求,对于发射出去的多发(不少于2发)弹箭,各自对应的设计弹道是按某种弹道协同飞行关系进行规划;发射出去后,根据任务要求、感知的弹箭运动状况、弹道环境及目标状况等,弹箭可自主分析、决策是否需要调整完善各自的协同飞行弹道,并控制实际弹道追踪调整完善后的飞行弹道,实现多弹间保持弹道协同飞行关系,实现组合的高效打击任务^[48-52]。

与前文介绍的智能弹道各项功能与关键技术相比,智能弹道的协同飞行弹道设计与控制的核心内容增加了要求多发弹箭的设计弹道保持某种协同飞行关系。

应当指出,智能弹箭的协同飞行是智能弹道应用对应的更高级形式体现,而非智能弹箭弹道必备功能。早期的无控弹箭,目前广泛研究发展的信息化可控制弹箭,均可进行协同弹道飞行方案设计,但各自对应的内涵有差异,体现出的协同弹道飞行在方式与性能水平上也有很大差异。主要表现为:

①无控弹箭协同弹道飞行。对于某协同弹道飞行要求,如多发弹同时弹着,通过射前预先弹道设计计算,调节几发弹的发射射角与初速,实现协同弹道飞行。对无控弹箭,可以调节协同飞行的手段非常有限,协同飞行效果一般。

②信息化可控制弹箭协同弹道飞行。对于某协

同弹道飞行要求,通过射前对多发弹各自方案弹道的协同设计(不仅可调节射角或初速等,主要是设计各自对应的方案弹道),使多发弹的方案弹道能实现要求的协同弹道飞行功能,发射后各发弹仍各自向其对应的方案弹道追踪飞行。

③智能弹箭协同弹道飞行。它具备了信息化可控制弹箭协同弹道飞行的所有技术能力,并且也是通过对多发弹各自的设计弹道保持某种协同飞行关系而实现协同弹道飞行,这点在形式上同信息化可控制弹箭、无控弹箭相同。

但信息化可控制弹箭、无控弹箭的设计弹道在射前已设计确定,发射后不再变化,所以信息化可控制弹箭和无控弹箭的协同弹道设计,实质是对各发弹带有终端约束下的变调节参数设计,在满足终端约束条件下,各发弹的协同弹道设计可以在射前进行独立设计,因此本质上还是单发弹的外弹道飞行理论与设计。

而智能弹箭对应的设计弹道,在飞行过程中可根据需要进行调整变化,并要求各自的设计弹道也保持某种协同飞行关系,这引出智能弹箭的弹间协同弹道飞行,为各发弹带有弹道过程约束的方案弹道设计,即各发弹的设计弹道除了一些终端约束外,还有弹道过程(协同)耦合性约束。这实际上提出了多发弹协同、耦合飞行弹道问题,给外弹道理论与技术发展提出了挑战。当然,由于智能弹道的设计弹道随任务要求、目标状态及环境变化等,可以调整完善并更加接近实际状况,因此智能弹道的弹间协同弹道飞行在协同适应能力、水平与实际效应上有了极大提升,是智能弹道技术的高度综合集成应用。

智能弹道协同飞行弹道设计与控制功能的主要关键技术:

①协同飞行弹道自适应及相关模态设计技术。即不同任务要求及环境条件(不同炮、弹、射速、任务、环境等)对协同弹道飞行能力的影响及相关模态分析与设计。与信息化可控制弹箭相比,这项关键技术的难点在于需要分析飞行中不同条件下设计弹道的变化及耦合对协同弹道飞行的影响。

②保障协同飞行的群外弹道理论与技术。由于智能弹箭在飞行过程中,设计弹道可能存在调整且对协同弹道飞行存在影响,各弹间设计弹道存在耦合影响关系,这使得在处理智能弹箭的协同弹道飞行时,需要对多发弹在不同条件、状况下保持同步,并实时进行外弹道计算和弹道设计,甚至需要协同

飞行下同时研判各发弹的飞行稳定性与实际操控效应。因此,需对多发弹同步实时开展耦合影响下的外弹道计算和设计,而非仅仅分别对单发弹进行外弹道设计,这方面的研究内容可称之为群外弹道理论与技术。

群外弹道理论与技术主要包括:各发弹对应外弹道方程组的并行、快速弹道仿真与计算;多弹同时飞行下,弹道调整的耦合效应和弹道设计理论与方法;弹间信息感知共享、自主分析决策与弹道协同及控制权重分配;多发弹协同飞行稳定性及最优控制理论;不同约束、条件、要求等对应协同弹道飞行能力判据;适配多弹协同飞行的射前弹道准备方案。

弹间协同飞行弹道设计与控制技术与火炮或火箭发射状况、任务要求等相关联。智能弹道下的协同飞行技术,是极为复杂的技术应用,包括弹间通讯,应当遵循循序渐进的原则来发展研究。

3 展望

外弹道学的发展同常规弹箭的发展息息相关,是弹箭设计和应用的基础。任何新型弹箭的研究、应用到装备,都离不开相对应的外弹道理论与技术的支撑,智能弹箭的发展也同样如此。

与智能弹箭对应的是智能弹道,由于智能弹箭在弹道上对环境和任务需求等变化展现出了较强的自适应和调控能力,使其弹道性能有了质的飞跃与发展,弹箭将从追求“远、准、狠”的性能水平表征进入“远、准、狠、灵”水平表征的全新时代。

智能弹道涉及的问题具有复杂性和多样性,许多问题甚至引出全新的研究领域,需要进行探索,必将在理论基础、技术应用和多学科融合发展等方面给外弹道理论与技术的发展带来全新的挑战。但在未来弹箭性能提升、智能弹道应用需求的引领下,外弹道学研究人员必需面临这些挑战,逐步、全面地研究智能弹道带来的问题,建立智能弹道的全套理论与技术,为智能弹箭的研究、应用提供理论与技术应用基础。

智能弹道理论与技术在后续研究和发展中应注意以下关系:

①基本功能与扩展功能的关系。

在前文分析的智能弹道各功能、相应依托的关键技术中,有些为智能弹道的基本、必备功能,有些则属于智能弹道能力的扩展,或者为更高水平、更高层次的体现。在智能弹道的发展过程中应注意基本

功能与扩展功能的优先发展关系,在保证基本功能实现的基础上,追求扩展功能。

②相互关联关系。

在智能弹道的诸多功能中,有些功能及相对应的关键技术存在关联性,甚至相互依托,在对智能弹道理论与技术的研究与发展中,应注意这些相互关联关系。

③循序渐进的研究发展关系。

由于智能弹道理论与技术涉及问题众多,许多问题属于全新领域,甚至是跨学科领域内容,因此智能弹道的研究与发展绝非一蹴而就,只有当各方面问题、各项关键技术逐渐突破后,智能弹道理论与技术才能逐渐完备,并被广泛应用。目前智能弹道理论与技术的研究亟待开展。在发展路线和顺序上,应注意优先发展基础理论方面研究,包括仿真、设计、弹道特征参数感知辨识与自适应弹道调整等智能弹道相关理论、结构设计等。其次开展相关技术与保障(如模拟、训练)方面研究,并逐渐过渡到应用,同时研究中应注意有一些理论与技术与火炮等的发射技术状态进展密切相关。

智能弹箭的兴起与发展,预示着智能弹道理论与技术必将是今后外弹道学发展的一个主流方向,是外弹道学研究人员必需探索和开拓的新领域。随着研究的深入与完善,智能弹道及许多新的弹道术语将不再是些科幻般的新名词,而是能真实地实现,即弹道可以根据需要随机应变进行调整,实现更合理、更高效飞行的全新弹药。相关研究今后一段时期内将引领着外弹道学的发展。

参考文献

- [1] 浦发. 外弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
PU Fa. Exterior ballistics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980. (in Chinese)
- [2] 郭锡福. 现代炮弹增程技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1997.
GUO Xifu. Modern projectile range extension technology[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 徐明友. 高等外弹道学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
XU Mingyou. Advanced exterior ballistics[M]. Beijing: High Education Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 宋丕极. 枪炮与火箭外弹道学[M]. 北京:兵器工业出版社,1993.
SONG Piji. Exterior ballistics of guns and rockets[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [5] 王中原,史金光,常思江,等. 现代外弹道学[M]. 北京:科学出版社,2024.
WANG Zhongyuan, SHI Jinguang, CHANG Sijiang, et al. Modern exterior ballistics[M]. Beijing: Science Press, 2024. (in Chinese)
- [6] 王中原,周卫平. 外弹道设计理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2004.
WANG Zhongyuan, ZHOU Weiping. Theory and method of exterior ballistic design[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 王中原. 脱壳穿甲弹气动力外弹道优化设计[J]. 空气动力学学报,1993,11(3):270-277.
WANG Zhongyuan. The optimum design of aerodynamic and exterior ballistics for sabot-discarding penetrators[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1993, 11(3):270-277. (in Chinese)
- [8] VINH N X. Optimal trajectories in atmospheric flight[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981.
- [9] KNOCH H G, GREGORIOU G. Aeroballistic optimization of unguided artillery rockets: AIAA 1978-114[R]. 1978.
- [10] HAGER W W, MOORE F G. Optimal projectile shapes for minimum total drag: NSWC/TR-3597[R]. 1977.
- [11] LEONARD C H, COSTELLO M. In flight projectile impact point prediction[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Providence, Rhode Island, US: AIAA, 2004:1-40.
- [12] IIG M D. Guidance, navigation, and control for munitions[D]. Philadelphia, Pennsylvania, US: Drexel University, 2008.
- [13] REGAN F J, SMITH J. Aeroballistics of a terminally corrected spinning projectile (TCSP)[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1975, 12(12):733-738.
- [14] WERNERT P, LEOPOLD F, LEHMANN L. Wind tunnel tests and open-loop trajectory simulations for a 155mm canards guided spin stabilized projectile: AIAA 2008-6881[R]. 2008.
- [15] PETTERSSON T, BURETTA R, COOK D. Aerodynamics and flight stability for a course corrected artillery round[C]//23rd International Symposium on Ballistics. Tarragona, Spain: IBC, 2007:647-653.
- [16] PARK J H, BAE J H, SONG M S, et al. Aerodynamic design of a canard controlled 2D course correction fuze for smart munition[J]. Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 2015, 43(3):187-194.
- [17] LIU X D, WU X S, YIN J T. Aerodynamic characteristics of a dual-spin projectile with canards[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(12):4541-4553.
- [18] SAHU J, HEAVEY K, BURETTA R. Numerical computations of transonic flow over a course corrected spinning projectile: AIAA 2008-6740[R]. 2008.
- [19] COSTELLO M, PETERSON A. Linear theory of a dual-spin projectile in atmospheric flight[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamic, 2012, 23(5):789-797.
- [20] WERNERT P, THEODOULIS S. Modeling and stability analysis for a class of 155 mm spin-stabilized projectiles with course correction fuse(CCF)[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics

- Conference and Exhibit. Portland, OR, US: AIAA, 2011: 1–13.
- [21] ZHU D L, TANG S J, GUO J, et al. Flight stability of a dual-spin projectile with canards [J]. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229(4): 703–716.
- [22] SEVE F, THEODOULIS S, WERNERT P, et al. Flight dynamics modeling of dual-spin guided projectiles [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(4): 1625–1641.
- [23] 王中原, 史金光, 常思江, 等. 弹道修正弹技术发展综述[J]. 弹道学报, 2021, 33(2): 1–12.
- WANG Zhongyuan, SHI Jinguang, CHANG Sijiang, et al. Review on development of technology of trajectory correction projectile [J]. Journal of Ballistics, 2021, 33(2): 1–12. (in Chinese)
- [24] 丁松滨, 王中原. 弹丸滑翔弹道的能量法研究[J]. 兵工学报, 2002, 23(1): 10–13.
- DING Songbin, WANG Zhongyuan. Energy analysis method for the gliding trajectory of a projectile [J]. Acta Armamentarii, 2002, 23(1): 10–13. (in Chinese)
- [25] 徐秋坪, 常思江, 王中原. 自适应网格跟踪微分器设计[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6): 1212–1220.
- XU Qiuping, CHANG Sijiang, WANG Zhongyuan. Design of adaptive mesh tracking differentiator [J]. System Engineering and Electronics, 2018, 40(6): 1212–1220. (in Chinese)
- [26] 史金光, 王中原. 弹道修正弹落点预报方法研究[J]. 弹道学报, 2014, 26(2): 29–33.
- SHI Jinguang, WANG Zhongyuan. Research on method of falling point prediction for trajectory correction projectile [J]. Journal of Ballistics, 2014, 26(2): 29–33. (in Chinese)
- [27] 李小元, 王中原, 常思江. 在线弹道参数滤波与辨识方法分析[J]. 弹道学报, 2020, 32(2): 29–34.
- LI Xiaoyuan, WANG Zhongyuan, CHANG Sijiang. Online trajectory parameter filtering and method analysis [J]. Journal of Ballistics, 2020, 32(2): 29–34. (in Chinese)
- [28] 常思江, 王中原, 牛春峰. 基于卡尔曼滤波的弹箭飞行状态估计方法[J]. 弹道学报, 2010, 22(3): 94–98.
- CHANG Sijiang, WANG Zhongyuan, NIU Chunfeng. Estimation approach of flight state for guided projectiles based on Kalman filter [J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(3): 94–98. (in Chinese)
- [29] 王中原, 常思江. 横向弹道修正的一种快速计算方法[J]. 兵工学报, 2014, 35(6): 940–944.
- WANG Zhongyuan, CHANG Sijiang. An approximated calculation method for lateral trajectory correction [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(6): 940–944. (in Chinese)
- [30] 史金光. 卡尔曼滤波在弹道修正弹落点推算中的应用[J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 41–43.
- SHI Jinguang. Application of Kalman filtering in calculation of trajectory falling point of trajectory correction projectiles [J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 41–43. (in Chinese)
- [31] 杨靖, 常思江, 王中原. 基于改进混叠扩展卡尔曼滤波的炮弹阻力系数辨识[J]. 弹道学报, 2017, 29(1): 28–33.
- YANG Jing, CHANG Sijiang, WANG Zhongyuan. Drag coefficient estimation for projectiles based on improved hybrid extended Kalman filter [J]. Journal of Ballistics, 2017, 29(1): 28–33. (in Chinese)
- [32] 王旭刚, 王中原. 滑翔增程弹制导与控制系统设计[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(3): 304–308.
- WANG Xugang, WANG Zhongyuan. Guidance and control system design for gliding extended range projectile [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(3): 304–308. (in Chinese)
- [33] CHEN Q, WANG Z Y, CHANG S J, et al. Multiphase trajectory optimization for gun-launched glide guided projectiles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(6): 995–1010.
- [34] MA S, WANG Z Y, WANG X G, et al. Consensus-based finite-time cooperative guidance with field-of-view constraint [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2022, 23: 966–979.
- [35] WANG Z Y, CHANG S J. Impact point prediction and lateral correction analysis of two-dimensional trajectory [J]. Defence Technology, 2013, 9(3): 64–69.
- [36] CHANG S J, WANG Z Y, LIU T Z. Analysis of spin-rate property for dual-spin-stabilized projectiles with canards [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2014, 51(3): 958–966.
- [37] MA S, WANG Z Y, WANG X G, et al. Three-dimensional impact time control guidance considering field-of-view constraint and velocity variation [J]. Aerospace, 2022, 9(4): 202.
- [38] SAHU J, HEAVEY K, BURETTA R. Numerical computations of transonic flow over a course corrected spinning projectile: AIAA 2008–6740 [R]. 2008.
- [39] 黄伟, 高敏. 精确制导组件发展及关键技术综述[J]. 飞航导弹, 2016(8): 56–58, 70.
- HUANG Wei, GAO Min. Overview of precision guidance component development and key technologies [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(8): 56–58, 70. (in Chinese)
- [40] 雷晓云, 张志安. 二维弹道修正机构方案与修正控制算法综述[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1577–1588.
- LEI Xiaoyun, ZHANG Zhian. Overview of correction mechanism scheme and control algorithm of two dimensional trajectory correction projectile [J]. Control and Decision, 2019, 34(8): 1577–1588. (in Chinese)
- [41] 陈树生, 贾苜梁, 刘衍旭, 等. 变体飞行器变形方式及气动布局设计关键技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(6): 629595.
- CHEN Shusheng, JIA Muliang, LIU Yanxu, et al. Deformation modes and key technologies of aerodynamic layout design for morphing aircraft: review [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(6): 629595. (in Chinese)
- [42] 武宇飞, 龙腾, 毛能峰. 跨介质变体飞行器设计优化技术进展[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 29–40.
- WU Yufei, LONG Teng, MAO Nengfeng. Review of trans-media morphing flight vehicle design optimization techniques [J]. Tactical Missile Technology, 2020(4): 29–40. (in Chinese)
- [43] 陆宇平, 何真. 变体飞行器控制系统综述[J]. 航空学报, 2009,

- 30(10):1906–1911.
- LU Yuping, HE Zhen. A survey of morphing aircraft control systems [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(10):1906–1911. (in Chinese)
- [44] 刘天翔, 史金光, 赵新新, 等. 变外形滑翔制导炮弹的气动外形多目标优化[J]. *弹道学报*, 2024, 36(2):29–36.
- LIU Tianxiang, SHI Jinguang, ZHAO Xinxin, et al. Multi-objective optimization on aerodynamic shape of morphing gliding guided projectiles [J]. *Journal of Ballistics*, 2024, 36(2):29–36. (in Chinese)
- [45] 张尧, 张婉, 别大卫, 等. 智能变体飞行器研究综述与发展趋势分析[J]. *飞航导弹*, 2021(6):14–23.
- ZHANG Yao, ZHANG Wan, BIE Dawei, et al. A review of research on intelligent variant aircraft and analysis of trends [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(6):14–23. (in Chinese)
- [46] 王健磊, 陈晓宇, 洪厚全, 等. 基于变精度模型的变外形飞行器弹道优化[J]. *西北工业大学学报*, 2022, 40(3):618–627.
- WANG Jianlei, CHEN Xiaoyu, HONG Houquan, et al. Trajectory optimization of morphing aircraft based on multi-fidelity model [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(3):618–627. (in Chinese)
- [47] 彭悟宇. 高超声速飞行器气动变形方案设计与外形优化方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2019.
- PENG Wuyu. Research on aerodynamic morphing scheme design and shape optimization method of hypersonic vehicle [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [48] 槐泽鹏, 梁雪超, 王洪波, 等. 多弹协同及其智能化发展研究[J]. *战术导弹技术*, 2019(5):77–85.
- HUAI Zepeng, LIANG Xuechao, WANG Hongbo, et al. Research on multi-missile collaborative and its intelligence development [J]. *Tactical Missile Technology*, 2019(5):77–85. (in Chinese)
- [49] 宦国杨, 薛新华, 王政伟. 弹道导弹多弹协同作战规划技术[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(7):88–92.
- HUAN Guoyang, XUE Xinhua, WANG Zhengwei. Research on cooperative engagement application of multiple ballistic missiles [J]. *Fire Control & Command Control*, 2020, 45(7):88–92. (in Chinese)
- [50] 陈士超, 卢福刚, 李阳, 等. 射频寻的多弹协同制导构型与应用模式研究[J]. *飞航导弹*, 2021(9):53–58.
- CHEN Shichao, LU Fugang, LI Yang, et al. Research on the configuration and application mode of multi-bomb cooperative guidance with radio-frequency homing [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(9):53–58. (in Chinese)
- [51] 马帅. 制导炮弹协同攻击导引律与导引控制一体化设计方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2023.
- MA Shuai. Research on the integrated design method of guided artillery shell coordinated attack guidance law and guidance control [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [52] 王庆海. 火箭助推滑翔增程制导炮弹弹道规划与导引控制律设计[D]. 南京:南京理工大学, 2024.
- WANG Qinghai. Trajectory planning and guidance control law design for rocket-boosted glide extended-range guided projectiles [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)