

火炮振动与控制的发展现状及应用前景^{*}

杨国来, 葛建立, 孙全兆, 王丽群

(南京理工大学机械工程学院 南京, 210094)

摘要 火炮是一个多场耦合复杂系统,其发射过程具有高瞬态和强冲击特征,火炮振动是影响射击精度的重要因素之一,是火炮领域的重要研究内容。近年来提出了火炮多体系统动力学、非线性动态有限元、多目标多学科优化及不确定性等火炮现代设计理论与方法,对炮身、架体、底盘等重要部件及各部件间连接关系组成的火炮系统进行建模、仿真及优化,从而达到减小炮口振动、提高射击稳定性和射击安全性的目的。笔者从火炮振动与系统优化、弹炮耦合、火炮不确定性分析与优化等方面对近年来取得的成果进行了总结和分类讨论,并提出了火炮振动领域存在的问题及火炮振动与控制的应用前景。

关键词 火炮振动; 射击精度; 多体系统动力学; 有限元法; 弹炮耦合; 不确定性

中图分类号 TJ3

引言

火炮在第二次世界大战中被誉为“战争之神”,是当今世界各国军队常规武器装备的主体。火炮发射过程中,在高温、高压、高瞬态火药燃气压力作用下不可避免地产生振动,特别是炮口振动会对火炮射击精度造成不利影响。火炮射击精度涉及到火炮、弹药及气象条件等,是一个复杂的系统问题。为了研究方便,常常将火炮划分成不同的子系统,但是不同子系统之间是相互影响和高度耦合的。因此,采用完整的系统方法来解决精度问题是一个更好的选择。近年来,连续体力学、动力学设计、数值和计算机技术以及测试技术等各个学科分支在解决复杂工程问题中取得了很大进展,这为通过新技术更好地理解和改进火炮射击精度提供了可能性^[1]。火炮射击精度包括射击准确度和射击密集度,射击准确度与系统误差有关,可以修正;射击密集度是惯性弹丸的随机散布,与多种不确定性有关,无法消除,但是可以通过合理设计,控制在一定范围内。火炮振动是影响射击密集度的重要因素之一,是火炮结构的固有属性。火炮振动与控制在新型火炮设计和现有火炮改型设计的各个环节中占有重要地位,引起各国兵工界的普遍重视。因火炮振动涉及到多种物理场的耦合,且非线性、瞬态性强,其研究具有相当

的难度^[1-2]。各国火炮科研人员在该领域进行了大量的理论和试验研究。值得一提的是,从1977年到2001年,美国陆军装备研究与发展中心举办了10次火炮动力学学术会议^[3],此后的历届国际弹道会议都有关于火炮振动与控制相关的主题,提出了许多火炮振动分析和控制的新理论、新方法。国内在20世纪80年代正式立项火炮振动与控制的专题研究,随后获得了快速发展。历次国内的弹道学术会议一般都设置火炮振动与控制研究专题,在理论分析、数值计算及检验测试方面取得了十分显著的成果。

近年来火炮振动与控制的研究进展主要集中在以下几个方面:①火炮振动与系统优化;②弹炮耦合;③火炮不确定性分析与优化。

1 火炮振动与控制研究现状

1.1 火炮振动与系统优化

火炮总体设计是决定武器性能的关键,振动分析与仿真是研究火炮总体性能的一种重要理论与途径,主要解决炮口振动与射击稳定性问题。火炮振动的有效控制充分反映出火炮部件设计及集成的合理性,但由于发射过程具有高瞬态和强冲击特征,其振动特性及控制的研究具有极大难度。火炮发射时高温、高压(可达600 MPa)气体作用于炮身,

^{*} 国家自然科学基金资助项目(11172139,11572158,51705253);国家基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(51319702);国防重点预研基金资助项目(301070603,30107040705)

收稿日期:2021-10-28;修回日期:2021-11-15

使后坐部分在反后坐装置作用下产生大位移运动,炮膛合力通过反后坐装置缓冲后传递至摇架,然后通过摇架耳轴和高低机传递至上架/炮塔,再通过座圈传递至下架和大架(牵引炮),车载炮和自行火炮则传递至卡车或装甲车底盘,最后作用到地面上。由于炮膛合力产生的翻转力矩会使整个火炮有跳起趋势,系统具有一定的刚度和阻尼特性则会阻止火炮跳起,从而产生振动。近年来,多体系统动力学、有限元等成为火炮振动研究的主要理论和方法^[4-8]。

传统的火炮多体系统动力学模型^[9-11]常常将火炮简化为炮身、摇架、上架、下架和大架等少数几个刚体,炮身相对于摇架的运动采用滑移铰模拟,摇架相对于上架的转动在耳轴处建立旋转铰,上架相对于下架的回转同样采用旋转铰模拟,下架和大架多采用固定铰连接。炮膛合力、复进机力、制退机力及平衡机力等通过子程序嵌入到火炮多体动力学模型中,高低机和方向机采用扭簧模拟。火炮的多刚体模型自由度少,只有几个或者几十个自由度,刚体间的连接关系简单,可以通过自编程序或者商业软件实现,模型的求解速度快。随着计算机技术、数值计算方法的发展和火炮振动研究的深入开展,身管、摇架、上架,甚至大架或者底盘的柔性被考虑进模型。滑移铰和旋转铰不能考虑部件形状和配合间隙对火炮振动的影响,接触模型开始用于替代滑移铰和旋转铰,除了能很好地模拟配合间隙外,还能得到接触力和接触应力,这为火炮关键配合部件的设计提供了理论依据。

耳轴和座圈是火炮发射载荷传递的重要环节,传统的建模方式是采用等效旋转铰模拟。含间隙旋转铰的火炮耳轴-轴承接触碰撞动力学模型^[12]可以更有效地用于研究耳轴-轴承配合间隙对火炮振动的影响;火炮回转支撑滚珠与内、外滚道的接触碰撞模型能够模拟滚珠、滚道形状及配合间隙对火炮振动特性的影响^[13]。

火炮振动的系统优化模型主要以各部件质量、质心、后坐部分偏心距、反后坐装置参数、火线高、前后衬瓦间距、高低机的刚度和阻尼、驻锄尺寸等作为设计变量,以炮口振动、弹丸起始扰动、射击稳定性等表征指标作为目标函数^[14-18]。但是在同一个模型中对火炮结构总体参数和关键部件的结构参数进行优化具有很大的难度。文献[19-20]提出了一种基于径向基函数神经网络自适应代理模型的火炮多柔体系统参数优化方法,解决了火炮总体结构参数优化和关键零部件结构参数优化相互割裂的现状,形成了大口径火炮一体化优化设计方法。近年来,基

于有限元模型的火炮总体参数动态优化也已渐渐成熟。此法通常以代理模型为基础,结合遗传优化算法、神经网络学习方法等实现,开展了各种火炮振动的多目标优化设计研究^[21-23]。

坦克或自行火炮行进间射击增加了火炮振动与控制的研究难度,与停车时射击的最大区别是需要同时考虑火炮射击载荷和路面激励对系统振动与受力的影响。行进间射击火炮振动涉及到多体系统动力学、火炮发射振动、车辆行驶动力学及数值计算等多个学科。目前,国内外针对行进间射击技术的研究主要是围绕路面-底盘-火炮系统一体化模型,探讨在不同路面激励、不同车速下履带或轮式底盘与火炮系统耦合振动的规律,特别是炮口振动规律与现代控制策略。

美国陆军装甲兵工程委员会很早就对各种装甲战斗车辆行进间探测、打击静止或运动目标的性能进行了评估与论证^[24-26]。在坦克和自行火炮行进间路面-底盘-火炮系统动力学模型中,考虑路面激励和后坐载荷的共同作用,将坦克车体的振动与火炮在稳定器作用下的运动有机结合起来,分析车体振动对火炮运动的影响^[27-30];建立了考虑多个结构非线性因素的坦克行进间刚柔耦合多体系统动力学模型,对坦克行进间射击炮口振动进行多目标优化设计,研究了高速机动条件下坦克行进间火炮非线性振动及稳定性对炮口振动的影响^[31-33]。文献[34]提出了一种坦克火炮稳定系统约束跟随控制方法,建立了一种包含双向稳定系统的坦克行进间对动稳定控制模型(如图1所示);进一步,提出了一种基于坦克火炮双向稳定控制状态空间模型的自适应鲁棒反馈控制方法,并建立了一种含方位向电机和俯仰向电动缸的坦克行进间对动稳定控制联合仿真模型(如图2所示),为提高火炮行进间射击精度提供了保障^[35]。炮口吸振器也是一种有效减小炮口振动的方法,但是减振器的安装和固定需考虑炮口冲击波的影响^[36]。这些工作促进了火炮行进间射击时的振动控制,为火炮结构设计和控制系统设计提供了理论参考。

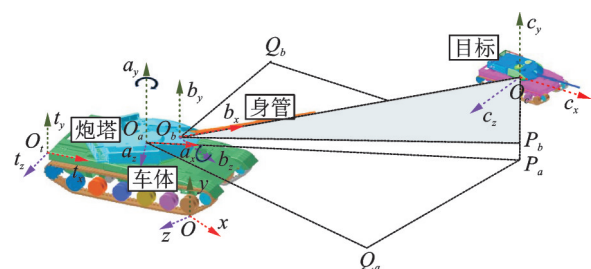


图1 敌我坦克之间的位置关系

Fig.1 The position relationship between friend and foe tanks

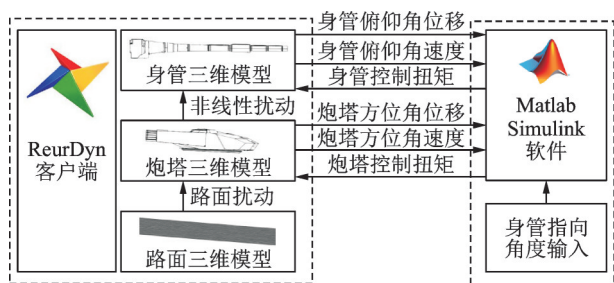


图 2 联合仿真数据交互的仿真框架

Fig.2 Simulation framework of co-simulation data interaction

1.2 弹炮耦合

火炮发射时,弹丸在火药气体推动下沿着身管内膛运动,弹丸与身管内壁发生接触、碰撞,这个接触碰撞给身管以很大激励,受激励的身管反过来又影响弹丸的运动,即弹炮耦合问题。弹炮耦合研究身管在火药气体和弹丸碰撞联合激励下的炮口振动及弹丸起始扰动,炮口振动的控制有助于提高射击精度^[37-39]。通过研究膛线、坡膛、身管弯曲等身管结构特征,弹丸质量偏心、弹带等弹丸结构特征,弹炮间隙、摩擦特性等配合关系对炮口振动的影响,指导身管和弹丸关键特征参数的优化设计,提升射击精度^[40]。面对精确火力打击的作战需求,弹炮耦合对研究炮射制导弹药与发射环境的适应性具有重要理论意义。

弹炮耦合接触/碰撞有限元建模理论与方法已趋于成熟,如将双线性本构模型、Johnson-Cook本构模型等用于弹带材料建模^[41-42]。火药燃气压力作用于身管内壁并随弹丸运动而变化的荷载条件建模方法,解决了以往燃气压力径向效应加载不准甚至无法加载的问题,获得了轴向不同位置热冲击载荷差异性引起的轴向非均匀温度分布及轴向温度梯度^[43-44]。弹丸挤进身管内膛仿真有效模拟了弹带材

料的挤压变形、刻槽过程、挤进阻力和挤进速度,对火炮挤进压力的假设进行了修正^[45-47]。文献[48]建立了挤进系统的流固耦合计算模型,通过火炮发射试验进行了验证,如图3所示,并进行了挤进系统优化设计。进一步建立了考虑真实挤进速度的两相流内弹道与弹炮相互作用有限元耦合模型,探索了能量转化过程,如图4所示,为提高能源效率进行了优化^[49]。将火药燃烧、弹丸挤进与弹丸膛内运动过程耦合起来的建模理论与方法对于弹-炮-药一体化设计与优化具有重要理论意义。

弹炮耦合有限元建模方法虽然与弹丸膛内运动的实际过程比较接近,但是由于膛线身管结构的特殊性,有限元模型无法精确描述其几何特征,如大口径火炮膛线深度约为 3 mm,宽度约为 4 mm,而身管内径达 155 mm,长度约为 8 000 mm,膛线与身管尺度不同。精确的几何表述是弹丸与身管大滑移动接触问题的基础和关键。膛线身管和弹

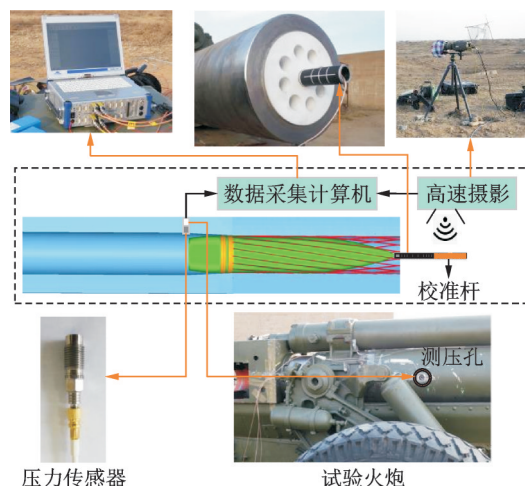


图 3 挤进发射试验原理和实物图

Fig.3 Schematic diagram and physical picture of real gun launch experiment

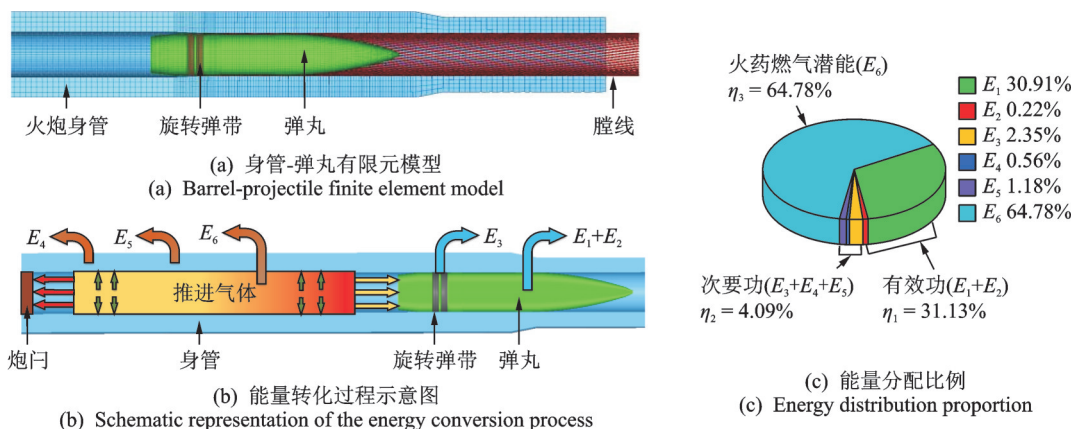


图 4 内弹道能量转换的数值模拟研究

Fig.4 Numerical Simulation of Energy Conversion in Interior Ballistics Stage

丸的非均匀有理 B 样条 (non uniform rational B-spline, 简称 NURBS) 建模及等几何接触分析^[50-51]为解决这类问题提供了一种新思路^[52-54]。NURBS 与拉格朗日有限元耦合的三维混合单元建模方法^[55]既能借鉴有限元法成熟的理论和程序, 又充分利用了 NURBS 单元的高精度特点, 对于计算精度要求高或是几何形状复杂的膛线、弹带等结构能够发挥较好的作用。

1.3 火炮不确定性分析与优化

火炮发射过程实际上是一个受多种不确定性因素影响的不确定性过程, 特别是炮口振动和弹丸起始扰动具有不确定性的特点。受不确定性因素的影响, 每一发射弹的膛内载荷、火炮振动特性以及弹丸的飞行轨迹与姿态都存在差异, 这些差异汇聚到落点坐标, 最终影响到火炮武器系统的一项重要战术技术指标——射击密集度。火炮不确定性分析与优化研究着重解决火炮随机振动问题, 为火炮射击密集度设计提供方法理论和分析手段, 从不确定性角度揭示火炮发射过程本质并掌握其变化规律, 从而实现火炮射击密集度的有效控制。近年来, 火炮工程领域主要针对火炮不确定性振动分析与优化两大类进行了研究。

在火炮不确定性振动研究方面, 着重分析不确定性参数对火炮静态或动态特性的影响, 目前该领域的研究处于起步阶段。这种研究滞后, 一方面是由于火炮振动系统本身的复杂性造成的。火炮振动系统结构复杂, 显式微分方程组通常由于这种复杂性而存在推导困难, 振动系统的梯度信息也难以直接获得, 属于典型的复杂非线性泛函系统。针对这一问题, 文献[56]通过偏微分计算的后向链式法则

推导了前馈神经网络微分方程, 提出了基于前馈神经网络微分的区间摄动法, 实现在较小计算成本的情况下近似获得不确定性响应的区间边界。另一方面, 现有的不确定性分析方法大多只能处理一些具有显式函数关系的简单工程问题, 如图 5 所示, 无法很好地求解复杂非线性泛函系统的不确定性分析。针对复杂的火炮系统, 文献[57-59]基于混沌多项式模型(如图 6 所示), 系统研究了火炮随机振动问题, 并提出了一种新型 Legendre 多项式区间扩张函数, 有效克服了区间包裹效应, 形成了基于 Legendre 多项式的区间非线性振动求解方法。目前该领域研究核心在于解决以下问题: 振动模型复杂性与不确定性分析复杂性共同导致的计算效率低下; 区间方法的“包裹效应”和子区间法的“维度灾难”; 由统计知识欠缺导致的混合不确定性。

在火炮不确定性优化研究领域, 以火炮关键参数误差方案设计为目标的不确定性优化研究目前发展较为完善, 形成了以随机优化、区间优化为代表的理论体系。在随机不确定性优化方面, 文献[60]考虑了制导炮弹飞行环境下的不确定性因素, 利用线性协方差分析法推导了系统误差传播方程, 进而建立了不确定飞行环境下的弹道优化模型, 利用 Chebyshev 伪谱法并结合内点算法获得方案弹道的最优解。文献[61-62]提出了一种指标要求导向型火炮随机因素计算方法, 构建了射击密集度稳健设计模型。随机规划法具有良好的有效性和鲁棒性, 优化方案对随机干扰也有很好的抑制效果。但是由于测量、成本等因素的限制, 确定火炮发射过程中随机参数的概率分布通常很难, 必须对它们的分布类型做一些假设。针对这一问题, 很多研究采用了区间规划法优化火炮的供输弹、协调器结构^[63-64]、后坐流

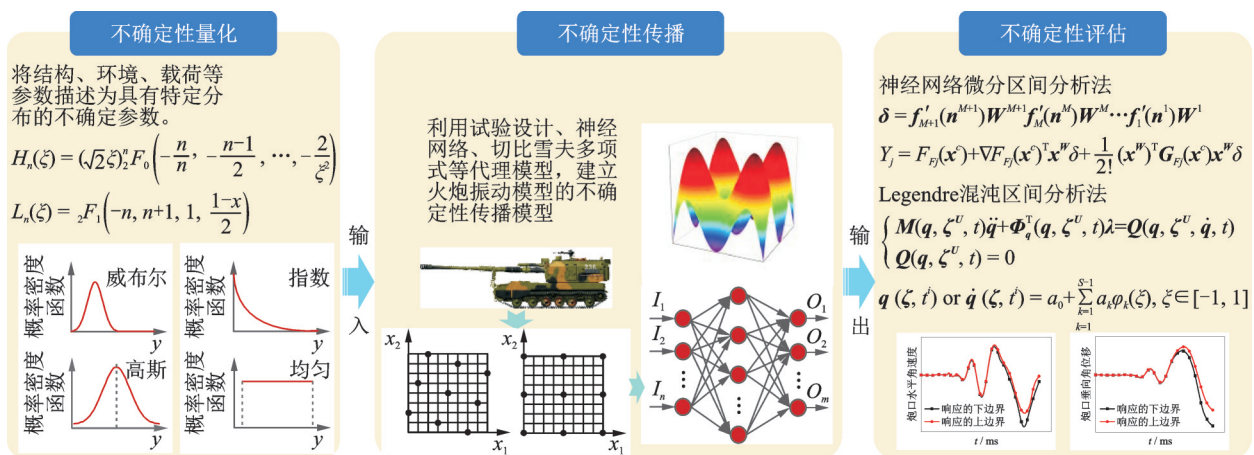


图 5 火炮不确定性研究的基本流程

Fig.5 The basic process of artillery uncertainty research

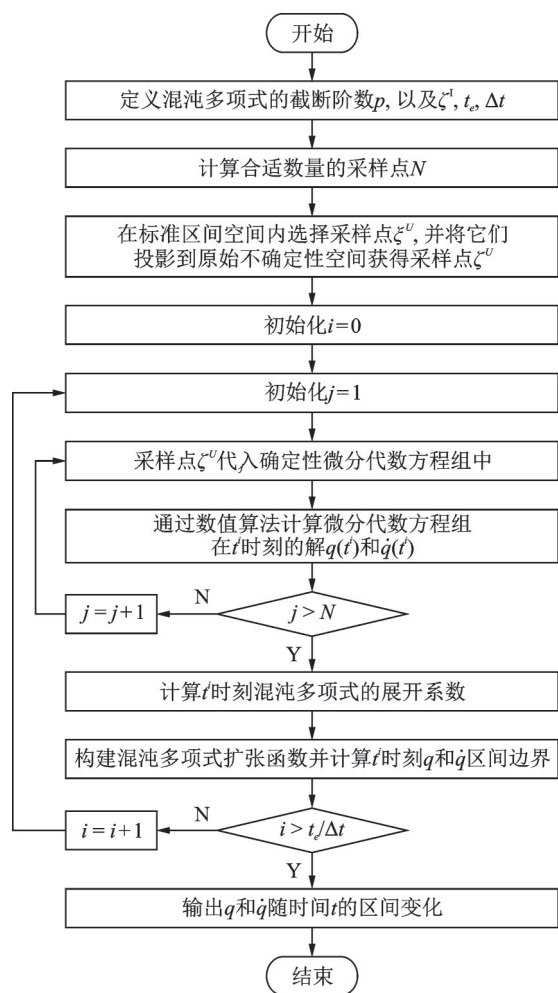


图6 基于混沌多项式展开的区间不确定性动力学求解方法
Fig.6 A method for solving interval uncertainty dynamics using polynomial chaos expansion

液孔尺寸^[65]、摇架结构尺寸^[66]等。这些研究通常转化为两层嵌套优化问题求解,其中外层优化器用于设计变量的寻优,内层优化器用于计算不确定性目标函数和约束函数的区间边界。对于每个特定的区间向量,确定性优化过程都需要执行两次。嵌套优化所导致的效率低下是限制其工程应用的最大瓶颈,尤其是当优化模型中存在多个目标函数和多个约束函数时。为此,一些启发性研究提出了基于前馈神经网络微分的非线性区间数优化算法^[67]、基于Legendre多项式展开的区间数优化算法^[68]、基于Chebyshev代理模型与仿射算法的区间优化方法^[69]等多种方法,消除区间不确定性优化中最耗时的内层优化,从而在一定程度上解决了传统嵌套优化的优化效率低下难题。

整体而言,现有火炮振动分析及优化研究很少考虑火炮振动系统的不确定性,对于不确定性所导致的射击现象缺乏系统分析和深层次机理研究。

2 火炮振动与控制的应用前景

大威力、高精度、高机动性是火炮发展的趋势,也是未来战场对火炮的要求。大威力意味着炮口动能大,火炮受到的反作用力大,需要加强火炮结构,从而引起重量的增加;高机动性又希望火炮轻量化,这一对矛盾对火炮的设计理论提出了更高的挑战;高精度则要求尽量减小火炮振动。火炮振动与控制理论和建模方法的研究成果从火炮平台的角度为解决这一问题提供了一种思路,将极大促进火炮在以下几个方面进步。

1) 超轻型大口径火炮的研制。超轻型大口径榴弹炮从传统的9 t优化到3 t多(如美国M777),大大提高了战术机动性,武装直升机载运和空投变得容易,使得大威力火炮更容易布置到山地、丘陵等一些阵地。超轻型迫击炮兼顾了威力与人工便携性。超轻型大口径火炮研制的难点在于火炮整体刚度不好控制,相同的后坐能量会导致炮口振动变大,射击稳定性变差,对保证火炮射击精度和发射安全性是一个很大的挑战。

2) 坦克炮、自行火炮的高速行进间射击技术。高速行进间射击时,路面对车体的冲击加剧,炮口振动剧烈,射击精度差,不易击中目标。火炮振动与控制方法和技术的进步为炮口振动控制提供了理论参考,高速行驶情况将炮口振动控制在某一范围,为火炮射击提供有利条件。高效可靠的双稳控制算法、反馈信号的精确测试、执行结构的优化设计是高速行进间振动控制的难点。

3) 炮射制导弹药技术。目前的炮弹多为惯性无控弹,精确打击能力差。炮射简易制导炮弹成本低,射程范围内速度快,打击效果好,对未来战场适应能力强;但是其难度在于火炮膛内发射环境恶劣,制导元器件容易损坏。轴向过载、旋转过载、弹丸与内膛的剧烈碰撞过载是制导元器件难以克服的障碍,弹-炮-药适应性研究和一体化设计将有助于解决这一难题。

3 结束语

火炮振动与控制技术近年来取得了很大进展,对火炮零部件设计、系统设计与优化、轻量化设计等方面发挥了巨大作用,对解决火炮威力与机动性之间的矛盾提供了快捷经济的途径,加快了火炮武器的升级换代。然而,火炮振动与控制仍然存在一些亟待解决的问题:①由于火炮试验对场地和操作要

求严格,火炮振动与控制仿真实论和方法普遍缺乏严谨的试验验证,如果能对火炮振动与优化模型、弹炮耦合模型、火炮不确定性理论等进行严格考核和验证,并形成行业规范,用来指导火炮设计,必将带来火炮武器性能的极大提升;②火炮振动与控制模型、理论和方法具有一定的难度,现有成果比较分散,若能形成系统性、可操作性的工程设计软件、使用规范或者专家库,便于为火炮设计人员和制造装配人员提供参考。

参 考 文 献

- [1] 杨国来,葛建立,孙全兆.火炮发射动力学概论[M].北京:国防工业出版社,2018:1-8.
- [2] 杨国来,杨占华,葛建立,等.火炮时变力学[M].北京:科学出版社,2020:1-11.
- [3] ERENGIL M. Proceedings of the 10th U.S. army gun dynamics symposium [R]. Austin Texas: The University of Texas at Austin, 2002.
- [4] BALLA J. Dynamics of mounted automatic cannon on track vehicle[J]. International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2011, 5(3): 423-432.
- [5] BALLA J, KRIST Z, CONG I L. Infantry fighting vehicle in case of burst firing [C] //ICMT-2015, International Conference on Military Technologies. Brno: Czech Republic, 2015.
- [6] 王德石,史跃东.火炮振动分析与多体系统模型研究[J].动力学与控制学报,2012,10(4):303-324.
WANG Deshi, SHI Yuedong. Research on gun's vibration and modeling methods by multibody dynamics[J]. Journal of Dynamics and Control, 2012, 10(4): 303-324. (in Chinese).
- [7] 芮筱亭,何斌,陆毓琪,等.刚柔多体系统动力学离散时间传递矩阵法[J].南京理工大学学报,2006,30(4):389-394.
RUI Xiaoting, HE Bin, LU Yuqi, et al. Discrete time transfer matrix method for rigid-flexible multibody system dynamics[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(4): 389-394. (in Chinese)
- [8] 芮筱亭,刘怡昕,于海龙.坦克自行火炮发射动力学[M].北京:科学出版社,2011:1-20.
- [9] 杨国来.多柔体系统参数化模型及其在火炮中的应用研究[D].南京:南京理工大学,1999.
- [10] 石明全.某火炮自动供弹系统和全炮耦合的发射动力学研究[D].南京:南京理工大学,2003.
- [11] 周军,高跃飞,王登,等.基于ADAMS的火炮发射动力学仿真研究[J].振动与冲击,2020,39(23):135-140.
- ZHOU Jun, GAO Yuefei, WANG Deng, et al. Artillery launch dynamic simulation based on ADAMS[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(23): 135-140. (in Chinese)
- [12] 谢润,杨国来,徐锐,等.考虑耳轴-轴承间隙的自行高炮行进间射击炮口响应研究[J].振动与冲击,2015,34(16):156-169.
XIE Run, YANG Guolai, XU Rui, et al. Muzzle response of self-propelled anti-aircraft gun on the move in consideration of clearance between trunnion and bearing [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 156-169. (in Chinese)
- [13] 曾晋春.车载式火炮刚柔耦合发射动力学研究[D].南京:南京理工大学,2010.
- [14] 周乐,杨国来,葛建立,等.基于遗传算法的火炮反后坐装置结构多目标优化研究[J].兵工学报,2015,36(3):433-436.
ZHOU Le, YANG Guolai, GE Jianli, et al. Structural multi-objective optimization of artillery recoil mechanism based on genetic algorithm [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(3): 433-436. (in Chinese)
- [15] 王飞,杨国来,葛建立,等.某火炮射击稳定性的总体参数灵敏度分析与优化[J].火炮发射与控制学报,2014,35(4):58-61.
WANG Fei, YANG Guolai, GE Jianli, et al. Overall structure parameters sensitivity analysis and optimization of a gun firing stability [J]. Journal of Gun Launch and Control, 2014, 35(4): 58-61. (in Chinese)
- [16] 林通,钱林方,陈光宋,等.面向输弹一致性的某输弹机稳健优化设计研究[J].兵工学报,2019,40(2):243-250.
LIN Tong, QIAN Linfang, CHEN Guangsong, et al. Research on robust optimal design of a ramming mechanism for consistency of ammunition ramming [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(2): 243-250. (in Chinese)
- [17] 王浩,葛建立,王知,等.基于非层次型改进二级求解技术的大口径火炮多学科优化设计[J].弹道学报,2019,31(1):7-13.
WANG Hao, GE Jianli, WANG Zhi, et al. Multi-disciplinary optimization design of large caliber gun based on non-hierarchical improved two-level solving technique [J]. Journal of Ballistics, 2019, 31(1): 7-13. (in Chinese)
- [18] 单春来,刘朋科,古斌,等.多级优化算法在火炮总体结构设计中的应用[J/OL].兵工学报, [2021-05-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20210514.1335.004.html>.

- [19] 萧辉,杨国来,孙全兆. 火炮多柔体动力学结构优化研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 27-34.
XIAO Hui, YANG Guolai, SUN Quanzhao. Research on flexible multi-body dynamics structure optimization of artilleries.[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(1): 27-34. (in Chinese)
- [20] XIAO H, YANG G L, GE J L. Surrogate-based multi-objective optimization of firing accuracy and firing stability for a towed artillery [J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(1): 290-301.
- [21] 梁传建,杨国来,王晓锋. 基于神经网络和遗传算法的火炮结构动力学优化[J]. 兵工学报, 2015, 36(5): 789-794.
LIANG Chuanjian, YANG Guolai, WANG Xiaofeng. Structural dynamics optimization of gun based on neural networks and genetic algorithms[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(5): 789-794. (in Chinese)
- [22] 葛建立,谢新宇,刘国志,等. 复合材料座钣动态响应分析及结构优化[J]. 弹道学报, 2020(4): 83-90.
GE Jianli, XIE Xinyu, LIU Guozhi, et al. Dynamic response analysis and structural optimization of composite base plate [J]. Journal of Ballistics, 2020(4): 83-90. (in Chinese)
- [23] 赵天枝. 面向复杂机械结构动力学优化的近似模型研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [24] PURDY D J. Modelling and simulation of a weapon control system for a main battle tank[C]//Proceedings of the 8th U.S. Army Symposium on Gun Dynamics. Watervliet: Benet Laboratories, 1996: 14-16.
- [25] MURDZA C. Weapon recoil effects on canted lightweight vehicles [R]. Aberdeen: Army Research Lab, 1994.
- [26] BUNDY M, NEWILL J, MARCOPOLI V, et al. A methodology for characterizing gun barrel flexure due to vehicle motion[J]. Shock and Vibration, 2001, 8(3/4): 223-228.
- [27] 史力晨,王良曦,张兵志. 坦克-火炮系统行驶间振动建模与仿真[J]. 兵工学报, 2003, 24(4): 442-446.
SHI Lichen, WANG Liangxi, ZHANG Bingzhi. Modeling and simulation of a moving tank-gun system in vibration [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(4): 442-446. (in Chinese)
- [28] 李剑峰,王剑,李振平,等. 履带车辆行进间射击的随机响应研究[J]. 车辆与动力技术, 2009, 3: 9-12.
LI Jianfeng, WANG Jian, LI Zhenping, et al. Research on random response for tracked vehicle marching fire [J]. Vehicle and Power Technology, 2009, 3: 9-12. (in Chinese)
- [29] 冯长根,温波,李才葆. 自行火炮行进间射击动力学研究[J]. 兵工学报, 2002, 23(4): 457-461.
FENG Changgen, WEN Bo, LI Caibao. Dynamic analysis of a self-propelled gun firing on the move [J]. Acta Armamentarii, 2002, 23(4): 457-461. (in Chinese)
- [30] 钱明伟,王良明. 自行火炮行进间动力学模型及仿真研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(5): 520-524.
QIAN Mingwei, WANG Liangming. Modelling and simulation of dynamics for the self propelled artillery running on the road [J]. Armamentarii, 2004, 25(5): 520-524. (in Chinese)
- [31] 陈宇,杨国来,谢润,等. 某坦克行进间射击炮口振动优化与分析[J]. 弹道学报, 2016, 28(4): 86-89.
CHEN Yu, YANG Guolai, XIE Run, et al. Optimization and analysis of muzzle vibration for tank firing on the move [J]. Journal of Ballistics, 2016, 28(4): 86-89. (in Chinese)
- [32] 陈宇,杨国来,付羽翀,等. 高速机动条件下坦克行进间火炮非线性振动动力学研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(7): 1339-1348.
CHEN Yu, YANG Guolai, FU Yuchong, et al. Dynamic simulation on nonlinear vibration of marching tank gun under high mobility conditions [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(7): 1339-1348. (in Chinese)
- [33] 陈宇,杨国来. 稳定器作用下坦克行进间炮口振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(8): 21-27.
CHEN Yu, YANG Guolai. A study on muzzle vibration characteristics of moving tanks under the influence of a stabilizer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(8): 21-27. (in Chinese)
- [34] MA Y Z, YANG G L, SUN Q Q, et al. Adaptive robust control for tank stability: a constraint-following approach [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2021, 235(1): 3-14.
- [35] MA Y Z, YANG G L, SUN Q Q, et al. Adaptive robust feedback control of moving target tracking for all-Electrical tank with uncertainty [J/OL]. Defence Technology, [2021-03-10]. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.03.005>.
- [36] LITTLEFIELD A, KATHE E, MESSIER R, et al. Gun barrel vibration absorber to increase accuracy[C]//Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Seattle: U.S. Army ARDEC, 2001.
- [37] KEINÄNEN H, MOILANEN S, TERVOKOSKI J, et al. Influence of rotating band construction on gun tube loading—part I: numerical approach [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134(4): 61-65.
- [38] EDWARD A J. Advanced gun system gun and

- projectile dynamic model results and correlation to test data[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2012, 134: 51-60.
- [39] GUR Y, AZULAY I, TOUATI D, et al. Jump error and gun dynamics: a comparison between two types of 120mm smooth-bore tank guns[C]//23th International Symposium on Ballistics Tarragona. Spain: Lunch Dynamics, 2007: 565-572.
- [40] ERLINE T F. Deviation effect of an in-bore centerline on a 5-inch naval gun[R]. Aberdeen: Army Research Lab, 2000.
- [41] LI Z, GE J L, YANG G L, et al. Modeling and dynamic simulation on engraving process of rotating band into cylinder using three different numerical methods [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2016, 18(2): 768-780.
- [42] 马佳, 陈光宋, 吉磊, 等. 身管内膛与弹丸前定心部接触碰撞响应分析[J]. *弹道学报*, 2019, 31(4): 74-81.
MA Jia, CHEN Guangsong, JI Lei, et al. Analysis on contact/impact response between barrel and bourrelet [J]. *Journal of Ballistics*, 2019, 31(4): 74-81. (in Chinese)
- [43] 于情波, 杨国来, 葛建立, 等. 基于火药燃气压力空间变化的火炮发射动力学研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(17): 141-147.
YU Qingbo, YANG Guolai, GE Jianli, et al. Artillery firing dynamics based on spatial variation of propellant gases pressure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(17): 141-147. (in Chinese)
- [44] 于情波, 杨国来, 葛建立. 基于随动边界的火炮身管热力联合效应数值分析[J]. *兵工学报*, 2019, 40(4): 697-707.
YU Qingbo, YANG Guolai, GE Jianli. Numeric analysis of barrel heat-pressure joint effect based on follow-up boundary[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(4): 697-707. (in Chinese)
- [45] SUN Q Z, YANG G L, GE J L. Modeling and simulation on engraving process of projectile rotating band under different charge cases [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2017, 23(6): 1044-1054.
- [46] 孙河洋, 马吉胜, 李伟, 等. 膛膛结构变化对火炮内弹道性能影响的研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(6): 669-675.
SUN Heyang, MA Jisheng, LI Wei, et al. Study on influence of bore structure on gun's interior ballistic performances [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(6): 669-675. (in Chinese)
- [47] 李森, 钱林方, 孙河洋. 某大口径火炮弹带热力耦合挤压动力学数值模拟研究[J]. *兵工学报*, 2016, 37(10): 1803-1811.
LI Miao, QIAN Linfang, SUN Heyang. Research on coupled thermo-mechanical model during rotating band engraving process [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(10): 1803-1811. (in Chinese)
- [48] XIN T, YANG G L, XU F J, et al. Modeling, simulation and uncertain optimization on gun engraving system[J]. *Mathematics*, 2021, 9(4): 1-25.
- [49] XIN T, YANG G L, WANG L Q, et al. Numerical calculation and uncertain optimization of energy conversion in interior ballistics stage [J]. *Energies*, 2020, 13(21): 1-21.
- [50] LU J. Isogeometric contact analysis: geometric basis and formulation for frictionless contact [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, 200(5/6/7/8): 726-741.
- [51] HIERMEIER M, WALL W A, POPP A. A truly variationally consistent and symmetric mortar-based contact formulation for finite deformation solid mechanics [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 342: 532-560.
- [52] 过斌, 葛建立, 杨国来, 等. 三维实体结构NURBS等几何分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(9): 42-48.
GUO Bin, GE Jianli, YANG Guolai, et al. NURBS-based isogeometric analysis of three-dimensional solid structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(9): 42-48. (in Chinese)
- [53] 过斌, 葛建立, 张鸿浩, 等. 膛线身管的NURBS建模与等几何数值分析[J]. *南京理工大学学报*, 2015, 39(5): 538-543.
GUO Bin, GE Jianli, ZHANG Honghao, et al. NURBS model and isogeometric analysis of rifled barrel [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2015, 39(5): 538-543. (in Chinese)
- [54] 程清思. 弹丸沿身管大滑移接触问题的等几何分析方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [55] GE J L, GUO B, YANG G L, et al. Blending isogeometric and Lagrangian elements in three-dimensional analysis [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2016, 112: 50-63.
- [56] WANG L Q, CHEN Z T, YANG G L. An interval uncertainty analysis method for structural response bounds using feedforward neural network differentiation [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 82: 449-468.
- [57] WANG L Q, CHEN Z T, YANG G L. An uncertainty analysis method for artillery dynamics with hybrid stochastic and interval parameters [J]. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2021, 126(2): 479-503.

- [58] WANG L Q, CHEN Z T, YANG G L. A polynomial chaos expansion approach for nonlinear dynamic systems with interval uncertainty [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 101(4):2489-2508.
- [59] WANG L Q, YANG G L. An interval uncertainty propagation method using polynomial chaos expansion and its application in complicated multibody dynamic systems [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 105: 837-858.
- [60] 陈琦, 王中原, 常思江, 等. 不确定飞行环境下的滑翔制导炮弹方案弹道优化[J]. *航空学报*, 2014, 35(9): 2593-2604.
CHEN Qi, WANG Zhongyuan, CHANG Sijiang, et al. Optimal trajectory design under uncertainty for a gliding guided projectile[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(9): 2593-2604. (in Chinese)
- [61] 王丽群, 杨国来, 刘俊民, 等. 面向火炮射击密集度的随机因素稳健设计[J]. *兵工学报*, 2016, 37(11): 1983-1988.
WANG Liqun, YANG Guolai, LIU Junmin, et al. Robust design of random factors on gun firing dispersion [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(11): 1983-1988. (in Chinese)
- [62] WANG L Q, YANG G L, SUN Q Q, et al. An uncertain optimization method for overall ballistics based on stochastic programming and a neural network surrogate model [J]. *Engineering Optimization*, 2019, 51(4): 663-679.
- [63] 石海军, 钱林方, 李森. 具有参数区间不确定的协调器保性能优化[J]. *兵工学报*, 2014, 35(2): 152-157.
SHI Haijun, QIAN Linfang, LI Miao. Guaranteed cost optimization for the shell transfer arm with interval uncertainty [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(2): 152-157. (in Chinese)
- [64] 蒋清山, 钱林方, 徐亚栋, 等. 考虑区间不确定性的某弹丸提升装置参数优化[J]. *兵工学报*, 2015, 36(6): 1117-1122.
JIANG Qingshan, QIAN Linfang, XU Yadong, et al. Parameter optimization of a shell elevating device with interval uncertainties [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(6): 1117-1122. (in Chinese)
- [65] 李荣, 杨国来, 孙全兆, 等. 火炮后坐阻力的区间不确定性优化研究[J]. *弹道学报*, 2017, 29(2): 78-84.
LI Rong, YANG Guolai, SUN Quanzhao, et al. Optimization on interval uncertainty of artillery recoil resistance [J]. *Journal of Ballistics*, 2017, 29(2): 78-84. (in Chinese)
- [66] 李志旭, 杨国来, 葛建立. 考虑材料特性参数误差的某火炮摇架多目标优化[J]. *南京理工大学学报*, 2017, 41(6): 671-675.
LI Zhixu, YANG Guolai, GE Jianli. Multi-objective optimization for cradle carriage of gun considering material property parameter errors [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2017, 41(6): 671-675. (in Chinese)
- [67] WANG L Q, CHEN Z T, YANG G L, et al. An interval uncertain optimization method using back-propagation neural network differentiation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 366: 113065.
- [68] WANG L Q, YANG G L, LI Z X, et al. An efficient nonlinear interval uncertain optimization method using Legendre polynomial chaos expansion [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 108: 107454.
- [69] XU F J, YANG G L, WANG L Q, et al., Interval uncertain optimization for interior ballistics based on Chebyshev surrogate model and affine arithmetic [J]. *Engineering Optimization*, 2021, 53(8): 1331-1348.



第一作者简介:杨国来,男,1968年11月出生,博士、教授、博士生导师。现任特种设备可靠性设计与控制工信部重点实验室副主任、南京理工大学国际教育学院院长,兼任辽宁省瞬态物理力学与能量转换材料重点实验室学术委员会主任委员、江苏省振动工程学会副理事长、中国兵工学会智能装备技术专业委员会委员、中国兵工学会火炮专业委员会委员、吴运铎国防科技创新中心专家委员会委员。江苏省青蓝工程优秀教学团队带头人、江苏省“333高层次人才培养工程”中青年科技带头人。主要从事火炮发射振动与控制、磁阻尼制退技术、模块装药火炮发射技术等方面的研究工作。主持国防“九七三”课题、国防重大专项、国家重大仪器专项、武器装备型号/演示验证、国家自然科学基金等高层次科研项目30余项。获国家级教学成果一等奖和二等奖各1项、国防科技进步一等奖3项和二等奖4项、兵器工业科技进步特等奖和兵器装备科技进步特等奖各1项。出版专著/教材5部,发表学术论文200余篇,授权发明专利32项。

E-mail:yyanggl@njjust.edu.cn

通信作者简介:葛建立,男,1980年3月生,副教授。主要研究方向为火炮现代设计理论与方法。

E-mail:gejianli@njjust.edu.cn