



先进战斗机武器内埋发展趋势与关键气动问题

金鑫 杨党国 蔡广平 吴继飞 徐来武 刘付生

Key aerodynamic issues and development tendency of internal weapons bay of advanced fighters

JIN Xin, YANG Dangguo, CAI Guangping, WU Jifei, XU Laiwu, LIU Fusheng

引用本文:

金鑫, 杨党国, 蔡广平, 等. 先进战斗机武器内埋发展趋势与关键气动问题[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(3): 152–159. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2022.0060

JIN Xin, YANG Dangguo, CAI Guangping, et al. Key aerodynamic issues and development tendency of internal weapons bay of advanced fighters[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(3): 152–159. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2022.0060

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2022.0060>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

战斗机翼型使用和发展综述

An overview of the development of fighter airfoils

空气动力学学报. 2021, 39(6): 53–60 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0252>

后壁倒角对开放式空腔气动噪声抑制作用研究

Effect of chamfer rear-face angle on open cavity flow aero-acoustic noise suppression

空气动力学学报. 2017, 35(5): 645–649 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2015.0047>

典型构型空腔模型设计与流动/噪声特性研究

Analysis of design method and aeroacoustics characteristics inside typical cavity

空气动力学学报. 2018, 36(3): 432–439, 448 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2017.0201>

先进战斗机过失速机动模型飞行试验技术

Model flight test technology for post-stall maneuver of advanced fighter

空气动力学学报. 2020, 38(1): 9–20 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2019.0088>

沟槽微结构尺寸对高速列车横风特性影响研究

Influence of groove microstructures on the aerodynamic performance of high speed trains under crosswind

空气动力学学报. 2021, 39(5): 132–141 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0149>

一种变体尾翼的气动-隐身特性研究

Study of aerodynamic and stealthy performance for a multifunctional morphing tail

空气动力学学报. 2020, 38(5): 896–900 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0173>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com

网址: <http://kqdlxxb.xml-journal.net/>



关注微信公众号
获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2022)03-0152-08

先进战斗机武器内埋发展趋势与关键气动问题

金鑫^{1,4}, 杨党国^{2,3,*}, 蔡广平¹, 吴继飞³, 徐来武³, 刘付生^{2,3}

(1. 中国航空工业集团 成都飞机设计研究所, 成都 610091;

2. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 绵阳 621000;

3. 中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 绵阳 621000;

4. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要: 紧盯未来先进战斗机研制需求和发展趋势, 详细分析了武器内埋技术在提高飞机战技指标和综合性能方面的优势, 并介绍了国内外在先进战斗机武器内埋技术方面研究的基本情况和遇到的一些具体问题, 归纳总结了内埋武器舱空腔复杂流动机理、流声振多场耦合问题研究的现状和关键技术难点; 从内埋武器舱系统研制设计要求出发, 梳理了先进战斗机内埋武器系统研制面临的关键气动问题和空腔类构型流致振动与噪声问题的主要特征, 着重分析了内埋武器舱复杂流动机理、振动与噪声问题、数值仿真方法、风洞测试技术和流固声多场耦合控制技术难点, 指出了下一步需要突破的关键技术难点和研究重点, 为准确把握先进战斗机内埋武器系统关键气动问题和开展相关问题研究提供借鉴和指导。

关键词: 战斗机; 内埋武器舱; 空腔; 气动性能; 振动与噪声

中图分类号: V211.5 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2022.0060

Key aerodynamic issues and development tendency of internal weapons bay of advanced fighters

JIN Xin^{1,4}, YANG Dangguo^{2,3,*}, CAI Guangping¹, WU Jifei³, XU Laiwu³, LIU Fusheng^{2,3}

(1. Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610091, China;

2. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

3. High Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

4. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Internal weapons bay can considerably improve the overall aerodynamic performance of advanced fighters. However, during the bomb dropping, the structural vibration and aerodynamic noise induced by flow fields around internal weapons bay will significantly undermine fighters' safety. This paper first briefly introduces the development of internal weapons bay and summarizes related research regarding cavity-flow-induced vibrations and aerodynamic noise. Later, design requirements for internal weapons bay are proposed based on a systematic analysis of the complex cavity flows related to internal weapons bay. At last, critical technical difficulties and some future research directions are discussed after a thorough study of flow mechanism, numerical simulation methods, wind test techniques, and control strategies for fluid-structure-noise coupled systems. This paper is helpful to the understanding of vital aerodynamic issues related to internal weapons bay. It also provides research directions to the cavity-flow-induced noise and vibrations.

Keywords: advanced fighters; internal weapons bay; cavity; aerodynamic performance; vibration and noise

收稿日期: 2022-03-23; 修订日期: 2022-04-19; 录用日期: 2022-04-20; 网络出版时间: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(11732016, 11972360, 52130603)

作者简介: 金鑫(1985-), 男, 山东枣庄人, 高级工程师, 研究方向: 飞行器设计、机弹相容性. E-mail: jinfour@126.com

通信作者: 杨党国*, 研究员, 研究方向: 非定常空气动力学, 流致振动与噪声预测技术, 流固声耦合与控制技术. E-mail: yangdg-cardc@163.com

引用格式: 金鑫, 杨党国, 蔡广平, 等. 先进战斗机武器内埋发展趋势与关键气动问题[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(3): 152-159.

JIN X, YANG D G, CAI G P, et al. Key aerodynamic issues and development tendency of internal weapons bay of advanced fighters[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(3): 152-159(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2022.0060

0 引言

新世纪以来,随着新型作战模式的转变发展和智能化快速作战能力的迫切需求,以美俄为首的世界各军事强国都非常重视发展空军和海军的空中武器装备。在军事需求和国家安全牵引下,以打赢信息化智能化战争为战略目标,各军事强国大力开展飞行新概念、新技术、新作战模式空中武器装备论证研制工作,发展了以 F-22、F-35 和 T-50 战机为代表的一系列具有隐身功能的新型战斗机。

出于高机动性、高敏捷性、高气动效率、低阻力特性、超视距作战能力、超声速巡航能力、良好隐(声)身性能等追求,美国 F-22 和 F-35、俄罗斯 T-50 等均采用了武器内埋技术。武器内埋不仅能降低飞机的雷达反射面积,提高作战生存率;而且能有效减小飞机飞行阻力,特别是超声速飞行时的波阻,增加作战航程,提高飞行速度。因此,武器内埋技术成为了国际上新型先进战斗机、远程轰炸机和未来无人作战飞机等必须采用的关键技术,是实现技战术指标、提高作战效能的基本前提,有着非常重要的地位和广阔的应用前景。

然而,内埋武器投放分离过程中,武器舱将演变成(带舱门)大尺度空腔。高速飞行条件下($0.6 \leq Ma \leq 2.0$),武器舱绕流会不可避免地出现流动分离、剪切层不稳定、波/涡/剪切层干扰^[1],当满足一定条件时还会出现流激振荡和声腔共鸣现象。武器舱内压力脉动剧烈,噪声环境恶劣,易导致武器舱及内埋武器系统结构振动,舱门打不开或关不上,武器出舱时出现俯仰、偏摆等非预期运动,产生以下严重后果:1)舱内电控系统工作失灵失效,影响武器系统的有效控制;2)影响武器出舱和投放分离,危及飞机安全;3)武器舱及内埋武器系统结构疲劳甚至破坏,缩短使用寿命,增加维护成本;4)降低内埋武器瞄准精度和飞机的操稳品质,进而影响作战效能。

本文针对先进战斗机内埋武器系统研制需求,重点分析了武器内埋的关键技术难点,并介绍了国内外的主要研究进展,指出了未来需要深入研究的问题。

1 国内外武器内埋战斗机发展情况

美国在 20 世纪 50 年代研发的超声速截击机 F-106 上采用了武器内埋方式携带空空导弹,开展了武器内埋相关问题的研究;70 年代开始对内埋武器舱技术开展系统而深入的全面研究。美国国家航空航

天局(NASA)^[2-5]和阿诺德工程发展中心(AEDC)^[6-9]开展了内埋武器问题研究,母机模型采用 F-111 飞机 1:15 缩比模型,武器模型采用 B-43、B-57 的 1:15 缩比模型(见图 1),在洛克希德CFWT 设备和 AEDC-4T 设备中进行了 F-22 内埋武器舱气动和武器分离风洞试验研究(见图 2),建立了完备的地面试验数据库。另外,美国空军军械技术实验室(AFATL)^[10-11]、空军飞行动力实验室(AFFDL)^[12-15]、空军科学研究所(AFOSR)^[16-17]、海军水面武器中心(NSWC)^[18]、空军研究实验室(AFRL)^[19]以及空军武器实验室(AFWAL)^[20-22]等多家军方单位也对内埋武器舱问题开展了相关研究,建立了以风洞试验为主的研究体系,对内埋武器舱系统气动问题进行全面深入的研究,并开展大量飞行试验综合验证工作。其取得的科研成果为美国先进轰炸机和战斗机内埋武器舱系统关键气动问题的解决提供了有力的技术支持。

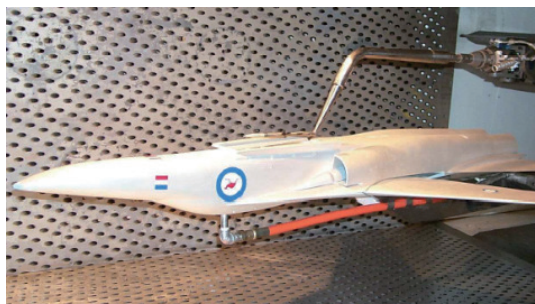


图 1 F-111 内埋武器分离风洞试验^[8]

Fig. 1 Separation test of F-111 internal weapons bay^[8]

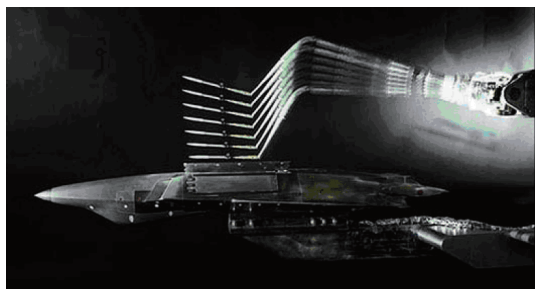
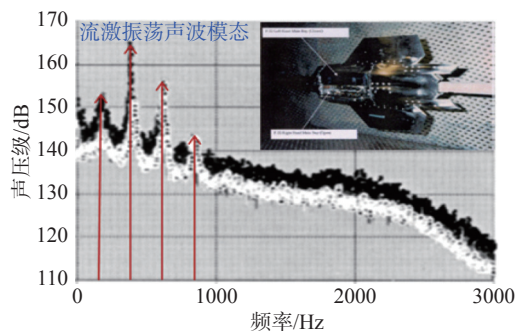
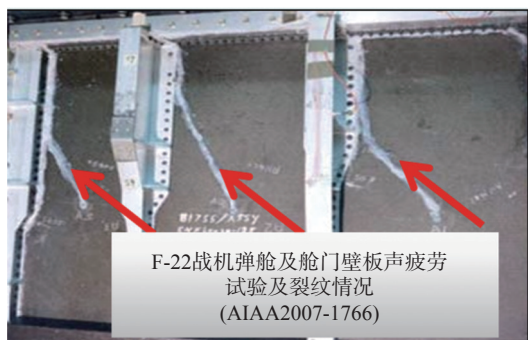


图 2 F-22 内埋武器分离风洞试验^[9]

Fig. 2 Separation test of F-22 internal weapons bay^[9]

美国虽然成功研制了全球最先进的 F-22 和 F-35 战机,并已列装,但这两型飞机仍存在武器舱及内埋武器系统振动与噪声问题。如 F-22 战机武器舱及舱门壁板在声疲劳试验中出现了裂纹^[23](见图 3 和图 4)。2013 年 1 月美国国防部作战试验与鉴定部发布了 F-35 战机的测评报告,指出因 F-35A 战机内埋武器舱舱门结构强度问题,该机 2012 年部分测试点试飞计划被延迟;F-35B 战机在内埋武器舱疲劳试验中结构出现裂纹,试验被迫中止。

图3 F-22 内埋武器舱振动噪声试验^[23]Fig. 3 Noise and vibration test of F-22 internal weapons bay^[23]图4 F-22 内埋武器舱门壁板声疲劳裂纹^[23]Fig. 4 Acoustical fatigue of F-22 internal weapons bay^[23]

俄罗斯在先进战机内埋武器舱研制方面也取得了突破。T-50 战机武器全部内埋,内置 3 个武器舱,实现了气动特性和雷达隐身综合性能,雷达可探测性大大降低,具备隐身性能好、起降距离短、机动敏捷性强、超声速巡航等特点。预计到 2025 年,俄罗斯将用 T-50 全部替换米格-29 和苏-27 飞机。同时俄罗斯还在进行先进无人机的研制,米格公司已推出“电鳐”喷气式隐身无人战斗机(武器采用内埋装载方式)。欧洲六国(法国、西班牙、意大利、希腊、瑞典和瑞士)历时 5 年研制的“神经元”隐形无人战机,于 2012 年在法国南部的伊斯特尔空军基地首飞成功。该机采用飞翼气动布局,进气道和尾喷口都采用了隐形设计,机身覆盖隐身涂层,武器采用内埋技术。2010 年 7 月,韩国与印尼达成了共同开发下一代隐身战斗机 KFX 的意向,并于三年后,首次公布了其内埋武器舱和电子系统的最新设计成果。2013 年 2 月,印度在航展上展示了其最新的四代机 AMCA 概念设计,该机构型与美国的 F-22 战机类似,采用了武器内埋技术。

为了适应国际复杂的环境,我国也在加紧开展武器内埋战机研制,同样也面临武器内埋技术关键问题,亟需解决。从公开发表的文献来看,20 世纪 90 年代我国就有部分学者对空腔和内埋武器舱问题进行

了研究。一些高校和科研机构围绕先进战斗机内埋武器舱复杂流动、振动噪声难题及内埋武器系统功能实现性、结构安全性等问题开展了大量研究^[24-42],获得的某机武器舱马赫数 2.0 以下的试验结果表明,武器舱内噪声总声压级约为 145~170 dB,远高于《军用飞机结构强度规范》(GJB 67A-2008)要求(即噪声总声压级大于 140 dB 时就需要进行结构动强度分析和声疲劳试验)。高强度噪声载荷将对武器舱结构安全和使用寿命产生不利影响。为此中国空气动力研究与发展中心联合飞机设计单位共同构建了战斗机内埋武器舱流动/振动/噪声多场耦合试验模拟平台和仿真技术,揭示了马赫数 2.0 以下的武器舱复杂流动和声振载荷产生机理,并提出了工程实用的武器舱振动噪声控制对策,为建立武器内埋技术研发体系和地面评估手段奠定了坚实的研究基础,在促进我国先进战斗机装备研制水平、生存能力、实战能力的快速提升方面起到了积极作用。

2 战斗机内埋武器系统设计要求

内埋武器系统设计成功与否直接关系到战斗机的战斗力生成和作战效能的有效发挥。随着现代先进战斗机的战技指标和内埋武器系统使用条件、适应边界的不断提升,内埋武器系统有了更严苛更复杂的设计要求。

2.1 内埋武器系统设计总体方案

内埋武器系统设计总体方案:

1) 选择合适的武器舱几何尺寸和形状,满足武器装载方案、悬挂装置、电气接口和机械接口以及维护间隙检查等要求;

2) 武器排列和安装方法要使载机和武器的使用包线大,满足分离安全和投放精度要求;

3) 优化的武器装载、投放使用能力,有利于减少任务准备时间和再次出动时间,并且达到良好的综保水平,具备维护工作量小等特点。

2.2 内埋武器舱设计要求

内埋武器舱几何构型、外形参数、结构形式和舱门开闭方式等结构完整性设计,会影响到内埋武器的投放安全、飞机性能、稳定性和操纵性,甚至影响到进气道性能。因此,内埋武器舱设计初期就需要考虑武器舱总体、气动、载荷、结构、强度、控制等一体化设计要求,减少武器舱挂载和作战使用中的武器分离、颤振和振动、噪声(疲劳)等问题。否则,在战斗机飞行试验后或服役过程中才暴露这些严重问题,将给飞机的设计和使用带来颠覆性和反复性问题。

2.3 内埋武器系统设计要求

内埋武器装载要求: 武器构型多, 武器几何尺寸、舵面控制、稳定性对武器舱振动和噪声环境提出要求。

内埋武器使用要求: 包线范围大、大过载、高马赫数, 面临诸多严酷的载荷作用环境, 对结构安全性提出要求。

内埋武器功能要求: 任务载荷变化, 不局限于导弹、炸弹, 还有雷达、电子战吊舱。

内埋武器发射要求: 全向打击发射、高效弹射装置、清洁能源、变弹射力、折叠弹翼等。

因此, 机/弹/挂架/发射系统的综合集成设计成为未来内埋武器系统设计和提升作战性能的必然趋势。此外, 载机平台作战使命决定了内埋武器的主要性能指标, 小型化、智能化、多功能化、高密度装载成为内埋武器的发展方向, 在内埋武器系统设计中可采用“设计-使用-再设计”螺旋式研制技术, 以实现内埋武器系统综合功能要求^[43]。

3 关键气动问题主要特征

先进战斗机内埋武器舱流场是复杂流动的典型代表之一, 主要存在三个典型特征: 一是强耦合。多尺度旋涡结构、复杂波系相互干扰、剪切层不稳定是武器舱空腔高速流动的典型特征, 是诱发强烈噪声的根本原因。流场和声场之间的强耦合作用于武器舱结构, 导致武器舱出现声振耦合现象。二是预测难。高速条件下武器舱内流动呈现非定常, 诱发的武器舱噪声和结构振动也呈现非定常、非线性, 导致武器舱流动/振动/噪声特性预测方法难建立。三是控制难。实现武器舱流动/振动/噪声同时控制, 必须厘清武器舱复杂流动/振动/噪声产生机理, 才能建立有效的控制措施; 但武器舱振动与噪声产生机理复杂, 流声/声振耦合作用强, 这导致难以同时实现武器舱流控-减振-降噪的控制, 如图 5 所示。

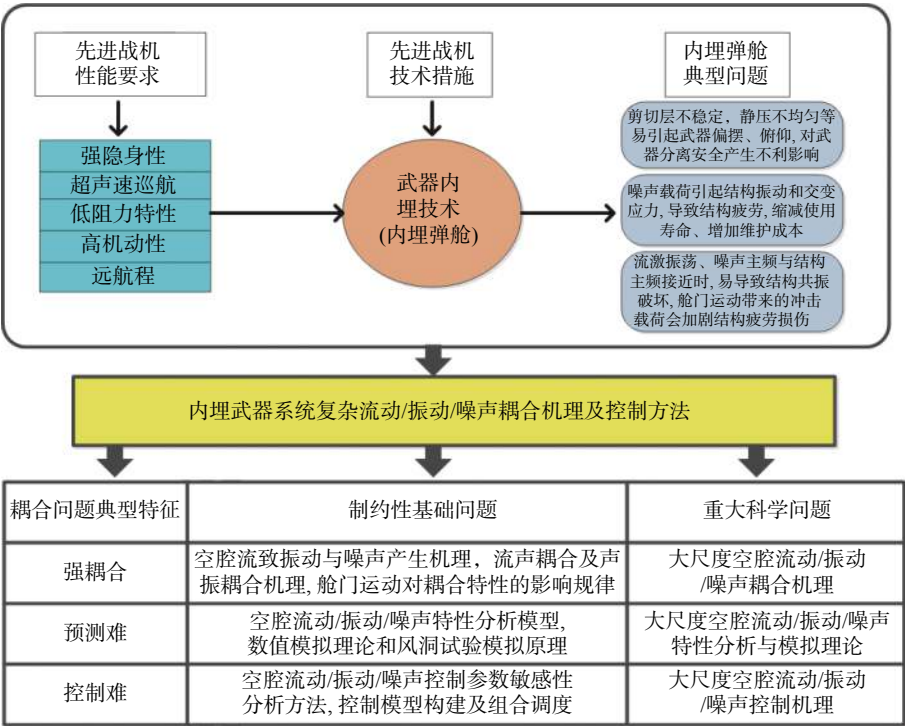


图 5 内埋武器系统关键气动问题
Fig. 5 Key aerodynamic problems of internal weapons system

面临的主要问题如下:

1) 内埋武器系统复杂流动问题。高速气流流经不同形式的武器舱时, 可能会形成完全不同的流动方式。一般而言, 武器舱流动可以分为“开式流动”、“过渡式流动”和“闭式流动”三种典型流动状态。对于“开式流动”, 气流将直接跨过武器舱向后流动, 舱内静压梯度较小, 此时武器舱对周围流场干扰较小。从内埋武器气动力特性方面考虑, 该类武器

舱流场较适合内埋武器分离, 且对全机气动力特性影响较小。而对于“闭式流动”, 气流将在武器舱前缘发生分离, 在舱底前段再附, 之后在武器舱后壁附近再次分离, 舱内压力梯度较大。武器从该类武器舱流场分离时往往会产生较大的抬头力矩, 不利于武器安全分离; 另外, 该类武器舱流场还将使全机阻力大大增加, 并可能影响飞机的操纵性和稳定性。“过渡式流动”则介于“开式流动”与“闭式流动”两者之

间。工程上,除了气动特性因素之外,武器舱设计还需综合考虑总体、结构、武器类型、发射方式等要求,故不同作战任务的飞机武器舱可能对应不同的流动类型。

围绕这一问题的研究集中于两个方面:一是关于武器舱复杂流动影响因素和演化机理等的研究;二是探寻降低舱内压力梯度的主/被动流动控制措施,改善舱内流动。

2)内埋武器系统振动与噪声问题。内埋武器舱流场结构异常复杂,流动呈高度的非平稳随机性,伴随一系列的波/涡/剪切层相互干扰和耦合,诱发武器舱内部及周围产生强烈的气动噪声。然而,“开式流动”、“过渡式流动”和“闭式流动”三种流动类型的武器舱内的振动与噪声量级一般差别较小,但频率特性不同。“开式流动”武器舱内存在严重的流激振荡声模态,声腔耦合放大导致舱内出现多个声压峰值激振频率,且容易引起局部结构强烈振动,更容易发生共振;“过渡式流动”武器舱内同样也存在流激振荡声模态,但声模态往往阶数较少;“闭式流动”武器舱内几乎没有流激振荡声模态,但因其舱深度很浅,一般的武器舱不采用此种结构形式。武器舱高速复杂流动和结构振动产生的、作用于结构表面的脉动压力载荷,可引起武器舱及内埋武器系统的结构振动,导致结构疲劳,影响使用寿命。腔内高强噪声还会引起电控系统工作失灵失效。刺耳的“啸叫”声会影响飞行员工作。武器舱壁板受到气流撞击和噪声载荷作用时,在满足一定的空气动力学与结构动力学条件下,出现的腔壁结构振动,不仅引起交变应力,而且对机载电子仪器仪表的正常工作也会产生不利影响。当气动激励频率、噪声频率接近舱壁结构固有频率时,易发生共振,导致舱壁结构破坏、武器机械零件松动、控制管线通路故障,甚至造成武器系统损坏。美国在研制内埋武器舱的过程中,高强振动与噪声曾造成F-111武器失效、B-1舱门结构损坏,以及多种飞机电气系统损坏等严重问题。

围绕武器舱振动与噪声问题方面的研究集中于两方面:一是关于武器舱振动与噪声产生及演变机理的研究。这类研究主要分析各种参数对武器舱气动噪声的影响规律,探索声学回路形成机制及发声机理,发展武器舱振动与噪声测试技术。二是武器舱振动与噪声抑制方法研究。这类研究会采用主/被动流动控制方法破坏武器舱噪声回路,抑制武器舱流场诱发的强振动与噪声,改善动力学环境。

3)舱门运动与武器舱流场耦合问题。舱门是内埋武器舱系统的重要组成部分。在内埋武器发射时,

舱门需快速开启;当内埋武器发射完成后,舱门需快速关闭。舱门快速运动可能加剧武器舱流场的非定常效应,从而使武器舱流场更加复杂。而处于复杂流场且快速运动的舱门,其本身的气动特性也是须重点研究的内容。武器舱所引发的复杂流动可能导致内埋武器舱门系统出现故障,造成舱门打不开或关不上。另外,在非定常气动力作用下,武器舱舱门可能出现流致振动、抖振等现象,影响飞机操纵和飞行品质,并可能引发结构疲劳和损伤,甚至会出现舱门破裂、危及飞行安全的严重问题。而在气动力、惯性力和结构弹性共同作用下,武器舱舱门甚至可能出现颤振,产生结构破坏,造成飞行事故。

因此,开展舱门运动与武器舱流场耦合问题研究十分必要,获取相关动态数据对内埋武器舱载荷准确估算、结构设计与优化等都具有重要意义。

4)内埋武器分离安全问题。受武器舱空间结构限制,内埋武器涉及到的机/弹分离相容性环节较多,加之内埋武器舱流场流动特性较为复杂,因此,内埋武器分离安全性难以通过经验公式或数值模拟进行准确评估。舱内强涡流可引起武器舱内压力急剧变化,从而导致内埋武器分离过程中产生抬头、翘尾、横向滚动等不稳定状态,甚至碰撞舱壁或舱门,危及武器安全分离和载机飞行安全(见图6)^[43]。内埋武器机/弹分离相容性研究的主要任务是分析内埋武器与载机是否能安全分离,并确保武器的安全分离姿态。导弹需在舱门打开后的极短时间内从武器舱绕流中穿过,并在离开机身一定距离后获得一个良好的姿态,适时点火、发射,提高命中目标的概率。

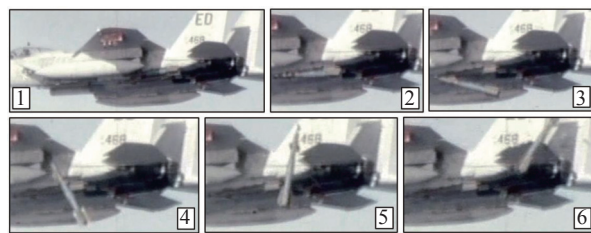


图6 F-15投放GBU-12碰撞事故^[43]

Fig. 6 Collision accident of F-15 during the launch of GBU-12

对该类问题的研究可分为两个方面:一是获取不同流场参数、不同武器舱几何参数下,内埋武器分离过程中的气动力特性,评估其分离安全性,为内埋武器舱/武器气动外形优化设计提供技术支撑;二是流动控制方法研究。探索安全可靠且工程实用的流动控制措施,改善内埋武器分离过程中的气动特性,减少影响内埋武器安全分离的不利因素,确保武器/载机分离安全。

4 内埋武器系统地面综合验证

内埋武器系统地面综合验证和考核是完成内埋武器系统研制的必经阶段,就是通过地面的测试系统和试验环境检验内埋武器系统的功能实现性、结构完整性。主要有以下几种方式:

- 1) 悬挂系统的地面弹射试验;
- 2) 武器系统的地面坑投试验;
- 3) 结构系统的地面振动(GVT)试验;
- 4) 武器系统的大型吹袭试验;
- 5) 武器系统的风洞验证试验;
- 6) 武器系统的火箭撬试验(见图7)。



图7 火箭撬滑车地面试验

Fig. 7 Groud test of rocket sled

国内外开展战斗机内埋武器系统地面综合验证都是采用多种试验手段相结合的研究方式。大型吹袭试验的试验条件和参数范围较窄,一般的吹袭马赫数很难达到超声速,且由于流场模拟能力较差,武器舱流动、振动、噪声测量数据偏差较大。火箭滑车试验在地面滑轨上进行,试验成本高、准备周期长、干扰因素多,且由于地面气流密度大、载荷大,受武器舱结构载荷限制,试验速度一般很难达到要求的状态。相比较而言,风洞试验条件可控、参数测量精确、试验安排灵活,更适宜开展弹舱流动、振动、噪声问题研究。只是受风洞尺寸限制,一般采用缩比模型进行内埋武器系统气动问题研究,开展武器舱流动特性、噪声和振动载荷测量试验,完成武器分离轨迹验证等。然后,采用全尺寸武器舱模型风洞试验进行武器系统、挂架系统、作动系统等的稳定性和可靠性的考核验证,并完成缩比模型风洞试验结果的修正。

5 技术进步需求和研究重点

5.1 内埋武器系统发展需求

武器内埋仍将是未来先进隐身战机的必选形式,

其主要发展方向是:

1) 高马赫数内埋武器舱设计需求。未来马赫数2.0以上的武器内埋技术比较缺乏关键气动问题的研究。

2) 高密度武器内埋挂装需求。充分利用武器舱空间,增大武器挂载量将成为未来战斗机取得作战优势的需求之一。

3) 新型内埋武器舱结构布局需求。当前的开式流动武器舱依旧存在系统复杂、作战场景不足等问题,未来将开展新型武器舱结构布局研究,创新内埋武器舱设计理念。

4) 多种类武器装载需求。针对不同作战使用环境和作战需求,发展多种类型的武器装载方式。如导弹内埋、多层挂装、直接力发射、前后双武器舱、倾斜武器舱。

5) 武器智能发射和精确控制需求。争取战争主动权,提高生存力和战斗力,就要实现武器全向发射和精准打击。

5.2 主要气动问题研究重点

未来的内埋武器系统具有构型尺度大、武器密集装载发射、力学载荷特征复杂、约束条件严苛等特点,要求具备内埋武器安全投放分离、结构轻质安全设计、战场环境适应能力强、疲劳寿命要求高、电控系统工作正常等能力。因此,存在的关键气动问题主要有:

1) 复杂运动边界耦合影响的内埋武器系统多场载荷预测模型与仿真技术;

2) 多参数非定常过程内埋武器系统多场载荷试验原理与模拟技术;

3) 主/被动组合调度的内埋武器系统多场载荷自适应控制理论和建模方法;

4) 内埋武器系统结构声振响应规律与抗声振疲劳设计方法;

5) 内埋武器系统密集装载、安全投放与结构系统降载评估技术;

6) 基于机器学习的内埋武器系统数据融合与智能优化设计;

7) 内埋武器系统功能实现性和结构安全性系统集成演示验证。

参 考 文 献:

- [1] SPALART P, ALLMARAS S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[C]//30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV. Reston, Virginia: AIAA, 1992: 439.
doi: 10.2514/6.1992
- [2] KRISHNAMURTY K. Acoustic radiation from two-dimensional

- rectangular cutouts in aerodynamic surfaces[J]. NACA Technical Note, 1955(3457).
- [3] PLENTOVICH E B, CHU J, TRACY M B. Effects of yaw angle and Reynolds number on rectangular-box cavities at subsonic and transonic speeds[R]. NASA TP-3099, 1991.
- [4] TRACY M B, PLENTOVICH E B, CHU J. Measurements of fluctuating pressure in a rectangular cavity in transonic flow at high Reynolds numbers[R]. NASA-TM 4363, 1992.
- [5] TRACY M B, PLENTOVICH E. Characterization of cavity flow fields using pressure data obtained in the Langley 0.3-Meter Transonic Cryogenic Tunnel[R]. NASA-TM 4436, 1993.
- [6] CROSBY W. Flow field investigations of a simulated weapons cavity at Mach 3[R]. AEDC TSR-81-V37, 1981.
- [7] BAUER R, DIX R. Engineering model of unsteady flow in a cavity[R]. AEDC TR-91-17, 1991.
- [8] SUHS N. Transonic flow calculations for a cavity with and without a store[R]. AEDC TR-92-4, 1992.
- [9] DIX R E, BAUER R C. Experimental and theoretical study of cavity acoustics[R]. AEDC TR-99-4, 2000.
- [10] CATALANO G. Turbulent flow over an embedded, rectangular cavity[C]//19th AIAA, Fluid Dynamics, Plasma Dynamics, and Lasers Conference, Honolulu, HI, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1987. doi: 10.2514/6.1987-1298
- [11] DIX R E, BUTLER C. Cavity aeroacoustics[J]. Cavity Aeroacoustics, 1990.
- [12] HELLER H H, HOLMES D G, COVERT E E. Flow-induced pressure oscillations in shallow cavities[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1971, 18(4): 545-553. doi: 10.1016/0022-460X(71)90105-2
- [13] HELLER H H, BLISS D B. Aerodynamically induced pressure oscillations in cavities: physical mechanisms and suppression concepts[R]. AFFDL TR-74-133, 1975.
- [14] CLARK R L. Weapons bay turbulence reduction techniques[R]. Defense Technical Information Center, 1975. doi: 10.21236/ada334771
- [15] CLARK R L. Evaluation of F-111 weapon bay aero-acoustic and weapon separation improvement techniques[R]. AFFDL TR-79-3003, 1979.
- [16] ORKWIS P D, DISIMILE P J. Transient shear layer dynamics of two- and three- dimensional open cavities[R]. AFOSR TR-95-0505, 1995.
- [17] VAKILI A, WOLFE R, NAGLE P. An experimental investigation of cavity aeroacoustics in high speed flows[R]. AFOSR TR-95-0510, 1995.
- [18] ZOCCOLA P J, FARABEE T M. An experimental investigation of flow-induced cavity resonance[C]//Proceedings of ASME 2001 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, New York, USA. 2021: 9-22. doi: 10.1115/IMECE2001/NCA-23501
- [19] ROSS J. High speed acoustic measurements in cavities[R]. defense technical information center, 2001. doi: 10.21236/ada387519
- [20] BARTEL H W, MCAVOY J M. Cavity oscillation in cruise missile carrier aircraft[R]. AFWAL TR-81-3036, 1981.
- [21] KAUFMAN L G II, MACIULAITIS A, CLARK R L. Mach 0.6 to 3.0 flows over rectangular cavities[R]. AFWAL TR-82-3112, 1983.
- [22] SHAW L. Supersonic flow induced cavity acoustics[R]. AFWAL TM-85-210, 1986.
- [23] MORTON M. Certification of the F-22 advanced tactical fighter for high cycle and sonic fatigue[C]//Proc of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii. Reston, Virginia: AIAA, 2007: 1766. doi: 10.2514/6.2007-1766
- [24] 侯中喜, 夏刚, 秦子增. 三维超声速开式空腔振荡特性研究[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(6): 1-4.
HOU Z X, XIA G, QIN Z Z. The numerical analysis of oscillatory characteristics in 3D supersonic open cavity[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2004, 26(6): 1-4 (in Chinese).
- [25] 侯中喜, 易仕和, 王承尧. 超声速开式空腔流动的数值模拟[J]. 推进技术, 2001, 22(5): 400-403.
HOU Z X, YI S H, WANG C Y. Numerical analysis of supersonic open cavity[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(5): 400-403 (in Chinese).
- [26] 陈伟芳, 尹乐, 吴雄, 等. 开式空腔流动的蒙特卡罗直接模拟[J]. 力学季刊, 2003, 24(3): 341-345.
CHEN W F, YIN L, WU X, et al. Flow simulation in open cavity by direct simulation Monte-Carlo method[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2003, 24(3): 341-345 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.0254-0053.2003.03.009
- [27] 刘俊, 杨党国, 王显圣, 等. 端流边界层厚度对三维空腔流动的影响[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 475-483.
LIU J, YANG D G, WANG X S, et al. Effect of turbulent boundary layer thickness on a three-dimensional cavity flow[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(2): 475-483 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2015.0112
- [28] 杨党国, 李建强, 罗新福, 等. 弹穴流动特性高速风洞试验研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(4): 33-39.
YANG D G, LI J Q, LUO X F, et al. Investigation on flowing characteristics of the internal weapon cavity in wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2006, 20(4): 33-39 (in Chinese).
- [29] 杨党国, 范召林, 李建强, 等. 弹舱流动特性数值模拟及风洞试验研究[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(3): 378-383.
YANG D G, FAN Z L, LI J Q, et al. Studies on flow characteristics of cavity by numerical simulation and wind tunnel test[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2009, 27(3): 378-383 (in Chinese).
- [30] 肖虹, 高超, 党云卿. 飞行器腹部空腔绕流的数值模拟[J]. 航空计算技术, 2007, 37(4): 44-46.
XIAO H, GAO C, DANG Y Q. Numerical simulation of aircraft's belly cavity flow[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2007, 37(4): 44-46 (in Chinese).
- [31] 马明生, 张培红, 邓有奇, 等. 超声速空腔流动数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(3): 388-393.
MA M S, ZHANG P H, DENG Y Q, et al. Numerical simulation investigation of supersonic cavity flow[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2008, 26(3): 388-393 (in Chinese).
- [32] 李晓东, 刘靖东, 高军辉. 空腔流激振荡发声的数值模拟研究[J]. 力学学报, 2006, 38(5): 599-604.
LI X D, LIU J D, GAO J H. Numerical simulation of flow-induced oscillation and sound generation in a cavity[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(5): 599-604 (in Chinese).
- [33] 赖焕新, 周邵萍, 罗开红. 空腔的非定常可压缩过流及相关气动声学问题[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(5): 755-758.
LAI H X, ZHOU S P, LUO K H. Three-dimensional unsteady compressible flow over an open cavity and relevant aeroacoustics[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(5): 755-758 (in Chinese).
- [34] 杨党国, 刘俊, 王显圣, 等. 典型构型空腔模型设计与流动/噪声特性研究[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(3): 432-439, 448.
YANG D G, LIU J, WANG X S, et al. Analysis of design method and aeroacoustics characteristics inside typical cavity[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(3): 432-439, 448 (in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0201

- [35] 万振华, 周林, 孙德军. 方腔流致振荡及噪声的数值研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(3): 291–298.
WAN Z H, ZHOU L, SUN D J. Numerical investigation of flow-induced oscillations and noise from a rectangular cavity[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(3): 291–298 (in Chinese).
- [36] 杨党国, 李建强, 梁锦敏. 基于CFD和气动声学理论的空腔自激振荡发声机理[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(6): 724–730.
YANG D G, LI J Q, LIANG J M. Sound generation induced by self-sustained oscillations inside cavities based on CFD and aeroacoustic theory[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, 28(6): 724–730 (in Chinese).
- [37] 杨党国, 范召林, 李建强, 等. 超声速空腔流激振荡与声学特性研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(7): 1567–1572.
YANG D G, FAN Z L, LI J Q, et al. Cavity flow oscillations and aeroacoustic characteristics at supersonic speeds[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(7): 1567–1572 (in Chinese).
- [38] 杨党国, 李建强, 蒋卫民, 等. 不同马赫数下长深比对空腔声学特性的影响[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 221–225, 237.
YANG D G, LI J Q, JIANG W M, et al. Investigations on aeroacoustic characteristics inside cavities influenced by length-depth ratios at different Mach numbers[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(12): 221–225, 237 (in Chinese).
- [39] 张强. 流动诱导空腔振荡频率方程的改进[J]. 振动工程学报, 2004, 17(1): 53–57.
ZHANG Q. Development of the frequency equation used for prediction of fluid induced pressure oscillation in cavities[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2004, 17(1): 53–57 (in Chinese).
- [40] 杨党国, 祝静, 李建强, 等. 跨超声速开式空腔流激振荡模式预估分析[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(3): 369–375.
YANG D G, ZHU J, LI J Q, et al. Prediction and analysis of flow oscillation modes inside open cavities at transonic or supersonic speeds[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2014, 32(3): 369–375 (in Chinese).
doi: [10.7638/kqdlxxb-2012.0126](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2012.0126)
- [41] LUO K Y, ZHU W Q, XIAO Z X, et al. Investigation of spectral characteristics by passive control methods past a supersonic cavity[J]. *AIAA Journal*, 2018, 56(7): 2669–2686.
doi: [10.2514/1.j056689](https://doi.org/10.2514/1.j056689)
- [42] WANG X S, YANG D G, LIU J, et al. Control of pressure oscillations induced by supersonic cavity flow[J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(5): 2070–2077.
doi: [10.2514/1.j059014](https://doi.org/10.2514/1.j059014)
- [43] 张勇. 国外四代机内埋武器发展现状及启示分析[J]. 战术导弹技术, 2020(1): 22–32.
ZHANG Y. Development and enlightenment for foreign internal weapons of the 4th generation fighters[J]. *Tactical Missile Technology*, 2020(1): 22–32 (in Chinese).

(本文责编: 周奇杰 英文编审: 董思卫)