

文章编号: 1674-8190(2024)01-015-08

螺旋桨发动机安装系统动力学设计技术综述

陈永辉, 陈春兰, 燕群, 徐健, 董万元, 王建强

(中国飞机强度研究所 航空噪声与动强度航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: 随着螺旋桨发动机安装系统国产化研制进程的加快, 需要开展相关的安装系统技术研究, 而动力学设计是其中的重要组成部分。本文对比分析了不同结构形式安装系统的动态性能特点, 进一步从军民用标准规范和工程实践经验出发, 归纳了安装系统动力学设计的技术要求, 梳理了安装系统动力学设计技术的发展历程和国内外现状, 指出国内外差距主要体现在设计理念、关键技术和应用实践经验等方面。在此基础上, 展望了螺旋桨发动机安装系统动力学设计技术的发展趋势, 为当前及未来螺旋桨发动机安装系统的设计技术研究提供了参考。

关键词: 航空发动机; 安装系统; 动力学; 螺旋颤振; 设计技术

中图分类号: V232.7; V228.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.01.02

Review on dynamics design techniques of propeller engine installation system

CHEN Yonghui, CHEN Chunlan, YAN Qun, XU Jian,

DONG Wanyuan, WANG Jianqiang

(Key Laboratory of Aeronautical Noise and Dynamic Strength, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the acceleration of propeller engine installation system's localization, the relevant technical research of installation system must be carried out, in which the dynamics design is one of the important parts. The dynamic performance characteristics of installation systems with different structures are firstly compared and analyzed. The technical requirements of the installation system dynamics design are summarized proceeding from the military and civilian standards and engineering practice experience. The development history and current situation at home and abroad of the installation system dynamics design techniques are reviewed. It is pointed out that the gap between home and abroad is mainly reflected in the design concept, key technology and practical experience of application. On this basis, the development trend of the dynamics design techniques of the propeller engine installation system is prospected in this paper and the reference for current and future research on the design techniques of propeller engine installation system is provided.

Key words: aero-engine; installation system; dynamics; whirl flutter; design technique

收稿日期: 2022-10-14; 修回日期: 2023-02-02

基金项目: 工信部专项项目(WDZC-2021-05)

通信作者: 陈永辉(1985-), 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: 378474195@qq.com

引用格式: 陈永辉, 陈春兰, 燕群, 等. 螺旋桨发动机安装系统动力学设计技术综述[J]. 航空工程进展, 2024, 15(1): 15-22.

CHEN Yonghui, CHEN Chunlan, YAN Qun, et al. Review on dynamics design techniques of propeller engine installation system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(1): 15-22. (in Chinese)

0 引言

涡桨飞机在军用运输、舰载预警、支线民用飞机等领域得到了广泛应用,但发动机和螺旋桨引起的过大振动与噪声,会导致乘员疲劳和设备过早失效,是涡桨飞机关注的重要性能指标之一。采用减隔振方式对发动机进行安装,是阻断发动机振动向飞机传递的主要手段之一。国内多型新研飞机均提出了发动机减振安装的需求。

国外从 20 世纪 30 年代已针对活塞螺旋桨发动机开展了减振安装设计。随着航空工业的不断发展,对涡轮螺旋桨发动机、涡扇发动机,乃至开式转子、背撑式等新型发动机的安装系统的研究越来越多^[1],波音、空客、斯奈克玛等主机厂商以及 Lord、Barry Controls 等减振降噪产品供应商是其中的主力军。国内在 20 世纪 90 年代也针对型号开展了安装系统设计,由于受到安装架结构形式等诸多条件的限制,针对单个减振器开展的研制工作较多,而对于空间多点隔振系统表现出的整体动力学特性考虑不足,特别是缺少额外附加抗扭装置的新型隔振系统的动力学设计技术研究。

基于上述背景需求和存在的技术问题,本文系统地梳理了发动机安装系统设计的发展历程,包括安装系统的结构形式及特点、动力学设计技术要求、主要设计方法等方面,并展望了相关技术的发展趋势。

1 安装系统主要结构形式及特点

根据发动机支撑要求的不同,螺旋桨类发动机安装系统的结构形式多样^[2],从安装面数量上看,有单平面安装、双平面安装和多平面安装。单平面安装的减振器在同一平面内,主要用于活塞式螺旋桨和小型涡桨式等重量较轻的飞机发动机,减振器轴线可以交汇于安装面内,如图 1 所示。

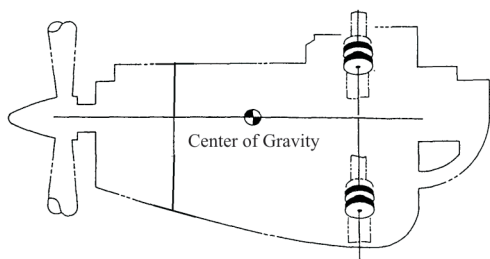


图 1 单安装面直列式安装形式^[3]
Fig. 1 Single installation surface in-line arrangement^[3]

减振器轴线也可以交汇于发动机重心处,常见于大部分活塞式螺旋桨发动机,汇聚式安装形式如图 2 所示。

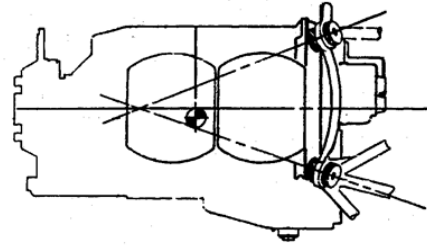


图 2 单安装面汇聚式安装形式^[3]
Fig. 2 Single installation surface convergent type^[3]

双平面和三平面则主要用于中、大型螺旋桨飞机发动机,这种形式较为复杂,欧美国家和地区普遍采用对称五点式安装形式,如图 3 所示。

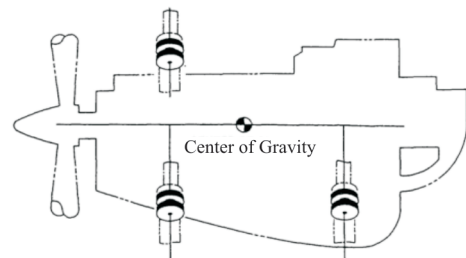


图 3 对称五点式安装形式^[3]
Fig. 3 Symmetrical five point installation^[3]

某型飞机则主要采用对称四点式安装形式,如图 4 所示。

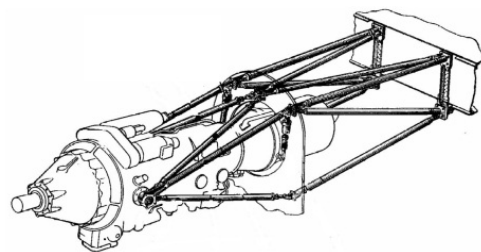


图 4 对称四点式安装形式^[1]
Fig. 4 symmetrical four point installation^[1]

上述安装形式均能有效支撑发动机运行,但在设计难度、安装效果、更换难度、经济成本等方面各有优劣,本文主要关注动态性能的区别。考虑到应用对象的推力级别不同,因此将单平面安装形式 1(如图 1 所示)和 2(如图 2 所示)进行对比,双平面安装形式 3(如图 3 所示)和 4(如图 4 所示)进行对比,简要总结如表 1 所示。

表 1 不同安装结构的动态性能特点
Table 1 Dynamic performance characteristics
different engine mount

编号	安装结构形式	动态性能特点
1	单平面直列式	各向振动难以解耦; 俯仰和偏航方向约束较弱, 颤振裕度相对小
2	单平面汇聚式	发动机振动解耦较好; 俯仰和偏航方向约束较强, 颤振裕度相对大
3	双平面五点式	常配合扭矩补偿器使用, 隔振器无需承担大扭矩, 较高的柔性使得隔振效果好; 振动耐久性容易保证
4	双平面四点式	隔振器需承担大扭矩, 柔性较低, 隔振效果不易提升; 达到高振动耐久性相对困难

2 安装系统动力学设计技术要求

设计指标与技术要求是安装系统设计的依据, 必须予以明确。安装系统作为连接飞机与发动机的承力结构, 必须满足军、民用飞机和发动机的相关要求, 因此, 本文对相关标准规范进行梳理。军用飞机和发动机相关标准主要参考《军用飞机强度与刚度规范》3.2.5条规定: 对螺旋桨飞机, 应采用减振支持系统把动力装置安装在机体结构上^[4];《航空发动机结构完整性指南》要求: 发动机安装节应有足够的强度, 以满足所有的飞行和地面包线状态的承载要求^[5];《航空涡轮螺旋桨和涡轴发动机通用规范》规定: 装有发动机的安装系统, 由转子残余不平衡量激起的所有有害振型的固有频率不应高于慢车转速的 80%^[6]。民用飞机和发动机相关标准主要参考《航空发动机适航规定》第 33.63 条要求: 发动机不应导致将过大的振动传给航空器结构^[7]。

另外, 相关单位也制定了行业标准规范, 例如, 航空工业第一飞机设计研究院牵头制定的《飞机动力装置隔振器设计和安装技术要求》规定: 发动机安装系统的固有频率应小于额定功率上螺旋桨转速的 70%^[8]。

柔性隔振可能导致的螺旋颤振问题同样需要考虑。1965 年, 美国联邦航空管理局 (FAA) 颁布的民用飞机适航条例首次规定螺旋桨飞机应进行

螺旋颤振分析, 还需确保在发动机安装系统存在任何破损时无颤振发生^[9]; 随后, 修正案 23-18、25-40 首先引入“旋转模态”这一名词来概括转动部件的弹性、惯性和气动力产生的动态综合效应, 指出安装螺旋桨或风扇发动机的飞机可能产生的螺旋颤振现象^[10-11]; 1984 年, 修正案 23-31 生效, 修订了单引擎、涡轮螺旋桨发动机飞机的适航标准, 把螺旋颤振分析扩展到单发涡轮螺旋桨飞机的动力装置安装^[12]。

飞机与发动机主机厂所对发动机安装系统也提出了更具体的要求。例如, 基于发动机自身变形的考虑, 要求涡桨发动机变速箱机匣所在的安装面应承担一定比例以上的发动机扭矩; 基于发动机附件变形的考虑, 要求发动机工作位移不超过某个限值等。

从上述要求可以看出, 减振是安装系统的一个重要功能, 同时安装系统设计还需要考虑变形、强度、颤振稳定性等要求, 而各项要求在一定程度上可能会发生冲突, 型号设计中需要进行合理取舍, 才能获得综合性能优异的安装系统。

3 安装系统动力学设计技术发展历程

3.1 国外技术发展历程

结构动力学和螺旋颤振是安装系统动力学设计的两个重要方面, 二者共同对安装系统的减振元件提出刚度和阻尼约束, 一直以来处于分别独立开展研究的状态。这一研究领域最早可查的文献可以追溯至 1938 年, Taylor^[13]指出发动机振动对机体疲劳的危害, 并首次以活塞螺旋桨发动机安装系统为研究对象, 提出采用柔性隔振的解决方案, 指出当发动机重心位于安装面之后时, 即采用汇聚式安装方式, 旋转和平动振动可以获得解耦, 更有利于开展隔振设计。同时, 该文献描述了螺旋桨飞机螺旋颤振不稳定的可能性。

之后较长一段时间内, 发动机安装系统的动力学设计没有更新的研究文献。直到 20 世纪 60 年代, 两架涡桨发动机飞机由于螺旋颤振失事, 螺旋颤振问题才开始受到重视。

国外经过多年研究, 得到了以下结论: 失稳边

界随着发动机安装刚度、阻尼、载油量的下降而降低,提高螺旋桨转子的转速一般可使系统的失稳边界下降^[14]。Kunz^[15]进一步总结了螺旋颤振的影响因素,使用准定常气动力学分析方法,证明了颤振对稳定性的影响,但与专门研究螺旋桨、支撑转子、直升机转子不同,其对三种结构进行了统一处理,结果同样表明,转子安装点支承刚度的下降会导致稳态边界降低;Čečrdle^[16]提出了基于全机动力学模型进行螺旋颤振分析的必要性,充分地考虑了特殊的对称和反对称的发动机振动模态。另外,若干基于有限元的综合分析方法也应用于螺旋颤振非稳态问题的精确分析上。例如,气动、动力学和性能的综合分析软件CAMRAD II、旋翼试验数据和直升机分析软件UMARC、DYMORE,这些都是先进的用于分析旋翼飞机性能、稳定性和载荷的综合分析方法。

关于发动机安装系统的结构动力学设计方面的研究,直到20世纪80年代才又重新开展,首先着手研究前期未考虑的柔性边界问题。Phillips^[17]扩展了柔性基础上进行隔振安装的研究,研究结果表明,基础柔性的影响随着发动机重心与安装面距离的增加而变大,并给出了量化的公式;Ashrafiuon^[18]利用解析法在柔性基础上建立了发动机隔振安装后的响应计算模型,计算结果表明基础柔性对于发动机振动和发动机向基础的振动力传递具有较大的影响,但基础柔性为可进行解析计算的板结构,数学推导复杂。

多自由度空间系统减振效果的评价也开始研究,主要原因在于现行适航条例和结构完整性大纲中,只对飞机舱内振动和噪声作出要求,并未分解到安装系统这一中间环节,导致工程设计中难以对其作出明确规定。Lord公司的Swanson^[19]提出了一种预测多点连接被动隔振系统的性能预测方法,采用发动机、隔振器、结构的频响函数构建隔振效率矩阵,并指出当减振器阻抗矩阵的最大特征值远小于发动机和基础结构的最小特征值时,隔振系统是有效的。由于避免了采用模态分析等系统识别技术,该方法在评估模态密集和高阻尼系统的隔振效率上有显著优势,但未能给出定量的评估参数(如图5所示)。

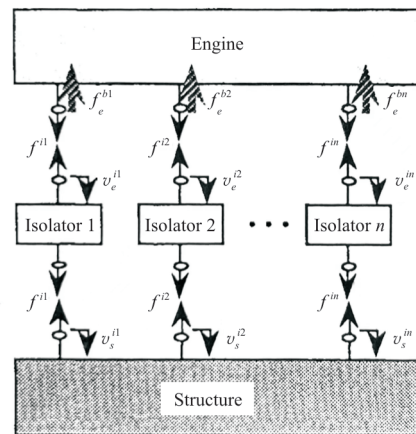


图5 多自由度隔振系统^[19]

Fig. 5 Multidimensional isolated mounting system^[19]

20世纪90年代,优化设计的手段在隔振设计中获得应用。Ashrafiuon^[20]将发动机简化为六自由度刚体,建立弹簧阻尼安装系统模型,研究了单安装面四点汇聚式安装系统的动态响应计算方法,进一步研究了该类型安装系统隔振效率优化设计方法。先进的计算仿真工具也逐步引入,Swanson^[21]基于刚体发动机模型和弹簧阻尼连接假设,建立其动力学方程并设计了计算机程序(Sixopt)进行求解,针对涡桨发动机最佳连接刚度与各安装系统零件的姿态进行优化,得到最佳传力与隔振效果,证明了计算机优化技术在航空器安装系统设计上具有的优越性;Snyman^[22]以发动机不平衡量和相位差为设计变量,以发动机挂点的位移量最小为目标函数,开发了一套动态优化算法LFOPIB,达到了优化目标。

随着关键技术点的研究和突破,综合设计的思想逐步贯彻到工程使用中,发动机安装系统需要集承载、隔振、抗扭等多种功能于一体,从工程应用角度,安装系统设计时不应仅考虑隔振这一项指标,但公开发表的文献则出现较晚。最早可见于1983年,加拿大哈维兰飞机公司的Hrycko^[23]首次提出发动机安装系统设计中必须统筹考虑强度和刚度要求、颤振稳定性、一阶振动传递率、瞬态着陆载荷最小化等要求,定性分析了DASH7通用飞机的双安装面三点式安装系统的设计流程,并论述了双安装面相对于单安装面的优缺点;2002年,加拿大滑铁卢大学的Rabih^[24]系统地阐述了安装系统设计中的理论问题,包括安装系统的数学建模与稳定性分析、隔振分析与优化方法、安

装系统非线性刚度的影响、主动减振等,二自由度计算模型如图 6 所示。

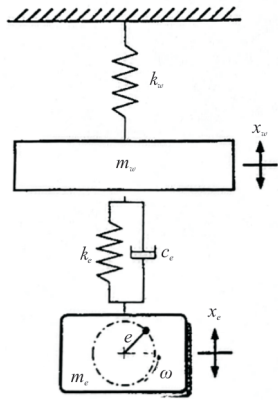


图 6 涡桨发动机安装的二自由度计算模型^[24]

Fig. 6 Linear 2 DOF model representation of turboprop mounted to a wing^[24]

3.2 国内技术发展历程

国内开展发动机减振安装的相关研究工作主要集中在科研院所,沈阳飞机设计研究所的施荣明^[25]叙述了某型飞机发动机安装结构动力学设计的背景、关键技术以及取得的进展和结论等;邓吉宏等^[26]以某型发动机安装结构为对象,计算了发动机支撑杆系刚度和质量对机身结构的减振效果的影响,为发动机支撑杆系的减振设计提供了依据;李春刚^[27]对某型飞机发动机安装架进行了重新设计,并采用有限元方法计算了不同载荷条件下安装架的性能。中国飞机强度研究所承揽了航空航天工程部和 ANDF 系统工程渠道支持的《航空发动机隔振安装研究》项目,系统调研了波音 707、737-300、737-400、MD-82 等飞机和 CFM56、V2500 等发动机的安装方式以及 Barry Controls 公司的产品,提出以金属弹簧+钢丝网的隔振器形式为目标开展隔振器的研制。在此项目基础上,21 世纪初开展了成果转化,为运-8 系列飞机开发了金属丝网减振器产品。其中,潘树祥^[28]概述了翼吊发动机隔振安装设计中需要考虑的因素、设计步骤以及金属丝网隔振器的设计和试验方法。

随着技术的发展,更多飞机倾向于使用欧美国家普遍采用的双平面五点式安装方式,安装系统采用橡胶减振器+扭矩补偿器的形式,在这一趋势下,国内学研究者开展了进一步的研究,研究范围如图 7 所示。

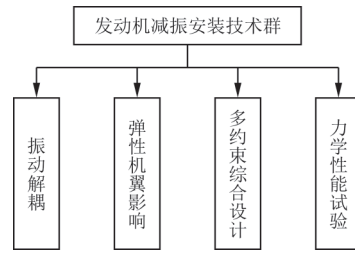


图 7 国内减振安装研究方向

Fig. 7 Domestic engine mounting research direction

2010 年,苏尔敦等^[29]首次对我国在发动机隔振安装技术研究中的进展进行了综述,描述了飞机发动机隔振安装设计的技术途径,对发动机隔振安装设计中应该考虑的载荷进行了分析,通过发动机隔振安装技术案例分析,介绍了发动机隔振安装技术的应用情况。基于上述研究,国内在该领域开展了一系列关键技术的突破。2018 年,陈永辉等^[30]研究了柔性基础下多自由度隔振系统的刚柔耦合建模方法,分析了柔性机翼对系统动态性能的影响,结果表明机翼与减振器刚度比对系统垂向模态和垂向振动耦合影响较大;2019 年,陈春兰等^[31]分析了机翼对双平面五点式安装系统设计的影响,结果表明机翼阻尼对高频共振响应影响较大,垂向刚度比大于 2 时,安装系统取得了良好的隔振效果;同年,陈春兰等^[32]利用 ADAMS/Insight 优化设计模块,实现了发动机安装系统侧向、偏航、俯仰等主要有害模态的振动解耦;陈永辉等^[33]借鉴汽车发动机减振设计中关于振型解耦的评价方式,首次综合考虑振动传递率、振动耦合、低频位移等因素开展了安装系统设计;王典等^[34]基于弹性中心理论与能量解耦原理,研究了六自由度振动的传递率,并针对某具体型号验证了其隔振效果;赵秀峰等^[35]指出发动机安装是飞机总体设计中必须考虑的重要因素,针对翼吊飞机的特点,研究了发动机安装位置对飞机特性的影响,并介绍了几种不同吊挂形式以及吊挂与机翼、吊挂与发动机连接形式的优缺点。为便于与试验进行对比,董万元等^[36]设计了一种全尺寸大功率涡桨发动机隔振系统,通过试验方法研究了不同激励对隔振系统隔振性能的影响;王建强等^[37]开展了试验平台设计及试验验证技术研究,在试验过程中联合施加发动机推力及振动载荷,成功完成了多自由度安装系统的隔振性能考核,为后续安装系统的台架试车提供了技术基础。

螺旋颤振研究方面,国内已有 20 多年的研究

历史,初步形成了涡桨发动机飞机防螺旋颤振的设计和分折手段。所采用的螺旋桨非定常气动力计算模型主要是二元准定常叶素理论,其中的气动导数除了采用理论计算值外,也有发动机制造厂家提供的数据,螺旋颤振所采用的物理模型以取发动机俯仰和偏航两个自由度的居多,也有考虑了机翼两个主要模态影响的计算模型^[38]。在与试验对比研究方面,顾家柳等^[39]发现轴头的角向刚度是影响螺旋桨转子开始失稳飞行门坎速度的首要因素,并设计了一种螺旋桨—转子风洞试验模型,计算结果与试验结果一致性较好;任兴民等^[40]介绍了螺旋桨转子系统颤振涡动的一种算法,考虑了桨叶的振动变形、桨轴—支承系统的振动特性以及螺旋桨转子的不平衡力,对螺旋桨转子系统颤振涡动的影响进行了分析,计算结果与风洞试验结果吻合较好;郑秋风^[41]通过理论和风洞试验研究了螺旋颤振特性,结果表明发动机连接刚度的增加会使系统的颤振稳定性更好;于仁业等^[42]针对Y12F飞机的螺旋颤振问题,建立了螺旋桨发房系统的杆板结构有限元模型并进行了试验修正,进一步计算了不同海拔高度和不同转速的螺旋颤振临界速度,与试飞结果符合性较好。

3.3 国内外差距分析

国内外安装系统差距主要体现在设计理念、关键技术和应用实践经验上,国内仍有提升空间。

首先,系统设计相较于元器件结构设计的观念形成较晚。发动机安装系统动力学设计是在保证静力特性情况下开展的工作,应在保证发动机安装系统承载、抗扭等基本功能完整的条件下,权衡隔振、位移、寿命等存在一定程度冲突的指标,国内直到20世纪末才开始这一系统设计的研究^[25]。

然后,关键技术尚未完全突破。基于飞机、安装系统、发动机或假件进行的一体化动力学建模,特别是附件扭矩补偿器之后的建模、力学传递特性和模态分析工作鲜有研究。螺旋颤振方面,建模和试验过程中采用转子轴头的动刚度来代替发动机安装系统和转子支承的刚度、阻尼等参数^[35],对安装系统设计的指导性不够直接。

最后,实践应用对于设计的指导和反馈不足。目前欧美国家和地区的商业公司产品遍及全球诸多飞机型号,重点转向采用新工艺、新材料、新构型的减振系统动力学问题;国内从20世纪90年代

依托军机研制的平台,开展了安装系统产品研制工作,在某型飞机普遍采用的四点式安装形式上具有丰富的经验,但在欧美国家和地区采用的五点式安装,特别是附加机械式或液压式扭矩补偿器之后的技术研究,仍处于跟随阶段,对于国外在应用实践中形成的设计准则、要求和方法,国内还没有足够的储备。

4 展 望

飞机振动与噪声控制技术发展至今,动力学建模、仿真与分析技术已开展过较多研究,但在面向新的研究目的和研究对象时,仍有较大的研究必要性,综合分析主要有以下三个发展趋势:

1) 舱内振动抑制的研究更加注重舒适性的要求。这方面目前仍未得到充分研究,安装系统动力学设计过程中,既要考虑隔离发动机产生的高频振动,还要考虑隔离人体较为敏感的低频振动,同时还要保证系统的螺旋颤振稳定性,多项约束导致系统频率的设计范围较小,针对此类系统的振动传递率曲线高效、高精度优化设计方法需要进一步研究。

2) 单一隔振方式向组合隔振方式发展。传统单一被动隔振方式不易兼顾共振放大倍数与高频隔振效率,采用隔振+吸振、隔振+陷波等组合抑振措施,利用弹性吸振器或液体陷波器抑制特定频率处的振动峰值,以达到飞机运行全工况良好的隔振状态,针对此类复杂液弹、压电—弹性阻尼系统的动力学分析和设计技术具有非常迫切的工程需求。

3) 动力学设计技术在新型减振系统中不断发展。智能减振结构、高阻尼合金减振器、减振器+框架一体化结构、高静低动结构已逐步展开研究。面向此类新结构,需要进一步开展机翼—框架—减振系统—发动机一体化建模与分析技术,关键技术点包括适用于着陆冲击分析的系统弹性模态数量选取方法、静动载荷联合施加与分析技术、新型减振器建模与仿真技术等。

5 结束语

本文结合国内外研究文献、军民机飞机和发动机相关规范以及航空类高校与主机厂所的研究经验,系统地梳理了国内外在涡桨发动机动力学

设计技术方面的研究历程,分析了国内外研究现状和差距,指出国内螺旋桨类发动机减振安装系统无论是设计水平、实践经验还是产品成熟度,还需开展体系性的研究工作。进一步阐述了安装系统综合设计思想的重要性,重点辨识了螺旋桨类发动机安装动力学设计的关键技术细节,为当前型号安装系统产品的国产化替代研究以及未来型号的自主设计提供参考。

参考文献

- [1] SHMYROV V F, TSUKANOV R U. Airplane power plants systems designing[M]. US: Wiley, 2010.
- [2] 雷劲博. 航空发动机安装节多体动力学建模与仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
LEI Jinbo. Multibody dynamics modeling and simulation of aeroengine mount [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [3] RIVIN E I. 被动隔振[M]. 朱石坚, 译. 武汉: 海军工程大学出版社, 2004.
RIVIN E I. Passive vibration isolation[M]. ZHU Shijian, translation. Wuhan: Naval Engineering University Press, 2004. (in Chinese)
- [4] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机强度与刚度规范——第 8 部分: 振动和航空声耐久性: GJB 67.8A—2008[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2008.
Equipment Development of the PLA. Military airplane structural strength specification Part 8: vibration and aeroacoustic durability: GJB 67.8A—2008[S]. Beijing: Equipment Development of the PLA, 2018. (in Chinese)
- [5] 国防科学技术工业委员会. 航空发动机结构完整性指南: GJB/Z 101—1997[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Engine structural integrity guidance: GJB/Z 101—1997[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2018. (in Chinese)
- [6] 中央军委装备发展部. 航空涡轮螺旋桨和涡轮轴发动机通用规范: GJB 242A—2018[S]. 北京: 中央军委装备发展部, 2018.
Equipment Development Department of the Central Military Commission. General specification for aircraft turboprop and turboshaft engine: GJB 242A—2018[S]. Beijing: Equipment Development Department of the Central Military Commission, 2018. (in Chinese)
- [7] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定: CCAR-33-R2[S]. 北京: 中国民用航空局, 2012.
Civil Aviation Administration of China. Aeroengine airworthiness regulations: CCAR-33-R2[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2012. (in Chinese)
- [8] 中国航空工业总公司. 飞机动力装置隔振器设计和安装技术要求: HB6752—93[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1994.
Aviation Industry Corporation of China. Technical require-
- ments for design and installation of vibration isolators for aircraft power plants: HB6752—93[S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 1994. (in Chinese)
- [9] FAA. Airworthiness standards: normal, utility, acrobatic and commuter category airplanes: FAR-35[S]. US: FAA, 1965.
- [10] FAA. Airworthiness standards: normal, utility, acrobatic and commuter category airplanes: FAR-23, Amendment 30[S]. US: FAA, 1977.
- [11] FAA. Airworthiness standards: transport category airplanes: FAR-25[S]. US: FAA, 1977.
- [12] FAA. Airworthiness standards: normal, utility, acrobatic and commuter category airplanes: FAR-23, Amendment 31[S]. US: FAA, 1984.
- [13] TAYLOR E S. Vibration isolation of aircraft power plants [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1938, 6: 43-50.
- [14] WILMER H. propeller-rotor whirl flutter: a state of the art review[J]. Journal of Sound Vibration, 1966, 4(3): 528-544.
- [15] KUNZ D L. Analysis of prop-rotor whirl flutter: overview and update [C] // 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Denver, Colorado: AIAA, 2002: 1-8.
- [16] ČEČRDLE J. Whirl flutter optimisation-based solution of twin turboprop aircraft using a full-span model[J]. Applied and Computational Mechanics, 2017, 11(1): 1-18.
- [17] PHILLIPS W H. Effect of structural flexibility on the design of vibration-isolating mounts for aircraft engines[R]. US: NASA, 1984.
- [18] ASHRAFIUON H. Dynamic analysis of engine-mount systems [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1992, 114: 79-83.
- [19] SWANSON D A. Multi-dimensional mount effectiveness for vibration isolation: AIAA-92-2381-CP [R]. US: AIAA, 1992.
- [20] ASHRAFIUON H. Design optimization of aircraft engine-mount systems [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1993, 115: 463-467.
- [21] SWANSON D A. Optimization of aircraft engine suspension systems [J]. Journal of Aircraft, 1993, 30(6): 979-984.
- [22] SNYMAN J A. Vibration isolation of a mounted engine through optimization [J]. Mechanism and Machine Theory, 1995, 30(1): 109-118, 1995.
- [23] HRYCKO G O. Design of the low vibration turboprop powerplant suspension system for the DASH7 aircraft [C] // 1983 Business Aircraft Meeting & Exposition. Wichita, Kansas: AIAA, 1983: 1-5.
- [24] RABIH A. Modeling and vibration control of turboprop installations[D]. Canada: University of Waterloo, 2002.
- [25] 施荣明. 发动机安装结构动力学设计[J]. 应用力学学报, 2001, 18(s1): 11-15.
SHI Rongming. The structural dynamic design of the engine install [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 18(s1): 11-15. (in Chinese)

- [26] 邓吉宏, 施容明, 陈桂彬. 飞机发动机支杆动力学设计方法研究[J]. 应用力学学报, 2001, 18(s1): 75-79.
DENG Jihong, SHI Rongming, CHEN Guibin. Method of dynamic design of engine on support rod for the aircraft[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(s1): 75-79. (in Chinese)
- [27] 李春刚. 某型飞机发动机安装架强度分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010, 23(2): 38-42.
LI Chungang. Finite element analysis of engine mount of a aircraft[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(2): 38-42. (in Chinese)
- [28] 潘树祥. 翼吊发动机隔振安装分析[R]. 北京: 中国航空工业总公司第六二二三所, 1998.
PAN Shuxiang. Analysis of vibration isolation for wing crane engine[J]. Beijing: 623 Institute of Aviation Industry Corp. of China, 1998. (in Chinese)
- [29] 苏尔敦, 黄文超, 朱善庆. 飞机发动机隔振安装技术[C]// 中国航空学会第七届动力年会. 贵阳: 中国航空学会, 2010: 1-10.
SU Erdun, HUANG Wenchao, ZHU Shanqing. Vibration isolation installation technology for aircraft engines [C] // The 7th Annual Power Conference of China Aviation Society. Guiyang: CSAA, 2010: 1-10. (in Chinese)
- [30] 陈永辉, 王建军. 翼吊式发动机安装系统隔振设计技术研究[J]. 强度与环境, 2018, 45(3): 48-51.
CHEN Yonghui, WANG Jianjun. Research on vibration isolation design technology for underwing engine mount system [J]. Structure & Environment Engineering, 2018, 45(3): 48-51. (in Chinese)
- [31] 陈春兰, 陈永辉, 燕群. 考虑机翼柔性影响的发动机安装系统隔振设计研究[J]. 装备环境工程, 2019(7): 51-54.
CHEN Chunlan, CHEN Yonghui, YAN Qun. Vibration isolation design of engine installation system considering the influence of wing flexibility [J]. Equipment Environmental Engineering, 2019(7): 51-54. (in Chinese)
- [32] 陈春兰, 苏尔敦. 某涡桨发动机隔振安装系统弹性参数优化研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(5): 1-5.
CHEN Chunlan, SU Erdun. Optimization of elastic parameter of vibration isolation system for turboprop engine [J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(5): 1-5. (in Chinese)
- [33] 陈永辉, 陈春兰, 苏尔敦, 等. 航空发动机安装系统动力学设计技术研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(6): 23-27.
CHEN Yonghui, CHEN Chunlan, SU Erdun, et al. Research on dynamic design technology of aero-engine mounting system [J]. Computer Simulation, 2018, 35(6): 23-27. (in Chinese)
- [34] 王典, 黄尚友, 阚玉平, 等. 飞机发动机安装系统隔振设计及振动特性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 7991-7995.
WANG Dian, HUANG Shangyou, KAN Yuping, et al. Vibration isolation design and vibration characteristics analysis of the installation system for aircraft engine [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 7991-7995. (in Chinese)
- [35] 赵秀峰, 谭申刚, 沈威, 等. 翼吊式发动机安装设计综述[J]. 航空工程进展, 2013, 4(3): 268-237.
ZHAO Xiufeng, TAN Shengang, SHEN Wei, et al. A review on the installation design of wing-mounted engine [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(3): 268-237. (in Chinese)
- [36] 董万元, 王建强, 陈永辉, 等. 大功率涡桨发动机隔振系统设计及试验[J]. 振动·测试与诊断, 2022, 42(1): 177-203.
DONG Wanyuan, WANG Jianqiang, CHEN Yonghui, et al. Design and experiment study on vibration isolation system for high power turboprop engine [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2022, 42(1): 177-203. (in Chinese)
- [37] 王建强, 陈永辉, 潘凯, 等. 涡桨发动机安装系统振动传递特性测试及分析[J]. 噪声与振动控制, 2020(3): 250-255.
WANG Jianqiang, CHEN Yonghui, PAN Kai, et al. Test and analysis of vibration transmission characteristics of turboprop engine mounting systems [J]. Noise and Vibration Control, 2020(3): 250-255. (in Chinese)
- [38] 郑秋风. 涡桨发动机飞机的螺旋颤振分析及实验[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
ZHENG Qiufeng. Analysis and experiment studies on whirl flutter of turboprop aircraft [D]. Beijing: Beihang University, 2012. (in Chinese)
- [39] 顾家柳, 洪杰, 李上福. 螺旋转子的颤振涡动[J]. 航空学报, 1992, 13(8): 362-369.
GU Jialiu, HONG Jie, LI Shangfu. Flutter whirl of the propeller rotor systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1992, 13(8): 362-369. (in Chinese)
- [40] 任兴民, 李智炜, 徐明. 螺旋盘转子轴头动刚度实验测量方法及技术处理[J]. 应用力学学报, 1992, 9(2): 129-134.
REN Xingmin, LI Zhiwei, XU Ming. Method of testing measurement and technical treatment on shaft head dynamic stiffness of propeller rotor systems [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1992, 9(2): 129-134. (in Chinese)
- [41] 郑秋风. 机翼-涡桨发动机系统的螺旋颤振参数影响实验[C]// 第十三届全国空气弹性学术交流会. 哈尔滨: 中国空气动力学会, 2013: 155-159.
ZHENG Qiufeng. Experimental study on the influence of helical flutter parameters on wing turboprop engine system [C] // The 13th National Symposium on Aeroelasticity. Harbin: Chinese Aerodynamics Research Society, 2013: 155-159. (in Chinese)
- [42] 于仁业, 王刚, 王金亮. Y12F型通勤飞机螺旋颤振研究[C]// 2013年首届中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学会, 2013: 1-8.
YU Renye, WANG Gang, WANG Jinliang. Y12F Com-muter airplane whirl flutter research [C] // The First China Aviation Science and Technology Conference. Beijing: CSAA, 2013: 1-8. (in Chinese)