

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-12

倾转旋翼机气动设计研究进展

王宗辉^{1,2}, 杨云军², 赵佳祥¹

(1. 中国航天空气动力技术研究院 彩虹无人机科技有限公司, 北京 100074)

(2. 中国航天空气动力技术研究院 第一研究所, 北京 100074)

摘要: 倾转旋翼机既具有传统直升机垂直起降、空中悬停的能力又具备固定翼飞行器高速巡航的性能。倾转旋翼机优异的飞行性能使其在航空领域具有巨大的发展应用潜力, 然而这些优异性能也给倾转旋翼机的气动研发设计带来了诸多挑战。倾转旋翼机气动构型的发展经历了几十年迭代优化, 但在气动设计方面仍存在很多关键技术需要去深入探究。本文重点介绍了倾转旋翼桨叶外形优化设计、倾转旋翼机全机气动干扰和回转颤振气动弹性稳定性问题的研究现状, 根据目前现状对下一步倾转旋翼机气动设计研究进行展望, 并提出了一些研究方向上的建议。

关键词: 倾转旋翼机; 倾转旋翼; 飞行模式; 回转颤振; 气动干扰

中图分类号: V211.52

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Development in aerodynamic design of tiltrotor aircraft

WANG Zonghui^{1,2}, YANG Yunjun², ZHAO Jiexiang¹

(1. Caihong UAV Technology Co., Ltd., China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

(2. No.1 Research Institute, China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

Abstract: The tiltrotor aircraft has both traditional helicopter vertical takeoff and landing, airborne hovering capabilities, and high-speed cruising performance of fixed wing aircraft. The excellent flight performance of tiltrotor aircraft has enormous potential for development and application in the aviation field. However, at the same time, it also brings many challenges to research and design. The development of the overall aerodynamic configuration of tiltrotor aircraft has undergone decades of iterative optimization, and there are still many key technologies in the aerodynamic design of tiltrotor aircraft that need to be further explored. This article focuses on the research status of optimizing the shape design of tiltrotor blades, aerodynamic interference of tiltrotor aircraft, and aerodynamic elastic stability of whirl flutter. Based on the current situation, the next step of aerodynamic design research for tiltrotor aircraft is discussed, and several suggestions for research directions are provided.

Key words: tiltrotor aircraft; tiltrotor; flight mode; whirl flutter; aerodynamic interference

收稿日期: 2024-02-03; 修回日期: 2024-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(U21B2054)

通信作者: 杨云军(1975-), 男, 博士, 研究员。E-mail: yangyj1998@163.com

引用格式: 王宗辉, 杨云军, 赵佳祥. 倾转旋翼机气动设计研究进展[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-12.

WANG Zonghui, YANG Yunjun, ZHAO Jiexiang. Development in aerodynamic design of tiltrotor aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-12. (in Chinese)

0 引言

直升机以其垂直起降、空中悬停以及定点回转等灵活机动飞行能力成为航空领域先进武器系统的重要成员之一。直升机根据总体气动布局可以分为单旋翼加尾桨的传统构型、共轴式双旋翼构型、纵列式双旋翼构型、横列式双旋翼构型四大类^[1]。其中,倾转旋翼机属于横列式双旋翼构型直升机,它具有速度快、航程远、耗油率低、载重大、噪声小等优点。倾转旋翼机两个旋翼系统通过固定翼安装在机身的左右两侧,两套旋翼系统旋转方向相反,实现相互抵消反扭力矩的效果,从而摆脱对传统构型直升机尾桨的依赖,整机构型对称,稳定性和操纵性较好。

倾转旋翼机由于同时存在旋翼系统与固定机翼,既具有传统构型直升机空中悬停以及垂直爬升下降的能力又拥有固定翼螺旋桨式飞行器高速巡航的性能。倾转旋翼机具有三种飞行模态:当旋翼系统短舱垂直于固定翼向上时,倾转旋翼机处于直升机模态,具备垂直起降以及空中悬停能力;当旋翼系统短舱倾转 90° ,与机身保持向前姿态时,倾转旋翼机处于固定翼飞行器高速巡航模态;介于两者中间,当旋翼系统短舱与固定机翼存在小于 90° 夹角时,倾转旋翼机处于倾转过渡模态,在该模态下,倾转旋翼机可以进行短距起飞以及实现直升机模态与高速巡航固定翼飞行器模态之间的切换。倾转旋翼机优异的气动布局和飞行性能使其具有巨大的发展应用潜力。然而,与之相伴随的是它带来的复杂设计挑战。倾转旋翼机研发过程中存在的关键技术挑战可以归纳为以下五点:1) 倾转旋翼系统桨叶外形的设计,2) 倾转旋翼机多运动组件之间复杂的气动干扰问题,3) 旋翼与机翼之间耦合产生的复杂动力学稳定性问题,4) 倾转旋翼机复杂系统的飞行控制规划,5) 倾转与传动系统的设计优化。总结发现,倾转旋翼机面临的五个关键技术挑战几乎全部直接或间接涉及气动研究。其中第4)条与第5)条主要以气动特性与气动载荷为输入进行倾转旋翼机飞行动力学与结构动力学设计规划,本文重点对以气动设计为直接研究内容的前三条挑战问题进行阐述。

倾转旋翼机旋翼系统在直升机飞行模态下往往需要较大的旋翼旋转半径来获得较小的桨盘载

荷,从而降低需用功率,提升飞行器在悬停和垂直爬升状态的飞行效率。然而在固定翼高速巡航模态下,倾转旋翼产生的推力往往只有悬停状态拉力的十分之一左右,此时需要保持较小的旋转半径,以缓解高速巡航状态桨叶外端产生的空气压缩效应造成的功率损失。因此,综合考虑多种飞行模态下倾转旋翼的飞行效率对提升整机飞行性能起到至关重要的作用。倾转旋翼机飞行过程中桨叶的高速旋转、短舱倾转变换、固定翼高速巡航等状态使得流场出现复杂的非定常特性,进而产生各种难以预测的尾迹涡结构,旋翼流场的尾迹涡对倾转旋翼机飞行性能具有显著影响。倾转旋翼机多种飞行状态导致旋翼、机翼以及机身短舱之间复杂的流场分布特性,气动载荷作用于飞机结构上可能产生严重的气动弹性稳定性问题,并且由于倾转旋翼机各部件并非完全刚体结构,因此在气动载荷作用下不可避免的发生弹性变形,倘若要精确掌握真实飞行性能,必须要考虑到气动载荷与结构之间的耦合影响。

本文在简单介绍倾转旋翼机气动构型发展概况以后,重点对倾转旋翼系统桨叶气动外形优化设计、倾转旋翼机全机气动干扰改进分析以及旋翼/机翼耦合系统气动弹性等问题研究现状进行阐述,并对倾转旋翼机未来气动研究方向提出一些建议和思路。

1 倾转旋翼机气动构型发展概况

倾转旋翼机的雏型最早起源于20世纪20年代, Henry 提出将两个大旋转直径的螺旋桨固定于机翼翼尖的垂直轴上,但该飞机并没有真正实现倾转旋翼机倾转功能^[2]。之后,真正第一款成功实现转换飞行模态的倾转旋翼机是1947年超越飞机公司提出的1-G型飞机,该架飞机在1954-1955年之间先后进行了上百次试验飞行。1951年,贝尔直升机公司研制出XV-3倾转旋翼机原理验证机与著名的麦克唐纳飞机公司以及西科斯基飞机公司竞标军方的全新垂直起降飞行器研制合同。由于技术积累不足,在后续的飞行试验中,XV-3暴露出了众多气动设计问题。一方面,研究人员发现该构型飞机在倾转过程以及固定翼飞行器高速巡航模态下,气动力与结构系统发生耦合,出现气动弹性不稳定现象。另一方面,研究人员发现传

统直升机旋翼桨叶并不是倾转旋翼机的最佳选择。直到1971年,经过技术改进探索,贝尔直升机公司再一次赢得美国宇航局提出的XV-15竞标合同,XV-15倾转旋翼验证机在后续几十年成为大量实验测试和数值计算的标模^[3-6]。在具有了XV-15的成功经验以后,1983年,贝尔与波音合作开发出了更加先进的V-22倾转旋翼机,即全世界著名的“鱼鹰”运输机,该飞机于1989年3月19日试飞,2006年进入美国空军服役,2007年服役于海军陆战队至今。2017年,贝尔直升机研制成功V-280

“英勇”倾转旋翼机并成功首飞。V-280的巡航速度为520千米/小时,即280节,这也是其代号中“280”的由来。2022年12月5日,美国陆军官网宣布贝尔V-280中标FLRAA项目,赢得陆军40多年来最大直升机采购竞标。后续美陆军计划用V-280取代两千架“黑鹰”直升机或一千多架“阿帕奇”直升机,美国通用直升机开始全面进入倾转旋翼时代。美国倾转旋翼机的发展历程如图1所示。

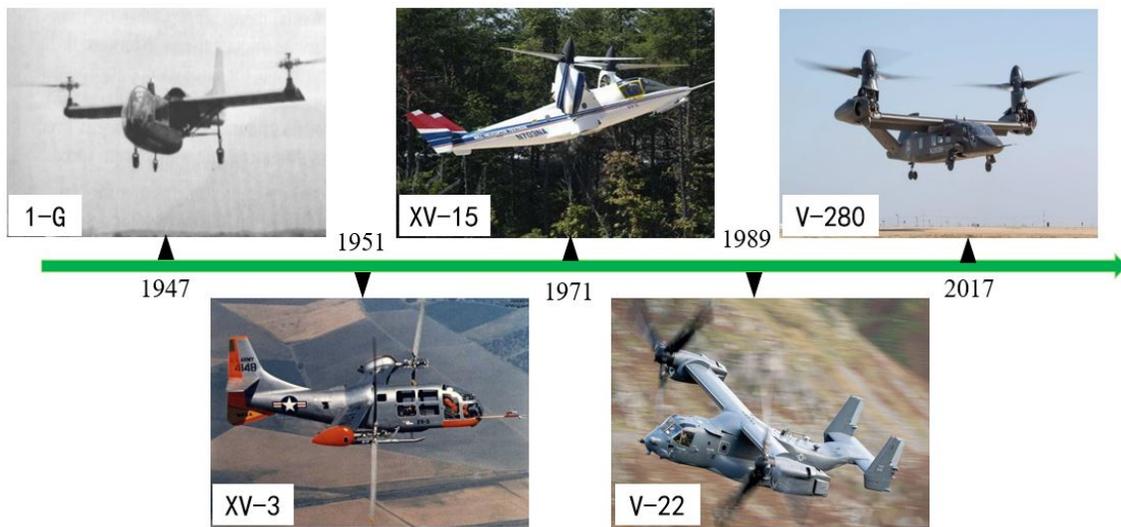


图1 美国倾转旋翼机发展历程

Fig. 1 Development history of tiltrotor aircraft in America

我国对于倾转旋翼机的研发设计起步要晚很多,目前国内倾转旋翼机典型代表有2018年珠海航展展示的中国航空气动力技术研究院研制的“彩虹-10”倾转旋翼无人机。该无人机于2020年首飞,这也是国内首款自主完成倾转过渡飞行试验的大中型倾转旋翼机。

2 倾转旋翼机气动设计问题

2.1 倾转旋翼桨叶气动外形设计

倾转旋翼桨叶的气动外形设计经验来源于传统直升机大展弦比旋翼桨叶,然而倾转旋翼系统不仅需要实现传统直升机垂直起降功能,还需要像固定翼螺旋桨一样在固定翼高速巡航模态提供前飞的拉力。倾转旋翼在高速巡航状态,由于压缩效应,导致桨叶出现功率损失,因此,倾转旋翼桨叶需要进行大展弦比/小扭转旋翼和小展弦比/

大扭转螺旋桨之间的折中外形设计。目前,倾转旋翼气动性能的分析方法仍主要沿用传统直升机旋翼的半经验数学模型以及计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)数值模拟方法^[7-9]。

半经验数学模型计算倾转旋翼气动性能在桨叶气动外形设计的前期发挥重要的作用,它可以避免CFD方法过多的计算时间,提高设计效率,与此同时具有较高的计算精度。半经验数学模型主要理论方法有动量理论、叶素理论以及涡流理论等,其中动量理论与叶素理论组合的动量叶素理论方法在旋翼气动性能快速估算中具有较广泛的应用。2009年,Leishman等^[10]在美国直升机学会年度论坛上曾阐述了倾转旋翼桨叶在气动设计上的难点挑战,他表示,倾转旋翼需要满足在悬停和拉升状态具备低桨盘载荷和高悬停效率,而在高速巡航模态下,倾转旋翼桨叶需要实现剖面阻力

最小化并降低压缩效率,从而实现最佳推进效率。Gur等^[11]对比了旋翼三种诱导速度计算模型:动量理论、涡流理论和升力线理论,结果表明动量理论与叶素理论的组合方法在旋翼气动特性计算方面具有更高精度。Bohorquez等^[12]采用动量叶素理论研究了旋翼桨叶平面形状等几何参数对双旋翼构型直升机飞行效率的影响。Jakub等^[13]采用动量叶素理论建立旋翼参数化模型,并对旋翼桨叶进行了气动分析和参数化设计工作。Waqas等^[14]基于动量叶素理论建立了螺旋桨不同飞行状态气动性能计算模型,并通过试验数据进行了模型验证,证明了建立的模型可以计算不同来流迎角下螺旋桨的气动力和气动扭矩。Macnell等^[15]用平板理论以及失速延迟模型扩展的动量叶素理论方法提供了与试验数据最接近的结果,相比于传统动量叶素理论具有更高精度。国内李鹏^[16]针对倾转旋翼气动性能计算建立了针对悬停和高速巡航飞行状态的计算模型,结果显示该模型对于初步模拟倾转旋翼悬停和巡航状态气动特性具有较高的计算效率和计算精度。涡流尾迹模型在旋翼气动性能计算中同样发挥重要作用。2009年,美国航空航天局研究人员利用V-22缩比模型对理论计算与试验结果进行对比,结果表明:传统的自由尾迹模型在计算悬停状态气动性能时具有较高的精度和效率,对于固定翼高速巡航模态,则推荐采用差分动量理论模型^[17]。国内李春华等^[18]、王俊超等^[19]基于升力面与桨尖涡流模型建立了针对倾转旋翼悬停和高速巡航两种模态的自由尾迹分析方法。

倾转旋翼桨叶外形设计需要考虑倾转旋翼机多种模态下的飞行效率综合最优化,半经验数学模型的建立对倾转旋翼桨叶的优化设计提供了重要理论工具。国内外众多研究学者将旋翼数学计算模型与优化算法相结合,针对多种飞行模态进行了桨叶优化设计工作^[20-25]。Giovanni等^[21]将多目标遗传算法与动量叶素理论相结合,以悬停效率、爬升效率和高速巡航效率为优化目标进行桨叶外形优化设计。Jimenez等^[22]同样采用了动量叶素理论对倾转旋翼桨叶几何外形进行优化设计,优化变量包括了叶素扭转角、后掠角以及翼型弦长。国内包括南京航空航天大学、中国航天空气动力技术研究所以及北方工业大学等众多研究所

高校对倾转旋翼的气动外形优化进行了探索。薛立鹏等^[23]依据涡流理论建立分析模型,并且以悬停和高速巡航飞行效率为目标进行了优化设计。孙凯军等^[24]通过Kriging代理模型与多目标遗传算法建立了桨叶气动外形优化设计方法,优化目标为悬停拉力和巡航效率,以地面悬停功率和巡航拉力为约束条件进行桨叶平面形状优化设计。闫文辉等^[25]基于动量叶素理论并耦合CFD方法进行了倾转旋翼桨叶优化设计。王宗辉等^[26]基于动量叶素理论建立了多飞行状态倾转旋翼气动性能计算模型,并对桨叶的翼型分布、弦长和扭转角进行了优化设计,实现多飞行状态下飞行效率综合最优化。多飞行状态动量叶素理论如图2所示。

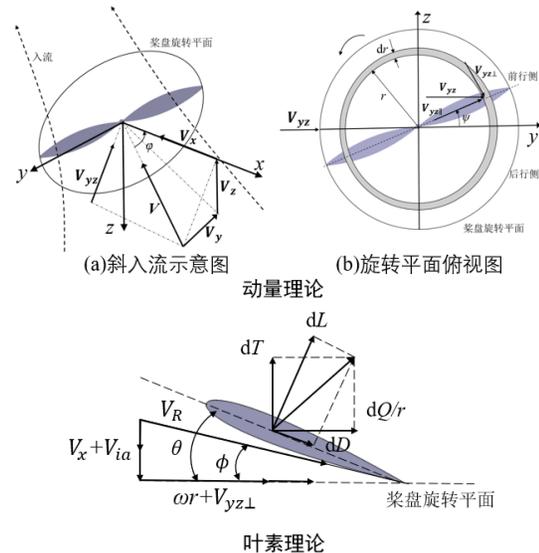


图2 多飞行状态动量叶素理论^[26]

Fig. 2 BEMT for multiple flight conditions^[26]

不可否认,半经验数学模型能够高效地计算桨叶的气动性能,在倾转旋翼桨叶优化设计的前期对叶素扭转角、弦长以及翼型选择等方面具有重要意义。然而,该理论方法无法对倾转旋翼流场进行更加真实地模拟,无法分析流动分离以及桨涡干扰等复杂气动问题。因此,求解Navier-Stokes方程的CFD方法在倾转旋翼气动设计方面仍然具有不可替代的地位。旋翼嵌套网格法搭配高精度的CFD数值模拟方法对捕捉尾迹涡以及获得诱导速度、表面压力等方面具有显著效果^[27-29]。招启军等^[30-31]建立了包含N-S方程、全位势方程求解器以及自由尾迹分析的混合方法,结合嵌套网格生成技术对旋翼的悬停状态进行了流场模拟分

析。后续将 CFD 方法与优化方法相结合,为提高倾转旋翼外形优化设计的效率,建立基于遗传算法和径向基函数优化方法。陈皓^[32]、李鹏等^[33]采用 CFD 方法对倾转旋翼倾转过渡状态进行了非定常流场模拟。

2.2 倾转旋翼机全机气动设计

倾转旋翼机多种模式下的切换飞行带来了复杂的气动干扰问题。一方面,在直升机悬停和垂直起降模式下,旋翼产生的下洗流会直接作用于机翼表面,从而产生“喷泉效应”,降低整个飞行器飞行效率^[34-36];另一方面,倾转旋翼机在倾转过渡过程中,存在旋翼变距,短舱倾转以及机翼迎角改变等多种部件运动,从而产生复杂的非定常流场^[37-38]。

1) 悬停及巡航状态研究

为了探究倾转旋翼机复杂的气动特性与流场机理,众多研究学者对倾转旋翼机的多种飞行状态进行了高精度数值模拟。2000年,Polak等^[39]对倾转旋翼机机身对称平面出的流场进行研究,发现在悬停状态存在一种称为“喷泉效应”的负面效应,如图3所示。

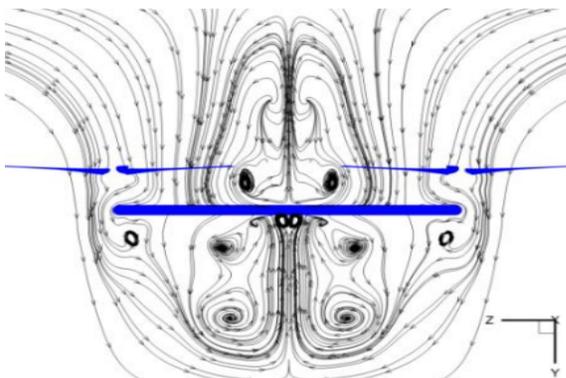


图3 悬停状态“喷泉效应”^[16]

Fig. 3 The fountain effect in hovering state^[16]

随后,Potsdam等^[40]利用发展的网格生成技术与流场求解器对V-22模型进行了半模与全模布局下的流场模拟。Zhao等^[41]采用流场模拟计算方法发现:在悬停状态下,低转速有利于提高悬停效率但降低了整体拉力,高转速可以提高气动效率,增大拉力值。在巡航状态下,小的旋转半径可以提高飞行速度。Alex等^[42]采用一种基于涡粒子方法计算模型对倾转旋翼三种状态的气动性能和流动机理进行了研究。国内方面,孙凯军等^[43]、陈皓

等^[44-45]分别发展了高效的流场模拟方法,研究了倾转旋翼机多种飞行模式下的非定常气动特性。马铁林等^[46]研究了在高速巡航状态下,旋翼滑流尾迹对全机的气动影响。李欢等^[47]、招启军等^[48]分别采用非定常预处理方法和风洞试验等方法对倾转旋翼机悬停模态流动机理以及气动载荷进行了分析。

针对倾转旋翼机全机复杂的流场干扰和非定常气动特性问题,众多学者进行了气动布局设计改进。针对倾转旋翼机悬停模态下“喷泉效应”带来的效率下降问题,2003年,Alli^[49]提出了“ERICA”项目计划,将原来的固定机翼分为与短舱一同倾转的外侧机翼段和内侧固定机翼段(“ERICA”概念图如图4所示)。后续,Beaumier等^[50]对该构型进行气动以及气动声学方面的进一步分析介绍。Gibertini等^[51]、Giovanni等^[52-54]以及Garcia等^[55]分别采用试验以及数值模拟方法对倾转机翼/旋翼机构型进行了悬停状态分析,证明了该构型在悬停状态能够改善悬停效率。王宗辉等^[56]通过低速飞行时机翼失速迎角约束以及高速飞行时倾转旋翼机需用功率限制建立该构型倾转过渡走廊计算模型,通过飞行姿态规划对比发现,倾转机翼段的产生虽然可以起到悬停降载效果,但会导致短舱倾转角与前飞速度包线范围变小,倾转机翼段占比越大,倾转旋翼机的飞行控制难度越高。Chen等^[57-58]研究了带有涡流发生器的V-22翼型流动特性,结果显示,合理的布局可以提高其气动性能。后续又在机翼段采用格尼襟翼气动布局改进方案,用以提高机翼升力系数。



图4 “ERICA”概念图^[49]

Fig. 4 Artist impression of the ERICA concept^[49]

2) 倾转过渡过程研究

倾转旋翼机所独有的倾转过渡过程给倾转旋翼机的研发设计难度带到了一个新的高度。在进行倾转过渡过程的流场计算模拟和飞行试验之前,需要利用空气动力学与飞行力学、飞行控制等多学科确定倾转过渡走廊,实现倾转过渡过程的姿态规划^[59]。曹芸芸^[60]提出了低速段采用机翼失速限制,高速段采用发动机功率限制相结合的方法计算倾转过渡走廊。张铮等^[61]通过理论计算结果与风洞试验建立了适用于飞行力学分析的倾转旋翼机旋翼系统与固定机翼的流场干扰模型,并且给出了倾转过渡过程中旋翼与机翼气动干扰的速度范围。Ma等^[62]建立了三维飞行倾转走廊包线,其中包含推进方向、空速和高度组合。Steven等^[63]通过对倾转过渡过程的数值模拟发现,当旋翼与机翼处在大角度位置时,旋翼的诱导下洗流降低了机翼的有效攻角,导致升力阻力显著降低,而在接近固定翼模态的小角度时,旋翼的尾流加速了机翼表面气体流动,机翼的升力得到加强。Appleton等^[64]在倾转旋翼机倾转过渡过程分别对旋翼对机翼、旋翼对尾翼和机翼对尾翼相互作用的影响进行研究。Chen等^[65]、Zhang等^[66]分别采用动量盘模拟流场,对倾转过渡过程进行了高效的流场模拟分析。刘佳豪等^[67]采用延迟分离涡模拟方法进行倾转过渡状态不同倾转角下旋翼与机翼组合体准定常仿真计算,对单独旋翼以及旋翼与机翼的干扰流场进行模拟分析,如图5所示。

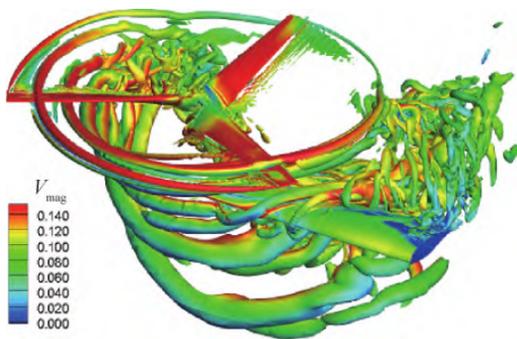


图5 旋翼与机翼的流场干扰^[67]

Fig. 5 Flow field interference between rotor and wing^[67]

2.3 倾转旋翼机气动弹性研究

气动弹性力学反映了弹性体飞行器在流场中惯性力、弹性力和气动力之间的耦合作用。在固

定翼飞行器中,气动弹性力学主要研究的是静气弹与颤振现象,在传统直升机中,气动弹性力学主要研究的是桨叶的气动弹性响应问题以及全机地面/空中共振等稳定性问题。区别于固定翼飞行器与传统旋翼类直升机,倾转旋翼机典型的气动弹性问题在于弹性固定翼与可倾转旋翼之间气动力、弹性力以及惯性力耦合产生的回转颤振^[68]。在高速前飞状态下,旋翼桨盘存在大轴向入流,此时旋翼桨距角通常较大,加上旋翼系统大旋转半径,使得全机容易产生回转颤振气动弹性稳定性问题^[69]。倾转旋翼机气动弹性分析需要分别建立结构动力学模型与非定常气动力模型,从而进一步建立非线性气弹耦合动力学方程。当前对倾转旋翼气弹动力学的研究中,对旋翼非定常气动特性的研究主要采用的是数学模型描述桨盘入流,如自由尾迹入流模型,非定常气动力理论建模方法主要包括Leishman-Beddoes模型、Johnson模型和ONERA模型。结构动力学模型一般采用中等变形梁假设,基于Hamilton原理推导建立倾转旋翼机结构动力学方程。

针对倾转旋翼机回转颤振问题,国外研究相对较早。Kvaternik^[70]在研究中发现高速巡航阶段机翼产生的气动载荷能够抑制回转颤振效果,并且旋翼系统中桨叶的预锥角和挥舞变距调节系数同样对回转颤振边界具有显著影响。为了深入研究倾转旋翼机气动弹性稳定性,研究学者对旋翼/短舱/固定翼之间的气动弹性模型进行了探索研究。其中,回转颤振最经典的模型是1974年Johnson^[69]建立的巡航模态下倾转旋翼机的九自由度分析模型。通过试验结果对比发现,该模型对计算气动弹性稳定性具有较高精度。后续,该模型又得到进一步改进,使其能够应用于悬停以及倾转过渡多种飞行状态^[71-72]。Beerinder等^[73]分析了倾转旋翼机固定翼状态下的回转颤振问题,并指出倾转旋翼的高速旋转和弹性体固定机翼的动力学模态会引起系统的失稳。Li等^[74-75]利用Hamilton的广义原理建立倾转旋翼机巡航状态下气动弹性稳定性分析模型,并采用动态入流非定常模型对倾转过渡过程气弹稳定性进行了分析。Marika等^[76-78]基于气动弹性稳定性对倾转旋翼机固定翼段进行了结构设计。Mair等^[79-80]、Houbolt等^[81]分

状态响应和稳定性及气动与结构紧耦合模型搭建等技术问题^[96]。

4) 目前研究学者对倾转过渡状态流场数值模拟往往只考虑了短舱倾转角变化等少数部件运动,甚至很多计算过程采用的是特定倾转角下的准定常模拟。后续研究中,应该考虑真实飞行工况下前飞速度、旋翼桨距角、机身迎角的实时配平变化,通过飞行动力学倾转过渡走廊建模,完成倾转过渡姿态规划,进而模拟更加真实的倾转过渡过程。

5) 作为水面大型舰船海空协同作战的重要武器装备,倾转旋翼机通常会面对海上阵风环境影响,尤其在非定常流场及非对称着陆环境状态下的动态配平具有较高挑战性^[97]。因此,研究倾转旋翼机在突风环境或者舰载着陆时的流场机理是一件值得深入探究的问题。

4 结束语

倾转旋翼机既具有传统构型直升机垂直起降,空中悬停以及定点回转等功能,又能够切换至固定翼飞行器模式进行高速巡航飞行。本文结合倾转旋翼机飞行优势以及发展前景,阐述了倾转旋翼机在气动设计方面遇到的挑战,重点对倾转旋翼系统桨叶气动外形优化设计、倾转旋翼机全机气动干扰改进分析以及旋翼/机翼耦合系统气动弹性等问题研究现状进行介绍,并总结了下一步气动研发设计几个发展方向,可为后续相关研究提供借鉴。

参考文献

- [1] 王适存. 直升机空气动力学[M]. 南京: 航空专业教材编审组, 1985: 1-4.
WANG Shicun. Helicopter aerodynamics [M]. Nanjing: Aviation Professional Textbook Editing and Review Team, 1985: 1-4. (in Chinese)
- [2] SPENSER J P, WHIRLY B, A history of U. S. helicopter pioneer[M]. Washington D. C.: University of Washington Press, 1998: 34-35.
- [3] MAISEL L M, GIULIANETTI D J, DUGAN D C. The history of the XV-15 tilt rotor research aircraft: from concept to flight[M]. Washington: NASA History Division, 2000: 28-29.
- [4] WEIBERG J A, MAISEL M D. Wind-tunnel tests of the xv-15 tilt rotor aircraft: NASA - TM - 81177[R]. USA: Technical Report, NASA, 1980.
- [5] WERNICKE K G, MAGEE J P. XV - 15 flight test results compared with design goals[C]// AIAA 30th Aerospace Science Meeting and Exhibit. New York: AIAA, 1979: 1-12.
- [6] LYLE K H, BURLEY C L, PRICHARD D S. A comparison of measured and predicted xv-15 tiltrotor surface acoustic pressures[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1999, 44(4): 285-297.
- [7] 赵国庆, 招启军. 基于目标压力分布的旋翼先进气动外形反设计分析方法[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 744-755.
ZHAO Guoqing, ZHAO Qijun. Reverse design analysis method for advanced aerodynamic shape of rotor based on target pressure distribution [J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2014, 35(3): 744-755. (in Chinese)
- [8] 张卫国, 孙俊峰, 招启军, 等. 旋翼翼型气动设计与验证方法[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(6): 136-147.
ZHANG Weiguo, SUN Junfeng, ZHAO Qijun, et al. Aerodynamic design and verification methods for rotor airfoils [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 39(6): 136-147. (in Chinese)
- [9] BROCKLEHURST A, BARAKOS G N. A review of helicopter rotor blade tip shapes[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 56(1): 35-74.
- [10] LEISHMAN J G, ROSEN K M. Challenges in the aerodynamic optimization of high-efficiency proprotors[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2011, 56(1): 12004.
- [11] GUR O, ROSEN A. Comparison between blade-element models of propellers[J]. The Aeronautical Journal, 2008, 112(1): 689-704.
- [12] BOHORQUEZ F, SAMUEL P, SIROHI J, et al. Design, analysis and hover performance of a rotary wing micro air vehicle[J]. Journal of the American Helicopter Society. 2003, 48(2): 80-90.
- [13] JAKUB K, STANISLAW K, ROBERT R. Helicopter main rotor blade parametric design for a preliminary aerodynamic analysis supported by CFD or panel method[J]. Materials, 2022, 15(2): 1-20.
- [14] WAQAS K, MEYER N. A propeller model for general forward flight conditions[J]. International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2015, 3(2): 72-92.
- [15] MACENLL R, VERSTRAETE D. Blade element momentum theory extended to model low Reynolds number propeller performance [J]. The Aeronautical Journal, 2017, 101(1): 1-23.
- [16] 李鹏. 倾转旋翼机非定常气动特性分析及气动设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
LI Peng. Analysis of unsteady aerodynamic characteristics and aerodynamic design of tiltrotor aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [17] ACREE C W. JVX proprotor performance calculations and

- comparisons with hover and airplane mode test data: TM - 2009-215380[R]. USA: NASA, 2009.
- [18] 李春华, 徐国华. 悬停和前飞状态倾转旋翼机的旋翼自由尾迹计算方法[J]. 空气动力学学报, 2005, 23(2): 152-156.
- LI Chunhua, XU Guohua. Calculation method for rotor free wake of tiltrotor aircraft in hover and forward flight states [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 23(2): 152-156. (in Chinese)
- [19] 王俊超, 谭剑锋, 李建波, 等. 基于自由尾迹方法的自转旋翼气动特性研究[J]. 航空学报, 2015, 36(11): 3540-3548.
- WANG Junchao, TAN Jianfeng, LI Jianbo, et al. Research on aerodynamic characteristics of autotrophic rotors based on free wake method [J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2015, 36(11): 3540-3548. (in Chinese)
- [20] STAHLHUT C W. Aerodynamic design optimization of proprotors for convertible-rotor concepts [D]. Maryland: University of Maryland, 2012.
- [21] DROANDI G, GIBERTINI G. Aerodynamic blade design with multi-objective optimization for a tiltrotor air-craft[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2015, 87(1): 19-29.
- [22] JIMENEZ A, BIAVA M, BARAKOS G. Tiltrotor CFD Part II-aerodynamic optimisation of tiltrotor blades[J]. The Aeronautical Journal, 2017, 121(1): 611-636.
- [23] 薛立鹏, 张呈林. 倾转旋翼气动优化设计[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 453-458.
- XUE Lipeng, ZHANG Chenglin. Aerodynamic optimization design of tiltrotor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 29(4): 453-458. (in Chinese)
- [24] 孙凯军, 张练, 付义伟, 等. 某型倾转旋翼机的旋翼桨叶气动优化设计[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 340-347.
- SUN Kaijun, ZHANG Lian, FU Yiwei, et al. Aerodynamic optimization design of rotor blades for a certain type of tiltrotor aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 340-347. (in Chinese)
- [25] 闫文辉, 邓佳子, 王向阳, 等. 旋翼螺旋桨巡航及悬停状态气动特性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 192-199.
- YAN Wenhui, DENG Jiazi, WANG Xiangyang, et al. Aerodynamic performance of rotor propeller in cruise and hover status[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 192-199. (in Chinese)
- [26] 王宗辉, 杨云军, 赵弘睿, 等. 多飞行状态倾转旋翼气动优化设计[J]. 航空学报, 2024, 45(9): 529024.
- WANG Zonghui, YANG Yunjun, ZHANG Hongrui, et al. Aerodynamic optimization design of tiltrotor for multiple flight conditions [J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2024, 45(9): 529024. (in Chinese)
- [27] JOELLE B, DIDIER B. Multifidelity aerodynamic optimization of a helicopter rotor blade[J]. AIAA Journal, 2019, 57(8): 3132-3144.
- [28] ZHAO Q J, ZHAO G Q, WANG B, et al. Robust Navier-Stokes method for predicting unsteady flowfield and aerodynamic characteristics of helicopter rotor[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(2): 214-224.
- [29] BIEDRON R T. Simulation of an isolated tiltrotor in hover with an unstructured overset-grid RANS solver[C]// Journal of the American Helicopter Society 65th Annual Forum. Grapevine: 2009.
- [30] 招启军, 徐国华. 基于 Navier-Stokes 方程/自由尾迹/全位势方程的旋翼流场模拟混合方法[J]. 空气动力学学报, 2006, 24(1): 15-21.
- ZHAO Qijun, XU Guohua. A hybrid method based on Navier-Stokes/free wake/full-potential solver for rotor flow simulations[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 24(1): 15-21. (in Chinese)
- [31] 招启军, 蒋霜, 李鹏, 等. 基于 CFD 方法的倾转旋翼/螺旋桨气动优化分析[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(4): 544-553.
- ZHAO Qijun, JIANG Shuang, LI Peng. Optimization analysis of tilting rotor/propeller aerodynamics based on CFD method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 35(4): 544-553. (in Chinese)
- [32] 陈皓. 倾转旋翼机过渡模式下非定常气动力数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- CHEN Hao. Numerical simulation of unsteady aerodynamics in transition mode of tiltrotor aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [33] 李鹏, 招启军. 倾转旋翼典型飞行状态气动特性的 CFD 分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(2): 421-431.
- LI Peng, ZHAO Qijun. CFD analysis of aerodynamic characteristics of typical flight states of tiltrotor wings[J]. Journal of Aerodynamics, 2016, 31(2): 421-431. (in Chinese)
- [34] WOOD T L, PERVEY M A. Reduction of tiltrotor down-load[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1995, 40(3):42-51.
- [35] FELKER F. Wing download results from a test of a 0.658-scale v - 22 rotor and wing[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1992, 37(4):58-63.
- [36] MCVEIGH M A, ROSENSTEIN H J, MCHUGH F J. Aerodynamic design of the xv - 15 advanced composite tiltrotor blade[C]// American Helicopter Society Aerodynamics 39th Annual Forum. St. Louis, MO: AIAA, 1983: 1-14.
- [37] WU Z, LI C, CAO Y. Numerical simulation of rotor - wing transient interaction for a tiltrotor in the transition mode [J]. Mathematics, 2019, 7(1): 116-130.
- [38] LI P, ZHAO Q J, ZHU Q X. CFD calculations on the unsteady aerodynamic characteristics of a tilt-rotor in a conversion mode[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(6): 1593-1605.

- [39] POLAK D R, REHM W, GEORGE A R. Effects of an image plane on the tiltrotor fountain flow[J]. *Journal of American Helicopter Society*, 2000, 45(2):90 - 96.
- [40] POTSDAM M A, STRAWM R C. CFD simulations of tiltrotor configurations in hover[C]// Montreal: *Journal of the American Helicopter Society*, 2005.
- [41] ZHAO G Q, ZHAO Q J, LI P, et al. Parametric analyses for effects of RPM and diameter on tiltrotor aerodynamic performances in hovering and cruise mode [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2021, 22(2): 479-488.
- [42] ALEX Z, ALBERTO S, MICHELE P, et al. Assessment of a mid-Fidelity numerical approach for the investigation of tiltrotor aerodynamics[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3385.
- [43] 孙凯军,张碧辉,付义伟,等. 悬停状态倾转旋翼机非定常气动干扰研究[J]. *航空工程进展*, 2019, 10(6): 744-749. SUN Kaijun, ZHANG Bihui, FU Yiwei, et al. Research on unsteady aerodynamic interference of tiltrotor aircraft in hovering state[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(6): 744-749. (in Chinese)
- [44] 陈皓,陆志良,郭同庆. 悬停状态下倾转旋翼机向下载荷被动减缓措施研究[J]. *空气动力学学报*, 2018, 36(3): 529-534. CHEN Hao, LU Ziliang, GUO Tongqing. Research on passive mitigation measures for downward load of tiltrotor aircraft in hovering state[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 36(3): 529-534. (in Chinese)
- [45] 陈皓,陆志良,郭同庆. 旋翼滑流对倾转旋翼机飞机模式下气动特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(11): 2809-2816. CHEN Hao, LU Ziliang, GUO Tongqing. The influence of rotor slipstream on the aerodynamic characteristics of tiltrotor aircraft in aircraft mode [J]. *Journal of Aerodynamics*, 2018, 33(11): 2809-2816. (in Chinese)
- [46] 马铁林,张子伦,刘振臣,等. 倾转旋翼机巡航状态旋翼滑流影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(6): 1124-1137. MA Tielin, ZHANG Zilun, LIU Zhenchen, et al. The effect of rotor slipstream on the cruise state of tiltrotor aircraft [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(6): 1124-1137. (in Chinese)
- [47] 李欢,龚小权,唐静,等. 非定常预处理方法在倾转旋翼飞行器悬停状态气动干扰模拟中的应用[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(2): 396-409. LI Hua, GONG Xiaoquan, TANG Jing, et al. Application of Unsteady Preprocessing Method in Aerodynamic Interference Simulation of Tiltrotor Aircraft in Hovering State[J]. *Journal of Aerodynamics*, 2019, 34(2): 396-409. (in Chinese)
- [48] 招启军,倪同兵,李鹏,等. 倾转旋翼机流动机理及气动干扰特性试验[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(12): 2900-2912. ZHAO Qijun, NI Tongbing, LI Peng, et al. Experimental study on flow mechanism and aerodynamic interference characteristics of tiltrotor aircraft [J]. *Journal of Aerodynamics*, 2018, 33(12): 2900-2912. (in Chinese)
- [49] ALLI P. Erica: The European tiltrotor design and critical technology projects [J]. *AIAA International Air and Space Symposium and Exposition*, 2003, 25(15): 14-17.
- [50] BEAUMIER P, DECOURS J, LEFEBVRE T. Aerodynamic and aeroacoustic desing of moder tilt - rotors: the onera experience[J]. *ICAS*, 2008, 26(1): 14 - 19.
- [51] GIBERTINI G, AUTERI F, CAMPANARDI G, et al. Wind-tunnel tests of a tilt-rotor aircraft[J]. *The Aeronautical Journal*, 2011, 115(1):315-322.
- [52] GIOVANNI D. Wing-rotor aerodynamic interaction in tiltrotor aircraft[D]. Milan: Politecnico di Milano, 2014.
- [53] GIOVANNI D, ALEX Z, GIUSEPPE D. Aerodynamic interaction between rotor and tilting wing in hovering flight condition [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2015, 60(4):1-20.
- [54] DROANDI G. Experimental investigation of the rotor-wing aerodynamic interaction in a tilting aircraft in hover [J]. *The Aeronautical Journal*, 2015, 119(1): 591-612.
- [55] GARCIA J A, BARAKOS G. Numerical simulations on the ERICA tiltrotor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 64(1): 1-35.
- [56] 王宗辉,杨云军. 倾转机翼/旋翼机过渡姿态规划分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(1): 20-26, 58. WANG Zonghui, YANG Yunjun. Design of transition attitude for tilt wing /rotor aircraft [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(1): 20-26, 58. (in Chinese)
- [57] CHEN H, CHEN B. Aerodynamic performance enhancement of tiltrotor aircraft wings using double-row vortex generators[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2021, 22(2): 802-812.
- [58] CHEN H, CHEN B. Lift enhancement of tiltrotor wing using a gurney flap[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 115: 12-18.
- [59] WERNICKE K G. Performance and safety aspects of the XV-15 tilt rotor research aircraft: AHS 77-33-14 [R]. USA: Technical Report, NASA, 1977.
- [60] 曹芸芸. 倾转旋翼飞行器飞行动力学数学建模方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012. CAO Yunyun. Research on mathematical modeling methods for tilt rotor aircraft flight dynamics [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [61] 张铮,陈仁良. 倾转旋翼机旋翼/机翼气动干扰理论与试验[J]. *航空学报*, 2017, 38(3): 31-39.

- ZHANG Zheng, CHEN Renliang. Theory and test of rotor/wing aero-interaction in tilt-rotor aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica*, 2017, 38(3): 31-39. (in Chinese)
- [62] MA T, WANG X, FU J, et al. Three-dimensional flight envelope for V/STOL aircraft with multiple flight modes [J]. *Aerospace*, 2022, 9(11): 691-706.
- [63] STEVEN A T, JOON W L. Interactional aerodynamics of the XV-15 tiltrotor aircraft during conversion maneuvers [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2022, 67(1): 1-13.
- [64] APPLETON W, FILIPPONE A, BOIDO N. Interaction effects on the conversion corridor of tiltrotor aircraft[J]. *The Aeronautical Journal*, 2021, 125(1): 2065-2086.
- [65] CHEN H. Numerical calculations on the unsteady aerodynamic force of the tilt-rotor aircraft in conversion mode [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019.
- [66] ZHANG Y, YE L, YANG S. Numerical study on flow fields and aerodynamics of tilt rotor aircraft in conversion mode based on embedded grid and actuator model [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1):93-102.
- [67] 刘佳豪, 李高华, 王福新. 倾转过渡状态旋翼-机翼气动干扰特性[J]. *航空学报*, 2022, 43(12): 214-225.
- LIU Jiahao, LI Gaohua, WANG Fuxin. Aerodynamic interference characteristics of rotor wing in tilting transition state [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica*, 2022, 43(12): 214-225. (in Chinese)
- [68] LYNN R R. The birth of the tiltrotor-The 1992 Alexander A. Nikolsky Lecture [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 1993, 38(1):3-16.
- [69] JOHNSON W. Dynamics of Tilting Proprotor Aircraft in Cruise Flight: TND-7677 [R]. Washington D C: NASA, 1974.
- [70] KVATERNIK R G. Studies in Tilt-rotor VTOL aircraft aeroelasticity in solid mechanics structures and mechanical design [D]. Case Western Reserve University, 1973.
- [71] JOHNSON W. Optimal control alleviation of tilting proprotor GUST response [J]. *Journal of Aircraft*, 1977, 14(3): 301-308.
- [72] JOHNSON W. Analytical modeling requirements for tilting proprotor aircraft dynamics [R]. California: Rotorcraft Aerodynamics & Dynamics NASA TM, 1975.
- [73] BEERINDER S, INDERJIT C. Whirl flutter stability of two-bladed proprotor/pylon systems in high speed flight [J]. *Journal of The American Helicopter Society*, 2003, 48(2): 99-108.
- [74] LI Z, XIA P. Aeroelastic stability of full-span tiltrotor aircraft model in forward flight [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(6): 1885-1894.
- [75] LI Z, XIA P. Aeroelastic modelling and stability analysis of tiltrotor aircraft in conversion flight [J]. *the Aeronautical journal*, 2018, 122(1): 1256.
- [76] MARIKA B, ANIELLO D, JACOPO B, et al. Wing structure of the next generation civil tiltrotor from concept to preliminary design [J]. *Aerospace*, 2021, 8(4):102-117.
- [77] ANIELLO D, GIANLUCA D, NICOLA P, et al. Structural scalability preliminary studies for the next generation civil tiltrotor composite wing [J]. *Aerospace*, 2023, 10(5): 478-506.
- [78] ANIELLO D, MARIKA B, JACOPO B, et al. Aeroelastic tailoring of the next generation civil tiltrotor technological demonstrator composite wing [J]. *Aerospace*, 2022, 9(7): 335-350.
- [79] MAIR C, TITURUS B, REZGUI D. Stability analysis of whirl flutter in rotor-nacelle systems with freeplay nonlinearity [J]. *Nonlinear Dynamics*. 2021, 104(1):65 - 89.
- [80] MAIR C, TITURUS B, REZGUI D. Stability and dynamical analysis of whirl flutter in a gimballed rotor-nacelle system with a smooth nonlinearity [C]. United Kingdom: 47th European Rotorcraft Forum, 2021.
- [81] HOUBOLT J C. Propeller-nacelle whirl flutter [J]. *Journal of the Aerospace Sciences*, 2015, 29(3): 333-346.
- [82] 胡国才. 新型倾转旋翼机气动弹性稳定性分析模型 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2006(6): 601-606.
- HU Guocai. Mathematical model and formulations of a new tilt-rotor aircraft for aeroelastic stability analysis [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2006(6): 601-606. (in Chinese)
- [83] 贾大伟, 韩景龙. 倾转旋翼机回转颤振研究 [J]. *直升机技术*, 2007(3): 45-51.
- JIA Dawei, HAN Jinglong. Research on rotational flutter of tiltrotor aircraft [J]. *Helicopter Technology*, 2007(3): 45-51. (in Chinese)
- [84] 贾大伟, 韩景龙. 倾转旋翼机悬停状态气弹响应分析 [J]. *南昌大学学报*, 2007, 31(1): 229-232.
- JIA Dawei, HAN Jinglong. Aeroelastic response analysis of tiltrotor in hover [J]. *Journal of Nanchang University*, 2007, 31(1): 229-232. (in Chinese)
- [85] 岳海龙. 倾转旋翼机倾转时旋翼/短舱/机翼耦合结构气弹响应研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- YUE Hailong. Research on aeroelastic response of coupled structures of rotors, nacelles, and wings during tilting of a tiltrotor aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [86] YUE H L, XIA P Q. A wake bending unsteady dynamic inflow model of tiltrotor in conversion flight of tiltrotor aircraft [J]. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52(11): 3188-3197.
- [87] 董凌华. 倾转旋翼/机翼气弹耦合动力学研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- DONG Linghua. Research on aeroelastic coupling dynamics of tiltrotor/wing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [88] 李治权. 倾转旋翼机转换和飞机飞行模式下的气弹动力学

- 研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- LI Zhiqian. Aeroelastic dynamics study of tiltrotor aircraft conversion and aircraft flight mode [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [89] 邓旭东, 胡和平. 倾转旋翼机螺旋颤振稳定性研究[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(6): 1041-1046.
- DENG Xudong, HU Heping. Research on whirl flutter stability of tiltrotor aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 36(6): 1041-1046. (in Chinese)
- [90] 王福新, 黄明其. 倾转旋翼飞行器的风洞试验技术综述[J]. 实验流体力学, 2005, 19(4): 85-89.
- WANG Fuxin, HUANG Mingqi. A summary on the wind tunnel test techniques for tilting-rotor aircraft[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(4): 85-89. (in Chinese)
- [91] ACREE C W, PEYRAN R J, JOHNSON W. Rotor design options for improving tiltrotor whirl-flutter stability margins[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2001, 52(4): 87-95.
- [92] HATHAWAY E L, GANDHI F. Tiltrotor whirl flutter alleviation using actively controlled wing flaperons[J]. AIAA Journal, 2006, 44(11): 2524-2534.
- [93] 刘周, 杨云军, 周伟江, 等. 基于 RANS-LES 混合方法的翼型大迎角非定常分离流动研究[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 372-380.
- LIU Zhou, YANG Yunjun, ZHOU Weijiang, et al. Study of unsteady separation flow around airfoil at high angle of attack using hybrid RANS-LES Method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2014, 35(2): 372-380. (in Chinese)
- [94] THIERRY L, PHILIPPE B, SYLVETTE C. Aerodynamic and aero-acoustic optimization of modern tilt-rotor blades within the adyn project [C] // 4th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Finland: 2004.
- [95] 邓景辉. 高速直升机关键技术与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(9): 529085.
- DENG Jinghui. Key Technologies and Development for High-Speed Helicopters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2024, 45(9): 529085. (in Chinese)
- [96] 韩景龙, 陈全龙, 员海玮. 直升机的气动弹性问题[J]. 航空学报, 2015, 36(4): 1034-1055.
- HAN Jinglong, CHEN Quanlong, YUAN Haiwei. Aeroelasticity of Helicopters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2015, 36(4): 1034-1055. (in Chinese)
- [97] YOUNG L A. Simulated tiltrotor aircraft operation in close proximity to a building in wind and ground-effect conditions [C] // 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2015.

(编辑: 马文静)