**舰载直升机空气动力学及其应用现状**

裴为诚1，刘畅1，李书1,2,\*

1.北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191

2.北京航空航天大学 宁波创新研究院，浙江 宁波 315800

摘 要：舰载直升机空气动力学主要研究旋翼尾迹与船体空气尾流之间的气动干扰。舰载直升机空气动力学的研究方法包括实验测量和数值计算两大类，前者以缩比模型的风洞或水洞定量实验为主，后者以求解 RANS 方程或大涡模拟等CFD方法为主。舰载直升机空气动力学的研究成果，可以为舰载直升机舰面动力学、飞行动力学、导航和飞控等应用研究提供支持，但后者目前所使用的旋翼气动模型仍以简化的入流模型为主。将舰载直升机空气动力学的研究成果与工程领域重要的应用问题相结合具有重要意义。

关键词：舰载直升机；空气动力学；气动干扰；旋翼尾迹；船体气流尾迹

中图分类号：V275 文献标识码：A 文章编号：ISSN(年)期-起始页码-页数

直升机以其特有的垂直起降、悬停和低空低速飞行能力，特别适合于在军舰、民用船只、海上钻井平台等起降条件和飞行环境较差的平台上执行任务。舰载直升机能够有效扩大船只作业半径、丰富海上作业科目、提升应对海上突发情况的能力。发展舰载直升机对于保障船只航行安全、维护海洋权益具有重要意义。世界各航空大国历来重视舰载直升机的发展，相继研制出各种构型的舰载直升机（见表1）。当前，我国海军正处于“近海防御型向近海防御与远海护卫型结合转变”[2]的关键时期。发展适合中国国情的舰载直升机，对于海洋强国战略的实施具有重要意义。

在舰载直升机的设计、使用和维护过程中，存在大量亟待解决的科学和工程问题。海面复杂多变的气流和海浪条件，船体对海面气流的扰动，海面、船体与旋翼之间的气动干扰，使得直升机在舰面执行起降任务的难度远大于其在陆地上执行同类任务。船只在海面航行时，船体结构对海面气流的扰动使得直升机起降平台附近的气流环境较为复杂，增加了直升机完成起降飞行任务的难度。海面的风速和风向、船只的航速和航向都是影响上述船只空气尾流的重要因素。海浪和海风引起的船体起伏、俯仰、滚转运动，使舰载直升机舰面动力学问题的复杂程度，大大高于直升机在地面和空中飞行时所对应的动力学问题。直升机旋翼尾迹与船体空气尾流之间存在复杂的相互作用，进一步增加了上述问题的复杂程度。

为确保舰载直升机安全完成舰面起降任务、减轻飞行员工作负担，有必要对舰载直升机空气动力学及以之为基础的舰面动力学、飞行动力学、导航与飞控等应用开展深入研究。国内外众多学者在这方面开展了大量研究工作，积累了丰富的研究方法和研究成果。本文综述了舰载直升机空气动力学的研究现状，并介绍了与之相关的一些应用。

表1国外主要舰载直升机[1]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 首飞时间 | 研制单位 | 型号 | 别名 | 构型 |
| 1954 | 美国西科斯基公司 | UH-34D/E | Sea Horse | 单旋翼带尾桨式 |
| 1959 | 美国西科斯基公司 | SH-3A | Sea King | 单旋翼带尾桨式 |
| 1959 | 美国卡曼宇航公司 | SH-2 | Sea Sprite | 单旋翼带尾桨式 |
| 1961 | 苏联卡莫夫设计局 | Ka-25 | Hormone | 双旋翼共轴式 |
| 1962 | 美国波音直升机公司 | CH-46 | Sea Knight | 双旋翼纵列式 |
| 1963 | 法国宇航公司 | SA321 | Super Frelon | 单旋翼带尾桨式 |
| 1964 | 美国西科斯基公司 | CH-53A | Sea Stallion | 单旋翼带尾桨式 |
| 1966 | 美国贝尔直升机公司 | TH-57A/B/C | Sea Ranger | 单旋翼带尾桨式 |
| 1973 | 苏联卡莫夫设计局 | Ka-27/28 | Helix | 双旋翼共轴式 |
| 1976 | 苏联卡莫夫设计局 | Ka-29 | Helix-B | 双旋翼共轴式 |
| 1978 | 法国宇航公司 | AS332/ AS532 | Super Puma | 单旋翼带尾桨式 |
| 1979 | 美国西科斯基公司 | SH-60B | Sea Hawk | 单旋翼带尾桨式 |
| 1981 | 苏联卡莫夫设计局 | Ka-32 | Helix-C | 双旋翼共轴式 |
| 1982 | 法国宇航公司 | SA365F | Panther | 单旋翼带尾桨式 |
| 1989 | 美国贝尔直升机公司 | V-22 | Osprey | 倾转旋翼 |
| 1997 | 俄罗斯卡莫夫公司 | Ka-52 | Alligator | 双旋翼共轴式 |

# 舰载直升机空气动力学

舰载直升机所特有的空气动力学问题，主要来源于旋翼尾迹与海面气流和、船体空气尾流之间的相互作用。舰载直升机离舰或着舰过程中，海面和船体阻挡旋翼尾迹向下游移动，引起的“地”面效应，也是影响直升机飞行安全的重要因素。研究海面、船体与旋翼之间的气动干扰，是舰载直升机空气动力学的重点和难点。

### 实验测量

Derby和Yamauchi[3]介绍了一套用于研究直升机与两栖攻击舰气动干扰问题的 1/48 缩比模型。该模型还被用于研究直升机与大型建筑物以及地面的气动干扰问题。此项目对倾转旋翼机、纵列式直升机、单主旋翼直升机三种构型都进行了缩比模型实验，获得的结果可用于指导全尺寸直升机舰上操纵以及编队飞行的研究。

Lamar等[4, 5]通过实验研究了利用柱状涡流发生器（Columnar Vortex Generator, CVG）对船体空气尾流进行控制的可行性。他们希望该技术能够应用于改善舰载机（包括直升机）的起降环境。

Herry和Vorst[6]利用粒子成像测速（Particle Image Velocimetry, PIV）和激光断层扫描显示（Laser Tomoscopy Visualizations, LTV）技术，在ONERA的L2风洞中测量了1/60简单外形军舰缩比模型和1/100真实外形军舰缩比模型两种船体的空气尾流。实验结果对于理解船体无侧滑航行时，船体结构后方气流的“双稳态（bi-stable）”现象，特别是二者之间的临界情况有很大帮助。

Kääriä等[7]通过开展水洞实验，研究了直升机处于舰体空气尾流中时的气动载荷特征。该实验是在一个1/54的直升机缩比模型上进行的，模型直升机的旋翼也进行了简化，气动载荷通过安装在机身内的六分量天平来测量。实验模拟了船头正面迎风与 45°侧风两种来流条件，沿直升机着舰机动飞行路径选取了几个固定点，测量了直升机在这几个点上的非定常气动载荷。结果表明，船头正面迎风时，直升机着舰过程中存在拉力不足（thrust-deficit）的区域；而在45°侧风条件下，存在压力墙（pressure-wall）区域。他们认为，这是由船体空气尾流中的速度梯度引起的，通过对船体空气尾流进行非定常CFD分析，解释了上述实验观察到的现象。尽管该实验是在固定直升机的条件下进行的，仍不能完全反映直升机着舰过程的真实载荷特征，但可作为验证计算模型的参照对象。

Friedman等[8]利用固定在（长32.9m）实验船后甲板上的模型直升机，研究了船体空气尾流与直升机旋翼尾迹的相互影响。通过安置在旋翼周围的风速计，测量了实验船静止、无侧风航行、侧风航行等条件下的流场信息。尽管该实验是在固定直升机的条件下进行的，但已将实验环境从室内转移到了真实的船只上，因而更接近舰载直升机的真实工作环境。

### 数值计算

Landsberg等[9]利用 FAST3D 非定常流动求解器，分析了船体空气尾流与旋翼入流的相互作用。FAST3D 求解器采用的是通量修正输运（Flux Corrected Transport, FCT）算法和虚拟单元嵌入（Virtual Cell Embedding, VCE）方法。旋翼对流场的影响是通过一个简化的桨盘模型来体现的，该模型中动量源沿桨盘均匀分布，因此只能反映旋翼整体的气动特性，而不能精细到每片桨叶。虽然计算模型较为简单，但计算结果仍能反映船体空气尾流中的非定常性对旋翼入流的影响。

Muijden等[10]基于结构网格，求解 雷诺平均纳维斯托克斯（Reynolds-Averaged Navier--Stokes, RANS）方程与RANS-大涡模拟（Large Eddy Simulation, LES）混合方法两种物理模型，分析了船体空气尾流，并与实验数据进行了比较。结果表明，RANS 方程的计算结果很好地反映了船体空气尾流的时间平均特征，而 RANS-LES 混合方法则进一步给出了更加接近物理真实的流场波动特征。上述计算结果已被用到直升机飞行模拟器中，并且得到了经验丰富的飞行员给出的积极评价。但只计算了船体空气尾流，并没有将直升机（特别是旋翼）包括在计算模型中，因此没有体现船体空气尾流与旋翼尾迹的耦合效应。

Crozon等[11]基于结构网格，利用作用盘方法对旋翼在船体影响下的入流特征进行了静态计算。作用盘方法的结果表明，当旋翼接近船体时，其入流会受到船体的显著影响，这种影响是非线性的，因而叠加法不再适用。为突破作用盘方法只能描述旋翼整体入流特征的限制，此文通过求解非定常 RANS 方程获得了每片桨叶的流场信息。通过该方法得到的旋翼拉力的计算结果与实验结果吻合较好，验证了方法的有效性。他们希望此文的计算方法有助于确定直升机着舰过程的安全飞行包线，但并没有给出具体的结论。就算例而言，此文也只给出了孤立旋翼与船体在气动方面的相互影响，没有考虑机身对气流的影响，也没有考虑旋翼动力学方面的问题。

He等[12]介绍了该公司在建立高置信度舰载直升机飞行仿真环境方面所做的工作。该仿真系统集成了直升机动力学、船体动力学以及非定常船体空气尾流方面的建模方法，为舰载直升机飞行训练和测试提供了一种高效的模拟工具。该仿真系统提供了三种不同精细程度的仿真模型：（1）旋翼尾迹由有限状态入流模型描述，船体空气尾流由平板模型描述；（2）旋翼尾迹由有限状态入流模型描述，船体空气尾流由 CFD 或实验数据描述；（3）旋翼尾迹和船体空气尾流由黏性涡粒子方法描述。

其中，前两种模型可用于实时仿真计算。此后，该公司的 Zhao 等[13]将黏性涡粒子方法与基于非结构网格的 CFD 求解器相结合，研究了旋翼尾迹与船体空气尾流的相互作用。基于此混合方法的计算结果，他们推广了Peters--He有限状态入流模型作，使其适用于实时仿真。

# 在工程领域的应用现状

### 舰面动力学

Wei等[14]分析了SH-2F型直升机在预定的甲板运动、甲板摩擦、定常风条件下的舰面动力学特性，用以确定该型直升机安全着舰和离舰的条件。对处于工作状态的旋翼、处于非工作状态的旋翼、折叠起来的旋翼以及机身分别进行了建模，以研究这4种情况的空气动力学特性。利用能量法推导了船体运动的动力学方程，包含三个线位移、两个角位移（滚转、俯仰）共5个自由度。此外，他们还分析了不同甲板摩擦条件对直升机舰面动力学特性的影响。基于上述分析模型，此文给出了一些定性和定量的安全指标，但有待实验数据的验证。

Wall[15]研究了直升机着舰和离舰过程中桨叶特有的气动弹性问题。在海上风速较大且旋翼转速较低时，桨叶容易出现较大变形，这是由桨叶的动力学特性、船体运动、船体空气尾流等因素共同作用所引起的。他们将柔性桨叶离散为若干刚性的微段，用以表现非线性的桨叶弯曲变形；基于实验数据对船体空气尾流进行建模，体现了甲板上方气流随时间、空间变化的非定常、非均匀的特征。此文反映了影响桨叶气弹响应的各种因素之间相互作用关系的复杂性，但分析所用气动模型依赖实验数据，可考虑用更一般的CFD方法代替。

### 飞行动力学

Jewell等[16]介绍了一项由美国海军航空发展中心支持的实验研究。该项研究的目的是在直升机操稳参数、舰面操纵流程、环境条件等方面，对飞行品质规范修订提出建议。Clement 等[17]建立了一种用于模拟直升机着舰飞行的实时仿真模型。该模型采用叶素法对旋翼进行气动建模；利用CFD 软件得到船体空气尾流数据，并经过三维快速傅里叶变换算法处理，使其适用于实时仿真。

Zhang等[18]利用全尺寸海上实验数据，识别出一个关于船体空气尾流速度垂直分量的功率谱模型。基于上述半经验的船体空气尾流模型和一个简化的旋翼气动模型，他们研究了船体空气尾流对旋翼拉力和滚转、俯仰力矩的影响。此后，他们又建立了一种用于模拟直升机与船体气动干扰并考虑地面效应的实时仿真模型。该模型中，船体由板块表示，旋翼尾迹由固定尾迹和预定尾迹模型表示，海面的影响（地面效应）通过镜像法体现。基于以上模型，将旋翼入流表示成有限状态形式，以便于进行实时仿真。该模型只适用于直升机在甲板上方悬停的配平问题。此后，他们还直升机与船体气动干扰问题中的地面效应问题进行了研究[19]。

Bogstad等以及CAE电子公司的 Giannias等[20-21]利用有限元求解器，基于 Euler 方程和非结构网格技术，研究了船体空气尾流，并将得到的数据整合到直升机飞行仿真软件中。Zan[22]对[21]中的一些观点提出了质疑，其认为特殊算例的计算结果与实验数据进行的对比，并不能证明该方法在更一般的条件下下仍然有效。实验和基于 Navier--Stokes方程的计算结果都显示，在某些情况下，船体空气尾流是由涡流主导的，并且存在强烈的流动分离现象。因此，[21]中基于 Euler 方程得到的结论并不可靠。

Lee 等[23-24]基于非结构网格，利用无黏CFD计算得到船体空气尾流，并将其引入到GENHEL直升机飞行仿真程序中。基于此模型，他们针对特定的直升机着舰和离舰飞行轨迹，设计了最优控制算法。结果表明，船体空气尾流的非定常性对于直升机着舰和离舰操纵具有显著影响，这正是舰载直升机与舰载固定翼飞机明细不同的地方。此文中的CFD计算模型没有考虑空气黏性，因而可能没有丢失了一些真实船体空气尾流的特征。在后续研究[25]中，他们引入了一种随机船体空气尾流模型，用以提高仿真的效率。该模型可用于优化飞行控制系统，以提高飞行器抗扰性能。

Hoydonck等[26]建立了一种用于模拟直升机着舰操纵的飞行力学模型。旋翼模型采用刚性桨叶，考虑二阶挥舞运动，用叶素法对主旋翼进行建模。旋翼入流采用一种改进的 Pitt--Peters 动态入流模型进行建模，通过引入四个状态变量来体现尾迹畸变对旋翼入流的影响。利用该模型，他们研究了直升机按预定路径着舰的飞行稳定性和控制方面的一些问题，但并没有考虑船体空气尾流对旋翼的影响。

Forrest等[27]将非定常CFD计算所得的船体空气尾流数据引入到直升机飞行模拟器中，得到了一个比较接近真实情况的飞行仿真环境。一些直升机着舰过程中真实存在的现象，在该仿真模型中得到了体现。通过飞行员的主观评价以及其他客观指标，验证了该模型的有效性，也验证了将船体空气尾流CFD计算结果引入飞行仿真的可行性。尽管该方法只考虑了船体空气尾流对旋翼尾迹的影响，但仍可应用于舰载直升机飞行员的日常训练。

Akinyanju[28]基于FLIGHTLAB直升机综合分析软件，对舰载直升机舰面操纵进行了建模和分析，并将仿真结果与实验数据进行了比较。他们采用叶素法、有限状态尾迹和自由尾迹对旋翼进行建模，基于CFD对船体空气尾流进行模拟，引入地面涡（Ground Vortex）模拟甲板和海面引起的地面效应。计算结果表明，船的航行速度、航向、旋翼转速、海况对直升机的舰面操纵具有显著影响，并且得到了实验数据的验证。但此文中的建模工作过于依赖软件提供的功能，因而不具有一般性，也不易引入更精细的气动或动力学模型。

### 导航与飞控

Ngo和Sultan[29]建立了一种用于着舰操纵的面向控制系统设计的非线性直升机飞行力学模型。该非线性模型具有隐式常微分方程的形式，其结果与基于悬停和前飞状态线化模型的结果吻合较好。此外，他们用一种简单的船体运动模型来模拟海面不规则运动对船体的影响。基于以上直升机模型和船体模型，他们利用模型预测控制（Model predictive control, MPC）方法，设计了一种能够完成自主着舰任务的控制系统。从工程实践角度看，该模型具有一定的应用价值，但该模型所用的Pitt--Peters 静态入流模型，并不能体现旋翼与船体在气动方面的相互影响。

Gevaert等[30]提出了一种全自动直升机舰面回收系统的设计方案。针对高海况条件下的舰载机着陆任务，设计了导航和控制系统算法。他们将六自由度直升机飞行动力学模型和船体运动数据用于全自动和远程人在回路仿真。

Negrin等[31]介绍了一种用于手动执行直升机在移动甲板上方低空悬停任务的叠加显示技术。分析和实验结果表明，将惯性参考系中的位置信息提供给飞行员，有助于提高直升机在移动甲板上方执行悬停任务的质量。

Hess[32]基于简化的船体运动和直升机飞行动力学模型，提出了一种适用于直升机全包线飞行控制系统设计的方法，并将该方法应用于直升机在高速航行的船只甲板附近执行位置保持任务。

# 结论

本文对舰载直升机空气动力学的研究现状进行了综述，并对与舰载直升机相关的一些应用问题作了简要介绍。舰载直升机空气动力学的研究，既包含所有直升机共有的一般性问题（即直升机空气动力学或旋翼空气动力学的研究内容），也有海面和船体与旋翼相互影响所带来的特殊问题。旋翼空气动力学研究的主要任务是，认识旋翼流场的特点和规律，为直升机的设计、使用和维护提供支持。舰载直升机舰面空气动力学研究的主要任务则是，深入理解旋翼尾迹和船体空气尾流的流动特点，把握海面、船体与旋翼之间的气动干扰规律，为舰载直升机舰面动力学、飞行动力学、导航和飞控研究提供支持。

对舰载直升机空气动力学的实验研究经历了从定性到定量，从宏观到微观的发展过程。定量实验方面，包含测力实验和测速实验两类。伴随实验技术的进步，测速实验经历了介入式热线测速技术、非介入式单点LDV技术、非介入式多点PIV技术的发展过程。目前，三维PIV技术已经能够对旋翼流场进行高分辨率测量，可以预见，该技术在未来一段时间里仍将是旋翼空气动力学研究的重要工具。

数值计算是舰载直升机空气动力学的另一类重要的研究方法。旋翼流场的非定常、非线性特征决定了问题的复杂性。为了真实还原旋翼流场的流动特征，必须解决好转捩、附面层分离、涡核粘性耗散、涡结构失稳破裂等复杂的流体力学问题。为了解决网格离散带来的涡量非物理耗散问题，网格自适应加密技术、涡量约束方法等新兴的流体力学计算方法正成为该领域的研究热点。

舰载直升机由海上作业、舰面起降所带来的特殊空气动力学问题，表现为海面自由来流、船只空气尾流与旋翼尾迹的相互作用，即气动干扰问题。美国、法国、荷兰等国在该领域开展了许多实验和计算方法研究，一些分析方法已经实现商业化，并成功应用到飞行仿真、导航和飞行控制系统设计等应用领域。相比之下，我国在这方面开展的研究工作十分有限。研究舰载直升机空气动力学，特别是海面、船只与旋翼之间的复杂气动干扰问题，对于确定直升机舰面起降的环境条件，制定和完善直升机舰面起降作业规程，提高舰载直升机的安全性和作业效率具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 倪先平. 直升机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.

[2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的军事战略[M]. 北京: 人民出版社, 2015.

[3] Derby M R A Y. Design of 1/48th-Scale Models for Ship/Rotorcraft Interaction Studies[D]. Orlando, Florida, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2003.

[4] Lamar J E A L. Subscale Ship Airwake Studies Using Novel Vortex Flow Devices with Smoke, Laser-Vapor-Screen and Particle Image Velocimetry[R]. Hampton, Virginia, United States: NASA Langley Research Center, 2007.

[5] Lamar J E. Modifying Ship Air-Wake Vortices for Aircraft Operations[R]. Hampton, Virginia, United States: NASA Langley Research Center, 2004.

[6] Herry B A V J. Towards the Impact of Flow Bi-Stability on the Launch and Recovery of Helicopters on Ships[D]. Virginia Beach, Virginia, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2011.

[7] Kääriä C H A W. Aerodynamic Loading Characteristics of a Model-Scale Helicopter in a Ship's Airwake[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(5): 1271-1278.

[8] Friedman C A D J. Measurements of Dynamic Interface Between Ship and Helicopter Air Wakes[D]. Dallas, Texas, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2015.

[9] Landsberg A A B J. Analysis of the Nonlinear Coupling Effects of A Helicopter Downwash with an Unsteady Ship Airwake[D]. Reno, Nevada, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1995.

[10] Muijden J V A B. Computational Ship Airwake Determination to Support Helicopter-Ship Dynamic Interface Assessment[D]. San Diego, California, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013.

[11] Crozon C A S R. Numerical Study of Helicopter Rotors in a Ship Airwake[J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(6): 1813-1832.

[12] He C A L M. Flight Fidelity Options to Enhance Rotorcraft/Ship Testing and Training[D]. Honolulu, Hawaii, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2008.

[13] Zhao J A R N. Physics-Based Rotorcraft/Ship Aerodynamic Interaction Modeling in Support of Real Time Flight Simulation[D]. Grapevine, Texas, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013.

[14] Wei F A B E. Analytical Modeling of SH-2F Helicopter Shipboard Operation[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(5): 877-885.

[15] Wall A. A Discrete Approach to Modelling Helicopter Blade Sailing[D]. Ottawa, Ontario, Canada: Carleton University, 2009.

[16] Jewell W A C W. Realtime Piloted Simulation Investigation of Helicopter Flying Qualities During Approach and Landing on Nonaviation Ships[D]. Reno, Nevada, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1986.

[17] Clement W F A G. Development of a Real-Time Simulation of a Ship-Correlated Airwake Model Interfaced with a Rotorcraft Dynamic Model[D]. Hilton Head Island, South Carolina, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1992.

[18] Zhang H A P J. Ship Airwake Effects on the Helicopter Rotor Aerodynamic Loads[D]. Scottsdale, Arizona, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1994.

[19] Zhang H A P J. Ground Effect Simulation Model for Rotorcraft/Ship Interaction Study[D]. Baltimore, Maryland, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1995.

[20] Bogstad M C A A. CFD Ship Airwake Analysis for Helicopter Flight Simulators[D]. Reno, Nevada, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1999.

[21] Bogstad M C A H. Computational-Fluid-Dynamics Based Advanced Ship-Airwake Database for Helicopter Flight Simulators[J]. Journal of Aircraft. 2002, 39(5): 830-838.

[22] Zan S. Technical Comment on "Computational-Fluid-Dynamics Based Advanced Ship-Airwake Database for Helicopter Flight Simulation"[J]. Journal of Aircraft. 2003, 40(5): 1007.

[23] Lee D A H J. Simulation of Pilot Control Activity During Helicopter Shipboard Operations[D]. Austin, Texas, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2003.

[24] Lee D A S N. Simulation of Helicopter Shipboard Launch and Recovery with Time-Accurate Airwakes[J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(2): 448-461.

[25] Lee D A H J. Analysis of Pilot Workload in the Helicopter/Ship Dynamic Interface using Time-Accurate and Stochastic Ship Airwake Models[D]. Providence, Rhode Island, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004.

[26] Hoydonck W R M V. Investigation on the Simulation and Handling Qualities for Helicopter Operating near Ship Decks[D]. Keystone, Colorado, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2006.

[27] Forrest J S A O. Ship-Helicopter Operating Limits Prediction Using Piloted Flight Simulation and Time-Accurate Airwakes[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(4): 1020-1031.

[28] Akinyanju T. Shipboard/Rotorcraft Simulation and Analysis[D]. Cincinnati, Ohio, United States: Union Institute and University, 2007.

[29] Ngo T D A S. Nonlinear Helicopter and Ship Models for Predictive Control of Ship Landing Operations[D]. National Harbor, Maryland, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2014.

[30] Gevaert G A S E. Shipboard Launch and Recovery of RPV Helicopters in High Sea States[D]. Palo Alto, California, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1978.

[31] Negrin M A G A. Superimposed Perspective Visual Cues for Helicopter Hovering Above a Moving Ship Deck[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics,. 1991, 14(3): 652-660.

[32] Hess R A. A Simplified Technique for Modeling Piloted Rotorcraft Operations Near Ships[D]. San Francisco, California, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2005.

作者简介：

李书（1965-） 男，博士，教授。主要研究方向：飞行器结构优化设计、飞行器结构动力学。

Tel: 010-82314622

Email: lishu@buaa.edu.cn

**Shipborne Helicopter Aerodynamics and the Status of Its Applications**

### Pei Weicheng1, Liu Chang1, Li Shu1,2,\*

*1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China*

*2. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo, 315800, China*

**Abstract:** Ship-borne helicopter aerodynamics mainly studies the aerodynamic interference between rotor wake and ship air-wake. The study methods include two categories: experimental measurements and numerical simulations. The former is mainly based on quantitative experiments in wind tunnels or water tunnels of scaled models, and the latter is mainly based on CFD methods such as solving the RANS equation or large eddy simulations. The study results can support studies on engineering problems, such as ship-borne helicopter deck dynamics, flight dynamics, navigation and flight control. However, the rotor aerodynamic model currently used by the applications is still a simplified inflow model. It is of great significance to combine the results of ship-borne helicopter aerodynamics with important engineering problems.

**Key Words:** ship-borne helicopter；aerodynamics；aerodynamic interactions；rotor wake；ship air-wake