航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Apr. 25 2023 Vol. 34 No.04 1-10

F-35C舰载机着舰试验分析与展望

田源，王月基，柳超
海军航空大学，山东 烟台 264001

摘　要：随着航空技术的高速发展，舰载机设计制造的技术集成度和复杂度不断提高，与此同时，技术的可靠性和安全性也面临新的挑战，需要通过严密的试验来发现。与陆基飞机不同，舰载机主要以航母为平台遂行各项任务，其舰机适配能力直接影响战斗力生成，因此列装前要进行严格的舰机适配试验。由于舰载机着舰面临的难度和风险最大，着舰试验便成为舰机适配试验的核心环节。本文以美军F-35C舰载机着舰试验为例，分析了F-35C和“尼米兹”级航母的结构特点，从地面试验、陆基模拟着舰试验和舰基实际着舰试验三个方面分析了着舰试验各阶段的实施内容和过程方法，结合舰载机着舰训练实践总结其主要做法和成功经验，并对未来舰载机着舰试验的发展方向进行了展望，以期为我国开展同类试验提供有益参考。

关键词：舰载机；着舰试验；舰机适配；进近模式；F-35C

中图分类号：V271.492　　**文献标识码：**A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2023.04.001

舰载机是航母编队战斗力的核心，是执行对海打击、制空作战、预警侦察、电子对抗等任务的主要力量。舰载机遂行作战任务的基本前提是能够在航母甲板上安全起降。由于海上环境的复杂性，舰载机起降历来被认为是一项难度极高的任务，尤其是着舰过程，往往伴随极大的风险挑战。据统计，舰载机飞行事故中，80%发生在着舰环节[1]，最近一次较为严重的事故是2022年1月发生在南海的F-35C坠机事故。为保证装备可靠性，舰载机交付列装前必须经过严格的着舰试验，从源头入手最大限度降低安全风险。

舰载机着舰试验的主要目的是验证着舰过程中舰、机两方面装设备的协同能力。近年来，国内外专家学者针对舰载机飞行试验开展了一系列研究，A.David等[2]针对F-35B舰载机与英国“伊丽莎白女王”级航母的整合问题进行了总结，分析了舰载机垂直起降的策略方法。王擎宇等[3]从试验体系的角度简要梳理了F-35C舰载机舰机起降试验的组成环节。王春晖等[4]从设计的角度提出F-35C舰载机与航母的适配性内容体系和方法。郭润兆、刘相春等[5-6]分析了舰载机与航母之间的约束接口关系，提出了较为完整的舰载机舰机适配性研究框架。张蓉等[7]针对舰载机舰载适用性试飞内容筹划、飞行人员的培训和选拔等问题，从美、俄舰载机舰载适用性试飞，以及飞行员培训的实际做法入手进行了总结。颜世伟等[8]综合分析了EA-18G电子战飞机在陆上和海上的试验评估环境、试验风险，以及试验需要人员、物资等因素，制定了相应的试验方法和试验评估内容，并归纳总结了海上试验需重点关注的问题。

目前，从国内外研究情况来看，专门针对舰载机着舰试验开展研究的文献还比较少，且内容上更加侧重于框架、体系研究，对一些关键技术的试验缺乏深入分析。为此，本文以美军F-35C舰载机为例，重点对该机着舰试验各阶段的具体实施内容和过程方法进行深入研究，结合舰载机着舰训练实践总结主要做法和成功经验，并对未来舰载机着舰试验的发展方向进行展望，以期为我国开展同类试验提供有益参考。

1 试验平台

美军F-35C舰载机着舰试验主要以F-35C舰载机和“尼米兹”级航母为平台展开。美国海军现役“尼米兹”级航母共10艘，此次试验根据不同阶段任务，分别由“尼米兹”号（CVN 68）、“德怀特·艾森豪威尔”号（CVN 69）和“乔治·华盛顿”号（CVN 73）具体承担，通过实地试飞验证F-35C舰载机着舰适配能力。

1.1 F-35C舰载机

F-35C是一款舰载多用途第五代战斗机[9-13]，其机体结

收稿日期：2022-09-29；退修日期：2023-02-08；录用日期：2023-03-07
引用格式：Tian Yuan，Wang Yueji，Liu Chao.Analysis and prospect of the F-35C carrier landing test[J].Aeronautical Science & Technology，2023，34(04)：1-10.田源，王月基，柳超.F-35C舰载机着舰试验分析与展望[J].航空科学技术，2023，34(04)：1-10.

构如图1所示。它采用单座舱、单发动机设计，由普惠公司研制的F135发动机提供动力，最大可产生约178kN推力。该机具有良好的隐身性能，可全天候执行作战任务，主要用于对地攻击和制空作战。与同系列的F-35A和F-35B相比，F-35C的基本结构并无太大区别，但为适应舰载起降的特殊要求，采用了一些专门设计并加强了内部结构。例如，F-35C拥有更大的机翼面积、更大的全动式水平尾翼，增加了操纵面尺寸，在机翼外翼段后缘增加了副翼，这些改进有助于提高舰载机低速状态下的操纵性，实现航母进场精确控制、精准着舰。此外，F-35C还采用了舰载机典型的可折叠机翼，以减少舰载机驻留甲板时所占用的甲板空间，并采用了内埋式可收放尾钩。F-35C全机共有11个武器挂点，其中4个位于内部，7个位于外部，可搭配使用先进中程空空导弹和空对地武器。

F-35C舰载机主要采用了三种进近控制技术，分别是手动模式、进场动力补偿（APC）模式和增量轨迹（DP）模式[14-18]。其中，手动模式为：当飞行员截获下滑道后，通过操纵驾驶杆和油门杆，使舰载机保持固定的下滑角、俯仰角、速度和下沉率，即采用等角下滑的方式直至触舰。这种模式的缺点是对飞行员的操纵技术要求很高。APC模式的主要特点是通过引入动力补偿系统，对发动机推力进行控制，实现自动调节舰载机进场时的速度和高度，提高下滑轨迹的精度，保持飞机的低速稳定性。而在DP模式下，当着舰过程中纵向杆偏离中心位置时，轨迹会进行相应的修正；而当纵向杆处于中心位置时，飞控系统会根据下滑角和航母航速计算出着舰的基准轨迹，并控制飞机沿基准轨迹飞行，减轻飞行员操纵负担。

1.2 “尼米兹”级航母

F-35C的设计初衷就是与“尼米兹”级航空母舰[19-22]兼容，并获得作战支持，因此着舰试验主要在“尼米兹”级航母上完成。“尼米兹”级航母甲板基本结构如图2所示。甲板长约332m，宽76.8m，满载排水量约10×10^4t。该型航母采用斜角飞行甲板结构，甲板长约240m，倾斜角为9°。采用这种结构便于多架舰载机同时开展起降作业，互不干扰。甲板配备4个C-13蒸汽弹射器、4个Mk7拦阻装置以及1套菲涅尔透镜光学助降系统。甲板下设1个机库，甲板两舷配备了4部升降机，其中3部位于右舷，1部位于靠近舰尾的左舷，舰载机通过升降机完成机库与甲板间的调运。

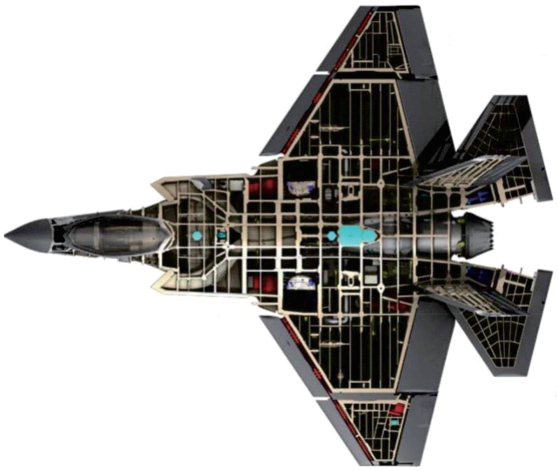

图1 F-35C舰载机结构示意图

Fig.1 The structure of F-35C

2 试验分析

在试验平台的基础上开展F-35C舰载机着舰试验，具体实施过程中，遵循舰机适配试验的固有方法，按照由地面到空中、由陆基到舰基的顺序开展，有层次、有侧重地稳步推进。

2.1 地面试验

地面试验主要是指在地面条件下测试舰载机的结构性能，以及地面环境模拟部分飞行状态下的特性。通过试验获取必要的数据来验证机体结构、强度等设计指标，从而尽可

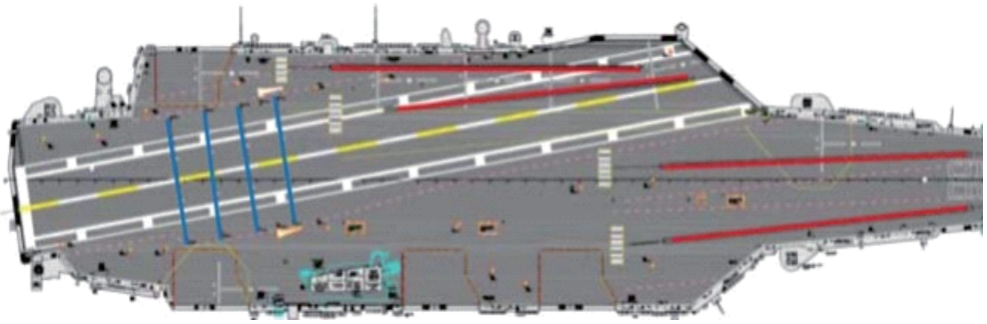

图2 尼米兹级航母甲板结构图

Fig.2 The structure of Nimitz-class aircraft carrier deck

能前移风险点，排除安全隐患，为空中试飞创造良好条件。

2.1.1 静态载荷试验

在试验环境下按照极限工况对机身、机翼、水平尾翼、垂直尾翼施加压力，以评估限制载荷和极限载荷下飞机的结构强度。例如，对于F-35C水平尾翼，试验中被施加了超过150%限制过载，如图3所示。试验结果表明其结构的可靠性，为拓宽过载包线提供了可能[23-24]。

图3 F-35C舰载机水平尾翼载荷试验

Fig.3 F-35C horizontal tail down bending test

2.1.2 耐久性试验

该试验主要考察各类飞行条件下飞机结构本身对于抵抗破裂以及疲劳开裂等方面的能力。由于飞行中产生的机动载荷、抖动载荷对机身损害较大，F-35C耐久性试验采用专用试验平台循环施加机动载荷、抖动载荷的方式，模拟实际飞行1000h所承受的机体损伤。通过反复试验，确保F-35C能够达到8000飞行小时的疲劳寿命[24-25]。此外，还针对其承担的航母弹射起飞和阻拦挂索任务开展了专项循环载荷试验。

2.1.3 落震试验

该试验的主要目的：一是检验F-35C舰载机功能和结构设计是否满足航母着舰要求；二是收集试验载荷和飞机响应数据，对后续实际飞行中的性能表现做出预测。落震试验环境如图4所示。试验中F-35C舰载机从接近2.5m高空坠落，同时附带俯仰角8.8°、滚转角2°等不同姿态[26-29]。通过试验，测量了最大下沉速度时起落架载荷及对机体响应情况，验证了舰载机着舰高过载条件下起落架收放功能、武器弹舱开闭情况、燃油箱密封情况等。

图4 F-35C舰载机落震试验

Fig.4 F-35C drop test

2.2 陆基模拟着舰

F-35C舰载机陆基模拟着舰参照舰基实际着舰设置相关条件，其着舰下滑示意图如图5所示。

2.2.1 高下沉率试验

舰载机着舰过程中，下沉率是需关注的一个重要因素。过高的下沉率可能造成机体和飞行员承受较大的过载，进

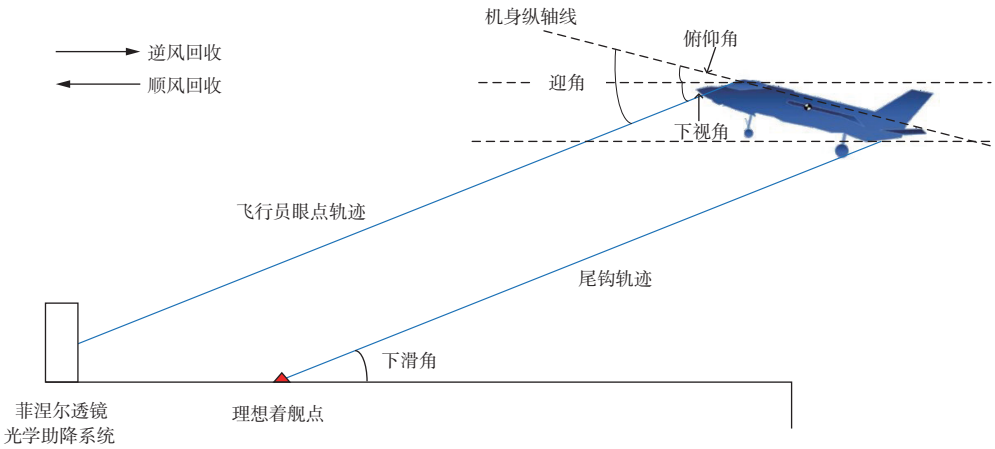

图5 舰载机陆基模拟着舰示意图

Fig.5 The diagram of field carrier landing

而影响飞行安全[30-32]。因此，着舰试验期间要着重摸清高下沉率条件下舰载机的状态表现。根据着舰姿态的不同，具体可细分为标准俯仰姿态、机头向上姿态，以及机头向下姿态下的高下沉率着舰试验。

（1）标准俯仰姿态高下沉率

试验目标是在标准俯仰姿态下以不小于6.4m/s的下沉率完成着舰。这项测试需要完成三次以上并且至少有一次阻拦挂索，使主起落架达到最大压缩载荷的75%以上。试验期间每个飞行日都要以3.5°下滑角开始，在确保飞机、仪表和拦阻装置正常运行后，下滑角以0.5°增量递增，当增加到5.0°时，下滑角增量减少为0.25°，直到完成任务[33]。

（2）机头向上高下沉率

试验目标是在高于标准俯仰角2.2°，也就是飞机处于高俯仰姿态下，实现不小于6.4m/s的下沉率[33]。试验方法与标准俯仰姿态情况类似。通常情况下舰载机着舰要保持恒定的迎角，而根据试验要求，下滑角度会逐步递增，造成舰载机俯仰姿态不断变小。所以，为了达到所需的高俯仰姿态，飞行员会增大迎角飞行，随着迎角增加，舰载机空速相应减小，空速减小意味着下沉速度降低，偏离了试验目标要求。为达到既定的下沉率，通常可采用的方法是调整舰载机着舰时的风向。在陆基模拟着舰环境下，由于着舰跑道固定，因此调整风向的方法是选择满足理想自然风条件的时段开展试验。对于机头向上高下沉着舰，最优条件是无风或顺风，这样可以使舰载机在目标俯仰姿态所需的迎角下飞行，达到要求的下沉率，同时不影响飞行员视场，不增加安全风险。

（3）机头向下高下沉率

试验目标是在小于标准俯仰角4.5°，也就是飞机处于机头向下的姿态，达到不低于6.4m/s的下沉率。试验同样受甲板风的影响，但与机头向上高下沉率试验情况有所不同。随着下滑道角度的增大，舰载机俯仰角会对应减小，但可能仍然达不到预期的机头向下姿态。为了进一步减小俯仰角，就需要减小迎角。随着迎角减小，空速会增加。当迎角减小到一定程度时，空速过高，甚至会高于最大啮合速度，影响安全。解决方法是根据气象条件，选择理想自然风时段，利用逆风完成试验，理想着舰逆风大小是2.5~5.0m/s[33]。

高下沉率试验采用了DP进近模式，这样无论飞行员技术水平或环境条件如何，都能保证试验结果的一致性和可重复性。DP模式是一种非常重要和实用的着舰操纵模式，这种模式下能够提高试验效率，可避免由于天气等因素而造成的延误。

2.2.2 滚转与偏航试验

舰载机着舰过程中，坡度和航向是需要经常调整修正的飞行参数，直接影响舰载机的安全着舰，因此在试验过程中需对滚转和偏航情况进行实践验证。

（1）滚转试验

滚转试验是为了模拟飞行员对中偏差修正慢，或是航母在海况影响下横摇运动，还可模拟飞机产生轻微抖动或姿态不稳定，具体包括带左坡度和右坡度飞行。试验目标是舰载机保持在6°坡度下，达到不小于5.2m/s的下沉率[33]，带坡度拦阻试验如图6所示。

图6 F-35C准备进行带坡度拦阻

Fig.6 F-35C conducting a roll-only arrestment

为了实现带坡度阻拦，飞行员将人为飞出1.5~3.0m对中偏差，偏差方向与坡度方向相反（比如带右坡度时对中偏左），具体偏差量取决于侧风的方向和大小。当舰载机处于下滑道适当高度时，着舰指挥官通过无线电发出“调整坡度”的指令，飞行员收到指令后将调整并保持所需的飞机倾斜角度。其间着舰指挥官与飞行员要共同把控安全。这其中需要注意的问题是，如果飞行员过早加入坡度，容易造成机身纵轴与跑道中线的偏差过大，飞机触地时速度矢量偏向跑道一侧，影响安全；此外，还需考虑飞机的滚转响应需要一定时间，为了达到目标坡度，一般飞行员的输入操纵会超过预期，然后再回调，但应避免因超调造成试验失效。

（2）偏航试验

试验目标是舰载机保持固定偏航角（大于5°）的情况下，达到不小于5.2m/s的下沉率。试验中着舰指挥官在适当时机通过无线电发出“偏航”指令，飞行员操纵方向舵偏转，调整飞机到距跑道中心线横向偏移约1.5m的位置，偏移方向根据风向确定，这样在侧风中进行试验可限制由偏

航引起的横向漂移[33-35]。安全方面需要注意的问题是，如果着舰指挥官或飞行员过早控制舰载机偏航，飞机与跑道中线的偏差容易过大，飞机在触地时的方向矢量会偏向跑道一侧，造成安全隐患。

（3）滚转、偏航复合试验

除设置了滚转、偏航单一要素偏差外，还要进行二者间的复合偏差试验，包括滚转、偏航同向试验和反向试验。同向试验的目标是实现下沉率不小于5.2m/s，并且飞机的滚转和偏航在同一方向上，滚转角和偏航角都不小于5°[33]。反向试验即飞机的滚转和偏航方向相反，其余参数要求与同向试验一致。试验在侧风下进行，一方面可以限制速度矢量的横向分量；另一方面便于设置偏航角。与滚转和偏航单要素试验类似，飞行员需要为着舰时可能出现的跑道偏离做好准备，防止挂索失败。

试验采用DP模式。飞行员利用先进的控制率和辅助设备来保持恒定的下沉率，能够将注意力从下滑道保持上转移。采用DP模式进行滚转试验时，舰载机在触地前能够较准确地设置坡度，几乎不需要横向操纵杆输入；进行偏航试验时，方向舵的偏转几乎不影响飞机的滚转角，这样便于飞行员飞出极限参数。

2.2.3 最大啮合速度试验

舰载机最大啮合速度受尾钩载荷、拦阻装置、下沉速度等多方面限制，着舰挂索时一旦超过最大啮合速度，则因无法完成阻拦必须复飞，甚至危及飞行安全[36-37]。最大啮合速度在机型设计制造阶段已经确定，但仍需通过实地试飞进行验证。

（1）正常状态最大啮合速度

试验目标是利用最大啮合速度着舰所得数据，测量并验证尾钩轴向载荷的设计极限。为了评估载荷，飞机要在标准进近迎角下，从大约300m的高度下降，以不低于5.2m/s的下沉速度完成拦阻[33]，并评估尾钩过载，之后按照目标速度进行下一次拦阻。当舰载机尾钩达到最大纵向载荷限制，并且触舰点位置在距跑道中心线横线偏移1.5m范围内时，试验完成。其间如果舰载机或拦阻装置损坏，则停止试验。

（2）偏心状态最大啮合速度

为得到更加全面的试验数据，除正常状态下的试验外，还需要对阻拦索左右两侧挂索位置进行测试，也就是偏心状态下的最大啮合速度试验，偏心距依次设置为3m、4.5m和5.5m[33]。进入5.5m最大偏心距后，逐渐增加啮合速度，直到达到尾钩限制载荷或拦阻装置极限。

2.2.4 空中挂索试验

试验目标是使前起落架承受高载荷，同时尾钩达到不少于85%的限制载荷[33]。试验方法是飞行员在快要接近甲板时做出一个机头向上俯仰机动，使尾钩在主起落架触地前挂索，这种类型的着舰也被称为“空中挂索”。“空中挂索”瞬间，舰载机机头迅速下俯，前起落架触地时载荷达到峰值。实际上从F-35C的几何形状来看，在最优进近迎角下，主起落架轮胎底部低于尾钩挂索位置，着舰时主起落架先于尾钩接触甲板，因此发生空中挂索的可能性较低。

为便于达成目标，试验采用了最低安全下滑角2.25°，舰载机保持迎角15°飞行。这种情况下，尾钩和主起落架触地点在同一个水平面上。在较高迎角下开展试验，也会带来一定难度，例如，飞行员修正下滑位置偏高时，向前的纵向输入会导致迎角和俯仰角快速减小，尾钩位置抬高，下沉率增大，不利于实现空中挂索；相反，当修正下滑位置偏低时，向后的纵向输入会导致迎角和俯仰姿态增加，尾钩位置降低，可能造成飞机在回到理想下滑道之前就已经触地，导致挂索失败。此外，在较高的迎角下飞行会限制飞行员前方视野，这些因素结合在一起，大大增加了试验难度。

2.3 舰基实际着舰

通过一系列陆基试验，可初步了解舰载机在陆基环境中的飞行品质。当陆基条件下机体结构、飞行质量和性能达到预期时，就可以进入舰基试验。

2.3.1 舰基试验过程

舰基试验从2014年11月至2016年8月分阶段开展，历时两年多完成，其间共开展了三个航段的试验任务。

（1）首轮海试

首轮海试于2014年11月在圣地亚哥外海实施，为期两周。试验目的是评估F-35C舰载机与飞行甲板作业的一体化程度，从而进一步确定该型机航母作战参数。来自马里兰州帕图克森特河海军航空站的两架F-35C舰载机参与试验，在“尼米兹”号（CVN 68）航母上共完成124次拦阻挂索[38]，如图7所示。2014年11月13日，F-35C舰载机完成了首次夜间着舰。试验完成了全部计划测试点，F-35C的卓越性能也得到充分展示。

（2）第二轮海试

第二轮海试于2015年10月在远离维吉尼亚海岸的海上实施，两架来自第23打击测试与评估中队的F-35C舰载机在“德怀特·艾森豪威尔”号航母上进行着舰试验，共完成66次拦阻着舰[39]，如图8所示。试验中两架舰载机还挂载了GBU-31、联合制导攻击武器JDAM以及AIM-120先

图7 F-35C在“尼米兹”号航母上进行首次着舰

Fig.7 F-35C first lands on the aircraft carrier “Nimitz”

图8 F-35C在“艾森豪威尔”号航母上着舰

Fig.8 F-35C lands on the aircraft carrier “Eisenhower”

进中距空空导弹，这也增大了舰载机的着舰重量（质量）。试验中的一个重点是高着舰逆风环境下舰载机着舰状态，其间甲板着舰作业区风速大约在40kn（74.08km/h）。在既定的试验环境下，舰载机表现出了良好的操控性能。

（3）第三轮海试

第三轮海试于2016年8月在远离维吉尼亚海岸的海上实施，F-35C舰载机在“乔治·华盛顿”号航母上开展着舰试验，如图9所示。这也是F-35C舰载机列装前的最后一次海试飞行。本轮试验旨在通过不同挂载下的飞行、满挂载飞行、不同着舰操纵模式下飞行、不同侧风下的飞行等多种途径，尽可能扩大飞行包线[40]。此外，还测试了联合精密进近着舰系统的可用性。

2.3.2 操纵品质评估

为了评估舰载机操纵品质，试验期间试飞员会有意设置下滑道和对中偏差，并尝试不同空速下的进近着舰。前期主要以单一偏差为主，如起始高度高或对中偏左等。在

图9 F-35C在“乔治·华盛顿”号航母上着舰

Fig.9 F-35C lands on the aircraft carrier “George Washington”

对起始偏差进行评估后，试飞员会将偏差保持到中间段，并在接近段进行修正。如果在接近段期间没有完成正确修正，着舰指挥官将会命令飞行员复飞。在评估了单一偏差后进行复合偏差试验，如下滑位置偏低、低空速、高坡度等多个要素的组合。由于舰载机着舰会受环境影响，特别是受甲板风的影响显著，试验根据着舰时的逆风大小，分别设置了低风速（8~10m/s）、理想风速（10~15m/s）、中等风速（15~20m/s）和高风速（18~20m/s）等不同等级[33]，通过不同典型环境下的试验，使装备性能得到充分验证。

舰基试验期间，手动模式、APC和DP三种进近控制模式均得到了检验。这三种进近模式都表现出一级操纵品质，但DP模式仍是首选，因为在操纵品质上，不仅能够达到预期性能，而且减少了飞行员的工作量。其中部分参数指标在试验后进行了改进，例如，在最初的试验计划中要求，F-35C进近着舰时后缘襟翼设置为30°，试验中发现当后缘襟翼设置为15°时，配合DP模式，下滑道修正和保持更容易[33]。通过改进飞机操纵品质，减少飞行员工作量，使尾钩触舰点离散度降低，从而增加了挂索成功的概率。DP优势是减少了训练条件限制，增加了安全边际和操纵能力。由于其一级操纵品质、飞行员工作量减少、触舰点分散度小，在后续利用F-35C舰载机开展航母认证过程中，飞行员也都成功地使用了这项技术，认证期间舰载机均能够降落在甲板上的理想位置。较高的着舰成功率有助于提高舰载机的回收效率，可靠的回收效率为舰载机下一次出动争取了更多时间，进而将会提高其作战能力。

3 总结与展望

舰载机着舰试验是一项涉及多领域多学科的专业化工

作，它将飞行品质、飞机性能、机体载荷等理论相结合，采用系统方法评估飞机在着舰过程中与航母的适配能力。本文从试验平台的基本结构特点出发，按照实施流程对地面试验、陆基模拟着舰试验和舰基着舰试验等方面进行了分析，相关经验做法可对后续同类试验的开展形成以下启示：

（1）一体化设计为试验的顺利实施提供了重要保证。F-35C是一款集多种前沿技术于一体的舰载第五代战斗机，在机体结构、进近着舰操纵、机载设备集成等方面采用了诸多先进设计，因此其着舰试验具有更高的难度和复杂度，需从顶层设计出发做好体系规划。在美军F-35C舰载机着舰试验中，试验团队依据《联合合同规范》[6]等文件要求进行体系设计，紧贴任务目标进行整体规划，实现试验内容有重点、测试项目全覆盖，充分验证着舰飞行中涉及的所有功能要求，为舰载机融入航母战斗编队打下坚实基础。

（2）科学的实施方法为试验的安全高效开展提供了有力支撑。由于舰载机有着特殊的作业环境，其较陆基飞机着陆面临更大的风险。试验坚持由易到难、循序渐进的原则，从地面到空中、从陆基到舰基、从单点到多点，逐步验证了着舰下滑涉及的空速、下沉率、迎角、滚转、偏航等各个要素及其关联关系，通过试验科目间重复性、交叉性验证，准确摸清新装备技术状态，最大限度规避安全风险。

（3）敢于尝试的态度为摸清装备性能边界开辟了广阔道路。武器装备试验不同于日常战备训练操作，需对装备的各项技术战术指标进行全方位检验，因此不仅要试验常规状态，还要涉及各类特殊情况、极限状态。按照这一要求，试验团队开展了不同飞行姿态、不同操纵模式、不同环境、不同偏差下着舰等多种类别试验。通过大量尝试，人为创造极限条件，探明装备特性，对可改进的性能点及时反馈优化，确保装备质量满足要求。

（4）服务实战实训的原则为试验的开展提供了明确的目标指向。着舰试验的最终目的是服务于舰载机作战能力提升。试验中为提高舰载机着舰成功率，尝试了诸如DP进近模式的新技术，减轻了飞行员的操纵负担，同时使着舰精准度大大提高，而高回收效率为舰载机再次出动争取了更多的时间，使飞行员能够将更多的精力聚焦于作战能力提升，对战斗力发展起到促进作用。

通过对F-35C舰载机着舰试验的深入分析可以看出，该领域研究已取得一定成果。但结合技术发展及当前实际，在舰载机着舰试验领域仍有许多问题有待深入研究。为此，在上述研究基础上，我们对下一步舰载机着舰试验的开展情况进行了一些展望：

（1）基于全自动着舰系统的着舰试验。AWALS从舰、机两个方面进行关键技术突破，使舰载机在无须飞行员干预的情况下完成着舰，可大幅减轻飞行员操纵负担，也可为无人机着舰提供技术保障。AWALS是当前舰载机着舰技术的研究热点，也是未来的重要发展方向。从公开发表的文献中可以看到，美军已掌握全自动着舰技术，并进行了军事应用，但目前针对全自动模式下舰载机着舰试验的研究还缺少细节描述，今后我们将结合AWALS发展情况进行深入研究。

（2）特种飞机的着舰试验。特种飞机是以预警机、侦察机、干扰机和反潜机为代表的一类大型空中平台，在信息化战争中发挥着重要作用。目前在舰载战斗机的着舰方面的研究相对成熟，世界各航母国家均掌握了着舰技术，但在特种飞机着舰方面的发展还比较滞后，如何构建完善的特种飞机着舰试验体系，加快特种飞机与航母的融合进程，是当前和今后一个时期我们需要重点解决的一个问题。

（3）复杂气象条件下的着舰试验。当前舰载机着舰试验的开展主要在常规条件下进行，而在实际执行任务期间，舰载机面临的是复杂多变的海洋环境，低能见度、高海况、高甲板风等复杂气象条件给舰载机着舰带来严峻挑战。从作战运用上看，复杂条件下舰载机自身的着舰能力以及与航母之间的协同配合能力更具实战意义，因此这也将是今后的一个研究重点。 AST

参考文献

[1] 曲浩，段卓毅，郭润兆. E-2D预警机与舰载战斗机着舰难度对比研究[J]. 西北工业大学学报，2017，25(增刊):63-69.
Qu Hao, Duan Zhuoyi, Guo Runzhao. A comparative study on the landing difficulty between the E-2D AWACS and the carrier based fighter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 25(Supplement): 63-69.（in Chinese）

[2] David A, Rob B, Richard P,et al. Integration of the F-35 joint strike fighter with the UK Queen Elizabeth class aircraft carrier [C]//International Powered Lift Conference, 2013.

[3] 王擎宇，李启军，谭大力，等. 国外航母舰载机起降适配性试验体系研究[J]. 船舶工程，2021，43(2): 14-17.
Wang Qingyu, Li Qijun, Tan Dali,et al. Research on the foreign carrier aircraft launch and recovery suitability testing system [J]. Ship Engineering, 2021, 43(2): 14-17.（in Chinese）

[4] 王春晖. 美国F-35舰载机与舰船平台的适配性设计分析[J]. 舰船科学技术，2018，40(8): 149-152.

Wang Chunhui. Analysis of the ship suitability design of the F-35 fighter[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(8): 149-152.(in Chinese)

[5] 郭润兆,段卓毅,李小卫. 舰载机机舰适配性体系研究[J]. 航空科学技术,2014,25(3):10-13.
Guo Runzhao, Duan Zhuoyi, Li Xiaowei. Study on adaptation system of carrier-based aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014,25(3): 10-13.(in Chinese)

[6] 刘相春. 航空母舰舰机适配性技术体系[J]. 中国舰船研究,2016,11(3): 1-4,10.
Liu Xiangchun. A technology system for the carrier/air vehicle integration[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(3): 1-4,10.(in Chinese)

[7] 张蓉,郭斌. 国外舰载机舰载适用性试飞经验与启发[J]. 工程与试验,2012,52(2): 7-9.
Zhang Rong, Guo Bin. Experience and illumination of foreign aircraft carrier suitability flight test[J]. Engineering & Test, 2012, 52(2): 7-9.(in Chinese)

[8] 颜世伟,谭大力,耿建明. 美国海军EA-18G舰载机PALS海上试验分析[J]. 舰船科学技术,2019, 41(7): 154-157.
Yan Shiwei, Tan Dali, Geng Jianming. Analysis on the EA-18G sea trials for flying qualities, performance and precision approach and landing system[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(7): 154-157.(in Chinese)

[9] Paul M B.Genesis of the F-35 joint strike fighter[J].Journal of Aircraft, 2009,46 (6):1825-1836.

[10] Rosa R. F-35 joint strike fighter lightning II avionics[C]//Proceedings of 2008 IQPC Military Avionics Conference. London: IQPC, 2008.

[11] 晨枫. F-35闪电II战斗机[M].北京:航空工业出版社,2014.
Chen Feng. F-35 joint strike fighter lightning II [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.(in Chinese)

[12] Chris W, Bruce A B,Jeffrey A C,et al.F-35 air vehicle technology overview[C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta Georgia, 2018.

[13] Arthur E S, Robert B. F-35 program history[C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta Georgia, 2018.

[14] Denham J W. Project magic carpet: Advanced controls and displays for precision carrier landings[R]. AIAA 2016-1770, 2016.

[15] 张志冰,张秀林,王家兴,等. 一种基于多操纵面控制分配的IDLC人工着舰精确控制方法[J]. 航空学报,2021, 42(8): 525840.
Zhang Zhibing, Zhang Xiulin, Wang Jiaxing, et al. An IDLC landing control method of carrier-based aircraft based on control allocation of multiple control surfaces[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8) : 525840.(in Chinese)

[16] 段卓毅,王伟,耿建中,等. 舰载机人工进场着舰精确轨迹控制技术[J]. 航空学报,2019,40(4): 622328.
Duan Zhuoyi, Wang Wei, Geng Jianzhong, et al. Precision trajectory manual control technologies for carrier-based aircraft approaching and landing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(4): 622328.(in Chinese)

[17] 吴文海,汪节,高丽,等. Magic Carpet着舰技术分析[J]. 系统工程与电子技术,2018, 40(9): 2079-2091.
Wu Wenhai, Wang Jie, Gao Li, et al. Analysis on Magic Carpet carrier landing technology[J]. Systems Engineering and Electronics,2018, 40(9): 2079-2091.(in Chinese)

[18] Lockheed Martin. New F-35C flight control software improves handling characteristics during carrier landings [EB/OL]. (2016-08-31). http://www. navair. navy. mil/index. cfm?fuseacton=home.NAVAIRNewsStory&id=5076.

[19] 陈文涛,韩超,黄赓.美国尼米兹级航母的建造、训练、认证、部署、维修周期的特点及拨动[J].海军装备,2020(1): 70-72.
Chen Wentao, Han Chao, Huang Geng. The characteristic of Nimitz class aircraft's construction, training, certification, deployment and maintenance cycle[J]. Naval Equipment, 2020 (1): 70-72.(in Chinese)

[20] 刘相春. 国外航母与舰载机速查手册[M].北京:海潮出版社,2013.
Liu Xiangchun. Pocket guide of aircraft and aircraft carrier abroad[M]. Beijing: Haichao Press, 2013.(in Chinese)

[21] 孙立华. 盘点美国核航母战斗群[J]. 军事文摘,2016(11): 33-36.
Sun Lihua. The uclear powered aircraft carrier battle group of America[J]. Military Digest, 2016(11): 33-36.(in Chinese)

[22] 刘广,颜世伟,李海旭,等. 国外航母航空保障技术发展现状[J].航空科学技术,2020, 31(2): 1-11.

Liu Guang, Yan Shiwei, Li Haixu, et a1. Aviation support technology development for foreign aircraft carrier[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(2): 1-11.（in Chinese）

[23] Robert M E, Philip C G, Joseph B Y, et al. F-35 structural design, development, and verification [C]// 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta Georgia, 2018.

[24] 中新网. F-35C地面测试现裂纹拟2018年8月具备初始战力[EB/OL]. (2015-11-19). http://www. chinanews. com. cn/m/mil/2015/11-19/7632069.shtml.

Chinanews. A crack appears in the F-35C ground test, it is planned to have initial combat force in August 2018[EB/OL]. (2015-11-19). http://www. chinanews. com. cn/m/mil/2015/11-19/7632069.shtml.（in Chinese）

[25] 中国航空工业发展研究中心. F-35战斗机完成静力试验[EB/OL]. (2011-09-22). http://www. dsti. net/ Information/News/7078.

Aviation Industry Development Research Center of China. F-35 completes static test[EB/OL]. (2011-09-22).http://www.dsti.net/Information/News/ 7078.（in Chinese）

[26] Norwood D S., Full scale aircraft drop test program for the F-35C carrier variant[C]// 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Kissimmee Florida, 2015.

[27] 胡锐，刘小川，白春玉，等. 舰载飞机起降装置动力学试验研究进展[J]. 航空科学技术, 2022, 31(1): 11-19.

Hu Rui, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, et al. Research progress on dynamic test of carrier aircraft take-off and landing device [J]. Aeronautical Science & Technology,2022, 31(1): 11-19.（in Chinese）

[28] 杜金柱，卢学峰，陈煜. 起落架突伸缓冲器的设计与验证[J]. 航空科学技术，2022，33(2): 76-82.

Du Jinzhu, Lu Xuefeng, Chen Yu. Design and test of landing gear's sudden-extension absorber[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(2): 76-82.（in Chinese）

[29] 豆清波，杨智春，刘小川，等. 舰载机全机落震试验方法[J]. 航空学报，2017，38(3): 175-183.

Dou Qingbo, Yang Zhichun, Liu Xiaochuan,et al. Test method for full scale drop of carrier-based aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(3): 175-183.（in Chinese）

[30] 薛小锋，王远卓，路成. 基于改进Kriging模型的舰载机着舰下沉速度影响性分析研究[J]. 西北工业大学学报，2019，37(2): 218-224.

Xue Xiaofeng, Wang Yuanzhuo, Lu Cheng. Sinking velocity compact-analysis of carrier-based aircraft based on improved Kriging model[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(2): 218-224.（in Chinese）

[31] 王钱生. 关于舰载机着舰下沉速度的初步研究[J]. 飞机设计，2007，27(3): 1-6.

Wang Qiansheng. A preliminary research of sinking velocity for carrier-based aircraft[J]. Aircraft Design, 2007, 27(3): 1-6.（in Chinese）

[32] 周进. 舰载机起降段设计使用载荷谱编制及载荷谱加重研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2019.

Zhou Jin. Study of the compilation of design load spectrum on take-off and landing section of carrier-based aircraft and the aggravated load spectrum[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.（in Chinese）

[33] Wilson T. F-35 carrier suitability testing [C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2018.

[34] 彭一明，聂宏，张明，等. 偏航状态下拦阻钩挂索动力学分析[J]. 航空学报，2015，36(6): 1876-1884.

Peng Yiming, Nie Hong, Zhang Ming, et al. Dynamic analysis of arresting hook following engagement of an arresting cable in yaw condition[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 1876-1884.（in Chinese）

[35] 柳子栋. 舰载机拦阻着舰动力学特性及安全控制方法研究[D]. 西安：西北工业大学，2016.

Liu Zidong. Study on dynamic characteristics and security control method of carrier aircraft arrested deck-landing[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.（in Chinese）

[36] 谢朋朋. 舰载机着舰挂索及拦停安全特性研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2020.

Xie Pengpeng. Study on hanging ropes after landing and safety characteristic of arrest of crrier aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.（in Chinese）

[37] 聂宏，彭一明，魏小辉，等. 舰载飞机着舰拦阻动力学研究综述[J]. 航空学报，2014，35(1): 1-12.

Nie Hong, Peng Yiming, Wei Xiaohui, et al. Overview of

carrier-based aircraft arrested deck-landing dynamics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 1-12.（in Chinese）

［38］中国船舶工业综合技术经济研究院. 美海军F-35C战机即将在“尼米兹”号航母上进行测试[EB/OL].(2014-11-02).http://www.dsti.net/ Information/News/91263.

China Institute of Marine Technology & Economy. U.S. navy F-35C aircraft will be tested on the Nimitz aircraft carrier[EB/OL]. (2014-11-02). http://www. dsti. net/Information/News/91263.（in Chinese）

［39］中国航空工业发展研究中心. F-35C开展第二轮海上舰载试飞 [EB/OL].（2015-10-09）. http://www. dsti. net/ Information/News/963434.

Aviation Industry Development Research Center of China. F-35C completes flight testing in second at-sea trials[EB/OL].（2015-10-09）. http://www. dsti.net/ Information/News/963434.（in Chinese）

［40］中国航空工业经济技术研究院. F-35C提前完成第3轮舰载试飞 [EB/OL].（2016-08-31）. http://www.dsti.net/ Information/News/101067.

AVIC Econimic and Technical Institute. F-35C completes the third round of flight testing ahead of schedule[EB/OL].（2016-08-31）. http://www. dsti. net/ Information/News/101067.（in Chinese）

Analysis and Prospect of the F-35C Carrier Landing Test

Tian Yuan, Wang Yueji, Liu Chao

Naval Aviation University, Yantai 264001, China

Abstract: With the rapid development of aviation technology, the technical integration and complexity of the design and manufacture of carrier-based aircraft are constantly improving. Meanwhile, technical reliability and security of equipment is facing new challenges, so rigorous test is needed. Unlike the land-based aircraft, the carrier-based aircraft performs tasks based on aircraft carrier, and the carrier suitability directly affected the generation of combat ability. Therefore, a new type of aircraft must be strictly tested before being equipped and the performance basis of aircraft should be fully checked to ensure the quality of equipment. Since carrier landing is much more difficult and faces higher risk, it becomes a core process of carrier suitability test. First, this paper analyzes the structure characteristics of F-35C and Nimitz class aircraft carrier. Then it analyzes the content and process of the carrier landing test from the aspects of ground test, land-base and carrier-base. Finally, it summarizes the practice and experience of the test, and the prospects of carrier landing test are given. It will provide a useful reference for similar experiments of our next generation carrier-based aircraft in the future.

Key Words: carrier-based aircraft; carrier landing test; carrier suitability; approach modes; F-35C

Received: 2022-09-29； **Revised:** 2023-02-08； **Accepted:** 2023-03-07