

doi: 10.7690/bgzdh.2023.12.003

# 国外两栖舰船与短距/垂直起降飞机的舰机适配性分析

赵启兵, 朱晨帆, 杨中源, 葛友滨, 何巍  
(中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

**摘要:** 为提升我国两栖攻击舰远程攻击能力, 对国外舰机适配性进行分析。分析国外短距/垂直起降飞机(short/vertical takeoff and landing, SVTOL)的技术现状, 从舰船总体设计角度开展舰机适配性分析并提出关键技术, 结合美国、日本、意大利的大型两栖舰船具体分析舰载机上舰的改装工程。结果表明, 该分析可为国内相关领域科研生产提供参考。

**关键词:** 两栖攻击舰; 舰载机; 短距/垂直起降; 舰机适配性; 改装

**中图分类号:** V11 **文献标志码:** A

## Adaptability Analysis of Foreign Amphibious Ships and Short/Vertical Takeoff and Landing Aircraft

Zhao Qibing, Zhu Chenfan, Yang Zhongyuan, Ge Youbin, He Wei  
(Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** In order to improve the long-range attack capability of our amphibious assault ship, the adaptability of foreign ships and aircraft is analyzed. This paper analyzes the technology status of foreign short/vertical takeoff and landing (SVTOL) aircraft, analyzes the compatibility of warship and aircraft from the perspective of warship overall design, and puts forward the key technologies. Combined with the large amphibious ships of the United States, Japan and Italy, the refitting project of carrier-based aircraft on board is analyzed. The results show that the analysis can provide a reference for scientific research and production in related fields in China.

**Keywords:** amphibious assault ship; carrier-based aircraft; short/vertical takeoff and landing; ship-to-aircraft adaptability; modification

### 0 引言

两栖攻击舰最早诞生于 20 世纪 60 年代, 这类舰船通常具有直通式甲板、坞舱等设施, 能够搭载一定数量的舰载机、两栖车辆、气垫艇等特种装备, 不仅能够辅助登陆作战人员综合采用立体、平面投送的方式完成既定使命目标, 而且可以作为舰载机母舰遂行多种作战任务, 与传统登陆舰相比, 具有巨大的效能优势。近年来, 随着经济全球化趋势加速发展, 各大军事强国均面临着如何在海洋环境下更高效地输送兵力乃至实施两栖登陆作战<sup>[1]</sup>以维护自身在海外利益及安全的问题, 这些因素有力促进了各国海军对两栖攻击舰及其配套武器装备发展和运用的重视, 而短距/垂直起降飞机(SVTOL)由于其优越的航空作战效能, 已成为两栖攻击舰最重要的装备之一。

在 2003 年的伊拉克战争中, 美国海军“好人理查德”号、“巴丹”号等多艘两栖攻击舰参与战斗, 使用鹞式战机执行联队防空、对地火力打击等作战

任务, 成功实战运用固定翼舰载机与两栖攻击舰联合作战模式, 为美国海军验证了“鹞式航母(Harrier Carrier)”作战理念的可行性和优越性。

2019 年美军基于 Harrier Carrier 抛出“闪电航母(Lightning Carrier)”概念。具体来说, 闪电航空母舰是指 F-35B 战机与两栖攻击舰形成新组合, 该组合可执行与航空母舰类似的作战任务, 以辅助海军形成新式航空母舰编队。第 5 代隐身舰载战斗机极大提升了两栖攻击舰远程打击能力。美国军方依托现有“黄蜂”级两栖攻击舰搭载 F-35B, 打造了一艘真正意义上的闪电航母, 甚至可独自执行高强度作战。

笔者分析世界主流短距/垂直起降飞机技术特点, 阐述舰机适配性设计关键技术, 以美国的美国级“的黎波里”号两栖攻击舰、日本的出云级“出云”号直升机驱逐舰以及意大利“的里雅斯特”号两栖攻击舰为例, 剖析舰载机上舰的关键技术, 深入挖掘短距/垂直起降舰载机与两栖攻击舰的适配

收稿日期: 2023-08-03; 修回日期: 2023-09-05

第一作者: 赵启兵(1991—), 男, 安徽人, 硕士。

发展方向，以期为我国海军舰载机技术的积累和发展提供借鉴。

## 1 短距/垂直起降飞机的技术现状分析

### 1.1 F-35B 联合攻击机

当美军面临服役战机陆续老化和减小国防开支的双重现状时，决定继 F-22 之后研制 F-35 第 5 代多功能战机 (Joint Strike Fighter)，以填补美国陆海空、陆战队等军种的使用缺口。研制方针中突出高杀伤性、高生存力和高保障性，使其具备较强的打击能力、很高的作战弹性、更低的维护成本、可持续的保障性等众多优势。

如图 1 所示，目前 F-35B (SVTOL) 是 F-35<sup>[2]3</sup> 种机型中起降距离最短的机型，最适用于两栖攻击舰。其采用了推重比大于 1 的 F-119-611 发动机，输出的动力转换为 4 部分向上的合力，分别通过推力矢量喷管向下偏转、驾驶舱背后的升力风扇向下吹风以及翼尖向下喷射压缩空气 3 种手段实现了垂直起降，并可控制飞机在起飞或着陆时的姿态。在垂直起飞/着陆时，F-35B 背部的辅助进气口自动打开，这一创新设计既避免发动机再次吸入废气保持发动机的功率，也降低吸入异物的概率。

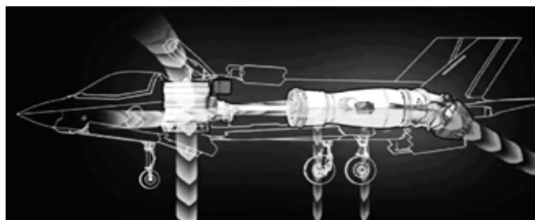


图 1 动力

### 1.2 鱼鹰系列

为保留直升机垂直升降、悬停等优点，克服航程短、飞行速度慢等缺点，各国一直探索设计某种性能更好的飞行器以超越直升机。MV-22 鱼鹰如图 2 所示，是世界首次入列服役的倾转旋翼飞行器。



(a) MV-22 折叠状态 (b) MV-22 展开飞行状态

图 2 MV-22 倾转旋翼机

MV-22 鱼鹰并未直接使用常规固定翼飞机安装螺旋桨、发动机的构造，而是将直升机的旋翼系统和固定翼螺旋桨集成于一体进行设计，既可实现

起飞、降落及悬停状态<sup>[3]</sup>下稳定机动飞行，又可在平飞状态下持续高速飞行，延长续航。机翼和旋翼桨叶可机械折叠，进一步降低了舰上贮存空间要求，以实现舰船更多数量的装载。

CMV-22B 鱼鹰倾转旋翼机基于美国海军陆战队现役的 MV-22 研制，如图 3 所示，为美国海军专用型，已于 2020 年首次交付。该款新型舰载运输机将携带更大的油箱实现更远航程，能够满足 F-35C 战机发动机动力模块的运输任务需求。



图 3 CMV-22B 鱼鹰倾转旋翼机

### 1.3 AV-8B 鹞式战机

AV-8B 鹞式是英国推出的鹞式战斗机攻击机的美国版本，是美国海军陆战队现役战机之一，如图 4 所示进行短程起飞/垂直降落。该战斗机设置 4 个可偏转喷口，可从 0 旋转至 98.5°，能够提供平飞状态的推力和起飞降落过程的升力，实现短距起飞、垂直起飞、空中悬停、垂直降落。在翼尖、尾翼和机头设置反作用喷嘴，用以控制飞机姿态和改善失速性能。



(a) AV-8B 短距准备起飞 (b) AV-8B 正在垂直降落

图 4 AV-8B 鹞式战斗攻击机

虽然该型机实现垂直降落、垂直起飞，但在起降过程中消耗大量燃油，导致对自身起飞重量严格限制，最终未能扩大作战半径。此外，在垂直起飞和着陆过程中喷出的废气会被进气口重新吸入，可能导致升力突然下降，存在一定的安全隐患。其发动机推力矢量如图 5 所示。

### 1.4 雅克系列

雅克-141 (如图 6 所示) 诞生于苏联时期，是雅克福列夫设计局开发的一款超音速垂直起降战斗机，但苏联解体导致雅克-141 从未大规模生产。



图 5 发动机推力矢量



图 6 雅克-141 原型机

俄罗斯雅克-141 是使用升力发动机和偏转主发动机喷口相结合的垂直起降飞机。雅克-141 的 2 台升力发动机串列于驾驶员座舱之后，其中单台发动机推力为 41.68 kN(4 250 kg)，尾喷口设置在后机身，并配备推力转向装置，推力方向最大偏转角 95°，以实现垂直起降。当飞机进入平飞状态之后，主发动机转至向后，升力发动机则停止工作，其进气道关闭。

## 2 舰机适配性技术

舰机适配性<sup>[4]</sup>是指舰载机充分有效地利用母船设施和装备的能力。在预定的作业条件下，两栖攻击舰和舰载机群相互适应、正确配合，才能协同完成舰载机出动回收等一系列特定作业任务。无论是现役舰船加装舰载机的临时任务，还是新型舰船设计满足某型舰载机上舰需求<sup>[5]</sup>，第一要务都是考虑舰载机与母船的舰机适配性，故需开展舰机适配性设计分析和关键技术梳理。

### 2.1 舰机适配性设计

舰机适配性包含舰机总体适配技术、勤务保障适配技术、机务保障适配技术、起降保障适配技术和飞行指挥适配技术等内容。笔者聚焦以下 4 点：

#### 1) 飞行甲板和机库布局。

为保证舰载机在甲板停放、转运、起降等作业安全，多个作业流程时间和空间尽可能少干涉、少影响，往往将飞行甲板布局分为起降区和停机区 2 部分区域。起降区的长度决定了舰载机滑跑距离。停机区内的停机数量由舰载机折叠后的长度、宽度

和安全间距直接决定。机库的净高需满足舰载机转运的最小高度要求，库内贮存飞机数量受长度和宽度限制；同时，应考虑在机库内设置专用维修空间，以保证维护维修作业的正常开展。

#### 2) 升降机转运能力。

飞机升降机的载重能力和尺寸是制约垂直转运能力的关键因素。现役大多数两栖攻击舰以搭载直升机为主，舰载机折叠状态下尺寸、重量远小于固定翼舰载机；因此，即便飞机升降机的尺寸满足舰载机的转运空间和系留空间需求，但载重能力小于舰载机自身重量，依旧无法实现垂直转运。

#### 3) 航空弹药保障能力。

如图 7 所示，为提升弹药保障效率，美军基于发动机不停机的状态下开展制导炸弹的装填加挂试验。



(a) 弹药转运

(b) 人工辅助挂弹

图 7 F-35B 不停机挂弹

#### 4) 维修及支援。

两栖舰船执行海上任务周期长，舰载机维护和支援设施能够保障不同舰载机日历时间以及规定飞行小时数内的周期性工作，具备更换发动机、旋翼等维修保障能力。

如图 8 所示，F-35 战机长期海上飞行导致机身背部隐身涂层受损，直接关系其隐身性能，需及时修补。为抵抗海洋恶劣环境的侵蚀，减少维护维修的工艺步骤，F-35B 制造商洛马公司研发了“RAM 补丁”技术，把 RAM 贴片裁剪成任意形状粘贴在掉漆部位，从而在例行维护保养的工序中快速修补，帮助该机支撑到下一阶段重新喷涂周期。

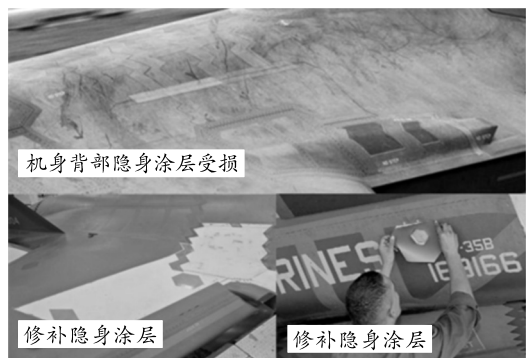


图 8 RAM 补丁技术的应用

## 2.2 关键技术

### 2.2.1 起降甲板结构设计和高温防护技术

垂直降落过程中，飞行甲板应能承受发动机高温尾焰的烧蚀，触舰瞬间，巨大的轮印载荷附加在飞行甲板之上。钢材在高温作用下，材料性能会发生巨大变化，随着温度升高，钢材的弹性模量会出现显著的折减，而热膨胀系数则缓慢上升。当温度为 600 °C 时，钢材的屈服强度将降为室温环境下强度的一半。当温度达到 800 °C 时，钢材基本上丧失强度和刚度，附加温度应力的产生以及纵向抗屈曲能力的骤减，甲板总强度进一步下降；因此，有必要开展起降甲板结构设计和高温防护技术的研究。

#### 2.2.1.1 构建温度模型及力学模型

针对 SVTOL 发动机对于起降甲板温度的影响，宾夕法尼亚大学的高速空气声学实验室对 F-35B 的尾喷口开展了一系列实验<sup>[6]</sup>，实验数据曲线如图 9 所示，发现甲板温度在喷口正下方最高，且离喷口正下方越远，温度越低，当距离达到 14D (D 为喷口直径) 时甲板温度衰减至常温。

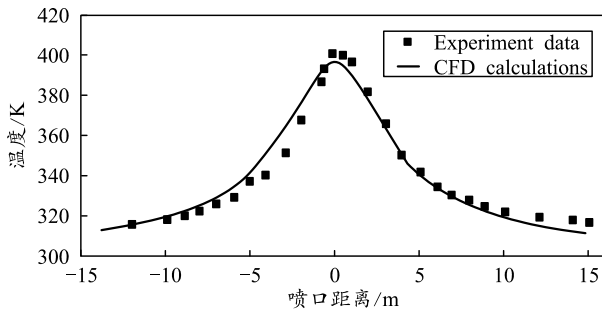


图 9 实验数据及拟合数据

采用对数函数拟合试验数据：

$$\frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0} = \frac{\alpha T_{\max} - T_0}{T_{\max} - T_0} \left[ 1 + \log_{\frac{1}{15}} \left( \frac{r}{D} + 1 \right) \right]; \quad (1)$$

$$T = \alpha T_{\max} + (\alpha T_{\max} - T_0) \log_{\frac{1}{15}} \left( \frac{r}{D} + 1 \right). \quad (2)$$

式中： $T_{\max}$  为高温尾流的温度； $\alpha$  为温度衰减系数； $\alpha T_{\max}$  为甲板的最高温度； $r$  为距离甲板温度最高处的距离（即距离火焰中心的水平距离）； $D$  为喷口直径； $T$  为  $r$  处的温度。

#### 2.2.1.2 高温防护技术

目前，飞行甲板高温防护主要包含 2 种方案：

1) 飞行甲板散热装置 (flight deck heat sink, FDHS) 布置于甲板表面飞机着陆点去保护飞行甲板免受高温尾流的冲击，由铝制板和其支撑柱组成，

并和其他构件形成一个密封空心体，如图 10 所示。内部装有含腐蚀抑制剂的工作液体、工作时类似一个蒸气室，通过液体来散热。FDHS 不仅重量轻，而且具有良好的强度和抵抗冲击的能力，可布置在超过 50 m<sup>2</sup> 的范围内。

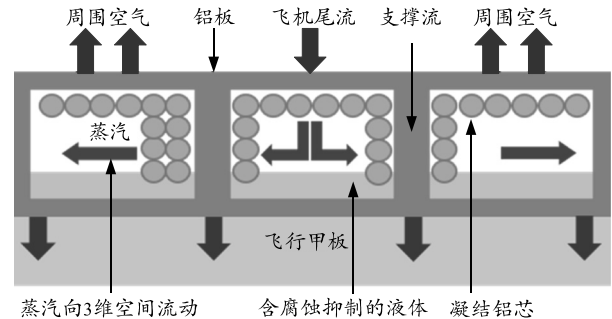


图 10 飞行甲板散热装置

2) 通过喷涂耐高温隔热涂料也可以达到隔热保护的，且施工方便、重量轻、造价低，不影响甲板上其他设备或机器的布置和工作。

### 2.2.2 舰面复杂气流场研究

如图 11 所示，舰载机在舰船甲板上起降时，会受到起降位置、风速、风向等因素的影响，尤其在舰船右舷上层建筑后方，舰船尾流的各方向气流对飞行器的飞行特性都会产生不同程度的影响；因此，必须针对某一特定型号的舰载机和舰船组合，量化各因素对飞行特性的影响。



图 11 起降复杂流场

由于垂直起降的特殊性及高危险性，其起降过程所在的气流场不同于常规起降流场，更复杂更易产生危险事故。舰载机在投入舰载使用之前必须进行机/舰动态配合试验，确定舰载机相对舰船的风向、风速限制的飞行包线，形成起降风限图<sup>[7]</sup>。风限图的常规方法是舰机海上联合试验，其风险高、周期长、价格贵；因此，目前国内外正高度关注仿真技术的发展，旨在通过计算机数值模拟方法研究舰面流场及舰面起降安全飞行风限图。

同时值得注意的是，推力矢量 STOVL 利用喷流进行垂直起飞和降落，在接近地面时会形成喷泉流<sup>[8]</sup>现象，可能造成安全裕度和垂直起降能力的下降。

### 2.2.3 出动回收流程研究

舰面保障全流程活动的高效程度对舰载机出动能力的影响至关重要。区别于原先仅搭载直升机的

出动模式，固定翼飞机出动流程<sup>[9]</sup>复杂，具体流程如图 12 所示，起飞准备主要包括牵引、系留、通电、加油、挂弹等作业活动。

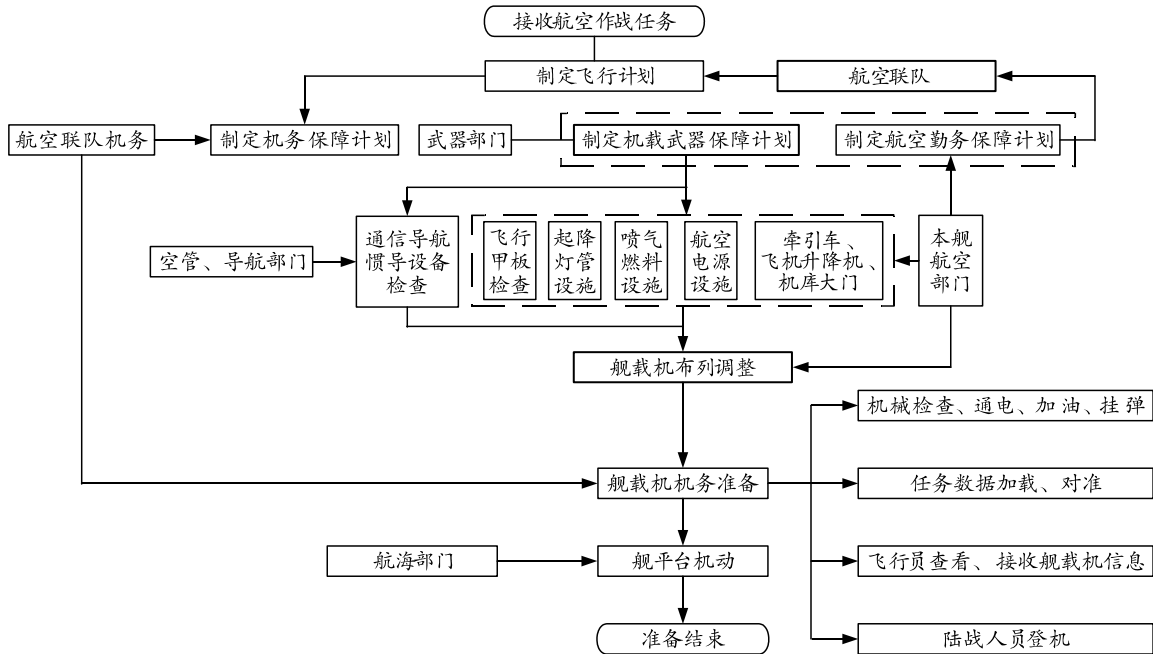


图 12 舰载机出动流程

### 2.2.4 舰机协同起降训练技术

短距起飞/垂直降落方式的特殊性，对于飞行员的驾驶体验、指挥保障方式与众不同；因此，陆上基地构建舰机协同模拟训练系统，可进一步消除飞行员的负面心理并有效提升飞行员飞行技术，在舰船和舰载机未交付的状态下促使指挥人员逐步建立指挥能力。

2017 年，英国 BAE 系统公司完成了新型全动态模拟器的开发，以用于 F-35B 的飞行员训练。如图 13 所示，该模拟器允许飞行员模拟驾驶 F-35B 在“伊丽莎白女王”号航母飞行甲板上起飞降落，让飞行员具有身临其境的体验，为舰上测试做好了充分准备。实际试验证明，该模拟训练为 F-35B 在“伊丽莎白女王”航母批量列装立下功劳。



图 13 BAE 公司的模拟器视角

## 3 舰船的改装/设计

为进一步提升作战效能，国外新型两栖攻击舰

与传统舰型相比，均针对 STVOL 进行了一定的适配性设计，对必要装备进行了升级/改装，以试图再现美军闪电航母理念。下文以美国级、出云级、的里雅斯特号两栖攻击舰为例分析舰船改装的重要技术状态变更。

### 3.1 美国级两栖攻击舰改装

美国级两栖攻击舰“的黎波里”号于 2017 年正式下水，与上一代黄蜂级最大的不同是取消了坞舱，全部改为机库和航空支援设施，最大限度地发挥海军陆战队的航空作战能力。美国级两栖攻击舰 2 种典型配置方案如表 1 所示。

表 1 美国级两栖攻击舰舰载机典型配置

| 方案 | 飞行器类别  | 数量 |
|----|--------|----|
| 1  | F-35B  | 6  |
|    | MV-22  | 12 |
|    | CH-53K | 4  |
|    | AH-1Z  | 4  |
|    | UH-1Y  | 13 |
|    | MH-60S | 2  |
| 2  | F-35B  | 20 |
|    | MH-60S | 2  |

与首舰“美国”号相比，“的黎波里”号围绕飞行甲板增大、提升航空燃料存量等关键因素进行了改进升级。美国级两栖攻击舰燃气轮机与搭载的直升机、倾旋翼机及固定翼飞机共用 JP-5 喷气燃料

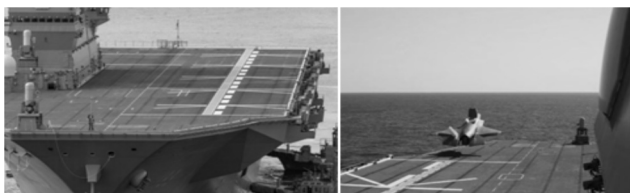
为燃料源，大大降低后勤保障难度，使得舰上补给与调度能力大幅提升。

MV-22 鱼鹰直升机发动机喷出的高温尾流使得飞行甲板受到高温冲击，大约 10 min 发生了屈曲现象。F-35B 部署前，ONR 美国海军研究办公室于 2009 年发布了甲板热管理系统 (deck thermal management system, DTMS) 的征集公告。该甲板热管理系统应能够在飞行甲板受到高温尾气冲击时升温速率降低 16 000~24 000 BTU/min，一定时间内热承载能力提高 48 000 BTU~2.2 MBTU，并且使得甲板温度保持在 300 °F 以下 (约 149 °C)。

2011 年 10 月 16 日，F-35B 在黄蜂号航母上完成首次试飞，在 2013 年 8 月 14 日完成第 2 次试飞，测试了一种置于着陆点上的陶瓷和铝合成的新型防护层，这种铺层可以使得甲板对于飞机着陆过程的高温机械冲击及磨损的承受能力更高，而且自身不产生明显热变形，不影响着舰安全。

### 3.2 出云级直升机驱逐舰改装

出云级直升机驱逐舰是目前日本吨位最大的军舰。为加强出云级直升机驱逐舰远洋攻防能力，日本引进美军 F-35B 战机，并对首舰“出云”号进行升级改造以适应 F-35B 未来上舰。目前“出云”号已完成阶段性改装，计划第一批 6 架 F-35B 于 2024 年正式上舰。改装内容主要包括：甲板添加耐热涂层；增设 JP-5 航空喷气燃料油舱；增设机载武器对应的弹药库；新增空中管制。日本防卫省希望购买的 F-35B 可以随出云号前往东岛南部和北部区域，以协助空中自卫队进行监视活动，并扩大日本武装部队的活动范围。图 14 为驻日美军的 F-35B 战机在“出云”号上进行起飞操作。



(a) 改造后的“出云”号 (b) F-35B 在“出云”号滑跑  
图 14 F-35B 在出云号上试验

### 3.3 的里雅斯特号两栖攻击舰设计

意大利的里雅斯特号两栖攻击舰 (如图 15 所示) 采用传统直通甲板设计，设置与“伊丽莎白”航母相似的双舰岛，搭载 2 部舷侧式升降机，满载排水量约 32 000 t，预计 2022 年正式服役。的里雅斯特号在设计阶段已考虑搭载 F-35B 战机，在船艏加装

滑跃跳板<sup>[10]</sup>使得舰载机更易实现短距起飞。可搭载 12~15 架舰载机，兼容搭载 AW101、NH90 等直升机。该舰既满足意大利对直升机垂直输送与两栖抢滩的任务需求，又搭载短距/垂直起降战机提升纵深打击能力和拓展舰船作战半径。



图 15 里雅斯特号两栖攻击舰

## 4 结束语

对于中低烈度的海洋战争，闪电航母作战理念已被各国广泛接受，而短距/垂直起降舰载机更是海上空中作战力量的重要载体，配合两栖舰船共同执行战场侦察、对海打击、对陆打击、战场制空等多类型任务。通过分析国外多型短距/垂直起降舰载机，再结合美国、日本、意大利的大型两栖舰船设计及改装经验，梳理舰机适配性的一系列关键技术，可为国内相关领域科研生产提供参考。

### 参考文献：

- [1] 王玉松, 纪延琚. “西北风”级两栖攻击舰作战系统研究[J]. 指挥控制与仿真, 2015(3): 144-148.
- [2] 吴雄. 短距起飞/垂直降落飞机动力装置特点及关键技术分析[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 91-96.
- [3] 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.
- [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]. 2018, 40(8): 149-152.
- [5] 马凯, 陈豪, 郝桐, 等. 美国舰载无人机系统研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(5): 1-4, 20.
- [6] RUDENKO N A. Investigation of the Heat Transfer of Two Parallel Jets Impinging Normal to a Flat Surface[D]. State College: Penn State, 2016.
- [7] 赵维义, 刘航, 傅百先. 舰载直升机风限图及其试飞[J]. 飞行力学, 2002, 20(4): 48-50, 60.
- [8] RICHARDSON G, DAWES W. Hot gas ingestion modelling for the vertical descent phase of a Harrier[C]//17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. Toronto: AIAA, 2005.
- [9] 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.
- [10] 王豪. 国外舰载机滑跃起飞关键技术分析[J]. 教练机, 2018(3): 27-30.