航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Feb. 25 2020 Vol. 31 No.02 1-11

国外航母航空保障技术发展现状

刘广[1]，颜世伟[2]，李海旭[1,*]，马欣瑞[1]，彭修全[1]
1.中国船舶工业系统工程研究院，北京 100036
2.中国人民解放军92942部队，北京 100161

摘　要：航母航空保障系统是保障舰载机在航母上安全起降和有序作业的核心，是实现舰载机高效出动回收的基础和保证，在航母各主要系统中具有突出重要的作用，是航母区别于其他大型主战水面舰艇的重要标志。通过收集整理国外相关文献，从航空保障任务规划与指挥管理技术、舰载机起飞保障技术、飞行器着舰引导技术、舰载机拦阻回收技术、舰载机驻留转运及资源保障技术、面向架次率的航空保障集成设计与验证技术6个方面概括并总结了国外航母航空保障技术的发展现状。梳理了国外部分重要航空保障装备的性能参数和工作原理，最后对国外航母航空保障技术的应用情况进行了概括总结，对未来研究方向进行了展望。

关键词：航母；航空保障；出动回收架次率

中图分类号：V271.492　　**文献标识码：**A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2020.02.001

人类在探索海洋和天空的征程中发明了舰船和飞机，舰载航空则是二者结合的重要力量。舰船航空保障是实现舰载航空力量的基石，是连接舰和机的纽带、联系海和天的桥梁。航母的诞生使人类海战模式发生了由平面到立体的根本性变革，实现了真正的超视距战斗，对海上作战方式产生了重大影响。

与陆基机场长3000m、宽80m相比，航母的跑道约为长200m、宽30m，航母跑道面积仅为陆基跑道的2.5%，而且处于海浪运动下不规则的六自由度运动，舰载机完成起飞回收、驻留转运、充填加挂等作业技术复杂、难度大、风险高。为破解舰载机起降的这些难题，航空保障技术应运而生。本文概括国外航母航空保障技术的发展现状，阐述航空保障技术内涵及现状、原理机理、主要性能等内容。

1 概述

舰船航空保障技术是保障各类舰载机实现塔台飞行指挥、高效出动、安全回收、舰面集群转运、油水气电供给、弹药流转加挂、维修任务支援等各类航空作业的各项技术总和，该技术涉及飞行甲板、机库、飞行塔台、机务勤务中心、起飞站、回收站、保障站、喷气燃料舱室、机载武器舱室以及上千名航空作业人员，由多个子系统组成，具有复杂的交互流程，是实现舰载机安全上舰、实现良好舰机适配和形成出动回收能力的核心系统，其顶层能力衡量指标为航空保障作业架次率。

航空保障技术主要用于：管控母舰20km以内舰载机的各类作业；助力舰载机起飞离舰；引导舰载机着舰下滑并精确降落；实现舰载机在飞行甲板和机库的转运和系留停放；完成舰载机在母舰的燃油补给和弹药挂载，以及辅助性的供电、供气、冲洗、救援等保障作业。

本文将从航空保障任务规划与指挥管理技术、舰载机起飞保障技术、飞行器着舰引导技术、舰载机拦阻回收技术、舰载机驻留转运及资源保障技术、面向架次率的航空保障集成设计与验证技术6个方面分别阐述。

2 航空保障任务规划与指挥管理技术

美国海军航空指挥管理作业早期是根据不同作业开展相对独立的指挥，如着舰指挥员负责舰载机着舰引导回收作业指挥、弹射器部位负责指挥起飞、甲板引导人员指挥飞机转运，都属于现场指挥方式。

自第二次世界大战（简称二战）后，航母航空联队为了及时方便地了解飞行甲板和机库甲板上舰载机的位置和载荷等信息，利用基于飞行甲板、机库、舰载机小比例模型的指挥沙盘作为航母上进行舰载机调度规划的重要工具[1]。美国海军将这种沙盘设备形象地称作“显灵板”（Ouijia Board），如图1所示，就好像巫师进行占卜的工具一样，航空保障任务规划与指挥人员可通过沙盘对即将实施的舰载机调度方

收稿日期：2019-09-10；　退修日期：2019-10-02；　录用日期：2019-12-05
*通信作者. Tel.：010-59516541　E-mail：haixu2000@126.com
引用格式：Liu Guang, Yan Shiwei, Li Haixu, et al. Aviation support technology development for foreign aircraft carrier[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(02): 1-11. 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(02)：1-11.

案进行规划、验证和优化。显灵板沙盘操作人员通过甲板记录人员获取甲板上舰载机的信息，如舰载机的位置、挂载的武器种类、燃油量等，在沙盘上移动和摆放舰载机模型，表示不同舰载机在飞行甲板上的位置，并使用专用配件表示舰载机的不同保障状态，从而实现所有舰载机保障作业的管控。

图1 美国航母显灵板沙盘

Fig.1 Ouijia board of American carrier

随着信息技术的发展，美国研制了航空数据管理和控制系统（ADMACS）。其是一种用于航母航空保障作业指挥管理的的战术实时数据管理与指挥系统[2]。航空数据管理和控制系统的试用版本Block 0于1998年就有了工程发展模型，首次为塔台飞行指挥、空中交通管制、着舰引导提供了数字化显示。其正式版本Block 1随后安装到9艘“尼米兹”级航母，进一步扩展为紧密跟踪监测飞机和直升机发射回收状态及舰上保障作业的信息管理系统，如图2所示。改进的Block 2版本则整合了航空保障作业管理、武器装载系统、弹射装置、拦阻装置的状态和维护功能。

航空数据管理与控制系统通过大量的软硬件（传感器、局域网、显示与控制设备），连接航空作业相关系统（包括弹射起飞系统、着舰引导系统、拦阻回收系统等），经过航空作业相关数据的融合、分发和控制，实现包括舰载机任务规划、航空弹药储运、喷气燃料充填、航母维修、舰载机维修、舰载机调度、舰载机弹射与回收、飞行甲板管理等的集成。航空数据管理与控制系统还能够与航母作战系统、导航系统和气象系统相连。

图2 航空数据管理与控制系统

Fig.2 Aviation data management and control system

3 舰载机起飞保障技术

二战后，随着喷气式舰载机上舰，舰载机重量（质量）和起飞速度大幅增加，无法在平直甲板上直接滑跑起飞，必须借助专门的辅助手段，为此出现了弹射起飞系统[3]。由于弹射起飞系统复杂，对技术的要求高，英国、俄罗斯等国家还研制出了滑跃起飞方式。为避免舰载机发动机高速、高温尾喷流对舰面其他飞机和人员造成损伤，无论是弹射还是滑跃起飞，均在起飞站位加装喷气偏流板装置。

3.1 蒸汽弹射装置

弹射装置的发展始于1912年，到二战前，分别经历了压缩空气弹射装置、飞轮弹射装置、火药弹射装置等多种形式。二战时期，舰载机的重量急速增长，航母开始采用液压弹射装置[4]。二战后，随着喷气式舰载机的上舰，对起飞速度的要求更高，当时大量采用的液压弹射装置暴露出日益突出的安全问题，为此美国研制了弹射能量更大的火药弹射装置和内燃弹射装置，但没有投入使用。20世纪50年代，英国人发明了功率更高且更安全的蒸汽弹射装置[5]，后由美国引进并不断改进，现已发展到C-13型。目前美国已研制出电磁弹射装置，并应用于最新的“福特”级航母，发展过程如图3所示。

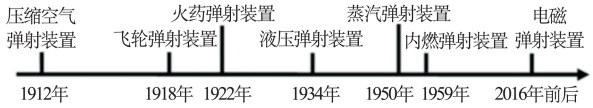

图3 航母弹射装置的发展过程

Fig. 3 Development process of carrier catapult

蒸汽弹射装置的基本原理是将高温高压蒸汽储存在储汽筒内，弹射时，将高压蒸汽从储汽筒内迅速释放至弹射装置汽缸，推动汽缸内的活塞，带动舰载机加速到起飞速度。

蒸汽弹射装置从20世纪50年代发展至今，技术成熟，除“福特”号外，目前国外现役航母上采用的弹射装置均为蒸汽弹射装置，包括美国“尼米兹”级航母、法国“戴高乐”号航母、巴西“圣保罗”号航母。各型弹射装置的主要参数见表1和表2。

蒸汽弹射装置主要组成包括弹射机系统、复位系统、首轮拖曳牵制系统，储汽系统和测控系统，如图4所示，湿式储汽筒是储汽系统的重要组成部分；发射阀、汽缸组件、往复车等是弹射机系统的重要组成部分；抓曳车和复位机是

表1 早期蒸汽弹射装置的主要参数

Table 1 Main parameters of early steam catapult

型号	BXS-1	C11-1	C11-2	BS-4
国家	英国	美国	美国	英国
开用年份	1950	1954	1954	1955
舰载机重量/t	6.8~13.6	21.8	11.3	6.8~13.6
弹射末速/(km/h)	>167	232	241	204
最大加速度/g	>4	>3	5	>4
动力冲程/m	45.5	64	45.5	45.5

表2 后期蒸汽弹射装置的主要参数

Table 2 Main parameters of later steam catapult

型号	C-7	C13-0	C13-1	C13-2
国家	美国	美国	美国	美国
开用年份	1955	1961	1965	1989
舰载机重量/t	25.8	22.7	27.5	30
弹射末速/(km/h)	232	287	287	287
最大加速度/g	3	6	5	5
动力冲程/m	77	76.1	94.4	94.4

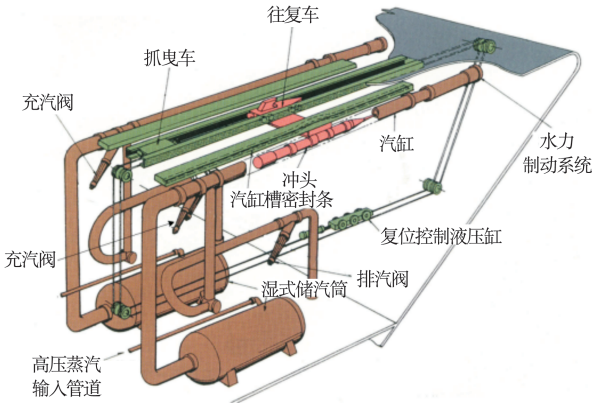

图4 蒸汽弹射装置结构图

Fig. 4 Structure of steam catapult

复位系统的重要组成部分。

3.2 电磁弹射装置

电磁弹射装置是利用直线电机产生的电磁力，带动舰载机加速到起飞速度的装置，其本质是将电能转化为舰载机的动能。美国海军最新的“福特”级航母采用了电磁弹射装置[6]。相比蒸汽弹射装置，电磁弹射装置具有以下优点：

(1)电磁弹射装置能量利用效率高

以美国核动力航母为例，其蒸汽弹射装置综合效率约为5%，弹射一次最大消耗蒸汽600kg。电磁弹射装置自身能量利用率约60%，电磁弹射装置综合效率约为15%。

(2)电磁弹射装置具有纠错和容错能力

实现了状态实时监测与故障诊断预测，提高了可靠性，降低了维修需求，人员数量需求比蒸汽弹射减少30%左右。

(3)电磁弹射过程平稳柔和，有助延长舰载机使用寿命。

电磁弹射装置为闭环控制系统，对舰载机的推力峰均比(即推力最大值和平均值的比值)可控制在1.05以内，而蒸汽弹射装置为开环控制系统，推力峰-均比平均值为1.25，最大可达到2.0。因此电磁弹射装置对舰载机损伤和对飞行员身体损害更小，且可满足不同型号飞机的弹射任务。电磁弹射准备时间短。蒸汽弹射装置从准备到具备弹射条件需要数小时，而电磁弹射装置只需要15min就能达到待用状态。电磁弹射装置符合舰艇全电化的发展趋势，代表了未来航母弹射装置的发展方向。

电磁弹射装置由能量存储、能量调节、能量转换、控制与状态监测等单元构成，如图5所示。

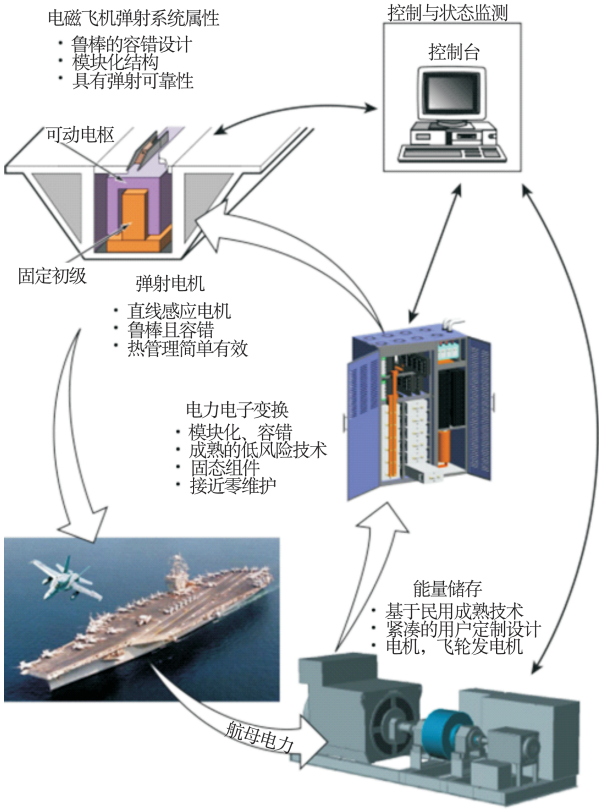

图5 电磁弹射装置构成图

Fig. 5 Structure of EMALS

3.3 喷气偏流板装置

喷气偏流板装置用于将起飞状态的舰载机喷气发动机高温高速气流向上、向外偏折，以保证在舰载机后方飞行甲板上的人员、设备及其他飞机的安全[7]。

航母上为了保障舰载机实现连续起飞，需要在前一架

飞机弹射作业时，后一架飞机排队等待，因此需要通过偏流板遮挡前一架飞机尾喷流，从而保护下一架排队飞机。各国航母大多配备喷气偏流板，其中印度新改装的“维克拉玛蒂亚”号航母采用左舷斜置起飞跑道，省掉了舷边偏流板。

美国现役航母采用海水冷却式喷气偏流板装置，该装置由偏流板组件、运动执行机构、海水冷却系统、液压系统、电气控制系统和辅助系统组成，如图6所示。美国现役每艘航母上均装有4部Mk7型海水冷却式喷气偏流板，分别对应4个舰载机起飞站位。目前其正在积极探索研究省略掉海水冷却系统的被动隔热式喷气偏流板技术。

图6 海水冷却式喷气偏流板

Fig. 6 Seawater cooled jet deflector

3.4 滑跃起飞技术

滑跃起飞是指舰载机仅依靠自身动力，在航母飞行甲板跑道上加速滑跑，并经舰艏滑跃甲板离舰起飞[8]。至2019年国外现役航母中，俄罗斯“库兹涅佐夫”号航母、意大利“加里博迪”号和“加富尔”号航母、印度“维拉特”号和“维克拉玛蒂亚”号航母、泰国“查克里王朝”号航母均采用滑跃起飞方式。

滑跃起飞利用向上带有滑跃角度的甲板使舰载机依靠发动机推力加速时获得一定的离舰迎角和速度，从而产生足够的升力和速度实现起飞。

采用滑跃起飞方式节省了安装结构复杂的弹射装置，大幅减少了使用和维护工作量。但是需要舰载机具有良好的起飞段特性，通常该要求会牺牲舰载机一定程度的航程和空中性能。

舰载机利用滑跃甲板滑跑起飞，在同样起飞重量条件下可比平直跑道缩短一半起飞滑跑距离。相对常规跑道起飞而言，滑跃起飞能大幅缩短舰载机起飞滑跑距离或增加舰载机有效载荷。如苏-33滑跃起飞时所需跑道长度仅为常规平直跑道的30%，而AV-8B“鹞”式舰载机滑跃起飞要比常规平直跑道起飞增加50%有效载荷。

另外，滑跃起飞可以减轻飞行员负担并增加安全性。滑跃甲板使得舰载机离舰后获得一个垂直向上的分速度，保持正值爬升率可增加飞行员距离海面高度，能够用于处理可能遇到的紧急情况，避免发生事故。

4 飞行器着舰引导技术

为了便于梳理发展脉络，可以将着舰引导技术大致划分为4个发展阶段，1910—1950年为人工着舰引导阶段，1950—1980年为半自动着舰引导阶段，1980—2000年为全自动着舰引导阶段，2000年至今为多手段融合全自动着舰引导阶段。实际上4个阶段的划分并不十分严格，如全自动着舰引导自1960年前后即开始探索，而这里的4个阶段划分则主要依据技术应用成熟情况进行。

4.1 人工着舰引导阶段

20世纪50年代以前，航母搭载螺旋桨式舰载机，速度慢，着舰过程可直接由着舰指挥员在舰载机即将触舰的最后阶段通过人工引导方式实现。着舰指挥员通过手势作为信号，引导舰载机着舰[9]。为了让飞行员更清楚地看见信号，将人工手势改为手持彩色信号旗，以此来提高信号的能见度。为消除信号旗易受风向变化影响的缺点，后又改用球拍状彩色信号板，如图7所示。为了适应战时夜间着舰作业的要求，着舰指挥员通过手拿长60～90cm的霓虹管发光棒或闪光灯，取代白天使用的信号板，以便飞行员能看清信号。

图7 着舰引导员指示牌指挥

Fig.7 Guide sign command of LSO

4.2 半自动着舰引导阶段

20世纪50年代后期至80年代初，喷气式舰载机上舰，飞行员观察和判断时间大幅缩短，加剧了航母着舰作业的危险性。该阶段出现了光学助降设备和雷达助降设备。光

学助降设备采用菲涅尔透镜，能确保舰载机在着舰前处于正确的下滑道内。雷达助降设备能够为舰载机的着舰提供下滑道偏差信息，以便舰载机尽早调整着舰姿态[10]。在该阶段，雷达助降设备的核心为AN/SPN-10、AN/SPN-42型雷达。半自动着舰模式的引导指挥员工作台如图8所示。

图8 着舰指挥员工作台

Fig.8 Control panel of LSO

4.3 全自动着舰引导阶段

20世纪80年代初到90年代末期，AN/SPN-46型雷达成功上舰使用，标志着全自动着舰方式的成熟运用，舰载机不需要飞行员操控而能够自动着舰，着舰引导系统称为精确进近着舰系统（PALS）。根据引导模式不同，该系统可以单独引导舰载机着舰，也可以与光学助降配合使用。

20世纪80年代初，AN/SPN-46型雷达的研制和使用，使全自动着舰引导系统的使用更加成熟[11]。全自动着舰引导系统以AN/SPN-46型着舰引导雷达为主，以仪表着舰系统的AN/SPN-41型雷达为辅，构成相互独立、相互融合、相互监视的全自动着舰引导体制，整个着舰引导系统的结构组成如图9所示。

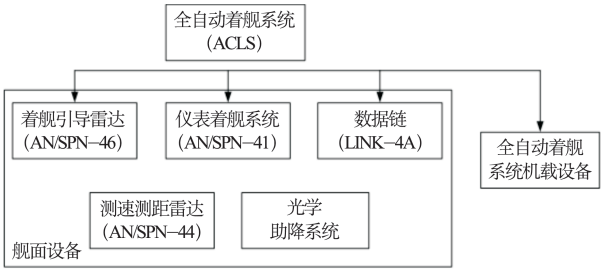

图9 全自动着舰引导系统组成

Fig. 9 Composition of automatic landing guidance system

4.4 多手段融合全自动着舰引导阶段

自2000年前后至今，舰载机在原有着舰引导方式的基础上增加了GPS技术和光电系统用于着舰引导；原有的光学助降系统性能进一步改进，先后研发并使用了改进型菲涅尔透镜光学助降系统和激光着舰系统。多种系统的融合使用，降低了着舰风险，提高了着舰的准确性。

（1）卫星引导技术

以GPS卫星为核心的联合精确进近着舰，在370km即开始对100架舰载机进行空中交通管制。离舰37km时，联合精确进近着舰系统将融合AN/SPN-46雷达为舰载机提供进近与着舰服务。离舰18.5km范围内，可继续采用光学助降设备辅助调整下滑航线。在电磁管制条件下，着舰指挥员仍仅在紧急情况下直接命令飞行员复飞。随着基于GPS技术为核心的联合精确进近着舰系统的正式使用和性能的提升，舰载机的着舰引导将通过联合精确进近着舰系统完成。

（2）电视监视系统

电视监视系统集电子图像和声音记录功能于一体，主要作用是在回收作业期间为着舰指挥员提供舰载机下滑道参考信息，并能够昼夜监视舰载机起降作业，为飞行评估、飞行后讲评提供影像资料。

（3）改进型菲涅尔透镜光学助降系统

此阶段使用改进型菲涅尔透镜光学助降系统替代了原有的菲涅尔透镜光学助降系统。改进型菲涅尔透镜光学助降系统的原理与菲涅尔透镜光学助降系统相似，但增加了灯箱的数量，达到了细分下滑道的目的。

（4）激光助降系统

激光助降系统于20世纪90年代末研制成功并使用。由于其在无线电和雷达管制条件下可用，因此将舰载机着舰引导系统可用性提高至99%。对于光学助降系统而言，大气的散射作用会优先滤掉光谱中的蓝光部分，从而使灯光颜色随远近变化，增加飞行员判别的难度。而激光具备空间定向性好和颜色纯度高两个特性，使得激光助降系统与透镜光学助降系统相比，具有透光性强、聚焦性强、适应低能见度环境等优点。

简单来说，激光助降系统就是让飞行员看到不同颜色的激光，表示飞行员相对于正确下滑航线的偏移量。由于衍射非常少，激光束形成的进近航线边缘非常清晰，利于飞行员辨认。

5 舰载机拦阻回收技术

拦阻回收系统的作用是在有限定长距离内将舰载机拦阻减速，消耗吸收其动能，使其在既定拦阻距离范围内安全停稳。从舰载机尾钩钩住拦阻索到舰载机停稳，整个过程只有短短2～3s。

5.1 液压型拦阻装置

美国现役的“尼米兹”级航母全部采用Mk7型液压缓冲

式拦阻装置。从20世纪50年代以来，该型装置一直是美军航母上的标准拦阻装置，已经发展了4型（Mk7 Mod1～Mk7 Mod4）[12]，总的趋势是装置能够吸收的能量越来越高，允许的舰载机着舰重量越来越大、着舰速度越来越快、过载越来越平缓。Mk7型液压拦阻装置的主要性能参数见表3。

表3 美国航母各型拦阻装置参数

Table 3 Main parameters of arresting gear

参数	Mk7-2	Mk7-3	Mk7-4
最大能量/MJ	52.0	64.4	64.4
冲跑长度/m	95.4	103.6	103.6
拦阻索破断载荷/kg	85275	92986	92986
滑轮索破断载荷/kg	88450	97522	97522
滑轮索穿绕比	18:1	18:1	18:1
拦阻索直径/mm	34.9	36.5	36.5
滑轮索直径/mm	36.5	36.5	36.5
滑轮缓冲装置冲程/mm	1994	3048	4572
拦阻机长/m	15.2	15.2	15.2
拦阻机重量/t	37	43	43
索用拦阻机冲程/mm	4343	4648	4648
网用拦阻机冲程/mm	3810	4064	4064
拦阻索拉出长度/m（至尾钩）	97.8	105.2	105.2
拦阻网拉出长度/m（至前轮）	109.4	118.4	118.4

美国现役航母装备的Mk7型液压拦阻装置主要由拦阻机系统、钢索系统、甲板装置等系统部件构成，如图10所示。

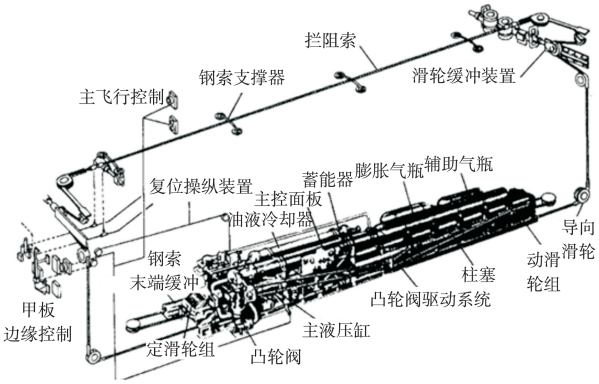

图10 Mk7型液压拦阻装置构造

Fig. 10 Structure of Mk7 hydraulic arresting gear

5.2 涡轮电力拦阻装置

涡轮电力拦阻装置是利用水力涡轮机、感应电机以及摩擦制动装置吸收舰载机的动能，从而在较短距离内将舰载机停在航母飞行甲板上的装置。其中，水力涡轮机把舰载机的动能转变成水的热能；感应电机通过改变对旋转轴的作用力，进而改变拦阻索对舰载机的作用力；摩擦制动器起到备用的作用，当水力涡轮机和感应电机之一失效时发挥作用，仍可以对舰载机进行拦阻。

与液压拦阻装置相比，涡轮电力拦阻装置的优势包括：（1）可靠性更高，有助于提高舰载机的安全性；（2）重量包络更大，更适合于拦阻重型舰载机和轻型无人机；（3）拦阻过程更平稳柔和，可降低舰载机拦阻过程过载峰均比；（4）运控实现闭环，便于通过状态监测支撑健康管理，从而更及时、方便地实施维修。

涡轮电力拦阻装置主要由拦阻机、软件控制系统、电力调节系统、拦阻索及滑轮索组成，如图11所示。其中拦阻机和软件控制系统是最重要的部件。拦阻机是涡轮电力拦阻装置的吸能部件，构成简洁，包括水力涡轮、带有一定惯量的锥形鼓轮、机械制动装置、感应电机以及一根连接以上构件的旋转轴；软件控制系统包括动态控制子系统、操作人员工作台以及维护人员工作台，该系统能够精确控制舰载机拦阻着舰的过程，并能控制舰载机在甲板上滑跑的距离；电力调节系统主要实现能量存储、电力分配与调节；拦阻索和滑轮索采用了轻质复合材料，可以减少系统总惯性，降低结构载荷，并缩小滑轮减振器尺寸，拦阻索与滑轮索相连，通过随动滑轮缠绕锥形鼓轮，最终固定在锥形鼓轮上。

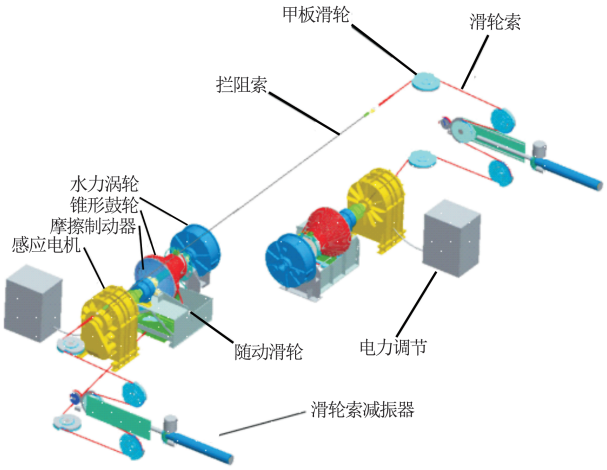

图11 先进拦阻装置构成图

Fig. 11 Structure of advanced arresting gear

6 舰载机驻留转运及资源保障技术

航母作为海上浮动机场，除了实现舰载机起飞和着舰，还设置了舰载机调运系统用于完成舰载机的安全、高效转运和系留；设置了航空弹药储运系统用于完成航空弹药的储存、转运、装配、挂载；设置了舰面保障系统用于为舰载机

提供航空作业所需的油、气、水、电供应和日常维护。

6.1 舰载机驻留转运技术

飞机升降机用于在飞行甲板与机库间调运舰载机、舰面保障车辆、设备和人员。世界上的轻型航母基本采用舷内升降机，而巴西的“圣保罗”号航母、意大利的“加富尔”号航母则选择了一部在舷侧，一部在舷内的布局。大型和中型航母大都把飞机升降机布置在舷侧。美国在二战后从建造的“福莱斯特”级航母起，所建各型航母均将飞机升降机布置在舷侧。例如，“福莱斯特”级航母共4部升降机，其中右舷岛前有一部，岛后有2部，左舷有一部。而“小鹰”级和“尼米兹”级航母将左舷的一部升降机移至斜角甲板后部。这种布局不会影响舰载机的起降作业，又方便将飞行甲板上停放的舰载机及时地转运，从而解决了“福莱斯特”级航母升降机布置在斜角甲板前端，影响舰载机起降的问题，提高了舰载机的出动架次率。美国新一代“福特”级航母采用能力增强型飞机升降机，因此只设计了三部飞机升降机，右舷岛前有两部，左舷有一部，如图12所示。

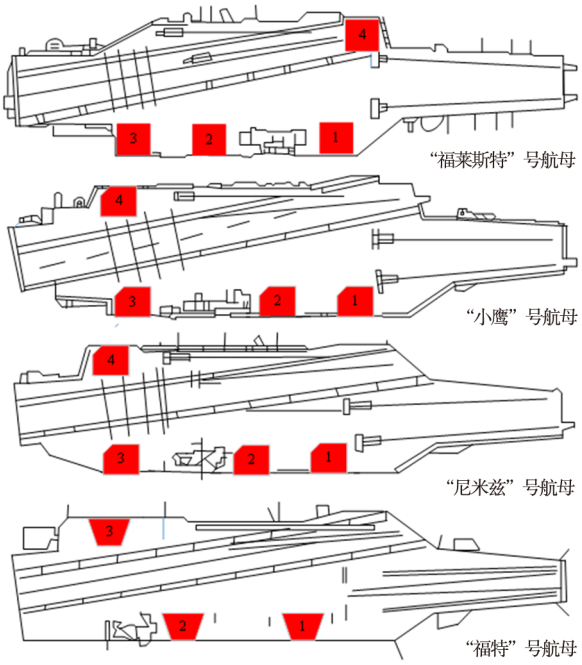

图12 美国航母飞机升降机布置变迁

Fig. 12 Changes in American aircraft carrier lift layout

6.2 机载武器保障技术

航空弹药储运技术是为了实现舰载机弹药在航母上的储存、转运、装配、检测和挂载。

弹药从出库到挂载到舰载机的过程环节很多。首先，需要从弹药库中取出准备挂载的各类机载武器；其次，通过下层武器升降机送达至弹药装配区进行装配，为了不占用飞行甲板，弹药装配区一般尽量设置在飞行甲板下层二甲板或三甲板；然后，装配好的弹药通过上层武器升降机或飞机升降机送达飞行甲板，如果装配区就在飞行甲板，则不再分上下层升降机；最后，在飞行甲板上完成舰载机弹药到舰载机的转运和挂载。

与“尼米兹”级航母相比，“福特”级航母在武器升降机和弹药转运车方面采用了新技术，提高了设备的转运能力和自动化水平。

6.2.1 武器升降机

“尼米兹”级航母上的武器升降机依靠电动钢丝绳或电动液压装置产生的动力升降。为进一步提高载荷和升降速度，同时提高维护性，美国研发了不需绳索而利用电磁力移动的先进电磁武器升降机。

先进电磁武器升降机的关键部件为永磁同步直线电机。升降机直线电机的初级永磁阵列布置于井道内壁，两侧布置钢轨，实现升降机平台导向轮导引和机械制动作业；升降机直线电机次级永磁阵列布置于升降机平台，初级和次级之间的电磁吸引力可以将导向轮紧贴于钢轨。升降机的上升和下降通过直线电机控制系统实现，主要通过变换器向电磁阵列供电，微处理器可以精确控制线圈电流从而实现电磁场移动，这样就生成可控的升降机推力，图13为先进武器升降机的模型和全尺寸样机。

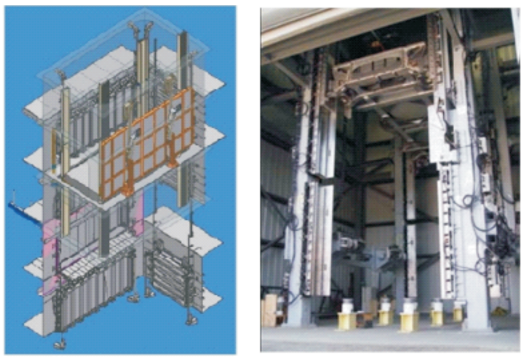

图13 先进武器升降机模型(左)及样机(右)

Fig. 13 Advanced weapon lift model (left) and prototype (right)

与“尼米兹”级航母的武器升降机相比，“福特”级航母的先进武器升降机具有如下优点：(1)平台面积大，载重能力高，先进武器升降机的平台达到6m×2.5m，面积15m^2，载重能力约11t；(2)采用电磁力驱动，能够实现快速升降，并增加设备的可靠性；(3)不需要缆索或电缆连接到升降机平台上，可以在垂直升降通道上安装横向隔离门，更有利于保

证弹药库和各层甲板的安全。

6.2.2 弹药自动搬运车

除了先进武器升降机，在“福特”级航母最初的设计方案中，曾计划使用全向自动搬运车替代“尼米兹”级航母上的弹药转运车和叉车等多种搬运工具。全向搬运车采用智能控制和自主导航系统实现自主驾驶穿梭于飞行甲板和弹库，减少人员劳动量并提高效率，其搬运重量达到5.5t，是普通人力搬运车的两倍，同时其尺寸小，从而有利于航母内部空间的布置。全向自动搬运车操作时对航母其他操作的影响较小，所需的维护工作量也较少。

6.3 喷气燃料保障技术

舰载机由于飞行速度快、升限高、工作的高空环境温度低且发动机构造精密，所使用的喷气燃料中任何超标的杂质颗粒和水分都可能引起发动机产生严重的事故症候，降低舰载机的作战能力，所以舰载机对所使用的喷气燃料的清洁性提出了很高要求。同时，为了保证喷气燃料的存储安全，研发了飞机专用的JP-5型静态不可燃喷气燃油，只有通过发动机内部高压将其喷成雾状才能点燃。

喷气燃料系统作为舰载机的燃油保障系统，其使命主要是为波次出动回收执行任务的舰载机安全高效地补给干净、清洁的喷气燃料，相当于多座加油站。此外，喷气燃料系统还需要接收海基及岸基的喷气燃料的横向补给，实现喷气燃料的安全存储，在必要时回收舰载机剩下的燃油并具备污油存储等基本功能。此外，该系统还须具备喷气燃料品质量保障的能力，这也使得喷气燃料系统相比于其他系统要求更高、系统组成更复杂。

6.4 航空辅助保障技术

6.4.1 航空电源保障技术

航空电源系统为舰载机起飞前准备及再次出动准备提供电源供给，为飞行甲板及机库内舰载机维护、维修提供电源供给，为航空维护、维修相关舱室提供电源供给，并具有舰面启动舰载机的保障能力。

舰载机发动机可利用辅助动力系统启动，也可利用外部电力启动。美国“尼米兹”级航母的舰载机在利用外部电力启动时，外部电源供电电制统一为三相四线制115V/400Hz交流电，部分舰载机兼容28V直流电。因此，“尼米兹”级航母舰面航空电源设备的电制为115V交流和28V直流。为了作业方便，设置了固定式舰载机电力服务站和航空电源车两种航空电源保障设备。其中，固定式舰载机电力服务站大量布置在飞行甲板。如“尼米兹”级航母飞行甲板上布置的舰载机电力服务站多达36个，其中19个分布在舷边。

航空电源车包括牵引车搭载式和独立式两种。以前，美国航母上的飞机牵引车后部带有航空电源车；随着F/A-18成为主要舰载机，美国航母上飞机牵引车后部已不再装备电力装置，而代之以喷气式舰载机发动机起动装置。美国航母上使用的独立式航空电源车包括NC-2A、MMG-1A和A/S37A-3等型号。

另外，美国海军正在研发的F-35C“闪电II”舰载机的电制为270V直流。这与“尼米兹”级航母上的电力装置并不匹配，为了适应这型舰载机，“福特”级航母上的舰载机电力服务站将具备270V直流供电能力，同时还具备适用现役舰载机的115V/400Hz交流电供电能力。

6.4.2 航空供气保障技术

航空供气系统的功能是保障舰载机飞行准备、维护所需主要气体，包括保障舰载机用氧气、氮气的充填，保障舰载机舰面通电检查时电子设备的冷却，保障舰载机轮胎的充气。为此需要配备多种供气设备，包括供氧终端、供氮终端、航空空调车、压缩空气终端等。

6.4.3 飞机救援吊车

航母上部署有多种应急救援设备，包括飞机救援吊车、叉车等。当舰载机在飞行甲板上发生故障、受损或坠毁时，这些设备可以对事故舰载机进行及时处理。根据事故的具体情况，需要使用不同的设备，其中最重要的就是飞机救援吊车。美国“尼米兹”级航母使用的是A/S32A-35A型飞机救援吊车（CVCC），用于在航母飞行甲板上起重、挪动和移除失事舰载机，如图14所示。

图14 救援吊车正在吊运直升机

Fig. 14 The rescue crane is lifting the helicopter

6.4.4 飞机冲洗车

根据舰载机使用经验，需要视情对其发动机和机身进行清洗，这对保障舰载机性能是非常重要的维护项目。在飞行甲板区域对舰载机的机身和发动机进行冲洗作业时，飞机冲洗车是重要的保障设备，如图15所示。

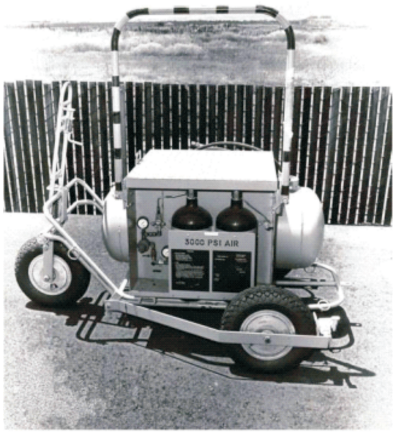

图15 发动机冲洗车

Fig. 15 Engine flushing vehicle

6.5 舰载机机务维修保障技术

舰载机的维修保障是一个复杂的系统工程，包括保持、改善、恢复舰载机技术状态的各类活动。舰载机舰基维修保障分为基层级和中继级两层维修组，维修组的数量以及维修效率直接影响舰载机的战备完好率和日出动架次。成熟的舰基航空保障装备维修保障应该具有完整的维修管理、实施、法规、制度、培训等方面体系。

在维修管理方面，美国海军维修管理层次分明，信息支持手段丰富。美军建立了“岸基统管、舰基组织、基层维修”三级管理模式。岸基维修管理部门包括领导层、组织管理部门、维修器材供应部门、维修监督小组。舰基维修管理由舰长全面负责本舰装备维修与器材管理工作，供应部门统一负责本舰维修器材申领、保管和分发，各部门按照“谁使用、谁维护”的原则，具体负责相应装备的修理保障，少数通用和专用装备专门指定负责部门。航空保障装备的维修部门主要为航空部门和飞机舰基维修部门。为了更好地进行维修管理工作，美海军研发了维修与器材管理系统，用于维修的计划、管理、控制、监管、协调、器材供应等，为舰基和岸基维修部门提供各类维修管理相关信息。其主要包括计划维修系统（PMS）、维修数据系统（MDS）等。

在维修实施方面，美海军建立了以中级士官为主体、专职维修人员和兼职维修人员搭配，士官士兵和新兵搭配的维修力量层次。其设有维修支持分队，按照层次搭配设置了维修力量，并使用航修队、航母与现场服务分队加强维修能力。维修支持分队由经验丰富、维修技能高超的专职维修人员（服役时间较长的高级士官）构成，有效增强了各中队的舰员级维修力量。维修支持分队对外的职责是辅助所在中队维修工作组的某些维修工作，既可与工作组共同完成，也可独立承担完成。

舰上基层维修能够使用可视化信息板、维修需求板、维修与器材管理系统，为岸舰维修部门提供舰载机和保障装备的维修计划、进度、行动控制和实施方法。美海军在计划维修系统（PMS）基础上开发了新一代舰员级维修管理系统（OMMSNG），负责舰员级维修任务具体实施的规划、安排、报告和跟踪。海军海上后勤中心数据库接收和分发维修和器材数据，是海军舰船的中心岸基数据库，对维修和配置信息进行归档和维护。

通过信息化平台提高了维修工作效率，可以全面记录航空保障装备维修保障细节，包括维修实施情况、装备故障历史数据、发现的问题和整改建议等，这为实现装备健康管理和实时战备状态控制提供了基础。

7 面向架次率的航空保障集成设计与验证技术

面向架次率的航空保障集成设计的主要任务是采用均衡的航空保障资源和恰当的航空保障技术实现航空保障作业架次率目标。航空保障集成设计是实现指挥管理与任务规划、起飞保障、着舰引导、回收保障、驻留转运及资源保障等技术高效均衡集成的核心技术。航空保障系统的集成设计与验证技术研究对于提高母舰保障资源利用率、提高综合保障效率、提升舰载机出动回收能力具有重要意义。

航空保障作业架次率定义为在特定任务和环境条件下，能够保障舰载机在规定时间实现的出动回收架次数。航空保障作业架次率可以看作航空保障作业循环样式、航空保障作业周期、波次保障舰载机数量、持续时间的函数。

例如，航空保障作业循环样式按照双波次循环出动、航空保障作业周期1.5h（1+30），波次保障舰载机数量12架，每天持续12h，则计算可得航空保障作业架次率96架次/12h。

美国海军用两个典型的航空保障作业架次率表征航母航空保障能力。一是持续作业架次率，定义为持续30天（26个飞行日，4个机械日），每天作业12h，能够保障舰载机（包括固定翼飞机和旋翼机）的平均日出动架次。“尼米兹”级航母最高能够实现每月4284个架次，平均165架次/天。二是高强度出动架次率，定义为持续4天，每天作业24h，能够保障舰载机（包括固定翼飞机和旋翼机）的平均日出动架次。“尼米兹”级平均每天可以出动228架次，4天合计912架次。

根据当日作战任务，美国海军日飞行时间12h可分为昼间、夜间、昼夜交替三种，昼间为6～18时或9～21时，昼夜交替为0～12时，夜间为18时至次日6时。

架次率生成主要由舰载机可用能力、飞行员可用能力、航空保障作业能力三方面能力构成。1997年7月，美国“尼米兹”号航母与第9航空联队进行了为期4天的高强度演习，美国海军分析中心（CNA）对该次演习的数据进行分析认为：航空保障作业是生成出动架次率的首要因素，其次是飞行员可用能力，最后是舰载机可用能力。

面向架次率的航空保障集成验证主要采用实船试验和仿真推演两种手段。

1997年美国航母高强度演习，设定了攻击任务、战场控制任务、其他任务。攻击任务包括空中遮断（AI）、近程空中支援（CAS）、阻断（INT）、进攻性防空作战（OCA）、压制敌防空火力（SEAD）；攻击支援任务包括电子支援（ES）、空中加油（MTNK）、战术空中侦察（TARPS）；战场控制任务是指对海陆空作战空间实施控制，保护关键的设施和部队，支持火力投送；其他任务包括空中早期预警、防御性防空、海面搜救支援、武装侦察、功能检查试飞、后勤保障等。

除了演习这种形式，实际作战也可以看作实船试验验证手段。2002年阿富汗战争中，“尼米兹”级平均每天的航空保障作业架次率达到90～100架次，2003年伊拉克战争中则为120～130架次，几乎相当于中小国家空军每日能出动的总量。

仿真推演方面，美国航母项目执行办公室（PEO Carrier）和海军系统司令部（NAVAIR）委托AVW技术公司，利用建模与仿真，进行了“福特”级航母航空保障作业架次率的计算，包括30天持续作业（26天飞行日，4天机械日，每天作业12h），4天高强度作业（每天作业24h）。AVW在计算中，把“福特”级航母航空保障作业架次率作为航空保障各类集成要素的函数，通过作业流程推演确定架次率，涵盖了舰载机加油、弹药转运和加挂、舰载机转运、状态检查、飞机维修保养、起飞、引导、回收拦阻等作业过程。“福特”级持续作业架次率的门限值为160架次，目标值为220架次，高强度作业架次率的门限值为270架次，目标值为310架次。

通过实船试验或仿真推演或两者结合，最终验证了实际的航空保障能力，才能实现航空保障集成设计的闭环。

8 结束语

航空保障系统是连接航母与舰载机的桥梁，也是实现舰机适配、保障航母核心战斗力的关键。纵观航空保障技术的发展历程，由滑跃起飞到电磁弹射、由人工着舰引导到全自动着舰引导、由油水气电多站点独立保障到一站式保障，高自动化、高智能化、高保障效率已成为世界航空保障技术的发展趋势。未来随着舰载机保障需求的不断提升，大数据、人工智能等前沿技术的不断发展，航空保障技术也将持续演进变革，不断向无人化、智能化迈进。 AST

参考文献

[1] 李耀宇,朱一凡,贾全, 等.基于排队网络的舰载机甲板调运优化调度策略生成方法[J].海军工程大学学报,2013,25(5):26-30.
Li Yaoyu, Zhu Yifan, Jia Quan, et al. Queueing network-based optimal scheduling policy made for carrier aircraft on flight deck [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 25(5): 26-30. (in Chinese)

[2] 石剑琛.美国海军航母作战系统发展及展望[J].舰船科学技术, 2012, 34(4): 132-135.
Shi Jianchen. The development and prospect of US navy carrier combat system [J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(4): 132-135. (in Chinese)

[3] 朱熠.舰载机起飞控制与仿真技术研究[D].南京：南京航空航天大学,2012.
Zhu Yi. Research on control and simulation of launch technology for carrier-based aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

[4] 任锐,马大为,姚琳,等.多级气动液压弹射装置建模及性能研究[J].兵工学报, 2016, 37(8): 1365-1372.
Ren Rui, Ma Dawei, Yao Lin, et al. Theoretical modeling and performance research on multi-stage pneumatic and hydraulic catapult device [J]. ACTA Armamentarii, 2016, 37(8): 1365-1372. (in Chinese)

[5] 余晓军,高翔,钟民军.蒸汽弹射器的动力学仿真研究[J].船海工程, 2005(3): 1-4.
Yu Xiaojun, Gao Xiang, Zhong Minjun. Simulation on dynamics of the steam-powered catapult [J]. Nautical Engineering, 2005 (3): 1-4. (in Chinese)

[6] 杨杰.蒸汽弹射器与电磁弹射器[J]. 科技视界, 2015(15): 152.
Yang Jie. Steam catapult and electromagnetic catapult [J]. Science & Technology Vision, 2015(15): 152. (in Chinese)

[7] 王海东,毕玉泉,时立攀,等.喷气偏流板装置动力学分析及仿真[J].机械设计与制造工程,2019, 48(3): 25-28.
Wang Haidong, Bi Yuquan, Shi Lipan, et al. The dynamics analysis and simulation of the jet blast deflector installation [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(3): 25-28. (in Chinese)

[8] 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.
Wang Hao. Analysis on the key technique of ski-jump takeoff of oversea carrier-based aircraft [J]. Trainer, 2018(3): 27-30. (in Chinese)

[9] 张凯伦,韩维,陈志刚.基于光学引导下飞行员操纵着舰建模[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(4): 395-400.
Zhang Kailun, Han Wei, Chen Zhigang. Modeling of pilot maneuvering carrier-based aircraft on landing on FLOLS [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2018, 33(4): 395-400. (in Chinese)

[10] 郑峰婴.舰载机着舰引导技术研究[D].南京:南京航空航天大学, 2007.
Zheng Fengying. Research on shipborne aircraft landing guidance technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

[11] 李佳桐.全自动着舰纵向引导律优化设计[D].黑龙江:哈尔滨工程大学,2016.
Li Jiatong. Optimization design of automatic landing guidance law [D]. Heilongjiang: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)

[12] 朱承邦. 现代航空母舰拦阻装置[J]. 舰载武器, 2009(10): 75-79.
Zhu Chengbang. Modern aircraft carrier interceptor [J]. Shipborne Weapons, 2009(10): 75-79. (in Chinese)

（责任编辑　陈东晓）

作者简介

刘广（1978－）男，硕士，研究员。主要研究方向：舰船航空保障。

颜世伟（1982－）男，博士，工程师。主要研究方向：舰船航空保障。

李海旭（1985－）男，硕士，高级工程师。主要研究方向：舰船航空保障。

Tel：010-59516541

E-mail：haixu2000@126.com

马欣瑞（1992－）女，硕士，工程师。主要研究方向：舰船航空保障。

彭修全（1993－）男，硕士，工程师。主要研究方向：舰船航空保障。

Aviation Support Technology Development for Foreign Aircraft Carrier

Liu Guang[1], Yan Shiwei[2], Li Haixu[1,*], Ma Xinrui[1], Peng Xiuquan[1]

1. CSSC Systems Engineering Research Institute, Beijing 100036, China

2. Troops 92942, Beijing 100161, China

Abstract: The Aircraft carrier aviation support system is the core of ensuring the safe takeoff, landing and orderly operation of carrier aircraft on the aircraft carrier. It is also the basis and guarantee for the efficient dispatch and recovery of carrier aircraft. By researching the relevant foreign literature, this paper summarizes the aviation support technology for foreign aircraft carrier from six aspects: aviation support mission planning and command management technology, carrier-based aircraft take-off support technology, aircraft landing guidance technology, carrier-based aircraft arresting technology, carrier-based aircraft resident, transfer and resource support technology as well as aviation support integrated design and verification technology for sortie rate. The performance parameters and operation principles of some important foreign aviation support equipments are sorted out. Finally, the application of foreign aircraft carrier aviation support technology is concluded, and the future research direction is prospected.

Key Words: aircraft carrier; aviation support; sortie rate

Received: 2019-09-10; **Revised:** 2019-10-02; **Accepted:** 2019-12-05

***Corresponding author.Tel. :** 010-59516541 **E-mail:** haixu2000@126.com