



Part 02

航空母舰篇

航空母舰是一种以舰载机为主要作战武器的大型水面舰艇，通常拥有巨大的甲板和舰岛，舰岛大多坐落于右舷。航空母舰是现代海军的重要武器，也是一个国家综合国力的象征。依靠航空母舰，一个国家可以在远离其国土的海域以及不依靠当地机场的情况下对目标施加军事压力和进行作战。





建造航空母舰需要克服哪些技术难题

航空母舰是世界上最庞大、最复杂、威力最强的武器之一，是一个国家综合国力的象征。它是囊括了舰体（含适航性能和续航动力及移动机场）、四维电子设备（含空天导航、高新技术雷达及抗电磁设备）、自卫武器（含导弹、防空火炮、反潜武器）和攻击武器（舰载机）等不同技术成分的系统组合，不仅科技含量和技术难度非常高，技术要求复杂，而且对新材料、新工艺的应用都有特殊而苛刻的要求，绝非一朝一夕可以达成。

目前，世界上有能力独立自主建造航空母舰的国家极少。从技术难度分析，设计和建造航空母舰必须具备五大能力：大型计算机辅助工程设计、大型试验水池和风洞、特种钢材、配套电子设备、舰载机技术。

冷战时期，美国依靠大型计算机的帮助，仅在一年半内就绘制出“尼米兹”级核动力航空母舰建造所需的十余万张图纸。而苏联不具备这种条件，因此只能大量运用人工运算和绘制，结果用了比美国多两倍的时间才勉强绘制出大吨位航空母舰的设计图纸。



美国建造的“尼米兹”级核动力航空母舰

美国在制造真正意义上的航空母舰时，前期对设计、制造、材料等相关领域的研究和试验要求很高。而拥有大型试验水池和风洞，是设计航空母舰的重要前提。目前，世界上只有美国、俄罗斯、英国和法国等少数国家拥有这些研究和试验设施。根据美国海军工程规范，建造航空母舰一般要经过船体放样、船体机件加工、船体

装配、设备安装等十余道复杂工序。其中，航空母舰的船体放样至关重要。这道工序需要以标准化的大型试验水池、风洞及超高速计算机为依托，当今世界仅有不到10家公司有能力完成。

缺乏特种钢材也是许多国家无法建造航空母舰的重要原因。由于航空母舰的船体必须能承受住9级以上风浪，飞行甲板必须能承受住舰载机起降时的高温和高摩擦力，所以对钢材强度要求很高。目前，只有极少数国家有能力制造航空母舰用钢，美国还将其列为战略物资，不允许国内企业擅自对外出口。

配套电子设备能否跟上航空母舰建造周期也是重要制约因素。美国航空母舰使用的电子配套系统，一般在船体建造前几年便已着手研制和生产，这样可以避免在总装时出现空等局面。相比之下，苏联/俄罗斯在建造“库兹涅佐夫”号航空母舰时因为电子设备未能及时到货，导致其至少延误了一年半工期。



苏联/俄罗斯建造的“库兹涅佐夫”号航空母舰

此外，舰载机作为航空母舰最关键的武器，其制造难度也很大，目前舰载机制造技术仍然控制在极少数国家手里。由于舰载机的制造要求极为苛刻，因此常常使那些有心建造航空母舰却无力制造舰载机的国家陷入窘境。与舰载机配套的弹射技术也是许多国家绕不开的难题，尽管蒸汽弹射器原理简单，但并不容易生产，其所需的承载滑块、导轨、汽缸、活塞及传动装置不仅需要超级精密机床加工，而且工艺流程非常复杂且精度要求极高。现今这些制造技术为美国独家垄断，相关技术高度保密。



美国海军 F/A-18 “大黄蜂” 战斗 / 攻击机正在弹射起飞



美国海军“林肯”号航空母舰及其舰载机编队在阿拉伯海执行任务



建造航空母舰对材料有何要求

作为支持海军海空立体作战的武器平台，航空母舰在现代战争中发挥着不可替代的作用，因此其质量也必须达到极致。建造航空母舰的各种材料必须是各个领域内的顶尖材料，或者是只有航空母舰才有资格使用的稀有材料。在各种材料中，钢材无疑是最重要的一种。

航空母舰用钢特别是飞行甲板用钢要求极高，在军用舰艇中也许只有核潜艇可以与之相比。具体来说，建造航空母舰所使用的钢材必须具备以下特性。

第一，抗海水腐蚀。海水对舰艇底部的腐蚀特别厉害，会严重影响舰艇的航行速度和防护能力。因此，建造一般民用和军用舰艇的钢材都要求有较强的抗海水腐蚀能力。相比之下，航空母舰的作战环境更为恶劣，维护所需时间更长，因此，要求所用钢材抗海水腐蚀的能力就更强。



美国海军“卡尔·文森”号航空母舰高速航行时激起巨浪

第二，防磁。一般钢铁都带有一定磁力。由于地球本身是有磁场的，一般低磁钢铁制造的舰艇服役久了，会受地球磁场磁化，产生磁力。磁力对军舰来说是非常不利的。因为这意味着舰艇容易被敌方磁力探测仪侦测到，或易受到敌方磁性水雷等武器的攻击。因此，航空母舰用钢材的磁力越小越好。



第三，耐高温和耐冲击能力。飞机在陆地上起飞，一般需要在3千米长的跑道上助跑、起飞。而在航空母舰上，舰载机在一两百米内，就要从静止状态完成滑跑、起飞、腾空的过程。除了依靠弹射装置助推外，更要求舰载机本身有强大的推力。当舰载机起飞时，发动机喷射出的火焰温度极高，足以熔化普通钢材制作的甲板。另外，舰载机着舰时，对甲板的冲击力极大。因此，航空母舰对甲板的抗冲击力、抗扭曲力的要求非常高。另外，航空母舰甲板还要有抵抗敌方穿甲弹攻击的能力。



美国海军 F/A-18 “大黄蜂” 战斗 / 攻击机起飞时喷射的火焰

第四，高强度、高韧性。建造航空母舰所使用的钢材强度要远远高于普通军用舰艇的钢材强度，采用高强度钢板可以减轻船体重量，增强抗弹能力。特别是飞行甲板的钢材，由于要承受舰载机起飞过程中的高温和高摩擦力，所以更要精益求精。船用特种钢材的屈服强度一般用 MPa（兆帕）表示，油轮、散装货船、集装箱船等民用船只所用钢材屈服强度只需要 250 MPa 即可，普通军用舰艇在 300 MPa 以下就行。而航空母舰用钢，特别是航空母舰飞行甲板用钢一般要求在 850 MPa 以上。

目前，世界上能制造航空母舰、潜艇用钢的只有美国、俄罗斯、法国和日本等少数几个国家。其中，质量最好的钢材是美国开发的 HY 系列钢材（包括 HY-80、HY-100、HY-130 等）和 HSLA 系列钢材（包括 HSLA-80、HSLA-100、HSLA-115 等），以及俄罗斯开发的 AK 系列镍铬加钛合金钢。



俄罗斯海军“库兹涅佐夫”号航空母舰在大洋中航行



法国海军“戴高乐”号航空母舰在大洋中航行



斜角甲板与全通甲板相比有何优势

巨大的飞行甲板是航空母舰最明显的外形特征，它是航空母舰特有的也是极其重要的分层甲板。陆基飞机如果起飞时速度不够，仅需要延长起飞时间即可，舰载机则完全不同，因为航空母舰飞行甲板的空间有限，舰载机没有多余的跑道滑行。因此，飞行甲板的设计对航空母舰的战斗力有着至关重要的影响。

在航空母舰发展初期，飞行甲板就是在舰艏处装置一条长直钢板，因跑道长度有限而起飞速度不足，加上飞行甲板末端的上层建筑构造会产生不利于飞行的气流，这种设计很快被摒弃。之后，出现了全通甲板，其外观为长直的矩形，拦阻网将甲板分为前后两部分，前段为舰载机起飞区，后段为舰载机降落区。当拦阻网放下时，甲板前后两部分合二为一，舰载机就能从舰艏向前自由测距滑跑起飞。



采用全通甲板的日本“凤翔”号航空母舰



采用全通甲板的美国“游骑兵”号航空母舰

自航空母舰问世至 20 世纪 50 年代初期，全通甲板一直是各国航空母舰的主流设计方式。喷气式飞机时代来临后，以往能够满足螺旋桨飞机起飞的前段跑道长度无法令其起飞，若从后段甲板起飞，则会令其他舰载机无法降落，从而降低起降效率。

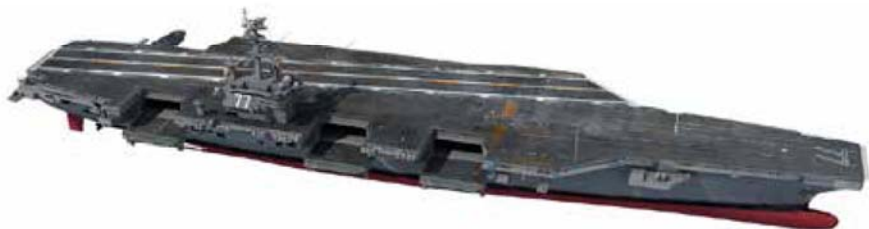
另外，全通甲板也存在降落失败会撞毁跑道上飞机的问题。英国曾尝试在甲板上铺设橡胶，让舰载机在没有放下起落架的条件下降落，但这会造成舰载机降落后出现难以移动的情况。

有鉴于此，英国海军上校丹尼斯·坎贝尔（Dennis Campbell）提出将甲板至舰身中心线左偏 10° ，前段甲板就可用来安全地停放飞机和进行起飞的设计概念，若飞机在斜角区降落失败也不会撞到起飞区与停机区的飞机。1952 年 5 月，美国海军也在“中途岛”号航空母舰（USS Midway CVB-41）的斜角甲板上尝试起降螺旋桨飞机与喷气式飞机，效果皆令人非常满意。此后，斜角甲板设计技术逐渐成熟，喷气式舰载机也在 20 世纪 50 年代中期大量服役，美国海军还将大量老式航空母舰改为斜角甲板。



美国海军“中途岛”号航空母舰

时至今日，中大型航空母舰大多采用斜角甲板，舰体前方的直通部分用于飞机起飞，长 $70 \sim 100$ 米，斜角部分位于主甲板左侧，用于飞机降落，长 $220 \sim 270$ 米，两部分夹角为 $6^\circ \sim 13^\circ$ 。与全通甲板相比，斜角甲板的优势是：降落飞机未能钩住拦阻索时，可马上拉起复飞而不会与前甲板停放的飞机相撞。另外，舰载机起飞和降落可同时进行。



采用斜角甲板的美国海军“布什”号航空母舰



采用斜角甲板的法国海军“戴高乐”号航空母舰



滑跃起飞的工作原理和优点是什么

从航空母舰诞生至今，其舰载机的起飞方式主要有4种：自主起飞、弹射起飞、垂直起飞和滑跃起飞。其中，自主起飞类似于陆基飞机的起飞方式，飞机依靠自身的动力沿飞行甲板跑道加速起飞，现在已经很少使用。而垂直起飞存在着难以克服的致命缺陷，会限制舰载机的综合作战能力，所以应用并不广泛。因此，各国现役主力舰载机大多采用弹射起飞和滑跃起飞两种方式。由于弹射起飞的技术要求较高，目前仅有美国完全掌握了蒸汽弹射器制造技术，而英国、俄罗斯、西班牙、意大利、印度和泰国等国的航空母舰只能采用成本低、技术简单的滑跃起飞方式。

滑跃起飞由英国人道格拉斯·泰勒（Douglas Taylor）发明，最早于20世纪70年代应用在“无敌”级航空母舰（Invincible class aircraft carrier）上。滑跃起飞的原理是飞机贴着甲板进行滑行加速时，经由向上抬升 $4^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的飞行甲板获得正轨迹角、俯仰角速度和一定的初始高度。滑跃甲板会使飞机的部分速度转为向上的升力，相比于垂直起飞，这种方法更能节省油耗。



装有滑跃甲板的英国海军“无敌”级航空母舰



装有滑跃甲板的意大利海军“加富尔”号航空母舰

与弹射起飞相比，滑跃起飞的优点包括：弹射起飞必须在航空母舰上安装弹射器，并且在这个区域不能进行其他作业，而滑跃起飞不需要，这就扩大了航空母舰的可用空间；弹射起飞需要把舰载机牵引到弹射区由专门的人员固定到锁定器上，等人员离开后才能起飞，而滑跃起飞只要前方没有障碍就可起飞；舰载机滑跃起飞时离海面较高，不易触到大浪，而弹射起飞时高度较低，而且弹射时巨大的过载，可能使飞行员产生意识昏迷；大部分弹射式航空母舰仍然采用蒸汽弹射器，必须耗费大量淡水，而淡水是海上的重要资源，滑跃起飞则不需要消耗淡水；如果滑跃甲板在战斗中被损坏，经过修补后，舰载机仍可起飞。而弹射器一旦损坏，舰载机就无法起飞。



装有滑跃甲板的俄罗斯海军“库兹涅佐夫”号航空母舰

滑跃起飞的缺点是对飞行员的驾驶技术要求较高，舰载机的载重也比弹射起飞的舰载机少（载重中包括油料，过重会影响其航程），还会降低舰载机的离舰速度、增加起飞所需跑道距离，舰载机起飞时需额外加速，要耗费更多燃油，导致其作战时间较短、起飞效率也比弹射起飞低。由于滑跃起飞方式一次只能让1架舰载机起飞，所以在执行大规模机群的行动时颇费时间。为了弥补这个缺点，俄罗斯“库兹涅佐夫”号航空母舰（Kuznetsov 063）设计了两条跑道。



装有滑跃甲板的泰国海军“查克里·纳吕贝特”号航空母舰



蒸汽弹射器如何将舰载机弹射升空

蒸汽弹射器 (steam catapult) 是二战后现代航空母舰使用的主要飞机弹射器，这主要是由于喷气式飞机的出现，舰载机重量大幅提升，自力起飞和原先的弹射器设备已不足以满足其需求，于是英国人柯林·米切尔 (Colin Mitchell) 在 1951 年提出将航空母舰蒸汽轮机的蒸汽连动到弹射器上，进而发明了航空母舰使用的蒸汽弹射器，并在“珀尔修斯”号航空母舰 (HMS Perseus R51) 上首次安装试验。



美国海军“埃塞克斯”级航空母舰
的蒸汽弹射器外部特写



时至今日，蒸汽弹射器已经是一个非常复杂的系统工程，其主要包括起飞系统、蒸汽系统、归位系统、液压系统、预力系统、润滑系统和控制系统等。蒸汽弹射器有两种弹射方式：拖索式和前轮牵引式，前者是以钢索将舰载机挂载于滑块上，再快速向前移动，将飞机沿着甲板上的轨道拖曳加速，进而使飞机起飞，2018年退役的巴西“圣保罗”号航空母舰（Sao Paulo A12）便采用这种弹射方式；后者是将飞机前轮上的弹射杆挂载于甲板上弹射器的滑块中，经由弹射的拖曳获得加速效果，它可以节省大量的人力，弹射时间也更短，但舰载机需要经过专门设计，目前这种弹射形式是主流。



巴西海军“圣保罗”号航空母舰

蒸汽弹射器以蒸汽为动力，其管线铺设于飞行甲板下，并在甲板的沟槽上连接一个滑块，在前轮牵引式的条件下，舰载机会用弹射杆勾住滑块，当弹射器充气完成后，甲板会立起阻挡热蒸汽、保护甲板作业人员的喷流挡板（分为耐热砖和流水冷却式两种，目前新建航空母舰大多采用前者，在不需要进行弹射作业的情况下可盖起来成为甲板的一部分），飞机再借由蒸汽的强大推力驱动滑块前进而起飞，多余的蒸汽再于管线末端排出，若气候恶劣、甲板勤务人员不好进行作业时，可以由甲板上的弹射器综合控制系统操作，其为甲板上的一个半圆形透明操作室，船员可通过该处操作弹射系统，不使用时可关闭使其成为甲板的一部分。



小知识:

一般来说,大型航空母舰上会配备2部以上的弹射器,可在2秒内将静止的舰载机加速到300千米/时,大约每20秒即可让1架舰载机升空。

由于蒸汽弹射器造价昂贵,制造和安装技术比较复杂,维护保养非常费时,占用航空母舰空间过大和过重(以美国“尼米兹”级航空母舰为例,4部蒸汽弹射器重量就有2280吨,体积则有2265立方米),所以只有极少数国家拥有相关的制造技术。目前,美国拥有C-13型蒸汽弹射器,除供给美国海军使用外,法国海军也有引进。



美国海军航空母舰
勤务人员正在检修蒸汽弹射器



美国海军F/A-18“大黄蜂”战斗/攻击机借助蒸汽弹射器起飞

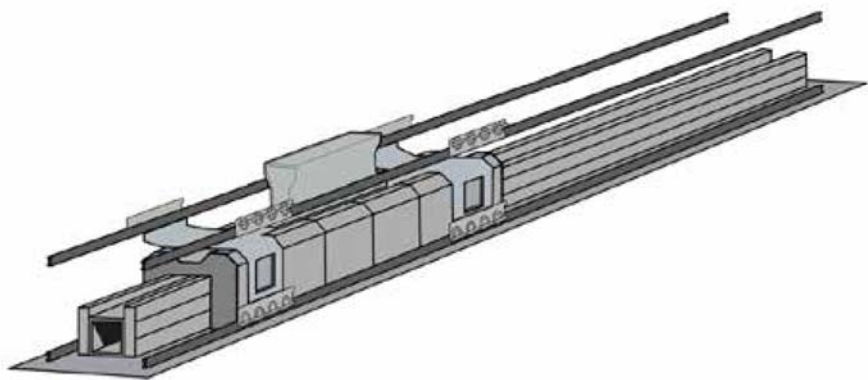




电磁弹射器与蒸汽弹射器相比有何优势

电磁弹射器是美、英等国正在研制的最新一代航空母舰专用飞机弹射器，其中美国已公开宣布研制成功，并已将其安装在正在建造中的“福特”级航空母舰（Ford class aircraft carrier）上。电磁弹射器的原理类似于磁悬浮列车，能有效降低维护和弹射成本，并能提升航空母舰的自动化程度。电磁弹射器使用一台直线电动机作为动力来源，这是其与传统的蒸汽弹射器最大的不同。

电磁弹射器的装备重量很轻（只有 20 吨左右）、造价适中、维护成本较低，系统的淡水消耗量较少，同时也更节能。电磁弹射器占用的空间更小，运作需要的人员也更少，可靠性也更高。一部蒸汽弹射器弹射一次需要消耗大量蒸汽，并且要在航空母舰甲板下安装庞大的机械设备。电磁弹射器使用航空母舰产生的电能，安装也更为简易。另外，将大量的水烧开产生蒸汽储备需要十几个小时，而电磁充能只需要数分钟，这种紧急应战能力在实战中具有很大的优势。



电磁弹射系统示意图

相比于蒸汽弹射器，电磁弹射器可以弹射更重型的飞机，其加速的过程更均匀，对飞机的结构伤害也更小。电磁弹射器的加速度可以精确地控制，针对重型战斗机和小型无人机可调节不同能量输出，以适应其不同起飞速度要求。美国的电磁弹射器弹射速度的范围为每秒 28 ~ 103 米，中间为无挡段，但传统蒸汽结构只有几个较粗挡段，飞机设计重量只能为特定几种重量，过轻或过重都不行。另外，电磁弹射器的最大弹射输出功率能够达到 122 兆焦，而传统的蒸汽弹射器只有 95 兆焦。相比之下，电磁弹射器的能量输出多了 28%。电磁弹射器的能量利用率也高出了 5%。

当然，电磁弹射器同样存在缺点：一旦航空母舰的电力系统或核反应堆出现故障，整套系统将无法运作。另外，由于电磁弹射器需要消耗大量的电力，因此作为其能量来源的4套发电机组也将占用较大的空间。



安装有电磁弹射器的美国海军“福特”级航空母舰



“福特”级航空母舰搭载的 F/A-18F “超级大黄蜂” 战斗 / 攻击机准备弹射起飞



“菲涅耳”透镜光学助降装置如何帮助舰载机着舰

在航空母舰诞生之初，舰载机的降落作业非常困难，并且发生事故的伤亡较多，因而最早在美国海军“兰利”号航空母舰（USS Langley CV-1）上出现了两种革命性的辅助降落制度：设置降落指挥官、使用拦阻网。其中，降落指挥官一般由技术纯熟的飞行员担任，主要负责在甲板上判断降落条件、飞机高度等信息，然后挥动旗帜传递信号，引导舰载机降落。后来，这两种制度都传入了英国。

进入喷气式舰载机时代后，由于其速度过快，降落指挥官和飞行员都反应不及，原有制度已不能保证安全降落。1952年，英国海军中校尼可拉斯·古德哈特（Nicholas Goodhart）设计出了早期的光学助降装置——助降镜。它是一面大曲率反射镜，设在舰艏的灯光射向镜面再反射到空中，给飞行员提供一个光的下降坡面（与海平面夹角为 $3.5^{\circ} \sim 4^{\circ}$ ），飞行员可以沿着这个坡面并以飞机在镜中的位置修正误差，直到安全降落。

由于助降镜受海浪颠簸影响较大，飞行员往往会跟丢光柱，并且难以再次捕捉。20世纪60年代，英国研制出第二代光学助降装置——“菲涅耳”光学助降装置，其在原理上与助降镜相似，也是在空中提供一个光的下滑坡面，但它提供的信号更有利于飞行员判断方位，并修正误差。



美国海军“尼米兹”级航空母舰勤务人员正在检修“菲涅耳”光学助降装置

“菲涅耳”光学助降装置设在航空母舰中部左舷的一个自稳平台上，以保证其光束不受舰体左右摇摆的影响。该装置由4组灯光组成，主要是中央竖排的5个分段的灯箱，通过“菲涅耳”透镜发出5层光束，光束与降落跑道平行，与海平面保持一定角度，形成5层坡面。灯光由着舰引导员（Landing Signal Officer, LSO）控制，他们在舰体后部左舷的平台上，分别观察舰载机的位置、起落架、襟翼、尾钩等情况，一面与飞行员通话，一面操纵灯光信号。在舰岛上部左后方设有主飞行控制室，1名飞控官监视飞行甲板和空中的情况，进行最后的安全把关。



小知识：

“菲涅耳”透镜是由法国物理学家奥古斯汀·菲涅尔（Augustin Fresnel, 1788年5月10日至1827年7月14日）发明的，他被誉为“物理光学的缔造者”。

当不允许舰载机着舰时，左右两侧红色灯发出闪光，绿色水平基准灯不亮；当允许舰载机着舰时，红色灯不亮，绿色基准灯则发出固定光，“菲涅耳”透镜也同时发光。它发出的光要比绿色基准灯强，而且上下不同位置的透镜发出的定向光束各代表一种下滑角。黄色光是高的下滑坡面，红色光是一个低的下斜坡面，橙色光是正确的下滑坡面。舰载机飞行员下滑时，如果看到的是橙色光束，就可以准确地着舰了；如果看到的是黄色光束，就说明舰载机下滑角度太大；如果看到了红色光束，则说明舰载机下滑角度太小。



美国海军“尼米兹”级航空母舰上的“菲涅耳”光学助降装置





美国海军“尼米兹”级航空母舰上的着舰引导员正在引导舰载机着舰



拦阻索如何拦截降落的舰载机

舰载机拦阻装置是航空母舰上的重要辅助设备，其实现了舰载机在长度有限的航空母舰甲板上安全着舰。拦阻索是拦阻装置中的重要组成部分，它与舰载机直接接触。早在1911年，美国“宾夕法尼亚”号装甲巡洋舰（USS Pennsylvania ACR-4）便利用拦阻索，首次实现了飞机拦阻降落。时至今日，各主要国家已经先后研发了重力式、制动式、液压式、液压缓冲式、涡轮电力式等多种类型的拦阻装置。



美国海军“尼米兹”级航空母舰勤务人员正在整理拦阻索

航空母舰最早使用的是重力式拦阻装置，它的结构非常简单，就是两端系上沉重沙袋的粗麻绳。使用时把绳子拉紧横向布置在舰载机预计降落的甲板上。舰载机降落时，机身下面的尾钩钩住一根拦阻索，沉重的沙袋与甲板产生的摩擦力使飞机减速。为了提升拦阻效果和成功率，早期航空母舰通常布置十几根甚至 20 多根拦阻索。

重力式拦阻装置虽然方便，但拦阻能量较低，在螺旋桨舰载机时代尚能发挥作用，进入喷气式舰载机时代后就失去了使用价值。不过，这种横跨甲板布置拦阻索的方式和拦阻原理一直沿用至今，成为各国航空母舰拦阻装置的标准配置形式。目前，现役航空母舰主要使用液压缓冲式拦阻装置。喷气式舰载机之所以在降落时并不会关闭发动机，主要是为了保证在情况不好时可以马上复飞，所以现代航空母舰的拦阻索数量已大幅减少。



美国海军 F/A-18 “大黄蜂” 战斗 / 攻击机着舰时尾钩与甲板擦出巨大火花

以美国航空母舰为例，舰上通常设有 4 根拦阻索，第一根设在距离斜角甲板尾端 55 米处，然后每隔 14 米设一根，由弓形弹簧张起，高出飞行甲板 30 ~ 50 厘米。由于要承受舰载机的巨大冲击力、甲板的摩擦力以及各种化学物品和海水的腐蚀，拦阻索不仅要有很高的强度，还须保持很好的柔韧性和耐腐蚀性，因此其对索体材料和编织工艺要求极高。美国航空母舰的拦阻索直径约 35 毫米，由 6 股钢丝绳组成，每股由 12 根主钢丝和 12 根辅助钢丝紧密缠绕，最大可承受约 85 万牛的拉力。

当舰载机即将降落时，先放下起落架和襟翼，再将尾钩放下。舰载机俯冲着舰，其尾钩就可能钩住间隔布置在甲板上的多根拦阻索中的一根，通常第二、第三根拦阻索的拦阻概率最高。舰载机的尾钩钩住拦阻索继续向前滑跑，拦阻索给舰载机施加向后的作用力，使其速度越来越小，最终安全停在甲板上。在舰载机停止的瞬间，拦阻索中存在的应力可使舰载机向后滑动很小一段距离，拦阻索会自动从舰载机的尾钩上脱落，使失去拉力的拦阻索恢复到原来的位置，为下一架舰载机的降落做好准备。至此，一架舰载机在拦阻索的帮助下完成降落。如果着舰时没有钩住拦阻索，舰载机则可以加大发动机油门采取逃逸复飞措施，在低空飞行后重新着舰。



小知识：

据美国海军统计，正常情况下白天着舰的舰载机尾钩钩住第二、第三根拦阻索的概率约为 62%，尾钩钩住第四根拦阻索的概率约为 18%，尾钩钩住第一根拦阻索的概率约为 16%。而在夜间，尾钩大多会钩住第三、第四根拦阻索。另外，白天舰载机的逃逸复飞率为 4%，夜间则高达 12% ~ 15%。



美国海军 F/A-18 “大黄蜂” 战斗 / 攻击机着舰时钩住拦阻索



成功降落的美军海军 F/A-18 “大黄蜂” 战斗 / 攻击机



拦阻网如何保护着舰失败的舰载机

拦阻网是为了让降落的舰载机免于意外采取的一项保险措施，如果降落的舰载机没有钩住拦阻索并且无法逃逸复飞（如飞行员受伤、机体受损、燃油耗尽等），拦阻网可以避免舰载机撞上甲板上停放的飞机或摔出飞行甲板，并且不会毁损机体。



美国海军“尼米兹”级航空母舰勤务人员正在整理拦阻网



1926年，美国海军格利上尉驾机在“兰利”号航空母舰上降落时，尾钩没有钩住拦阻索，飞机径直撞向了停在甲板上的机群，导致12架飞机受损。事故发生后，舰长决定用木架和缆绳在飞行甲板前架起一道网，用于拦阻降落失败的飞机，这就是拦阻网产生的由来。拦阻网的发明大幅提升了飞机的降落效率，1923年末使用拦阻网时美国海军最佳的成绩是7分钟降落3架飞机，1926年使用拦阻网后则是4分20秒降落了6架。

现代航空母舰配备的拦阻网一般由高强度尼龙材料制成，网体由上、下水平主吊带和数量众多的垂直竖带构成，下水平主吊带与后方横贯甲板的一根缓冲钢索连接。舰载机冲入拦阻网后，垂直竖带会缠绕在主机翼上，将冲击力传递到水平主吊带以及钢索上，迫使舰载机停下来。



利用两侧支柱竖立起来的拦阻网

现代航空母舰上的拦阻网一般设在第三根拦阻索处，高约4.5米，宽略大于拦阻索。拦阻网的垂直竖带宽约76毫米，厚约7毫米，间隔约900毫米，可承受的冲击力大于拦阻索。一般情况下，拦阻网并不会张开，而是放在跑道左侧。跑道两侧各有一根可悬挂拦阻网的支柱，放倒在槽内，与飞行甲板齐平。一旦发生紧急情况，勤务人员可在2分钟内支起拦阻网。

与可以重复使用的拦阻索不同，拦阻网使用1次后必须更换。因为拦阻网属于紧急迫降手段，冲入拦阻网中的舰载机会受到不同程度的损伤，而拦阻网也会报废，因此无法再次使用。



美国海军 S-3 “维京”反潜机被拦阻网逼停

航空母舰的升降机如何设置和运作

由于航空母舰的机库位于飞行甲板下面，因此，舰载机在机库和飞行甲板之间的移动需要借助升降机。在航空母舰的运作过程中，升降机扮演着非常重要的角色。其大小和形状都必须合理布局，面积过大会挤占甲板过多的宝贵空间，面积过小则影响飞机在机库和飞行甲板之间的转运效率。

早期航空母舰的升降机一般布置在飞行甲板的中线上，被称为“舷内升降机”。这种升降机的防浪性和安全性较好，但舰体的纵向强度损失较大，需要用几百吨钢材来补差，而且占用的有效空间较大，装甲防护也差，特别是不能同时弹射和回收飞机。后来，美国海军在 1942 年完工的“埃塞克斯”号航空母舰（USS Essex CV-9）上首次采用了“舷侧升降机”，将升降机位置调整到舷侧。



小知识：

美国“福莱斯特”级航空母舰曾在斜角甲板前方设置了一具升降机，以便舰载飞机降落后立刻收入机库，然而后来发现这样做机会其实很少，另外航空母舰航行时溅起的浪花会波及舰载机，因此从“小鹰”级航空母舰开始美国海军又将该升降机的位置调整到侧舷。



舷侧升降机为悬臂梁，其构造是在航空母舰机库甲板的舷边开个洞，在洞外设两道垂直的导槽。升降机平台靠近舷边的一端有几组导向轮卡在导槽内，平台伸到舷外的另一端，在升降机两边用绳索起吊，借升降机侧面导向轮的反作用力来平衡整个升降机的负荷及钢索张力。工作时，导向轮沿导槽上下滚动，平台就可随之上下移动，将飞机由机库升至飞行甲板，或由飞行甲板移至机库。

舷侧升降机的发明使航空母舰飞行甲板不必开口，从而提高了舰体结构强度，且由于三面对空，可起降大型舰载机，并可增加机库的面积。但其缺点也是明显的，升降机必须在舷侧开口，其加工工艺难度较大，同时这会导致舰体水密、气密及防化性能较差，而且海浪也容易冲上升降机平台。不过相比较而言，舷侧升降机还是利大于弊，因此，其至今仍为大多数航空母舰拥有国所采用。



美国海军“企业”号航空母舰使用升降机运送 F/A-18 “大黄蜂” 战斗 / 攻击机

至于升降机布置在左舷还是右舷，则因不同的航空母舰而异。升降机的位置应适于将飞机供给弹射器，并有助于迅速将回收的飞机送入机库。目前，美国“尼米兹”级航空母舰上装有4部升降机，左舷斜角甲板处有1部，右舷有3部。该舰升降机舷侧开口处的四角采用圆弧形，内外有两层门，在遭遇大风浪或核生化武器攻击时，可将两层门密封关闭，使舰体得到加固。美国新建造的“福特”级航空母舰将升降机减为3部，左舷1部位置不变，右舷只保留了2部，原因是前部的升降机较少使用，而且在高海情航行时海水会涌上升降机平台。而英国新造的“伊丽莎白女王”级航

空母舰的 2 部升降机均在右舷。

升降机的尺寸取决于航空母舰上最大飞机的尺寸和输送的有关设备。“尼米兹”级航空母舰上使用的升降机开口宽 23.5 米、纵深长 15.9 米，表面积为 374 平方米，自重 105 吨，提升能力达 40 多吨，表面材料为钢板覆盖铝合金。



美国海军“尼米兹”级航空母舰升降机上的 X-47B 无人机



美国海军“尼米兹”级航空母舰的舰员在升降机上跳水



英国海军“伊丽莎白女王”级航空母舰设在舰岛后方的2部升降机（黄色标识）

毫不起眼的弹药升降机为何至关重要

谈起航空母舰，人们总是对升降机运行过程、拦阻索工作原理、飞行甲板布局、舰载机性能等话题津津乐道。然而，航空母舰上有一个对航空母舰的出动率与性能影响非常大的设备，却很少有人提及，甚至很多人都不知道它的存在，这就是弹药升降机。

航空母舰上的弹药升降机被飞机升降机的阴影所覆盖，在绘制航空母舰三视图的时候，弹药升降机往往被忽视，但是弹药升降机作为航空母舰上不可缺少的存在，会直接制约舰载机的出动效率与架次，那么航空母舰作为一国海军的绝对核心，不起眼的弹药升降机如何影响其战斗力，弹药升降机的位置又会产生哪些影响？

美国“福特”级航空母舰的首舰于2017年7月开始服役，却迟迟没有形成战斗力，主要原因就是弹药升降机出了问题。“尼米兹”级航空母舰的弹药升降机可以以30米/分的速度运送4.5吨弹药，而“福特”级航空母舰的“先进武器升降机”能以45米/分的速度提升10.8吨弹药。虽然“福特”级航空母舰的弹药升降机性能非常先进，但却并不可靠，其11台弹药升降机只有4台能正常使用。



美国海军“福特”级航空母舰的先进武器升降机正在工作

弹药升降机和飞机升降机不同，飞机升降机沟通的是机库甲板与飞行甲板，而弹药升降机沟通的是弹药库、机库甲板、飞行甲板，而且并非所有的弹药升降机都需要穿透机库甲板，例如“福特”级航空母舰的11台升降机中，只有4台升降机穿透了机库甲板，其余7台升降机仅沟通弹药库与机库甲板。在小轿车一般大小的空间内常态化抬举10吨以上的弹药，这对结构的强度要求非常高，而且弹药升降机直通弹药库，一旦弹药升降机被击穿，整艘航空母舰都会陷入危险的境地。因此，弹药升降机的数量不能多也不能少。

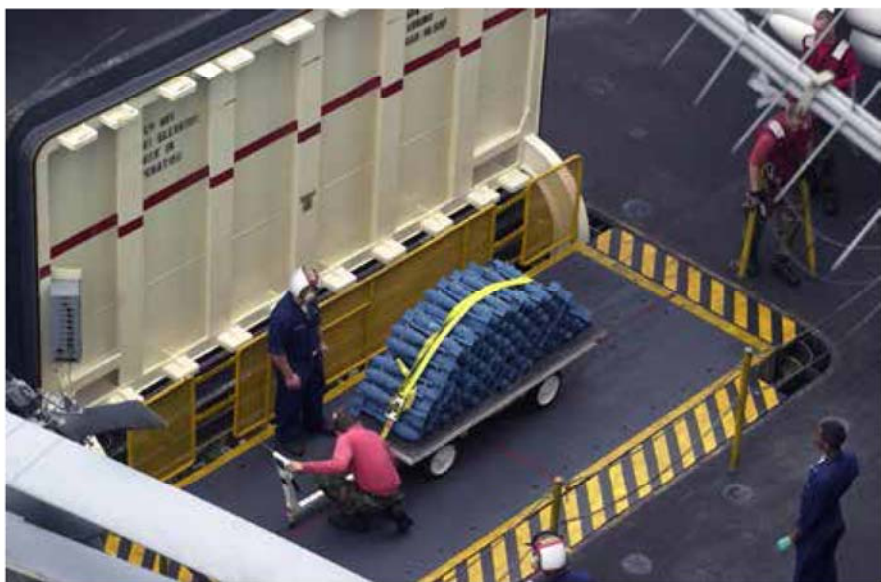
“尼米兹”级与“福特”级航空母舰均有4台弹药升降机位于飞行甲板位置，但是两者位置不同。“福特”级航



法国海军人员参观“福特”级航空母舰的先进武器升降机内部

空母舰的弹药升降机更加靠近停机区位置，并且4台升降机中的3台不会受到舰载机起飞的影响，地勤人员可以轻而易举地将弹药推到战斗机附近并给战斗机挂载弹药。舰岛前部的升降机密集到了3架战斗机共享1台升降机的地步，所以右侧停机区舰载机的弹药挂载速度极快，起飞准备时间短，放飞效率高。而位于燃气导流板正后方的弹药升降机，能免受发动机燃气的困扰，也能为待飞战斗机加注燃油和挂载弹药。

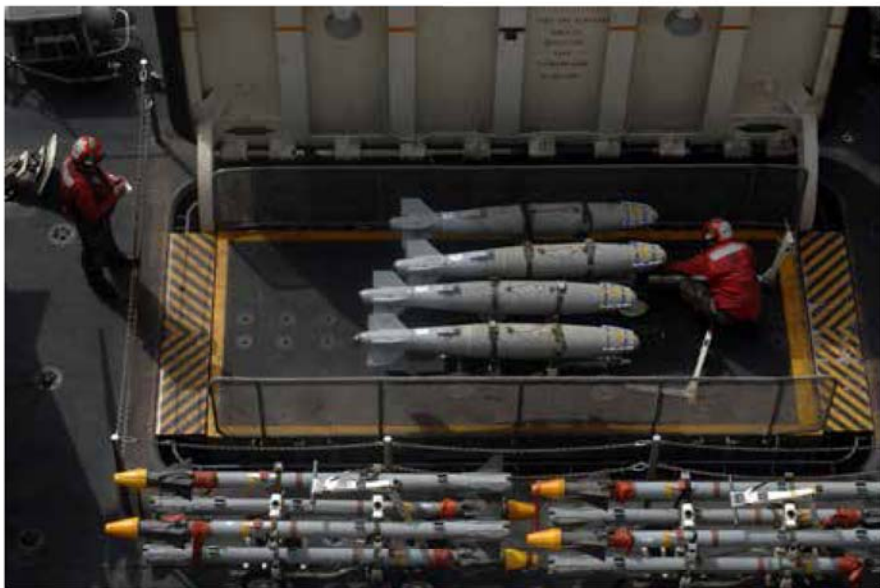
“尼米兹”级航空母舰的弹药升降机同样位于飞行甲板右侧，但是弹药升降机的大小不平整，位置不规则，而且前部弹药升降机位于起飞区。只要有舰载机起飞，前部升降机就无法使用。也就是说，“尼米兹”级航空母舰能够常态化运作的弹药升降机只有3台。而这3台升降机，有2台位于舰岛左侧，1台位于停机区左侧，也就是说第二弹药升降机为舰岛前部停机区的舰载机补充弹药，第四弹药升降机为舰岛后部停机区的舰载机补充弹药，第三弹药升降机同时为舰岛前后以及斜侧停机区停放的舰载机补充弹药。至于没有弹药升降机的左侧停机区，因为停放于这个位置的战斗机非常少，所以使用飞机升降机运输弹药即可。



美国海军“尼米兹”级航空母舰的弹药升降机

整体来说，弹药升降机应当分开布置，并尽量贴近停机区并避开机库正前方。每个停机区至少配备1台，以实现弹药运输流程的最优化，避免出现挂载1枚导弹要推着数吨重的弹药推车跑几百米的尴尬局面，飞行甲板前部的弹药升降机数量应

当多一点，因为在舰载机回收状态时，前部的弹药升降机越多，越有利于弹药的快速回收。



美国海军“杜鲁门”号航空母舰的弹药升降机



航空母舰的舰岛设在右舷有何好处

现代航空母舰的舰岛都设在右舷，这是经过实战检验后得出的结论。英国作为航空母舰的起源国，早期曾经将航空母舰的舰岛设在左舷，但在使用过程中发现一个问题，就是舰载机飞行员在遇到危险时大多喜欢向左飞，因此发生了不少舰载机撞击舰岛的事故。英国海军对这种现象进行了调查，最后发现一般人驾驶飞机、汽车等交通工具时遇到危险的第一反应就是向左躲避，据说这和绝大多数人心脏长在左侧有关系。于是，从“半人马”级航空母舰开始，英国海军就将航空母舰的舰岛统一挪到了右舷。

与英国相比，同时期开始建造航空母舰的日本在舰岛位置的问题上吃了更多苦头。当时日本作为航空母舰大国，拥有多艘航空母舰，每次出行都是多艘航空母舰结伴而行。日本设计师认为，2艘航空母舰并排航行时，如果舰岛都在右舷，将不利于两舰同时进行舰载机的起飞与回收工作。如果将一艘航空母舰的舰岛设在右舷，



而另一艘设在左舷，两舰配合起来会更加方便。因此，日本在20世纪30年代建造的“苍龙”号和“飞龙”号航空母舰，舰岛就是一个在右舷一个在左舷。

然而，实际情况却和日本设计师的想法截然不同。由于二战时期日本舰载机的操纵杆在飞行员两腿之间，而飞行员一般用右手操作。如果飞机要转弯，飞行员向左拉动操纵杆，远比向右顺手。由于“飞龙”号航空母舰的舰岛设在左舷，飞行员在降落失败后拉升复飞时避让舰岛会很很不方便，一不注意就会撞到舰岛。在发生多起撞击舰岛事故后，日本设计师最终将舰岛放在了右舷。



舰岛设在左舷的日本“飞龙”号航空母舰

有了英国和日本的前车之鉴，美国、法国和苏联等国在建造航空母舰时也沿袭了这一传统，形成了航空母舰的舰岛统一在右舷的布局。



舰岛设在右舷的美国海军“企业”号航空母舰



舰岛设在右舷的美国海军“福特”级航空母舰



舰岛设在右舷的俄罗斯海军“库兹涅佐夫”号航空母舰