

第 2 章 舰载机起飞及进近着舰全过程

2.1 起飞模式及起飞过程

舰载机的起飞过程具有如下特点：

(1) 舰载机的起飞过程是速度不断改变的非定常运动，舰载机沿跑道滑跑时要承受地面的支反力和摩擦力，贴近地面飞行时的地面效应也会对空气动力特性发生重要影响。

(2) 舰载机的起飞构形状态和空中飞行不同，表现在舰载机要放下起落架、打开襟翼等增升装置。舰载机构形状态的变化使起飞过程的升阻特性发生变化，舰载机起落阶段的静态气动系数是迎角和舵偏角的非线性函数，地面效应的存在使气动系数随飞行高度变化。

(3) 起飞速度对舰载机飞行航迹有很大影响。舰载机离舰起飞速度太低，就不能得到一个正的爬升率，可能会掉入海中；起飞速度太高则会占用长距离的跑道，同时增加舰载机的结构载荷。

(4) 航母在海上是一个六自由度的运动平台，它在海面上由于受到风浪等因素的影响，会产生各种不规则的运动，其中以纵摇、横荡和垂荡对于舰载机的起飞和着舰的影响最为显著。例如，航空母舰的纵向摇动会影响舰载机离舰后的轨迹角和飞行姿态，航空母舰的横向摇摆不仅会造成舰载机起飞时的升力损失和附加的横向运动。

(5) 由于离舰速度和离舰迎角较小，以及离舰瞬间地效突然消失，舰载机离舰上升的过舰首航迹会经历一段下沉过程，为避免离舰上升时舰载机机体的过度抖动，以及纵、横向稳定性或操纵性的丧失，应限制迎角超过最大容许迎角，舰载机离舰后的航迹下沉量不应超过容许的最大下沉量，下沉之后的爬升率应达到一定的量值。

航母舰载机中，除垂直 / 短距(V / STOL)起降飞机和直升机能垂直起飞外，其余的固定翼舰载机均要经过适当距离的滑跑，达到一定的末速度，才能离舰起飞。二战以前的早期舰载机由于起飞重量轻、滑跑距离短，采用了局部甲板或全通甲板自主式起飞方式。二战之后，随着飞机重量的逐步增大及滑跑距离的增长，以前的起飞方式已不再适用，必须寻找新的起飞方法，赋予舰载机外力和离舰俯仰角的滑跃起飞方式和弹射起飞方式应运而生。

2.1.1 滑跃起飞

滑跃起飞借助上翘的弯曲斜甲板给飞机提供额外的升力，使飞机从航母起飞。这早在第一次世界大战左右，由于当时舰载机的质量一般不足 500kg，在起飞时会在航母的甲板上临时铺设具有一定角度的斜坡跑道。跑道的长度大约在 30m 左右，斜坡的角度大约 5° 左右。

滑跃起飞有两个重要特点：一是起飞速度小于正常起飞速度；二是飞机具有一定的离舰姿态角和爬升率。起飞的过程主要分为三个阶段：舰面水平滑跑、舰面弯曲斜甲板滑跑和离舰上升段，但是细分起来也可以分为五个阶段，具体过程如图2.1所示。

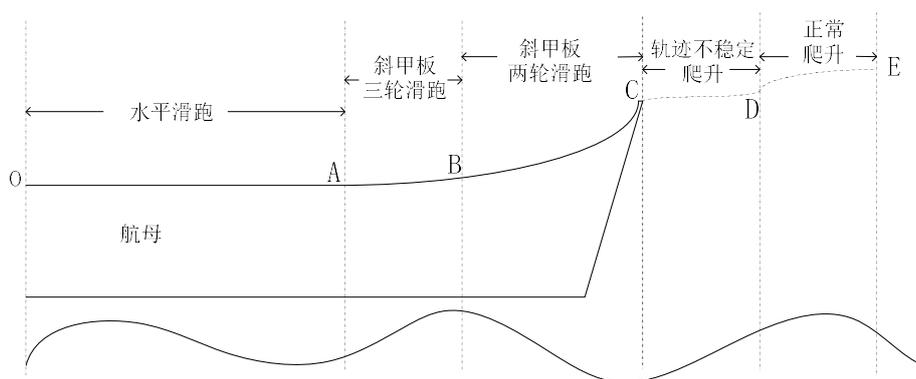


图 2.1 舰载机滑跃起飞过程示意图

第一阶段是水平滑跑段。从飞机的起飞点O到飞机的质心达到弯曲斜甲板的起点A。在这一阶段中飞机完全依靠发动机的推力进行水平加速，实际上这个阶段是十分重要的，因为这个阶段的末速度就是第二阶段斜甲板加速段的初速度。飞机的速度与飞机的飞行姿态关系非常密切，想获得比较高的末速度就必须注意两个主要参数：飞机的重力和飞机的推力，因为总体而言，飞机的推重比愈大，则飞机在第一阶段所能加速的终值也越大。这就使得一方面希望增加舰载机的推力，一方面希望减轻舰载机的质量。

第二阶段和第三阶段是弯曲斜甲板加速段，第二阶段和第三阶段的区别就是第二阶段是三轮滑跑、而第三阶段是两轮滑跑，也就是说，当舰载机到达B点之时，由于升力作用，飞机的前起落架抬起。这两个阶段最重要的事情并不是加速，而是强迫飞机调整自己的姿态，使其在没有达到起飞速度的情况下就先进入类似飞起来的状态，从而在离舰之后，能借助这种类似滑翔的趋势在重新调整之后仍然能够保持原有的飞行状态并加速进入正常的飞行。

第四阶段被称为半抛物飞行段，飞机的在过舰首的时候由于地效作用消失一般会有下沉，其下沉的趋势很难描述。弹射起飞的飞机离舰之后的下沉量大于3m就不符合舰载机安全性的要求，而滑跃起飞只要离舰之后出现下沉量就算不安全。不出现下沉量对于滑跃起飞来说是比较困难的，所以在一些文献的规定中，第四阶段正好用于描述在飞机爬升率未达到

正值、未开始正常爬升的阶段。

第五阶段就是飞机开始正常爬升或开始加速平飞的阶段，第四阶段和第五阶段的交接点被定义为“飞离点”。“飞离点”有两个要求，一是航迹角及其导数大于零；二是舰载机在垂直方向的合力为零或垂直向上，即飞机不再有下沉趋势。

2.1.2 弹射起飞

弹射起飞是指用弹射器(蒸汽型、液压型或电磁型)给舰载机施加外力，使其迅速增速而“弹射升空”。弹射起飞的实施方法，依据舰载机与滑块的联结方法，可以分为拖索式和前轮牵引式弹射。早先是采用拖索 / 短索弹射方式，现在通常采用前轮弹射方式。

拖索式弹射时，甲板人员先用钢质拖索把飞机挂在滑块上，再用一根索引释放杆把其尾部与弹射器后端固定住。弹射时，猛力前冲的滑块拉断索引释放杆上的定力拉断栓，牵着飞机沿轨道迅速加速，在轨道末端把飞机加速到直起飞速度抛离甲板，拖索从飞机上脱落，滑块返回弹射器起点准备下一次工作。

前轮弹射方式是美国海军 1964 年试验成功的。舰载机的前轮支架装上拖曳杆，前轮就直接挂在了滑块上，弹射时由滑块直接拉着飞机前轮加速起飞。弹射时间缩短，飞机的方向安全性好。但这种舰载机的前轮要专门设计。美国海军核动力航母都采用了这种起飞方式。

根据舰载机在弹射起飞过程中的不同受力以及运动状态，可将舰载机弹射过程分为三个阶段：舰面滑跑阶段、舰面自由滑跑阶段和离舰后的上升阶段。弹射器拖拽滑跑阶段，舰载机在发动机推力和弹射器牵引力的共同作用下向前加速滑跑。舰载机离舰后，起落架支反力消失，舰面摩擦力消失，弹射器牵引力消失。

舰面弹射滑跑时，将舰载机视为质点，设甲板坡度为零，舰载机可用推力始终与甲板平行。舰载机离开甲板，地效作用消失，引起舰载机的升力系数减小，从而影响飞行轨迹，大致为半个抛物线曲线。此后飞行员开始介入操纵，收油门至 95%最大军用推力位置并收起起落架，操纵舰载机向预定高度爬升和转入预定航向，结束弹射起飞过程。

1. 蒸汽弹射系统

图 2.2 为蒸汽弹射过程示意图，其中各数字代表的含义是：1.起飞甲板；2.拖拽固定杆；3.牵引加速杆；4.滑块总成；5.弹射阀总成；6.开槽气缸；7.活塞总成；8.水刹；9.复位装置；10.储气罐。

蒸汽弹射过程是一个将蒸汽工质内能转换成飞机动能的过程。弹射器内弹道参数要求满

足飞机弹射技术指标要求：①保证飞机在恶劣海况下的最小离舰速度；②保证飞机在甲板上能平稳加速；③汽缸内工质压力必须小于允许值。

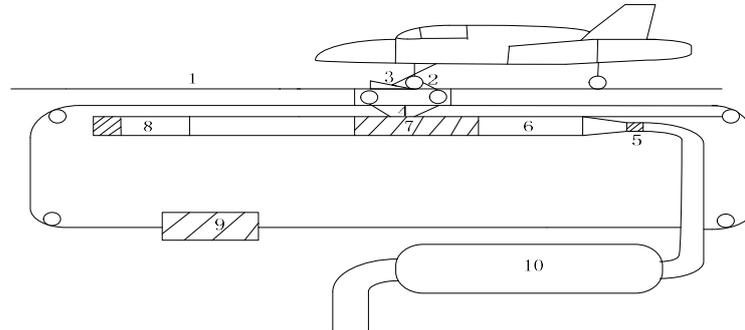


图 2.2 蒸汽弹射示意图

蒸汽弹射的工作流程描述为：首先，在弹射准备阶段，飞机先滑行进入弹射位置。然后，位于前轮前方的牵引杆和后方的制动杆分别扣上。飞机利用它的转向前轮滑行到发射区，飞机被钩在弹射器上蓄势待发。当后方甲板上的挡流板升起后，身着绿衣的连接员会跑到前轮附近，并采取半跪的姿势。前轮牵引钩放下，与弹射器滑块啮合，勒紧装置将滑靴与牵引杆绷紧。再把扣子扣在前起落架后面，以抵抗弹射器向前的牵引力，固定飞机。然后飞行员一边踩紧刹车，一边启动引擎并将操纵杆推到全加力档。与此同时，弹射操作员开启弹射阀，蒸汽进入汽缸，对活塞产生推力并传递给牵引杆。接着，当一切准备就绪，飞机引擎达到满推力时，飞行员敬礼表示准备妥当，弹射指挥官面向前方，再转身对着飞机，蹲下，手向前指，他的手按在甲板上的同时，发射员按下发射按钮，弹射器压力迅速加大，扣在前起落架后面制动杆上的扣子松开，飞机瞬间向前冲去。高压蒸汽源源不断地进入汽缸，持续产生弹射力，飞机的滑行越来越快。在弹射行程末段，飞机速度大于滑梭速度，由于机械结构设计，滑梭与牵引杆分离，活塞在水刹的作用下减速，飞机便如离弦之箭飞速而去。此后，回位装置通过钢丝绳牵引滑梭总成及活塞后退，回到初始位置，汽缸中的蒸汽则通过回流阀回收。



图 2.3 舰载机准备弹射起飞

图 2.3 为美国 F/A-18“超级大黄蜂”正准备弹射起飞。

2. 电磁弹射系统

从流程上讲，电磁弹射器与蒸汽弹射器相差不大，主要不同的是弹射系统的组成。电磁弹射器主要包括储能系统、驱动装置、电力调节系统、控制系统，另外还有冷却系统、预加动力装置、减速缓冲与刹车装置等。

储能系统用来提供足够的电能。储能系统在特定的时间周期内从航母的配电系统中获得电能，并将储存的能量在 2~3s 的弹射期内以脉冲形式转换为电能。电力电子系统控制储能系统脉冲放电，调节直线电机定子速度，使飞机达到起飞速度。控制系统保证弹射过程按规定的参数完成弹射。

驱动装置主要部件是弹射电动机，采用目前较先进的直线式线性感应电动机，从电力调节系统输入的电能通过直线电动机能够有效、可靠地驱动质量很大的物体。

电力调节系统负责接收来自控制系统的信号，把外界提供的电能转换成精确的电力脉冲电压和频率，并提供给驱动装置。

控制系统根据弹射飞机所需的末速度、弹射环境及发射质量，向电力调节系统发出相应的控制信号。

电磁弹射的工作流程描述为：系统操作战位根据下达的指令输入相关数据与参数，控制系统进行信息处理后向电力调节系统发送相应控制信号，电力调节系统把储能系统输入的电能转换成精确的脉冲电压和频率，并把该动力输入驱动装置的弹射电动机，于是直线电动机的次级产生等加速的运动并带动飞机运动，加速到一定距离飞机达到预期速度后，瞬时对电动机次级进行制动，同时飞机在惯性作用下继续向前运动，飞机这时已在短距离内获得了一定的前进能量，同时依靠飞机发动机的动力，一同推动飞机前行，实现飞机在航母上的起飞。

电磁弹射系统通过拖索与舰载机前轮相连接，当飞机进入起飞状态之时，航母自身的电源通过储能分系统——飞轮储能系统将能量增加到足够电动机所需要的能量，然后通过电力调节分系统和调节控制分系统来控制电动机，使其在 2~3s 的时间里将飞机加速弹射出去。

2.2 返航进近着舰过程

舰载机返航着舰过程根据离航空母舰的距离可以分为四个阶段：引导、待机、进近与着舰，图 2.4 所示。进近至着舰之间又有盘旋、对中、下滑、阻拦、复飞和紧急着舰等过程。

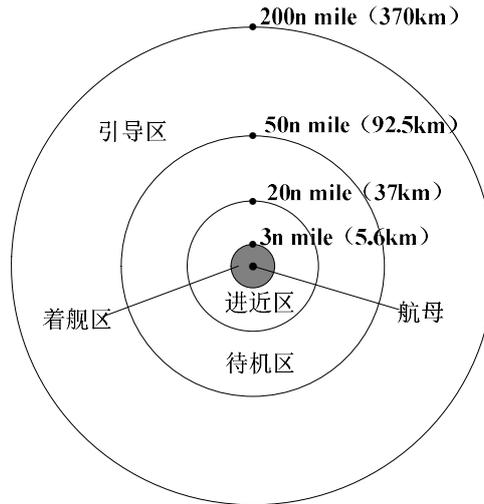


图 2.4 舰载机返航进近着舰过程空域划分

舰载机从作战空域返航时，首先由预警机进行导航，舰载机从预警机得到的情报主要是舰载机离航母的位置和周边空中交通状况。

如果舰载机驾驶员发现飞机出现燃料不足或机械故障，可直接与航母通话，使航母调整舰载机的着舰顺序。另外还能根据情况的需要，接受空中加油或通过航母与陆上基地取得联系进行紧急着陆。

在正常着舰状态下，舰载机在离航母 200n mile 处接受舰上航空飞行管制中心的航行管制和指挥，航空飞行管制中心设置在着舰甲板的舰岛下方的战斗指挥所的一角。航空飞行管制中心操纵台的显示器上的黄色标志是通过雷达捕捉到的航母周围 200n mile 半径内的画面。航母飞行管制中心从这里直接向着舰机或其他的己方飞机提供信息或指令。

舰载机通过航空飞行管制中心可获得飞机离航母的距离、方位、高度及航母的航向，并提供航母周围飞行的其他舰载机的位置等情报。通过这些情报，返航舰载机可确认自己的准确位置，并利用导航计算机安全地接近航母。

在离舰约 50n mile 处，舰载机进入待机阶段，在此阶段舰载机按照马歇尔等待航线飞行，以等待进近着舰的指令。在等待飞行过程中，航空飞行控制中心会告知舰载机将采用何种进近着舰方式与拦阻方式着舰，并告知舰载机开始着舰时的位置信息，以帮助舰载机顺利进入进近着舰阶段。

在离舰约 20n mile 处，舰载机进入进近着舰阶段，进近着舰阶段主要包括进场和下滑着舰两大阶段。舰载机在离航母 3n mile~20n mile 的空域内飞行时称为进场阶段，在离舰 3n mile 以内的飞行称为着舰阶段。当舰载机进行通场飞行时，进场段与着舰段有交叉空域，着舰阶段定义为捕获下滑道后的下滑着舰。进场阶段，舰载机由舰上航空指挥中心的进场操作

台控制，按照规定的进场航线飞行，进场飞行完成时，舰载机的高度、速度、航向、飞机构型等飞行状态需达到下滑着舰的要求，以帮助顺利进入下滑着舰阶段，然后按照标准的下滑航线降落至航母上。

根据进近着舰时的气象条件和飞行员的目视情况，舰载机进近着舰主要有三种模式：

模式 I：目视进场及目视着舰

模式 II：仪表指示进场及目视着舰

模式 III：仪表指示进场及全自动着舰

方式 I 主要工作在气象条件良好，航母控制区的云层高度在 3000ft（900m）以上，且能见度超过 5n mile（9260m）的白天。方式 II 的工作条件为航母控制区的云层高度在 1000ft~3000ft 之间，且能见度超过 5n mile 的条件下。方式 III 主要工作在航母控制区的云层高度低于 1000ft，或能见度低于 5n mile，或日落后 1.5h 至日出前 1.5h 的任何时刻。这种进近着舰方式分类以气象条件和飞行员的目视情况为依据，可以保证舰载机进近着舰的全天候性，且进近着舰方式的多样性可以提高着舰的安全性。

着舰阶段主要运用全天候着舰引导系统（All-Weather Carrier Landing System, AWCLS）引导舰载机进行下滑着舰。AWCLS 系统是一种多模态的引导系统，主要包括以下四种模态：

模态 I：自动着舰引导系统(Automatic Carrier Landing System, ACLS)，当舰载机进入到舰上跟踪雷达的截获窗口后，ACLS 将直接引导舰载机进行全自动着舰，整个着舰过程无需任何手动操纵。

模态 IA：由 ACLS 将舰载机引导至离舰 0.75n mile 处，然后转入菲涅尔透镜(Fresnel Lens Optical Landing System, FLOLS) 光学助降系统人工引导着舰。

模态 II：仪表着舰引导系统(Instrument Landing System, ILS)，着舰过程中飞行员根据座舱内的仪表显示信息，手动控制舰载机飞行至离舰 0.75n mile 处，转为 FLOLS 着舰。

模态 III：舰上控制进场系统(Carrier Controlled Approach System, CCAS)，飞行员根据舰上操作人员给出的语音信息，将舰载机引导至 FLOLS 着舰区域内，由 FLOLS 引导着舰。

AWCLS 4 个模态之间的关系是：当模态 I 正常工作时，模态 II 与模态 III 负责监控，即飞行员通过机舱的指针仪表或平视显示器监视 ACLS 工作是否正常，同时舰上控制台也监控 ACLS 的工作状态。当飞行员发现舰载机飞出了模态 I 的安全工作区，则降级到模态 II 执行人工操纵进场。在模态 II 工作状态下，若舰载机超出安全区，则飞行员会接收到按模态 III 工作的指令并按模态 III 人工操纵着舰。模态 I 与模态 II 可单独工作，但在零决断高度及零能见度条件下着舰时，两系统需同时工作。

2.3 返航进近着舰模式 I——目视进近及目视着舰

2.3.1 模式 I 的飞行航线

由于气象条件较好，飞行员可以利用航母上装备的塔康设备所指示的航母位置信息（方位、距离等）目视飞行进场并着舰，这也是舰载机返航最常用的飞行过程。

图 2.5 所示为返航着舰模式 I ——目视进近与目视着舰的飞行航线。

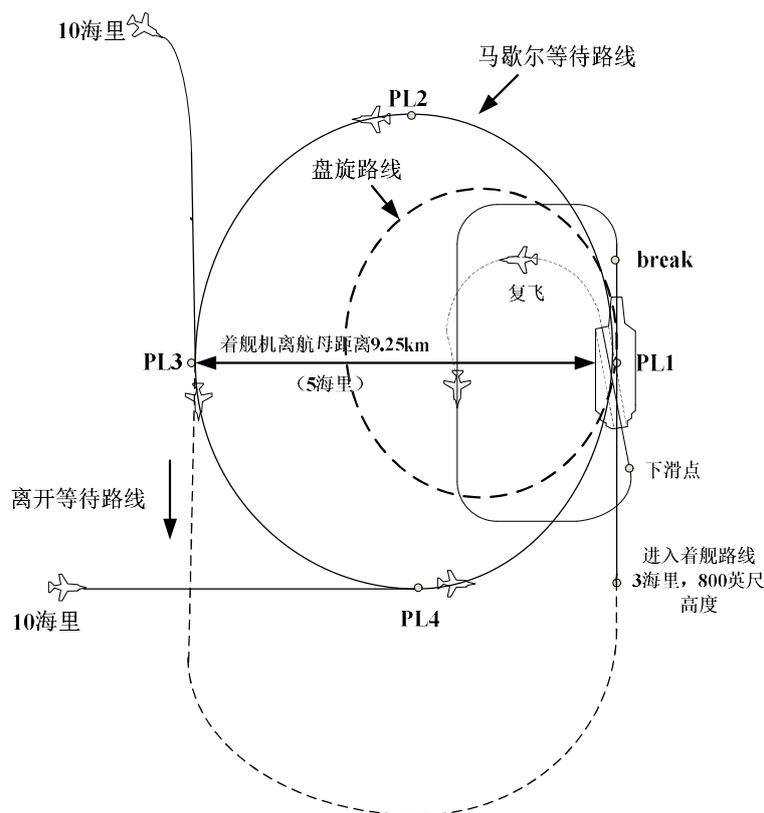


图 2.5 返航着舰模式 I ——目视飞行与目视着舰

飞机进入进近区看见航母后，飞行到 10n mile 处，飞机开始由塔台进行控制。飞机接着进入等待航线，即 I 类马歇尔航线。等待航线是一个逆时针圆形航线，直径为 5n mile。飞机在进入等待航线之前的 10n mile 处，以相同高度水平飞行切入等待航线。不同飞机的等待航线高度不同，等待航线最小高度是 2000ft。等待航线最低高度的飞机有进近优先权。飞机在等待状态下，每次通过航空母舰上空的 PL1 点时都与进近操作员进行联系，以确认是否获得着舰许可。考虑到舰载机在各自等待航线中飞行时可能出现燃料不足的情况，在 1500m 的高度上特意安排了空中加油机。飞行员接收到塔台发出的着舰信号后，飞机从等待航线上垂直航母的 PL3 点位置，开始沿图中浅色虚线所示路径离开等待航线，并下降到位于航母

后方 3n mile 800ft (约 240m) 高度。此时飞机继续逆风飞行通过航母上空准备进入 break 航线。接着飞机是以水平转弯 (break) 直接进入下滑点 (如图 2.5 细实线所示) 还是进行盘旋飞行 (如图 2.5 虚线圆所示), 这要根据着舰航线上的飞机数来决定。盘旋一般开始于航母首部, 飞机爬升到 1200ft (约 360m) 高度, 按逆时针圆形航线飞行, 圆形航线直径为 3n mile。飞机进入盘旋航线目的是维持飞机之间的时间间隔, 以等待允许进入 break 阶段。所谓 break 阶段是指飞机从 800ft 高度水平左转弯直接进入着舰航线的阶段。进入 break 阶段时, 飞机至少在航母首部前方 1n mile 处, 最多离首部 4n mile 距离。当飞机结束 break 阶段后, 飞机进入顺风阶段, 并开始下降到 600ft (约 180m) 高度。

为了维持舰载机之间的时间间隔, 舰上指挥中心会根据着舰航线上的舰载机数目来决定是否发送盘旋指令, 着舰航线上的舰载机一般不超过 6 架。直到接收到允许着舰指令, 舰载机才可以重新进入通场航线。

图 2.6 为没有盘旋航线的着舰区目视飞行航线, 即通场航线。舰载飞机进入着舰航线时的飞行高度为 800ft (约 240m), 飞行速度在 154m/s~180m/s 之间。通过航母上空或右舷时放下尾钩, 关闭武器弹药的发射开关, 发动机油门采用 85%~89% 军用推力。飞机继续沿直线飞行一段距离后, 打开减速板, 表示要着舰。高度下降到 600ft (约 180m) 时进入 break 阶段, 即进行作 180 度水平左转弯, 接着飞机逆航母前进方向沿左舷作水平飞行。在这段飞行中, 飞行员检查飞机重量, 要确认飞机重量小于最大着舰重量, 飞机在航母左侧上空飞行约 1n mile 后再次作 180 度转弯, 到达着舰区中心线延长线的后方, 进入下滑道, 这时的高度为 380ft (约 116m), 速度为 125kn~130kn (64~66.7m/s), 在离舰约 0.75n mile (约 1389m)。这时, 着舰信号指挥官 (LSO, Landing Signal Officer) 将菲涅尔透镜光学着舰系统的信号切换灯点亮, 使飞行员确认飞机已进入下滑道, 此时飞行员将保持一定的飞行速度和迎角, 按菲涅尔助降系统引导着舰, 如图 2.7 所示。

在进场着舰过程中, 为了加快发动机的响应速度, 可以将发动机保持在 85%~89% 的军用推力状态, 飞行员凭飞行经验推杆调整发动机推力。如果在着舰途中复飞指示灯闪亮, 飞行员必须立即把油门杆推到最大功率位置, 拉起飞机, 重新进近着舰。如果飞机的燃料不足, 可由航母上空待命的加油机实施空中加油。

舰载机按照 I 类马歇尔航线进行等待飞行时, 当收到舰上允许着舰的指令后, 从等待航线上正横向位置或从正对舰尾位置开始下降至 7n mile 1200ft 高度处, 准备进入初始进近阶段, 然后离开马歇尔航线并下降到位于舰尾后约 3n mile, 800ft 高度, 进入进场着舰航线, 或距舰尾 10n mile 处直接进入进场航线, 由于方式 I 的气象条件很好, 舰载机需要在航母上

方通场飞行。通场飞行的目的是调整飞行的高度、速度、飞机构型等，以满足进入下滑着舰的要求，以便顺利过渡到着舰段。

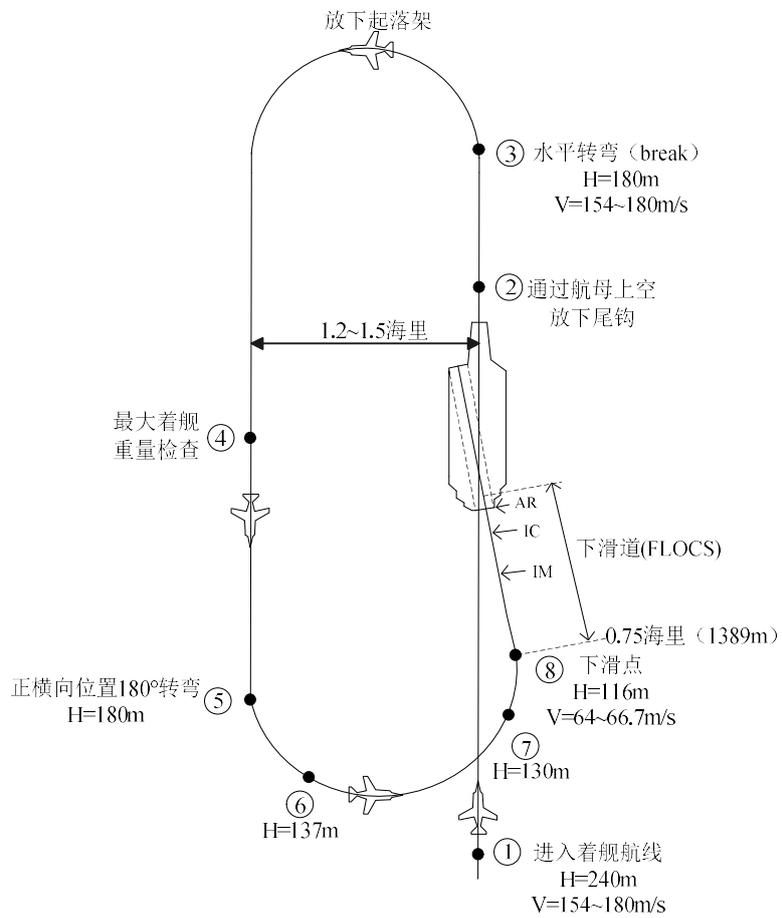


图 2.6 目视着舰飞行航线

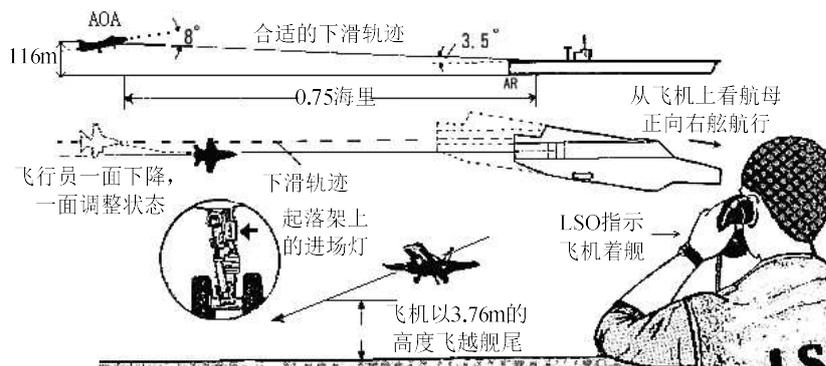


图 2.7 菲涅尔透镜着舰阶段轨迹

对于下滑着舰航线的设计，关键是要确定下滑角的大小，确定了下滑角的大小即可得到下滑航线。美国海军的资料显示，基准下滑道的范围为 2.5°~5°，可以 0.25°的间隔进行调整，一般情况下，舰载机在斜角甲板上以 3.5°或 4°的定常下滑道以无平飘且固定下滑角的着舰方

式完成着舰任务。下滑角度一般设定为 3.5° 或 4° ，最大下滑角度的确定须考虑飞机的下降速率和结构载荷的限制，而最小下滑角度的设定应考虑如下因素：

① 当飞行甲板静止时，飞机必须能在甲板障碍物上方最小 10ft 的距离上通过，这样才能使飞机在舰体晃动或飞机偏离下滑线时，飞机与障碍物之间有一个安全的间隙；但由于拦阻钢索尽量安装在舰的尾部，为使飞机能被有效地拦阻，则下滑角又不能太小，故最小下滑角应在这两个因素下进行折衷。

② 下滑角越小，飞机偏离下滑轨迹而造成的着舰点误差散布就越大。

③ 过小的下滑角，使飞行员操纵飞机精确地维持在这条下滑轨迹上比精确地维持在稍陡的下滑轨迹上更困难。

为保证舰载机安全着舰，在设计下滑道航线时，还需对舰载机尾钩越过舰尾瞬间的空间位置进行偏差限制，通常依据最小舰尾净空（指舰载机飞越航母舰尾瞬时尾钩距着舰甲板的最小高度）、下滑角和着舰引导精度，确定舰载机过舰尾时刻的安全位置偏差限制范围。

下滑的最后阶段，舰载机采用直接冲撞拦阻钢索的方式进行着舰，舰载机的理想着舰点应该位于拦阻钢索的第二和第三条之间。

舰载机在着舰下滑直至着舰的全过程中，纵向要捕获基准下滑道，侧向要对准甲板跑道的正中轴线，否则就可能在降落后撞上甲板上的其它建筑或停放在跑道旁的其它飞机。在下滑接近舰尾的过程中，由于航母不断地向前行进，造成待降的甲板跑道随着航母运动而不断向右前方平移，因此飞行员在初次对中成功后，还要在降落前的下滑过程中根据跑道的平移情况，将飞机航向不断向右修正，保证航向始终尽量对准跑道中线，直到舰载机安全着舰。

2.3.2 模式 I 的马歇尔等待航线

模式 I 中的等待航线属于 I 类马歇尔航线，如图 2.8 所示，I 类马歇尔航线适用于云层高度 3000ft 以上，能见度 5n mile 的飞行条件。

(1) 进入 I 类马歇尔航线

① 舰载机在准备进入等待区域时，即距等待区域 10n mile 之外，若飞机航向与航母基本回收航线（BRC, Basic Recovery Course）的夹角在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间，飞机需左转弯进入距等待区域的 10n mile 处，并降到规定的高度；若夹角在 $270^\circ \sim 90^\circ$ 之间，飞机则需右转弯进入距等待区域的 10n mile 处并降到指定高度；

② 飞机从距等待航线之前 10n mile 处，按指定高度进行平飞，并不断向等待区域飞近，在进入等待区域前，将飞行速度减速至最大省油速度；

③ 提前进入转弯点，以便按切线方向进入等待航线。

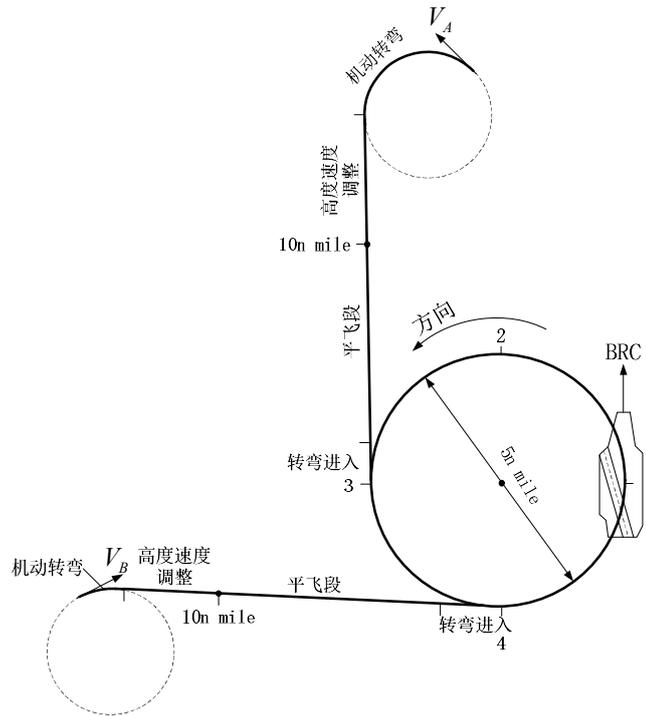


图 2.8 I类马歇尔航线

(2) I类马歇尔等待飞行过程

舰载机在航母上方，以直径为 5n mile 的圆形航线进行盘旋飞行，该圆形航线与 BRC 在 3 点钟位置处相切，圆形航线离航母的最低高度为 1500ft。由于等待区域较大，所以允许多架舰载机在航母上方按照 5n mile 的等待圆进行飞行，但是要保持 1000ft 高度的差，即等待航线按照 1000ft 高度隔开，最低航线高度为 1500ft。

(3) I类马歇尔航线回收（如图 2.9 所示）

- a、从等待航线正横向位置或从舰尾位置开始下降进入初始着舰阶段。
- b、到达 7n mile，1200ft 高度。
- c、进入初始阶段：3n mile 800ft 高度。长机报告进入“初始阶段”。
- d、保持好的队形（以梯形标准飞行方式）。
- e、保持间隔进入减速机动段，不在离舰首 1n mile 之前进入减速机动段。

f、若需要进行盘旋飞行，则进入盘旋过程：从舰首开始，爬升到 1200ft 保持在 3n mile 范围内，重新进入减速机动段，报告“盘旋 90”。

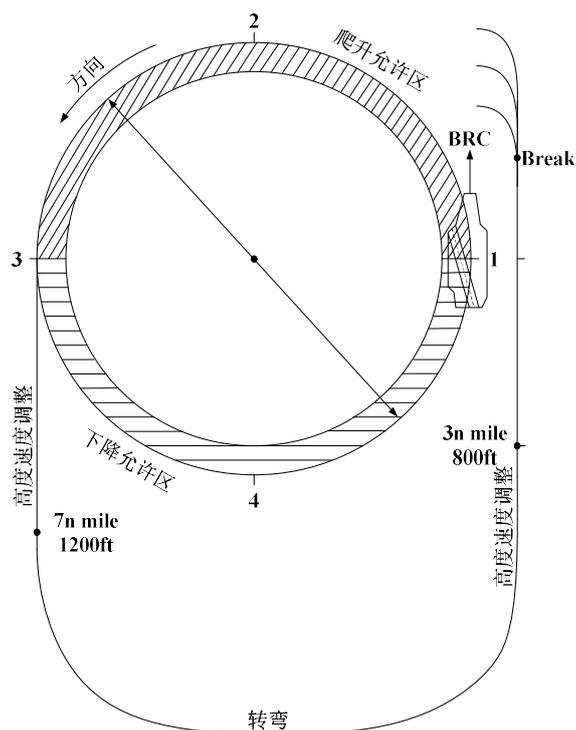


图 2.9 I类马歇尔航线回收

2.3.3 F/A-18 飞机目视着舰航线

以 F/A-18 为例，进一步说明模式 I 的目视飞行着舰航线。如图 2.10 所示，该目视着舰航线主要包括 4 个阶段：初始阶段，break 和顺风阶段，转弯到最终进近阶段，最终进近阶段。

1. 初始阶段

在初始阶段，飞行员驾驶飞机按计划好的标准航线，飞向航母上方，准备进入椭圆着舰航线。这个阶段开始于离航母尾部 3n mile, 800ft 高度处，300~400kn 飞行速度，稍微偏向航母右边，结束于航母首部上方或者稍微越过航母首部。

2. Break 和顺风阶段

Break 又叫水平机动转弯，即舰载飞机开始进入椭圆着舰航线，进行等高度的左转弯。该阶段包括飞机减速和飞机构型变化过程，以飞机进入顺风飞行结束。

在 break 阶段，飞行员将感觉到大的过载（2~4g），为了迅速地减小空速并进行水平转弯，其滚转角应在 45 度~70 度之间。滚转角的大小取决于初始空速大小及飞行员对转弯半径的判断。设置 break 阶段的目的是改变飞机结构（放起落架，收放减速板等），调节进近迎角，进行水平转弯。直到舰载飞机转弯 180 度，飞行员才知道其相对于航母的位置。此时，对航向进行小校正，就可调整飞机与航母的侧向距离。对飞机结构进行变化可有效地控制空

速，所以飞行员在 break 阶段开始时就打开减速板。

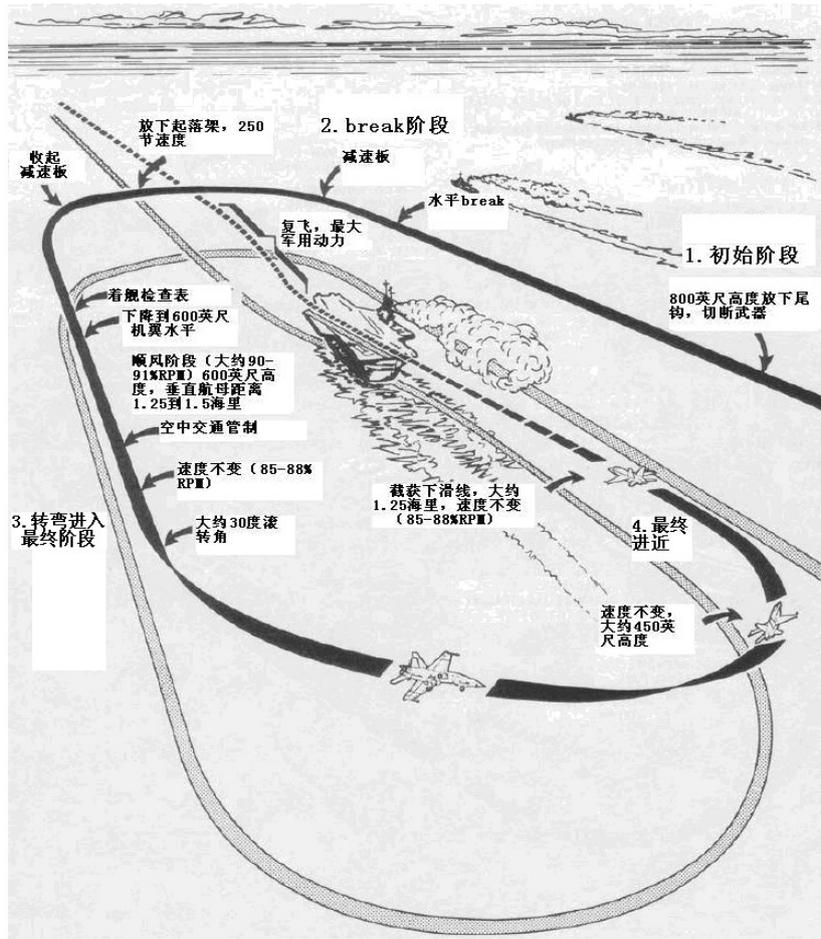


图 2.10 F/A-18 目视着舰航线

从 break 阶段开始，到横滚改出进入顺风阶段，大约需要 30 秒的时间。在顺风阶段，飞行员花 15s 到 20s 时间，即可使飞机进入良好的稳定飞行状态。该阶段还应完成必要的着舰检查：锁定安全带，关掉防撞灯，切断防滑装置，放下尾钩。

3. 转弯到最终进近阶段

这个阶段开始于垂直着舰信号官 (LSO) 平台的正横向位置，距航空母舰 0.9n mile~1.1n mile，飞机的高度为 600ft 高度。此时，飞行员给出一恒定的滚转角指令，一般以 27°~30° 滚转角转弯，使飞机飞向甲板中心线的延长线，以截获最终进近航线。飞行员调整下沉速率，以 200ft/min~300ft/min 下沉速率下降，使飞机转弯到 90° 航向位置时，高度为 450ft。

转弯过程中侧向控制可采用开环控制，直到飞行员获得甲板中心线的对中信息。飞机到达 45° 航向位置时，高度为 325ft~375ft，飞行员可以看到菲涅尔透镜光波束，对垂直轨迹进行初步调整，并按甲板侧向偏离的灯光指示适当调整滚转角。这个阶段总的时间大约为 30 秒。在第 30 秒时，飞行员必须开始对下滑轨迹，对中并对迎角进行紧密的飞行员在环的

闭环控制。

4. 最终进近阶段

最终进近开始时，飞机进入甲板中心线的延长线以横滚改出，并且对下滑轨迹的光波束进行精确跟踪。不要过早去观察“肉球”，看见“肉球”后，检查下沉速率并调整至 500ft/min~600ft/min。菲涅尔透镜的“肉球”提供了下滑轨迹的引导信息。飞行员利用舰尾处的垂直灯线与甲板中间线灯的指示，可获得精确的侧向引导信息。

2.4 返航进近着舰模式 II——仪表引导进近及目视着舰

2.4.1 模式 II 飞行航线

图 2.11 所示为返航着舰模式 II——仪表引导进近及目视着舰的飞行航线。

舰载机在 15+Angel 数 (1Angel=1000ft) n mile 处进入 II 类马歇尔等待航线。获得着舰许可的舰载机飞离等待航线，朝航母后方飞行，并下降到位于航母后方 3n mile, 800ft 高度，进入进场航线 (同进场着舰方式 I)，目视进场着舰。

值得注意的是，航母航空指挥中心 (CATCC) 在模式 II 工作过程中必须有人监视，并随时准备在气象条件恶化时采用模式 III 进行回收。模式 II 和模式 III 不需要同时工作，仅在气象条件无法满足目视着舰时采用模式 III 引导。当一架或两架舰载机编队按照模式 II 回收时，飞行员在离舰 10n mile 范围内可以看到航母的情况下，可以转为塔台控制并继续按照模式 I 的目视着舰飞行航线回收。若无法在离舰 10n mile 处看到航母，可以下降高度但不能低于 800ft，若在 5n mile 处仍看不到航母，则需要进入逃逸/复飞模式，重新进场并按照模式 III 进行回收。

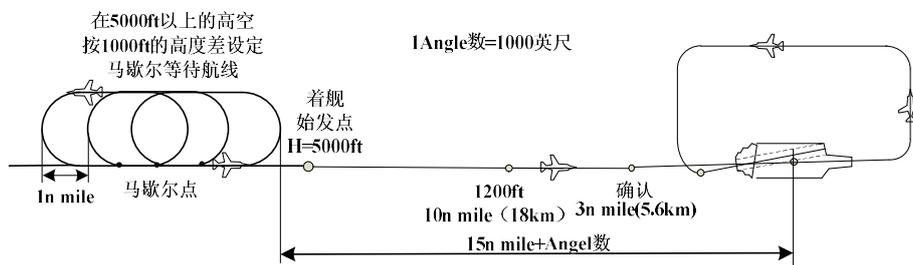


图 2.11 返航进近着舰模式 II——仪表引导进近及目视着舰

在方式 I 和方式 III 的航线基础上，设计方式 II 的进场航线，如图 2.12 所示，图 (a) 为按方式 I 进场的航线，图 (b) 按方式 III 进场的航线。

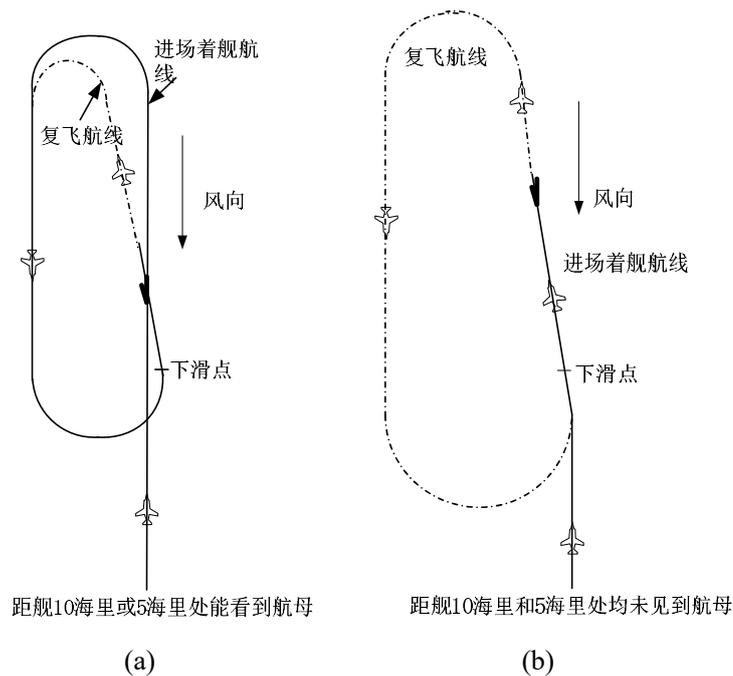


图 2.12 模式II的进场航线

2.4.2 模式 II 中的马歇尔航线

(1) 进入II类马歇尔航线

飞机进入II类马歇尔等待航线和I类马歇尔等待航线类同。

① 飞机在等待区域之外，调整航向，并降到指定的等待高度；

② 在指定的高度处进行平飞，并不断靠近等待区域，在进入等待区域之前将速度减到最大省油速度；

③ 提前进入马歇尔点，以准备进入等待航线飞行。等待区域在航母的后方，距航母的位置为 20n mile，5000ft 以上的区域。

(2) II类马歇尔等待飞行过程

舰载机进入等待区域后，从马歇尔点处首先按照规定的转弯半径进行 180°转弯，然后沿与航母相反的方向，直线飞行规定的距离，再次进行 180°左转弯，随后直线飞行至进入等待区域的马歇尔点处，若此时仍不允许进场，则舰载机继续左转弯，重复之前的飞行过程，不断飞行。由此可见，II类马歇尔等待航线是一个田径圆。通常，舰载机进行两次 180°的水平转弯各需约 1 分钟，直线段飞行各需约 2 分钟；同方式I的等待一样，在等待区域中，允许多架舰载机进行等待飞行，但要保持 1n mile 的距离和 1000ft 的高度差，也就是说每隔 1n mile 和 1000ft 就有一个马歇尔点，马歇尔点对于最终着舰方位可以有±30°的偏差，最底层

的歇尔点位于距舰尾 20n mile, 5000ft 高度处。

根据马歇尔等待飞行的过程, 对飞行过程中的关键点进行确定, 最终设计的II类马歇尔航线如

图 2.13 所示。

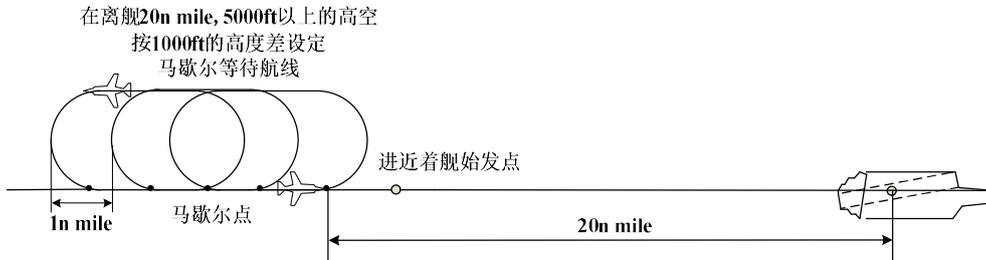


图 2.13 II类马歇尔航线

左手椭圆航线, 仅部分编队飞行。飞机按照规定的半径和距离进行等待航线飞行, 底层马歇尔点位于离航母 21n mile 高度为 6000ft 处。从底层马歇尔点开始, 每隔 1n mile 和 1000ft 高度就有一个马歇尔点。例如离舰 21n mile, 6000ft 高度处、离舰 22n mile, 7000ft 高度处各有一个马歇尔点。

马歇尔点的位置相对于最终着舰方位可以有 $\pm 30^\circ$ 的偏离。马歇尔航线通常按椭圆航线逆时针飞行 6min。进行两次 180° 转弯各需一分钟, 按椭圆航线的每条边飞行各需 2min。飞行员到达马歇尔点时, 向航母作一次报告并给出燃油状态信息。舰上的马歇尔控制台在确认飞行员进入马歇尔等待航线后, 向飞行员提供以下信息: a. 到进近的预期时间; b. 备用机场的地点或者空中加油机的位置及通信频率。

马歇尔航线指定最小高度 1500ft, 最大省油空速 230kn。

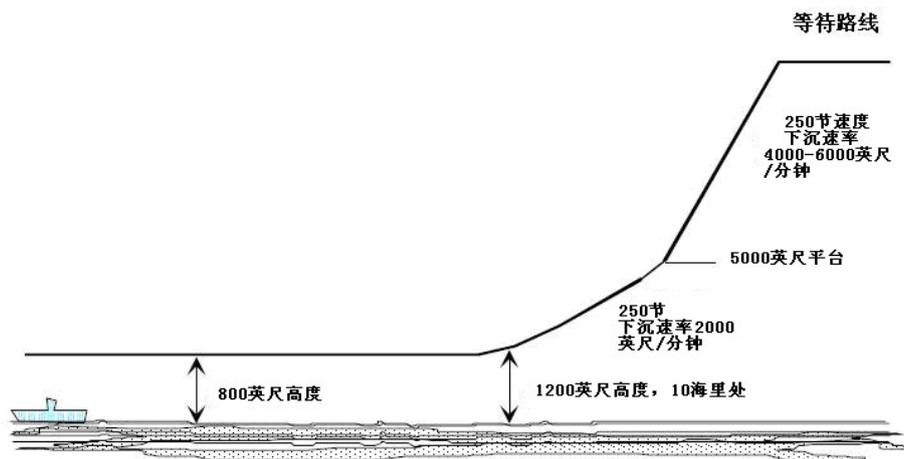


图 2.14 模式II回收航线

(3) II类马歇尔航线回收

II类马歇尔航线回收如图 2.14 所示。按预期的时间离开等待点，进入进近航线；报告开始的飞行速度（250kn，下沉速率 4000~5000ft/min；长机在 5000ft 高度（约距舰 20n mile）报告，下沉速率降到 2000ft/min；如果没有使用目视飞行规则或在 5n mile，800ft 高度处没有看到航母，按基本回收航线（BRC）直接爬升到云层顶部进行目视飞行；看到航母后，报告“看到”，并转向塔台控制，进入正常的减速机动段：800ft 高度，250~300kn 速度。

2.5 返航进近着舰模式 III——仪表引导进近及全自动着舰

由于进近着舰方式III工作时，天气情况较差，能见度较低，舰载机无需进行通场飞行。按模式III回收时仅对单架飞机进行引导与回收。

方式III的进场航线根据III类马歇尔航线与航母的位置的关系，分为两种情况：一是在舰尾等待的进场，二是在舰艏等待的进场。

如果舰载机在舰尾等待飞行时，收到舰上发来的允许着舰的指令，舰载机则经由马歇尔点离开等待航线，向航母后方飞去，并不断降高，在离舰 10n mile 处，高度降至 1200ft，并放下尾钩和起落架转为着舰构型，在离舰 6n mile 处进行着舰检查，在离舰 3n mile 处捕获到下滑点，直接进行下滑着舰。若着舰失败，则重新拉起进行复飞，重新准备着舰，从复飞航线进入着舰航线点距舰约 4n mile。根据舰尾等待时方式III的进场过程，设计出舰尾等待时方式III的进场航线，如

图 2.15 所示，其中虚线部分为复飞航线。

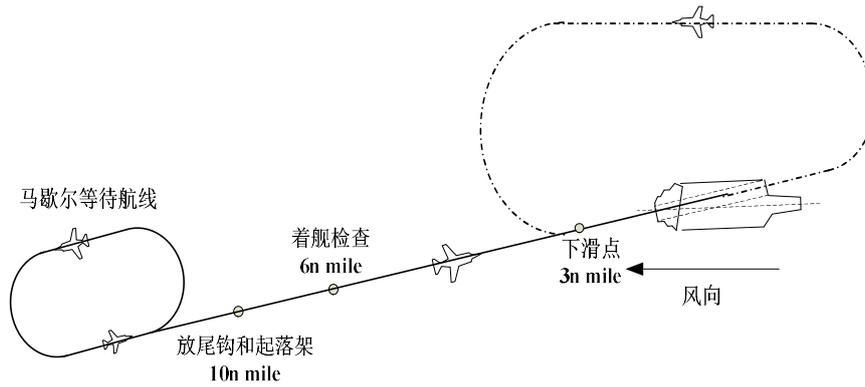


图 2.15 舰尾等待时模式III的进场航线

根据舰尾等待时方式III的进场过程，设计出舰艏等待时方式III的进场航线，如图 2.16 所示，其中虚线为复飞航线。舰载机在舰艏等待时，收到舰上发来的允许着舰指令，舰载机经由马歇尔点飞离等待航线，即以 30° 的方向飞向舰尾，在飞离舰尾后 $4\sim 5n$ mile 处开始升高直至离舰 $10n$ mile 处转弯进入着舰航线，降至规定高度，准备进场着舰。在离舰约 $3n$ mile 处捕获到下滑点，进行下滑着舰。若着舰失败，则复飞，重新准备着舰。

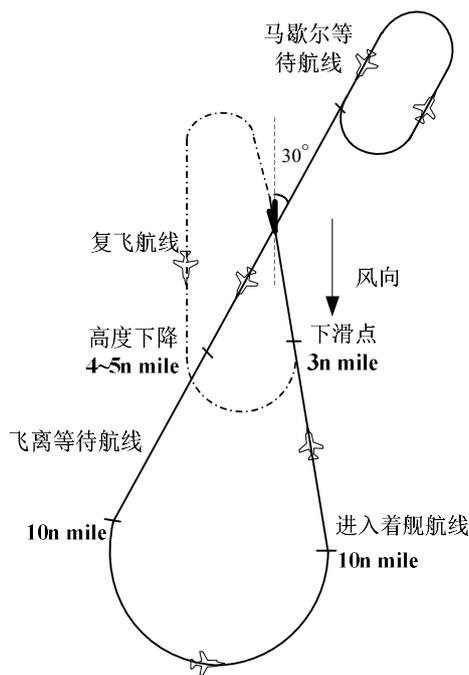


图 2.16 舰艏等待时模式III的进场航线

2.5.1 模式 III 飞行航线

图 2.17 所示为返航着舰模式III——仪表着舰系统 (ICLS, Instrument Carrier Landing System) 进近及全天候着舰引导系统 (AWCLS, All-Weather Carrier Landing System) 着舰的飞行航线。

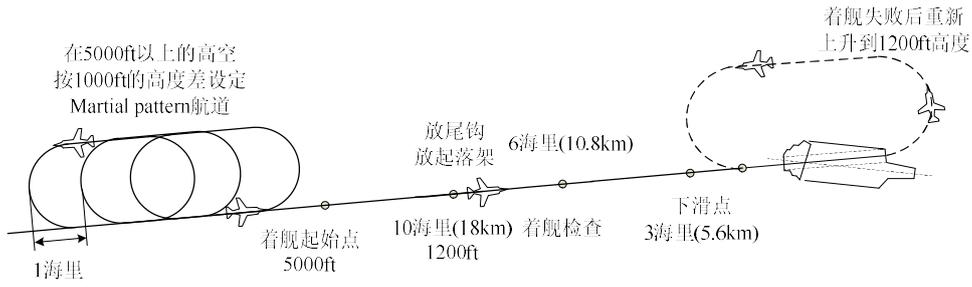


图 2.17 返航着舰模式III着舰

飞机在 15n mile 处进入马歇尔等待航线，不通飞机的等待航线高度不同，等待航线最小高度为 6000ft (1800m)，等待航线按照 1n mile 和 1000ft 高度隔开。获得着舰许可的飞机飞离等待航线，下降到 5000ft (1500m) 高度，转弯进入半径为 12n mile 的圆形航线，沿逆时针方向左盘旋。在离舰 8n mile，约 1200ft (365m) 高度处进入着舰航线，由 AWCLS 引导着舰。

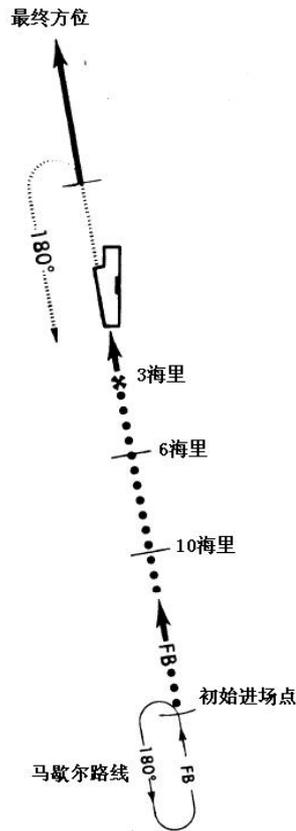


图 2.18 模式III回收航线俯视图

按模式III进行回收的俯视图如图 2.18 所示，纵向剖面图如图 2.19 所示。

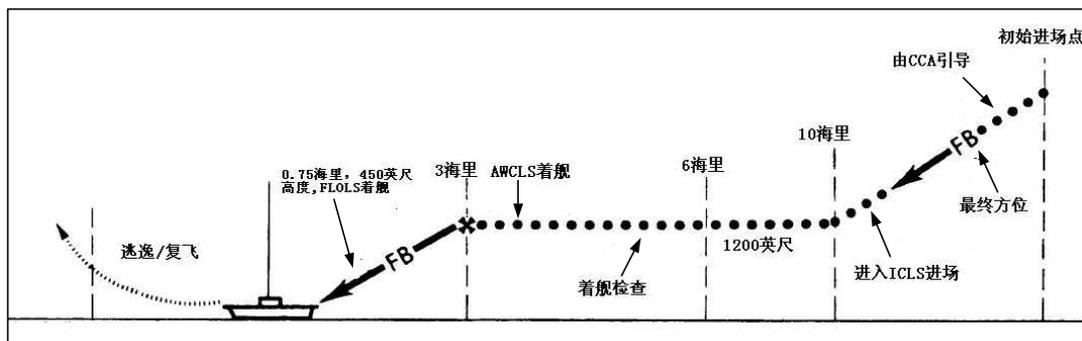


图 2.19 模式III回收航线纵向剖面图

舰载机在 15+Angel 数 n mile 处进入III类马歇尔等待航线。位于最低层等待航线上的舰载机在获得着舰许可后，飞离等待航线，朝航母后方飞行。舰载机在离舰 10 n mile，约 1200ft 高度处转为着舰构型，由全自动着舰系统引导着舰。

2.5.2 模式 III 中的马歇尔等待航线

模式III中的马歇尔等待航线与模式II中的相同。由于等待过程相同，那么航线的样式也相同，唯一不同之处在于III类马歇尔航线在航母舰尾的斜后方与着舰跑道方向一致，或者是在舰艏的斜前方与舰尾约成 30° 的偏差角，如

图 2.20 所示。

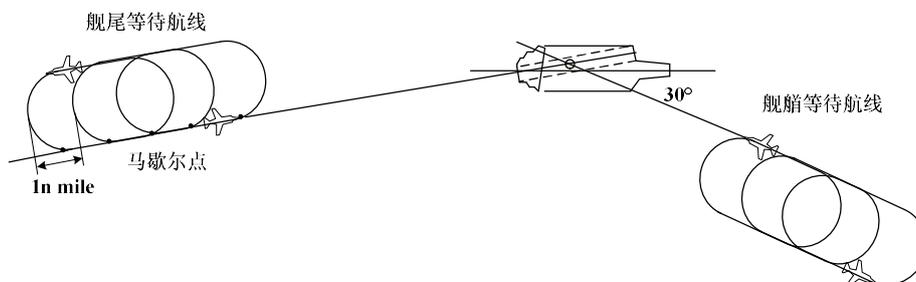


图 2.20 III类马歇尔航线

2.5.3 模式 III 的 ICLS 进近航线

基于仪表的半自动着舰引导系统 ICLS 实际上是一种基于雷达的引导系统。在雷达引导下，飞机的着舰误差不与飞行控制系统直接耦合去构成自动着舰导引，而是将引导误差通过仪表或平显仪显示给飞行员。飞行员按显示器去操纵飞机，以消除着舰误差。

图 2 显示了 ICLS 在飞机进近与着舰中的作用。飞机在进近着舰点①进行着舰顺序检查，

决定采用何种着舰方式。然后继续由塔康(TACAN)导引台进行引导,由舰上控制方式(CCA)将飞机引导到②点,即 ICLS 平台入口。这时启动 ICLS,由它显示飞机在空中的方位与高度。然后继续由 CCA 引导飞机至③点,以控制飞机姿态进入 ICLS 工作状态。此时飞行高度约 1200ft,离航母距离约 10n mile (18km)。此时放下襟翼,起落架及减速板,平飞减速。当由 ICLS 引导至点④,即离航母 6n mile 处,再进行一次着舰检查,然后继续平飞减速,由 ICLS 引导至点⑤,进入 全天候自动着舰系统(AWCLS)的雷达精密跟踪系统的截获窗。此时速度约 130kn (66.8m/s),距离为 3.5~5n mile (6.4km~9.2km),飞机由进近状态过渡到着舰状态。若由于安全原因,选择了全天候自动着舰系统(AWCLS)中的模态II,则继续采用 ICLS 模态着舰,引导飞机至点⑥,此时离航母约 0.75n mile,高度 450ft (116m)。然后由菲涅尔人工助降系统(FLOLS)最终引导飞机着舰。

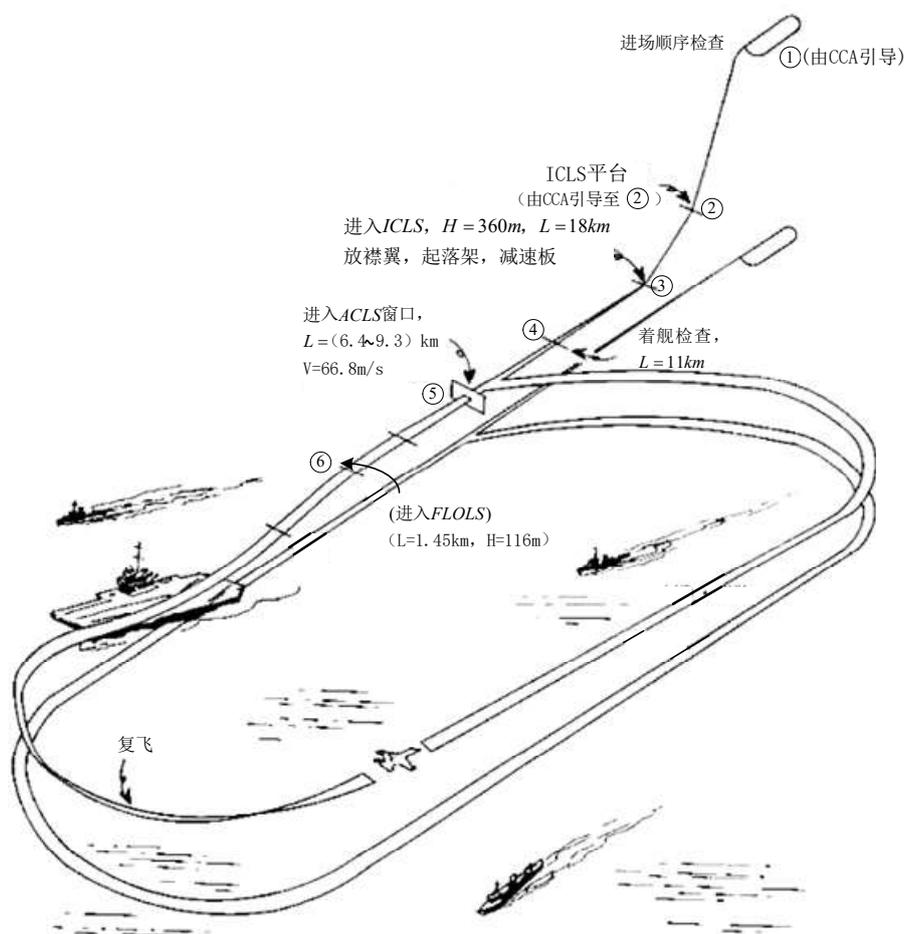


图 2.21 ICLS 引导飞机进近与着舰

由 ICLS 系统的工作机理可知,当飞机离着舰点约 0.75n mile (1200m) 时,飞行轨迹会发散不稳定。故最终需由 FLOLS 引导着舰。引导飞机进近一般均由 ICLS 承担,而在 AWCL 飞行模态II中,其引导飞机着舰的任务也由 ICLS 承担,也即舰载机的进近与着舰均可由 ICLS

完成。但 ICLS 引导飞机进近与着舰时只能引导飞机至 FLOLS 的入口处。总之，ICLS 既是进近的必要引导手段，又是 AWCL 的重要组成部分。

2.5.4 模式 III 的 AWCLS 着舰

以 F/A-18E 飞机为例，AWCLS 的模态 I 即全自动着舰航线如图 2.21 所示。

当飞机进入“雷达截获窗口”后，则飞机进入 ACLS 工作状态。雷达截获窗口离舰约 2~4n mile (3.7~7.4km)，一般随不同飞机而变化。例如，对 F/A-18，窗口距离为 4n mile。

ACLS 一般有如下工作顺序：

- (1) 进入 ACLS 前，机上“Check-off”灯亮，表明检查已结束。
- (2) 飞机被截获后，舰上的指令数据链发出“ACL LOCKON”指令，告诉驾驶员飞机已被雷达截获。
- (3) 若飞机处在要求的着舰空间内，则“ACL LOCKON”信息自动点亮“Coupler Available”灯，告知飞控系统可与耦合器耦合。
- (4) 飞行员接通飞控系统，AWCLS 模态 I 工作。
- (5) “Command Control”灯亮，表明机上纵向与侧向自动飞控系统正在接收地面引导指令而进行工作。

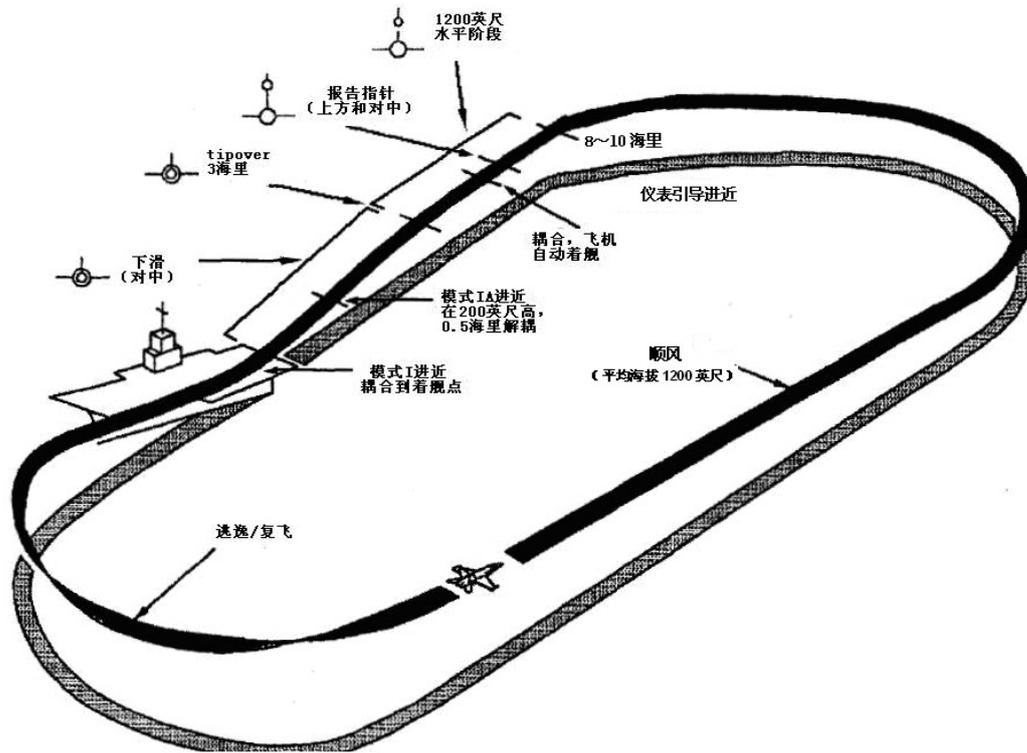


图 2.21 F/A-18 全自动着舰航线

若飞机不落在自动着舰安全区，则“Coupler Available”灯关闭，并自动断开飞控系统，此时飞行员按 AWCLS 的模式II工作，采用 ICLS 半自动着舰，但若由于 AWCLS 模式II的工作飞机又返回到安全区，此时“Coupler Available”灯又亮，飞行员可重新接通飞控系统按 ACLS 工作。若在模式II状态下，飞机又超出安全区，飞行员会接到舰上发出的指令，则按 AWCLS 模式III工作。

(6) 在着舰前 12.5 秒，舰上发出“10 second”指令，使机上“10 second”灯亮，表示甲板运动补偿信息加入，进行自动补偿。

(7) 离舰 1.5 秒时，由于进入雷达的盲区，则自动断开 ACLS，飞机在姿态稳定系统工作下继续飞行。

(8) 在 AWCLS 模式II状态下，若飞机超出工作安全区，则飞行员会接到“Wave-off”指令，进行复飞。

F/A-18E 飞机在 AWCLS 着舰顺序中,各距离节点的定义如图 2.22 所示。

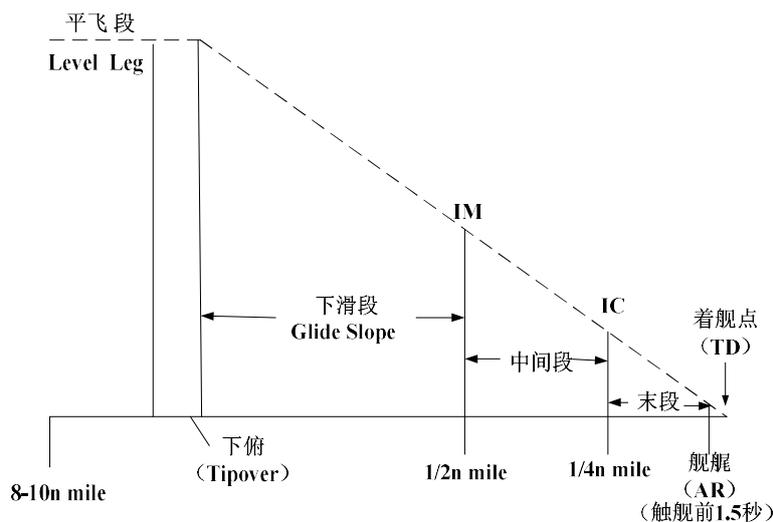


图 2.22 F/A-18E 飞机按 ACLS 着舰时各距离节点的定义

2.6 返航着舰模式 IV——紧急着舰

紧急着舰是飞机出现故障、燃料不足等意外情况下采用的应急着舰方式。主要应用于下列情况：

- (1) 飞机遭受战斗损伤。
- (2) 尾钩、起落架或发动机等失灵。
- (3) 燃油不足以使飞机第二次通过甲板拦阻索。
- (4) 飞行员疲劳或受伤，用正常手段已不可能成功着舰。

着舰机在空中出现紧急情况时，飞机驾驶员直接与着舰指挥官取得联系听取解决方案。因尾钩或起落架发生故障而不能正常着舰时，如果接受空中加油后仍无法飞回地面基地时，就不得不在航母上进行强行着舰。若故障机具备空中逗留能力尽可能先让其他着舰机进行着舰，并从航母上弹射起飞S-3空中加油机给故障机进行空中加油。此时，着舰甲板上迅速把周围的舰载机牵引到安全的停放区域，在3号和4号拦阻索之间设置第5号紧急拦阻索，并架起拦阻网支架，展开尼龙拦阻网，如图2.23所示。

故障机在空中抛掉导弹等搭载武器和燃料，最大限度减少紧急着舰时发生火灾的可能性。全部准备工作结束后与通常着舰一样，引导故障机着舰。当故障机冲进阻拦网时一旁待命的消防车迅速靠近故障机，喷洒防火剂，防止火灾的发生。救护小组迅速接近故障机救出机组成员，航空医疗负责人员用升降机把救出的机组人员送进航母医院。

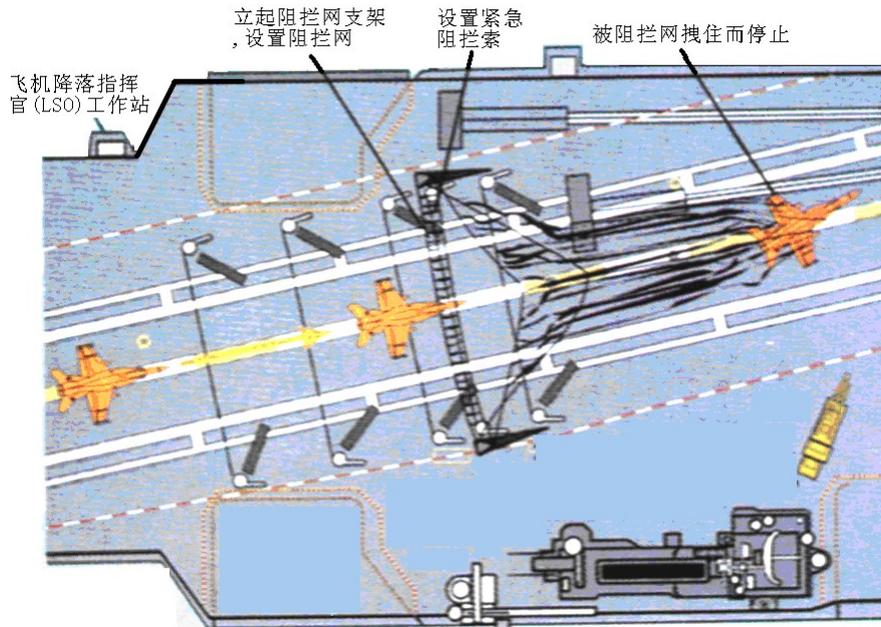


图 2.23 着舰方式IV——紧急着舰

返航着舰模式IV主要使用航空母舰上的拦阻网保证舰载机着舰，只在应急时使用，通常飞机撞网后还允许滑跑 30m~40m。虽然拦阻网用尼龙带编成，但由于飞机的巨大冲力，尼龙带仍然会造成飞机前缘薄弱部位损伤，因此需对这些部位进行适当加强。由于拦阻后的飞机前缘破坏较大，一般舰上不能修复，需进厂修理，同时还会影响甲板上其他飞机的起降和调度，因此战时拦阻网是不用的。

2.7 逃逸/复飞过程

舰载机着舰过程中因其着舰环境复杂以及飞行员技术失误等，并不能保证每次都能成功着舰。舰载机从进舰轨迹上尚未触舰之前终止着舰而转为其航线的机动称为复飞。舰载机着舰触舰后直接滑跑离舰的过程称为逃逸。

当舰载机着舰过程中未挂钩和脱钩情况下，需要执行紧急逃逸操纵程序。逃逸又称为触舰后复飞。通常航母上有 4 个拦阻机，每个都有 1 条拦阻索。这 4 条拦阻索，从后到前均匀放置，依次编号为 1~4，如果在第 4 根拦阻索之后着舰，舰载机飞行员需要立即增加推力开始逃逸。拦阻钩的接地点在 4 根拦阻索中间也不一定保证拦阻成功，因为较大的着舰下沉速度下飞机剧烈地碰撞甲板可能引起拦阻钩从甲板上跳起，导致钩不到任何一条拦阻索。

当舰载机着舰过程严重偏移预定下滑轨道时，必须放弃着舰，进行复飞紧急操纵程序。着舰过程中，复飞经常发生，据有关文献显示，目前舰载机每着舰 20 次，就有一次需要进

行复飞，即复飞概率为 1/20。舰载机复飞的过程为：位于航空母舰上的精确跟踪雷达不断地测量飞机进场速度、下沉速率、飞机距舰尾的水平距离及高度，并将测量结果提供给复飞决策系统，当飞机有撞舰的危险时，由复飞决策系统的特定判断程序，通过数据链发出复飞指令，命令飞行员执行复飞任务。

飞机应该在最终方位延长线上直线爬升到 1200ft 高度，等待进近控制的指示。所有的复飞航线转弯应该是水平的。如果舰前方 4n mile 或 2min 还没有收到指示，飞行员应该尝试和舰进行联系，发出确定的位置信息。如果还没有收到指示，就假定通讯失败并执行顺风转弯并在垂直舰的位置进行报告。

思考题

1. 舰载机起飞方式有哪些？其优缺点是什么？
2. 舰载机滑跃起飞甲板上升角大小与起飞过程关系是怎样的？
3. 舰载机着舰模式有哪些？并从航线工效、作战效率及飞行操纵等方面分析其合理性。
4. 马歇尔等待航线的设置与机型、转弯机动性及高度/位置精度具有怎样的关系？
5. 逃逸和复飞的区别是什么？