

## 广发军工·参军策（卷十四）

## 航母舰载机起飞专题

分析师：胡正洋 S0260516020002



021-60750639



huzhengyang@gf.com.cn

分析师：赵炳楠 S0260516070004



010-59136613



zhaobingnan@gf.com.cn

本期《参军策》，我们将介绍航母舰载机的起飞方式，通过对比研究电磁弹射起飞方式的优越性，分析其技术难点。

## 本期观点：

- 现役航母舰载机有滑跃式、垂直式、弹射三种起飞方式。

现役航母舰载机具有三种起飞方式：滑跃起飞、垂直起飞和弹射起飞。滑跃起飞结构简单、造价低廉且不需要对舰载机作较大改动，但不能起飞大型固定翼舰载机。垂直起飞可随时随地起飞战机，增加作战反应速度，但载弹量不足，作战能力较低。弹射起飞分为蒸汽弹射和电磁弹射。蒸汽弹射起飞可以起飞大型固定翼舰载机，美军蒸弹技术成熟、使用经验丰富，但其对蒸汽的能量利用率低，消耗大量淡水资源且后期运维繁杂。

- 电磁弹射起飞方式优势明显，是未来航母舰载机起飞方式发展方向。

相比于其他起飞方式，电磁弹射优势明显：能量利用率高，弹射效率显著提高，极大提升作战性能；与未来武器有良好兼容性；符合舰船综合电推发展趋势；或将成为未来无人机地面起飞理想的发射方式。我们认为，电磁弹射器是未来航母发展方向。

- 美国“福特级”航母已采用电磁弹射，中国导轨式电磁能武器技术在摸索中前进。

美国是最早研制电磁弹射器的国家，研制历经近30年花费32亿美元。美国通用原子公司承接了“福特”级航母前三艘的弹射器制造任务，首舰“福特”号弹射系统和阻拦系统实际建造成本为8.18亿美元，其中电弹系统价值量约6.7亿美元。根据科技部2016年1月7日文章，海军工程大学电力集成创新团队在马伟明院士带领下研制的某电磁发射系统，填补了国内空白，取得了与世界最先进水平的同步发展，并打破了我国导轨式电磁能武器技术始终徘徊不前的局面，取得重大进展。

- 风险提示

电磁弹射系统产业化进度低于预期；航母应用电磁弹射系统具有不确定性；军费持续低于预期。

## 相关研究：

广发军工·参军策（卷十三）：造船行业：新接订单触底，供给侧改革持续推进

2017-06-22

广发军工·参军策（卷十二）：自动检测设备(ATE)

2017-06-04

广发军工·参军策（卷十一）：以美为镜，看直升机行业成长空间

2017-05-22

## 目录索引

现役航母舰载机起飞方式特点 .....	4
滑跃起飞：美国以外的其他国家航母舰载机主流起飞方式.....	4
垂直起飞：舰载机主要是英国“鹞式”战机.....	5
蒸汽弹射起飞：美国现役航母舰载机主流起飞方式.....	6
电磁弹射：弹射能力极强，造价不菲 .....	9
电磁弹射起飞原理.....	9
电磁弹射系统构成.....	9
起飞方式比较：电弹优势明显.....	10
美国通用原子公司是目前全球唯一电弹系统供应商.....	14
电弹系统价格不菲.....	14
电磁弹射是未来航母发展方向 .....	15
电磁弹射是未来发展方向.....	15
电弹技术难点：直线电机、弹射控制和电力储能 .....	16
中国导轨式电磁能武器技术进展情况.....	17
风险提示 .....	18

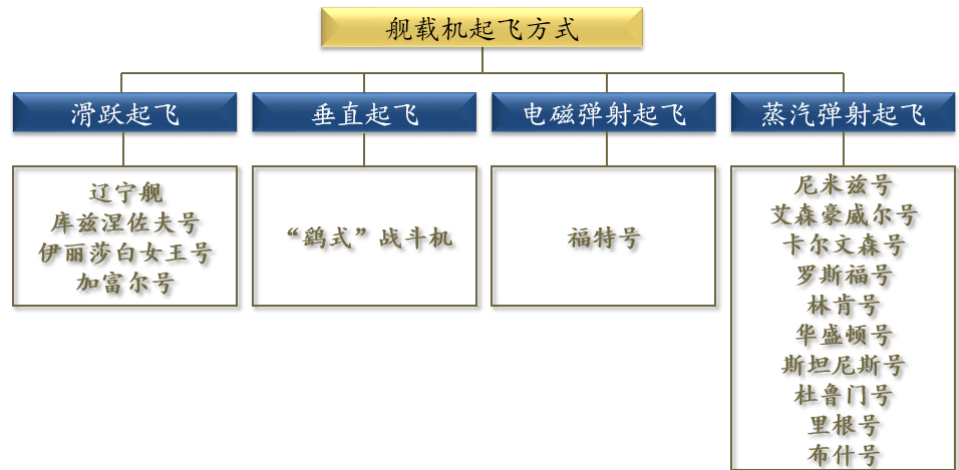
## 图表索引

图 1: 舰载机起飞方式 .....	4
图 2: 舰载机滑跃起飞原理图 .....	5
图 3: 蒸汽弹射系统组成 .....	6
图 4: 蒸汽弹射系统弹射飞机示意图 .....	7
图 5: 蒸汽弹射系统弹射飞机示意图 .....	8
图 6: 电磁弹射器结构 .....	9
图 7: 电磁弹射器弹射过程 .....	10
图 8: 滑跃起飞方式优缺点 .....	11
图 9: 蒸汽弹射起飞方式优缺点 .....	12
图 10: 蒸汽弹射器和电磁弹射器核心参数对比 .....	13
图 11: 蒸汽弹射和电磁弹射优劣势比较 .....	13
图 12: 滑跃起飞、蒸汽弹射和电磁弹射优劣势比较 .....	14
图 13: 电磁弹射是未来发展方向 .....	16
图 14: 电磁弹射器三大技术难点 .....	17
图 15: 电弹上舰的四个过程 .....	17
表 1: 滑跃起飞航母概况 .....	4
表 2: 蒸汽弹射航母概况 .....	6
表 3: 美国 C-型蒸汽弹射器发展概况 .....	8
表 4: 通用原子电磁弹射系统合同金额以及实际费用 (单位: 亿美元) .....	15

## 现役航母舰载机起飞方式特点

航母舰载机起飞方式有四种：滑跃起飞、垂直起飞、蒸汽弹射起飞和电磁弹射起飞。在现役航母舰载机中，除直升机和英国“鹞式”战机以外，其余大多数固定翼舰载机均要经过适当距离的滑跑，达到一定速度才能起飞。美国“福特级”航母采用了电磁弹射但尚未服役，其他三种起飞方式在现役航母中广泛应用。

图1：舰载机起飞方式



数据来源：《美俄舰载机起飞方式优劣谈》马世强，广发证券发展研究中心

### 滑跃起飞：美国以外的其他国家航母舰载机主流起飞方式

滑跃起飞指舰载机先依靠自身动力在航母水平甲板滑跑，后经航母舰首滑跃甲板，使舰载机在离舰瞬间被赋予一定斜倾角和向上的垂直分速度，实现离舰起飞。滑跃起飞技术是由英国人首先发明创造。英国将该技术最先应用在“无敌”级航母上，使“海鹞”垂直/短距起降飞机起飞重量、载弹量、作战半径均得到较大提高。目前采用滑跃起飞的国家有英、俄、西班牙、意大利、印度、中国等。

表 1：滑跃起飞航母概况

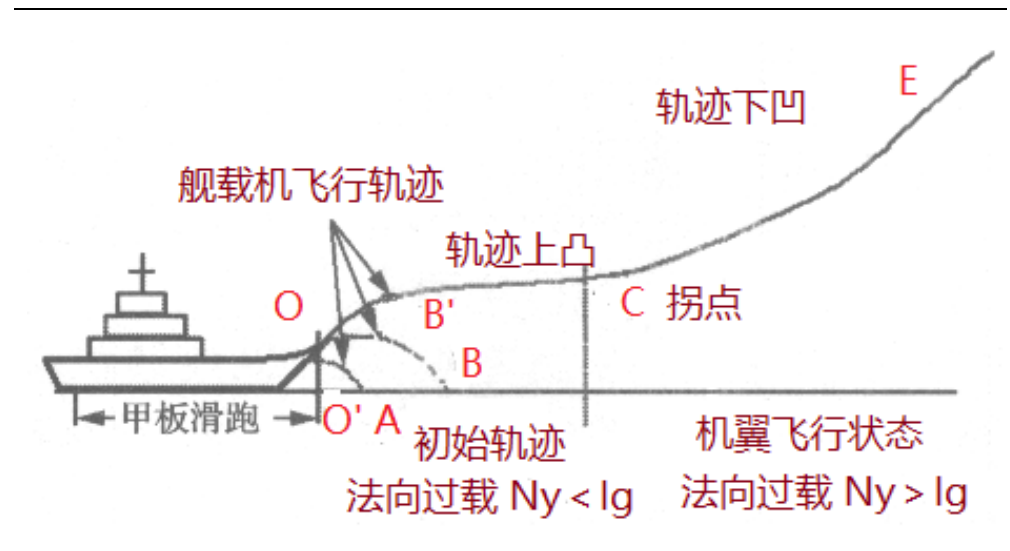
航母名称	服役时间	舰长/米	舰宽/米	吃水/米	标准排水量/万吨	满载排水量/万吨	主要舰载机	部分主要武器	
中国	辽宁舰	2012	304.5	75	10.5	4.7	6	J-15	1130 近防炮、FL-3000N 舰载反导系统、RBU1200 反潜火箭
俄罗斯	库兹涅佐夫号	1991	306.5	72	9.87	5.3	6.6	苏-33	SA-N-9 垂直发射防空导弹、SA-N-11 近程导弹、RBU-12000 十联装火箭深弹发射器
英国	伊丽莎白女王号	2016	280	74	11	5	6.5	F-35、MASC 预警机、HM-1 反潜直升机	
意大利	加富尔号	2008	236	39	7.5	2.2	2.7	F-35 STOVL 版	紫苑-15 短程防空导弹、KBA 25mm 防空机炮

数据来源：《现代航母舰载机起飞方式浅析》（曲东才）、广发证券发展研究中心

根据《舰载飞机滑跃起飞动力学研究》，滑跃起飞原理是舰首6~12°左右的滑跃甲板赋予舰载机离舰起飞瞬间斜向上的航向角和分速度。

- 假如甲板是水平的，当飞机滑跑至舰首O点时，如果速度不够大，飞机升力小于重力，飞机离舰后将按曲线OA下降落水；
- 当舰首采用滑跃甲板时，飞机滑跑到O点，由斜板给舰载机一定的机身俯仰角、航迹倾斜角，若此时速度仍然不够大，飞机亦会像一个抛射体到达最高点B'，然后再沿B'B下降。但显然水平距离O'B>O'A，飞机加速时间长，较水平甲板容易起飞。
- 若滑跃甲板倾角一定，飞机发动机推力与飞机重力的比值超过临界点时，飞机离舰轨迹将从OB偏向OE。

图2：舰载机滑跃起飞原理图



数据来源：《航母舰载机起飞方式现状及发展趋势》（曲东才）、广发证券发展研究中心

### 垂直起飞：舰载机主要是英国“鹞式”战机

垂直起飞方式指不需要滑跑可以原地起飞战机。垂直起降主要指固定翼飞机可以不用借助跑道而在原地就能垂直起飞和垂直降落，其主要原理是利用喷气反作用力或者空气动力，克服重力，使战机起飞。利用喷气反作用力原理的主要是英国的“鹞式”战机。

垂直起飞方式可以自由起飞降落但其战斗能力较低且不具备远航能力。根据《世界垂直起降动力装置的演进和展望》，垂直起飞方式可以随时随地起飞，不受机场跑道限制。但其不具备远航能力，在垂直起飞时要耗掉总油料的三分之一，载弹量也明显少于其他同类型战机，如鹞式战机的载弹量只有2271千克而同期美国的F-14有6577千克，战斗能力较低。

### 蒸汽弹射起飞：美国现役航母舰载机主流起飞方式

蒸汽弹射起飞是指用蒸汽弹射器给舰载机施加外力，使其迅速增速而“弹射升空”。蒸汽弹射器工作原理为将蒸汽压力转化为对飞机的推力。目前，美国海军除了最新服役的“福特”号航母之外，其余10艘尼米兹级航母舰载机均采用蒸汽弹射起飞。法国、巴西、阿根廷等国的航母也都采用蒸汽弹射起飞。

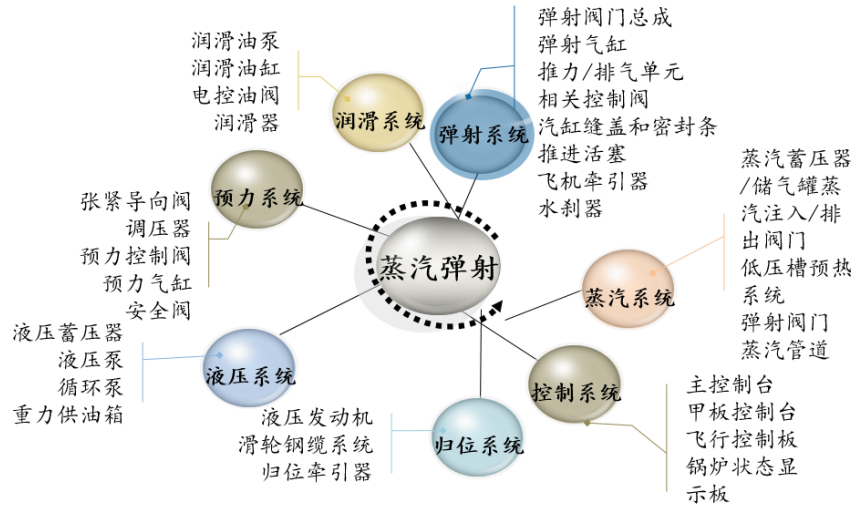
表 2：蒸汽弹射航母概况

舰名	编号	服役时间	舰长 (m)	满载排水量 (10000t)	最大航速 (kn)	舰载机数量 (架)	编制舰员数 (人)
“尼米兹”	CVN68	1975.5	333	9.1	30	90~100	5930
“艾森豪威尔”	CVN69	1977.10	332.2	9.1	30	80	3105
“卡尔文森”	CVN70	1982.2	332.9	9.6	35	78	3500
“罗斯福”	CVN71	1986.10	332.8	9.8	35	80	3500
“林肯”	CVN72	1989.11	333	10.2	35	78	6075
“华盛顿”	CVN73	1992	332.8	10.2	35	78	3500
“斯坦尼斯”	CVN74	1995.12	332.8	10.55	32	74	6093
“杜鲁门”	CVN75	1998.7	332.8	10.55	35	74	3500
“里根”	CVN76	2003.7	333	10.4	30	80	4266
“布什”	CVN77	2009.1	332.9	10.2	30	80~100	3000

数据来源：《航母舰载机起降方式特点分析及全球现役航母简介》（吴家鸣），广发证券发展研究中心

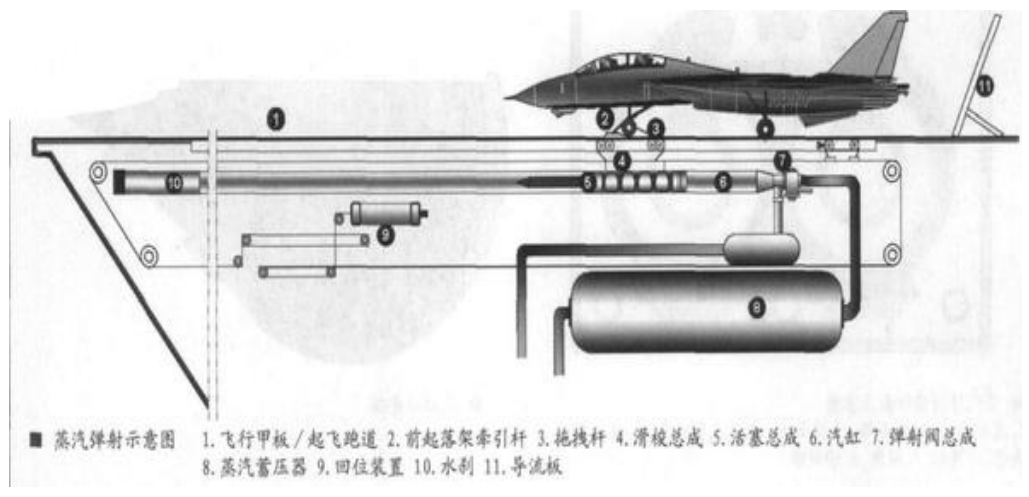
蒸汽弹射器主要由蒸汽系统、弹射系统、润滑系统、预力系统、液压系统、归位系统以及弹射控制系统等几部分组成。根据《导弹燃气-蒸汽弹射发射技术概述》，蒸汽系统包括储气罐、蒸汽注入/排除阀门、弹射阀门、蒸汽管道等；弹射系统包括弹射阀门总成、弹射气缸、推进活塞、飞机牵引器、水刹器等；润滑系统分布于弹射器各主要结构；液压系统主要提供控制动力，控制各阀门开闭。

图3：蒸汽弹射系统组成



数据来源：《Steam-powered catapults》、《兵器知识》，广发证券发展研究中心

图4：蒸汽弹射系统弹射飞机示意图

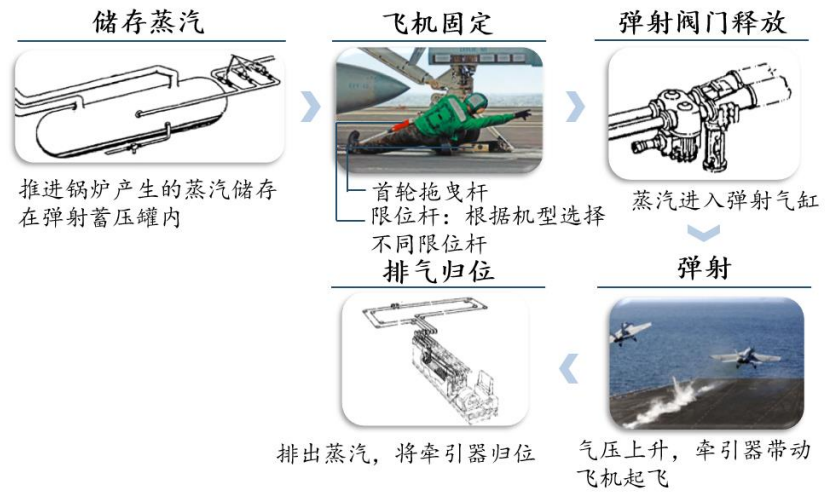


数据来源：《蒸汽弹射器揭秘》Naval Air Force、广发证券发展研究中心

蒸汽弹射是以高压蒸汽推动活塞带动弹射轨道上的滑块把联结其上的舰载机投射出去。简要过程说明如下：

- 储存蒸汽：航母推进锅炉中产生的蒸汽储存在弹射蓄压罐内，等待弹射指令；
- 飞机固定：飞机就位后拉好拖索并张紧；
- 弹射阀门释放：接到弹射指令后，储气罐中的高压蒸汽进入开口汽缸，推动汽缸中的活塞带动往复车；
- 弹射：往复车通过拖索牵拉飞机在甲板上高速滑行，在极短的时间内使飞机获得离舰速度而起飞；
- 排气复位：舰载机弹射起飞之后，通过制动缸等部件使往复车制动、复位，为下一次弹射做好准备。

图5：蒸汽弹射系统弹射飞机示意图



数据来源：《Steam-powered catapults》、《航空科学技术》，广发证券发展研究中心

目前蒸汽弹射的结构和性能都已成熟，单从机械角度看已达到性能的顶峰。最先在蒸汽弹射技术上获得成功的是英国海军。1954年，美国从英国购买2套BXS-1型蒸汽弹射器，将其称为C-11型。1961年，完全摆脱英国弹射器的纯正美国式蒸汽弹射器诞生，美国海军将其命名为C-13型。C-13是非常成功的弹射器，美国海军现役的“尼米兹”级航母都是采用C-13型。出口法国“戴高乐”号使用的是C-13-5型弹射器。

表 3：美国 C-型蒸汽弹射器发展概况

时间	型号	搭载母舰	性能及价格
1954	C-11	“汉科克”	推动 17.7 吨的飞机达到 136 节或者 31.4 吨的飞机达到 107.5 节的速度，弹射冲程为 64.5 米
1955	C-11-2	“福莱斯特”	冲程不足 50 米
1965	C-13-1	“企业”	重 550 吨，长度 100 米，可将 22.7 吨重飞机弹射到 175 节
1995	C-13-3	“戴高乐”	长度 75 米，最大起飞重量 28 吨
2003	C-13-7	“里根”	重 490 吨，长度 112 米，最大起飞重量 36 吨

数据来源：《美国海军航母弹射飞行发展史》（雪巴），广发证券发展研究中心

蒸汽弹射器价格不菲，目前只有美国可以批量生产弹射器。蒸汽弹射器的部件与其他军用或民用的产品通用性并不高，汽缸、活塞、密封条、橡胶条等都需要专门研制，这就造成弹射器的生产成本很高。目前除美国外，其他国家没有批量生产的需要，所以其研发成本更高。《微观航母之弹射杂谈》披露法国从美国购得的C-13-3型蒸汽弹射器约为1.2亿美元，自行研制、制造的费用将高达15亿美元。

## 电磁弹射：弹射能力极强，造价不菲

### 电磁弹射起飞原理

电能和动能的相互转化构成电磁弹射最为基本的原理。根据电磁感应原理，切割磁感线能够产生电流，反过来，电能也能转化为机械能。电磁弹射器利用直线感应电机的直线运动，带动舰载机加速到起飞速度。其工作原理是：直线感应电机的定子通上交流电后，产生交变磁场，这种磁场使直线感应电机的动子产生感应电流，这样，处于交变磁场的动子就会受到安培力的作用，向前运动。航母舰载机就是在动子的带动下，加速起飞。

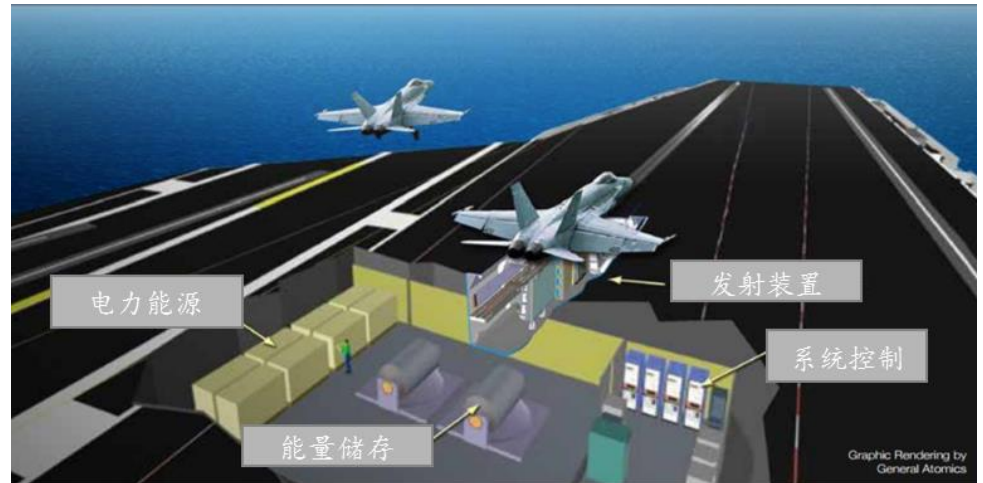
美国最新“福特”号航母是目前全球唯一搭载电磁弹射器的航空母舰。2017年4月8日，“福特”级航母的首舰“福特”号海试，引起全球广泛关注。美国海军计划在2058年之前建造10艘同级航母，全部搭载电磁弹射系统，取代目前的“尼米兹”级航母。

### 电磁弹射系统构成

根据《电磁弹射技术的原理与现状》，电磁弹射器在结构上可以分为发射电机系统、电力储能系统、功率转换电子系统、发射控制系统四大子系统。

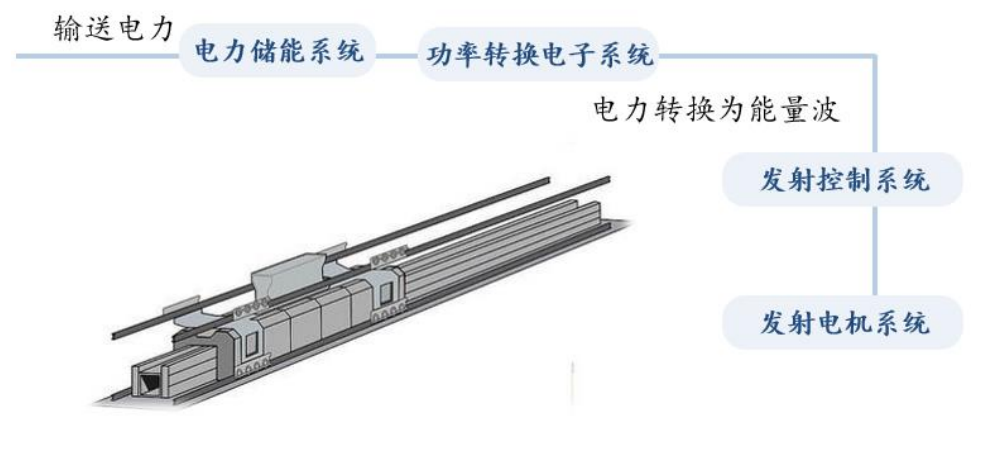
- **发射电机系统：**采用紧凑的模块化集成飞行甲板结构，能将电流转化为电磁力，将飞机加速送进发射道。
- **电力储能系统：**航母自身的电力主要来自于舰船动力系统，但是该电力无法提供100兆瓦以上的峰值功率，因此需要电力储能系统将电力储存，经积累后在高密度释放，以达到整个系统正常工作时的需求。
- **功率转换电子系统：**将从电力储能系统接收的电力转换为电压电流合适的能量波驱动穿梭仓沿发射轨道运动。
- **发射控制系统：**电磁弹射器采用闭环系统，对进入发射电机的电流采取实时控制，保证了最优化的推出速度以及更平稳的加速，因而能适用不同重量的飞机。

图6：电磁弹射器结构



数据来源：通用原子公司官网，广发证券发展研究中心

图7：电磁弹射器弹射过程



数据来源：《电磁弹射器EMALS及其材料》吴始栋，广发证券发展研究中心

### 起飞方式比较：电弹优势明显

上节提到，现役航母舰载机有四种起飞方式：滑跃、垂直、蒸弹和电弹。中国首艘航母“辽宁”号和首艘国产001A航母为滑跃起飞，未来舰载机起飞方式更多的是在蒸弹和电弹之间选择。故本小节将对分析滑跃、蒸弹和电弹三种起飞方式的优缺点。

滑跃起飞相较于地面起飞最大的优点是缩短舰载机起飞的滑跑距离。滑跃起飞方式有诸多优点：

- 缩短舰载机起飞滑跑距离：飞机沿滑跃甲板起飞后，在沿抛物线轨迹下降过程中，将受到上洗气流的作用而获得更大升力。
- 结构简单，造价低廉，不需对飞机作较大改进。

- 对甲板风要求少：如AV-8B斜甲板起飞要求甲板风比平甲板起飞少30kn。
- 增加安全性和减轻驾驶员的工作负担：由于飞机离舰后有一个垂直方向的分速度，爬升率始终为正值，驾驶员有足够的高度处理可能遇到的紧急情况。

滑跃起飞相较于电弹起飞最显著缺点是不能起飞大型固定翼舰载机。滑跃起飞相较于电弹起飞有诸多缺点：

- 不能起飞大型固定翼舰载机；
- 飞机留空时间减少：采用滑跃起飞方式，发动机需开加力，油耗增大，使飞机留空时间减少；
- 舰载机数量有限：由于舰首甲板采用上翘斜曲面，因此不利于舰载机在舰首停放，使航母的舰载机数量减少。若美国“尼米兹”级航母采用滑跃起飞方式，则会少停放10多架F/A-18飞机；
- 舰载机出动频率较低：美国“尼米兹”航母舰载机日出动次数在140架次，“辽宁”号正常条件下为70架次。

图8：滑跃起飞方式优缺点



数据来源：《电磁弹射器》（刘伟）、《滑跃起飞和弹射起飞》（王瑾）、广发证券发展研究中心

蒸汽弹射技术成熟，可以弹射多种类型飞机。蒸汽弹射方式有如下优点：

- 降低了舰载机的要求：对目前舰载机而言，均可以通过弹射器的弹射离舰起飞；
- 保证舰载机以较短时间间隔连续起飞：如美国“尼米兹”级航母上配置的4台C-13弹射器，在同时工作时，起飞间隔仅为15s；
- 美军技术成熟，使用经验丰富：美国10艘“尼米兹”及航母都是采用蒸汽弹射起飞。

蒸汽弹射相较于电弹能量利用率低以及对航母舰体的负面影响较大。蒸汽弹射缺点：

- 弹射器技术难度大：目前全球只有美国制造弹射器，在使用和维修过程中，弹射器的关键部件需要超高技术和相当的经验；
- 弹射器重量和体积很大：如“尼米兹”级航母上的四台C-13弹射器重量为2800t，体积为2265m<sup>3</sup>，占用70多米的甲板空间；
- 蒸汽弹射能量利用率低：蒸汽弹射能量利用率只有6%左右；
- 消耗大量淡水资源：每弹射一次大约消耗1吨淡水资源；
- 后期维护保障繁杂：
- 对航母舰体的应力影响较大：在弹射起飞时，对航母舰体的压力和冲击力不容忽视。

图9：蒸汽弹射起飞方式优缺点



数据来源：《电磁弹射器》（刘伟）、广发证券发展研究中心

**电磁弹射相较于蒸汽弹射的优势明显。**

- 弹射性能较好：电磁弹射最大弹射能力高达122兆焦耳，比蒸汽弹射器高出约29%，可以弹射重量更大的舰载机。
- 弹射更为可控：蒸汽弹射无法精确控制推力，会造成舰载机受力不均，进而造成机体受损。电磁弹射加速更可控，更平稳，可大幅减小对舰载机和各部件的冲击。蒸汽弹射一般要求18吨以上，而电弹可弹射飞机小到2公斤，大到40余吨。
- 可靠性更高：蒸汽弹射2次重大故障的平均周期约为405周，而电磁弹射周期达1300周以上。
- 适装性更佳：蒸汽弹射器大部分重量位于上层甲板，导致船体重心升高，而且弹射气缸必须整体安装，而电磁弹射器可以灵活布置。
- 体积质量更小：C-13型蒸汽弹射器的总质量约为538吨，体积超过1100立方米，而电磁弹射质量小于280吨，体积小于425立方米。

- 能量利用率更高, 节约淡水: 蒸汽弹射器能量利用率只有6%, 每起飞一架飞机, 约消耗1吨淡水, 电磁弹射能量利用率可达60%, 不消耗淡水资源。

图10: 蒸汽弹射器和电磁弹射器核心参数对比

	蒸汽弹射	电磁弹射
原理	高压蒸汽能量转化为动能进行弹射	强电流通过电磁铁产生强磁场作用于连接飞机的牵引器进行弹射
核心参数	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 弹射末速度: 84米/秒</li> <li>• 最大峰均推力比: 最大2.0</li> <li>• 最大弹射能量: 102兆焦</li> <li>• 重量: 530吨</li> <li>• 体积: 1133立方米</li> <li>• 平均无障碍临界间隔: 405个周期</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 弹射末速度: 28-103米/秒</li> <li>• 最大峰均推力比: 最大1.05</li> <li>• 最大弹射能量: 122兆焦</li> <li>• 重量: 小于225吨</li> <li>• 体积: 小于425立方米</li> <li>• 平均无障碍临界间隔: 1300个周期</li> </ul> <p><b>技术参数全面优于蒸汽弹射!</b></p>

数据来源: 《兵器知识》, 广发证券发展研究中心

图11: 蒸汽弹射和电磁弹射优劣势比较

	蒸汽弹射	电磁弹射
难点	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 气缸密封材料制造</li> <li>• 高压储气容器生产</li> <li>• 弹射功率控制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 储能原件制造</li> <li>• 控制变频器制造</li> <li>• 电力系统保障</li> </ul>
优势	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 美军技术成熟, 使用经验丰富</li> </ul>	<p>与蒸汽弹射相比:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 多<b>14%</b>以上发射容量, 输出功率可调节</li> <li>• 质量降低<b>50%</b>, 体积降低<b>35%</b>, 维护人员降低<b>30%</b></li> <li>• 故障率低, 维护方便</li> </ul>
劣势	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 维护困难, 运行费用高昂</li> <li>• 淡水消耗量大, 每次弹射消耗一吨</li> <li>• 高压弹射对飞机产生不必要的应力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 磁泄露会对舰艇及战机电磁设备产生干扰</li> </ul>

数据来源: 《兵器知识》, 广发证券发展研究中心

图12：滑跃起飞、蒸汽弹射和电磁弹射优劣势比较

起飞方式	重要特征							优势	劣势	结论	举例
	滑跑距离	作战能力	打击目标数/天	能源利用率	重量大小	舰载机出动频率	可搭载舰载机数量				
滑跃起飞	150m	较低	——	——	——	70架次/天	约20架	缩短滑跑距离；结构简单；造价低廉；对甲板风要求少；减轻驾驶员的工作负担。	不能起飞大型固定翼舰载机；飞机留空时间减少；舰载机数量有限；舰载机出动频率较低。		辽宁舰；001A型
蒸汽弹射	约75m	较高	248	6%	538吨，体积超过1100立方米	140架次/天	75架	降低了舰载机的要求；保证舰载机以较短时间间隔连续起飞；技术成熟，使用经验丰富。	弹射器技术难度大；弹射器重量和体积很大；蒸汽弹射能量利用率低；对航母舰体的应力影响较大。	电磁弹射起飞方式优势显著	尼米兹级
电磁弹射	75m	最高	2000	60%	280吨，体积小于425立方米	220架次/天	75架	弹射性能较好；弹射更为可控；可靠性更高；适装性更佳；能量利用率更高。	磁泄露；对供电系统要求较高。		福特号

数据来源：《电磁弹射器》（刘伟）、《航母飞机起飞的最佳选择》（李梅武）、广发证券发展研究中心

### 美国通用原子公司是目前全球唯一电弹系统供应商

美国是最早尝试电磁弹射器的国家。早在1945年，美国海军就和西屋公司在夏威夷机场上一同建造了一台电磁弹射器，它可以在178米的距离内将4吨重的飞机加速到180千米/时。1992年卡曼公司开始为美国海军新一代航母研发电磁弹射方案；2004年美国海军选择通用原子公司为电磁弹射器的主承包商；2007年，电磁弹射器的系统开发及验证项目评估完成；2008年3月，完成电力储能子系统电机部件的工厂验收测试；2008年4月，全尺寸电磁弹射器的直线感应电机首次测试完成。

### 电弹系统价格不菲

美国通用原子公司为美国海军“福特”号（CVN-78）航母交付电磁弹射系统。2009年6月，通用原子公司接受“福特”号航母的电磁弹射器的生产任务。“福特”航母上的弹射系统将由4台弹射器和共用电源接口的多台发电机组成，2011年6月，通用公司交付了第一个电机，确保了亨廷顿英格尔斯工业公司CVN-78航母建造工期的顺利进行。2013年5月，“福特”号航母开始吊装电磁弹射器。据美国国防部官网披露通用原子公司为“福特”号航母建造电弹系统和阻拦系统合同价为6.76亿美元，但实际建造费用超支约为8.18亿美元，电磁弹射系统实际建造价格约为6.70亿美元，占航母总建造费用129亿美元的5.19%。

通用原子公司为美国海军第二、三艘“福特”级航母“肯尼迪”号和“企业”号建造弹射系统。美国国防部官网披露，2015年6月通用原子公司以7.37亿美元再

次斩获美国海军第二艘“福特”级航母“肯尼迪”号（CVN-79）电磁弹射系统和阻拦系统建造合同。随着电磁弹射系统建造成熟，为了进一步控制航母建造费用，2017年1月海军授予通用原子公司第三艘“企业”号5.27亿美元的电磁弹射系统合同，5月授予1.95亿美元的阻拦系统合同。

表4：通用原子电磁弹射系统合同金额以及实际费用（单位：亿美元）

	“福特”号	“肯尼迪”号	“企业”号
合同价款	6.76 亿 (EMALS+AAG)	7.37 亿 (EMALS+AAG)	7.22 亿 (5.27 亿 EMALS+1.95 亿 AAG)
实际费用	8.18 亿 (6.70 亿 EMALS+1.48 亿 AAG)	-	-

数据来源：U.S. Dept. of Defense、广发证券发展研究中心 注：EMALS为电磁弹射器缩写，AAG为先进阻拦装置缩写。

## 电磁弹射是未来航母发展方向

### 电磁弹射是未来发展方向

电磁弹射器代表了未来大中型航空母舰的发展方向。舰载机依托电磁弹射器起飞，可有效提升整体作战实力。未来，随着相关技术的发展和材料器件的改进，电磁弹射技术将向着提高弹射质量和弹射速度方向发展。上节我们对比了三种舰载机起飞方式的优缺点，电弹优势明显，除此以外，电磁弹射是未来发展方向还体现在以下五个方面。

**1.电磁弹射器大幅提升航母作战能力。**美国最新采用电磁弹射起飞的“福特”号航母可以搭载75架各型飞机，战时舰载机的单日起降架次最多可达270架次以上，美国海军现役“尼米兹”级航母为120-140架次，辽宁舰单日起降架次目前只有数十架次，作为滑跃起飞的中型航母，其单日起飞极限为70-80架次。电弹航母搭配舰载机同时打击目标数为2000个/天，蒸汽航母只有248个/天。

**2.电磁弹射调控应力峰值将减轻对舰载机结构的影响。**蒸汽弹射的高过载，在弹射瞬间加速度峰值超过6g，使其对舰载机的纵向强度要求很高，大幅增加舰载机的设计难度和空重。连续弹射8架次后，蒸汽压力下降，动力损失，航速会从30节下降到20节。电磁弹射能量的可调节性，大大减轻J-15等舰载机结构强度的要求，其对航母的机动性也几乎没有负面影响。

**3.电磁弹射与未来武器有良好的兼容性且能够升级扩展弹射能力。**未来武器系统有激光武器，电磁炮等和电磁弹射有着最佳配合，和蒸汽弹射几乎全无关系。电磁弹射系统将促使以电磁炮为代表的高能电磁武器发展。在升级扩展方面，蒸汽弹射能力升级几乎不可能，而电磁弹射器为模组化设计，随着元器件性能的提升，可方便的提升电磁弹射的性能指标。

**4. 航母向综合电力推进方向发展已是必然趋势，电磁弹射系统符合这一趋势。**蒸汽弹射起飞只是一个过渡形式，美国计划在2058年之前用电磁弹射航母完全替代目前的蒸汽弹射航母。除将装备核动力航空母舰外，电磁弹射器还可以与滑跃跑道形状配合，进一步列装常规动力航母，甚至可以用于采用综合电力系统的舰艇之上。

**5.电磁弹射系统或将成为无人机地面弹射起飞的理想发射方式。**电磁弹射技术与传统火药相比在速度、射程和隐身性能方面拥有突出优势，可成为未来鱼雷、导弹的推离发射平台，甚至可以用于卫星、飞船、火箭等空天装备的低成本重复发射。目前美国已经开始研究利用直线电机作为航天发射的平台。

图13：电磁弹射是未来发展方向



数据来源：《中国舰船研究》、《舰船动力发展的方向》（马伟明），广发证券发展研究中心

### 电弹技术难点：直线电机、弹射控制和电力储能

直线电机技术、弹射控制技术和电力储能技术是电磁弹射器的三大技术难点。

- 直线电机技术：电磁弹射器是一台直线感应电机，原理并不复杂，但要做到规模大（长达百米），功率强（可能达到上百兆焦），在工艺上实现并不容易。美国目前研制的直线感应电机要求的峰值功率必须在100兆瓦以上，而民用的功率远远低于这个水平，为此，美国给每部电磁弹射器都配备四台30兆瓦直线感应电机。
- 弹射控制技术：电磁弹射需要精确控制弹射末速度和弹射过程中加速度，弹射控制技术的难点在于对直线电机的实时反馈控制，以及对各种信息的组网、交互与处理。
- 电力储能技术：每一次电磁弹射持续时间大约不到3秒，但峰值功率高达上百兆瓦，这就需要有一个储能设备将航母电站输出的电能储存起来，一瞬间释放。储能技术的难点就是需要找到能量密度很高的储能方式，否则储能装置本身体积重量超标就不能满足上舰使用的要求。

图14：电磁弹射器三大技术难点



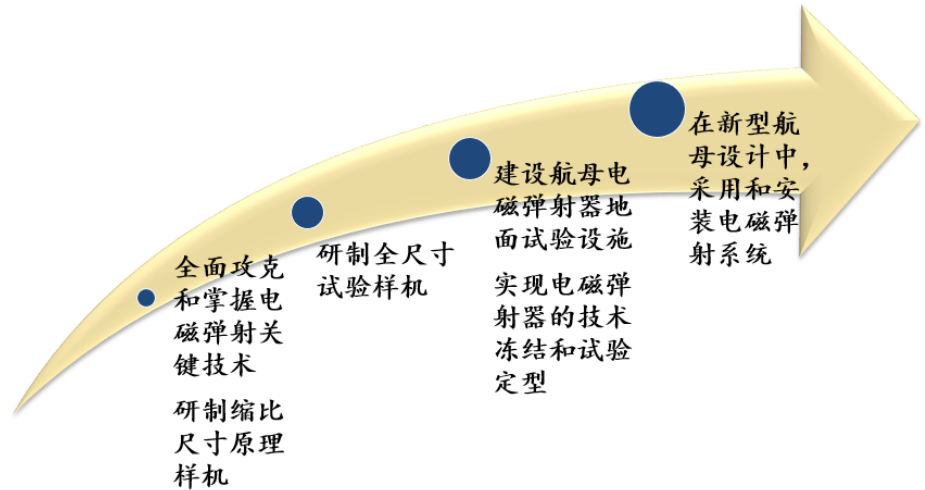
数据来源：Naval Air Force、《兵器知识》，广发证券发展研究中心

拥有超强电力系统的航母才能安装电磁弹射，具体就是指全电推进的常规航母或者采用特殊设计而侧重发电能力的新式反应堆的核航母。电磁弹射需要强大的电力系统，但并不是说只有核动力航母才能装备电磁弹射。比如英国的伊丽莎白女王级航母是常规动力，但它是综合式全电推进的航母，有上百兆瓦的电力作后盾，也可能装备电磁弹射，而尼米兹级航母是核动力的，但电力不够充足。

### 中国导轨式电磁能武器技术进展情况

电弹上舰要经过以下四个过程。第一，全面攻克和掌握电磁弹射关键技术，研制缩比尺寸原理样机；第二，进入工程开发阶段，随后研制全尺寸试验样机；第三，建设航母电磁弹射器地面试验设施，然后使用真正的舰载机进行长时间的地面弹射试验，逐步地解决各种工程应用中出现的问题，实现电磁弹射器的技术冻结和试验定型；第四，在新型航母设计中，采用和安装电磁弹射系统，最终实现“电弹上舰”。

图15：电弹上舰的四个过程



数据来源：《兵器知识》，广发证券发展研究中心

中国导轨式电磁能武器技术已取得重大发展。科技部2016年1月7日发表文章《海军工程大学电力集成创新团队》，文章指出，海军工程大学电力集成创新团队在马伟明院士带领下，经过近30年的奋斗，已建成国际一流的舰船综合电力技术国防科技重点实验室，成为军用电气领域的研发中心和高层次人才培养基地。研制的某电磁发射系统，填补了国内空白，取得了与世界最先进水平的同步发展，并打破了我国导轨式电磁能武器技术始终徘徊不前的局面，取得重大进展。

## 风险提示

电弹上舰进度低于预期；军费持续低于预期。

## 广发军工行业研究小组

- 胡正洋：首席分析师，北京大学经济学硕士、上海交通大学机械工程及自动化学士，4年证券从业经历，2016年进入广发证券发展研究中心。
- 赵炳楠：分析师，哈尔滨工业大学工学学士和硕士，6年以上军工企业工作经历，2年以上证券从业经历，2015年进入广发证券发展研究中心。
- 彭 雾：联系人，复旦大学微电子与固体电子学硕士，2016年加入广发证券发展研究中心。

## 广发证券—行业投资评级说明

- 买入：预期未来12个月内，股价表现强于大盘10%以上。
- 持有：预期未来12个月内，股价相对大盘的变动幅度介于-10%~+10%。
- 卖出：预期未来12个月内，股价表现弱于大盘10%以上。

## 广发证券—公司投资评级说明

- 买入：预期未来12个月内，股价表现强于大盘15%以上。
- 谨慎增持：预期未来12个月内，股价表现强于大盘5%-15%。
- 持有：预期未来12个月内，股价相对大盘的变动幅度介于-5%~+5%。
- 卖出：预期未来12个月内，股价表现弱于大盘5%以上。

## 联系我们

	广州市	深圳市	北京市	上海市
地址	广州市天河区林和西路 9号耀中广场A座1401	深圳福田区益田路6001 号太平金融大厦31层	北京市西城区月坛北街2 号月坛大厦18层	上海浦东新区世纪大道8号 国金中心一期16层
邮政编码	510620	518000	100045	200120
客服邮箱	gfyf@gf.com.cn			
服务热线				

## 免责声明

广发证券股份有限公司（以下简称“广发证券”）具备证券投资咨询业务资格。本报告只发送给广发证券重点客户，不对外公开发布，只有接收客户才可以使用，且对于接收客户而言具有相关保密义务。广发证券并不因相关人员通过其他途径收到或阅读本报告而视其为广发证券的客户。本报告的内容、观点或建议并未考虑个别客户的特定状况，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的投资建议。本报告发送给某客户是基于该客户被认为有能力独立评估投资风险、独立行使投资决策并独立承担相应风险。本报告所载资料的来源及观点的出处皆被广发证券股份有限公司认为可靠，但广发证券不对其准确性或完整性做出任何保证。报告内容仅供参考，报告中的信息或所表达观点不构成所涉证券买卖的出价或询价。广发证券不对因使用本报告的内容而引致的损失承担任何责任，除非法律法规有明确规定。客户不应以本报告取代其独立判断或仅根据本报告做出决策。

广发证券可发出其它与本报告所载信息不一致及有不同结论的报告。本报告反映研究人员的不同观点、见解及分析方法，并不代表广发证券或其附属机构的立场。报告所载资料、意见及推测仅反映研究人员于发出本报告当日的判断，可随时更改且不予通告。本报告旨在发送给广发证券的特定客户及其它专业人士。未经广发证券事先书面许可，任何机构或个人不得以任何形式翻版、复制、刊登、转载和引用，否则由此造成的一切不良后果及法律责任由私自翻版、复制、刊登、转载和引用者承担。