

舰船电磁兼容性

舰船电磁兼容性



第七〇一研究所

第七〇一研究所

665
50

U665
Z50

413434

SI-19-92

舰船电磁兼容性



第七〇一研究所

1992.5

中译本前言

舰船电磁兼容性应用研究及实船设计，在我国起步较晚，但是其发展速度之快，在我国新技术领域堪称前茅。我国相继引进了西方发达国家，尤其是美国的有关标准、规范及设计资料，对这一发展起到了促进作用。

我所作为舰船总体研究所，极其关心舰船电磁兼容性的研究与发展。为了提高舰船电磁兼容性设计水平，电磁兼容研究室一直在注意搜集国外的有关资料。本书就是为适应我国舰船电磁兼容性领域的广大科技人员从事舰船电磁兼容性应用研究和设计而译编出版的，它对编制我国有关标准，规范亦有较大参考价值。

本书主要译校者有：曲长云、王玉成、周开基、成更海、齐全尚等。

本书由王凌、成更海负责编辑，译编过程中可能有误，请指正。

编者

1992.3

目 录

	页次
第一章 历史背景.....	(3)
第二章 舰船电磁环境(EME)	(14)
第三章 舰船电磁兼容性	(21)
第四章 舰船电磁干扰(EMI)	(27)
第五章 舰船电磁辐射的危害性.....	(124)
第六章 舰船电磁脉冲(EMP).....	(146)
第七章 舰船电磁评估.....	(165)

前 言

自十九世纪末无线电通讯技术首次在海上使用以来，海军舰船就从未脱离过电磁学。海军舰船电磁学的应用与发展，使得从通讯到导航、雷达、武器控制以及电子战等领域出现了一系列奇迹，而每项奇迹之间已经逐渐形成对抗，其根源又是电子技术和电子干扰。

从 1899 年首次进行舰对岸无线电试验至今，电磁干扰就对海军如何进行可靠、有效的战斗提出了各种错综复杂的问题，虽然舰船电磁技术已经应用了一个世纪，但电磁干扰只是在严重性和复杂性的程度上有所变化。今天，随着无数高级复杂的电磁系统装备舰船，电磁干扰问题已日趋严重。因此调派最优秀的电磁工程专家进行一场彻底控制的战斗刻不容缓。为了保证舰船电磁学的完善（这对当代的电子武器和电子战至关重要）必须坚持不懈的努力和创新。

依·劳·洁尔

1987年5月15日

于普雷斯顿

引 言

从本书所论述的特殊意义上讲，电磁学就是与辐射能量（即辐射电磁场形式的能量）相关的电场与磁场之间的相互作用。例如，在此最为感兴趣的理论课题将是发射或接收电磁波的各种舰载装置，它们的无线电频谱从极低频直到极高频微波。其它部分的电磁频谱例如光波（如红外光和纤维光学）本书将不作深入论述。

本书中将不给出电磁理论的严格数学处理。自麦杰斯韦经典理论时代以来，已经出版了很多优秀理论著作。有代表性的样本列于参考资料目录中。

象通讯、导航、雷达及武器控制系统等通过相连的发射天线那样发射舰船电磁能是我们所希望的。象如下情况那样发射电磁能量则是不希望的，即未被抑制的互调谐产物、谐波频率、宽带噪声、乱真信号、脉冲串噪声、高电平旁瓣能量、发生二次辐射、多路径反射和辐射危害等，遗憾的是，上述情况往往会发生。

同样地，电磁能的接收可以分成需要的（如需要通讯信息、雷达回波脉冲、导航定位和武器控制跟踪）和完全不希望产生的（凡是接收的或感应的无关电磁发射均视为干扰）两类。

海军舰船（装有大量的电子系统）必须与电磁辐射与接收的各种情况作斗争。特大功率的发射机必须在复杂的舰船环境条件下与极敏感的接收机共存和同时工作。在这些众多的系统中干扰必须被消除或被抑制到最低限度，以便使每个系统有效地完成所承担的任务。然而达到这一效果并不容易。

本书力图讨论对舰船电磁学起主要作用的各种因素，并努力说明如何解决兼容性与干扰的问题。从这个意义上讲，本书将提供大量所需要的知识，从而有助于海军工程师从事舰船系统设计和操作。这将是本书的愿望。

翻译 成更海
校对 周开基

第一章 历史背景

1-0 前言

在1986年5月16日的华盛顿邮报和1986年7月14日刊发的海军时报周刊中向美国公众披露了以下情节：在福克兰战役中英国驱逐舰 HMS 谢菲尔德号被一枚“飞鱼”导弹击沉，当时该舰舰长正在同英国本土进行无线电通讯联络，为了避免雷达干扰他的作战电话联系，下令关闭了该舰雷达，而恰恰在这时，“飞鱼”导弹不知不觉地降临了。

海军时报记者特别强调的一点就是在电子系统之间的电磁干扰 (EMI) 问题，同时指出，相同或类似的问题也可能出现在美军舰船上。他援引海军原始资料证实海军对本该很好了解的 EMI 问题还不甚了解，虽然海军在最近的 3~4 年已开展“电磁兼容性 (EMC) 运动”。

“谢菲尔德”事件戏剧性地加深了人们对电磁干扰的认识，尤其是在紧急关头，电磁干扰能中断或降低舰船电子系统性能从而产生严重的后果。目前，最需要确定一种强制性的措施以控制电磁干扰的有害影响。然而，电磁干扰不是新问题，又没有积极地尽全力去控制它。

很自然，舰船电磁学的基本性质是系统的电磁兼容和消除电磁干扰。两者没有必然的联系，它们始终是对立的。那些广泛分布于陆上、为数众多的用于减缓电磁干扰问题的各种工程设备，在舰船上使用同样令人满意。

1-1 海军使用电磁学

十九世纪末，现代无线电技术的先驱——无线电报（话）被发明了。美国海军立即对这一尚未被人们认识而遭到拒绝的新技术产生了极大的兴趣。他们意识到无线电报（话）可以在海上不受视距的限制，即使在大雾中或不见星辰的夜晚以及暴风雨中进行通讯和导航。美国海军于1899年10月26日开始着手最初的舰上试验，这是美国海军研究无线电通讯和电磁干扰现象的开始。作为试验的一部分，海军部有远见地研究了同时使用二部发射机和消除干扰的方法。在权威性的美国海军电子通讯史中 L.S 豪斯幽默地写到：“干扰试验的结果相当成功，就是说，干扰非常明显。岸台不时地发送信号，与此同时，一艘船接受另一艘船的信号，在低带上复现的记录总是很不清晰，其结果是相当混乱的。”这些缺陷描述如下：“当两艘舰船正在进行无线电通讯，比如在美国的“新纽约号”与“灯塔”号之间，另一艘船驶入信号范围并试图与“灯塔”号进行通讯联络，“灯塔”号同时收到来自两艘船上的信号就变得混乱，岸上接收台也无法分清它们。”

这显然很令人失望，但三个设备同时在一个频率上工作是不可避免的。即使在今天，用宽波段发送设备在大致相同的频率上重复同一实验，其结果也将完全一样。当时不能使用可调谐的设备是令人遗憾的，因为人们基于这样一个印象，即干扰与无线电设备是与生俱来的，这一看法持续了多年。

现在我们已了解到海军最初采用电磁学和随之而来的电磁干扰的困扰，它们之间的这种固有联系，困扰了我们几乎一个世纪。同时还应注意，电磁干扰并非是所遭受的唯一灾害。海军调查人员仔细地记录了伴随无线电发送产生的潜在问题，这些问题就是我们今天电磁危害的初型：

- a. 由发送线圈中产生的火花或发送电线绝缘损坏，将足以点燃易燃的气体混合物或其

它易燃材料。

b.发送线圈的震动，对心脏不好的人是非常严重和危险的。

c.发送装置及其电线，如果放置在罗盘附近，将对罗盘产生有害的影响。

这里我们首先提到电磁辐射对燃料 (HERF) 和军械 (HERO) 的潜在危害，第二是对人体的辐射危害 (RADHAZ) 和射频 (RF) 灼伤危害。第三是我们所熟悉的另一重要方面，即电磁兼容性 (EMC)。

这里应当指出的是，就某一观点而言，干扰并非总是有害的。在海军首次进行舰船无线电试验后不到两年，电磁干扰就被用于比赛竞争。1901年国际快艇比赛中曾报导过一则三线勤务事件：无线电报（话）专家、出版印刷者协会的李·德·福尔斯特、美联社的加哥里蒙·马可尼和美国无线电报话公司的约翰·皮卡德展开了激烈的竞争。豪斯描述了这场有趣的比赛：在马可尼和德·福尔斯特的比赛中，他们的移动电台分别用旗语呼叫各自的岸台并拚命发问：“出了什么事？信号混淆了，无法辨别！”德·福尔斯特试着改善他的通讯，后来由于没有再看见信号，他非常满意。觉得自己比对手表现出色，开始想象他凯旋时的情景。结果他们都失败了，而美国无线电报话公司通过干扰他们对手的无线电通讯获得了第一。

有理由说这次悲剧的真正肇事者是美国无线电报话公司，当他们在这次国际快艇比赛中企图让美联社使用他们的设备的努力失败后，就在纳夫辛克 (Navesink) 海兰兹 (Highlands) 附近建立了一个很大功率的电台。在整个比赛中，他们发出非常强大的干扰电流以致在马可尼和德·福尔斯特的接收器中产生上述的响应。皮卡德提到美国无线电报话公司在本次比赛中的作法时说：当时我说“报告”，就意味着他们俩人也说“报告”，但马可尼和德·福尔斯特并未呼叫报告，换句话说，制造的新闻并不是事实！他强调美国无线电报话公司用了一种简单的天线，二十英寸大线圈和喇叭形断续器，卸去所有负荷，以致使瞬时放电的频率很高，他们的初级线圈尽可能大地通入电流以使断续器持续有效，因此，就能发射相当大的能量……。他们的接收站设在 Galilee 并用天线接收德·福尔斯特的信号。这意外地使他们优于马可尼的粉末检波器和印字机。皮卡德声称在去比赛场地的途中，突然产生一个想法，即用操作码方法来阻止马可尼和德·福尔斯特的接收联络。他手上刚好有张报纸，于是将大写的标题重叠在小写的文章上，他注意到小写的字几乎难以辨认，但大写的标题丝毫无妨。为了节省时间使用小字标题。于是，皮卡德着手制作“简便”的密码。例如，一个长 10 秒的划线意味着 COLUMBIA “哥伦比亚”在前方，二个同样长的划线代表 SHAMROCK 领先，三个同样长的划线代表它们并驾齐驱。接着有一系列 1 到 9 的长划线用密码传递一般现象。这样装备后，他们就能在获得信号的同时干扰别人。“马可尼和德·福尔斯特一点机会都没有，而我们从简单密码说明中制造了一个动听的故事。”有点微妙的是，有时能从 Galilee 听到皮卡德发出的与马可尼在时间上分开的指令。联想到美联社的船 MINDORA 号上，由皮卡德提供而由马可尼使用的装置，这个谜就解开了。联系这一事件，教授谈到他与美联社长的冲突：“大约还在几百英尺以外，Melvillestone 号甲板上的喇叭就开始责骂我们。他骂了我们整整 10 分钟，且每个词都不重复。只是由于我们找了个鸡蛋并幸运地把它扔进了他们的喇叭里，他们才突然停止了咒骂，而与此同时，谈判也停止了。”联系到他所说的“比赛的最后事件报告，皮卡德说：“当快艇越过终点线，我们控制电键并连续保持按压，于是实际上并不连续的辐射波成为连续

的了。我们回到了港口，电池使用了1小时15分钟，通过无线电报（话）我们发出了最长的划线。”比赛后，当皮卡德经过纳夫辛克回家时，灯塔管理员请他过来并且说：“噢！顺便提一句，我们前几天有一台无线电报（话）机，马可尼带着一台象证券报价机似的小黑盒子来这里，从盒中输出的纸带上，中间有长长的黑色线，每隔几分钟马可尼就拾起这种纸带，看上几眼并不平地骂上几句，撕下它，踩上几脚。”对此，皮卡德声称“这是对我工作效果的最好评价。”

以上事件也许是人们为某种利益而使用电磁干扰的首次记录。后来，世界爆发了战争，人为的利用干扰去干扰敌人的系统，同时，把干扰作为手段研究的新学科——今天称为电子战（EW）的新学科开发出来了。

回顾一下关于不希望的干扰总是伴随着无线电报（话）产生的事实，在1902年以前，由于突然增多的商业电台与无线电业余爱好者自制的电台产生的强烈干扰，海军官员主张由政府控制管理所有无线电报（话）的使用。他们特别强调了无线电报（话）易受干扰的致命弱点。而且，无线电报（话）在海运通讯上的使用还方兴未艾。为了防止相互间的干扰，海军部推荐自己来处理所有政府和私人在海岸附近的电台。经过官方的争论和各军种之间交涉，终于达成协议。1904年7月20日西多尔·罗瑟韦尔特总统签署了一道命令，指明由海军作所有政府电台（包括战争中的所有电台；同时贸易部门开始调整私人电台）的控制机关。这些事实确定了海军从早期就领导研究美国无线电电子学的地位。1904年底以前，海军有33艘船和20个岸台装备无线电报（话）机。

尽管有这些管理上的尝试，而讨厌的干扰问题仍不断地在政府、私人 and 业余爱好者之间出现。例如，商业台使用者曾进行一次公开阻止相互发射的尝试，还有许多业余爱好者热衷于中断政府或商业通讯。这些事件，导致要求政府更加有效地进行管理。

同时，令人不快的是海军自己在海战上体验到了无线电报（话）干扰的困扰。1906年进行了一次评估无线电报（话）战略使用的尝试，大西洋舰队进行了大规模演习，但由于所用设备的作用距离有限和令人头痛的干扰的影响，结果很令人失望。这次失败导致海军高级官员对无线电报（话）通讯的可靠性产生了较大疑问，从而严重地延缓了海军使用无线电报（话）的进程。

1-2 早期减少无线电报（话）干扰的尝试

海军很快认识到产生宽带发射射频能量的火花很可能引起相互干扰，在大量采购以前，开始直接评估现有的所有设备。特别强调良好的选择性可以减少相互干扰。为简化这一工作，海军设备局无线电部于1903年成立，负责研制和采购操作时无干扰的可靠的无线电报（话）设备。

截至1906年，独立调谐初级和次级耦合电路及改进的火花抑制电路被用来限制不希望的宽带能量。与此同时，把较好的操作训练和无线电报（话）频道分配也包括了进去。

1912年，新的名词术语“无线电”代替了老的“无线电话（报）”。两年以后，在1914年占领维拉克鲁斯港期间，海军首次在战争状态下试验了它的无线电通讯设备。结果很不满意。附近友邻舰艇的火花发射机产生如此强烈的干扰以至中断所有无线电通讯。参加者不得不作出时间分配计划，结果分配两小时给美国国内操作者进行无线电发射，其它四个国家各1小时。这样，设在华盛顿的军事总部要间隔四小时才能与它在战场上的武装力量联络。值得注意的是这种早在1911年建立的为避免干扰影响不得不采用的时间分配操作

方法（与频率管理一起），经过各种各样的不断改进，一直沿用到今天。

在第二次世界大战期间，无线电的必要性和价值多次被证实，如此广泛的应用前景促使设备不断的开发和改进。1918年超外差技术引入接收机电路使其具有较宽的射频放大功能、较好的选择性和更易操作，并且它很快在海军得到应用。由于舰船上众多的发射机和接收机相互工作距离很近，超外差接收机对干扰更加敏感，需要仔细采用屏蔽技术、电路隔离、振荡器稳定和前置预选器使超外差接收机满足舰船通讯业务。

此外，在这段时间里，探索了消除由海军电弧型发射机产生的相当大的谐波干扰的方法。加装高通滤波器来旁路电弧，采用将电弧耦合到抑制器里以抑制不希望的发射。尽管如此，1922-1923年海军在多次试验中还是明确地指出，电弧和火花发射机产生如此大的干扰，以致事实上在舰船上同时接收是不可能的，随着对通讯信道数量的要求迅速增多，不得不解决干扰问题。

幸而在20年代初，由于真空电子管的应用解决了这个问题。采用电子管发射机产生的射频“污染”小于电弧和火花发射机。与此同时，采用了防电键声装置以消除当发射机敲键时接收到的瞬变电键声，因此，可以提供更加靠近的频道间隔。

1-3 从射频干扰 (RFI) 到电磁干扰 (EMI)

在30年代以前，已出现了完全用于无线电干扰研究的工程产品。海军试验室和民间工业都在寻找克服舰船噪音干扰的方法。术语射频干扰，即RFI，开始用来描述不希望的电磁发射现象的特性，它可能是由辐射、感应或是传导产生的。海军的试验和探测结果，开始以期刊文章和报告的形式出现。

30年代典型的文件包括：

- a 工程信息会刊，No 101，1936年10月：“发射机干扰消除改进”
- b 会刊，No 103，1937年4月：“超外差接收机乱真干扰响应”
- c 会刊，No 104，1937年7月：“干扰测量”
- d 会刊，No 105，1937年10月：“噪音消除”
- e 会刊，No 106，1938年1月：“干扰和接收机选择性”
- f 会刊，No 109，1938年10月：“美国船约克城号无线电噪音测量”

1-3.1 第二次世界大战中海军电子学和射频干扰

由于第二次世界大战急需，1940年众多数量和型号的电子系统和新技术潮水般地装备到舰船上。射频干扰问题显著地复杂化了。当时，对空搜索雷达、对海搜索雷达、火控雷达、无线电导航系统和电子对抗设备同无线电通讯在狭窄的舰船环境中为分享拥挤的电磁频谱而竞争。由于必须立即投入使用，新设备没有考虑电磁兼容性和干扰问题就仓促安装了。表面上虽然增加了舰船的战斗能力，然而由于增加如此众多的新的电子系统所带来的相互干扰马上就限制了有效性。另一方面，二次大战前的大型舰船通常安装5~6台无线电发射机及6台通讯和导航接收机，而二次大战时大型战舰则装有12台发射机、18台接收机加上2部雷达。如此多的高功率发射和敏感接收设备在邻近一起操作产生严重的系统内和系统间的射频干扰。当时，海军看出它不得不面对的现实，遂于1945年6月14日颁布了第一个海军-陆军联合的射频干扰标准JAN-I-225，名称是“射频干扰测量”。

分析射频干扰，干扰的起因以及进一步改善和预防。较好的方法是应用屏蔽隔离并把干扰限制在干扰源内，与此同时，避免干扰进入敏感电路里。已研制出滤波网络使射频干

扰旁路以避免引起干扰。

1-3.2 战后的工作

1953年，由三军与阿莫尔研究基地（现伊里诺斯技术研究院）签订合同，研究确定射频干扰问题的大小和推荐抑制它的方法，这说明了政府对射频干扰的复杂性日益增加和可能产生的潜在危害表示担心。此后不久，于1954年召开了由政府 and 工业部门发起的三军射频干扰研讨会。三年后，1957年10月10日射频工程师学会（现电气电子工程师学会IEEE）成立了射频干扰专业学会。1958年6月海军出版了《海军射频干扰控制手册》，对舰船干扰检测和抑制等实际应用很有帮助。该手册做为舰船射频干扰描述、起因和补偿等综合性原始资料是经典性的。此外，该手册附录1列举了从1936年到1956年有关射频干扰的海军报告、论文和学科领域的有价值的文献。

遗憾的是，我们从事电子学的一些人在处理干扰问题上或是把它当成不可避免的，或是认为如果我们忽略它，它就会自动消失。我们投入巨大人力、财务资源去开发不可思议的电子设备和系统，在很多情况下，由于我们疏忽采用整个抑制干扰问题的那一极小部分，以致设备和系统完全无效。现在，这种明显的粗心大意的蠢事是再清楚不过的了。

然而，对不希望的电磁辐射特性的兴趣没有局限在对设备的干扰效应上。对电磁辐射危害的安全性的担心日益增加。为研究这些关系和确立工作方向，国防部电磁辐射危害工作组于1958年9月30日召开了会议，根据这次会议结果，分配给海军武备局负责研制射频辐射对军械危害（HERO）的标准，分配航空局负责起草射频辐射对燃料危害（HERF）的标准，分配船舶局研究下列射频辐射危害技术：

- a 术语
- b 测量单位
- c 场强测量技术
- d 测量仪器
- e 射频辐射危害的文献编纂
- f 通用射频辐射危害项目的目录

刚好三个月以后，1959年1月9日海军在一家制造厂进行了高功率辐射设备功率密度系列试验中的第一次试验。特别进行了确定辐射危害安全区的测量，它是在远离舰船超高频（UHF）对空搜索雷达（脉冲功率2兆瓦，脉冲重复频率300赫兹，脉冲宽度6微秒）上进行的。试验结果表明在主波束120英尺以内功率密度超过了人体安全暴露的极限值 $10\text{mw}/\text{cm}^2$ 。以这些简易初始控制试验为基础，根据功率密度和距离要求，可以建立设备辐射危害电平数据库。

二次大战后加速了电子学的发展，在这段时间，研究了射频干扰和有效克服它的很多方面。A·J·E雷斯提到海军主办了很多研究项目，新试验设备研制、接地、屏蔽、搭接试验等，在他给第十次三军电磁兼容性研讨会的公开信中评述50年代可以称作“弄清射频干扰现象”的时代。

1-3.3 越南战争期间的电磁兼容性

60年代对电磁系统干扰扩大了范围并加深了了解。例如，一艘典型的航空母舰上电子设备增加了二倍，有35台无线电发射机，56台接收机，7台导航支援设备以及100付以上的天线。1960年1月海军船舶局发布了它的第一个舰船电子系统电磁兼容性手册，

概述了辐射射频能量测量方法，开始正式使用电磁兼容性名词术语。具有同样重要意义的是，1961年国防部建立了电磁兼容性分析中心（ECAC），它位于马里兰州的安娜波里斯海军工程试验站内。该中心负责最新的计算机数学模拟的应用和为评估电磁环境、研究增加系统兼容性方法以及减少干扰和敏感度的起因进行数据处理分析。

60年代中期，已经沿用了大约30年的名词术语“射频干扰”逐渐为更全面和更确切的名词“电磁干扰”所代替，电磁干扰定义为能使电气和电子设备正常工作性能降低的任何辐射和传导的电磁扰动。电磁干扰包含的感兴趣的频谱比射频干扰宽。因此，电磁干扰的起因也就有更多的特殊性：除大气噪声和由电气机械、点火系统、荧光灯、焊接设备、电路继电器和开关产生的人为噪声外，还有由下列因素产生的干扰：（1）由于发射机和接收机电路的非线性，由两个以上信号混频产生新的和、差频率，即互调产物。（2）在舰船结构、索具和附件上由于金属连接的非线性作用，两个以上信号的混频产生互调产物。这主要是由于连接和接点的锈蚀及氧化作用，即所谓“锈蚀螺栓效应”。（3）发射机电路由于不适当的滤波和衰减，产生的谐波和乱真噪声。（4）当信号部分从一个信道渗透到另一信道时，产生同频道和邻近信道干扰。在电子系统的设计和生产中，为控制电磁发射和敏感度电平，1966年海军颁布了MIL-STD-469“雷达工程设计电磁兼容性要求”，1967年颁布了MIL-STD-461“设备的电磁特性要求”。

随着对电磁干扰的进一步认识，对怎样防护和抑制电磁干扰提出了更好的设想。为了对有很多电磁发射源和敏感器的上层建筑实现最佳布置，采用增加隔离（射频去耦）和减少性能降低等措施，推荐在设计过程中采用方法学。这较好地促进了对舰船电磁环境的了解。此外，舰船设计和结构工艺的改进也强调减少电磁干扰，例如对救生索和垂直梯子尽量采用非金属材料。

在越南战争海战期间记录的电磁干扰问题更使人震惊，美国海军舰长J·S·小奥勒尔详细描述了那个时代，他写到：“60年代后期，大量电磁问题已明显影响舰队的作战行动；以致舰队的能力实际上受电磁干扰制约。要求特混舰队和分队指挥官在指挥战斗时考虑他们的电子设备界面的限制。在某些情况下，当命令导弹处于战备状态时，一般惯用作法是关闭某些搜索雷达和通讯发射机。在另外的情况下，航空机的起飞和着舰也规定采取这样的措施。美国是在非常受限制的环境下进行战争，这就是现实的生活。”

认识了这些利害关系后，美国国防部长于1967年7月5日签署了一道命令建立国防计划综合部以保证电磁兼容性。在这以后，海军作战部长证实了存在大量严重的电磁干扰问题并于1969年12月24日建立战术电磁调度办公室，在他的指示中有如下的话：海军最紧急的问题之一是特混舰队电磁环境的管理。对每种海战模式电磁设备都是主要的。在很多情况下，已研制出来的用于舰船和飞机系统的电子装置没有充分考虑与总体电磁环境的电磁兼容性。在很多情况下，电子设计根据相互影响特性满足特殊要求而与需要无关。在很多情况下，紧迫的问题规定措施而不顾及更多的系统整体的需要。通常这就助长了电子项目的随意激增，因而拨款部门出现大量预算项目，结果导致对进攻和防御的最佳电磁环境都达不到。

高水平的提议清楚地预示了在70年代和80年代为与电磁干扰斗争海军组织的科学和工程管理途径。

1-4 现代电磁辐射分析（ERA）

1-4.1 暴露了管理的重要性

1970年，在海军作战部长的要求下，开始了彻底研究舰队现存的电磁问题。1973年4月这项著名的战术电磁系统研究，简称为TESS，得出一个令人惊奇的11卷报告，它说明了600多个问题。唯一的遗憾是它的发行范围受到限制，因此，没能发挥与其相应的解决问题的作用。然而，即使充分的辨别，已知的问题仍然存在，而新的系统出现时又带来了新的问题。这段时期存在的状况，可以再次引用奥勒尔的话：“有一些复杂的情况阻碍了改进，虽然命令已清楚地要求在采购和使用设备中考虑电磁学问题，但在实际生活中已归于失败。采购和计划管理者的注意力集中在其他重要问题上，而电磁干扰抑制措施完全被忽视了。改进也因不适当的要求而遇到了困难。由于资金不足，抑制和排除电磁干扰问题也受到限制。最后一点，由于提供的资料不足解决现有系统或采购中提出的问题深受影响。

与战术电磁系统研究每个阶段的报告同时，1973年4月海军也雄心勃勃地提出了它的舰船电磁兼容性改进计划(SEMCIP)。设立SEMCIP，研究对抑制电磁干扰有补偿作用的标准。用该标准能有效测量、控制、文件化并发布给舰队。另外，舰船电磁兼容性改进计划广泛应用于为减少电磁干扰的防护措施上，主要通过下列三方面来实现。

- a 设计和采购美国海军船舶电子系统应符合电磁兼容性。
- b 在现役舰队中判别和减少电磁干扰。
- c 对所有海军有关舰船及其电子系统设计、采购、安装、维修和使用的人员提供培训，保证每个人知道具体要求和办法，以期实现和维持舰船在整个寿命期内的电磁兼容性。

第一个例子是高度组织的快速响应管理，专门用于解决舰队反映的电磁干扰问题。

七十年代初期，还不断报导在新船中采用减少电磁干扰的结构工艺。强调采用改革出现的焊接和连接工艺以代替超过标准规定的螺接和铆接。由于有了新的焊接剂、填料和搭接方法，而所有这些都增加防锈能力从而减少了由“锈蚀螺栓”效应产生的互调产物的可能性。采用这些工艺的同时，要求舰船上层建筑大的金属构件用非金属玻璃增强塑料代替，例如储存箱、旗杆、支柱和梯子等。为减少电磁干扰的拾取和辐射，对电缆也进行适当的隔离、敷设和屏蔽。

同样，为减少由电磁干扰引起的设备性能降低采用了很特殊的电子电路，例如，1976年舰船对空警戒雷达上就出现了下列改进：

- a 防止接收机饱和
- b 减少虚警率
- c 增加信号与干扰比
- d 定向干扰的辨别，即旁瓣抑制
- e 固定（低速）杂波的抑制

表1-1列出了为达到上述改善所采用的抑制方法。

1-4.2 建立特别战术电磁系统执行委员会 (TESSAC)

为检查TESS报告和确定很多尚未解决问题的原因，于1975年8月成立了特别战术电磁系统执行委员会，即TESSAC。最后，提供了一份解决现有问题和预防将来出现问题的实施计划。通过询问海军计划、实验人员、系统工程管理人员查明战术电磁系统研究

报告的问题是否仍然存在以及采取了什么补偿措施等，战术电磁系统执行委员会发现：

表 1-1 舰船对空警戒雷达干扰抑制技术 (1976)⁽³⁰⁾

干扰抑制技术	性能改善				
	防止接收机饱和	减少虚警率	提高信号与干扰比	定向干扰辨别	固定杂波抑制
自动增益控制 (AGC)	1	2			
自动噪声电平 (ANL)	1	2			
波束与波束相关 (BBC)		1	2		
烧毁击穿 (BT)			1		
Dicke-Fix (DF)	1	1			
快速时间常数 (FTC)	1	1			
频率捷变 FA)			1		
手动增益控制 (MGC)	1				
动目标显示 (MTI)					1
窄带限制 (NBL)	1				
脉冲压缩 (PC)			1		1
脉冲与脉冲相关 (PPC)		1	2		
灵敏度时间控制 (STC)	1	2			1
旁瓣消隐 (SLB)				1	
旁瓣对消 (SLC)			1	1	
变重复频率 (VPRF)		2	1		
视频积累 (VI)		2	1		
宽带限制 (WBL)	1	2			
宽脉冲消隐 (WPB)		1			1

注：数字 1 代表该技术的主要用途，数字 2 代表次要用途。

- a 由战术电磁系统研究报告提出的很多舰队战术电磁问题仍然存在。
- b 新系统和设备研制及采购时，强调战术电磁问题不够。
- c 在系统和设备中，已知的电磁缺陷在运行中没有积极排除。
- d 阻碍有关指示计划的实施。
- e 存在忽视或应付对战术电磁项目的现象，以致使整体效果很小。

1976 年 3 月，战术电磁系统执行委员会出版了它的建议书，特别强调战术电磁项目管理，强制执行现有的政策并保证现有指示的实现。在认识到连续性工作的必要性以后，邀请战术电磁系统执行委员会继续它的工作，指导研究当时的电磁效应，确定海军试验和工程指挥人员排除电磁缺陷的能力，确定有关电磁效应方面足够的标准和规范，研制详细

的计划以确保在整个采购过程中考虑电磁干扰的有害影响以及开发电磁工艺，研究和设计计划。

这项研究结果可以概括在 1977 年 9 月战术电磁系统执行委员会的报告中，该报告记载：

- (1) 从完全防止和减少海军大部分电磁问题出发，检查一般技术状态。
- (2) 根据人力缺乏程度在分析、试验、预测和使用仪器之中修改变化的能力。
- (3) 根据在采购中提到的不满足电磁控制要求的最薄弱环节，从叠加、对立、非正常技术状态和不现实性出发评价标准和规范。

如前所述，战术电磁系统执行委员会阐明它的观点、政策和执行指示，提出全面的电磁问题的考虑。委员会的主要建议使海军的保证政策和指示与提供的资金相一致。在此基础上，建立指令和支持计划以充分有效地控制电磁问题。

1-4.3 电磁兼容性管理的实施

电磁问题引起海军作战政策指导部长的关注，希望出版一份战术电磁系统执行委员会的建议书，以便在舰船系统指挥一级实施电磁兼容性管理。1977 年 1 月 13 日，出版了一份细则，指出在开始进行所有涉及电磁辐射问题的电子设备和系统设计时，应准备好电磁兼容性计划大纲。因此为对电磁兼容性要求、分析、测量、试验和评估，必须提供计划、程序和合同文件以及所有必须引用的适用的标准和规范。对所有舰船和主要系统项目，在设计、采购和建造方面，为了检查、建议和对所有电磁方面进行技术鉴定，必须建立电磁兼容咨询委员会，以辨别和解决潜在的电磁问题。所有舰船代用设备方面的变化、工程变化的建议和对自动弃权的申请都必须包括涉及电磁兼容方面的论述。在开始设计之前，所有新的电子设备和系统必须经受全面的电磁兼容性分析，以保证同使用环境兼容。此外，必须对海军和合同人员、项目管理人员提供电磁兼容培训和教育，保证申请足够的经费去完成电磁兼容性分析和测量，符合细则的要求和措施，并解决舰队现存的和预期产生的电磁兼容性问题。

这个细则使今后的电磁兼容性没有不确定的项目，在海军舰船设计和设备研制中，不致出现遗憾。从此，确定了现代海军的电磁原则。

在 1978 年，作为舰船电磁兼容性改进计划的辅助，一个新的实施计划在船厂范围推广，叫做海岸修正行动大纲，即 WCAP。在船厂全面学习舰船电磁兼容性改进计划已制度化。成功地采用解决电磁干扰的方法，以保证水面舰船的修理、大修和保养方面在一定程度上加强电磁兼容性。

应该研究培训和技术资料、标准化方法、已知问题的数据资料和规范的改善，以实现和扩展舰船电磁干扰的控制寿命周期。提供典型的海岸修正行动大纲技术辅助包括：

- a 选择搭接和接地——诸如斜梯、安全栏杆、救生索、支柱、金属旗杆、变速箱传动轴、膨胀接头、俯仰天线安装和安全网等构件。
- b 屏蔽——例如，正对雷达主波束辐射的桅杆电缆的安装。
- c 匿隐——例如，对雷达发射机和电子战接收机，使用正确脉冲触发匿隐器。
- d 采用玻璃增强塑料或其他非金属材料代替救生索、梯子、救生艇缆索、防护器材固定件、救生艇制动器和旗杆等。
- e 选用非金属材料代替上层建筑和天线附近的铁磁性金属构件。

f 绝缘——为避免金属与金属接触，移动构件，诸如排气管、吊艇柱、救生索、起重臂、人员担架等与船体绝缘。

1-4.4 增加对电磁脉冲 (EMP) 的关注

大约在 70 年代后期，海军舰船系统另外一个电磁干扰分支逐渐引起关注，这就是电磁脉冲 (EMP)。由核弹头高空爆炸产生非常高强度的电磁脉冲场强，对在舰船设备中普遍采用的非常灵敏的微型固态电路元器件可能有灾难性的损坏。因此，研究出新的屏蔽技术和浪涌保护装置并用来加固舰船系统以预防电磁脉冲的潜在危害。

1-4.5 现代的情况

截止 80 年代，海军业已很好地熟悉了舰船电磁干扰现象。对待常见的和预期的电磁问题的挑战已有 80 多年的经验，现在对测量和解决电磁干扰问题的方法运用自如，对怎样同电磁干扰斗争的管理方法，在海军各部门已作为强制性政策明确规定，而最主要的是电磁干扰控制技术同电子设计工程师结合已开始成为常规。每个元、器件、组件或电路或设备或整个电子系统工程必须熟悉、采用所有控制电磁干扰的通用方法。当设计完工后，设备必需经受全面的试验以提供电磁干扰发射和敏感度证明。最后，系统总体工程师必须考虑设备操作的电磁环境，安装工程师必须采用现有的方法以减少电磁干扰。这个过程，至少对设备和系统在完成预期功能时提供有效使用的机会。同时这样做也省时省钱。待完工后出现电磁干扰问题再进行解决，那将是很费钱的。

现在特别强调文件要求，对任何系统的使用要求 (OR) 都要明确友方或敌方的电磁环境。另外，执行计划应给出系统对电磁干扰的易损性和减少风险的方法。提出的改进应阐明为达到规定的电磁干扰控制电平所采用的方法。最后应说明可接受的由电磁干扰引起的性能降低的量的要求。试验评估大纲 (TEMP) 应规定适当的试验以保证满足功能特性。同样，申请建议也必须包括预期电磁环境和在该电磁环境下的功能要求、电磁试验、评估、分析、模拟和控制电磁干扰的资料。

最后，对设计和采购的电磁兼容最高级管理文件是电磁兼容性计划大纲，这个大纲主要用于设计和采购领域以保证所有与电磁兼容有关的考虑，包括从开始到最后生产及扩展到设备使用寿命，通过全面采购计划实现。

在实用方面，80 年代已出现一些新改进。首先，对某些具体问题成功地提供了硬件解决办法。研制出系列标准化装置并用于解决通常遇到的故障上。采用这些附加的抑制干扰装置补偿了舰船电磁干扰方面的欠缺。它们包括时间和频率匿隐器、陷波器、信号处理器、宽带干扰消除器、自干扰消除器和用于中和非线性锈蚀连接从而减少互调产物的化学搭接剂。

另外一项重要的新技术是重新使用雷达吸收材料 (RAM) 以减少电磁干扰的影响。雷达吸收材料吸收射频能量的独特能力使它特别适用于对邻近的电磁系统的去耦和减少从舰船结构反射的电磁能量。由于这些有价值的特性，雷达吸收材料成为控制舰船电磁性能降低的有价值的工程方法。

80 年代，引人注目地涌现了以计算机模拟技术为辅助，提高舰船电磁兼容能力的浪潮。很快出现了彩色图表技术以显示与系统整体有关的预期性能和性能降低。设计者可根据显示图表对电子系统的不同布置立即判别其优点和缺点，然后提出直观的合理的推荐方案。

海军对舰船电磁干扰的产生、效应和解决方法有多年经验，已经积累了大量的数据、资料。为便于有效地应用这些资料，海军对电磁兼容性设计和分析已执行一个计算机化数据管理大纲。

这些自动化的数据提供采集、加固、报告和分析电磁干扰问题的统一格式。贮存这些数据资料反馈给舰船系统设计和采购过程。因此，系统地学习这些经验教训对预防电磁干扰问题的重演是有帮助的。

1-5 结论

大约 100 年前，美国海军就渴望成为辐射电磁能的第一个使用者。这是一个英明的决策，表现了对新事物惊人的敏锐。自从早期的无线电报（话）通讯被证明是绝对必需的以后，到了二十世纪，舰船通讯已被接受作为海军舰船设计和使用的不可分割的一部分。而且似乎哪里有海军哪里肯定也会有它。

然而，当接收无线电报（话）的同时，不知不觉也接收了不希望电磁干扰。一方面把电磁能作为资源，另一方面把电磁能作为干扰。从最初无线电报（话）出现的那天起到目前海军已拥有复杂的电子装备，这两个对立特性一直同时发生、演变。

在如此漫长而复杂的电磁学发展中，每一阶段都要克服潜在的干扰模式，今天我们正面临着什么样的情况呢？

现在，海军舰船离开电子学就不可能完成预期功能。电子学提供了通讯、指挥和控制、导航、雷达预警和跟踪、武器系统控制和数据处理等。这么多系统争夺有限的频谱资源和狭窄的舰船空间，这就使各系统同时正常工作出现一系列难以解决的问题。但是，各系统同时工作又是必需的！正如我们在历史评论中看到的，海军不得不制定一些权威性政策以保证舰船电磁系统确实有效地同时工作。这是一个长期、艰苦的挑战，但形势对我们有利。

水面舰船有它自己的电磁学同舰船作用的界限。首先将下列必需的项目提到适当的位置：

- 组织
- 经费
- 管理机构——在所有级别机构里把切实可行的政策放到适当位置。
- CNO 支持——海军作战部长（CNO）亲自批准电磁大纲进度。
- 舰队认可和支持——舰队承担培训和自助责任，积极执行电磁控制。

但是，这些项目即使过去有阻力没有完全贯彻，今后为继续积极防护也要求采用这些办法。

充分利用其电磁系统并具有最大战斗力的舰船的生产潜力是很明显的。

为保证安装在海军平台上所有敏感的电子设备的电磁兼容性，整个造船界、设计师、使用者应仔细注意潜在的电磁干扰问题。

确定可行的兼容性的能力已被提到适当高度并成为日常实践。

参考文献（略）

翻译 曲长云
校对 周开基
审定 成更海