



高空电磁脉冲 技术基础

毛从光 程引会 谢彦召 编著



科学出版社

高空电磁脉冲技术基础

毛从光 程引会 谢彦召 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

高空核爆炸产生的电磁脉冲即高空电磁脉冲,具有场强高、频谱宽、覆盖范围广的特点,能够威胁电力电子系统的安全。本书介绍高空电磁脉冲技术基础,主要内容包括 HEMP 技术的发展历程;HEMP 原始环境产生机理和辐射环境波形参数;HEMP 对电力电子系统造成的干扰和损伤效应;HEMP 缆线结构耦合机理和传导环境波形参数;设备、系统和广域系统的 HEMP 防护原则与策略;设备级和系统级 HEMP 模拟试验技术。本书以介绍电磁脉冲领域基本概念和技术方法为主,较全面地对 HEMP 技术体系进行介绍。

本书可供从事 HEMP 相关武器设计、试验和使用的技术人员以及对 HEMP 技术感兴趣的读者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高空电磁脉冲技术基础 / 毛从光, 程引会, 谢彦召编著. —北京: 科学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-03-058977-4

I. ①高… II. ①毛… ②程… ③谢… III. ①电磁脉冲-基本知识 IV. ①TL91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 225807 号

责任编辑: 宋无汗 杨 丹 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000

2019 年 1 月第一次印刷 印张: 16 3/4

字数: 338 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

高空电磁脉冲（HEMP）由高空核爆炸产生，其特点是场强高、频谱宽、影响范围大，能够对武器电子系统和国家电网通信等关键基础设施造成威胁。美国、苏联等自 20 世纪 50 年代开始关注该问题，近十多年来不断更新和制定系列军用和民用标准。我国在该领域的研究也已经进行了几十年，积累了一定的经验和研究成果，但与国际相比，仍有一定差距。HEMP 技术包含的内容丰富，相关文献资料繁杂。目前，国内已经出版的几本关于 HEMP 技术的专著，侧重于环境计算、系统防护等某一方面的技术。为此，本书着重介绍 HEMP 技术体系的全貌，并不突出某项技术。编写力求提纲挈领、简明扼要。书末列出了详细参考文献，可供读者进一步查阅。

全书分为 7 章，第 1 章介绍 HEMP 技术发展历程、环境、试验及防护等基本概念；第 2 章介绍 HEMP 环境产生的物理机理以及辐射模拟环境；第 3 章介绍 HEMP 对电子系统的干扰损伤效应；第 4 章介绍缆线结构的 HEMP 耦合机理和传导模拟环境；第 5 章介绍系统 HEMP 防护设计技术；第 6 章介绍辐射和传导防护组件的 HEMP 模拟试验技术以及电磁脉冲测量技术；第 7 章介绍系统 HEMP 抗扰度试验和系统敏感性评估试验技术。

本书由西北核技术研究所毛从光博士编写初稿并统稿，程引会博士增补修改了第 2 章，并给出了第 3、4、6 章的修改意见，西安交通大学谢彦召教授编写了第 6.3 节“脉冲电磁场测量与标定”。孙蓓云、孙东阳、崔志同、陈鹏、杜传报和秦锋等参与了第 3、5、6、7 章的编写。

本书的出版得到了邱爱慈院士指导的中国工程院重大咨询项目等的支持，书稿编写得到乔登江院士的建议。西北核技术研究所陈伟研究员、王建国研究员、周辉研究员，训练科和编辑部相关同志以及原总装备部教材办李国华老师，为本书的出版提供了帮助。吕敏院士、刘尚合院士和邱志明院士为本书的出版写了推荐信。在此一并表示诚挚的感谢。

本书对于从事 HEMP 相关系统设计、试验和使用维护的技术人员和初学者具有参考价值。书中以国外民用系统为对象，借鉴公开技术标准、报告、论文来阐述问题，一些数据不一定适用于国内条件，使用时需注意甄别。此外，HEMP 各项技术仍不断发展，读者可跟踪国内外科技文献，了解最新进展。

参与本书编写的多是工作在科研一线的同 志，由于经验和理解有限，难免存在疏漏和不妥之处，恳请专家学者批评指正。

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 HEMP 技术发展	1
1.2 系统 HEMP 效应试验	15
1.3 系统 HEMP 防护	21
第 2 章 HEMP 产生机理与辐射环境	27
2.1 HEMP 产生机理	27
2.1.1 辐射源	27
2.1.2 电流源	30
2.1.3 空气电导率	32
2.1.4 球对称情形	34
2.1.5 HEMP 的产生	35
2.1.6 理论与试验数据的比较	39
2.2 HEMP 辐射环境	39
2.2.1 HEMP 在地球表面的分布	40
2.2.2 HEMP 时域波形	41
2.2.3 早、中、晚期波形比较	47
2.2.4 地面附近反射和透射	48
第 3 章 系统 HEMP 效应	51
3.1 高空核试验与模拟试验中的 HEMP 效应现象	51
3.1.1 高空核试验中的效应现象	51
3.1.2 模拟试验中的效应现象	59
3.2 国家基础设施的 HEMP 效应	73
3.2.1 基础设施特征及 HEMP 威胁分析	73
3.2.2 电力设施	84
3.2.3 通信设施	92

第 4 章 场线耦合与 HEMP 传导环境	100
4.1 缆线结构 HEMP 响应	100
4.1.1 架空线 HEMP 响应计算模型	100
4.1.2 早期 HEMP 缆线耦合	103
4.1.3 早期 HEMP 室内线缆响应	112
4.1.4 中期长线耦合	113
4.2 HEMP 传导环境	114
第 5 章 系统 HEMP 防护	123
5.1 系统 HEMP 环境保护等级	123
5.2 系统防护原则	128
5.2.1 基本原则	128
5.2.2 元器件选择原则	132
5.2.3 HEMP 和 LEMP 联合防护原则	138
5.3 辐射防护措施	142
5.3.1 电磁屏蔽	142
5.3.2 辐射防护组件	148
5.4 传导防护器件	155
5.5 基础设施 HEMP 防护	162
第 6 章 防护组件 HEMP 模拟试验	167
6.1 辐射防护组件试验	167
6.1.1 辐射模拟试验方法	167
6.1.2 辐射模拟试验程序	182
6.2 传导防护组件试验	203
6.3 脉冲电磁场测量与标定	207
第 7 章 系统 HEMP 模拟试验	220
7.1 辐射抗扰度试验	220
7.1.1 辐射抗扰度试验等级	220
7.1.2 辐射抗扰度试验设备	223
7.1.3 辐射抗扰度试验程序与实施	228
7.2 传导抗扰度试验	230
7.2.1 传导抗扰度试验等级	230

7.2.2	天线端口传导抗扰度试验	237
7.2.3	衰减振荡波试验其他标准	238
7.2.4	传导抗扰度试验设备配置	239
7.2.5	传导抗扰度试验程序	244
7.3	系统敏感性评估试验	245
7.3.1	系统敏感性评估试验流程	245
7.3.2	微控制器 HEMP 敏感性评估试验举例	250
	参考文献	259

第 1 章 绪 论

1.1 HEMP 技术发展

1. 核爆炸电磁脉冲的发现

据报道, 大气层核试验初期, 就有试验人员注意到异常电效应的存在。特别是 Fermi 曾经指出, 在爆炸和冲击波直接效应作用不到的地方, 存在电磁效应, 因此他被认为是第一个注意到该问题的人。虽然 Fermi 最早认识到核爆炸会产生电磁场, 但是对于确切的机理并没有留下记录。1945 年, 美国 TRINITY 核试验中, 对所有的仪器设备都进行了电磁屏蔽。瞬态电磁波被称为电磁脉冲 (electromagnetic pulse, EMP)。最早核爆炸产生的 EMP 的精确测量是在 1951~1952 年进行的, 目的是诊断武器的输出参数。早期美国核试验的记录反映, 试验中经常采用 EMP 信号触发示波器和其他记录设备^[1]。

美国早期核试验中所采用的电磁屏蔽措施有效防护了 EMP 对测量设备的干扰。而英国却没有那么幸运, 在 1952~1953 年的第一次核试验中, 由于没有电磁屏蔽措施, EMP 干扰使大量的仪器设备失效。因此, 英国早期提出了“Radioflash”的概念 (即英国早期对 EMP 的称呼)。

20 世纪 50 年代中期, 为证实核爆炸产生电磁信号, 人们开始对核试验中的效应进行理论研究。1954 年, 洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 的 Garwin 提出, 由瞬时 γ 辐射产生的康普顿 (Compton) 电流是麦克斯韦 (Maxwell) 方程组中主要的激励源项。1958 年, 苏联的 Kompaneets 发表了第一篇关于 EMP 的公开文章。1959 年, 英国的 Pomham 和 Taylor 发表了一篇题为“Radioflash 理论”的文章。

早期理论往往不完整, 有时甚至不正确, 关注的重点为地面爆炸或者低空爆炸。大部分关注点为近区诊断测量 (在爆炸源区之外) 或者远距离探测以及观察国外核试验。因为在试验中 EMP 高频成分较少, 所以更多关注甚低频和低频效应。

1957 年, Haas 在 Plumbbob 核试验中进行了一系列磁场测量, 此后人们开始重视 EMP 效应在战略战术方面的重要影响。这些测量的目的之一是观察 EMP 能否引爆附近的磁性水雷。1958 年, 英美之间就军事系统 EMP 易损性和加固问题进行了激烈的讨论 (这场讨论或许是由英国核试验中测试仪器出现问题引起的)。1959 年, 人们开始担心 EMP 信号耦合到导弹发射井中和民兵导弹系统的埋地线缆。

20 世纪 50 年代末, 洛斯阿拉莫斯国家实验室在 EMP 试验和理论两方面的工作均取得了进展, 尤其是 Partridge、Suydam 和 Malik 等人。人们对高空 EMP 的研究始于 1957 年, 当时 Bethe 采用电偶极子模型对高空 EMP 信号进行了一些估计。但是, 这个模型对于早期脉冲的峰值估计不准确, 导致 1962 年进行的系列高空核试验中, 多项测量超出量程。

高空电磁脉冲 (high-altitude electromagnetic pulse, HEMP) 是由距离地面一定高度的大气层中核武器爆炸产生的瞬态电磁波。1956~1962 年, 美国和苏联共进行了 20 多次高空核试验^[2]。这些高空核试验中出现的效应现象造成的影响, 尤其是 1962 年美苏的核试验中一千公里外的电力、通信等系统都发生故障, 超出人们预料, 也引起人们对 HEMP 的极大关注。1962 年, 内华达进行的“SMALL BOY”地面核试验进行了许多 EMP 测量, 目的是获得接近爆心的 EMP 环境数据。不幸的是, 由于测量设备及其他问题, 许多测量失败。

20 世纪 60 年代早期, 大气层核试验被禁止, 高空核试验令人惊讶的一系列结果引起人们对 EMP 的极大兴趣。1962 年, Karzas 和 Latter 公开发表了两篇关于 EMP 理论的文章, 他们研究的部分原因是希望探测到违反禁核试条约的秘密核试验。1963~1964 年, Longmire 在空军武器实验室 (Air Force Weapon Laboratory, AFWL) 做了一系列关于 EMP 的报告, 给出了详尽的地表核爆 EMP 产生机理, 指出由地磁场引起的电子回旋效应, 产生了 1962 年核试验中高空 EMP 中较强的早期信号。这种“高频近似”理论后来由 Karzas 和 Latter 在 1965 年发表于公开刊物上。这一时期, AFWL 和英国也开展了重要理论研究和计算机程序开发方面的工作。并且 1963~1964 年也是军事系统 EMP 效应试验开始的时间, 当时 AFWL 的 Henderson、Graham 和 Cikotas 率先采用环天线、快开关和大容量电容器开展了 EMP 效应试验。

20 世纪 60 年代中期以后, 人们对 EMP 现象的兴趣和理解大大加深, 研究了大量简单的解析模型和非常复杂的计算机程序, 用于计算 EMP 环境。许多 EMP 模拟器已经建成并开展了模拟试验。人们开始关注系统易损性问题, 其中包括导弹、飞机、卫星和通信系统。这一时期的研究成果, 集中体现在 1978 年出版的关于核电磁脉冲 (nuclear electromagnetic pulse, NEMP) 的专辑——《IEEE 天线与传播学报》(AP-26) 和《IEEE 电磁兼容学报》(EMC-20)。

要清楚梳理 EMP 发展历史并不是一件容易的事, 原因包括以下几点。

- (1) 早期工作没有记录, 无文档资料。
- (2) EMP 的研究是不同的人和组织在不同的地点和国家独立进行的。
- (3) 这些工作大多是保密的, 公开文献记录不完整, 有时甚至会引起误导。
- (4) 科学家和工程师忙于解决技术问题, 很少记录历史细节。

2. 传感器与模拟器的发展

1962年“SMALL BOY”地面核试验之后,人们发现测量EMP物理参数的仪器设备不能满足实际要求,特别是核爆源区内的测量。传统的传感器将电场、磁场、电流密度等参数都转化成数据线缆和电路的模拟电信号,这其中存在基本的物理问题,即这些传感器在EMP源区的响应是未知的,因此无法控制测量精度。天线设计者并不熟悉和康普顿(源)电流有关的问题,非线性和时变的空气/土壤电导率以及其他的核辐射效应。要想取得实验上的进展,必须解决这些EMP源的问题和EMP与源区内目标的相互作用问题。

传感器作为核试验项目的一项研究内容,AFWL在源区传感器研发方面做出了很大的努力。设计思想基于EMP源区的物理过程(Baum早期在*Sensor and Simulation Notes*中给出的描述),传感器样机由EG&G公司制造,其中电场传感器由SRI公司制造。这些传感器应用于1967年的地下核试验AJAX和接下来的几次EMP试验中。在这一时期的地下核试验中,Baran、Baum和Ekman采用X波段双干涉技术对矩形波导中的受辐射空气进行了一些空气电导率的测量。

随着EMP试验测量发展和与之伴随的EMP模拟器的设计建造,高精度宽频带的传感器需求迫切,一方面可以用于模拟器性能的测量,另一方面也可以用于受试系统的各种响应参数的测量。最终人们设计出多种这样的传感器,在美国和欧洲广泛应用。在1978年的核电磁脉冲专辑中,这一技术的主要贡献者对源区和源区以外的传感器都做了系统的评述。

从EMP相互作用的角度来看,如导弹、飞机、通信中心的系统是极其复杂的,电子组件的易损性由诸多因素决定,20世纪60~70年代,EMP相互作用的分析结果可信度很低,因此需要较强的试验能力。为了深入开展这样的试验,必须有专门的试验设备产生类似于EMP的环境,这便是EMP模拟器。

判断一个设备是否为严格意义上的EMP模拟器,有两个方面的标准:一个是在没有试验对象的情况下,场的形式的精确性(空间域、时间域、频率成分等);另一个是模拟器本身和受试对象之间的相互作用尽可能小(该作用会影响受试对象响应特性的测量结果)。EMP的模拟设计主要围绕以上两点展开。

军事设备的初步试验开始于1963年,先是一些计算机设备,后来是导弹。第一台严格意义上的EMP模拟器是ALECS。它由Partridge提出,是三平行板传输线形式,用于对EMP测量仪器的标定。这个设备后来改造成了双平行板结构,用于对导弹的试验。后者完成于1967年,采用了Baum的计算结果,目的是模拟飞行系统的威胁级平面波EMP环境(远离地球表面但是低于高空核爆炸导致的大气源区)。ALECS的两板间距为12.75 m,如果模拟器和受试对象之间的相互作用不是很严重,则对于“飞行状态”的受试对象是严格意义上的EMP模拟器。另一个

早期 EMP 模拟方面的重要进展是近地爆炸源区 EMP 模拟。

到目前为止,国际上 EMP 模拟器设计技术已经比较成熟,已建成导波型、混合型和偶极子型等各种类型的模拟器,用于各种 EMP 环境的模拟。美国建造模拟器的部门有国防部核子局(Defense Nuclear Agency, DNA)、海军水面武器中心(Naval Surface Weapons Center)和哈瑞戴蒙德实验室(Harry Diamond Laboratory, HDL);欧洲多个国家也建造了各自的模拟器,这些模拟器的概况见表 1-1~表 1-4^[3]。

3. 计算技术

深入理解核爆炸 EMP 的产生、传播、与系统相互作用、模拟器的优化设计以及系统防护设计等问题,通常要借助于计算技术。EMP 领域采用的计算方法可分为解析法和数值法两大类^[1]。

1) 解析法

从麦克斯韦方程组出发,寻求问题的精确解或近似解,称为解析法。解析法通常效率较高,但是解决的问题不能太复杂。在一些情形中,解析法甚至可以给出特定问题的完全解。解析法可以帮助人们获得对现象的普遍理解,确定什么参数是最重要的。允许人们将电磁问题作为多变量函数问题考虑,这些变量包括各种物理尺寸、波传播方向及时域/频域变量。同时,也允许人们观察系统的电磁特性随变量而变动的物理过程。EMP 的基本物理过程采用近似解析法,描述康普顿源电流的微分方程、空气化学和结果电磁场的自洽方程。一些重要的解析法如下所示。

(1) 傅里叶/拉普拉斯变换关联时域和频域:解决线性时不变系统的电磁问题。

(2) 分离变量法用于特定坐标系。

(3) 复频率域解析方法:①低频方法包括 S 域展开、准静态项展开、多极子展开;②奇点展开法包括 S 平面极子项展开(必要时增加其他奇点),基于问题的不同参数,将自然频率、自然模式和耦合系数赋予各极子具体因数、时域衰减正弦;③高频方法包括物理光学、绕射方法(GTD、UTD 等)、积分渐进估计。

(4) 二维复杂坐标的共形变换:各种形状的电容电感、近似结构中的横电磁波(TEM)模式、结合锥结构的立体变换。

(5) 传输线理论:TEM 结构、集总参数传输线、近似用于线天线和散射体、多导体传输线(包括非均匀的)。

(6) 积分方程:频域方法,如 Wiener-Hopf、近似求解(有多种方法)、运算对角化(本征值和本征模)。

(7) 电磁拓扑(EMT):将电磁系统划分成较小的部分,先求解较小的部分,再结合起来,实现整系统的解决,其中采用屏蔽较好的假设,即设各层屏蔽体均

表 1-1 导波 EMP 模拟器 (末端连接集总负载)

模拟器	ALECS	ARES	Trestle	DREMPS	EMIS-III-TL	DM-1200	GINT-12-30	GINT-1.6-5	IEIMP-10	IEIMP-M5M	SEMP-6M-2M	SEMP-1.5	SEMP-12-3	Pulse-M	TRDI
国家	美国	美国	美国	加拿大	荷兰	中国	乌克兰	乌克兰	乌克兰	乌克兰	俄罗斯	俄罗斯	俄罗斯	俄罗斯	日本
峰值输出电压/MV	1	4	6~8	0.6	0.5	1.2	4.5	1.6	2.5	0.7	6	1.5	2.4	0.6	0.3
上升时间/ns	10	<10	约 20	5	10	10	5~10	5~10	20~40	5~10	9	5~12	空地>15 地>20	5	6
持续时间/ns	250	250	500	400	—	200	200~280	200~2500	350~400	200~250	580	35~850	空地<400 地<100	150	126
峰值电场/(kV/m)	100	>100	50	55	约 50	120	120	150	140	330	100	20~100	空地<200 地<30	100	50
长度/m	100	189	约 400	100	50	54	254	48	110	23	80	100	170	15	3.6
极板间距/m	13	40	105	10	约 10	8.4	30	5	12	3	15	约 15	10	3~6	3.6
特性阻抗/ Ω	100	125	300	110	100	180	100	100	100	100	120	100	110	150	100
启用时间	1960s	1970	1980s	1990s	1992	1985	1992	1976	1970	1992	1982	1998	1992	1990s	1999

表 1-2 导波 EMP 模拟器 (末端连接分布式负载)

模拟器	SSR	SIEM-2	France Telecom	DIESES	SAPIENS2	INSIEME	Rafael	MDES-60	NEMP	ERU-2M	VEPES	VERIFY	SEMI-RAMIS	VPBW	NOTES
国家	法国	法国	法国	德国	瑞典	意大利	以色列	中国	捷克	俄罗斯	瑞士	瑞士	瑞士	美国	美国
峰值输出电压/MV	2	2.8	0.8	1	1	1	2	0.06	0.45	1	0.8	0.6	0.1	—	0.01~1
上升时间/ns	1~5	10	2.5	1~7	5	4	<5	3	2.5~5	2.5~25	8	1	<10	1~2	3~5
持续时间/ns	25~200	250	23~200	80~1000	150	—	—	25~490	25~250	25~750	约 300	24~36	200	>30	600
峰值电场/(kV/m)	>100	>100	75	>100	>50	>100	>200	15~60	40~50	100	>100	100	62	50	2~100
长度/m	106	180	50	120	90	120	130	15	30	30	55	20	10	161	85
板间距/m	15	33	6	22	18	22	20	3	6	约 8	约 10	约 4	约 1.5	42	15
特性阻抗/ Ω	90	90	140	90	100	100	90	100	60	120	90	100	100	—	100
启用时间	1986	1979	1996	1981	1990	1990s	1989	2005	2004	1982	1989	1999	1991	约 2005	约 2005

表 1-3 垂直偶极 EMP 模拟器

模拟器	VPD-I	VPD-II	NAWCAD VPD	EMIS-III-VPD	EMPRESS I	EMPRESS II
国家	美国	美国	美国	荷兰	美国	美国
峰值输出电压/MV	1.6	4	—	0.5	1.5	7
上升时间/ns	<5	10	<5	<5	8~15	<10
标称位置处的峰值电场/(kV/m)@标称位置	10@100	36@100	—	2@100	3@375	25@200
高度/m	30	40	25	—	—	40
双锥阻抗/ Ω	75	60	75	75	75	70
启用时间	1970s	1970s	1980s	1980s	1970s	1980s

表 1-4 混合型 EMP 模拟器

模拟器	TEMPS&AESOP	USAF HPD	NAWCAD HPD	EMIS- II -HPD	WIS HPD	DPH	MEMPS	Rafael	FEMP 2000	SPERANS
国家	美国	美国	美国	荷兰	德国	法国	瑞士	以色列	法国	瑞典
峰值输出电压/MV	7	4	4	0.5	0.36	4	4	0.6	2.6	0.2
上升时间/ns	4~12	8~12	8~12	<5	1.2	1~5	10	<5	<1	2.5
标称位置处的峰值电场 (kV/m)@标称位置	52@50	33@30	33@30	2@100	10@8	50@30	60@20	—	—	2@100m
高度/m	20	30	30	20	8	30	20	10	30	20
长度/m	300	150	150	100	30	150	60	30	150	100
双锥阻抗/ Ω	120	150	150	150	150	150	150	150	150	150
启用时间	1970s	1970s	1970s	1980s	1990	1980	1985	1991	1999	1980s

较好，上一层电磁信号传递到下一层，但下一层不传递给上一层。

对于大部分的现实物理问题，纯粹的解析方法在处理复杂问题时是有限的，要想获得解析解往往不现实。在 HEMP 效应研究中，常用的解析方法是传输线方程方法，即求解 HEMP 环境与架空线、铺地线和埋地线的耦合问题，经典的三个架空线耦合模型为 Taylor 模型、Agrawal 模型和 Richidi 模型以及求解传输线网络的 Baum-Liu-Tesche (BLT) 方程。

2) 数值法

计算机技术的发展为复杂电磁仿真问题提供了强有力的工具，数值法基于大型高速计算机可以计算更接近实际的模型的响应。计算机计算可以看成“数值实验”。数值计算的缺点在于产生大量的数据，检查和理解这些结果非常困难并且费时。目前市场上有多种较成熟的商用电磁场数值计算软件可供使用，如 ANSOFT、CST 及 FEKO 等。

EMP 数值模拟工作和详细的解析研究差不多同时开始。早期的数值模拟工作几乎都是基于差分方法。因此，典型的 EMP 程序在空间网格按一定的时间步长逐步演进，即现在常用的时域有限差分 (FDTD) 方法。FDTD 方法能够记住作为空间和时间函数的源电流密度和电导率，对于求解核爆炸源区的电磁脉冲非常有意义。FDTD 方法不仅可用于研究 EMP 物理机理，也是进行 EMP 效应研究最常用的工具。

EMP 计算机程序与解析法中各种近似结果相互比对，可验证计算结果的准确性。例如，CHAP 程序在麦克斯韦方程组中包含了内行波，用于考查解析法中的高频近似。计算机结果显示高频近似结果通常是有效的。数值模拟程序中也包括详细的 X 射线、 γ 射线和自洽电流源的计算。EMP 数值计算结果的细节有所不同，但基本上证明了近似解析法的总体精度和可靠性。

电磁数值法是对解析法的有力补充和扩展，对于特定问题的数值求解可以加深基本电磁过程的认识，特别是那些不能得到完全解的问题。对于超出解析法的能力，但是在数值法能力范围内的一些问题，数值法可以作为一种数值实验手段，模拟实验物理过程。

大型复杂系统的数值分析与计算仍然是一个挑战性任务。例如，现代飞机、通信中心等系统中的线缆数量多且布局复杂，详细描述很困难，更别说电磁响应的计算（特别是在高频）。这些问题十分复杂，无法进行精确计算。即使能够针对某一种情形精确计算，但因为实际系统复杂多变，其结果也往往不准。线缆不在假设的地方，加入其他线缆，密封造成老化等，都会造成计算结果不可靠。对于复杂系统，电磁拓扑可以在计算中起到重要的作用。美国编写了电磁

拓扑的计算机程序 CRIPTE, 该程序已经成功计算了一些大型系统的响应。目前, 对大规模、超大规模数值计算的硬件、软件和算法的研究仍然处于迅速发展中。

4. 相关学术期刊和标准规范

1964年, 洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Partridge 对 EMP 技术的发展做出了重要推动, 这就是《传感器和模拟笔记》(*Sensor and Simulation Notes*) 的创刊, 它使人们思考 EMP 传感器和模拟设计问题。1966年刊物主编换成了 AFWL 的 Baum, AFWL 中许多人的努力使得刊物内容大大扩展, 包括了 EMP 技术的各个方面。

20世纪80年代初, 刊物将 EMP 及其相关课题内容分成了三类: EMP、脉冲电源 (pulsed electrical power, PEP) 和分析与计算技术 (analytical and computational technique, ACT), 涵盖了一千多篇文章, 这些文章集中代表了 EMP 的相关技术。文献出版工作主要由 AFWL 支持, 也有政府部门的参与。另外, 从 1970 年开始的 10 年里, AFWL 还编纂了大约 30 卷的 EMP 技术资料。1978年, 《IEEE 天线与传播学报》和《IEEE 电磁兼容学报》联合出版了关于 NEMP 的专辑, 较为系统地总结了 30 多年来核电磁脉冲技术研究进展, NEMP 专辑所采用的资料在《传感器和模拟笔记》中都能找到。

1962年, 美国和苏联进行了一系列的高空核试验, 其 EMP 效应引起广泛的关注。从 20 世纪 70 年代中期开始, EMP 技术扩展并催生了其他相关领域。EMP 相互作用和加固的概念直接应用到高功率微波和雷电环境中, 瞬态 (宽带) 电磁传感器和测量技术应用于脉冲电场、磁场、电流和电压等物理量测量。EMP 模拟器产生的快前沿强电磁脉冲辐射技术和瞬态雷达所需要的技术 (天线、开关和脉冲功率) 是类似的。EMP 源区的物理过程 (特别是大气化学) 和雷电放电以及电弧是类似的。在 90 年代初, 这些通用技术被命名为高功率电磁学 (high power electromagnetics, HPEM)。进行 HEMP 和 HPEM 相关技术研究的国际组织有国际电工委员会 (IEC)、国际无线电科学联盟 (URSI) 和电气与电子工程师协会 (IEEE)。美国从事 HEMP 研究的单位有洛斯阿拉莫斯国家实验室、劳伦斯利弗莫尔国家实验室、圣地亚国家实验室、哈瑞戴蒙德实验室以及 AFWL 等。

目前关于 EMP 及其相关课题的文献资料非常多。经常报道 EMP 研究的国际期刊有《IEEE 电磁兼容学报》《IEEE 天线与传播学报》《IEEE 等离子体科学学报》以及《IEEE 核科学学报》等, 美国的《传感器和模拟笔记》与《相互作用笔记》

是两个集中报道 EMP 研究进展的杂志。国内学术期刊包括《微波学报》《电波科学学报》《强激光与粒子束》《核电子学与探测》以及一些高校学报。国际学术会议有 IEEE 电磁兼容会议、欧洲电磁兼容会议等。国内学术会议包括全国核电子学与探测会议、全国抗辐射加固与电磁脉冲学术交流会等。

除学术期刊和学术机构外，标准规范对于电磁脉冲系统的防护、试验、采购等工作有较强的约束力。常见的国际标准包括美国军用标准和国际电工委员会制定的标准。

美国较早制定了国家军用标准，协调企业、科研院所、军方和政府部门的工作（表 1-5）。美军标 MIL-STD-188-125（1 卷和 2 卷）和 MIL-STD-461F 被多国参照。美军标的特点是全面且通用性强，针对一类系统，采用某个通用标准，如 MIL-STD-188-125 主要针对 C4I 系统，而 MIL-STD-461F 主要针对子系统和设备，将传导和辐射标准放在一起，不同单位依照各自需求选择标准中的相关部分执行。例如，RS105、CS115 和 CS116 部分对设备的各种抗 HEMP 能力做出了规定。MIL-STD-464 为系统电磁环境效应（E3）标准，将 HEMP 包含在内，全面介绍了各种自然和人为产生的强电磁环境，如静电（ESD）、雷电（LEMP）及强射频（IRF）等。需要说明的是，美军标中有关于 HEMP 环境的标准 DOD-STD-2169 和针对 MIL-STD-188-125 的系统防护标准 MIL-HDBK-423，但这两个标准都保密。

国际电工委员会下属的技术委员会 TC 77 负责电磁兼容（EMC）标准的制定。1989 年成立 SC-77C 小组，最初负责 HEMP 相关标准的制定工作。经过十年，77C 分会的工作范围扩展为所有高功率电磁威胁，包括恶意电磁干扰（IEMI）。到目前为止，该分会共发布了 14 个关于 HEMP 的标准和 3 个关于 HPEM 的标准（表 1-6）^[4]，即 IEC 61000 系列标准。其中 61000-1 系列和 61000-6 系列是关于效应和防护的一般标准；61000-2 系列是关于环境的标准；61000-4 系列是试验方法标准；61000-5 系列是防护标准。需要说明的是，IEC 标准主要侧重于民用设施和基础技术，目前该标准正逐步被美国、欧盟和俄罗斯的军用标准借鉴。例如，MIL-STD-461F 中关于 HEMP 早期波形参数与 IEC 61000-2-9 中的规定相同。IEC 标准的特点是分门别类、全面且体系性强。

国内主要针对特定的武器装备制定测量、试验、防护等不同方面的标准，与国外的标准相比，体系性、通用性较差，没有环境方面的专门标准。

国内外标准规范的制定均不断发展，已有的标准隔一段时间会被修订，新的标准也会根据实际需求制定和发布。