

重大基础设施非核强电磁脉冲威胁与防护策略研究

吴琦¹, 刘元安², 闻映红³, 赵明敏⁴, 王卫民², 张金宝³, 苏东林^{1*}

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191; 2. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; 3. 北京交通大学詹天佑学院, 北京 100044; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 国家现代化建设和运行高度依赖重大基础设施, 相应安全问题成为国家安全的核心要素之一; 非核强电磁脉冲源生成技术逐步成熟并朝着普及化、隐蔽化方向发展, 已成为重大基础设施的现实威胁类别。重大基础设施的电磁安全保障研究成为我国面临的紧迫性、战略性任务。本文以重大基础设施的非核强电磁脉冲威胁为研究对象, 明确了概念内涵并凝练了重大需求, 梳理了先发国家在本领域所发布的国家政策、产业标准、基础研究、应急管理举措; 阐述了防护关键技术体系, 包括正向设计、等效试验评估、威胁监测与预警等方面。在剖析我国重大基础设施的非核强电磁脉冲防护现状及存在问题的基础上, 提出了强化政府领导、组织科研攻关、制定标准规范、激发企业活力、分类分阶段实施防护加固、促进人才培养、加强公众培训等方面的基本策略。相关研究可为我国非核强电磁脉冲防护领域建设与发展、提升国家应对新型安全威胁能力提供基础参考。

关键词: 重大基础设施; 强电磁脉冲; 分级防护; 应急响应; 电磁防护

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A

Non-nuclear Electromagnetic Pulse Threat of Critical Infrastructures and Protection Strategies

Wu Qi¹, Liu Yuanan², Wen Yinghong³, Zhao Mingmin⁴, Wang Weimin²,
Zhang Jinbao³, Su Donglin^{1*}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 3. Jeme Tienyow Honors College, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Major infrastructures are vital for the modernization and operation of a country and the safety of major infrastructures is crucial for national security. In recent years, the generation technology of non-nuclear electromagnetic pulse (EMP) sources has gradually matured and develops to be universal and concealed. Therefore, the non-nuclear EMP has become a realistic threat for major infrastructures. Ensuring the electromagnetic safety of major infrastructures is an urgent strategic task for China. This study takes the non-nuclear EMP threat of major infrastructures as the research object, clarifies the basic concepts of and major demands for EMP protection for major infrastructures, and analyzes the measures taken by developed countries in this field from the aspects of national policies, industrial standards, fundamental research, and emergency management. In addition, the key technologies for efficient non-nuclear EMP protection are discussed, focusing on forward design, equivalent test and evaluation, and threat monitoring and

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-07-05

通讯作者: *苏东林, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为电磁兼容及电磁安全研究;

E-mail: sdl@buaa.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“电磁安全”(2021-XZ-40)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

prediction. Moreover, this study analyzes the current status and existing problems regarding non-nuclear EMP protection of major infrastructures in China and proposes several fundamental strategies including strengthening government leadership, promoting scientific research, formulating standards and guidance, stimulating the vitality of enterprises, conducting classified and staged implementation, boosting talent cultivation, and promoting public training. This study can provide a basic reference for the non-nuclear EMP protection of major infrastructures and further support China to handle new threats.

Keywords: critical infrastructure; electromagnetic pulse; graded protection; emergency response; electromagnetic protection

一、前言

重大基础设施与国家现代化建设和运行密切相关，若遭到破坏将对社会安全、经济安全、国防安全产生重大影响，因而基础设施安全问题成为国家安全的核心要素之一 [1~4]。当前，重大基础设施的信息化、网络化水平不断提升，总体架构变化明显；传感、通信、控制、数据存储等低压/弱电分系统在重大基础设施的运营及管理中的作用越发明显，一旦受到干扰和破坏，直接危及基础设施安全甚至社会安全与稳定。国家重大基础设施面临强电磁脉冲的潜在威胁，已逐渐成为各方共识。强电磁脉冲主要分为核电磁脉冲、非核电磁脉冲，都对电力、高速铁路、通信等重大基础设施构成威胁。近年来，非核电磁脉冲生成技术发展迅速并接近实用化，成为重大基础设施安全方面的潜在威胁。

重大基础设施具备多层次的连接关系，具有复杂网络的基本特征，早期研究主要关注设施的网络结构及特征。我国 110 kV 及以上高压电网具有较大的聚集系数、较小的路径长度，属于小世界网络 [5]；我国高速铁路网络拥有一些关键集散节点，对网络运营安全起着关键作用，具有无标度网络特征 [6,7]。因此，重大基础设施网络通常体现为小世界、无标度网络特征，对随机故障、非关键节点破坏具有较好的抵抗力，但面临较大范围的有意破坏或关键节点故障时容易产生级联失效，从而引发大规模故障 [8~10]。我国学者在重大基础设施网络结构方面开展了系统研究，就弹性电力系统发展规划提出了具体建议 [4,11]。在重大基础设施的强电磁脉冲作用数值仿真、局部节点防护加固、局部节点强电磁脉冲辐照试验等方面具有一定基础 [12~16]，为实施重大基础设施的强电磁脉冲防护工程提供了必要的基础条件。

本文以我国重大基础设施的非核强电磁脉冲威胁为研究切入点，总结发达国家重大基础设施的强电磁脉冲防护经验与教训，剖析我国在本领域的短

板与瓶颈，以利于运用后发优势，科学高效地解决我国在此领域的重大安全隐患及风险；力求从系统工程的视角论述实施强电磁脉冲防护的需求意义、发展现状、面临的问题、关键技术，进而提出实施重大基础设施的强电磁脉冲防护基本策略。

二、重大基础设施非核强电磁脉冲防护的概念内涵与重大需求

(一) 重大基础设施非核强电磁脉冲的防护概念

重大基础设施指关乎国计民生、社会运行、国家安全的大型设施网络，主要涉及电力、交通、通信、金融等核心领域。各类重大基础设施相互支撑，形成紧密交织的复杂网络。部分设施节点的失效容易产生连锁反应，难以快速恢复功能。世界强国重视重大基础设施安全问题，甚至成立了专门机构进行管理。

强电磁脉冲指瞬态、高能量密度的电磁场与电磁波，具有瞬时功率大（峰值功率达吉瓦级）、峰值场强高（数万伏/米）、组合波形多变（如窄带、宽带、超宽带、有载波、无载波等）、频谱范围宽（数兆赫兹至数十千兆赫兹，见图 1）等特征。高功率微波发生器、电磁脉冲发生器等技术装置发展迅速，投放形式拓展至机载、弹载、车载、便携式；

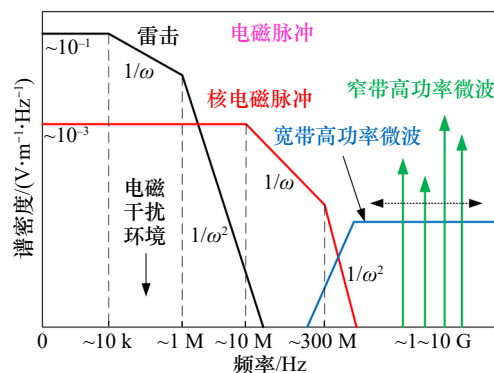


图1 强电磁脉冲的典型频谱特征
注： ω 表示电磁脉冲的频率。

甚至一些简易装置都能产生较强的电磁脉冲，对重大基础设施构成现实威胁。

以高速铁路列车为例，阐述重大基础设施可能面临的强电磁脉冲威胁（见图2）。高速铁路列车控制系统主要由车载设备、地面设备组成，通过铁路专用移动通信系统（GSM-R）实现车地双向数据通信；为了向列车提供控制信号传输通道，高速铁路通信信号系统需在设备之间提供开放的无线或电气接口 [17,18]。这些接口是强电磁脉冲进入高速铁路通信信号系统的重要耦合通道，在强电磁脉冲作用下列车控制系统可能出现损坏而引发故障并影响系统正常运行。《交通强国建设纲要》（2019年）提出，我国将统筹开发时速600千米级的高速磁悬浮系统、时速400千米级的高速铁路。在列车运行速度进一步提升后，对列车控制系统的抗干扰能力尤其是抗强电磁脉冲威胁能力将提出新的更高要求。

（二）重大基础设施非核强电磁脉冲的防护需求

1. 保障国家电磁域安全

国家日益重视电磁域安全，将之列为国家安全的核心要素之一并在《中华人民共和国国防法》中予以体现。重大基础设施保护工作逐步规范，《关键信息基础设施安全保护条例》将信息基础设施纳入重点保护范围。《“十四五”国家应急体系规划》提出了应急通信、应急管理信息化建设的重点工程，以全面提升我国应急通信资源调度与综合应用能力。

当前，我国针对重大基础设施安全采取的防护措施集中在硬件实体安全、信息网络安全方面，而

电磁域安全尚未明确规划。重大基础设施的电磁域威胁“看不见、摸不着”，概念相对抽象、易被各方忽视，存在被他方恶意利用的风险。恶意的强电磁脉冲攻击没有明显征兆，已经布局的电磁频谱监测站点缺乏有效的电磁脉冲监测手段，可能无法对各类强电磁脉冲事件进行有效取证。各类重大基础设施因缺乏有效的非核强电磁脉冲防护设计和验证而具有脆弱性，在特殊情况下可能使我国陷入“吃哑巴亏”的不利境地。因此，需要系统谋划并积极实施重大基础设施的强电磁脉冲防护措施，有助于扭转不利局面并保障重大基础设施运行安全。

2. 应对趋于严峻的非核强电磁脉冲威胁态势

高空核电磁脉冲（HEMP）对重大基础设施的威胁为专业人士所熟知。20世纪60年代外国开展的一系列高空核武器试验，产生的强电磁脉冲影响了数千千米范围内的电力传输线，造成通信、广播、交通等系统的大面积受损。《不扩散核武器条约》生效后，世界强国的关注点逐渐转向非核强电磁脉冲。

利用微波技术，可在重大基础设施局部产生强电磁脉冲，在一定距离内干扰各类低压/弱电设备，甚至在物理上烧毁重要的电子信息设备；高功率微波技术及其武器化方面发展迅猛，生成方式、作用机制等已有重大革新 [19~22]。大功率微波源不断发展，最高载频达数十吉赫兹，形成了常规真空器件、相对论器件、固态电子器件等大类（见图3）。其中，相对论器件峰值输出功率很高（可达数十吉瓦量级）；常规真空器件带宽和功率选择灵活，多

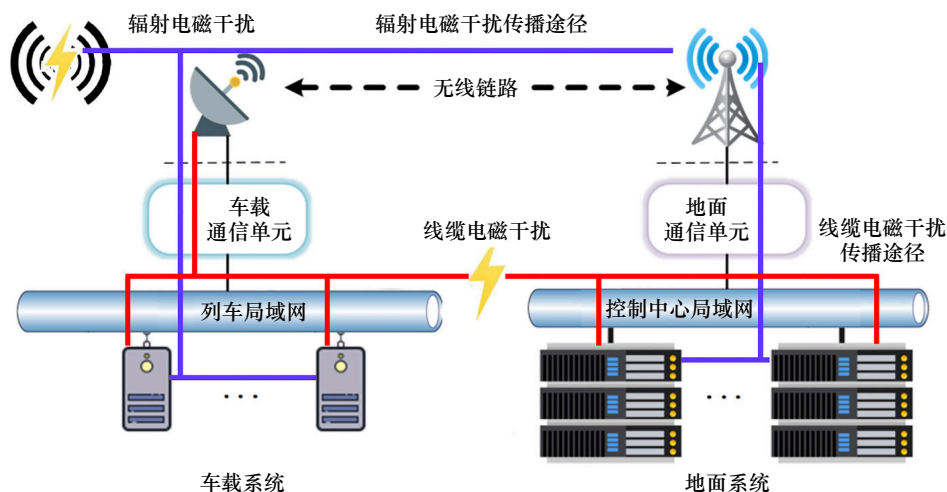


图2 高速铁路列车控制系统电磁干扰路径示意图

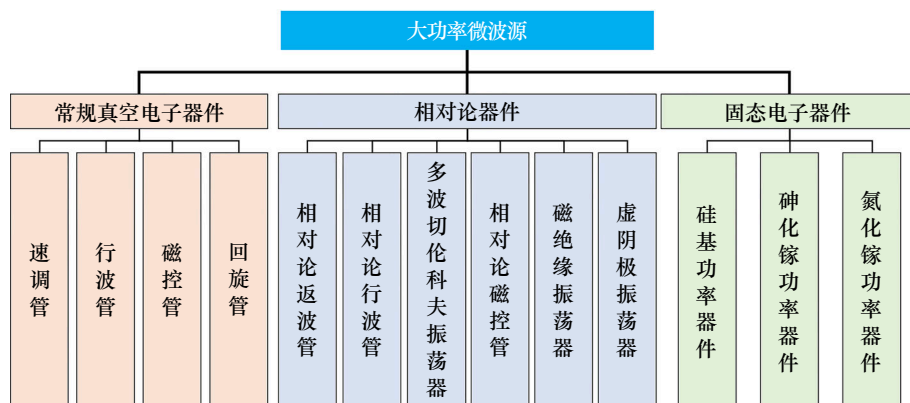


图3 大功率微波源的分类

个器件还可以进行空间功率合成，峰值功率可到百兆瓦量级或更高；已经涌现出了一些构造简单、成本低廉的非核强电磁脉冲发生装置，潜在应用更为灵活。非核强电磁脉冲攻击事先难以预防管控，损失难以快速恢复，已成为重大基础设施面临的现实威胁。

3. 合理提升公众对电磁安全的认知水平与危机意识

地震、火灾等灾害防范的成功经验表明，相关自救知识的宣传与演习，可以有效防止因公众慌乱情绪而致的次生伤害及损失。为此，北京航空航天大学电子信息工程学院就重大基础设施电磁安全课题开展了社会问卷调查（2021年），用于调研社会公众对相关领域的了解情况，促进电磁安全相关知识的社会普及。问卷调查共获取有效样本1060份，涵盖高校、企业、科研院所等，整体上被调查者的学历层次较高。然而，仅约1/3的被调查者了解“7·23甬温线事故”源自雷击效应，不到1/5的被调查者了解美加大停电（2003年）源自地磁扰动（GMD）引发的变电器故障。可以看出，社会公众对重大基础设施面临的强电磁脉冲威胁问题的认识水平整体偏低。

值得指出的是，问卷调查发现被调查者对电磁引发的重大基础设施故障容忍度很低：约5.5%的被调查者能够接受3 h以上的高速铁路延误；约8.5%的被调查者能接受3 h以上的停电；约5.1%的被调查者能接受3 h以上的通信中断，而69.2%的被调查者不能接受任何时长的通信中断。相关结果表明，社会公众对电磁域威胁了解甚少，对可能引发的重大基础设施故障难以接受；在普遍缺乏心理

准备的情况下，一旦发生相关故障，极有可能引发舆论和社会风险。

三、国外在重大基础设施强电磁脉冲防护方面的战略布局

（一）发布国家政策

美国在世界上率先启动重大基础设施强电磁脉冲防护工作。美国国会电磁脉冲委员会2001年正式成立，推动了覆盖广泛的理论分析和试验研究；2008年发布了10类重大基础设施面临的强电磁脉冲威胁与防护建议。2017年，美国国会完成电磁脉冲委员会重组，以全面推动强电磁脉冲对政治、经济、军事等领域的影响研究；完成了体系性的研究工作，对后续科学研究深化、国家战略制定极具参考价值。

在电磁脉冲委员会的倡议下，美国国会通过了《关键基础设施保护法》（2015年）。2019年，有关重大基础设施电磁安全的总统政策指令要求，加强并维护重大基础设施安全、运行、弹性恢复等能力；美国据此进入了强电磁脉冲防护的战略实施阶段。美国能源部发布的《电磁脉冲弹性行动计划》（2017年）提出，提高对强电磁脉冲威胁、效应、影响的认识水平，定位重点关键设施，开展电磁防护技术测试。美国国土安全部发布的《防范电磁脉冲和地磁扰动威胁的应对战略》（2020年）指出，需要提升电磁相关事件的快速响应与有效恢复能力；将16类基础设施纳入保护范围并指定各类基础设施的风险管理机构，从而更好落实重大基础设施相关的安全工作。

（二）制定产业标准

目前，对于重大基础设施的强电磁脉冲防护，美国工业界仍处于分析和观望阶段。其中，电力行业相对领先，针对GMD威胁制定了两套行业标准。北美电力可靠性公司的TPL-007-1标准要求，负责输电的电力公司以百年一遇级GMD事件为基准，评估输电系统的薄弱环节并制定相应的生产计划。EOP-101-1行业标准要求，电力部门优化作业计划、生产流程、办事程序，确保降低GMD事件的影响。美国电力公司之间依据协定，可以共享变压器和其他关键设备以提高电力系统的恢复能力。电力部门协调委员会联合其他关键基础设施管理部门，共同制定了《变压器应急运输指导法案》，在紧急情况下可通过铁路、公路、水路等方式，快速开展大型闲置变压器设备的调配与部署。截至目前，重大基础设施的非核强电磁脉冲防护要求还没有纳入相关行业标准。

鉴于重大基础设施的普及性和特殊性，宜采用分级防护方式实施保护，以获得较佳的效费比。根据重大基础设施允许的失效时长，可将强电磁脉冲防护等级分为[23]：级别一，允许长时间服务中断；级别二，允许服务中断数小时；级别三，允许服务中断数分钟；级别四，允许服务中断数秒钟。①级别一的关键点之一是确保值班人员拥有备用电源、食品、水及其他必要供应，以运行和维护基础设施的关键任务系统。②级别二需要在电源线、数据线、天线端增加电磁脉冲滤波器、电涌放电器等防护器件，无需昂贵的电磁屏蔽室，是成本效益较好的防护方法。③级别三通常需要电磁屏蔽机架、电磁屏蔽室。④级别四适用于直接关乎生命和财产安全的基础设施（如核电站、医疗生命支持系统、空中交通管制系统、高速铁路控制系统等），建议高频电磁脉冲的屏蔽效果应达到在10 GHz范围内提供80 dB的保护[23]。

（三）注重基础研究

美国高度重视HEMP、GMD对重大基础设施的灾难性破坏作用。美国国会电磁脉冲委员会研究了强电磁脉冲干扰对10类基础设施造成的风险，认为能源和通信基础设施的风险等级最高[1]。为此，美国能源部启动了“电网强电磁脉冲作用与防护研究项目”（2016年），从威胁特征分析、电磁易损性、

试验模拟、防护加固等方面开展研究；基础设施的电磁防护具有高度复杂性和多学科交叉融合特点，相关研究主要依托橡树岭、洛斯·阿拉莫斯、爱达荷等国家实验室进行[24]。美国桑迪亚国家实验室分析了电网设施在HEMP作用下的损毁效应统计规律[25]；开发了基于氮化镓材料、响应速度为亚纳秒级的瞬态抑制二极管，击穿电压达6 kV[26]。这些结果表明，美国在电网强电磁脉冲作用及防护方面走在世界前列。

欧盟通过第七框架计划资助了重大基础设施强电磁脉冲防护方面的研究，如高功率微波威胁防护、重大设施电磁攻击防护策略、铁路应对电磁攻击安全防护，重点关注高功率微波武器产生的强电磁脉冲威胁[27,28]。

（四）加强应急管理培训

为了提升社会公众对重大基础设施可能面临安全威胁的认知，美国政府开展了大量的应急响应工作。GridEx演习每两年举行一次，以强化行业对重大基础设施故障的处置能力为目标，确保事故发生时能够有序应对；不仅能够提高电力公司、管理部门的联合应对能力，也有利于缓解社会公众在重大事故发生时的慌乱情绪。例如，2021年11月举办的GridEx VI演习，设定了“在面对来自敌对国家支持的协调攻击时，发挥北美电力系统的弹性”目标，超过450个组织，来自电力行业、管理部门、专门机构的6500余人参加了演习。这表明，美国已经将组织的恶意攻击纳入重大基础设施的管理范围。

四、重大基础设施非核强电磁脉冲防护关键技术分析

电磁防护指消除强电磁辐射对信息化系统干扰或损伤的技术手段，构成保障重大基础设施系统效能及生命力的理论基础。基础设施的强电磁脉冲防护需要解决政策、管理、技术、经济、效益等诸多问题。我国在此领域的技术研究方面起步明显偏晚、认识普遍不深，更是需要组织力量、集中资源，扎实开展关键技术攻关并尽快取得突破。

（一）强电磁脉冲防护正向设计技术

重大基础设施普遍涉及芯片、电路、模块等基础器件/设备，在强电磁脉冲环境下呈现电磁易损特点，出现的错误和损毁效应还可能在设施网络中进行传播，开展防护工作难度极大。从各类装备的系统级电磁兼容及防护研制经验看，实现重大基础设施强电磁脉冲防护能力依赖正向设计技术，主要内容包括：① 电磁防护指标体系，即电磁防护论证、设计与试验指标体系；② 电磁防护仿真模型，形成高保真度的系统模型和电磁效应动态仿真技术；③ 电磁防护设计方法，解决电磁顶层指标分配问题，实现复杂系统的智能化设计；④ 电磁防护正向设计软件，围绕重大基础设施电磁防护需求，自主开发正向设计工具，形成设计方案并开展模型验证。

（二）设施级强电磁脉冲等效试验评估技术

重大基础设施结构具有超广域分布特性，强电磁脉冲与其作用的机理及规律尚未完全摸清，破坏性试验难以在真实的基础设施网络上开展。等效试验评估技术用于解决上述难题，主要内容包括：① 电磁脉冲端口耦合特性，形成大型系统电磁易损性效应模型、效果评估模型建模技术；② 电磁脉冲在设施网络中的传播动力学，辨识电磁脉冲在电磁拓扑内的能量耦合规律，突破基于传播动力学的建模技术；③ 电磁脉冲的高效生成与注入，发展在时间/空间/频率/能量等各域的精确缩比模型构建方法，实现电磁脉冲效应的等效验证。

（三）超广域强电磁脉冲威胁监测与预警

重大基础设施遍布全国各地，构成了超广域、多层次的复杂网络；强电磁脉冲作用于基础设施网络时不留痕迹，造成设施故障时不容易厘清源头，难以形成有效的故障修复方案。构建高效能、低成本的电磁脉冲威胁监测与预警系统，是解决上述问题的亟需方案，主要内容包括：① 电磁脉冲监测，突破低成本、小型化电磁脉冲拾取天线、采集电路、存储方法；② 电磁脉冲智能识别，辨识典型强电磁脉冲信号特征，形成智能化电磁脉冲识别分析能力；③ 广域电磁数据处理，通过分布式/集中式相结合的广域物联网等方式，形成广域电磁脉冲态势监测能力；④ 电磁脉冲威胁预警，构建基

础设施威胁预警信息传递及共享机制，引入人工智能、大数据预测等技术，提升电磁脉冲威胁预警能力。

五、我国重大基础设施非核强电磁脉冲防护现状及存在的问题

（一）研究力量较为分散

我国在重大基础设施电磁安全领域的科研工作相对分散，缺乏专门从事电磁安全研究的科研机构，尚未建立相关领域人才培养的学科体系，国家层面的重大科技项目布局刚刚起步。正是由于缺少专门从事电磁安全研究的国家级科研机构，导致在重大基础设施强电磁脉冲防护领域的技术实力存在较大不足，设计手段、试验评估、决策辅助等方面的短板尤为明显。重大基础设施电磁安全正向设计软件、电磁安全试验评估理论方法、设施设备电磁安全数据库、关键电路芯片电磁安全模型库等，多为空白或存在严重不足。

目前，我国的行业研究院牵头开展了一些重大基础设施的雷电脉冲防护技术研究，如中国电力科学研究院有限公司、中国信息通信研究院、中国通号研究设计院等为提升电力、通信、高速铁路等领域的雷电防护设计水平做出了积极贡献。然而，行业研究院在电磁安全领域配置人员严重不足，加之相关业务不属于主要工作职责，因而往往无法在本领域的基础性、前瞻性研究中投入足够力量。

已有的国际经验表明，以国家实验室为核心组建“产学研用”一体化研究力量体系，是解决重大基础设施电磁安全科学技术问题的有效途径。相比之下，我国在重大基础设施强电磁脉冲防护方面投入不足，多学科/多领域协同攻关、关键软硬件自主研发、重大工程实施管理等仍有较大提升空间，不足以支撑高度复杂、广域异构的重大基础设施强电磁脉冲防护实际需要。

（二）核心防护器件相较国际一流水平有差距

核心防护器件是支撑重大基础设施强电磁脉冲防护的“基础”，在实施基础设施防护工程实践中的费用占比较高。未来产值规模发展潜力可观且科技含量较高，是国家适宜大力拓展的产业方向。我

国在此方向拥有一定的技术储备，可加强顶层规划和资源整合以取得较快发展。

核心防护器件可分为多个等级（见图4），相应的电磁防护能力应逐级提升，即满足下一层次的电磁防护层级时应自动满足上一层次的电磁防护能力。
 ① 等级一主要面向基础设施的关键部件和设备的存储，防止各类强电磁脉冲影响电磁易损器件安全。
 ② 等级二是提升重大基础设施电磁安全能力的高效类别，包含浪涌防护、滤波防护、不间断电源等，可作为未来我国着重提升的产业内容。
 ③ 等级三主要面向电路、板卡，涉及各类瞬态抑制器件（如气体放电管、金属氧化物压控电阻、瞬态电压抑制二极管等）选择面较宽；若面临纳秒级强电磁脉冲或频率较高的高功率微波脉冲，已有器件能力存在不足，是短期内着重提升的产业方向。

六、我国重大基础设施非核强电磁脉冲防护基本策略

（一）强化政府领导

国家重大基础设施的强电磁脉冲防护，需要建立国家重大基础设施的顶层管理机构，统筹并协调管理部门、企业、科研院所、高校和社会力量。参考相关安全领域的组织架构，论证提出了国家重大基础设施电磁安全体系建议方案（见图5）：在电磁安全领导机构的统一组织下，分设运行监测系统、应急管理协同、协调管理系统、专家委员会等，围绕安全管理体系、安全技术体系、安全运行体系三方面开展工作。

在强化组织及运作的过程中，宜充分汲取发达国家的成功经验，尽快补齐政策、管理、法律、技术等薄弱环节，支持建设覆盖全国的应急预警、应



图4 电磁核心防护器件的分级及相应模组产品情况

注：TVS表示瞬变电压抑制二极管；MOV表示压敏电阻器；国外数据源自Mouser等平台，国内数据源自Mouser、阿里巴巴等平台，数据采集时间为2021年12月。

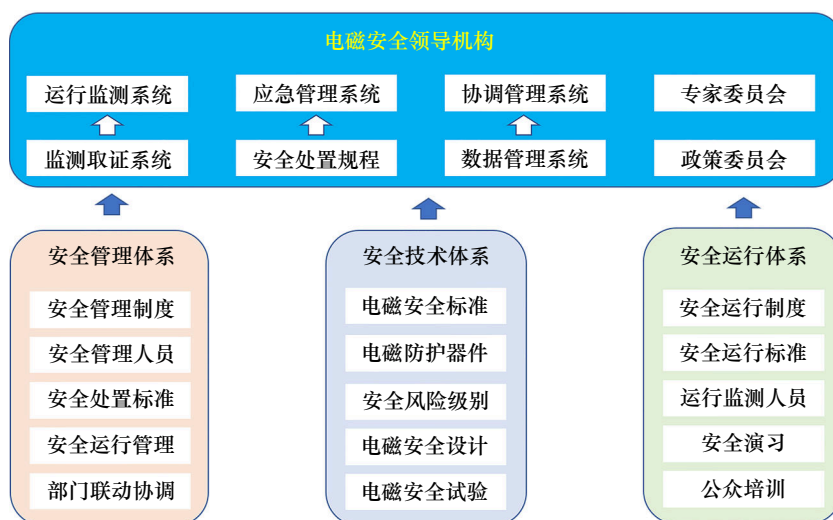


图5 国家重大基础设施电磁安全体系

急通信、应急管理 etc 系统。

（二）组织科研攻关

重大基础设施的强电磁脉冲防护涉及到全社会、众多行业，需要集中优势力量开展科学技术问题研究。建议实施国家科技重大专项，采用“揭榜挂帅”等多种形式来组织科研力量，选取具有代表性和紧迫性的基础设施，开展强电磁脉冲作用机理规律、系统安全架构、关键薄弱区域防护、设施网络级试验评估等核心科学技术攻关研究；探究重大基础设施与生产、商业、金融、经济、居民生活等的关联程度，明晰设施故障对社会稳定的影响模式。

电力网络、高速铁路、移动通信等已经成为国家“名片”，相关产品具有国际市场的比较优势，竞争力强且经济产值占比较高，适合作为优先开展电磁安全科学研究和技术攻关的细分领域。着力提升相关领域的基础设施安全等级，进一步创造我国工业产品的良好国际形象。

（三）制定标准规范

国家重大基础设施的强电磁脉冲防护是具体落实到各行业的工程实践，亟需建立适应国情的防护标准与规范。相关标准、规范的制定，关键在于“知己知彼”：“知己”指掌握重大基础设施电磁安全的基本情况和数据，对薄弱环节、损伤阈值、损伤效应等做到明确辨识；“知彼”即分析当前已有的非核强电磁威胁源特征，预测威胁源的中长期发展趋势，尤其是从威胁源在基础设施上的作用效应着手开展相关参数分析。

相关标准、规范的制定还需“有所侧重”。对于已有基础设施的电磁防护加固，应重点发展具有良好成本效益的防护技术标准、现状检测方法；对于未来新建的重大基础设施，需明确电磁防护标准及技术规范；积极探索强电磁脉冲威胁预警机制及响应策略。

（四）激发企业活力

重大基础设施的强电磁脉冲防护工作是复杂的管理与工程问题，经济成本对工程实践的成功与否起到关键作用。为了支撑重大基础设施强电磁脉冲防护工程的顺利开展，宜充分激发企业活力，合理给予金融、税收等优惠政策；支持电磁防护核心软

件、防护模组、防护器件的自主研发，推动形成新的战略性新兴产业并稳步实现“走出去”。

（五）分类分阶段实施防护加固

依据相关领域的技术体系和标准规范，开展国家重大基础设施的防护评级、关键重大基础设施及其重要任务系统定位；对于高优先级的重大基础设施，优先进行防护加固工作。

按照重大基础设施所处的规划、建设、运行、维护等不同阶段，制定基础设施的防护加固计划。对于新建的基础设施，建议依照相关标准进行设计和验证；对于已有的基础设施，可以与设施维护、大修过程相结合，主要针对重要的任务系统进行加固。

建议统筹分析关键基础设施所需电源系统、通信系统、人员支持系统的特点，规划并建设覆盖全国的专网系统，保持极端条件下重大基础设施的弹性。

（六）促进人才培养

国家重大基础设施的强电磁脉冲防护工作跨越工学、数学、管理学、经济学等学科门类，需要跨学科、综合性人才，而目前我国具备相关知识的人力资源较为缺乏。接受专门培育的电磁安全人才，需要具备深厚的数理基础；系统开设电磁类专业课程，需要良好的教学实验条件、科研实践平台。

从目前掌握的情况看，除少数“双一流”建设高校和建设学科外，众多高校的电磁类专业课程学时数量大幅缩减，“教师难教、学生难学”成为普遍现象，导致人才培养数量和质量不容乐观。因此，亟需在已有的学科体系中积极探索并尽快形成电磁安全专门人才培养体系，适时组建电磁安全学科。

（七）加强公众培训

居民的日常生活依赖于完好的重大基础设施，基础设施的重大故障必然严重影响居民的生活和生产活动。建议充分汲取地震应急避险工作的先进经验，从“事前”“事中”“事后”三个维度加强社会公众的知识培训以合理提升风险意识；如若出现相关极端事件，尽量减少社会公众的恐慌情绪。

可综合采用各种方式来加强公众培训，设立“基础设施安全日”，开展各类紧急情况下的演

习, 稳步提升社会公众的认知、应急、自救能力。

七、结语

本文分析了重大基础设施面临的非核强电磁脉冲威胁, 结合国情提出了针对性的防护策略建议; 研究内容涉及电力、交通、通信等类别的基础设施, 覆盖面较为宽泛, 在未来重大工程实践中应科学实施以促进稳健发展。电力能源供给一直是保障各类重大基础设施安全运行的共性关键环节, 可视为重大基础设施的“基础”; 在能源转型背景下, 电力系统的开放性、复杂性不断提升, 潜在极端事件威胁下的运行风险急剧增大。因此, 可率先开展电力系统的强电磁脉冲防护示范工程, 将有效应对非核强电磁脉冲威胁极端事件作为示范工程建设的核心目标。

在实施过程中, 可依托部分新建基础设施开展试验验证, 同时积极吸纳社会力量和资本参与, 尽快解决其中的科学问题、技术问题、工程问题; 及时总结以形成标准规范, 逐步向已有设施推广应用。在相关基础理论和技术攻关方面, 前瞻性布局非核强电磁脉冲的威胁源特性、传播规律、作用机理研究, 掌握强电磁脉冲作用下的电力系统薄弱环节与敏感设备; 明晰电磁敏感传播路径与影响规律, 预测电力系统可能遇到的强电磁脉冲攻击模式及规模等级; 研制电磁防护元器件、模块和装置, 掌握电力系统中易损器件/板卡/设备的快速恢复技术。

致谢

感谢何华武、刘尚合、陈维江、张平等院士以及刘培国、李东风、王珺珺等专家对本研究的指导与支持。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 13, 2022; **Revised date:** July 5, 2022

Corresponding author: Su Donglin is a professor from the School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, and a member of the Chinese Academy of Engineering. Her major research field is electromagnetic compatibility and electromagnetic security. E-mail: sdl@buaa.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Electromagnetic Security” (2021-XZ-40)

参考文献

- [1] Foster J S, Gjelde E, Graham W R, et al. Report of the commission to assess the threat to the United States from electromagnetic pulse(EMP) attack: Critical national infrastructures [R]. Mclean: Electromagnetic Pulse Commission, 2008.
- [2] Ostrich J, Kumar P. DOE electromagnetic pulse resilience action plan [EB/OL]. (2017-01-06)[2022-06-01]. <https://www.energy.gov/oe/downloads/doe-electromagnetic-pulse-resilience-action-plan>.
- [3] Wang D W, Li Y F, Dehghanian P, et al. Power grid resilience to electromagnetic pulse(EMP) disturbances: A literature review [C]. Wichita: 2019 North American Power Symposium, 2019.
- [4] 邱爱慈, 别朝红, 李更丰, 等. 强电磁脉冲威胁与弹性电力系统发展战略 [J]. 现代应用物理, 2021, 12(3): 1–10.
Qiu A C, Bie C H, Li G F, et al. HEMP threat and development strategy of resilient power system [J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(3): 1–10.
- [5] Sun K. Complex networks theory: A new method of research in power grid [C]. Dalian: 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, 2005.
- [6] Xu W T, Zhou J P, Qiu G. China’s high-speed rail network construction and planning over time: A network analysis [J]. Journal of Transport Geography, 2018, 70: 40–54.
- [7] Wang L, An M, Jia L, et al. Application of complex network principles to key station identification in railway network efficiency analysis [J]. Journal of Advanced Transportation, 2019 (7291): 1–13.
- [8] Li K J, Xie Y Z, Zhang F, et al. Statistical inference of serial communication errors caused by repetitive electromagnetic disturbances [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(4): 1160–1168.
- [9] 王意, 邹艳丽, 黄李, 等. 综合考虑局部和全局特性的电网关键节点识别 [J]. 计算物理, 2018, 35(1): 119–126.
Wang Y, Zou Y L, Huang L, et al. Key nodes identification of power grid considering local and global characteristics [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2018, 35(1): 119–126.
- [10] 叶玉玲, 李文卿, 张俊. 高速铁路网络复杂特性及其传播动力学研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 655–662.
Ye Y L, Li W Q, Zhang J. Complex characteristics and propagation dynamics of high speed railway network [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(5): 655–662.
- [11] Guo Y F, Zhang D R, Li Z C, et al. Overviews on the applications of the Kuramoto model in modern power system analysis [J]. International Journal of Electrical Power & Energy System, 2021, 129: 1–15.
- [12] Liu Q F, Ni C, Zhang H Q, et al. Lumped-network FDTD method for simulating transient responses of RF amplifiers excited by IEMI signals [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 63(5): 1512–1521.
- [13] Lanzrath M, Suhrke M, Hirsch H. HPEM-based risk assessment of substations enabled for the smart grid [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(1): 173–185.
- [14] Zhou L, San Z W, Hua Y J, et al. Investigation on failure mechanisms of GaN HEMT caused by high-power microwave(HPM) pulses [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,

- 2017, 59(3): 902–909.
- [15] Zhang J H, Lin M T, Wu Z F, et al. Energy selective surface with power-dependent transmission coefficient for high-power microwave protection in waveguide [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2494–2502.
- [16] Xiao M, Ma Y W, Liu K, et al. 10 kV, 39 mΩ·cm² multi-channel AlGaIn/GaN schottky barrier diodes [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(6): 808–811.
- [17] Wen Y H, Hou W X. Research on electromagnetic compatibility of Chinese high speed railway system [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2020, 29(1): 16–21.
- [18] Wu Y D, Weng J, Tang Z, et al. Vulnerabilities, attacks, and countermeasures in Balise-based train control systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(4): 814–823.
- [19] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展简述 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(2): 2–12.
Cong P T. Review of Chinese pulsed power science and technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(2): 2–12.
- [20] Zhang J, Zhang D, Fan Y W, et al. Progress in narrowband high-power microwave sources [J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(1): 1–15.
- [21] Drikas Z B, Addissie B D, Mendez V M, et al. A compact, high-gain, high-power, ultrawideband microwave pulse compressor using time-reversal techniques [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(8): 3355–3367.
- [22] Shi L H, Zhang X, Sun Z, et al. An overview of the HEMP research in China [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 422–430.
- [23] Baker G H, Radasky W A, Gilbert J L. Electromagnetic pulse (EMP) protection and resilience guidelines for critical infrastructure and equipment [EB/OL]. (2019-02-05)[2021-12-10]. <https://michaelmabee.info/electromagnetic-pulse-emp-protection-and-resilience-guidelines/>.
- [24] Electric Power Research Institute(EPRI). High-altitude electromagnetic pulse and the bulk power system: Potential impacts and mitigation strategies [R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute(EPRI), 2019.
- [25] Pierre B J, Guttromson R T, Eddy J, et al. A framework to evaluate grid consequences from high altitude EMP events [EB/OL]. (2020-07-16)[2022-06-01]. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1810043>.
- [26] Yates L, Gunning B P, Crawford M H, et al. Demonstration of >6.0 kV breakdown voltage in large area vertical GaN P-N diodes with step-etched junction termination extensions [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(4): 1931–1937.
- [27] Arnesen O-H, Hoard R. Overview of the European project “HIPOW” [J]. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2014, 3(4): 64–67.
- [28] Beck S, Dawson J, Flintoft I, et al. Overview of the European project STRUCTURES [J]. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2014, 3(4): 70–79.