doi: 10.7690/bgzdh.2026.10.001

陆战平台多电系统电磁兼容技术综述

王　彪[1]，李小健[1]，宋培姣[2]，熊　瑛[1]
（1. 中国北方车辆研究所电磁兼容实验室，北京 100071；
2. 陆军步兵学院石家庄校区机械化步兵系，石家庄 050200）

摘要：为加速推进陆战平台多电系统电磁兼容及防护技术的进步，总结陆战平台全电化的基本特征和多电系统的构成，分析陆战平台多电系统中遇到的新型技术问题。结合国内外多电系统技术的发展现状，从电磁兼容评价机制和系统级仿真技术方面介绍多电系统电磁兼容的核心内容和关键技术，分析多电系统电磁兼容的研究现状和未来发展前景。结果表明，该研究为全面推进陆战平台全电化技术的发展提供了技术支撑。

关键词：陆战平台；多电系统；电磁兼容；评价体系
中图分类号：TM91　　**文献标志码：**A

Review of EMC Technology for Multi-electrical Systems on Land Warfare Platforms

Wang Biao[1], Li Xiaojian[1], Song Peijiao[2], Xiong Ying[1]
(1. *EMC Laboratory*, *China North Vehicle Research Institute*, *Beijing* 100071, *China*;
2. *Department of Mechanized Infantry*, *Shijiazhuang Campus*, *Army Infantry Academy*, *Shijiazhuang* 050200, *China*)

Abstract: In order to accelerate the progress of electromagnetic compatibility and protection technology of multi-electric system on land warfare platform, the basic characteristics of all-electric land warfare platform and the composition of multi-electric system are summarized, and the new technical problems encountered in multi-electric system on land warfare platform are analyzed. Combined with the development status of multi-electric system technology at home and abroad, the core contents and key technologies of electromagnetic compatibility in multi-electric system are introduced from the aspects of electromagnetic compatibility evaluation mechanism and system-level simulation technology, and the research status and future development prospects of electromagnetic compatibility in multi-electric system are analyzed. The results show that this study provides technical support for the development of all-electric technology of land warfare platform.

Keywords: land warfare platform; multi-electrical system; EMC; evaluation system

0　引言

随着信息技术不断发展，战争模式发生深刻变化，科索沃战争、阿富汗战争、俄乌战争等表明现代战争已不再是装备性能的单纯比拼，而是作战体系的综合对抗[1-2]。战场上作战方式的变革，推动了武器系统向全电化、信息化、智能化、网络化演进。陆战平台全电化定义为以电能为基础能源，利用电能的传输、变化、控制等手段，转变成陆战平台所需要的能量，作用于地面武器平台的各个系统，达到陆战平台综合性能的整体提高[3-4]。陆战平台全电化将引入各种不同用电需求的电子模块，陆战平台单一电压体制必然造成电流承载量和效能比之间的失衡，而陆战平台全电化可以有效提升电能的利用效率，使得陆战平台各系统之间的运行达到最佳状态，进而实现陆战平台系统总体性能的整体提高[5]。

全电化陆战平台是以混合供电体制为基础，根据不同设备模块的功能特征和用电需求，建立遍布全平台的供配电网络，为各种用电设备提供电能。与传统战斗车辆供电系统相比，全电化陆战平台具有电压等级多、连接关系复杂等特点，导致陆战平台中有更多的电磁干扰源和电磁耦合途径[6]。

全电化陆战平台凭借其超常规作战系统的技术水平和作战效能，已经成为当今世界上军工强国争相研发的重点邻域，并将成为未来陆域作战装备系统的研发重点[7-8]。笔者着重探讨全电化陆战平台多电技术的电磁兼容性和防护机制，以及陆战平台控制系统中系统级电磁仿真技术，对增强全电化陆战系统应对战场上复杂电磁环境的能力具有重要军事价值和应用意义。

收稿日期：2025-02-06；**修回日期：**2025-03-07
第一作者：王　彪(1986—)，男，河北人，博士。

1 陆战平台多电系统概论

1.1 多电系统定义及特点

陆战平台多电系统是为满足陆域装备电驱动、电武器、电防御以及其他不同等级用电设备的需要，依据不同任务要求下的功率特征，考虑不同工况之间的相互作用关系，结合陆战平台空间及设备分布，创建遍布整个陆战平台的供配电网络[9]。陆战平台多电系统中设备配备布置灵活，具有强大的融合性和可集成性，能够突破传统技术限制，建立多级混合供电体制，大幅提高陆战平台的作战效能。此外，多电系统不仅可以实现电驱动、电武器和电防御体系所需电能的统筹管理和实时分配，而且能为多模探测雷达、战斗协同链以及敌对目标侦察和对抗等先进技术的陆战作战平台提供电能保障。

多电系统作为陆战平台的能源中枢，是实现武器装备全电化的核心[10-11]：

1) 系统容量高，电压体制多。传统作战平台电能需求并不高，通常最高为十几千瓦的量级，采用 28 V 电压体制对武器系统进行供配电。由于陆战平台全电化的快速发展，电压等级需求日益提高，能量要求大幅增加。如 20 t 等级的全电化陆战平台的电力需求量约为 300 kW，40 t 等级全电化陆战平台的电力需求量约为 1 000 kW，该平台的电压体制包含 28、270、900 V 等多个级别，平台正常运行电流最高达到了 500 A 以上，为陆战平台的稳定性和安全性提出了全新挑战。

2) 设备种类多，布线方式复杂。为满足陆战平台混合供电体制要求，多电系统由高压动力电池、电源管理装置、高压配电装置、中压配电装置和低压配电装置等设备组成，并根据平台内具体设备的供配电需求、功率特性、不同工况间转换关系以及功率容量进行设备和线缆布置。陆战平台还需建立全平台的供配电网络，为各用电设备提供能源保障，从而导致供电线缆和信号控制线的布置异常复杂。

3) 电磁兼容问题突出。全电化陆战平台初始设计时，考虑到电磁兼容问题，将大功率高压设备和网络通信、平台控制等低压设备分区放置，但由于有限的平台空间和庞杂的全平台供配电网络，加之不规则的系统结构，导致了陆战平台内部电磁干扰源的形成种类繁多，电磁干扰耦合方式十分繁杂，武器设备或武器系统在一定条件下作为受扰设备的同时也可能成为其他武器设备或武器系统的电磁干扰源。这使得陆战平台多电系统的电磁兼容难以分析，电磁干扰难以控制，从而导致全电化陆战平台电磁兼容问题突出。

1.2 多电系统构架

多电系统是实现全电化陆战平台的基础，通过使用电能替代传统陆战平台的机械能、液压能等二次能源，简化了陆战平台能源系统结构，大幅提高了陆战平台的可靠性和维护性，同时优化了陆战平台的能量利用效率、降低了燃油消耗和污染物排放，多电化已成为全面提升陆战平台技术性能和战术性能的重要保障[12]。陆战平台多电系统构成如图 1 所示。

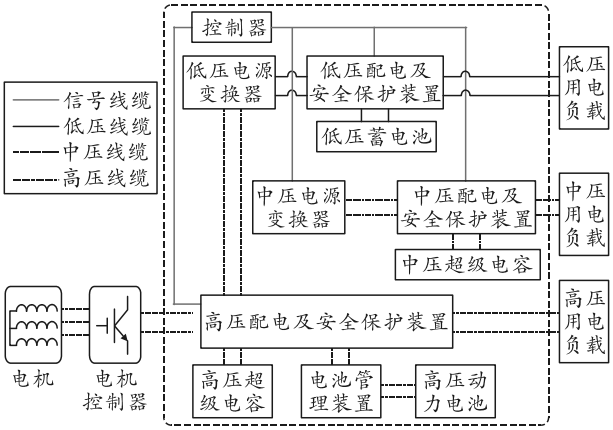

图 1 陆战平台多电系统构成

陆战平台全电化技术的覆盖范围非常广泛，根据设备的用电需求和功率特性，可将陆战平台分为高压供配电系统、中压供配电系统、低压供配电系统以及信号传输控制系统。高压供配电系统主要用于动力推进系统的驱动电机和散热风扇电机等高压用电设备的需求，中压配电系统用于武器系统和主动防护系统等电机类负载的中压用电设备需求，低压配电系统主要用于整车设备控制用电，同时满足整车显控设备、通信设备、照明以及整车其他小功率用电设备的需求。

1.3 影响多电系统安全的主要因素

陆战平台是集多种高功率高电压设备、低压信号管理设备、数据通信设备等电力电子于一体的庞大系统工程。多电系统的多电压等级和线缆复杂连接关系的特点给多电系统引入了更多的干扰源和耦合途径，同时平台内部包含众多低压控制、信号采集等低压电磁敏感器件，在施加高量级电磁干扰时，可能导致该敏感器件性能降级甚至失效[13]。例如，电源变换装置中绝缘栅双极型晶体管（insulate gate bipolar transistor，IGBT）的高频开关动作会产生大量

电磁噪声，导致武器装备内低压控制、信号采集等电磁敏感器件性能下降或失效，从而出现总线错误帧突增、控制失效、传感器信号错误等大量电磁兼容性故障。

在陆战平台多电系统研制过程中已暴露了大量电磁兼容故障，典型故障现象包括总线错误帧突增、控制失效、高压掉电和传感器采集信号错误等。同时也存在传导发射超标、电场辐射超标和瞬态干扰等问题。

2　陆战平台多电系统电磁兼容评价体系

美国国防部制定的 MIL-STD-461G 和 MIL-STD-464D，以及英国国防部制定的 DEF STAN 59-411 等标准[14-17]。电源特性采用的标准主要为美国国防部制定的 MIL-STD-1257E 和 MIL-STD-704F 等[18-19]。与此同时，面向电动汽车的民用标准也逐步形成，相关工作由国际无线电干扰特别委员会、美国汽车工程师协会、国际标准化组织等电磁兼容标准制定小组主导开展。国际无线电干扰特别委员会组织修订 CISPR 12 添加了针对电源变换系统工作的试验评定内容，CISPR 25 增补了与高压部件相关的电磁兼容试验评价内容；美国汽车工程师学会组织修订了 SAE J551-5，增补了电动汽车在车辆制动、爬行、巡航等状态下的电磁兼容试验评估方法；国际标准化组织也研究了针对屏蔽高压电源线的瞬态传导和耦合的标准[20-22]。另外，国外众多学者针对多电系统的电磁兼容评价体系进行了探讨。Elrayyah 等[23]分析了电驱动车辆中 DC/DC 逆变器脉冲宽度调制(pulse width modulation，PWM)信号，评估了逆变器功率开关器件产生的电磁干扰对电驱动车辆的影响。Labrousse 等[24]通过对电驱动车辆的开关器件以及电磁干扰耦合途径的研究，提出了电驱动车辆电磁效应集成化物理模型，并对电驱动车辆的电磁骚扰进行了评价。

国内武器装备采用的电磁兼容及防护标准规范主要包括 GJB 1389A-2005、GJB 151B-2013、GJB 8848-2016 等，电源特性标准主要包括 GJB 298-1987、GJB 4000-2000、GJB 181B-2012 等[25-30]。由于电动汽车产业发展迅速，民用车辆电磁兼容标准相继出台，主要包括 GB/T 14023-2011、GB/T 18387-2017、GB/T 18655-2018 等[31-33]。其中 GB/T 14023-2011 规定了电动汽车电磁骚扰特性在 0.03～1 GHz 频率范围内车辆测试状态和测试要求；GB/T 18387-2017 规定了频率在 0.45～30 MHz 频率范围内电动汽车的车载充电系统传导发射的测量方法和限制，同时也规定了 9 kHz～30 MHz 频率范围内电动汽车的电磁场辐照发射的阈值和测试方式；GB/T 18655-2018 给出了电动车辆和混合动力车辆内屏蔽的高压电源装置测量标准，并对相关高压部件的电磁兼容试验评价的内容进行了规定。与此同时，国内高校、科研院所以及车辆电磁兼容检测中心等在电动汽车多电系统电磁干扰试验研究领域做了大量工作，为构建完备的多电系统电磁兼容评价体系积累了大量经验。Xiong 等[34]开展了电动车辆试验测试技术研究，在测试台架上针对某军用高功率电源变换系统中不同工况下电源线及信号线的传导发射进行了试验方案配置，并进行了相关试验测试。苏丹[35]就电动车辆高功率 DC/DC 变换器系统电磁兼容测试方案进行了研究，提出了通过滤波装置引入高压动力电池包及阻性负载的试验配置方案。武艺[36]以某型陆域突击车辆所装备的电驱动系统为研究对象，针对外部高功率微波干扰，以确保电驱动装备平台的战场生存能力为前提，得到了一种车载电驱动系统在高功率微波辐照下的电磁效应分析手段。刘晴[37]以电动汽车为研究对象，探讨了提高动力系统电磁兼容性能的技术方法，研究了电动汽车动力系统电磁兼容性评估的技术指标，并通过试验 对电动汽车动力系统的电磁兼容特性进行了试验和评估。

3　陆战平台多电系统级仿真进展

系统级仿真是一种系统级联的电磁场与电路协同仿真技术，对系统内的设备以电磁模型或电路模型方式进行描述，并将其进行系统级联转化为系统级仿真计算模型。将电磁兼容的 3 个基本要素(干扰源、耦合路径和敏感设备)以部件模型的方式引入到仿真系统中。在电磁兼容性能仿真试验中，将所有部件级仿真模型按照实际布局、布线进行模型构建，典型干扰源通过信号采集设备进行实时数据采集，以高逼真度地模拟被测设备的电磁环境和工作状态，从而确定被试装备逼真的电磁效应特性和表示其功能性指标变化的具体情况。

熊瑛等[38]针对陆战平台中装甲车辆大功率电驱系统，提出了一种系统级的传导干扰预测模型构建方法，通过对多电系统各电气部件独立建模，再结合多导体传导线方法，构建了完成的分布式系统级传导干扰预测模型，在 10～100 kHz 频段内仿真精度优于 8 dB。翟丽等[39]为提高陆战平台多电系统

模型的精确性，基于测试和数值拟合法对陆战平台的电驱动系统的进行了优化，提出了一种基于端口阻抗测量法准确提取电机驱动系统等效电路模型。Wang 等[40]建立了电动汽车高压电驱动系统级的传导干扰模型，通过分析电驱动系统干扰源的特征和干扰耦合途径，对传导线路的噪声频谱进行分析，从而建立了电动汽车高压电驱动系统级的传导干扰模型。Boglietti 等[41]构建了从蓄电池、DC/DC 变换器到交流电机的所有电气设备的高频物理模型，基于该模型研究了在过电压时逆变器 du/dt 影响。Frei 等[42]建立了电动汽车电源变换系统的传导干扰模型，对电动汽车电源变换系统的低频传导干扰进行了预测研究。Chung 等[43]以混合动力电动汽车电源变换系统 IGBT、电缆和逆变器的等效基础模型，对其电源变换系统的传导干扰实施了相对精准的预测评估。Kim 等[44]通过 IGBT 的数据表和效应试验确定了 IGBT 模型的参数，建立了单相逆变器共模噪声电压高频电路模型，从而实现了 IGBT 传导干扰的预测分析。Maki[45]基于电磁场分析法建立了电机 3 维电磁场高频等效电路模型，通过模型仿真研究了电机内部电磁辐射干扰特性。

高印寒等[46]以车载平台大量导线及线束为研究对象，基于模糊推理理论将等效线束法应用在汽车线束时域辐射敏感度分析中，从而能实现对车载平台线束的电磁辐射干扰预测。吴定超等[47]基于小波包分解和特征能量提取技术对汽车电磁干扰进行了分析，通过传输线理论确定了车载平台线束间的串扰特性，并对车载天线和车载平台线束间的能量耦合进行了分析，从而利用干扰源特征传导信号实现干扰源识别。俞集辉等[48]依据磁直流电动机端口阻抗的幅频特性，提出了电动机传导电磁干扰电路模型，并通过试验验证了该模型的准确性和可靠性。段建东[49]通过干扰源提供干扰通道的对策建立了 PWM 驱动电机等效物理模型，并基于 PWM 驱动电机系统差模干扰和共模干扰的数学模型确定了等效电路的可靠性。陈名等[50]基于阻抗幅频特性，利用最小二乘法原理，建立了三相电机逆变器共模传导电磁干扰高频等效模型。

4 多电系统电磁兼容技术发展趋势及建议

传统装备所采用的电磁兼容分析方法并不能满足陆战平台多电系统的需求。当前，武器装备电磁兼容及防护工作轻前期分析、重后期试验整改。在设计阶段主要依靠经验完成电磁兼容性分析，往往只给出定性的评估结果。后期的试验测试是整个电磁兼容工作的核心，通过试验结果查找电磁兼容缺陷和隐患，再根据具体问题寻找整改方法。这种电磁兼容方式对电气结构相对单一、设备组成相对简单的传统装备而言是可行的。对陆战平台多电化武器装备而言，不仅要面对外部极为复杂的电磁环境，而且要在装备内部有限的空间内集成更多的电磁敏感设备。

将电磁兼容正向分析方法和问题解决方法进行有机整合，是解决陆战平台武器装备电磁兼容问题的发展趋势。基于模型的电磁兼容分析评估和基于试验结果导向的电磁干扰综合抑制是实现这一目标的最佳途径。通过电磁特性建模和电波传播特性建模，描述干扰源和系统响应之间的关系，结合电磁兼容数字仿真技术，实现陆战平台多电系统的电磁兼容性分析评估。

对于陆战平台多电系统存在的电磁发射、瞬态干扰等问题，建立针对性的抑制和控制方案，研制干扰抑制装置。通过电磁兼容正向分析方法提前发现装备的潜在电磁兼容隐患，在设计阶段规避风险，从而减少后期试验整改阶段的压力，为装备研制整体进度和装备电磁兼容性提供保障。

5 结束语

全电化陆战平台是现代陆战平台技术发展的目标和方向。它转变了传统的设计理念，选取电能为陆战平台的动力来源，依靠对电能的传导、输送、转换、控制等技术，转化成其他形式的能量，作用于武器系统的各个设备，提高了陆战平台的地面保障性能和灵活作战能力。陆战平台多电系统的研究、相关标准体系的创建和陆战平台多电系统电磁兼容评价体系等，必将推动我国陆战平台多电技术水平提升，为我国新一代装甲装备发展奠定坚实的基础。

参考文献：

[1] 刘尚合, 胡小锋. 电磁环境效应及对军事装备的影响[J]. 兵器知识, 2009(8): 19-21.

[2] 苏东林, 陈广志, 胡蓉, 等. 提升我国电磁安全能力的战略思考[J]. 安全与电磁兼容, 2021(5): 9-11.

[3] 藏克茂. 陆战平台全电化技术研究综述[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(1): 1-7.

[4] 王彪, 李小健, 熊瑛. 复杂电磁环境下无人战车面临的挑战与对策[J]. 环境技术, 2023, 41(10): 6-10.

[5] 李嘉麒, 魏曙光, 廖自力, 等. 陆战平台全电化关键技

术发展综述[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2049−2059.
[6] 马晓军, 袁东, 项宇, 等. 陆战平台综合电力系统及其关键技术研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 396−406.
[7] 刘川. 美国陆军战车现代化战略(一)[J]. 坦克装甲车辆, 2017(13): 34−39.
[8] 刘荣华, 王传有, 屠东, 等. 外军陆战平台作战感知增强技术发展研究[J]. 兵工自动化, 2022, 41(4): 5−9.
[9] 可荣硕. 车辆综合电力系统能量管理控制策略研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2014.
[10] 江丹. 多电飞机系统的电磁传导和辐射特性与抑制方法的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
[11] 王秀成. 电动车辆高压电驱动系统电磁干扰抑制技术[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
[12] BIANCHI N, MAHMOUD H, BOLOGNANI S. Fast synthesis of permanent magnet assisted synchronous reluctance motors[J]. IET electric power applications, 2016, 10(5): 312−318.
[13] REDL R. Electromagnetic environmental impact of power electronics equipment[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(6): 926−938.
[14] Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment: MIL-STD-461G[S]. Washington, D. C. : US government printing office, 2015.
[15] Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Emissions and Susceptibility: MIL-STD-461D[S]. washington, D. S. : US government printing office, 2015.
[16] Electromagnetic compatibility: DEF STAN 59-411[S]. London: UK defence standardization, 2007.
[17] 吴彦灵, 陈穷, 秦波. 俄罗斯电磁兼容性标准简介[J]. 航空标准化与质量, 2000(5): 19−23.
[18] Characteeristics of 28 volt DC input power to utilization equipment on military vehicles: MIL-STD-1257E[S]. Washington: US government printing, 2013.
[19] Aircraft electric power characteristics: MIL-STD-704F[S]. Washington: US government printing, 2013.
[20] Vehicles, boats and internal combustion engine driven devices–radio disturbance characteristics–limits and methods of measurement: CISPR 12[S]. Geneva: IEC central office, 2009.
[21] Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats and on devices: CISPR 25[S]. Geneva: IEC central office, 2016.
[22] Performance levels and methods of measurement of magnetic and electric field strength from electric vehicles 150kHz to 30MHz: SAE J551-5[S]. New York: American Society of Automotive Engineers, 1995.
[23] ELRAYYAH A, SOZER Y, ELBULUK M. Microgrid-connected pv-based sources a novel autonomous control method for maintaining maximum power[J]. IEEE industry applications magazine, 2015, 21(2): 19−29.
[24] LABROUSSE D, REVOL B, COSTA F. Common-Mode Modeling of the Association of N-Switching Cells: Application to an Electric-Vehicle-Drive System[J]. IEEE transactions on power electronics, 2010, 25(11): 2852−2859.
[25] 国家军用标准-总装备部. 系统电磁兼容性要求: GJB 1389A-2005[S]. 北京: 总装备部军标发行部, 2015.
[26] 中国人民解放军海军. 系统电磁环境效应试验方法: GJB 8848-2016[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2016.
[27] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求测量: GJB 151B-2013[S]. 北京: 总装备部军标发行部, 2013.
[28] 国防科学技术工业委员会. 军用车辆 28 伏直流电气系统特性: GJB 298-1987[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1987.
[29] 中国人民解放军总装备部. 飞机供电特性: GJB 181B-2012[S]. 北京: 总装备部军标发行部, 2013.
[30] 中国人民解放军总装备部. 舰船通用规范 总册: GJB 4000-2000[S]. 北京: 总装备部军标发行部, 2020.
[31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 车辆、船和内燃机线电骚扰特性用于保护车外接收机的限制和测量方法: GB/T 14023-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
[32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电动车辆的电磁场发射强度的限制和测量方法: GB/T 18387-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
[33] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 车辆、船和内燃机线电骚扰特性于保护车载接收机的限制和测量方法: GB/T 18655-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
[34] XIONG Y, LI X J, LI Y, et al. A High-frequency Motor Model Constructed Based on Vector Fitting Method[C]//Proceedings of 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2019: 191−194.
[35] 苏丹. 燃料电池轿车用 DC/DC 变换器的 EMC 研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
[36] 武艺. 电动汽车电驱动系统电磁干扰防护研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
[37] 刘晴. 纯电动汽车动力系统的电磁兼容性分析与评估[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
[38] 熊瑛, 李小健, 范知友, 等. 装甲车辆大功率电驱动系统传导干扰预测模型构建方法[J]. 兵工学报: 2024, 45(9): 3004−3016.

（下转第 10 页）