



★ ★ ★ ★ ★
“十三五”
国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
国防现代化建设

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

装甲车辆电磁兼容性 设计与试验技术

Armored Vehicle Electromagnetic Compatibility Design and Test Technology

赵晓凡 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

装甲车辆电磁兼容性 设计与试验技术

赵晓凡 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是系统论述坦克装甲车辆研制过程中电磁兼容性工程技术的著作,涉及军用车辆电磁兼容管理、设计、试验等技术。本书重点介绍了装甲车辆电磁兼容性总体要求、电磁兼容设计技术和电磁兼容试验验证技术,包括基本概念和原理、装甲车辆面临的电磁环境及干扰特性分析、电磁兼容性管理及策划、装甲车辆电磁兼容总体设计、部件分系统 EMC 设计技巧及原则、电磁兼容仿真分析与设计、军用车辆部件分系统 EMC 测试要求及验证方法,以及装甲车辆平台环境系统级试验与验证。本书可供从事军用车辆电磁兼容性指标论证、管理、设计和试验等工作的科研和技术人员参考使用,也可作为高等院校车辆专业学生的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

装甲车辆电磁兼容性设计与试验技术 / 赵晓凡编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019. 6

(陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书)

国家出版基金项目 “十三五” 国家重点出版物出版规划项目 国之重器出版工程

ISBN 978 - 7 - 5682 - 7116 - 5

I. ①装… II. ①赵… III. ①装甲车-电磁兼容性-设计②装甲车-电磁兼容性-试验 IV. ①TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 107291 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大彩印有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 37

字 数 / 640 千字

版 次 / 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 169.00 元

责任编辑 / 钟 博

文案编辑 / 钟 博

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

《国之重器出版工程》

编辑委员会

主任:苗 圩

副主任:刘利华 辛国斌

委员:冯长辉 梁志峰 高东升 姜子琨 许科敏

陈 因 郑立新 马向晖 高云虎 金 鑫

李 巍 高延敏 何 琼 刁石京 谢少锋

闻 库 韩 夏 赵志国 谢远生 赵永红

韩占武 刘 多 尹丽波 赵 波 卢 山

徐惠彬 赵长禄 周 玉 姚 郁 张 炜

聂 宏 付梦印 季仲华

《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》

编写委员会

名誉主编：王哲荣 苏哲子

主 编：项昌乐 李春明 曹贺全 丛 华

执行主编：闫清东 刘 勇

编 委：(按姓氏笔画排序)

马 越 王伟达 王英胜 王钦钊 冯辅周

兰小平 刘 城 刘树林 刘 辉 刘瑞林

孙葆森 李玉兰 李宏才 李和言 李党武

李雪原 李惠彬 宋克岭 张相炎 陈 旺

陈 炜 郑长松 赵晓凡 胡纪滨 胡建军

徐保荣 董明明 韩立金 樊新海 魏 巍



编者序

坦克装甲车辆作为联合作战中基本的要素和重要的力量，是一个最具临场感、最实时、最基本的信息节点，其技术的先进性代表了陆军现代化程度。

装甲车辆涉及的技术领域宽广，经过几十年的探索实践，我国坦克装甲车辆技术领域的专家积累了丰富的研究和开发经验，实现了我国坦克装甲车辆从引进到仿研仿制再到自主设计的一次又一次跨越。在车辆总体设计、综合电子系统设计、武器控制系统设计、新型防护技术、电子电气系统设计及嵌入式软件设计、数字化与虚拟仿真设计、环境适应性设计、故障预测与健康管理等新型工艺等方面取得了重要进展，有些理论与技术已经处于世界领先水平。随着我国陆战装备系统的理论与技术所取得的重要进展，亟需通过一套系统全面的图书，来呈现这些成果，以适应坦克装甲车辆技术积淀与创新发展的需要，同时多年来我国坦克装甲车辆领域的研究人员一直缺乏一套具有系统性、学术性、先进性的丛书来指导科研实践。为了满足上述需求，《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》应运而生。

北京理工大学出版社联合中国北方车辆研究所、内蒙古金属材料研究所、北京理工大学、中国人民解放军陆军装甲兵学院、南京理工大学、中国人民解放军陆军军事交通学院和中国兵器科学研究院等单位一线的科研和工程领域专家及其团队，策划出版了本套反映坦克装甲车辆领域具有领先水平的学术著作。本套丛书结合国际坦克装甲车辆技术发展现状，凝聚了国内坦克装甲车辆技术领域的主要研究力量，立足于装甲车辆总体设计、底盘系统、火力防护、电气系统、电磁兼容、人机工程等方面，围绕装甲车辆“多功能、轻量化、网



络化、信息化、全电化、智能化”的发展方向，剖析了装甲车辆的研究热点和技术难点，既体现了作者团队原创性科研成果，又面向未来、布局长远。为确保其科学性、准确性、权威性，丛书由我国装甲车辆领域的多位领军科学家、总设计师负责校审，最后形成了由14分册构成的《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》（第一辑），具体名称如下：《装甲车辆行驶原理》《装甲车辆构造与原理》《装甲车辆制造工艺学》《装甲车辆悬挂系统设计》《装甲车辆武器系统设计》《装甲防护技术研究》《装甲车辆人机工程》《装甲车辆试验学》《装甲车辆环境适应性研究》《装甲车辆故障诊断技术》《现代坦克装甲车辆电子综合系统》《坦克装甲车辆电气系统设计》《装甲车辆嵌入式软件开发方法》《装甲车辆电磁兼容性设计与试验技术》。

《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》内容涵盖多项装甲车辆领域关键技术工程应用成果，并入选“‘十三五’国家重点出版物出版规划”项目、“国之重器出版工程”和“国家出版基金”项目。相信这套丛书的出版必将承载广大陆战装备技术工作者孜孜探索的累累硕果，帮助读者更加系统全面地了解我国装甲车辆的发展现状和研究前沿，为推动我国陆战装备系统理论与技术的发展做出更大的贡献。

丛书编委会



前 言

随着世界军事变革的发展，装甲车辆的作战使命和作战环境发生巨大变化，装甲车辆的电动化、智能化、信息化的发展对电磁信息的依赖性也越来越强。各类高技术武器装备中电子信息技术广泛应用，电气电子控制系统的比重越来越大，这使电磁兼容性（EMC）问题错综复杂，层出不穷。在开发和部署新一代陆军移动平台、系统、子系统和设备的过程中，小到集成电路，大到整车平台，无不体现出电磁兼容技术的重要性。一方面车内电气化程度不断提高，强电、弱电信息设备皆安装于狭小的空间内，形成了非常复杂的电磁环境；另一方面外界电磁环境日趋复杂化，导致各种电磁兼容性问题层出不穷，对装备的各类任务系统造成严重威胁。特别是产品集成安装后，由于功能的高度集成及综合控制能力的需求，涌现出许多现行标准并没有明确定义的电磁干扰现象和电磁兼容性问题，其已成为新型装甲车辆总体设计、试验验证、保证作战效能和安全性的难题。

本书紧密结合装甲车辆全寿命期电磁兼容性控制、试验验证需求，总结了作者多年来从事坦克装甲车辆电磁兼容研究成果及大量的工程实践经验和教训，并且吸取了国内外车辆电磁兼容相关领域的先进经验和成果，系统阐述了装甲车辆研制全过程的 EMC 管理、预测分析、设计和试验验证等方面的原理、要求和实施方法，并给出了应用示例，内容具体全面，图文并茂，贴近实际，突出系统性和实用性，可以帮助设计人员更好地将电磁兼容技术应用到新一代装甲车辆的工程应用中。本书不仅对装甲车辆 EMC 进行了全面的阐述，而且对新型装甲车辆研制中新型混合动力、高压电驱系统设计、集成安装环境车载



通信系统电磁兼容试验与评估方法等面临的电磁干扰问题进行了探讨，希望为读者提供更有价值的信息。

全书共计 8 章，内容如下：

第 1、3 章重点介绍了装甲车辆的使命特点、管理必要性及发展需求，引入了 EMC 的概念和原理，叙述了装甲车辆电磁兼容性的内涵、外延、主要特征及电磁场与人体安全等内容，提出了 EMC 管理工作的基本流程，主要包含管理工作计划制定、工作监督要求和风险评估管理等内容。

第 2 章全面描述了装甲车辆面临的电磁环境特征，详细阐述了装甲车辆面临的有意、无意干扰源类型，车内环境典型电磁干扰源特征，干扰途径耦合机理及易敏感的设备 and 系统。对车载系统特殊高低压混合供配电、机电复合传动系统及车载通信系统集成环境电磁噪声源进行了详细分析介绍。

第 4、5、6 章重点介绍了装甲车辆 EMC 设计技术，包括总体 EMC 设计和部件分系统 EMC 设计的技巧与原则及仿真预测分析。其中第 4 章从总体设计角度论述了军用电磁环境的特殊性和控制技术、装甲车辆 EMC 总体设计流程、通用设计原则、特殊接口的防护设计及基于电磁兼容性要求的安装准则。第 5 章在部件分系统 EMC 设计技巧方面，系统阐述了 EMC 基础知识、电磁干扰耦合与传输理论，从工程实践应用的角度，提出了滤波、屏蔽、接地等抑制电磁干扰的有效措施和设计方法。第 6 章介绍了电磁仿真分析与设计的相关内容，对车载系统常用仿真方法进行了探讨，讨论了电磁学典型数值计算方法、电磁兼容建模方法，分析了电磁兼容模型与电磁模型的异同，提出通过进行二次分析得到电磁兼容参数，从而支撑 EMC 工程应用。

第 7、8 章重点介绍了军用车辆 EMC 试验验证技术，主要包括装甲车辆平台系统级和部件分系统的试验验证方法。其中第 7 章提出了车载平台部件分系统 EMC 具体试验方法的适用范围、方法的基本原理、试验实施中的各类问题和结果评估等，提出了关于车载电源系统的特殊测试要求，对军、民用车载部件分系统标准进行了差异对比。第 8 章系统介绍了装甲车辆平台环境系统级试验与验证技术，包括试验项目的选择、试验方法分类及适用性原则、试验文件的编制要求等内容，详细描述了地面系统集成安装环境下的电磁兼容性 10 个测试项目的试验方法和通信指挥车特殊测试要求的 4 个测试项目的试验评估方法，并且针对陆军地面平台涉及的电磁环境效应试验的基本要求进行探讨，提出关于 E3 检验方面的基本要求和试验策略，给出了辐射危害试验等 3 类效应试验的指南。

全书由赵晓凡研究员编著和定稿，张世巍研究员参与第 2 章和第 8 章部分内容的撰写，杜晓琳、聂秀丽参与第 5 章部分内容的撰写；中国北方车辆研究



所电磁兼容试验室杨光、焦美、李燕、张毅、李小健、熊瑛、赵骥、赵洋、王天楠等同志提供部分素材和试验数据及图表。

本书的编撰工作得到了作者单位领导和机关同志们的大力支持，感谢李春明总师、刘勇副所长对作者的信任及在写作过程中给予的悉心指导和帮助。北京理工大学出版社相关编辑为本书的出版做了大量细致的工作，在此一并表示衷心的感谢。本书的研究工作得到了各级机关以及有关单位和专家的帮助，在此深表谢意。

本书可供军用车辆领域电子电气系统设计、电磁兼容工程师和总体系统集成设计的人员使用，也可作为型号科研、工程设计、管理人员及车辆专业本科生的培训教材。

由于车辆电磁兼容学科内容丰富、发展迅速、涉及面广，限于作者的水平 and 经验，难免存在错误和不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者



目 录

第 1 章 基本概念和原理	001
1.1 概述	002
1.2 电磁兼容性的基本概念	003
1.3 电磁环境与电磁环境效应	007
1.4 装甲车辆电磁兼容的特点	010
1.5 车辆系统内和系统间的电磁兼容性	011
1.6 装甲车辆电磁性能控制计划	015
1.7 电磁场与人体安全	017
1.8 装甲车辆电磁兼容技术的发展	020
参考文献	024
第 2 章 装甲车辆面临的电磁环境及干扰特性分析	025
2.1 总则	026
2.2 装甲车辆面临的无意干扰源	027
2.3 装甲车辆面临的主要人为干扰源	040
2.4 装甲车辆易敏感的设备 and 系统	045
2.5 装甲车辆内部环境特性及典型电磁干扰源特征	049
2.6 车载通信系统集成环境电磁干扰特征	062
2.7 电磁干扰的基本特性（作用机理）分析	071
2.8 车内干扰传播途径和耦合特征	080



2.9	使用寿命期的电磁兼容问题	085
第3章	装甲车辆电磁兼容性管理与计划	087
3.1	装甲车辆(型号)电磁兼容性管理的必要性	088
3.2	电磁兼容性管理工作的基本流程	089
3.3	电磁兼容性管理工作的指导思想及目标	090
3.4	电磁兼容性管理的基本要求	091
3.5	电磁兼容性组织体系的构建及职责	092
3.6	电磁兼容性管理计划	093
3.7	电磁兼容性工作监督要求	095
3.8	电磁兼容性评审要求	095
3.9	电磁兼容性设计工作管理流程	097
3.10	电磁兼容性试验管理	097
3.11	电磁兼容性试验控制计划	099
3.12	电磁兼容性信息管理	100
3.13	电磁兼容性风险评估管理	100
3.14	质量保证的策划管理	102
第4章	装甲车辆总体电磁兼容性设计	103
4.1	军用电磁环境的特殊性	104
4.2	系统电磁兼容性控制技术	105
4.3	装甲车辆总体电磁兼容性设计流程及要素	106
4.4	不同类型军用车辆的特殊设计原则	117
4.5	特殊接口的防护设计	132
4.6	装甲车辆电磁兼容性通用设计原则及指南	135
4.7	与系统接口匹配相关的EMC设计分析	164
4.8	基于电磁兼容性要求的安装准则	170
第5章	部件电磁兼容性设计原则及技巧	181
5.1	概述	182
5.2	基本设计准则	182
5.3	减少干扰耦合设计	186
5.4	最小敏感度设计	189
5.5	印制电路板设计技术	192
5.6	电磁干扰抑制技术及措施	204



5.7	干扰抑制装置及其作用	206
5.8	非线性（瞬变）干扰特性及防护设计	215
5.9	滤波器设计及应用技术	222
5.10	屏蔽设计及应用技术	235
5.11	电缆线间串扰及耦合机理	261
5.12	电缆的屏蔽设计技术	265
5.13	常见线缆屏蔽层的接地方法	278
5.14	接大地、接地和搭接	284
5.15	静电放电	290
5.16	工艺质量控制	291
第6章	电磁兼容性仿真分析与设计	293
6.1	概述	294
6.2	仿真分析与产品设计开发	295
6.3	电磁问题的分类	297
6.4	电磁学典型数值计算方法	301
6.5	电磁兼容性建模方法	321
第7章	军用车辆部件分系统的测试要求及验证方法	333
7.1	军用车辆部件分系统电磁兼容性试验目的	334
7.2	测试场地的基本要求	336
7.3	电磁兼容性测试设备和使用	341
7.4	地面平台部件分系统 EMC 试验要求	350
7.5	基于标准要求（如 GJB 151B—2013）测试设备的 注意事项	374
7.6	道路车辆静电放电测试	382
7.7	车载电源系统的特殊测试要求	387
7.8	针对通信指挥车部件分系统辐射发射测试要求	395
7.9	军、民用车载部件分系统标准差异对比	406
附录 A	典型电控单元电磁兼容性试验计划（规范）编写范例	415
附录 B	试验报告举例	437
第8章	装甲车辆平台集成系统的试验与验证	449
8.1	概述	450
8.2	装甲车辆平台系统及试验项目适用性	451

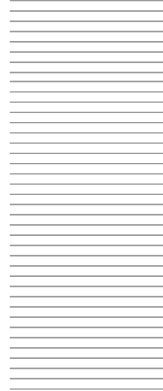


8.3	试验场地及环境要求	454
8.4	受试车辆的测试状态及测量设备要求	458
8.5	试验文件	463
8.6	地面系统集成安装环境的电磁兼容性测试	467
8.7	试验方法详细要求	469
8.8	通信指挥车辆特殊测试要求	516
8.9	陆军地面平台涉及的电磁环境效应试验指南	533
	参考文献	542
	索引	543



第 1 章

基本概念和原理





| 1.1 概 述 |

军用车辆由于其功能特点和作战使命，所面临的电磁环境覆盖整个陆基环境，涉及战场电磁环境、城市民用电磁环境、道路运输电磁环境、集结和训练电磁环境等。因此，装甲车辆电磁兼容性及对电磁环境的适应性要求评价显得尤其重要。

军用车辆所具有的批量大、批次多、生产周期长等特点都与电磁兼容性密切相关，其影响因素多、关联性强。不同批次的器件特性变化容易造成批量生产过程中电磁兼容的不可控制和不确定性。

对于装甲车辆，电磁兼容性是指武器系统、电气电子设备及控制系统等在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态，即要求在同一车载电磁环境中的上述各种设备都能正常工作且互不干扰，达到“兼容”状态。作为装甲车辆，随着作战模式的变化，系统电磁兼容性的内涵和外延都在扩展，在考虑电磁兼容的同时必须关注电磁环境效应和电磁环境适应性。

陆军装备面临的电磁环境（Electro Magnetic Environment, EME）是有用信号和无用发射相结合的结果，电磁信息越来越密集，而且呈现全方位、多层次、大纵深的立体特征，其中包括大量频率、周期、振幅和能量各不相同的波形，随着电子技术在车辆上的广泛应用，这些波形能扰乱平台及其相关系统的



正常功能甚至安全性。对于新一代装备，其电磁兼容设计的系统性、工程性、技术管理与规范性及生产的可控性还处于探索阶段。国际电工委员会（IEC）为电磁兼容性所下的定义为：电磁兼容性是电子设备的一种功能，电子设备在电磁环境中能完成其功能，而不产生不能容忍的干扰。对于装甲车辆行业，电磁兼容是电子设备的一种功能，如何实现这种功能有待于加强理解和深化研究。

| 1.2 电磁兼容性的基本概念 |

1. 电磁兼容性

电磁兼容性（Electro Magnetic Compatibility, EMC）是指设备、分系统、系统在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态（图1-1）。它是指电气设备在电磁环境中具备良好的工作能力，并且不产生在此环境中工作的其他设备所不能接受的电磁干扰。它包括以下两个方面：

（1）设备、分系统、系统在预定的电磁环境中运行时，可按规定的安全裕度实现设计的工作性能，且不因电磁干扰而受损或产生不可接受的降级。

（2）设备、分系统、系统在预定的电磁环境中正常地工作且不会给环境（或其他设备）带来不可接受的电磁干扰。

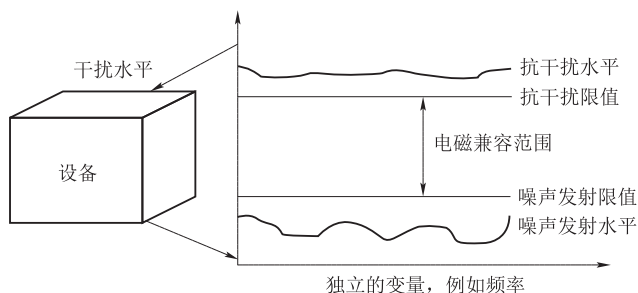


图 1-1 电磁兼容性

2. 电磁干扰

对于电磁干扰（Electro Magnetic Interference, EMI），国军标 GJB 72A—2002 的定义为：任何能中断、阻碍，甚至降低、限制无线电通信或其他电气电子设备性能的传导或辐射的电磁能量。