



★ ★ ★ ★ ★  
“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 试验学

Armored Vehicle Testing Technology

丛 华 樊新海 邱绵浩 编著

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

## 内 容 简 介

本书以传感器和检测技术为基础,以装甲车辆试验技术为目的构建内容体系,主要内容包括:绪论、测试系统的基本组成及特性分析、装甲车辆典型参数的测量、相似理论与正交试验设计、装甲车辆室内台架试验、装甲车辆室外道路试验、装甲车辆使用适应性试验、测试信号的采集与分析处理等。

本书整合了测量技术中的基础内容和试验技术中的重要内容,削枝强干,突出重点,使测量技术和试验技术有机融为一体。在内容安排上力求衔接有序,符合认知规律,由浅到深,由整体到局部,由理论到应用,便于读者掌握装甲车辆典型参数测量与典型试验技术的基本理论知识以及测试信号的常用分析处理方法。

本书可作为高等院校车辆工程专业有关课程教材或参考书,也可供高等院校相关专业教师、学生或科研院所工程技术人员自学参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

装甲车辆试验学 / 丛华, 樊新海, 邱绵浩编著. —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 978-7-5682-7106-6

I. ①装… II. ①丛…②樊…③邱… III. ①装甲车—车辆试验  
IV. ①TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 111367 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 / 25.75

字 数 / 444 千字

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

定 价 / 128.00 元

责任编辑 / 梁铜华

文案编辑 / 梁铜华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

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

现代车辆的研发过程不但涉及设计、制造和使用，而且还涉及新技术、新材料和新工艺，是一项技术密集的复杂系统工程。无论是车辆部组件设计阶段、原理样机组装阶段、设计定型阶段，还是后续使用阶段，都离不开测量和试验技术支持。车辆试验已经发展成为一个相对独立的学科，是车辆工程技术发展的重要组成部分，也是进行车辆性能评价、技术状况分析和状态监测诊断的重要技术手段。

鉴于车辆试验在现代车辆工程中的重要作用，以及车辆工程专业人才培养需要，编者在总结专业教学和科研实践经验的基础上编写了此书。内容选取主要根据车辆试验技术的发展，并结合履带式 and 轮式车辆实际情况，按照利于教与学、利于学生科学实践能力和创新精神培养的原则而定。本书兼顾了理论知识的系统性和技术手段的通用性，重点讲述了测量技术和车辆试验技术的基本理论知识以及常见试验设备、试验方法、试验数据的分析处理等内容。全书共分为 8 章，各章内容如下：

第 1 章 绪论：车辆试验的目的及意义；车辆试验的发展；车辆试验的分类；车辆试验的标准；车辆试验的组织。

第 2 章 测试系统的基本组成及特性分析：测试系统的基本组成；测量误差；测试系统的特性分析；不失真测试的条件；测试系统动态特性参数的测定方法；测试系统的干扰及防护。

第 3 章 装甲车辆典型参数的测量：应变与力的测量；转速与转矩的测量；振动测量；噪声测量；温度测量；液体参数测量。

第 4 章 相似理论与正交试验设计：相似理论；相似准则的求法；相似



准则形式的转换和数据处理；相似理论应用；正交试验设计；多指标分析方法；考虑交互作用的试验设计；正交试验设计的方差分析。

第 5 章 装甲车辆室内台架试验：概述；室内试验的动力设备和测功设备；车辆重心和转动惯量的测定；传动系统部件的室内台架试验；车辆动力性室内台架试验；车辆室内振动疲劳试验；消声室内车辆试验。

第 6 章 装甲车辆室外道路试验：概述；试验场；动力性试验；制动性试验；装甲车辆室外噪声试验；燃料经济性试验；操纵与稳定性试验；行驶平顺性试验；通过性试验；装甲装备陆上机动性能试验。

第 7 章 装甲车辆使用适应性试验：可靠性试验；维修性试验；保障性试验；测试性试验；安全性试验；其他适应性试验。

第 8 章 测试信号的采集与分析处理：模拟信号的采集；测试信号的幅域分析；测试信号的时域分析；测试信号的频域分析；测试信号的解调分析；测试信号的细化谱分析。

本书第 1、4 章由丛华教授编写，第 2、3、8 章由樊新海副教授编写，第 5、6 章由邱绵浩副教授编写，第 7 章由徐保荣高工编写。全书由安钢教授主审。本书编写过程中参阅了一些院校、科研单位的相关教材和专著，对书后所列参考文献的编（著）者表示诚挚的感谢！

限于学识和经验，书中疏漏和不妥之处在所难免，诚恳希望同行专家和读者不吝指正，以便进一步完善提高。

作 者



# 目 录

第 1 章 绪论 .....	001
1.1 车辆试验的目的及意义 .....	002
1.2 车辆试验的发展 .....	004
1.3 车辆试验的分类 .....	007
1.4 车辆试验的标准 .....	009
1.5 车辆试验的组织 .....	010
1.5.1 试验准备阶段 .....	011
1.5.2 试验实施阶段 .....	012
1.5.3 试验总结阶段 .....	013
第 2 章 测试系统的基本组成及特性分析 .....	015
2.1 测试系统的基本组成 .....	016
2.2 测量误差 .....	018
2.3 测试系统的特性分析 .....	020
2.3.1 测试系统的静态特性 .....	021
2.3.2 测试系统的动态特性 .....	025
2.3.3 测试系统动态特性分析 .....	029
2.3.4 测试系统对典型激励的响应分析 .....	035
2.4 不失真测试的条件 .....	039
2.5 测试系统动态特性参数的测定方法 .....	042
2.5.1 阶跃响应法 .....	042



2.5.2	频率响应法	044
2.6	测试系统的干扰及防护	046
第3章	装甲车辆典型参数的测量	049
3.1	应变、应力和力的测量	050
3.1.1	应变测量	050
3.1.2	应力测量	054
3.1.3	力的测量	055
3.2	转速与转矩的测量	059
3.2.1	转速测量	059
3.2.2	转矩测量	062
3.3	振动测量	066
3.3.1	电测法测振及其系统组成	066
3.3.2	振动的激励装置	067
3.3.3	常用的测振传感器	072
3.4	噪声测量	076
3.4.1	噪声测量的主要参数	076
3.4.2	噪声的评价	078
3.4.3	噪声测量仪器	081
3.4.4	噪声测量的方法	083
3.5	温度测量	086
3.5.1	测温方法分类	087
3.5.2	金属膨胀式温度计	087
3.5.3	热电偶	089
3.5.4	热电阻	092
3.5.5	热敏电阻	094
3.5.6	辐射式温度计	095
3.6	流体参数测量	096
3.6.1	压力测量	096
3.6.2	流量测量	102
第4章	相似理论与正交试验设计	107
4.1	相似理论	109
4.1.1	物理现象的单值条件	109



4.1.2	相似的概念	110
4.1.3	相似定理	112
4.2	相似准则的求法	116
4.2.1	方程分析法	116
4.2.2	量纲分析法	118
4.3	相似准则形式的转换和数据处理	122
4.3.1	相似准则形式的转换	122
4.3.2	模型试验数据的处理	123
4.4	相似理论应用	123
4.4.1	车辆模型风洞试验	123
4.4.2	地面车辆牵引性能的相似理论评价	126
4.5	正交试验设计法	128
4.5.1	正交试验表	128
4.5.2	用正交表安排试验	129
4.5.3	试验结果的直观分析法	132
4.6	多指标分析方法	134
4.6.1	综合平衡法	135
4.6.2	综合评分法	137
4.7	考虑交互作用的试验设计	139
4.7.1	交互作用表	140
4.7.2	正交表列的自由度	141
4.7.3	应用实例	141
4.8	正交试验设计的方差分析	142
4.8.1	方差分析的基本步骤	143
4.8.2	重复试验的方差分析	146
<b>第 5 章</b>	<b>装甲车辆室内台架试验</b>	<b>149</b>
5.1	概述	150
5.1.1	室内试验的特点	150
5.1.2	室内试验项目	151
5.2	室内试验的动力设备和测功设备	153
5.2.1	室内试验的动力设备	153
5.2.2	室内试验的测功设备	154
5.3	车辆重心和转动惯量的测定	163



5.3.1	车辆重心的测定	163
5.3.2	车辆绕三轴转动惯量的测定	164
5.4	传动系统部件的室内台架试验	166
5.4.1	试验目的与分类	166
5.4.2	开式传动部件试验	167
5.4.3	闭式传动部件试验	170
5.5	车辆动力性室内台架试验	174
5.5.1	轮式车辆底盘测功机试验	174
5.5.2	履带式装甲车辆室内动力性试验	179
5.6	车辆室内振动疲劳试验	180
5.6.1	试验的目的、内容和特点	180
5.6.2	疲劳试验技术	181
5.6.3	振动疲劳试验设备	183
5.6.4	程序加载试验法	185
5.7	消声室内车辆试验	190
5.7.1	概述	190
5.7.2	消声室及其基本要求	191
5.7.3	消声室类型和结构	191
5.7.4	噪声试验	192
第6章	装甲车辆室外道路试验	195
6.1	概述	196
6.2	试验场	197
6.2.1	试验场的分类	197
6.2.2	试验场的构成	198
6.2.3	国内外试验场简介	205
6.3	动力性试验	211
6.3.1	动力特性试验	211
6.3.2	牵引特性试验	215
6.4	制动性试验	215
6.4.1	制动效能试验	215
6.4.2	制动稳定性试验	218
6.5	装甲车辆室外噪声试验	218
6.6	燃料经济性试验	220



6.6.1	评价指标	220
6.6.2	试验方法	221
6.7	操纵与稳定性试验	222
6.7.1	轮式车辆的操纵与稳定性试验	222
6.7.2	履带式装甲车辆的转向性能试验	227
6.8	行驶平顺性试验	228
6.8.1	试验内容和方法	228
6.8.2	平顺性试验数据的采集和处理	230
6.8.3	人体承受全身振动的评价标准	231
6.9	通过性试验	235
6.10	装甲装备陆上机动性能试验	237
<b>第 7 章</b>	<b>装甲车辆使用适应性试验</b>	<b>249</b>
7.1	可靠性试验	250
7.1.1	可靠性试验的阶段	253
7.1.2	可靠性试验的种类	255
7.1.3	可靠性试验的评估	264
7.1.4	定量检测参数及定性检验方法	265
7.1.5	可靠性试验的方法	269
7.2	维修性试验	274
7.2.1	维修性试验的种类	275
7.2.2	维修性指标的验证方法	276
7.2.3	维修性试验方法	283
7.3	保障性试验与评价	286
7.3.1	综合保障性要素	287
7.3.2	保障性试验与评价的时机	288
7.3.3	保障性试验与评价的类型	289
7.3.4	保障性要求及检验方法	292
7.4	测试性试验	296
7.4.1	测试性设计核查	300
7.4.2	测试性研制试验	301
7.4.3	测试性验证试验	304
7.4.4	测试性分析评价	307
7.4.5	使用期间测试性信息收集与评价	308
7.5	安全性试验	310



7.5.1	安全性设计基本要求	312
7.5.2	安全性试验的分类	313
7.6	其他适应性试验	317
7.6.1	电磁兼容性试验	317
7.6.2	复杂电磁环境试验	318
7.6.3	环境适应性试验	319
7.6.4	人机适应性试验	323
第8章 测试信号的采集与分析处理		325
8.1	模拟信号的采集	327
8.1.1	连续时间信号的采样	328
8.1.2	量化和量化误差	334
8.1.3	截断与频谱泄漏	336
8.2	测试信号的幅域分析	337
8.2.1	概率密度函数	338
8.2.2	幅域参数	342
8.3	测试信号的时域分析	345
8.3.1	波形分析	346
8.3.2	相关分析	346
8.4	测试信号的频域分析	351
8.4.1	自功率谱	351
8.4.2	互功率谱	354
8.4.3	相干函数	356
8.4.4	三维谱阵图	357
8.5	测试信号的解调分析	359
8.5.1	Hilbert 变换解调法	360
8.5.2	Teager 能量算子解调法	361
8.5.3	两种解调分析方法的应用实例	363
8.6	测试信号的细化谱分析	364
8.6.1	Zoom-FFT 频谱细化方法	365
8.6.2	FFT-FS 频谱细化方法	366
8.6.3	两种频谱细化方法的应用实例	368
参考文献		370
索引		372



## 第1章 绪论

**装**甲车辆的研发是一项技术密集复杂系统工程。在不断提高车辆机动性能和防护性能的基础上，谋求车辆全寿命周期的可靠性、安全性、经济性和维修性等综合性能的全面提高，正成为装甲车辆发展追求的目标。这不仅是设计、制造和操作使用的问题，还涉及新技术、新材料以及新工艺的研究和发展。这些工作的开展，都与装甲车辆试验密不可分，都需要试验研究的数据支持。



## | 1.1 车辆试验的目的及意义 |

科学实验<sup>①</sup>是人们认识客观世界，掌握研究对象本质和科学规律的重要手段。人们对客观世界的认识，是通过不断地探索和实践逐步深入的。在大量实践活动的基础上，人们不断进行总结，对客观世界的认识逐步升华，渐渐掌握了各种理论知识，而这些理论反过来又指导人们对客观世界的探索和实践，使人们的实践活动更有针对性，并逐步达到科学化、规范化。因此，实践是一切理论活动的基础，是理论工作的前提。任何一种理论，只有在科学实验中得到证实后才能确立，而理论上的重大发现往往是伴随科学实验技术的突破，这在科学发展史上屡见不鲜。通过实验证实理论和发展理论是科学技术发展的基本规律之一。

在科学技术与科学实验相互促进的高速发展过程中，科学实验通过多种技术融合、多学科知识交叉渗透，逐渐发展成为理论体系完善、设施和设备技术先进、标准法规配套、人才队伍专业化分工越来越细的独立学科。

机械工程作为传统的学科领域，伴随着电气化、信息时代的到来，车辆、飞机、船舶、工程机械等工业产品的自动化和信息化技术含量越来越高，与之

---

<sup>①</sup> 本书中出现的“实验 (experiment)”一词，主要是强调与理论研究相区别的一种研究方法；“试验 (test)”一词，主要是指采用测试手段来获取或者验证某一结果的行为。



相应的必然是对产品的可靠性、安全性、舒适性和经济性的要求越来越高，其研发涉及机械设计、材料加工、制造工艺、自动控制、信息技术、动力传动、电气以及通信等多学科领域。因此，要使这种技术构成和系统构成越来越复杂的大型工业产品满足性能和使用要求，就必须在产品的研发过程中进行一系列的科学实验，而且通常情况下属于大规模系统性的实验，需要由一个多学科人才构成的专业实验队伍，依托多种精密、复杂的大型实验设备和实验设施，并在相关理论指导下，依据有关的实验标准和规程来设计方案和组织实施。

例如，装甲车辆整车场地试验。场地试验要求在专门的试验场进行，一般它是一个占地面积几十平方千米的大型综合性试验基地。试验场内建设有各种典型使用条件的模拟设施，能够模拟装甲车辆实际可能遇到的各种情况，如能进行高速试验的高速跑道，能进行各种性能测试的标准路面，能进行强化试验的各种道路，有各种坡道、滑台、涉水池以及相应配套的室内设备等。场地试验可以根据实际需要，进行包括各种性能、寿命和可靠性在内的各类试验。装甲车辆场地试验不仅设施、设备条件投入很大，而且试验耗费也相对较高。尽管如此，由于在试验场里能深入开展装甲车辆各种性能的试验研究，可缩短研制试验周期、提高试验结果的可比性和试验工作的安全性，在人力、物力和时间上都能取得明显的效益，因此试验场已经成为装甲车辆研制和改进不可或缺的典型试验设施。对于装甲车辆场地试验，试验设施多属大型试验设施或设备，而且涉及试验设计、道路模拟、系统控制、信息采集、数据处理及分析和系统维护等方面的技术支持，无论是试验设施的建设和管理，还是各种试验的具体实施，均需要各类专门技术人才的通力合作才可完成。

现代科学技术的发展，无论是在广度上还是在深度上都呈现出前所未有的发展速度，这种发展极大地促进和推动了实验科学的发展，使它的应用范围和规模发生了深刻的变化，出现了许多新的情况，提出了许多新的问题。实验科学不仅仅是应用在探索性的学术研究上，而且在工程领域，无论是产品的设计、性能预测、仿真分析和验证，还是产品生产质量的检验、可靠性评估以及使用中维修和维护的检测等，均涉及实验工作，实验科学已贯穿于产品的整个寿命周期。装甲车辆研发和性能改进过程中涉及许多复杂的工程技术难题，实验往往是发现和解决问题的最有效途径。为了适应科学技术发展对实验科学的要求，需要研究科学技术实验本身的一些问题。例如，如何根据实际需要，科学、高效地组织开展装甲车辆大型试验；如何合理地设计试验方案；如何根据需要选择适宜的测试技术，组成合理的测试系统，并进行试验数据的处理分析，等等。因此，需要从实验的理论和实践两方面进行系统全面的研究，认清其规律性和特殊性，加强理论与实践的互动，使科学技术实验发挥其应有的作用。