

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

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

# 坦克装甲车辆通用质量 特性设计与评估技术

刘树林 刘 勇 伊泉剑 等 编著

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

# 《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，是一种最具临场感、最实时、最基本的信息节点和武器装备，其技术的先进性代表了陆军装备现代化程度。

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取得重要进展，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、火力系统、



防护系统、电气系统、电磁兼容、人机工程、质量与可靠性、仿真技术、协同作战辅助决策等方面，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24分册构成的《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》，具体名称如下：《装甲车辆概论》《装甲车辆构造与原理》《装甲车辆行驶原理》《装甲车辆设计》《新型坦克设计》《装甲车辆武器系统设计》《装甲车辆火控系统》《装甲防护技术研究》《装甲车辆机电复合传动系统模式切换控制理论与方法》《装甲车辆液力缓速制动技术》《装甲车辆悬挂系统设计》《坦克装甲车辆电气系统设计》《现代坦克装甲车辆电子综合系统》《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》《装甲车辆环境适应性研究》《装甲车辆人机工程》《装甲车辆制造工艺学》《坦克装甲车辆通用质量特性设计与评估技术》《装甲车辆仿真技术》《装甲车辆试验学》《装甲车辆动力传动系统试验技术》《装甲车辆故障诊断技术》《装甲车辆协同作战辅助决策技术》。

《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“国家出版基金”项目、“‘十三五’国家重点出版物出版规划”项目和工信部“国之重器出版工程”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

本书从满足装甲车辆研制需求和提升装甲车辆通用质量特性水平出发，重点论述通用质量特性管理要求及指标体系、可靠性设计与评估技术、维修性设计与评估技术、安全性设计与评估技术、保障性设计与分析技术等内容，并结合工程实践，给出了通用质量特性管理、设计分析、试验评估等方面的工程案例。

本书共分为8章，第1章“概论”主要介绍了装甲装备的通用质量特性的内涵，分析了国内外技术现状和发展需求，指出了存在的问题和差距；第2章“通用质量特性管理与工程实践”主要介绍了通用质量特性的组织管理机构及职责、不同阶段的管理任务及工作项目，还介绍了生产与售后服务质量管理、通用质量特性指标体系及工程案例；第3章“可靠性设计技术与工程实践”主要介绍了GO法、FMECA、动态故障树等方法，以及可靠性优化分配技术，并结合装甲车辆介绍了GO法、FTA等的工程应用；第4章“可靠性试验、评估与工程实践”主要介绍了环境应力筛选、加速试验、可靠性强化试验、可靠性摸底试验以及可靠性评估技术，并针对可靠性摸底试验列出了成功案例。第5章“维修性设计、评估技术与工程实践”主要介绍了维修性主动设计技术、基于虚拟现实的维修性评价、维修性评价指标体系、维修训练技术及相应的工程案例。第6章“保障性设计分析技术与工程实践”主要介绍了装备保障性要求论证、装备保障方案的确定与优化、装备保障资源需求与分析、装备保障性试验与评价以及工程案例。第7章“测试性设计技术与工程实践”主要介绍了测试性设计方法、BIT设计、测试性预计与分析及工程案例。第8章“安全性工程”主要介绍了安全性工程原理、安全性分析方法、安全性设计方



法、安全性工程管理及工程案例。

本书是首部研究装甲车辆通用质量特性的工程理论和应用的图书，并将基础理论与工程实际案例相结合，为产品设计分析人员提供了大量的分析实例，具有很强的指导作用，对于装甲车辆的研制开发、装备通用质量特性水平的提升和适应实战化需求都具有非常重要的现实意义。

本书第1章由刘勇、刘树林撰写，第2章由刘树林、刘勇撰写，第3章由伊泉剑、刘树林撰写，第4章由高振涛、郭文珺撰写，第5章由刘树林、焦娜、伊泉剑撰写，第6章由陈守华、张波撰写，第7章由王秋芳、刘勇撰写，第8章由焦健、冯强撰写，全书由刘树林、刘勇起草撰写大纲和最终审定，由刘树林、焦娜、伊泉剑、郭文珺统稿。

本书在撰写过程中得到了中国人民解放军陆军装甲兵学院单志伟教授，中国人民解放军陆军研究院装甲兵研究所吴纬高工，北京航空航天大学任羿教授、吕川教授，中国北方车辆研究所王剑研究员等的指导，并根据他们提出的宝贵意见进行了修改，在编写过程中参考了许多专著和论文，在此向以上为本书的出版付出心血的所有同仁以及本书的主审专家和出版编审一并表示衷心的感谢。

由于作者的知识、经验和水平有限，书中难免存在不妥和错漏之处，恳请读者批评指正。

编 者



# 目 录

第 1 章 概 论 .....	001
1.1 装甲装备通用质量特性概述 .....	003
1.2 装甲装备通用质量特性发展需求分析 .....	004
1.2.1 提升装甲装备可靠性的需求，对提升产品可靠性基础 能力提出了迫切要求 .....	004
1.2.2 满足装备实战适用性要求，对提升装甲产品可靠性 能力提出现实需求 .....	005
1.2.3 装备研发模式和发展机制转变，对提升行业可靠性 能力提出了发展需求 .....	005
1.3 国内外现状 .....	006
1.3.1 国外现状 .....	006
1.3.2 国内现状 .....	007
1.4 存在的问题和差距 .....	008
1.4.1 研制模式落后，基础数据缺乏 .....	008
1.4.2 试验能力薄弱，缺少研制试验条件支撑 .....	009
1.4.3 保障能力不足，影响装备使用 .....	010
第 2 章 通用质量特性管理与工程实践 .....	011
2.1 通用质量特性组织管理机构 .....	012



2.2	通用质量特性专项组的职责	013
2.3	各分系统通用质量特性主任设计师的职责	013
2.4	通用质量特性管理模式	014
2.5	通用质量特性管理思想	014
2.6	通用质量特性管理阶段及任务	014
2.6.1	通用质量特性管理阶段	014
2.6.2	主要管理任务	014
2.7	通用质量特性管理实施阶段及管理工作项目	015
2.7.1	研制阶段通用质量特性管理实施流程	015
2.7.2	研制阶段通用质量特性管理工作项目	016
2.8	生产质量与售后服务质量管理	025
2.9	通用质量特性参数体系	026
2.9.1	通用质量特性的主要参数	026
2.9.2	通用质量特性参数分类及适用阶段	030
2.9.3	通用质量特性参数设计分解层次	031
2.9.4	装甲装备通用质量特性定性要求	033
2.10	工程案例	035
2.10.1	可靠性工作要求	035
2.10.2	可靠性工作组织机构和运行管理要求	036
2.10.3	可靠性工作计划的制定	038
2.10.4	对承制方和转承制方的监督和控制	039
2.10.5	可靠性评审	039
2.10.6	故障报告、分析和纠正措施系统 (FRACAS) 的建立	040
2.10.7	可靠性信息管理要求	041
2.10.8	可靠性设计分析工作管理要点	041
2.10.9	可靠性试验工作管理要点	045
2.10.10	各研制阶段可靠性工作项目选择	045
第3章	可靠性设计技术与工程实践	049
3.1	基于GO法的装甲车辆可靠性建模与分析技术	051
3.1.1	GO法的基本理论	051
3.1.2	GO法的分析流程	055
3.2	FMECA分析技术	059



3.2.1	FMECA 技术标准 .....	059
3.2.2	FMECA 技术标准的工作流程 .....	060
3.2.3	FMECA 技术分析步骤 .....	061
<b>3.3</b>	<b>动态故障树分析技术 .....</b>	<b>067</b>
3.3.1	结构及工作原理分析 .....	067
3.3.2	可靠性框图绘制 .....	067
3.3.3	建立动态故障树 .....	068
3.3.4	模块分解 .....	068
3.3.5	各模块定性分析和定量分析 .....	068
<b>3.4</b>	<b>装甲车辆可靠性优化分配技术 .....</b>	<b>069</b>
3.4.1	基于模糊层次分配和新、旧系统分配的故障率复合 分配方法 .....	070
3.4.2	标度与模糊数权重评估 .....	070
3.4.3	基于模糊层次分配和新、旧系统分配的故障率复合 分配问题的求解 .....	073
3.4.4	基于 GO 法的装甲车辆可靠性、维修性指标权衡优化 分配方法 .....	076
3.4.5	基于 GO 法的装甲车辆可靠性、维修性指标权衡优化 分配问题的求解 .....	080
<b>3.5</b>	<b>工程案例 .....</b>	<b>088</b>
3.5.1	基于 GO 法的装甲车辆可靠性建模与分析应用实例 .....	088
3.5.2	基于 FTA 的装甲车辆可靠性建模与分析应用实例 .....	093
3.5.3	装甲车辆可靠性优化分配技术工程案例 .....	100
<b>第 4 章</b>	<b>可靠性试验、评估与工程实践 .....</b>	<b>133</b>
<b>4.1</b>	<b>环境应力筛选 .....</b>	<b>135</b>
4.1.1	环境应力筛选的作用 .....	135
4.1.2	典型的环境应力 .....	137
4.1.3	环境应力筛选的实施 .....	139
<b>4.2</b>	<b>可靠性增长试验 .....</b>	<b>140</b>
4.2.1	可靠性增长试验的要求 .....	140
4.2.2	故障分类及纠正方式 .....	141
4.2.3	可靠性增长管理的内容 .....	142
4.2.4	常用的可靠性增长模型 .....	143



4.2.5	可靠性增长试验的步骤	146
4.3	加速试验	147
4.3.1	应力寿命试验	148
4.3.2	高加速寿命试验	149
4.3.3	加速寿命试验模型	149
4.4	可靠性强化试验	150
4.4.1	电子产品	150
4.4.2	机械液压类产品	151
4.5	可靠性摸底试验	153
4.5.1	试验性质及目的	153
4.5.2	被试品数量及技术状态	153
4.5.3	试验方法及时间	153
4.5.4	试验环境与条件要求	154
4.5.5	试验剖面	154
4.5.6	试验要求	159
4.6	可靠性评估技术	159
4.6.1	二项分布单元可靠性评估	160
4.6.2	指数分布单元可靠性评估	161
4.6.3	威布尔分布单元可靠性评估	176
4.6.4	正态分布单元可靠性评估	182
4.7	工程案例	186
4.7.1	应力设计	186
4.7.2	试验剖面设计	187
4.7.3	试验记录	190
第5章	维修性设计、评估技术与工程实践	195
5.1	维修性设计技术概述	197
5.1.1	维修性设计的内涵	197
5.1.2	装甲车辆维修性设计的国内外现状	199
5.2	维修性主动设计技术	200
5.2.1	装甲车辆维修性设计与功能结构设计流程	200
5.2.2	维修性主动设计流程	200
5.3	维修性-功能结构特征关联关系模型	205
5.3.1	维修性-功能结构特征关联关系模型的构建	208



5.3.2	结构关联的表达 .....	208
5.3.3	功能结构设计特征的表达 .....	209
5.3.4	维修性参数和环境要素的表达 .....	210
5.3.5	维修性和功能结构特征关联关系的表达 .....	211
5.4	基于虚拟现实的维修性评价 .....	215
5.4.1	虚拟现实下的维修性评估流程 .....	216
5.4.2	维修过程仿真 .....	216
5.4.3	维修性评估 .....	216
5.4.4	虚拟现实环境下装甲车辆维修性评估过程总结 .....	216
5.5	面向时空要素的装甲车辆维修性评估指标体系研究 .....	219
5.5.1	维修性评估指标体系建立方法研究 .....	219
5.5.2	装甲车辆维修性影响因素分析 .....	221
5.5.3	装甲车辆维修性评估指标体系 .....	225
5.5.4	维修性定性属性评估方法 .....	227
5.5.5	维修性定量属性评估方法 .....	243
5.5.6	维修性综合评估算法 .....	244
5.6	虚拟维修训练技术 .....	250
5.6.1	国内外虚拟维修训练技术研究现状 .....	252
5.6.2	虚拟维修训练关键技术概况与趋势 .....	259
5.7	工程案例 .....	263
第6章	保障性设计分析技术与工程实践 .....	279
6.1	概 述 .....	280
6.1.1	装甲装备保障问题分析 .....	280
6.1.2	装备系统的保障性 .....	281
6.2	装备保障性分析 .....	282
6.2.1	装备保障性分析的基本概念 .....	282
6.2.2	装备保障性分析的特点 .....	283
6.2.3	装备寿命周期各阶段的保障性分析工作 .....	284
6.2.4	装备保障性分析标准介绍 .....	286
6.2.5	装备保障性分析的流程与主要工作内容 .....	293
6.2.6	装备保障性分析的主要技术 .....	298
6.3	装备保障性要求论证 .....	307
6.3.1	装备保障性要求的分类 .....	307



6.3.2	确定装备保障性要求的过程	310
6.3.3	确定装备保障性要求的主要方法	315
6.4	装备保障方案的确定与优化	317
6.4.1	保障方案概述	318
6.4.2	使用保障方案的确定	319
6.4.3	装备预防性维修保障方案的确定	323
6.4.4	装备修复性维修保障方案的确定	333
6.4.5	装备保障方案权衡优化	343
6.5	装备保障资源需求分析	347
6.5.1	装备保障资源概述	347
6.5.2	装备寿命各阶段保障资源需求确定的主要工作	348
6.5.3	装备保障人力人员需求的确定	349
6.5.4	保障设备需求的确定	353
6.5.5	备品备件需求的确定	355
6.5.6	其他保障资源需求的确定	358
6.6	保障性试验与评估	362
6.6.1	保障性试验与评估概述	363
6.6.2	保障性试验与评估的分类	363
6.6.3	装备试验鉴定中的保障性试验与评估工作	364
6.6.4	保障性试验方法	365
6.6.5	保障性定量要求评估方法	367
6.6.6	保障性定性要求评估方法	371
6.7	工程案例	375
6.7.1	装甲装备保障性要求论证工程案例	375
6.7.2	装甲装备保障方案的确定与优化工程案例	383
6.7.3	装甲装备保障资源需求的确定工程案例	388
6.7.4	装甲装备保障性试验与评估工程案例	391
第7章	测试性设计技术与工程实践	393
7.1	概述	395
7.1.1	测试性参数体系	395
7.1.2	常用测试性术语	396
7.2	测试性设计方法	397
7.2.1	功能和结构划分	397



7.2.2	测试点的选择与设置 .....	398
7.2.3	测试接口设计 .....	403
<b>7.3</b>	<b>BIT 设计 .....</b>	<b>404</b>
7.3.1	系统级 BIT 设计 .....	404
7.3.2	单元级 BIT 设计 .....	406
7.3.3	BIT 技术 .....	409
<b>7.4</b>	<b>测试性预计与分析 .....</b>	<b>416</b>
7.4.1	系统测试性预计 .....	417
7.4.2	LRU 测试性预计 .....	421
7.4.3	SRU 测试性预计 .....	424
<b>7.5</b>	<b>工程案例 .....</b>	<b>425</b>
7.5.1	功能规划 .....	425
7.5.2	整体规划 .....	425
7.5.3	主要系统测试性接口需求分析 .....	426
<b>第 8 章</b>	<b>安全性工程 .....</b>	<b>429</b>
<b>8.1</b>	<b>安全性的基础概念及度量 .....</b>	<b>430</b>
8.1.1	事故、危险、安全及安全性的内涵 .....	430
8.1.2	安全性的一般度量方式 .....	432
8.1.3	安全性常见的评估方法 .....	432
<b>8.2</b>	<b>安全性工程原理 .....</b>	<b>434</b>
8.2.1	概念与内容 .....	434
8.2.2	工作思路 .....	434
<b>8.3</b>	<b>安全性分析方法 .....</b>	<b>435</b>
8.3.1	安全性分析工作、时机与关系 .....	435
8.3.2	初步危险表 .....	437
8.3.3	初步危险分析 .....	439
8.3.4	分系统危险分析/系统危险分析 .....	441
8.3.5	使用与保障危险分析 .....	444
8.3.6	健康危险分析 .....	446
8.3.7	功能危险分析 .....	448
<b>8.4</b>	<b>安全性设计方法 .....</b>	<b>450</b>
8.4.1	安全性设计的基本概念 .....	450
8.4.2	安全性设计需求与层级 .....	450



## 坦克装甲车辆通用质量特性设计与评估技术

8.4.3 通用安全性设计方法 .....	451
8.4.4 专用安全性设计方法 .....	451
8.5 安全性工程管理 .....	455
8.6 工程案例 .....	456
参考文献 .....	459
索引 .....	464



## 第 1 章

# 概 论

**通**用质量特性涵盖了可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性和环境适应性等“六性”，是一种由设计与生产赋予装备的固有属性，反映的是装备的可用性，由于环境适应性和其他几个特性的设计分析方法相对独立，本书中提到的通用质量特性不包含环境适应性，只围绕可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性展开（简称“五性”）。通用质量特性直接影响着装备的作战效能和装备的市场竞争力，

也是多年来影响装甲装备跨越式发展的重要因素之一。

要确保武器装备质量特性经得起部队的检验、战斗的检验和历史的检验，就必须提高面向实战化运用的武器装备质量特性水平。针对部队实战化作战训练强度和高频度的使用需求，装甲装备使用环境会十分严酷，使通用质量特性的设计难度随之加大。

在我国装甲装备的发展初期，对照国外先进的装备，以填补型谱的空白为主，主要强调追求功能、性能，解决了装甲装备的“从无到有”的问题。但也存在着可靠性基础数据缺乏，可操作的“五性”标准、规范缺失，缺乏实用的“五性”工程技术，“五性”工程技术应用水平低，可靠性试验和验证能力不足，生产工艺与装备的可靠性、稳定性差，装备使用与保障能力不足等一系列问题与短板，加之认识和管理不到位，难以支撑装甲装备“五性”技术发展。

综上，研究与发展装甲车辆的通用质量特性技术是形势所需，也是大势所趋。



## | 1.1 装甲装备通用质量特性概述 |

通用质量特性技术是指可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性等专门技术。近半个世纪以来，武器装备研制经历了重大的变化和发展，从单纯地关注产品性能的实现和购置费用，逐步转向以效能为目标并综合衡量武器装备全寿命周期费用。“五性”技术正是伴随着这一变化发展起来的，“五性”技术为武器装备综合效能的实现和全寿命周期费用的控制优化提供了工程技术手段和方法。同时，国内外武器装备的研制经验表明，“五性”工程与电器、机械、电子、液压、动力学等传统工程紧密融合，实现并行设计，进而影响装备的设计制造，是提高装备效能的有效途径。装备的“五性”水平是设计出来的，是装备的固有属性，要依靠研制生产来实现，需要把“五性”需求前伸到装备的设计阶段，即在设计装备时重视装备的“五性”指标。对于装甲装备来说，相关指标主要包括平均无故障时间、可达可用度、平均维修时间、虚警率等。

装甲装备快速发展，装甲装备主要战技指标都接近或局部赶超国际先进装备水平，但在“五性”指标的实现上，却与国际先进装备有明显差距。虽然我国装甲装备在研制过程中陆续开展了可靠性相关工作，为装备作战效能的发挥奠定了一定基础，但可靠性水平整体偏低，例如主战坦克或步兵战车的可靠性水平与国际同类先进装备有明显差距。维修性水平也不高，许多产品的设计