



国防科技图书出版基金



# 履带车辆 虚拟样机技术及其应用

Virtual Prototype Technology and its Application  
on Tracked Vehicle

王红岩 芮强 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 履带车辆虚拟样机技术 及其应用

Virtual Prototype Technology and its  
Application on Tracked Vehicle

王红岩 芮强 王良曦 沙学锋 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

履带车辆虚拟样机技术及其应用 / 王红岩等编著.

—北京: 国防工业出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 10304 - 5

I. ①履... II. ①王... III. ①履带车 - 计算机仿真  
IV. ①U469.6 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 229490 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 1/4 字数 277 千字

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

国防科技图书出版基金  
第七届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰				
副主任委员	吴有生	蔡 镛	杨崇新		
秘 书 长	杨崇新				
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明			
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利	
	刘泽金	孙秀冬	陆 军	芮筱亭	
	李言荣	李德仁	李德毅	杨 伟	
	肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威	
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南	
	傅惠民	魏炳波			

# 前 言

履带车辆系统虚拟样机技术是履带车辆工程设计研制与计算机建模仿真技术相互结合的产物。车辆地面力学、车辆系统动力学、多体系统动力学理论的逐步发展与完善,建模与仿真技术、计算机软硬件技术的飞速发展共同促进了履带车辆动力学性能研究模式的转变,建立履带车辆系统的虚拟样机模型并进行仿真分析已经成为一种新的技术手段。

履带车辆系统虚拟样机技术,能够用于原理样车总体设计方案动态特性的演示验证,进行总体性能及战术技术指标的预测与评估,实现多种设计方案的性能比较与多方案优选;能够实现对研制阶段物理样车各项性能指标的监控,为研制过程中出现的技术难题、故障现象提供理论分析方法,提出并制定解决方案;通过开展各部件、各分系统以及总体的综合匹配及参数、结构等的优化设计与改进,为物理样车的研制寻求总体最优的设计方案;能够与车辆设计定型试验同步,为各项战技性能指标的考核与验证提供参考和补充;能够减少甚至代替部分实车试验,尤其是极限工况、破坏性及危险性工况以及特殊要求的试验工况下的实车试验,从而确保试验车辆及人员的安全;同时,还能为军方对设计定型报告、设计定型试验报告以及车辆性能进行全面的鉴定与审查提供评估手段。

本书是作者多年来从事履带车辆系统虚拟样机建模与仿真、论证与评估工作的总结,内容涵盖了履带车辆系统虚拟样机建模及应用两方面。履带车辆系统的建模部分是本书的重点。全书共分为8章。第1章介绍了车辆领域虚拟样机技术、履带车辆系统建模与仿真技术以及车辆系统多学科协同建模与仿真平台的开发与应用概况。第2章论述了履带车辆动力传动系统元部件、分系统及总体的层次化、模块化建模过程。第3章基于多体动力学建模原理与方法,详细描述了履带车辆行动系统各部分的相互约束方程及力学关系模型,重点是履带与各轮系以及地面的相互作用关系模型,并对履带车辆行驶道路路面模型的建模过程进行了论述。第4章提出履带车辆虚拟样机模型准确度的评价指标,在此基础上,综合采用参数灵敏度分析和广义简约梯度优化算法,实现对模型关键参数的静态及动态修正,从而提升了仿真模型数值计算结果的可信度。第5章对履带车辆的起步、换挡、加速及转向特性进行了仿真,研究了不同道路特性及操纵使用工况对履带车辆加速性能的影响,模拟再现了履带车辆的转向故障现象。第6章研究了履带车辆垂向振动的行驶平顺性及悬挂参数优化。第7章虚

拟试验了履带车辆崖壁、断崖及壕沟等典型障碍的通过特性,对障碍通过性能进行了演示验证。第8章仿真研究了履带车辆软地面的行驶性能及影响因素,虚拟测试了典型软土地面的性质参数。

本书为从事履带车辆动力学分析与仿真研究的研究生、教师以及相关科研院所工程设计人员开展履带车辆系统论证、评估、研制、试验等工作提供了重要的参考资料。本书采用了参数化、模块化、层次化的建模方法,基于多软件协同、多学科综合与联合仿真技术,结合大量的工程分析实例,系统全面论述了履带车辆的虚拟样机及虚拟试验测试技术。此外,本书对虚拟样机模型的精度问题给予了高度关注,提出了基于试验数据及优化算法的虚拟样机模型修正方法,在虚拟样机模型的应用部分也是通过大量的实车试验对虚拟样机模型的精度进行验证,这在以往同类书籍中是不多见的。目前国内外该专业领域的著作还很少见,作者衷心希望通过本书的出版,能对履带车辆动力学特性的仿真分析研究工作起到积极的推动作用。

承蒙高连华教授对本书初稿进行评阅并提出宝贵意见。在本书所涉及的研究内容中,曾对作者提供有关数学模型、计算机程序设计和相关资料以及数据文件的有方志强博士、程钢博士、马伟标博士、杨涛博士、孔令杰博士、薛劲槽博士等。这里对上述同志的大力支持和辛勤劳动一并表示衷心感谢。

作者

2015年5月30日



# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 虚拟样机技术及其在车辆领域的应用现状 .....	2
1.1.1 虚拟样机技术 .....	2
1.1.2 虚拟样机技术在汽车领域的应用 .....	3
1.1.3 虚拟样机技术在军用车辆领域的应用 .....	4
1.2 车辆系统建模与仿真技术 .....	8
1.2.1 动力传动系统建模与仿真技术 .....	8
1.2.2 车辆系统动力学建模与仿真技术 .....	11
1.2.3 车辆系统多学科领域建模与协同仿真技术 .....	14
1.3 车辆系统多学科领域建模与协同仿真平台 .....	20
1.3.1 协同仿真软件平台的软硬件组成 .....	21
1.3.2 车辆系统建模与仿真分析平台的体系结构 .....	22
1.3.3 多领域建模与协同仿真平台的主要功能 .....	23
第 2 章 履带车辆动力传动系统模块化建模 .....	26
2.1 动力传动系统的模块化建模 .....	26
2.1.1 模块化建模方法 .....	26
2.1.2 传动系统建模过程中的因果关系问题 .....	30
2.2 车辆动力传动系统建模与仿真环境——EASY5 软件 .....	34
2.2.1 EASY5 软件的简要介绍 .....	34
2.2.2 EASY5 软件的主要功能与特点 .....	36
2.3 履带车辆动力与传动系统的模块化建模 .....	39
2.3.1 履带车辆柴油发动机的模块化模型 .....	39
2.3.2 传动系统基本元件及子系统的模块化建模 .....	42
2.3.3 典型履带车辆传动系统模块化模型实现 .....	62
第 3 章 履带车辆行动系统多体动力学建模 .....	66
3.1 行动系统组成及模型坐标系 .....	66

3.1.1	行动系统组成 .....	66
3.1.2	模型简化及坐标系 .....	66
3.1.3	行动系统多体建模环境 .....	68
3.2	系统约束及广义力单元模型 .....	68
3.2.1	系统约束方程 .....	68
3.2.2	接触力模型 .....	69
3.2.3	摩擦力模型 .....	70
3.3	悬挂系统模型 .....	71
3.3.1	悬挂系统弹簧阻尼力模型 .....	72
3.3.2	扭杆弹簧刚度及悬架刚度 .....	72
3.3.3	减振器等效阻尼系数确定 .....	74
3.3.4	缓冲限制器模型 .....	75
3.4	推进系统模型 .....	76
3.4.1	负重轮—履带接触模型 .....	76
3.4.2	履带张紧力模型 .....	77
3.4.3	履带—地面相互作用模型 .....	79
3.5	履带车辆行驶地面模型 .....	81
3.5.1	随机路面模型的建立 .....	82
3.5.2	确定外形路面模型的建立 .....	87
<b>第4章</b>	<b>履带车辆系统动力学模型修正 .....</b>	<b>88</b>
4.1	虚拟样机模型准确度评价指标 .....	88
4.1.1	静态准确度评价指标 .....	88
4.1.2	动态准确度评价指标 .....	89
4.2	动力学模型参数灵敏度分析 .....	90
4.2.1	参数灵敏度分析方法 .....	90
4.2.2	模型参数灵敏度分析 .....	91
4.3	履带车辆动力学模型修正 .....	93
4.3.1	模型参数修正方法 .....	93
4.3.2	模型修正优化算法 .....	95
4.3.3	模型参数静态修正 .....	97
4.3.4	模型参数动态修正 .....	99
<b>第5章</b>	<b>履带车辆纵向行驶动力学分析 .....</b>	<b>102</b>
5.1	履带车辆整车系统虚拟样机建模 .....	102
5.1.1	接口模型 .....	103

5.1.2	联合仿真模型	104
5.2	履带车辆起步、换挡过渡过程仿真分析	105
5.2.1	车辆起步特性仿真分析	105
5.2.2	车辆升挡特性仿真分析	109
5.2.3	车辆降挡特性仿真分析	111
5.3	履带车辆加速性影响因素的仿真分析	114
5.3.1	不同路面特性对加速性的影响	114
5.3.2	不同换挡工况对加速性的影响	114
5.3.3	不同起步工况对加速性的影响	116
5.4	履带车辆转向过程仿真及故障现象模拟	117
5.4.1	履带车辆转向特性仿真分析	117
5.4.2	履带车辆故障表现形式	120
5.4.3	履带车辆行驶故障现象模拟	121
5.5	纵向动力学特性的试验验证	135
5.5.1	试验目的与内容	135
5.5.2	试验测试方案	135
5.5.3	试验系统组成	137
5.5.4	试验测试与模型验证	141
<b>第6章</b>	<b>履带车辆垂向振动特性分析与试验</b>	<b>147</b>
6.1	履带车辆行驶平顺性分析与评价	147
6.1.1	行驶平顺性评价方法	147
6.1.2	车辆振动特性仿真分析	149
6.1.3	履带车辆行驶平顺性评价	151
6.2	履带车辆悬挂装置参数优化	153
6.2.1	履带车辆悬挂装置类型的选择	153
6.2.2	数值优化算法	154
6.2.3	悬挂装置特性参数优化	157
6.3	垂向振动特性试验验证	160
6.3.1	试验目的与内容	160
6.3.2	试验测试方案	161
6.3.3	测试系统及数据处理	163
6.3.4	试验测试与模型验证	165
<b>第7章</b>	<b>履带车辆障碍通过性评估与预测</b>	<b>168</b>
7.1	履带车辆通过崖壁障碍	168

7.1.1	履带车辆通过崖壁过程分析	168
7.1.2	履带车辆通过崖壁过程仿真	169
7.1.3	履带车辆通过崖壁性能评估	171
7.2	履带车辆通过断崖障碍	172
7.2.1	履带车辆通过断崖过程分析	172
7.2.2	履带车辆通过断崖过程仿真	173
7.2.3	履带车辆通过断崖性能评估	177
7.3	履带车辆通过壕沟障碍	180
7.3.1	履带车辆通过壕沟过程分析	180
7.3.2	履带车辆通过壕沟过程仿真	181
7.3.3	履带车辆通过壕沟性能评估	185
<b>第8章</b>	<b>履带车辆软地面行驶特性分析及地面参数测试</b>	<b>190</b>
8.1	履带车辆软地面行驶特性分析	190
8.1.1	车辆软地面行驶性能评价指标	190
8.1.2	履带车辆结构参数对软地面行驶性能影响分析	191
8.1.3	履带车辆行驶性能的预测与比较	203
8.2	履带车辆行驶地面性质参数测试	205
8.2.1	地面性质参数测试方法	205
8.2.2	地面行驶阻力系数测试及影响因素分析	207
8.2.3	地面附着系数测试及影响因素分析	211
8.2.4	转向阻力系数测定虚拟试验	214
	<b>参考文献</b>	<b>218</b>

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Virtual Prototype Technology and its Application Status in Vehicles	
Domain .....	2
1.1.1 Virtual Prototype Technology .....	2
1.1.2 Application of Virtual Prototype Technology in Vehicles	
Domain .....	3
1.1.3 Application of Virtual Prototype Technology in Military	
Vehicles Domain .....	4
1.2 Modeling and Simulation Technology of Vehicles System .....	8
1.2.1 Modeling and Simulation Technology of Power – transmission	
System .....	8
1.2.2 Dynamic Modeling and Simulation Technology of Vehicles	
System .....	11
1.2.3 Co – simulation Technology of Vehicles System .....	14
1.3 Multidisciplinary Collaborative Modeling and Simulation Platform of	
Vehicles System .....	20
1.3.1 Hardware and Software of Vehicles System Co – simulation	
Software Platform .....	21
1.3.2 Architecture of Vehicles System Co – simulation Software	
Platform .....	22
1.3.3 Main Function of Vehicles System Co – simulation	
Platform .....	23
<b>Chapter 2 Modular Modeling of Tracked Vehicles Power Transmission</b>	
<b>System</b> .....	26
2.1 Modular Modeling of Power Transmission System .....	26
2.1.1 Modular Modeling Method .....	26
2.1.2 Causal Relationships in the Proces of Transmission System	
Modeling .....	30

2.2	Modeling and Simulation Environment of Power and Transmission System—EASY5 .....	34
2.2.1	Main Functions and Features of EASY5 Software .....	34
2.2.2	Modular Modeling Process and Analysis of a Typical Automotive Automatic Transmission System .....	36
2.3	Modular Modeling of Power and Transmission System of Tracked Vehicle .....	39
2.3.1	Modular Modeling of Diesel Enging of Tracked Vehicle .....	39
2.3.2	Modular Modeling of Basic Components and Subsystem of Transmission System .....	42
2.3.3	Realization of Modular Modeling of Typical Transmission System of Tracked Vehicle .....	62

**Chapter 3 Multi – body Dynamic Model of Travel System of Tracked Vehicles .....** 66

3.1	Composition and Modeling Environment of Running Gear of Tracked Vehicles .....	66
3.1.1	Composition of Running Gear of Tracked Vehicles .....	66
3.1.2	Model Simplification and Coordinate System .....	66
3.1.3	Modeling Environment of Running Gear of Tracked Vehicles .....	68
3.2	System Constraints Equations and Generalized Force Models .....	68
3.2.1	System Constraints Equations .....	68
3.2.2	Contact – force Models .....	69
3.2.3	Friction – force Models .....	70
3.3	Suspension System Modelling .....	71
3.3.1	Spring and Damping Force Modelling of Suspension System .....	72
3.3.2	Rigidity of Torsion Bar Spring and Suspension .....	72
3.3.3	Determination of Equivalent Damping Coefficient of Shock Absorber .....	74
3.3.4	Model of Interaction Force between Limiter and Balance Shaft .....	75
3.4	Propulsion System Modelling of Traced Vehicles .....	76
3.4.1	Load Wheel – track Contact Model .....	76
3.4.2	Track Tension Force Model .....	77

3.4.3	Track – ground Interaction Model .....	79
3.5	Road Surface Profile Modelling .....	81
3.5.1	Random Road Profile Modelling .....	82
3.5.2	Profile – determined Road Modelling .....	87
<b>Chapter 4</b>	<b>Model Evaluation and Updating of Running Gear of Tracked Vehicles .....</b>	<b>88</b>
4.1	Accuracy Evaluating Indicators of Virtual Prototype Model .....	88
4.1.1	Static Accuracy Evaluating Indicator .....	88
4.1.2	Dynamic Accuracy Evaluating Indicator .....	89
4.2	Sensitivity Analysis of Dynamic Model Parameters .....	90
4.2.1	Parameter Sensitivity Analysis Method .....	90
4.2.2	Sensitivity Analysis of Modeling Parameters .....	91
4.3	Updating of Dynamic Model of Running Gear of Tracked Vehicle .....	93
4.3.1	Model Updating Methods .....	93
4.3.2	Optimizing Algorithm of Model Updating .....	95
4.3.3	Static Updating of Model Parameters .....	97
4.3.4	Dynamic Updating of Model Parameters .....	99
<b>Chapter 5</b>	<b>Longitudinal Dynamic Analysis of Tracked Vehicles .....</b>	<b>102</b>
5.1	Virtual Prototype Modelling of Propulsion System of Tracked Vehicle .....	102
5.1.1	Interface Model .....	103
5.1.2	Co – simulation Model .....	104
5.2	Simulation of Starting and Gear Shifting Process of Tracked Vehicles .....	105
5.2.1	Simulation of Starting Characteristic of Tracked Vehicle .....	105
5.2.2	Simulation of Upshift Characteristic of Tracked Vehicle .....	109
5.2.3	Simulation of Downshift Characteristic of Tracked Vehicle .....	111
5.3	Simulation Analysis of Influence Factors on Acceleration Performance of Tracked Vehicles .....	114
5.3.1	Influence of Different Road Surface properties on Acceleration Performance .....	114
5.3.2	Influence of Different Gear Shifting Conditions on .....	

	Acceleration Performance .....	114
5. 3. 3	Influence of Different Starting Conditions on Acceleration Performance .....	116
5. 4	Simulation of Steering Process and Imitator of Fault Phenomenon of Tracked Vehicles .....	117
5. 4. 1	Simulation Analysis of Steering Properties of Tracked Vehicles .....	117
5. 4. 2	Fault Forms of Tracked Vehicles .....	120
5. 4. 3	Imitator of Ride Fault Phenomenon of Tracked Vehicles ..	121
5. 5	Experimental Validation of Longitudinal Ride Dynamic Properties .....	135
5. 5. 1	Objective and Contents of Experiment .....	135
5. 5. 2	Experiment Scheme .....	135
5. 5. 3	Composition of Experiment System .....	137
5. 5. 4	Experiment Process and Modeling Verification .....	141
<b>Chapter 6</b>	<b>Analysis and Test of Vertical Vibration Properties of Tracked Vehicles .....</b>	<b>147</b>
6. 1	Analysis and Evaluation of Ride Comfort of Tracked Vehicles .....	147
6. 1. 1	Evaluation Method of Ride Comfort .....	147
6. 1. 2	Simulation and Analysis of Vibration Properties of Vehicles .....	149
6. 1. 3	Evaluation of Ride Comfort of Tracked Vehicles .....	151
6. 2	Parameter Optimization of Suspension System of Tracked Vehicles .....	153
6. 2. 1	Choosing Types of Suspension System of Tracked Vehicles .....	153
6. 2. 2	Numerical Optimization Algorithm .....	154
6. 2. 3	Parameter Optimization of Suspension System Properties .....	157
6. 3	Experimental Validation of Vertical Vibration Properties .....	160
6. 3. 1	Objective and Contents of Experiment .....	160
6. 3. 2	Experiment Scheme .....	161
6. 3. 3	Experiment System and Data Processing .....	163
6. 3. 4	Experiment Process and Model Verification .....	165



<b>Chapter 7</b>	<b>Assessment and Prediction of Obstacle Trafficability of Tracked Vehicles</b>	168
7.1	Precipice Obstacle Trafficability of Tracked Vehicle	168
7.1.1	Analysis of Tracked Vehicle Pass Through Precipice Obstacle	168
7.1.2	Simulation of Tracked Vehicle Pass Through Precipice Obstacle	169
7.1.3	Assessment of Precipice Obstacle Trafficability of Tracked Vehicles	171
7.2	Scar Obstacle Trafficability of Tracked Vehicle	172
7.2.1	Analysis of Tracked Vehicle Pass Through Scar Obstacle	172
7.2.2	Simulation of Tracked Vehicle Pass Through Scar Obstacle	173
7.2.3	Assessment of Scar Obstacle Trafficability of Tracked Vehicles	177
7.3	Ditch Obstacle Trafficability of Tracked Vehicle	180
7.3.1	Analysis of Tracked Vehicle Pass Through Ditch Obstacle	180
7.3.2	Simulation of Tracked Vehicle Pass Through Ditch Obstacle	181
7.3.3	Assessment of Ditch Obstacle Trafficability of Tracked Vehicles	185
<b>Chapter 8</b>	<b>Analysis of Driving Properties of Tracked Vehicles on Soft Road and the Test of Ground Parameters</b>	190
8.1	Analysis of the Driving Properties of Tracked Vehicles on Soft Road	190
8.1.1	Evaluation Indices of the Driving Performance of Tracked Vehicles on Soft Road	190
8.1.2	Analysis of the Influence of Structure Parameters of Tracked Vehicles on Driving Performance on Soft Road	191
8.1.3	Prediction and Comparison of Driving Performance of Tracked Vehicles	203
8.2	Parameters Test of Driving Ground Properties of Tracked Vehicles	205
8.2.1	Testing Methods of the Ground Parameters	205