



国防科技图书出版基金

空投用缓冲气囊系统 优化与环境适应性评价

Optimization and Environmental Adaptability Evaluation
of Airbag Landing Attenuation System for Airdrop

王红岩 芮强 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

空投用缓冲气囊系统优化与 环境适应性评价

Optimization and Environmental Adaptability
Evaluation of Airbag Landing Attenuation
System for Airdrop

王红岩 芮强 洪煌杰 李建阳 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空投用缓冲气囊系统优化与环境适应性评价/王红岩
等著. —北京:国防工业出版社, 2016. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 10639 - 8

I. ①空… II. ①王… III. ①伞降 - 空投 - 技术 - 研
究 IV. ①V353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 075375 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6 1/8 字数 168 千字

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 69.00 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	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
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	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	陆军
	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

缓冲气囊以其缓冲效率高、质量轻、成本低廉和可重复使用等特点,广泛应用于航天器软着陆、无人机和运载火箭回收以及重装空投防护等领域。

在军事领域,气囊着陆缓冲系统广泛应用在运载火箭以及无人机的回收系统中。20 世纪 90 年代,美国 Kistler 宇航公司提出并开发了全球首个整体可重复使用的运载火箭回收气囊,即 K-1 运载火箭气囊着陆缓冲系统。K-1 运载火箭的一、二级火箭均采用气囊着陆缓冲技术。其中,一级火箭的回收质量约 20t,二级火箭的回收质量约 12t,气囊缓冲系统提供的最大过载值不超过 4g,能够防止火箭箭体发生翻滚。俄罗斯在其第四代空降车上配备了新型气囊缓冲系统,该系统承载能力达到 20t 级,属于自带充气系统的主动控制式缓冲气囊,能够满足在复杂环境条件下使用要求。

在航天领域,新一代的载人飞船着陆系统和外太空探测器软着陆装置大量采用缓冲气囊式回收系统。2004 年,NASA 在研制新一代载人飞船——“猎户座”飞船的回收系统中采用主动控制排气式气囊缓冲方案,并于 2007 年完成了全面的投放试验测试。在同一时期,欧空局为新一代火星探测飞船研制了一种多气室、主动控制排气式气囊着陆缓冲系统,并应用在 2014 年的火星探测任务中。2010 年,美国波音公司设计开发的 CST-100 近地轨道载人飞船的着陆缓冲系统中基本继承了“猎户座”飞船缓冲气囊的设计。2014 年,我国也计划开发针对新一代多用途飞船返回舱的气囊着陆缓冲系统。

我国从俄罗斯引进的空投用气囊缓冲系统,属于 10t 级缓冲平台。虽然有严格的空投操作规范保证空投的正常实施,但是,研制方和使用

方都迫切需要深入探究气囊缓冲系统使用规范的量化标准、影响着陆安全性的关键因素以及气囊缓冲系统环境适应性的评价方法等问题。为了提高气囊缓冲系统对复杂环境的适应能力,气囊缓冲系统的主动控制技术已引起人们的广泛关注。

国内在排气式缓冲气囊的主动控制领域的研究起步较晚,目前还处于探索阶段。国外的研究成果主要应用在空间探测器和载人飞船的回收装置中。到目前为止,制约排气式气囊缓冲系统发展的主要问题仍然集中在试验技术、气囊主动控制技术等方面。在气囊的优化设计过程中,巨大的试验工作量迫使该工作依赖于仿真模拟技术,而大规模计算工作量需要采用替代模型的方法,这使得替代模型的建模方法和提高模型精度成为关键技术。目前,研究人员在探讨缓冲气囊优化设计的同时,也在不断深入研究工况参数和环境因素对缓冲气囊工作效能的影响,试图通过控制排气口的开度、开启压力或控制开启等方式改善缓冲气囊的着陆响应特性,提高系统的环境适应性。

本书介绍了空投用气囊缓冲系统的建模方法和有限元模型参数修正方法,在着陆缓冲过程模拟和系统响应特性分析基础上,提出利用替代模型技术对空投用气囊缓冲系统结构参数进行多目标优化的方法;设计开发了基于过载信号控制排气口主动开启式气囊缓冲系统,提高了气囊缓冲系统在复杂工况下的着陆稳定性;研究提出了空降车在复杂环境下着陆冲击响应特征的统计计算方法,可以实现对气囊着陆缓冲系统的综合评价。第1章对重装空投技术、空投用气囊缓冲技术等进行了综述。第2章描述气囊缓冲系统有限元模型参数修正方法,设计开发了一套载荷—气囊缓冲系统并搭建了室内跌落试验平台,以气囊缓冲特性的试验数据为标准,进行了气囊有限元模型参数修正。第3章讨论了空投用气囊缓冲系统的优化技术,通过构建气囊缓冲系统响应替代模型,考虑了缓冲气囊的缓冲性能和横向稳定性,实现了对气囊缓冲系统结构参数的多目标优化,并对比分析了优化前后的气囊缓冲特性。第4章讨论了气囊缓冲系统环境适应性评价方法,结合气囊系统的非线性有限元模型、响应替代模型和蒙特卡罗计算方法,预测不

同空投着陆环境下的着陆冲击响应;开发了空投用气囊缓冲系统环境适应性评估系统,该系统可作为复杂环境下空投训练可行性评价的技术手段和气囊缓冲系统综合性能评估的基础平台。第5章提出了几种提高气囊缓冲特性的关键技术,包括充气式缓冲气囊、气囊排气口面积控制技术和增压型气囊技术,提高了空投用气囊缓冲系统的环境适应性,为研究提高缓冲气囊环境适应性提供了理论基础。第6章讨论了排气口开启主动控制式缓冲气囊技术,设计开发了一种基于过载开关控制排气口主动开启式缓冲气囊,通过跌落试验和仿真分析研究了主动控制式气囊的缓冲特性和着陆稳定性,最后对该气囊缓冲系统进行了综合评价。

感谢高连华教授对全书的统稿和所提出的许多有益的建议。

由于时间仓促和作者水平有限,书中难免出现疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2015年8月16日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 重装空投技术	1
1.1.1 制动火箭	2
1.1.2 纸蜂窝	3
1.1.3 缓冲气囊	4
1.2 气囊缓冲技术	5
1.2.1 缓冲气囊充气技术	5
1.2.2 排气口开启压力控制技术	7
1.2.3 排气口面积控制技术	8
1.2.4 缓冲气囊试验验证研究现状	10
1.3 复杂系统的优化问题研究现状	13
第2章 气囊缓冲系统建模及有限元模型参数修正	17
2.1 气囊缓冲系统有限元建模与仿真	17
2.1.1 装备车体结构模型	18
2.1.2 基于控制体积法的有限元建模	23
2.1.3 气囊缓冲系统接触模型	27
2.1.4 着陆缓冲过程仿真分析	30
2.2 气囊缓冲系统室内跌落试验	44
2.2.1 气囊缓冲系统及试验平台	44
2.2.2 试验数据处理与结果分析	48
2.3 气囊缓冲系统模型参数修正方法	52

2.3.1	模型修正方法	52
2.3.2	缓冲气囊模型的待修正参数	55
2.3.3	修正用替代模型构建	57
2.3.4	修正后模型及其试验验证	61
第3章	空投用气囊缓冲系统的优化技术	64
3.1	气囊缓冲系统设计变量的选取	64
3.1.1	参数灵敏度分析	64
3.1.2	基于变网格的结构参数化方法	66
3.2	气囊缓冲系统优化目标的替代模型	68
3.2.1	气囊缓冲系统替代模型的设计空间与响应	68
3.2.2	优化目标替代模型的拟合方法比较分析	71
3.3	基于替代模型的气囊缓冲系统结构参数优化	77
3.3.1	气囊缓冲系统多目标优化方法	77
3.3.2	气囊缓冲系统结构优化结果分析	79
3.3.3	优化前后系统响应的对比分析	81
第4章	气囊缓冲系统环境适应性评价方法	84
4.1	着陆工况参数统计分布	85
4.1.1	着陆工况参数的统计计算方法	85
4.1.2	着陆工况参数统计分布规律	86
4.2	着陆响应特性的替代模型构建	88
4.2.1	试验设计	88
4.2.2	着陆响应特性的替代模型拟合	90
4.2.3	着陆响应特性替代模型的拟合精度评价	92
4.3	着陆工况参数灵敏度分析	94
4.4	基于蒙特卡罗计算方法的冲击响应的统计计算	95
4.5	空投用气囊缓冲系统环境适应性	99
4.6	优化前后气囊缓冲系统的环境适应性评价	102
4.7	空投系统环境适应性评估系统开发及应用	108

第5章 提高缓冲气囊环境适应性的几种关键技术	116
5.1 充气式缓冲气囊	116
5.1.1 气囊充气压力对缓冲特性的影响	117
5.1.2 气囊排气开启压力对缓冲特性的影响	120
5.2 气囊排气口面积控制技术	121
5.2.1 可控排气口气囊	121
5.2.2 海拔高度与气囊排气口面积的匹配技术	123
5.3 增压型缓冲气囊技术	131
第6章 排气口主动开启控制式缓冲气囊	136
6.1 被动式气囊着陆姿态对缓冲特性的影响	136
6.2 主动式缓冲气囊试验模型	140
6.2.1 主动式缓冲气囊开发	140
6.2.2 加速度开关控制器	142
6.2.3 系统延时时间分析	144
6.3 主动式缓冲气囊跌落响应特性	144
6.3.1 垂直跌落缓冲过程分析	144
6.3.2 跌落稳定性分析	149
6.4 空投用主动控制式气囊缓冲系统的匹配与评价	151
6.4.1 空投用主动控制式气囊缓冲系统的匹配设计	152
6.4.2 空投用主动控制式气囊缓冲系统的评价	164
6.4.3 复杂环境下气囊缓冲系统的综合性能对比	168
结束语	171
参考文献	172

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Heavy Equipment Airdrop Technology	1
1.1.1	Retrorocket	2
1.1.2	Paper Honeycomb	3
1.1.3	Attenuation Airbag	4
1.2	Airbag Landing Attenuation Technology	5
1.2.1	Gas Charging Technique of Attenuation Airbag	5
1.2.2	Control Technique of Valve Burst Pressure	7
1.2.3	Vent-control Technique	8
1.2.4	Development of Experimental Verification of Attenuation Airbag	10
1.3	Present Situation of Optimization Problem of Complex System	13
Chapter 2	Modeling and Updating Method of FE Model of Airbag Landing Attenuation System	17
2.1	FE Modeling and Simulation of Airbag Landing Attenuation System	17
2.1.1	Armored Hull Model	18
2.1.2	Airbag FE Modeling Based on Control Volume	23
2.1.3	Contact Model in Airbag Landing Attenuation System	27
2.1.4	Simulation of Landing Attenuation Process	30
2.2	Dropping Test of Airbag Landing Attenuation System	44
2.2.1	Airbag Landing Attenuation System and Test System	44

2.2.2	Test Data Processing and Result Analysis	48
2.3	Parameter Updating of Airbag Landing Attenuation	
	System Model	52
2.3.1	Model Updating Method	52
2.3.2	Airbag Parameters for Updating	55
2.3.3	Establishment of Substitute Model for Updating	57
2.3.4	Model after Updating and Test Verification	61

Chapter 3 Optimization of Airbag Landing Attenuation

	System for Airdrop	64
3.1	Design Variable of Airbag Landing Attenuation System	64
3.1.1	Parameters Sensitivity Analysis	64
3.1.2	Structure Parameterization Based on Meshing	
	Updating	66
3.2	Substitute Model of Optimization Objects of Airbag	
	Landing Attenuation System	68
3.2.1	Design Space and Response of Airbag Landing	
	Attenuation System Substitute Model	68
3.2.2	Compare and Analysis of Fitting Methods of	
	Optimization Objects Substitute Model	71
3.3	Parameter Optimization of Airbag Landing Attenuation	
	System Based on Substitute Model	77
3.3.1	Multi-objective Optimization Method of Airbag	
	Landing Attenuation System	77
3.3.2	Optimization Result Analysis of Airbag Landing	
	Attenuation System	79
3.3.3	Comparison of System Response between	
	Optimized System and Original System	81

Chapter 4 Evaluation Method of Environmental Adaptability of Airbag Landing Attenuation System

4.1	Probability Distribution of Landing Condition	
-----	---	--

Parameters	85
4. 1. 1 Statistic Calculation Method of Landing Condition Parameters	85
4. 1. 2 Probability Distribution Regularities of Landing Condition Parameters	86
4. 2 Establishment of Substitute Model of Landing Response Characteristic	88
4. 2. 1 Design of Experiments	88
4. 2. 2 Fitting of Substitute Model of Landing Response Characteristic	90
4. 2. 3 Assesment of Fit Goodness for Substitute Model of Landing Response Characteristic	92
4. 3 Sensitivity Analysis of Landing Condition Parameters	94
4. 4 Statistic Calculation of Impact Response Based on Monte Carlo Method	95
4. 5 Environmental Adaptability of Airbag Landing Attenuation System for Airdrop	99
4. 6 Environmental Adaptability Evaluation of Optimized Airbag Landing Attenuation System and Original System	102
4. 7 Environmental Adaptability Evaluation System for Airdrop System	108

Chapter 5 The Key Technologies for Improving the Environmental Adaptability of Airbag Landing Attenuation System

5. 1 Inflatable Airbag	116
5. 1. 1 Inflatable Pressure Effect on Attenuation Characteristics	117
5. 1. 2 Exhaust Opening Pressure Effect on Attenuation Characteristics	120
5. 2 Vent Area Control Technology	121

5.2.1	Controllable Vent Airbag	121
5.2.2	Matching Technology of Altitude with Vent Area of Airbag	123
5.3	Booster Type Airbag Technology	131
Chapter 6 Active Exhaust Control Airbag Technology		136
6.1	Passive Airbag Landing Posture Effect on Attenuation Characteristics	136
6.2	Active Airbag Principle Test System	140
6.2.1	Active Airbag for Test	140
6.2.2	Acceleration Control Switch	142
6.2.3	System Delay Analysis	144
6.3	Research on Active Airbag Drop Response Characteristics	144
6.3.1	Vertical Dropping Attenuation Process Analysis ...	144
6.3.2	Dropping Stability Analysis	149
6.4	Matching and Evaluation of Active Exhaust Control Airbag Landing Attenuation System for Airdrop	151
6.4.1	Matching Design of Active Exhaust Control Airbag Landing Attenuation System for Airdrop	152
6.4.2	Evaluation of Active Exhaust Control Airbag Landing Attenuation System for Airdrop	164
6.4.3	Comprehensive Performance Comparison of Airbag Landing Attenuation System in Complex Environment	168
Conclusion		171
References		172

第1章

绪论

装备空投是指从飞行器上用伞或者其他有效减速装置投放武器装备,使空降部队实现远程快速机动、超越自然地理障碍和实施纵深打击。随着空投技术的发展,已经实现了轻型坦克、火炮以及牵引车等武器装备的空投。本书研究的装备空投主要以空投轻型装甲车为研究对象。

1.1 重装空投技术

重装空投是通过运输机空运、利用降落伞或其他气动力减速器将重型武器装备等投送到指定空投地点的一种技术^[1]。美国、俄罗斯等军事大国对重装空投的研究起步较早,空运、空投能力处于世界领先水平。表1-1给出了美国、俄罗斯与我国在重装空投领域的现状^[2-4]。

表 1-1 重装空投发展现状

国别	起步时间	运输机型	运载能力/t	缓冲装置	领先技术
美国	1940 年	C130	18.9	纸蜂窝	超低空空投 精确空投
		C141	31.5		
		C-5A	118		
俄罗斯	1940 年	伊尔-76	40	制动火箭 缓冲气囊	人车一体空投
		安-22	80		
		安-124	150		
中国	1985 年	运-8	20	缓冲气囊	—
		伊尔-76	40		