



国防科技图书出版基金

飞船返回舱降落伞 系统动力学

Dynamics of Parachute-Capsule
Recovery System

张青斌 唐乾刚 彭勇 王海涛 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

飞船返回舱降落伞 系统动力学

Dynamics of Parachute-capsule
Recovery System

张青斌 唐乾刚 彭勇 王海涛 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

飞船返回舱降落伞系统动力学/张青斌等著. —北京:
国防工业出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-118-09039-0

I. ①飞... II. ①张... III. ①宇宙飞船—返回舱
—降落伞—系统动态学—研究 IV. ①V445. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 184920 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 245 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 62.00 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 镭	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

载人飞船回收系统的工作过程具有非常复杂的动力学特性,它涉及到空气动力学、弹性力学、结构力学、多体动力学、飞行力学等诸多学科。回收着陆系统的工作过程由一系列按特定程序依次进行的动作所组成,程序和动作的不可逆性是其特点之一。回收着陆程序一旦启动,各项动作就按预定的次序进行下去,直至返回舱着陆。如果在中途出现故障,不可能将程序暂停,也不能将动作复演。在整个回收着陆程序中,如果有某一个程序动作失效,就有可能导致着陆失败。回收着陆过程的不可逆性对回收着陆段的应急救生带来困难,一旦出现危险情况,外界无法采取营救措施,因此回收着陆系统必须具有很高的可靠性。

近十几年来,作者一直从事与飞船返回舱降落伞系统相关的理论及应用研究工作,主要包括巨型伞的充气过程建模、充气过程中伞衣尾流再附现象的动力学分析、吊挂系统的建模及物—伞多体系统的动力学建模。这些研究是对飞船回收系统的动力学特性进行分析和评定的理论基础。本书不仅可作为大型降落伞系统设计的参考书,也可作为高等工科院校飞行器设计、一般力学、航空航天等相关科研人员的参考书。作者撰写此书总结近十多年来的研究成果,而且诚望与国内广大同行进行交流。限于作者水平,本书必有许多不足之处,恳请读者批评指正。

最后,作者十分感谢国防科技图书出版基金的资助,并对所有给予关心和帮助的各位同仁,表示诚挚的谢意!

作 者

2013 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 载人飞船降落伞回收系统	1
1.2 降落伞关键动力学问题	3
1.2.1 降落伞的工作过程	3
1.2.2 降落伞的拉直过程	3
1.2.3 降落伞的充气过程	6
1.2.4 稳定下降过程	12
1.2.5 转化吊挂过程	15
1.3 本书主要内容	15
第二章 降落伞动力学	17
2.1 物体在理想流体中的运动	17
2.2 降落伞的动力学方程	23
第三章 一类开链式多刚体的 CFA 算法	30
3.1 旋量形式的刚体动力学方程	30
3.2 CFA 仿真算法	33
3.2.1 系统描述	33
3.2.2 较约束力递推关系	35
3.2.3 仿真算法	39
3.3 一个简单算例	40
3.3.1 方法 1:拉格朗日法	40
3.3.2 方法 2:CFA 递推算法	41
第四章 绳索动力学	44
4.1 绳索的几何非线性特征	44
4.2 绳索的阻尼弹簧模型	46

4.2.1	模型描述	46
4.2.2	绳段单元内力的计算	47
4.2.3	绳段单元外力的计算	48
4.2.4	系统动力学方程	51
4.3	绳索的多刚体模型	52
4.3.1	模型描述	52
4.3.2	约束力递推关系	54
4.4	绳索的连续模型	56
4.4.1	绳索的运动描述	56
4.4.2	系统的动力学方程	58
第五章 降落伞拉直过程动力学		61
5.1	Wolf 直线拉出模型	61
5.2	拉直过程的阻尼弹簧模型	63
5.2.1	模型假设	63
5.2.2	减速伞的动力学方程	64
5.2.3	伞包的动力学方程	66
5.2.4	拉出绳段结点的动力学方程	67
5.2.5	正在拉出伞绳结点的动力学方程	69
5.2.6	返回舱的动力学方程	70
5.3	拉直过程的多刚体模型	70
5.3.1	模型描述	70
5.3.2	拉直过程的 CFA 算法	71
5.4	计算结果与分析	72
5.4.1	拉直过程中偏离距离的定义	72
5.4.2	拉直过程的初始条件	73
5.4.3	高空突风对主伞拉直过程的影响	73
5.4.4	减速伞阻力面积对主伞拉直过程的影响	78
5.4.5	系绳力(捆绑带强度)对主伞拉直过程的影响	79
5.4.6	含有部分伞衣抖出运动的拉直过程	81
5.5	动力学模型验证与分析	84
5.5.1	与 Purvis 计算结果的比较	84
5.5.2	多刚体与阻尼弹簧模型仿真结果的相互对比	86
5.5.3	与空投试验的对比	88

第六章 降落伞充气性能的计算	90
6.1 降落伞的几何描述参数	90
6.2 伞衣充满条件	92
6.3 伞衣阻力面积变化	92
6.3.1 一次充满的伞衣	93
6.3.2 收口伞衣	94
6.4 伞衣充满时间	95
6.4.1 无收口密实伞衣充满时间的计算	95
6.4.2 无收口开缝伞衣充满时间的计算	98
6.4.3 收口伞衣充满时间的计算	98
6.5 开伞力	99
6.6 应用算例	101
6.6.1 平面密实圆伞充满时间的计算	101
6.6.2 飞船减速伞充气性能的估算	102
6.6.3 飞船主伞充气性能的估算	103
第七章 考虑流固耦合的充气动力学	106
7.1 伞系统质量阻尼弹簧模型	106
7.2 初始充气阶段伞衣周围流场模型	110
7.2.1 基本假设	111
7.2.2 伞衣内部压力分布	111
7.3 主充气阶段伞衣周围流场模型	114
7.3.1 基本假设	114
7.3.2 方程推导	114
7.4 计算结果及分析	116
7.4.1 初始充气模型的结果及分析	116
7.4.2 主充气阶段模型的结果及分析	118
第八章 用黏性涡方法计算伞衣绕流	124
8.1 涡方法的理论基础	125
8.1.1 流体控制方程	125
8.1.2 涡方法	126
8.1.3 物体所受气动力的计算	129
8.2 涡方法的数值实现	130

8.2.1	物面的离散及物面产生涡量的计算	132
8.2.2	利用快速多极子算法计算各涡元的诱导速度	136
8.2.3	涡元的黏性扩散	139
8.2.4	物面剪切涡量的脱落	142
8.2.5	物体气动力计算	142
8.3	方法及计算程序的验证	143
8.3.1	卡门涡街的形成过程	144
8.3.2	圆柱表面压力分布	145
8.3.3	圆柱的阻力系数及升力系数	146
8.4	伞衣上气动力的计算	149
第九章	充气过程中尾流再附现象的动力学分析	155
9.1	尾流再附现象的动力学模型	155
9.1.1	物—伞系统的运动方程	155
9.1.2	伞衣尾流运动方程	157
9.1.3	伞衣与尾流之间的动量传递	158
9.1.4	方程求解	159
9.2	模型验证	159
9.3	应用算例	161
第十章	吊挂系统新的建模方法	164
10.1	问题描述	164
10.2	约束方程	166
10.2.1	伞绳结点的力平衡方程	166
10.2.2	中间点的力平衡方程	166
10.3	方程组的求解	167
10.3.1	张力—应变曲线	167
10.3.2	初始值	168
10.3.3	迭代算法	168
10.4	应用算例	168
第十一章	伞舱盖与伞—舱组合体相对运动分析	172
11.1	伞—舱组合体的动力学模型	173
11.1.1	坐标系的定义	173
11.1.2	稳定下降过程中伞—舱组合体的动力学方程	173

11.1.3	拉直过程的动力学方程·····	177
11.1.4	降落伞充气过程的动力学方程·····	179
11.2	伞舱盖的动力学模型·····	181
11.2.1	坐标系定义·····	181
11.2.2	伞舱盖动力学方程·····	182
11.2.3	伞舱盖弹射分离动力学模型与运动方程·····	183
11.3	动力学模型验证与分析·····	183
11.4	计算结果与分析·····	186
11.4.1	伞—舱组合体“几何参考半径”的确定·····	186
11.4.2	伞舱盖和伞—舱组合体相对运动统计特征的 计算与分析·····	189
11.5	干扰因素的灵敏度分析·····	196
11.5.1	正交试验设计·····	196
11.5.2	极差分析与方差分析·····	197
11.5.3	数值结果分析·····	199
参考文献·····		201

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Parachute recovery system of manned spacecraft	1
1.2 Key dynamic problems	3
1.2.1 The working procedure of parachute	3
1.2.2 The deployment phase of parachute	3
1.2.3 The inflation of parachute	6
1.2.4 Steady descent phase of parachute	12
1.2.5 Suspension line transferring process	15
1.3 The structure of the book	15
Chapter 2 Parachute dynamics	17
2.1 Parachute motion in ideal airflow	17
2.2 Motion equations of Parachute	23
Chapter 3 A constraint force algorithm (CFA) for open chain multi-body system	30
3.1 Rigid dynamic equation in form of spinor	30
3.2 CFA simulation algorithm	33
3.2.1 System description	33
3.2.2 Hinged constraint force iterative relation	35
3.2.3 Simulation algorithm	39
3.3 A simple example	40
3.3.1 Lagrange method	40
3.3.2 Constraint force iterative algorithm	41
Chapter 4 Tether dynamics	44
4.1 Nonlinear Characteristic of tether geometry	44

4.2	Semi-damp-spring model	46
4.2.1	Description of the model	46
4.2.2	Calculation of inertial force	47
4.2.3	Calculation of external force	48
4.2.4	Dynamic model of ther system	51
4.3	Multi-body model of tether system	52
4.3.1	Description of the model	52
4.3.2	Constraint force iterative relation	54
4.4	Tether continuous model	56
4.4.1	Description of tether motion	56
4.4.2	System dynamic equations	58
Chapter 5	Dynamics model of parachute deployment	61
5.1	Wolf's model for line deployment	61
5.2	Damp-spring model of deployment process	63
5.2.1	Model assumption	63
5.2.2	Dynamic equation of pilot parachute	64
5.2.3	Dynamic equation parachute bag	66
5.2.4	Dynamic equation of deployed tether node	67
5.2.5	Dynamic equation of deploying tether node	69
5.2.6	Dynamic equation of capsule	70
5.3	Multi-body model of parachute deployment	70
5.3.1	Model description	70
5.3.2	CFA of deployment	71
5.4	Simulation and analysis	72
5.4.1	Definition of departure distance	72
5.4.2	The initiation condition of deployment	73
5.4.3	The influence of gust during deployment	73
5.4.4	The influence of pilot chute drag	78
5.4.5	The influence of tie force	79
5.4.6	Deployment with partial canopy shake-out movement	81
5.5	Dynamic model validation and analysis	84
5.5.1	Comparisons with Purvis's model	84
5.5.2	Comparisons between multi-body model and damp-spring model	86

5.5.3	Comparisons with airdrop experiment	88
Chapter 6	Calculation of parachute inflation performance	90
6.1	Geometry parameter description of parachute	90
6.2	The precondition for fully inflation of canopy	92
6.3	Canopy drag area in parachute inflation	92
6.3.1	Canopy full inflation by one time	93
6.3.2	Reefing canopy	94
6.4	Canopy filling time	95
6.4.1	Inflation time calculation for solid-material parachute with no-reefing	95
6.4.2	Inflation time calculation for parachute with gaps	98
6.4.3	Reefed parachute	98
6.5	Snatch loads	99
6.6	Application examples	101
6.6.1	Inflation time calculation for solid-material parachute	101
6.6.2	Inflation time estimation for pilot parachute	102
6.6.3	Inflation time estimation for main parachute	103
Chapter 7	Fluid-structure interaction(FSI) model of parachute inflation	106
7.1	Damp-spring model of parachute system	106
7.2	Flow field model around canopy in the initial inflation	110
7.2.1	Basic assumption	111
7.2.2	Inner pressure distribution of canopy	111
7.3	Flow field model around canopy in the main inflation phase	114
7.3.1	Basic assumption	114
7.3.2	Equation derivation	114
7.4	Results analysis	116
7.4.1	Results analysis of initial inflation phase	116
7.4.2	Results analysis of main inflation phase	118
Chapter 8	Calculating the flow around canopy by viscous vortex method	124
8.1	Basic theory of Vortex method	125

8.1.1	Flow control equation	125
8.1.2	Vortex method	126
8.1.3	Aerodynamic calculation	129
8.2	Numerical implementation of vortex method	130
8.2.1	Calculation of surface discretion and vortex generation	132
8.2.2	The vortex induced velocity calculated using fast multi-pole method(FMM)	136
8.2.3	Vortex viscosity diffusion	139
8.2.4	Shear vortex shedding on the surface	142
8.2.5	Aerodynamic calculation on the surface	142
8.3	Validation of method and program	143
8.3.1	The form procedure of carmen vortex	144
8.3.2	Vortex column surface pressure distribution	145
8.3.3	Drag coefficient and lift coefficient calculation	146
8.4	Aerodynamic calculation around canopy	149

Chapter 9 Dynamic of wake recontact phenomenon during parachute inflation 155

9.1	Wake recontact dynamic model	155
9.1.1	Parachute-forebody dynamic equation	155
9.1.2	Canopy wake motion equation	157
9.1.3	The momentum transformation between canopy and wake	158
9.1.4	Equation solving	159
9.2	Model validation	159
9.3	Application examples	161

Chapter 10 A novel modeling method for suspension system 164

10.1	Problem description	164
10.2	Constraint equation	166
10.2.1	Force balance of the tether node	166
10.2.2	Force balance equation of middle point	166
10.3	The solution of equations	167
10.3.1	Stress vs strain curve	167
10.3.2	Initial value	168

10.3.3	Iteration algorithm	168
10.4	Application example	168
Chapter 11	Relative motion between nose cap and parachute-capsule assembly	172
11.1	Dynamic model of parachute-capsule system	173
11.1.1	Definition of reference frames	173
11.1.2	Dynamic model of parachute-capsule during steady descent	173
11.1.3	Parachute dynamic equation	177
11.1.4	Recovery capsule dynamic equation	179
11.2	Nose cap dynamic model	181
11.2.1	Definition of reference frames	181
11.2.2	Dynamic model of nose cap	182
11.2.3	Ejection model of nose cap	183
11.3	Dynamic model validation	183
11.4	Result analysis	186
11.4.1	Definition of geometry reference radius	186
11.4.2	Statistic character of relative motion	189
11.5	Sensitivity analysis of interference factor	196
11.5.1	Orthogonal experiment	196
11.5.2	Range analysis and variance analysis	197
11.5.3	Analysis for numerical results	199
References		201