



飞行器系列丛书

气动减速技术

AERODYNAMIC DECELERATION TECHNOLOGY

余莉 著



科学出版社

飞行器系列丛书

气动减速技术

余 莉 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以气动减速系统工作包线为主线,系统介绍了各类气动减速系统的工作原理、结构形式、性能特点和设计分析方法,其中包括作者在科研过程中的一些实践经验及创新成果。本书共8章。第1~2章介绍气动减速系统的作用、工作原理、应用情况及与之密切相关的基本理论。第3~4章阐述高超音速气动减速系统的相关内容,包括航天器再入减速系统、充气式减速装置、可展开刚性减速装置的工作特点和性能分析方法。第5~7章对降落伞和翼伞的工作性能和分析方法进行介绍,包括开伞控制、群伞设计、尾流及伞衣变形等问题,建立了降落伞工作过程的动力学分析模型。第8章着重对充气式减速器、常规降落伞和冲压式翼伞的设计要点进行介绍,包括几何设计、强度分析及材料选择等内容。

本书可供从事气动减速技术和其他相关领域的工程师和研究人员参考,希望能对我国气动技术减速技术的相关研究工作起到一定的推动作用。

图书在版编目(CIP)数据

气动减速技术/余莉著. —北京:科学出版社,
2018.10

(飞行器系列丛书)

ISBN 978-7-03-059132-6

I. ①气… II. ①余… III. ①飞行器—减速装置
IV. ①V244

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第234887号

责任编辑:许健/责任校对:谭宏宇
责任印制:黄晓鸣/封面设计:殷靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

当纳利(上海)信息技术有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第一版 开本:B5(720×1000)

2018年10月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:397 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《飞行器系列丛书》编委会

名誉主任：赵淳生 郭万林 聂 宏

主 任：夏品奇

副 主 任：姚卫星 裘进浩 高存法

委 员（按姓氏笔画排序）：

王立峰 王同光 邓宗白 史治宇 余雄庆 陆志良

陈少林 陈仁良 陈国平 金栋平 赵 宁 胡俊辉

袁慎芳 蒋彦龙

丛 书 序

飞行器是指能在地球大气层内外空间飞行的器械,可分为航空器、航天器、火箭和导弹三类。航空器中,飞机通过固定于机身的机翼产生升力,是数量最大、使用最多的航空器;直升机通过旋转的旋翼产生升力,能垂直起降、空中悬停、向任意方向飞行,在航空器中具有独特的不可替代的作用。航天器可绕地球飞行,也可远离地球在外太空飞行。1903年,美国的莱特兄弟研制成功了人类第一架飞机,实现了可持续、有动力、带操纵的飞行。1907年,法国的科尔尼研制成功了人类第一架直升机,实现了有动力的垂直升空和连续飞行。1957年,人类第一颗人造地球卫星由苏联发射成功,标志着人类由此进入了航天时代。1961年,苏联宇航员加加林乘“东方1号”飞船进入太空,实现了人类遨游太空的梦想。1969年,美国的阿姆斯特朗和奥尔德林乘“阿波罗11号”飞船登月成功,人类实现了涉足地球以外的另一个天体。这些飞行器的成功,实现了人类两千年以来的各种飞行梦想,推动了飞行器的不断进步。

目前,飞行器科学与技术快速发展,各种新构型、新概念飞行器层出不穷,反过来又催生了许多新的飞行器科学与技术,促使人们不断地去研究和探索新理论、新方法。出版《飞行器系列丛书》,将为人们的研究和探索提供非常有益的参考和借鉴,也将有力促进飞行器科学技术的进一步发展。

本《飞行器系列丛书》,将介绍飞行器科学与技术研究的最新成果与进展,主要由南京航空航天大学从事飞行器设计及相关研究的教授、专家撰写。南京航空航天大学已研制成功了30多种型号飞行器,包括我国第一架大型无人机、第一架通过适航审定的全复合材料轻型飞机、第一架直升机、第一架无人直升机、第一架微型飞行器等,参与了我国几乎所有重大飞行器型号的研制,拥有航空宇航科学与技术一级学科国家重点学科。在这样厚重的航空宇航学科基础上,撰写出并由科学出版社出版本套《飞行器系列丛书》,具有十分重要的学术价值,将为我国航空航天界献上一份厚重的礼物,将为我国航空航天事业的发展作出一份重要的贡献。

祝《飞行器系列丛书》出版成功!

夏品奇

2017年12月1日于南京

前 言

气动减速装置是利用其结构形状和性能特征来改变飞行体气动特性,使飞行体减速并增加稳定性的装置。由于其质量轻、减速稳定效果好,在国防建设、科学研究、经济建设、体育运动等领域都有着非常重要的作用。它是航天器安全返回与进入的关键装置,是保障人员及物资安全着陆的重要装备,对于维持飞行弹头的轨迹及姿态起着积极的作用。如果气动减速系统出现故障,不仅会出现物毁人亡的悲剧,甚至可能造成重大的社会政治影响。

近 20 年,随着航空航天飞行器回收技术、航空救生技术、空降空投技术等领域的发展,基础研究逐渐深入,工程方法日趋完善,气动减速系统研制工作的科学性和可预测性也得到了很大的提高。虽然气动减速装置同飞行体(飞行器或前置载荷体)一起使用,但是它并不属于飞行体结构的组成部分。气动减速技术已经成为一个独立的专业。

降落伞是工程应用中最早、最为广泛的气动减速装置。早在 12 世纪,就已经出现类似降落伞的装置。但直到 18 世纪末,才在科学实验和气球跳伞表演中出现真正的降落伞。最初的降落伞是用刚性骨架保持张开的,以后逐渐出现了有中心孔的降落伞和全柔性伞,这些措施改善了降落伞的稳定性,利于携带,提高了实用性。第二次世界大战后,降落伞的发展更加迅速,出现了很多新的伞型,如环帆伞、旋转伞、翼伞等,满足了不同飞行体对气动性能的要求。当时的许多方法目前还在使用,如开伞拉绳和引导伞的开伞方法、伞包包伞方式、拉断绳减载方法等,这些措施提高了开伞安全性。降落伞的设计和分析水平也得到了很大的提高,形成了伞载系统动力学、降落伞空气动力学、降落伞流固耦合力学等研究方向。

随着航天技术、武器装备的发展,飞行体的速度、高度都大大提高,气动减速装置的工作包线也随之提高,降落伞的应用出现了新的技术问题:① 低密度下的充气展开问题;② 超音速下的高频喘振及强度问题;③ 超音速下的气动热载荷问题。为解决这些问题,出现了柔性充气式气动减速装置、半刚性气动减速装置以及刚性可展式气动减速装置。这些减速装置概念的提出始于 20 世纪 50~60 年代,并在 20 世纪 60 年代、80 年代及最近的十来年形成了 3 次研究高峰:进行了大量的风洞和飞行试验,获得了基本的气动性能数据,形成了超音速减速装置的基本理论模型。有的超音速气动减速装置已经应用在工程领域,有的还处在概念设计和试验论证阶段。

本书基于作者多年的工作积累和大量的文献调研,以气动减速系统工作包线为主线,系统地介绍了各类气动减速系统的工作原理、结构形式、性能特点和设计分析方法。全书共8章:第1章介绍气动减速系统的作用、工作原理和应用情况等;第2章为基础知识部分,介绍与气动减速系统结构和性能分析密切相关的基本理论和基本概念;第3~4章介绍超音速气动减速系统的相关内容,包括航天器再入减速过程基本理论和工作特性,充气式减速器及可展式刚性减速器的结构类型、工作特点和分析方法等;第5章在介绍降落伞基本类型的基础上,重点介绍降落伞的气动性能,包括降落伞高速运动时气动热问题、实际工作时的尾流问题、开伞控制问题、群伞设计问题及伞衣喘振变形等问题;第6章基于伞-载动力学理论介绍了降落伞从伞包拉出至稳定下降各运动阶段伞-载系统的轨迹及姿态分析方法等;第7章着重对冲压式翼伞的工作原理、性能特点和分析方法等进行介绍;第8章则是针对工程上常见的3类气动减速装置(充气式减速器、弹道型降落伞和冲压式翼伞)的设计要点展开介绍,包括几何结构设计、强度分析及材料选择等内容。

作者一直从事与气动减速系统相关的研究工作,所取得的每一点成绩都离不开同行的帮助、相关单位的支持,尤其是北京空间机电研究所、宏光空降装备有限公司、航宇救生装备有限公司的大力支持,在此表示深深的感谢!并对所有给予关心和帮助的各位同仁,表示诚挚的谢意!

本书可作为降落伞及其他气动减速装置设计的参考书,也可作为飞行器设计、人机与环境工程、一般力学、航空航天等相关教学科研人员的参考用书。限于作者水平,本书必有许多不足之处,恳请读者批评指正。

余 莉

2018. 8. 30

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 气动减速系统作用	1
1.2 工作原理	2
1.2.1 弹道系数	2
1.2.2 工作原理	3
1.3 类型及工作包线	4
1.3.1 类型	4
1.3.2 工作包线	5
1.4 气动减速装置的应用情况	7
1.4.1 飞行器回收	7
1.4.2 救生	10
1.4.3 空降空投	11
1.4.4 兵器	14
1.4.5 星际探测	14
1.4.6 飞机	16
1.4.7 高空空间应用	18
第 2 章 基本理论	21
2.1 坐标系及其变换	21
2.1.1 坐标系	21
2.1.2 坐标系之间的关系	22
2.1.3 运动状态量之间的关系	25
2.2 纺织材料及透气性	26
2.2.1 纺织材料原料及基本形态	26
2.2.2 纺织材料力学性能	27
2.2.3 纺织材料的透气性	29
2.2.4 织物透气性的影响因素	31
2.3 速度	33
2.3.1 地速与空速	33
2.3.2 表速、真速和实际空速	34
2.3.3 极限速度	34

2.4	过载	35
2.4.1	过载的概念	35
2.4.2	过载影响因素	36
2.5	气动性能	37
2.5.1	气动力	37
2.5.2	结构外形对气动性能的影响	39
2.5.3	透气性对气动性能的影响	40
2.5.4	工况对气动性能的影响	42
2.6	附加质量	45
2.6.1	附加质量的概念	45
2.6.2	附加质量的确定	48
第3章	航天器再入减速着陆系统	52
3.1	概述	52
3.1.1	再入航天器类型	52
3.1.2	再入系统工作环境	54
3.2	再入系统工作过程	58
3.2.1	再入过程	58
3.2.2	再入方式	60
3.3	航天器回收着陆系统	63
3.3.1	回收着陆过程	63
3.3.2	回收系统组成	65
3.3.3	伞舱盖分离过程	66
3.3.4	着陆缓冲过程	68
3.4	再入返回设计基本问题	70
3.4.1	技术体系	70
3.4.2	音障、热障和黑障	71
3.4.3	再入走廊	71
3.5	再入过程气动特性及飞行性能	75
3.5.1	概述	75
3.5.2	气动阻力与减速性能	76
3.5.3	气动升力与轨迹控制	77
3.5.4	配平迎角与稳定性能	78
3.6	再入过程气动热	79
3.6.1	气动热产生原因及影响	79
3.6.2	热流密度工程估算方法	81

3.6.3	参考焓方法	84
3.6.4	表面温度估算	86
3.7	再入航天器防热设计	87
3.7.1	气动热设计	87
3.7.2	防热方法	88
3.7.3	防热材料	89
第4章	超音速气动减速系统	92
4.1	概述	92
4.1.1	大载重任务需求	92
4.1.2	提高包线性能要求	94
4.2	柔性充气式气动减速装置	95
4.2.1	发展历程	95
4.2.2	结构分类	98
4.2.3	气球伞	101
4.2.4	充气式阻力锥	107
4.3	机械式气动减速装置	115
4.3.1	结构类型及特点	115
4.3.2	半刚性可展开伞状减速器	117
4.3.3	折叠板刚性减速装置	119
4.3.4	旋翼式气动减速装置	121
4.4	飞行性能	124
4.4.1	轨迹设计及控制	124
4.4.2	刚体运动方程	125
4.4.3	超音速减速系统轨迹计算	127
第5章	降落伞基础及气动性能	130
5.1	概述	130
5.1.1	发展历程	130
5.1.2	伞系统组成	131
5.2	伞衣类型	137
5.2.1	伞衣几何结构	137
5.2.2	密实织物伞	138
5.2.3	开缝伞	141
5.2.4	旋转伞	143
5.3	降落伞的气动性能	145
5.3.1	降落伞的气动力参数	145

5.3.2	结构对气动力的影响	146
5.3.3	伞衣压强分布及研究方法	148
5.3.4	降落伞的气动稳定性	154
5.4	降落伞的气动热问题	155
5.4.1	热平衡方程	155
5.4.2	对流换热系数	157
5.5	阻力特征及控制	159
5.5.1	意义	159
5.5.2	收口方法	160
5.5.3	收口绳的安装及结构	162
5.5.4	收口布的安装及结构	163
5.5.5	收口控制程度	165
5.6	尾流及影响	166
5.6.1	亚音速尾流	166
5.6.2	超音速尾流	167
5.6.3	尾流区影响因素	168
5.6.4	降落伞尾流及伞顶塌陷	170
5.7	群伞气动性能	174
5.7.1	概述	174
5.7.2	群伞性能特点	175
5.7.3	群伞设计要点	178
5.8	降落伞振动	180
5.8.1	伞衣振动	180
5.8.2	绳带振动	183
5.8.3	共振	186
第 6 章	伞-载系统动力学	188
6.1	降落伞的工作过程	188
6.2	降落伞开伞过程	189
6.2.1	降落伞开伞方式	189
6.2.2	降落伞开伞程序	190
6.2.3	降落伞的充气过程	192
6.2.4	降落伞的折叠和包装	193
6.3	拉直过程动力学	196
6.3.1	拉直阶段轨迹计算	196
6.3.2	拉直力计算模型	198

6.3.3	最大拉直力估算	201
6.3.4	拉直力影响因素	204
6.3.5	拉出过程设计要点	205
6.4	充气过程动力学	206
6.4.1	降落伞的充气性能	206
6.4.2	阻力特征及附加质量的变化	210
6.4.3	充气过程运动模型	215
6.4.4	最大开伞动载估算	217
6.4.5	开伞动载影响因素	222
6.4.6	充气过程设计要点	224
6.5	伞-载系统稳定稳降阶段	226
6.5.1	稳定阶段损失高度估算	226
6.5.2	伞-载系统的稳定性	227
6.5.3	伞-载系统稳定性判据	228
6.5.4	三维稳降阶段运动方程	231
6.5.5	伞-载系统稳定性影响因素	233
第7章	翼伞基础	238
7.1	概述	238
7.2	冲压式翼伞基本结构	240
7.3	翼伞气动特性	242
7.3.1	二维气动特性	242
7.3.2	翼伞气动特性	243
7.3.3	翼伞升阻比的影响因素	244
7.4	翼伞系统静稳定性	247
7.4.1	翼伞系统静稳定性分析	247
7.4.2	静稳定性影响因素	248
7.5	翼伞系统工作过程	250
7.6	开伞过程	252
7.6.1	开伞控制方法	252
7.6.2	充气过程运动模型	255
7.6.3	收口布三阶段模型	258
7.7	滑翔飞行过程	263
7.7.1	翼伞系统六自由度模型	263
7.7.2	翼伞系统平面运动模型	265
7.7.3	稳定滑翔运动	267

7.7.4	翼伞滑翔性能	268
7.8	牵引升空过程	271
7.9	翼伞操纵及减速雀降过程	273
7.9.1	翼伞的操纵	273
7.9.2	翼伞的雀降着陆运动	275
第8章	气动减速系统设计	277
8.1	充气式减速器设计	277
8.1.1	气球伞设计	277
8.1.2	充气式再入器设计	282
8.1.3	充气式减速器材料选择	284
8.2	弹道型降落伞设计	290
8.2.1	结构设计	290
8.2.2	强度计算	292
8.3	冲压式翼伞设计	299
8.3.1	翼型设计	299
8.3.2	伞衣设计	301
8.3.3	伞绳及操纵绳设计	304
8.3.4	其他附件设计	306
8.3.5	材料选择	307

第1章 绪 论

1.1 气动减速系统作用

飞行器或物体在空中运动时,若以安全不受到损伤的速度着陆,称为软着陆,反之,则为硬着陆。气动减速器是一种依靠其结构形状和性能特征来改变飞行器或运动物体气动特性,使飞行器稳定减速并实现软着陆的重要装置。气动减速装置最初均为折叠状态,和飞行器相连接并一起运动,但大多数气动减速装置并不属于飞行器结构的组成部分。为了论述问题的方便,本书将飞行器或运动物体统一称为载荷体或前置体。

气动减速装置最主要的作用就是大幅度降低载荷体的运动速度,保证载荷的着陆安全。气动减速装置若出现故障无法正常工作,有可能物(器)毁人亡,甚至造成非常严重的政治军事后果。

自1961年人类首次进入太空以来的50年间(1961~2010年),已有22名航天员献出了宝贵的生命,其中11人就是在返回着陆过程中牺牲的。1967年4月23日凌晨,苏联“联盟1号”飞船载着航天员弗拉基米尔·M.科马洛夫上校顺利升空,但在返回途中,由于降落伞没能正常打开,飞船带着一团火光,以每秒100多米的速度冲向地面,坠落于乌拉尔地区奥尔斯克以东65 km处,并发出几声猛烈的爆炸声,科马洛夫当场死亡。1971年8月,美国“阿波罗15号”飞船(Apollo 15)返回时3具主伞中1具被吹破,另外两具提前张开。虽然最终飞船安全溅落太平洋,但是落点偏离100 km远,溅落过载高达16g,险些酿成重大事故。“哥伦比亚号”航天飞机在1982年的先后两次飞行均是因降落伞出现故障,导致火箭助推器回收失败,第4次飞行更是造成价值3600万美元的助推器坠入深海,未能回收。2016年4月,美军173空降旅在空投装备训练中,由于降落伞没有正常打开,连续发生多起事故,造成大量武器车辆装备受损。我国在多次空投试验中,也因降落伞系统没有正常工作,造成空投装备损坏。

另一方面,气动减速系统还可以在物体运动过程中起稳定作用。有些物体对飞行中的姿态要求很高,像各种航弹,不仅要求弹道准确,还希望弹体在下降过程中稳定,以避免位于弹体头部的引信在飞行中受到摆动而触发。空投水雷、鱼雷则要求有一定的入水角,气动减速装置能使其稳定下降,并维持一定的入水角度。航天器返回舱在亚音速情况下气动稳定性比较差,回收降落伞能大

大提高舱体的稳定性能。另外,弹射座椅也常用稳定板(一种机械展开式气动减速装置)或降落伞来稳定座椅。可见,稳定物体是气动减速系统的另一重要作用。

由于气动减速装置展开后改变了载荷体的气动特性,因而大幅度减小了下降速度,从而使飞行轨迹发生变化。此外,有的气动减速装置具有一定的升力,可以对载荷体的飞行轨迹起一定的控制作用。如空投系统就常常采用冲压式翼伞来实现精确空投的目标。充气式再入减速器通过对飞行姿态控制来提高其滑翔性能,从而实现了对弹道轨迹的控制。因此,气动减速系统主要起减速、稳定作用,有时还具备一定的姿态控制及轨迹控制的能力。

1.2 工作原理

1.2.1 弹道系数

弹道系数是一个用来衡量飞行器克服空气阻力、维持飞行速度能力的数学模式。以飞船返回过程为例,空中运动时主要受到重力 G 、气动阻力 F_D 及气动升力 F_L 的作用(如图 1.1 所示),若采用简单的质点运动模型,则沿航迹方向,运动方程如下:

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = G \sin \theta - F_D \\ mv \frac{d\theta}{dt} = G \cos \theta - F_L \end{cases} \quad (1.1)$$

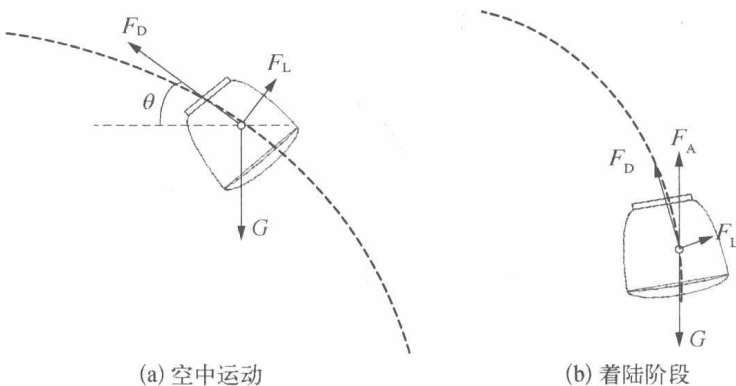


图 1.1 飞船返回减速过程受力图

只要有足够的飞行高度,飞行器最终会达到力平衡状态,此时飞行器呈垂直状态下落。气动合力和重力相等,即

$$G = F_A = \frac{1}{2}\rho v^2(CA) \quad (1.2)$$

对于一个物体重量一定的特定载荷体,要实现软着陆,降低着陆速度,就必须提高系统的气动特征面积(CA)。若系统重量越大,着陆速度也越大。因此评价飞行载荷减速能力的弹道系数 β 采用如下公式表示:

$$\beta = \frac{G}{C_D A} \quad (1.3)$$

根据上式描述,弹道系数为有量纲量,单位为 N/m^2 。对于降落伞气动减速系统,有时也用无量纲系数表示伞-载系统的减速能力,主要有下面两种描述方法。

方法一,以无量纲质量形式描述:

$$\beta_1 = \frac{m_{xt}}{\rho \pi D_0^3} \quad (1.4)$$

方法二,以包含减速系统气动特性的无量纲质量形式描述:

$$\beta_2 = \frac{m_{xt}}{\rho (C_D A)^{3/2}} \quad (1.5)$$

式中, m_{xt} 为系统质量; D_0 , $C_D A$ 分别表示减速装置的名义直径及阻力特征。

弹道系数越大,表明飞行系统速度衰减越慢。对于导弹等大多数飞行器,为了维持其高速的能力,弹道系数应该越大越好。但是若要对其进行软着陆减速回收,则应该减小弹道系数,最有效的措施就是增加阻力特征面积。

1.2.2 工作原理

气动减速装置最大的特点是不依靠外界动力,仅依靠自身的空气动力使系统减速,是一种无动力减速系统。根据上文可知,为了维持较小的速度飞行,首先必须减小飞行载荷的弹道系数。根据弹道系数定义(1.3)式,减小弹道系数有下面三种技术途径。

- (1) 减小飞行系统质量。气动减速系统常常采用抛弃质量的方式进一步减小着陆速度,如伞兵伞着陆前将武器装备通过吊篮提前释放。
- (2) 增加飞行系统阻力系数。飞行体受到各种形式的气动阻力(如摩擦阻力、

压差阻力、波阻等),影响气动阻力系数的因素有速度、气动角及形状,其中改变外形是气动减速系统常规通用的形式,如释放降落伞、释放系统外罩,都改变了飞行系统的气动阻力系数。

(3) 增加飞行系统名义面积。增加飞行系统名义面积是效果最显著的一种气动减速方式,根据飞行速度的不同,有采用刚性减速板方式、充气式阻力锥方式、降落伞方式等等。

图 1.2 为飞行体采用抛放质量结合降落伞的减速方式,当抛放质量减 50%,阻力系数增加 3 倍,可使弹道系数降至 $1/6$;当第二级降落伞打开后,阻力特征大大增加,弹道系数可在此基础上进一步降低至 $1/10$ 以下,大大减小了飞行器着陆速度。

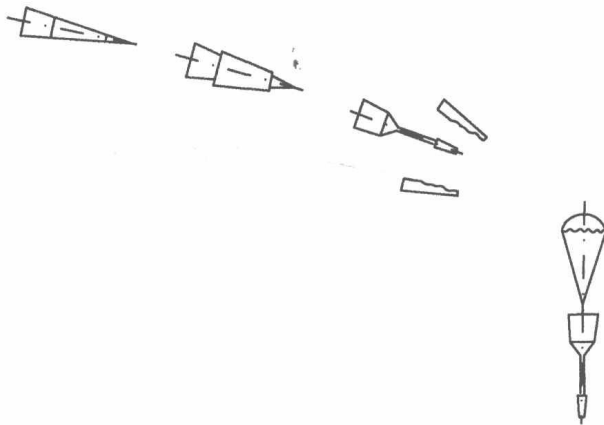


图 1.2 侧抛质量降落伞减速方式

1.3 类型及工作包线

1.3.1 类型

气动减速器可实现减速、稳定、救生、引导等多种功能,可应用于人员、物资、设备、飞行器等多种空间运动对象。采用不同的分类方法,气动减速器便有不同的种类和形式。

根据气动减速装置的气动性能来分类,主要包括弹道式气动减速器以及滑翔式气动减速器两大类型。我们知道,气动减速器最主要的工作特点是具有很好的气动阻力及气动稳定性,这种主要利用气动阻力,改变原载荷体飞行轨迹的减速装置为弹道式气动减速装置。有的气动减速装置除阻力以外,还有比较好的升力特性(如翼伞)。当这一类气动减速装置打开后,载荷体还可以依靠气动减速装置的滑翔能力,降落到预定的着陆地点,这一类减速装置称为滑翔式气动减速装置。弹