

固体火箭载荷设计基础

尹云玉 编著



中国宇航出版社

·北京·

前 言

固体火箭的设计要求主要取决于其所需要完成任务以及完成这些任务所需经历的各种工作环境和条件,也就是火箭所需经受的各种载荷。因此,只有准确地确定一枚火箭在其使用过程中的各种各样的内、外载荷,才能保证设计出的火箭既先进又可靠。相反,对主要载荷预计不足或者过高,则会造成火箭结构破坏或者非常笨重,以致不能满足总体性能要求。因此,有关火箭载荷的分析、计算、试验问题得到了广泛的研究。鉴于固体火箭是一个敏感的领域,能见到的比较详细的公开资料并不多。

由于载荷设计所涉及的问题很广泛,而研究起来又过于琐碎,故本书主要从工程设计的系统性出发,尽量以简单明了的公式来介绍载荷设计的内容、过程、方法,并使该书介绍的方法具有可操作性,以期对从事火箭载荷设计的工程技术人员有一定的参考价值。

众所周知,火箭设计是一项复杂的系统工程,它需要众多科技人员经过长期、大量的艰苦工作来完成。本书介绍的固体火箭载荷设计的许多成果包含了作者的单位领导、同事及相关协作单位科研人员的贡献,特别是竺润祥、邢福京、严孝安、陈振官、朱礼文、赵人濂、施钧昭等老师,为本书的完成给予了很大的帮助。在此,特向对作者完成本书提供过帮助的各位同志表示衷心的感谢!

由于作者知识水平所限,书中谬误之处在所难免,诚望读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 固体火箭载荷设计的任务	1
1.2 固体火箭载荷设计的现状	2
1.3 固体火箭载荷设计的发展方向	3
1.4 本书的内容	4
第 2 章 大气及海洋环境	5
2.1 引言	5
2.2 风	5
2.2.1 地面风	5
2.2.2 高空风	7
2.2.3 风场测量	11
2.3 波浪	11
2.3.1 浪级	12
2.3.2 波浪运动的基本方程与边界条件	13
2.3.3 线性波	14
2.3.4 非线性波	16
2.3.5 随机波浪理论	16
第 3 章 梁的内力及变形	19
3.1 引言	19
3.2 梁的外力	19
3.3 梁的剪力和弯矩	20
3.4 M 、 Q 间的微分关系式	21
3.5 梁的变形	22
3.6 载荷计算力学的研究范畴	24
第 4 章 固体火箭的动特性	26
4.1 单自由度系统的振动	26
4.2 二自由度系统振动	28
4.3 梁的弯曲振动	30
4.4 运动方程式系数	34
4.5 带纵向式分离头罩固体火箭动特性	39
第 5 章 水下载荷设计	42
5.1 空泡现象简述	43
5.2 局部空泡的描述	47
5.3 考虑空泡影响时潜地火箭横向外力作用特点	50

5.4	坐标系	56
5.4.1	发射坐标系	56
5.4.2	箭体坐标系	57
5.4.3	速度坐标系	57
5.4.4	水下载荷计算坐标系	57
5.4.5	船体坐标系	57
5.5	水下载荷计算主要输入参数	58
5.6	不考虑箭体弹性的出筒载荷计算	59
5.6.1	出筒纵向载荷计算	59
5.6.2	出筒横向载荷计算	60
5.7	考虑箭体弹性的出筒载荷计算	64
5.7.1	分析过程	64
5.7.2	增量形式的平衡方程	65
5.7.3	逐步积分法	65
5.7.4	纽马克(Newmark)法	66
5.7.5	考虑箭体弹性的出筒载荷计算的具体实现	66
5.8	潜地火箭流固耦合计算	68
5.8.1	动力学方程积分方法	69
5.8.2	有限体积方法(FVM)	69
5.8.3	流固耦合计算方法	69
5.8.4	潜地火箭流固耦合计算	70
5.9	水中及出水时不考虑箭体弹性的准定常水动力引起的载荷	72
5.10	波浪载荷计算	74
5.11	考虑箭体弹性的出水冲击载荷计算	77
5.12	考虑箭体时变模型的出水冲击载荷计算	79
5.13	箭体表面压力	81
5.13.1	准静态箭体表面压力	81
5.13.2	特征点压力	82
第6章	地面载荷设计	83
6.1	引言	83
6.2	两点铰链支承支反力计算	83
6.3	多弹性(刚性)支承支反力计算	84
6.4	停放、长期贮存、起吊、装填、运输和起竖载荷计算	86
6.5	非线性振动	87
6.5.1	直接积分法	88
6.5.2	摄动法和 KBM 法	89
6.5.3	等线性法	90
6.5.4	威尔逊 θ 法	91
6.6	随机振动	92

6.6.1	随机振动的基本概念	92
6.6.2	随机变量的概率统计特征	93
6.6.3	谱分析相关概念	94
6.6.4	单自由度结构的随机响应	96
6.6.5	多自由度和无限自由度结构的随机响应	98
6.6.6	小波分析概念	99
6.7	运输时车-筒-箭系统动力分析	101
6.8	竖立在发射台上的地面风载荷	102
6.8.1	地面风响应运动方程	102
6.8.2	定常及非定常风载荷	104
6.8.3	风测量和风载荷试验	105
第7章	空中飞行载荷设计	107
7.1	设计情况(计算情况)	107
7.2	坐标系及符号	108
7.2.1	坐标系	108
7.2.2	主要符号	108
7.3	载荷设计主要依据	110
7.4	飞行载荷计算方法	110
7.4.1	出筒轴向载荷计算	110
7.4.2	飞行中的轴向静载荷	111
7.4.3	轴向动载荷	111
7.4.4	横向静载荷	111
7.4.5	横向动载荷	113
7.5	载荷的综合和使用	116
7.5.1	载荷的综合	116
7.5.2	载荷的使用	116
7.6	载荷设计的试验验证	117
7.7	气动弹性问题分类	117
7.8	结构振动普遍运动方程	119
第8章	动力学响应预示及相关试验	121
8.1	几个基本概念	121
8.1.1	振动的基本概念	121
8.1.2	冲击的基本概念	123
8.1.3	噪声的基本概念	124
8.2	环境效应	126
8.3	动力学环境预示及控制	129
8.3.1	动力学环境预示方法	129
8.3.2	激励源预示方法	130
8.3.3	火箭动力学环境控制方法	131

8.4	统计能量分析基本理论	131
8.4.1	统计能量分析基本原理	131
8.4.2	使用统计能量分析的方法和步骤	135
8.5	动力学响应及特性相关试验	137
8.5.1	研制试验	137
8.5.2	鉴定试验	139
8.5.3	验收试验	142
8.5.4	环境应力筛选试验	142
8.6	载荷相关试验	143
8.6.1	地面风载试验	143
8.6.2	缩比模型水下载荷及测压试验	143
第9章	火箭整体稳定性分析	151
9.1	结构稳定性基本概念	151
9.2	临界载荷的计算方法	151
9.2.1	平衡方法	151
9.2.2	能量方法	152
9.2.3	动力方法	152
9.3	常用构件的临界载荷公式	153
9.3.1	压杆临界载荷公式	153
9.3.2	受压圆柱壳的临界载荷公式	154
9.4	结构稳定性分析的有限元方法	154
9.4.1	结构线性稳定性分析方法	154
9.4.2	非线性稳定性分析方法	156
9.5	盘式连接刚度计算方法	163
9.5.1	盘式连接问题	163
9.5.2	考虑接触后盘式连接的计算方法	164
9.6	短粗梁稳定性分析	169
9.6.1	Timoshenko 梁理论的回顾	169
9.6.2	一种改进的两节点单元	171
9.6.3	一种类型的短粗梁的稳定性分析	173
参考文献		175

第1章 绪 论

1.1 固体火箭载荷设计的任务

固体火箭载荷与设计专业的主要任务是研究作用在固体火箭结构上的外力,运用理论力学、材料力学、振动理论等科学知识给出组成固体火箭结构的零、构、部件载荷及安全系数的学科。

理论力学是研究物体机械运动的一般规律的科学。所谓机械运动就是通常意义下的物体运动,是指物体的空间位置随时间而变化。物体的平衡是机械运动的特殊情况,因此,理论力学里有一部分内容是研究物体平衡问题的,这个部分称为静力学。所谓平衡是指物体保持运动速度不变的状态,包括静止。与静力学相对应,理论力学的其余部分称为动力学。理论力学主要研究质点和刚体的运动。所谓刚体是指受力时不变形的物体,其内任何两点间的距离永不改变。刚体是一个理想的力学模型,而实际的物体在受力时总是要变形的。同一物体在理论力学问题里被看作刚体,但在材料力学问题中,需要了解作用力和变形之间的关系时,则被看成弹性体。

现代工程结构越来越复杂或庞大,且由不同的部件组成。为了使整个结构在一定外力作用下能安全地工作,必须对部件的设计提出强度(即抵抗破坏的能力)、刚度(即抵抗变形的能力)及稳定性(即维持其原有平衡形态的能力)要求。这些要求由材料力学来给出。材料力学的主要任务是:研究零、构、部件在外力作用下的受力、变形和破坏的规律,为合理设计零、构、部件提供有关强度、刚度和稳定性计算的基本理论和方法。材料力学研究的零、构、部件属于可变形固体。

材料力学中研究的力也有静力和动力之分。静力载荷是指载荷的大小、方向和作用点都不随时间而变化,加载过程非常缓慢,因而使结构的质量不产生加速度,也就不产生惯性力。但在工程设计中,经常也会碰到另一类载荷,即动力载荷,以及结构受动力载荷作用时所产生的振动现象。我们把随时间而变化的载荷,称为动力载荷,简称动载。动载作用的基本特点是使结构的质量产生显著的加速度,因而使结构产生较大的惯性力和弹性恢复力、阻尼力,并引起结构的振动。物体在某一位置附近来回运动的现象称之为振动。结构振动力学的基本任务在于分析结构(质点系或分布质量体系)振动的固有力学特性,分析在动力载荷作用下结构位移和内力等,以使结构设计能满足刚度和强度的要求,或采取减振或防振的措施,在进一步的研究中,还要结构满足动力稳定性的要求。

固体火箭载荷设计的基本内容包括风场设计、弹性振动特性设计、载荷设计、力学环境设计。

风场设计的任务是要调查和统计型号所需有关地区的地面风、海面风和高空风,完成风场及海况设计。陆地上发射的火箭必须考虑大气环境的影响,海上发射的火箭,除了要考虑大气环境的影响外,还必须考虑海洋环境的影响。大气及海洋环境对火箭的影响是多方面的,例

如:随着飞行高度的增加所遇到的大气压力和密度发生的变化,以及许多自然现象(如风、雨、雪、雷电等)都会影响火箭的正常发射和飞行;海洋上的波浪、涌浪会影响发射平台,从而影响火箭的发射;火箭离开发射平台后,还可能受到波浪、涌浪、洋流的影响等。研究大气及海洋环境有两个用途,一是了解大气及海洋环境的变化情况,为各种火箭设计提供环境设计的依据;二是限制火箭的工作条件,避免飞行事故。

弹性振动特性设计承担全箭结构振动特性的研究、分析和计算,包括:研究火箭结构动力学的各种分析方法和建模技术;计算全箭结构的纵向、横向和扭转振动特性及相应的运动方程式系数;完成振动特性和运动方程式系数计算报告;提出全箭振动试验任务书,并参加全部试验。全箭弹性振动特性设计主要技术要求首先是要准确预示(通过理论计算和试验)火箭的模态(频率、振型)并给出有关运动方程式系数,为结构设计和姿态控制系统设计提供设计依据;另外还要对与之相关的各种频率进行统一考虑,避免发生动力耦合等现象,使火箭的动特性设计较合理。

载荷设计关心火箭整体结构受力情况,承担火箭的载荷研究、设计和计算,包括:研究火箭运行各种状态的载荷计算方法;计算火箭各种状态下的载荷;提出载荷计算和强度计算情况报告。载荷设计不同于硬件设计有具体的性能指标。对载荷设计的主要技术要求是准确预示火箭在全寿命使用过程中将要遇到的各种载荷和条件,为结构设计提供设计依据;同时通过合理设计,使火箭受力情况满足总体要求而不会对型号研制增加很大难度。箭体结构部件的强度计算要根据设计情况的载荷进行。在计算载荷时,首先要选定载荷设计情况(或称火箭载荷计算情况)。所谓计算情况是指火箭在使用过程中(地面操作和飞行),某瞬时结构部件的应力达到最大值时,对应的载荷组合情况。换言之,一个箭体部件的计算情况,是指在载荷和加热同时作用下,箭体强度处于最危险的情况。在设计箭体时,明确计算情况不仅可以减少强度计算工作量,而且还是分析比较各种箭体结构方案及编写结构静力试验大纲的重要依据。固体火箭与液体火箭载荷设计主要不同之处在于陆态运输载荷、陆态弹射载荷计算及水下载荷计算,一般来说,这几种状态下的载荷要大于空中飞行载荷。

力学环境设计关心火箭局部结构动力响应情况,承担火箭各部段力学环境的研究、分析和设计,包括:研究火箭运行各种状态下的力学环境(包括振动、冲击、噪声和过载)的分析和设计方法;进行必要的信号分析和处理;计算并设计各部段的力学环境试验条件;完成力学环境和试验技术条件报告;提出遥测参数及其数据处理要求;参与分系统的力学环境试验,并处理与试验有关的具体问题。

1.2 固体火箭载荷设计的现状

固体火箭载荷设计用到的理论可称之为载荷计算力学理论,其基本理论分为静力理论和动力理论。

载荷计算中的静力理论是工程设计中使用最广泛的理论之一,它主要用于研究作用时间较长、分布特性相对确定、幅度及加载速度变化平缓的载荷,是一种工程近似方法。静力理论主要研究静载。所谓静载是指作用于火箭上的载荷(力或力矩),其作用时间比设计上所考虑的特征时间长,即是相对缓慢变化的载荷。火箭的特征时间就是箭体结构的一阶弹性振动周期。

载荷计算力学中的静力理论在航空、航天、航海、抗震结构设计中都有应用。在进行航空、航天结构中的静力载荷计算时,首先选定要分析的若干个特征时刻,根据某特征时刻作用在工程结构上的气动力、控制力等,计算整体结构的平移和转动加速度,然后由结构分布质量及加速度计算结构所受的惯性力,最后根据气动力、控制力及惯性力组成一个平衡力系,运用材料力学中的截面法计算结构中各截面的载荷。同时,在进行航天工程结构中的载荷计算时,也在不同程度上使用了动力理论,如火箭设计中就考虑了竖立风载、阵风载荷、抖振载荷等。但基本思想是选定特征时刻,动、静载荷分开计算,然后再按一定规则叠加。在进行船舶结构设计中的静力载荷计算时,使用的是切片法。切片法实际上就是把船体沿船长方向分成若干切片,求出船体作摇荡运动时作用在各切片上的流体动力,然后沿船长积分,即可求得作用在整个船体上的流体动力和力矩。当要计算船体某一剖面的剪力和弯矩时,这一剖面的剪力和弯矩由作用在这一剖面前的惯性力、水动力、静水力和波浪扰动力等决定。抗震工程设计中的静力理论假定建筑物为一不变形的刚体(刚体是没有工程意义上的内力的,这一假设只是为计算结构整体加速度使用,也为计算各截面的内力作铺垫,只有变形体才有工程意义上的内力),发生地震时其上各部分的加速度均与地面的加速度相同,由这一加速度所产生的惯性力就可作为建筑物的地震载荷。

静力理论忽略了结构本身的振动、变形性质,没有考虑结构的动力特性(固有频率、振型与结构阻尼等),所以与实际情况不完全相符合。尽管如此,由于这一理论应用极其简便,在一定条件下还是能解决大量工程设计问题,特别是,考核大型结构强度时,主要依靠静力试验设备进行,大型结构的动力强度考核问题非常困难,所以目前在工程设计中还使用静力理论。

随着有限元方法及相关计算软件的日益成熟,载荷计算力学中的动力理论在航空、航天、船舶、抗震结构设计中也日益得到了广泛的应用。动力理论主要研究动载,所谓动载是指作用于火箭上的载荷(力或力矩),其作用时间可与特征时间相比较,即载荷的大小随时间有显著的变化。

一般情况下,运动方程选取的独立几何参数是位移。为了求出各种动力响应,应先列出动力位移方程。描述动力位移的数学方程称为结构的运动方程。运动方程的解就提供了位移过程,从而可求出其他各种所需的结构动力响应,例如火箭各截面的剪力和弯矩。

目前,载荷计算所使用的方法主要是确定性方法,即非随机载荷计算方法,所研究的弹性变形属于小变形范围,主要采用线性理论。这样一来,载荷计算所关心的频率范围就不能太高。若频率太高,结构特性(如频率、振型、阻尼等)就很不好确定,高频的外力特性(相位、相关性等)也不好确定性函数表示。这就是说,高频特性适用随机(统计)方法研究,低频特性适用确定性方法研究。

1.3 固体火箭载荷设计的发展方向

固体火箭载荷设计与工程设计联系非常紧密。固体火箭设计提出的问题及火箭用户所关心的短周期、低成本、高可靠性问题,就是载荷设计要研究的问题。

固体火箭由成千上万个零件组成,任何一个零件出问题都有可能导致飞行故障,因此,载荷设计的对象要逐渐由以前主要关心大部件转变到也要关注小部件,即载荷计算的结构模型划分得越来越细,系统由简单到复杂,难度和工作量也相应会增加。

固体火箭在使用过程中还是存在静载荷工况的,或通过“动静法”转化为静载荷工况,且结构的强度考核主要是通过静力试验设备来考核,因此,静力理论会继续使用。但随着动力理论的日益成熟、计算软件的大量普及、计算机技术的高速发展,在固体火箭载荷设计中,动力理论会得到更深入的研究,并会解决固体火箭设计中遇到的许多问题(如动强度、动力稳定性、流固耦合问题等)。NASA 刘易斯研究中心就采用先进的耦合载荷分析方法解决航天飞机的有效载荷和自由号空间站的动态载荷问题。

目前的载荷计算中所采用的主要假设是小变形假设,假设结构系统是线性系统。但实际工程系统中是非线性的,如几何非线性(大变形)、阻尼非线性、刚度非线性(类似“软”、“硬”弹簧曲线)、载荷非线性、变质量等,这些非线性因素在一定条件下对载荷响应是有很大的影响的。因此,随着非线性理论的成熟,以后的载荷计算要考虑更多的非线性因素。

由于在工程结构中使用了大量的复合材料结构,结构可靠性问题得到了人们越来越多的关注,与结构可靠性有关的载荷随机性也必须进行适当的研究。特别是要研究高频载荷时,载荷计算的方法则由原来的确定性方法转变到随机方法,结构的外力函数不用确定性函数表示,而用统计特性表示,得到的载荷也就是随机载荷。

火箭设计是一个复杂的工程,牵涉到多门学科,相互之间都有不同程度的影响,要准确确定固体火箭的载荷,就需要将流体力学、弹道设计、姿控设计、结构动力学等因素综合考虑、联合计算,使得载荷计算由单学科向多学科发展。

1.4 本书的内容

本书介绍了弹道式固体火箭载荷设计的基础知识。第1章为绪论,介绍固体火箭载荷设计的任务、现状和发展方向。第2章主要介绍与载荷设计密切相关的风及波浪的相关知识,是进行固体火箭载荷设计必须掌握的外部条件之一。第3章从材料力学中梁的横向内力出发,介绍载荷设计主要研究的问题及其性质,类似的轴向内力与此相似,与材料力学中杆的内力类同,在此不作介绍。第4章主要介绍固体火箭的结构动特性问题,其研究结果是固体火箭姿控设计、载荷设计的重要输入条件。第5章介绍水下载荷设计,地面上发射的固体火箭无此载荷设计工况。第6章介绍地面载荷设计。第7章介绍空中载荷设计。第8章介绍结构动力响应预示及试验相关知识。第9章介绍固体火箭整体稳定性分析方面的相关知识。

第 2 章 大气及海洋环境

2.1 引言

陆地上发射的火箭必须考虑大气环境的影响。海上发射的火箭,除了要考虑大气环境的影响外,还必须考虑海洋环境的影响。大气及海洋环境对火箭的影响是多方面的,例如:随着飞行高度的增加所遇到的大气压力和密度发生的变化,以及许多自然现象(如风、雨、雪、雷电等)都会影响火箭的正常发射和飞行;海洋上的波浪、涌浪会影响发射平台,从而影响火箭的发射。研究大气及海洋环境有两个用途:一是了解大气及海洋环境的变化情况,给各种火箭设计提供环境设计的依据;二是限制火箭的工作条件,避免飞行事故。由于本书主要讨论载荷设计,故本书主要介绍对载荷设计影响较大的两个因素:风和波浪。

2.2 风

地球是由水圈、岩石圈、大气圈和生物圈所组成。我们把地球表面的整个空气层称之为大气。由于地球引力的作用使空气聚集在地球周围,形成所谓的大气圈。大气圈的底部紧接地面,但在它的顶部却很难找到一个严格的上界。大气的物理性质不论在垂直方向还是在水平方向都是不均匀的,不同高度的大气层和不同区域的空气具有不同的特点。因为地球在宇宙空间始终保持运动状态,使其与各行星之间的相对距离和位置发生改变,因此大气也随之变化。其中影响最大的是太阳和月亮,这就使得大气参数在年、月、日、时都有变化。还由于地球上各个地区的运动条件和地貌不同,局部大气条件也不同。这些不同使得温度、风速等在冬天与夏天、白天与黑夜都不同。

若用尺度范围很大的时-空变化构成的空气三维运动来表征风,即所谓“风场”。由于大尺度全球环流的控制,在中纬度高空会出现速度很大的强风带,称之为“急流”。急流自西向东运行,宽度可跨 5~10 个纬度。我国急流的特点是:每当冬季,在青藏高原两侧的高空会出现两支急流,即“北支急流”和“南支急流”。两支急流加速向东流动,并在上海上空汇集为一支。在两支急流中,南支的速度又比北支更大一些。这一特点对我国的火箭设计具有重要意义。

风是一个三维矢量,一般用其速率(风速)和方向(风向)描述。风速和风向为随机变量,随地点、高度和时间而变化。因此,在运载火箭设计中考虑风的影响时,需要考虑风场的时-空分布统计特性,并将风场模型化。

2.2.1 地面风

地面风是指距离地面 150 m 以下的风。地面风会产生一定的风压,其主要影响竖立在发射台上的运载火箭。通常,地面风分为定常风和阵风。

在气象预报中,我们把地面风分成十二级,见表 2-1。

表 2-1 风级表

风级	名称	平均风速范围/(m/s)
0	无风	0.0~0.2
1	软风	0.3~1.5
2	轻风	1.6~3.3
3	微风	3.4~5.4
4	和风	5.5~7.9
5	清风	8.0~10.7
6	强风	10.8~13.8
7	疾风	13.9~17.1
8	大风	17.2~20.7
9	烈风	20.8~24.4
10	狂风	24.5~28.4
11	暴风	28.5~32.6
12	飓风	≥32.7

2.2.1.1 定常风

定常风的风剖面用沿高度变化的平均风速表示。受地表摩擦的影响,平均风速随距地面高度的增大而提高。平均风速沿高度的变化一般用指数规律描述

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_r \left(\frac{z}{z_r}\right)^k \tag{2-1}$$

式中 $\bar{u}(z)$ 为高度 z 处的平均风速; $\bar{u}_r$ 为参考高度 z_r 处的平均风速; k 为地面粗糙度和风速等的函数。

因此,定常风剖面的平均风速通常以参考高度 z_r 上规定的平均时间内的风速表示,通过对平均风速记录进行统计处理,得出各种概率的风速值,可供设计时参考。国内气象部门采用 10 m 作为标准高度,平均时间为 10 min;而美国 NASA 采用 18.3 m 或 10 m 作为标准高度,平均时间为 10 min。

对于指数 k ,国内外均给出了一些不同地区和风速下的数值或经验计算公式。

2.2.1.2 阵风

描述阵风的要素之一是阵风因子,其定义为给定时间间隔内峰值风速与平均风速之比,即阵风因子 G 为

$$G = \frac{u(z)}{\bar{u}(z)} \tag{2-2}$$

式中 $u(z)$ 为高度 z 上,给定时间间隔 τ 内的峰值风速; $\bar{u}(z)$ 为高度 z 上、给定时间间隔 τ 内的平均风速。

阵风因子 G 是平均时间 τ 、高度 z 和平均风速 $\bar{u}(z)$ 的函数。随 τ 增加, G 增大; 随 z 增加, G 减小; 随 $\bar{u}(z)$ 增大, G 减小; 在高风速时, 对于给定 z 和 τ , G 趋于常值。通常, 以 10 min 的阵风因子近似代表 $10 \text{ min} \leq \tau \leq 60 \text{ min}$ 范围内的阵风因子, 一般取阵风因子 $G = 1.4 \sim 1.5$ 。

在美国 NASA 的规范中, 经常使用峰值风剖面, 峰值风速与定常风有相似的随高度变化的指数规律。峰值风速除以阵风因子可得到平均风速或定常风剖面。

在绝大多数情况下, 地面风完全处于紊流状态, 风速可视为平稳、各态历经随机过程, 基本上符合正态分布。因此, 可以用风速谱密度函数描述阵风, 称为阵风谱。

2.2.2 高空风

高空风是指距离地面 150 m 以上的风。一般认为对流层的高度为 11 km; 从 11 km 到 25 km 叫同温层, 其温度不变。高空风主要影响在大气层内飞行的运载火箭。目前国际上能得到的可靠的高空风数据的高度主要为 27 km 以下。其中, 对火箭设计比较重要的高度范围是 5~25 km, 因为在这些高度上的风是构成运载火箭最危险条件(对载荷、分离)设计的因素。通常, 高空风分为定常风、风切变和阵风。

运载火箭在大气层飞行的过程中, 会受到高空风的作用, 产生严重的气动载荷。大气层内的风是飞行的主要干扰因素, 因此, 风对火箭技术性能、结构和控制设计、飞行试验的风险和使用条件等的影响是运载火箭设计中需要考虑的重要问题。

2.2.2.1 定常风

高空风中的定常风一般采用参考高度上的, 最多风向下的, 一定出现概率的最大风速来描述。参考高度选取对地地导弹和运载火箭飞行影响最大的高度, 一般在 5~15 km 范围内选取。因此, 对于给定的参考高度, 需要解决下列问题:

- 1) 通过风向的概率密度分布确定最多风向。一般, 风向符合正态分布。
- 2) 确定给定风向时风速的条件分布。在固体火箭设计时, 一般选取 99% 概率的最大风速作为设计风速; 而在液体火箭设计时, 一般选取 95% 概率的最大风速作为设计风速。

描述风的气象坐标如图 2-1。 w 是风速(m/s), u 是风速的纬向分量(m/s)(西至东风为正)、 v 是风速的经向分量(m/s)(南至北风为正)。

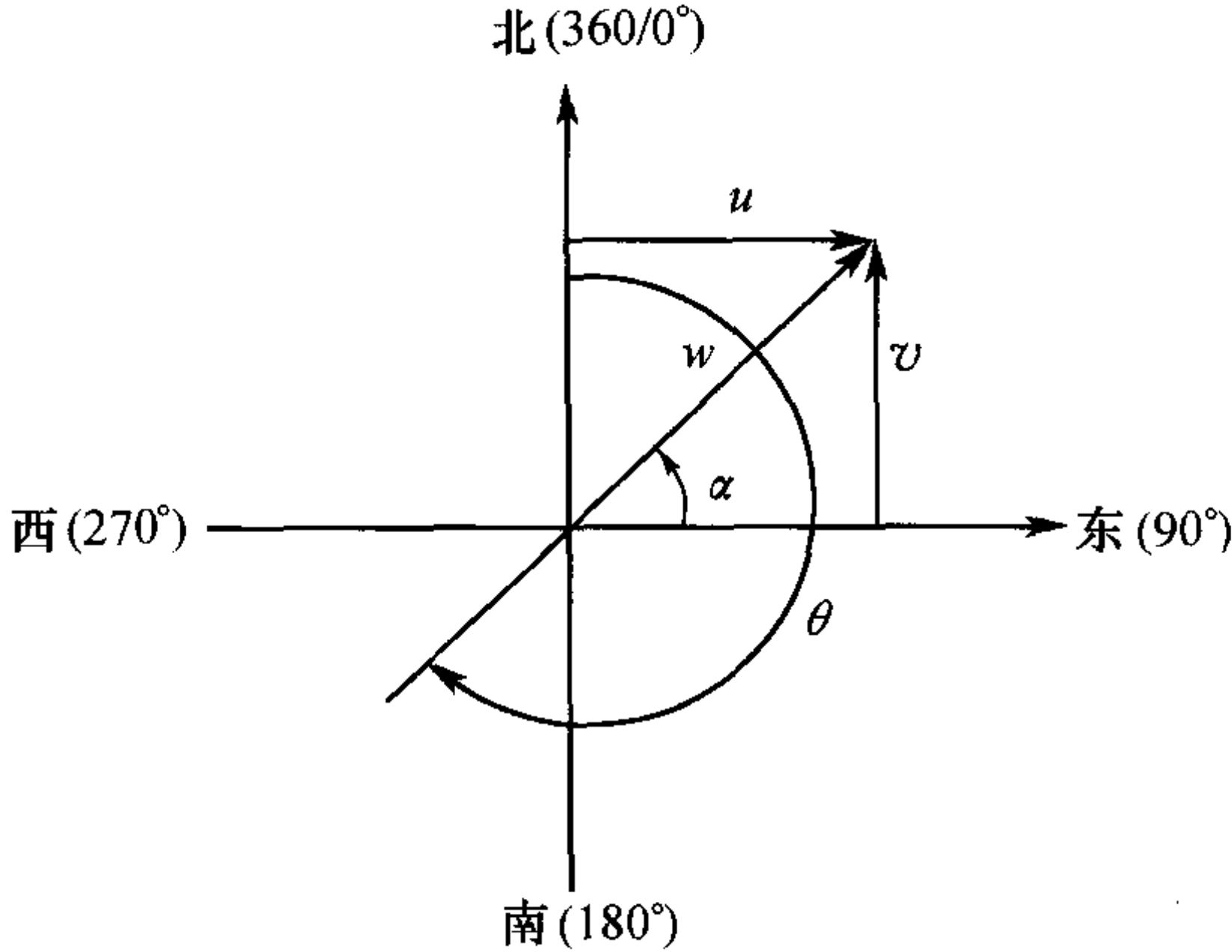


图 2-1 气象坐标系统示意图

0°, 顺时针旋转度量), α 为在数学坐标系中的风向(°)。

θ 和 α 两者的关系为 $\theta + \alpha = 270^\circ$ 。当要求风的方向分布时, 在极坐标下较方便。此时, 风的概率密度函数为

$$g(r, \alpha) = rd_1 e^{-\frac{1}{2}(a^2 r^2 - 2br + c^2)} \quad (2-3)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } a^2 &= \frac{1}{(1-\rho^2)} \left[\frac{\cos^2 \alpha}{\sigma_u^2} - \frac{2\rho \cos \alpha \sin \alpha}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{\sin^2 \alpha}{\sigma_v^2} \right] \\ b &= \frac{1}{(1-\rho^2)} \left[\frac{\bar{u} \cos \alpha}{\sigma_u^2} - \frac{\rho(\bar{u} \sin \alpha + \bar{v} \cos \alpha)}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{\bar{v} \sin \alpha}{\sigma_v^2} \right] \\ c^2 &= \frac{1}{(1-\rho^2)} \left[\frac{\bar{u}^2}{\sigma_u^2} - \frac{2\rho \bar{u} \bar{v}}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{\bar{v}^2}{\sigma_v^2} \right] \\ d_1 &= \frac{1}{2\pi \sigma_u \sigma_v \sqrt{1-\rho^2}} \\ r &= \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned}$$

其中 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 为风速均值; σ_u 、 σ_v 为标准偏差; ρ 为纬向和经向分量的相关系数。

在 $r=0 \sim \infty$ 范围内积分 $g(r, \alpha)$, 我们得到风方向 α 的概率密度函数为

$$g(\alpha) = \frac{d_1}{a^2} e^{-\frac{1}{2}c^2} \left[1 + \sqrt{2\pi} \left(\frac{b}{a} \right) e^{\frac{1}{2}(\frac{b}{a})^2} \Phi\left(\frac{b}{a}\right) \right] \quad (2-4)$$

$$\text{式中 } \Phi\left(\frac{b}{a}\right) \cong \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$$

根据 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 σ_u 、 σ_v 和 ρ , 由上述公式, 可以求得最大概率风向。

最大风出现的概率为:

$$p_w \{ w \leq w^* \mid \alpha = \alpha_0 \} = 1 - \frac{d_1}{a^2} e^{-\frac{1}{2}c^2} e^{\frac{1}{2}(\frac{b}{a})^2} \{ e^{-\frac{1}{2}W_s^2} + \sqrt{2\pi} \left(\frac{b}{a} \right) [1 - \Phi(W_s)] \} / g(\alpha_0) \quad (2-5)$$

$$\text{式中 } W_s = a w^* - \frac{b}{a}$$

α_0 为给定风向。

根据公式(2-5)经多次迭代可得一定概率下的最大风, 该概率一般取 0.99 或 0.95。

风的主要影响来自太阳、月亮与地球的自转。因此, 它与月份、季节、昼夜、地形、地貌、纬度关系很大。对流层内的最大风速通常出现在纬度 20°左右的地方。地球上风速变化最激烈的三个地区是亚洲的东方海岸(靠近日本), 北大西洋的北美洲东方海岸, 地中海的东海岸等。根据记录, 日本海岸对流层的顶部最大风速达 120~180 m/s; 北美海岸达到 130~160 m/s。

2.2.2.2 风切变

风切变是指两个高度上的风速差。由于风速符合正态分布, 因此, 风切变也符合正态分布。

在运载火箭设计中所考虑的风切变为参考高度出现最大风条件下的条件风切变。条件风切变一般为二维圆分布。

在参考高度上出现最大风的条件下, 由最大条件风切变求得的其他高度上的风速称为条件风。条件风一般也为二维圆分布, 由条件风切变可以得到条件风圆的圆心和半径。

给定参考高度 H_0 后,其他高度与参考高度的切变分量由下式求得

$$u' = (u_{H_0} - u_H), \quad H_0 > H \quad (2-6)$$

$$u' = (u_H - u_{H_0}), \quad H_0 < H \quad (2-7)$$

$$v' = (v_{H_0} - v_H), \quad H_0 > H \quad (2-8)$$

$$v' = (v_H - v_{H_0}), \quad H_0 < H \quad (2-9)$$

给定风速 u^* 、 v^* 下,风切变分量的平均值为

$$E(u'|u^*) = \bar{u}' + r(u, u') \frac{\sigma_{u'}}{\sigma_u} (u^* - \bar{u}) \quad (2-10)$$

$$E(v'|v^*) = \bar{v}' + r(v, v') \frac{\sigma_{v'}}{\sigma_v} (v^* - \bar{v}) \quad (2-11)$$

式中 $\bar{u}'$ 、 $\bar{v}'$ 分别为 u' 、 v' 的样本统计平均值; $r(u, u')$ 、 $r(v, v')$ 分别为 u 和 u' 的相关系数、 v 和 v' 的相关系数。

风切变的条件标准差为

$$\sigma_{u'}|_{u^*} = \sigma_{u'} \sqrt{1 - [r(u, u')]^2} \quad (2-12)$$

$$\sigma_{v'}|_{v^*} = \sigma_{v'} \sqrt{1 - [r(v, v')]^2} \quad (2-13)$$

式中 $\sigma_{u'}$ 、 $\sigma_{v'}$ 分别为风切变分量的标准差。

引入将条件矢量切变处理成二维圆分布的假设,可得到条件标准差为

$$\sigma_{V_1} = \sqrt{(\sigma_{u'}|_{u^*})^2 + (\sigma_{v'}|_{v^*})^2} \quad (2-14)$$

2.2.2.3 阵风

在运载火箭设计中,通常用两种方法处理高空风场中的阵风,即间断阵风和阵风谱(功率谱)。

对于间断阵风,一般理想化为两种类型:准矩形波型和重复正弦型。在设计时,将间断阵风叠加在定常风剖面上。

高空风的垂直详细风剖面中的小尺度运动一般由间断阵风和许多随机分量的叠加来表征,阵风谱则用于描述这一小尺度运动的叠加,它是风速谱密度函数。在运载火箭设计中,主要使用两类阵风谱:一类为详细风剖面谱,用于控制系统和缓变响应分析;另一类为阵风功率谱,用于火箭结构振动响应分析。

平行于火箭飞行速度(V)方向的纵向巨艾邓(Dryden)谱按下式计算:

$$\Phi_1(\Omega) = \frac{2\bar{\sigma}_w^2 L}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + (\Omega L)^2} \quad (2-15)$$

垂直于火箭飞行速度(V)方向的横向巨艾邓谱按下式计算

$$\Phi_2(\Omega) = \frac{\bar{\sigma}_w^2 L}{\pi} \cdot \frac{1 + 3\Omega^2 L^2}{(1 + \Omega^2 L^2)^2} \quad (2-16)$$

式中 阵风减缩频率 $\Omega = \frac{\omega}{V}$, 其取值范围是: $0.000\ 33 \sim 1.6(1/m)$; $\bar{\sigma}_w$ 为阵风速度的均方根值 m/s , 一般取 $1.5 \sim 3\ m/s$; L 为阵风扰动的特征长度 m , 一般取 $300\ m$ 。

2.2.2.4 综合风剖面

综合风剖面用于表示高空风场在参考高度上的设计风速、风切变以及阵风等组合的设计用风剖面,它在运载火箭设计中广泛采用。

2.2.2.4.1 综合标量风剖面

综合标量风剖面使用的是设计风速剖面的包络和间断阵风或阵风谱。

对于不考虑间断阵风的综合标量风剖面,典型地采用 95% 标量风速包络和 99% 标量风速上升切变包络,首先在风剖面包络线上选定参考高度上的设计风速,然后将该风速值减去不同风切变层厚度的风速变化值,得到参考高度以下各高度的风速值,从而构成风切变上升包络。最大风切变层厚度一般取 1 000 m。

考虑间断阵风时,其风剖面的构造方法类似。由于阵风与风切变不完全相关,应将风切变和阵风的幅值乘以系数 0.85。

在使用阵风谱的情况下,不需要考虑间断阵风,但需要将风切变幅值乘以系数 0.85。

2.2.2.4.2 综合矢量风剖面(Synthetic Vector Wind Profiles)

对于参考高度上出现的最大风,可沿高度由风切变得到一系列条件风圆,它们构成了表示风场特性的以参考高度最大风为顶点的上下两个对顶圆锥。最多风向构成的高度平面与圆锥相交,可得到两条交线:一条对应于最小条件风和最大风切变;另一条对应于最大条件风,但其风切变并不是最大。在设计中,最多风向上的风速,最小条件风与最大风切变共同构成了综合矢量风剖面。

各高度上风的条件平均值可由条件风切变分量平均值求得,其公式为

$$E(u | u^*) = u^* - E(u' | u^*), \quad H \leq H_0 \quad (2-17)$$

$$E(v | v^*) = v^* - E(v' | v^*), \quad H \leq H_0 \quad (2-18)$$

$$E(u | u^*) = u^* + E(u' | u^*), \quad H > H_0 \quad (2-19)$$

$$E(v | v^*) = v^* + E(v' | v^*), \quad H > H_0 \quad (2-20)$$

条件矢量风等概率圆的方程如下

$$AX^2 + BY^2 + CX + DY + E = 0 \quad (2-21)$$

式中 $A = 1$

$B = 1$

$C = -2E(u | u^*)$

$D = -2E(v | v^*)$

$E = [E(u | u^*)]^2 + [E(v | v^*)]^2 - 2\lambda_c^2 \sigma_{V_1}^2$

$\lambda_c^2 = -\ln(1 - P_c)$

P_c 是概率,通常取为 0.99。

将最多风向构成的直线代入方程(2-21),得到如下一元二次方程

$$(A + m^2 B)X^2 + (C + mD)X + E = 0 \quad (2-22)$$

式中 $m = \frac{-\cos\theta^*}{-\sin\theta^*}$;

θ^* 为最多风向。

此方程有两个根 x_1 、 x_2 ，由 x_1 、 x_2 得到 $y_1 = mx_1$ 、 $y_2 = mx_2$ 。计算 $W_A = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ 、 $W_B = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$ ，取 W_A 、 W_B 中最小者，将其随高度的变化画成曲线，就可得综合矢量风剖面。

2.2.3 风场测量

风场测量的参数为风速和风向。

风速和风向的测量一般按地面风和高空风进行分类，两者所使用的测量方法和仪器设备均不同。测量方法和测量仪器设备也随着科技的进步不断更新。常用的仪器设备主要有测风仪、气球、探空火箭、雷达等。

对于运载火箭来说，地面风和高空风的风场参数测量使用的方法与气象测量使用的方法基本一致，但测量重点是发射场周围的局部风场，主要用于监测发射环境是否满足设计规定的发射条件。

2.3 波浪

对于海上发射的火箭，必须考虑波浪对火箭的影响。

根据统计，在海面上大约有 70% 的时间会有海浪，这使船产生摇摆和击水，给出水过程中的火箭形成波浪载荷。

海浪可分为扑岸浪、风浪和涌浪三种。扑岸浪是海岸附近的浪。风浪是风引起的浪。涌浪则是暴风停止后余留下来的，或由暴风区域传播来的浪。涌浪巨大而长，成柱形，一个波形接一个波形有规律地向前传播。很显然，这是一种周期性(或近似周期性)的运动，也就是隔一个固定的时间间隔后，运动将毫无改变地回复到原来的运动状态。海浪和船波都是十分复杂的，处理的时候可以当作为余弦波(或称规则波)的叠加。后者是涌浪简化了的模型。

当风停止后，水内部摩擦力会使波浪逐渐消失，但从其消失的缓慢过程来看，摩擦力的作用不是很大的，近似地可以略去不计。因此，在波浪理论中，水是作为理想流体来处理的。

波浪运动是水面受风的压力的扰动后，在重力作用下产生的周期运动。因为风不可能是均匀的，各个地方的压力和速度会有所不同，这样就会引起水面凹凸不平，即形成微波。压力大的地方形成波谷，压力小的地方形成波峰。当风继续吹过水面，经过波峰时流线变密，流速加大，压力减小；经过波谷时流线变疏，流速减小，压力加大。在这种空气压力的作用下，水面的微波不但不会消失，而且继续加强，于是，水面便由开始的微波逐渐增大，最终成为巨大的波浪。

在风停止后，空气的压力分布是均匀的，这时水主要受重力的作用，水内部的摩擦力可以略去不计。重力可以分解为相对于自由表面的垂直力和切向力。由于切向力的作用，使水具有流动的特性，而不能保持扰动后的形状静止不动，波峰的水将流向波谷。当水面变为水平时，由于惯性作用，这种运动也并不马上停止，而是继续流动。于是原来波谷的地方将堆高为波峰，而波峰的地方将变成波谷。这样由于水具有的惯性及其受到的重力作用，就形成了波浪的周期性运动。

首先，这里需要注意的是，波浪运动是理想流体的运动，黏性力不起主要作用，因而可以略