

火箭动力学中的工程设计方法

[苏] Г. М. 莫斯卡连科 著

杜哲明 程 萍 译
程济昌 校

宇航出版社

火箭动力学中的 工程设计方法

〔苏〕Г.М.莫斯卡连科著

杜哲明 程 萍译

程济昌校

宇航出版社

内 容 简 介

本书涉及火箭飞行器设计最初阶段中选择最佳参数的一般问题。书中探讨了火箭构件的最大载荷计算情况；分别就两种质量变化规律，介绍了考虑重量平衡的火箭动力学诸定律；阐述了关于变质量质点质量分配的一般定理；引证了解析解，并借助解析解提出了飞行器工程设计的新方法；研究了一次使用及多次使用的火箭及火箭航天系统的非定态及准定态飞行。书中还列举了计算公式、图表、表格及典型算例。

本书可供火箭航天及航空技术领域的工程设计人员和专家参考，对于有关高等院校的教师及高年级学生亦有裨益。

火箭动力学中的工程设计方法

〔苏〕Г. М. 莫斯卡连科 著

杜哲明 程 萍 译

程齐昌 校

*

宇 航 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

北京丰华印刷厂印刷

*

开本 $850 \times 1168^{1/4}$ 印张 14 $\frac{1}{2}$ 字数 372 千字

1984 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印数 0001—2.000

统一书号：15244·0003

定价：2.20 元

目 录

前言	1
绪论	4
符号说明	9
脚注	17
第一章 火箭飞行器的分类	19
§ 1.1 火箭的分类	19
§ 1.2 多次使用的火箭飞行器的分类	41
§ 1.3 单级火箭	48
§ 1.4 组合火箭	49
§ 1.5 单级航天飞机及组合航天飞机的构造特点	52
§ 1.6 实验航天飞机	53
参考文献	58
第二章 火箭在真空中的运动	59
§ 2.1 质量秒耗量	59
§ 2.2 理想推力	60
§ 2.3 质量变化的线性规律	61
§ 2.4 质量变化的指数规律	61
§ 2.5 火箭发动机的推力	62
§ 2.6 比推力	64
§ 2.7 火箭运动的基本方程	66
§ 2.8 齐奥尔科夫斯基第一问题	66
§ 2.9 起飞过载	68
§ 2.10 主动段飞行时间	71
§ 2.11 质量按线性规律变化时的齐奥尔科夫斯基第二问题	73
§ 2.12 质量按指数规律变化时的齐奥尔科夫斯基第二问题	75
§ 2.13 应用于组合火箭的齐奥尔科夫斯基公式	77

参考文献	81
第三章 火箭构件的最大载荷计算情况	82
§ 3.1 迎面阻力	83
§ 3.2 悬挂式贮箱的计算情况	85
§ 3.3 确定轴向载荷的计算情况	87
§ 3.4 承力式贮箱的计算情况	91
§ 3.5 火箭上部各舱段	93
§ 3.6 火箭中舱段	94
§ 3.7 火箭下部各舱段	95
§ 3.8 带悬挂式贮箱的推进剂舱段	97
§ 3.9 推进剂泵入口液柱静压保持恒定的条件	98
参考文献	102
第四章 重量关系式的函数特征	103
§ 4.1 推进剂贮箱	104
§ 4.2 贮箱隔框	111
§ 4.3 考虑临界外力下的轴向应力时承力式贮箱的增压压力	112
§ 4.4 简单杆件	115
§ 4.5 壁板	117
§ 4.6 光圆筒壳体	118
§ 4.7 加肋夹层圆筒壳体	119
§ 4.8 加强的圆筒壳体	121
§ 4.9 承受横向载荷的构件	122
§ 4.10 铁饼形结构	123
§ 4.11 环形贮箱	124
§ 4.12 火箭航空构件	126
§ 4.13 推进剂贮量	132
§ 4.14 消极载荷	133
§ 4.15 火箭的熄火重量	133
§ 4.16 最简的重量关系式	134
参考文献	143
第五章 直径及相对长度对推进剂贮箱及舱段重量特性	

的影响	144
§ 5.1 增压压力恒定时贮箱相对长度对筒段重量的影响	145
§ 5.2 液柱静压变化时贮箱相对长度对筒段重量的影响	148
§ 5.3 增压压力恒定时贮箱相对长度对箱底重量的影响	149
§ 5.4 液柱静压变化时贮箱相对长度对箱底重量的影响	150
§ 5.5 增压压力变化时贮箱相对长度对筒段及箱底重量的 影响	152
§ 5.6 贮箱相对长度对隔框重量的影响	153
§ 5.7 关于贮箱相对长度对结构重量特性影响的一般说明	156
§ 5.8 内压恒定时相对长度对推进剂贮箱重量的影响	157
§ 5.9 内压变化时贮箱非单独筒段的最佳相对长度	160
§ 5.10 考虑轴压载荷时多贮箱舱段的最佳直径	162
§ 5.11 考虑液柱静压时多贮箱舱段的最佳直径	164
参考文献	171
第六章 基本重量关系式及其运用	172
§ 6.1 基本重量关系式的推导	172
§ 6.2 基本重量关系式的几种形式	174
§ 6.3 推进剂比重对重量比的影响	176
§ 6.4 对火箭推进剂效能的评定	178
§ 6.5 推进剂安全裕量对组合火箭有效载荷重量的影响	183
§ 6.6 火箭航空结构的“重量障”	187
参考文献	193
第七章 考虑重量因素时火箭的真空垂直飞行状态 特性	194
§ 7.1 质量按两种规律变化时的主动段垂直爬高	194
§ 7.2 被动段垂直爬高	197
§ 7.3 质量按两种规律变化时过载对主动段垂直爬高的 影响	199
§ 7.4 质量按两种规律变化时的总爬高	201
§ 7.5 质量按两种规律变化时过载对总爬高的影响	203
§ 7.6 齐奥尔科夫斯基宇航火箭列车及其熄火速度	204

§ 7.7 考虑介质阻力时的火箭被动段垂直上升	203
参考文献	214
第八章 变质量质点运动的最佳状态	215
§ 8.1 科斯玛杰米杨斯基第一问题	215
§ 8.2 科斯玛杰米杨斯基第一问题中重量因素的考虑	219
§ 8.3 科斯玛杰米杨斯基第二问题	221
§ 8.4 科斯玛杰米杨斯基第三问题	223
§ 8.5 科斯玛杰米杨斯基第三问题中质量按两种规律变化时重量因素的考虑	225
§ 8.6 存在制动推力时飞行器的垂直飞行	226
参考文献	230
第九章 航天飞机的飞行特性	231
§ 9.1 航天飞机的恒定低速准水平飞行	232
§ 9.2 航天飞机作恒定低速飞行时起飞推力重量比对巡航航程的影响	234
§ 9.3 航天飞机的恒定高速准水平飞行	236
§ 9.4 航天飞机作恒定高速飞行时起飞推力重量比对巡航航程的影响	240
§ 9.5 考虑引出段推进剂消耗时航天飞机的最佳巡航速度	242
§ 9.6 存在正升力时准定态滑行的时间、速度、航程和高度	245
§ 9.7 航天飞机巡航速度对计及滑行的航程的影响	251
§ 9.8 航天飞机的主动-惯性飞行	252
§ 9.9 存在负升力时准定态滑行的时间、速度、航程和高度	255
参考文献	261
第十章 单级火箭的最佳参数	262
§ 10.1 单级火箭的基本参数	263
§ 10.2 质量按线性规律变化时真空中的起飞过载	264
§ 10.3 质量按指数规律变化时真空中的起飞过载	270
§ 10.4 质量按线性规律变化与按指数规律变化的比较	272
§ 10.5 考虑大气影响的起飞过载	274

§ 10.6 考虑大气影响的箭体最佳直径	277
§ 10.7 确定基本参数最佳值的图解法	280
§ 10.8 按最大载荷推力比准则选择起飞过载	282
§ 10.9 按折算的炮火速度确定重量比	284
参考文献	288
第十一章 多级火箭质量按级分配的几种情况	289
§ 11.1 组合火箭的基本参数	292
§ 11.2 最简单的质量分配规律	293
§ 11.3 二级火箭的质量分配	301
§ 11.4 $\sigma(\theta_K) = 0$ 时的质量最佳分配条件	303
§ 11.5 参数 e^* 已给定时的质量分配	308
§ 11.6 参数 μ_K^* 已给定时的质量分配	309
§ 11.7 参数 M 已给定时的质量分配	311
§ 11.8 参数 e_K^* 已给定时的质量分配	313
§ 11.9 最佳级数	314
参考文献	326
第十二章 多级火箭的最佳参数	327
§ 12.1 一般情况下的最佳条件	327
§ 12.2 按邻级法分配质量的一般情况	331
§ 12.3 按 $M = \text{常量}$ 法选择参数	333
§ 12.4 $M = \text{常量}$ 定理的一般形式	333
§ 12.5 $M = \text{常量}$ 定理的实用推论	342
§ 12.6 关于如何考虑飞程序角 θ 的说明	348
参考文献	362
第十三章 多次使用的火箭航天系统诸飞行状态	367
§ 13.1 航天飞机的起伏式飞行状态	366
§ 13.2 适用于平缓的弹道式轨道的近似关系式	376
§ 13.3 航天飞机沿弹道式轨道再入稠密大气层	379
§ 13.4 从高空垂直下降	384
§ 13.5 航天飞机的亚轨道飞行	386
§ 13.6 航天飞机在垂直平面内的过渡飞行状态	392

§ 13.7 在水平面内盘旋的速度损失	399
参考文献	404
附录1. 两种质量变化规律下的基本参数函数特征	405
附录2. $k_x = k_{06} = k_{\text{AH}} = 1$ 条件下各种型式的推进剂贮箱 的参数关系式	407
附录3. 回返载荷借助降落伞-喷气系统下降的最佳 速度	423
附录4. 低速飞行时航天飞机返回发射场的条件	427
附录5. 多次使用的弹道式运载火箭和有翼式运载火箭 的比较	432
附录6. 某些火箭飞行器及其系统的重量特性	436
附录7. 改型的运载火箭	443
附录8. 选择“有翼式火箭+加速器”系统总体布局的重 心计算	445
附录9. 火箭滑行机的最大允许重量	448
参考文献	451

前 言

设计新的火箭飞行器是一个复杂的过程，受到多种因素的制约。通常，设计过程分成几个阶段来进行。

第一阶段中，在分析收集到的现有火箭结构特性原始数据及各种统计资料的基础上，初步拟定可能的或提供的火箭飞行器特性范围。然后，在该范围内采用常用简化方法进行多种参数的分析研究，其目的在于：

1) 确定火箭飞行器的动力装置及总体结构，合理选择基本参数（如火箭飞行器的结构型式、发动机装置、级数、推进剂类型等）；

2) 作为初步近似，确定基本参数最佳值（火箭飞行器的重量及有效载荷、速度及航程、各级质量分配、推力特性等）。

由于第一阶段中必须对重量关系式及弹道关系式进行综合研究，故有时将此阶段称为弹道设计阶段。这阶段中所求得的火箭飞行器特性的准确性取决于所用重量关系式的准确性及运动方程中对作用力估计的完全程度。应指出，目前对火箭运动方程的研究已相当完善，并能可信地估价由于这些方程的某些简化所带来的误差；而对于各种火箭飞行器基本重量关系式的研究则还达不到如此程度。为了综合分析重量关系式及运动方程（火箭动力学方程），必须研究确定重量关系式。关于这方面所发表的著作很少，远不能回答实际工作中所提出的问题。

在火箭飞行器弹道设计阶段以后的各设计阶段，将进行细致的总体结构设计、强度计算、重量特性修正、气动力计算、确定火箭飞行器控制系统及进行精确的弹道计算。在进行这些工作

时，为使重量特性更准确地适应原始要求，可对火箭飞行器基本特性加以修正。在目前业已发表的著作中，大多数是涉及火箭飞行器后面各设计阶段的问题的。

本书研究了火箭飞行器设计最初阶段的各项工作：确定基本重量关系式，分析重量因素对火箭飞行器各种飞行状态的影响，并制定火箭飞行器弹道设计的解析法，即计算火箭飞行器基本参数最佳值法。

在实用火箭动力学问题中，关于重量因素的考虑对选择火箭飞行器最佳参数影响极大。因此，本书对制定重量计算的解析法特别重视。确定了各种计算情况和作用在火箭飞行器构件上的最大载荷。求得了不同仓段、机组、动力部件及系统的重量计算公式。研究了基本设计参数之间的函数关系。给出了基本重量关系式并指明了“重量障”的存在。“重量障”规定了火箭飞行器设计特性的合理范围。

探讨了某些飞行力学原理。这些原理涉及 K. Э. 齐奥尔科夫斯基和 A. A. 科斯玛杰米杨斯基问题中对应的非定态（垂直的）及准定态（水平的）运动状态。

研究了真空中及大气中质量按两种规律变化时，考虑重量平衡方程的单级火箭飞行器运动状态，并制定了计算基本参数（轴向过载、有效载荷相对重量、积极物质●的重量比及消极物质的重量比、推进剂及推进剂仓段的几何特性）最佳值的方法。

探讨了用于多级火箭运动的变质量质点运动。这种火箭可具有不同的质量抛掉速度，包括

$$W \begin{cases} 0 \\ W_I, W_{II}, \dots, W_n \end{cases}$$

（I、II、…、n 分别代表第一、第二……等各分点脚注）。

提出了新的定理。这个定理在考虑质量特性、重力、轨道参

● 作者常把“物质”一词与“质量”一词混用——校者

数、介质气动力影响及发动机高空特性的条件下规定了质点（火箭）运动过程中质量分配的极值法则。运用工程计算方法给出了质量按线性规律及按指数规律变化时计及最佳过载的质量分配条件。书中表明，现有的关于划分变质量质点的各种提法皆为此定理的特殊情况。

目前，对发展中的多次使用的火箭飞行器日益重视。因此，本书探讨了航天飞机的巡航飞行及亚轨道飞行、火箭飞行器回返级再入稠密大气层的飞行状态（“起伏式”飞行、带正升力及负升力的准定态滑行，平缓的弹道式轨道飞行）及过渡飞行状态（快速拉平、机动下降、急跃升、水平面内盘旋）。还研究了计及引出段推进剂消耗的最佳巡航速度对包括滑行在内的航程的影响以及航天飞机的主动-惯性飞行。有了这些相互联系的资料，就能进行确定多次使用火箭飞行器回返级特性的工程计算^[12]。

书中探讨了飞行轨道的局部（在给定点）及整体（以一般形式）性质。

编写本书时，作者力求叙述简练并得出适于初步近似的设计计算的简便关系式。图线、附表及算例有助于理解材料及掌握独创的设计技能。

作者讲述材料时尽力将所得关系式表示为无因次形式，而这样一来又产生了某些关于术语问题的麻烦。例如，速度比（瞬时速度与初始速度之比）称为无因次速度。这种术语为设计人员所惯用，但从纯力学观点来看，如此定名未免欠妥。比如，航天飞机以弹道式火箭的飞行状态起飞，紧接着转为恒定速度的准水平巡航飞行状态，两种飞行状态的同一参数具有不同的术语。在第一种情况下，参数 $n(t)$ （等于飞行器推力与重量之比）定义为过载；在第二种情况下，则称为推力重量比。在两种运动状态的交接点，起飞段终点速度变为巡航飞行速度，这时参数 $n(t)$ 的定义便改变了。

绪 论

现代火箭动力学是理论力学中有关喷气飞行力学问题的分支。理论力学在火箭动力学问题中的应用构成了火箭动力学的研究主题。这门学科的主要任务在于确定对喷气飞行器（火箭、航天飞机、人造卫星、星际飞船、高超音速飞行体等）主动段（发动机工作时）飞行状态和被动段（发动机关机时）飞行状态起决定性影响的基本特性、轨道参数及规律。变质量物体力学是火箭动力学的科学基础，它研究质点（质点系）在力的作用和积极质量消耗的情况下的运动规律。

火箭动力学中的工程方法是指与火箭型飞行器设计问题有关的方法。这部分火箭动力学（亦可称为实用火箭动力学）的特点在于，其结果是在计及具体的结构设计因素（实验数据）而其中首先是重量因素的基础上获得的。

众所周知，设计方法（例如航空方面的）总是随着重量分析方法的发展而发展的。在火箭技术中，借助于综合分析火箭动力学方程及重量平衡方程，也使设计方法有了很大的发展。

火箭是运动时质量变化的物体。

俄国科学家、彼得堡工业大学教授И. В. 墨歇尔斯基于1897年提出了变质量质点（物体）动力学基本定律并在他的硕士论文中作了记载。

按此定律，变质量质点运动的基本方程为

$$M \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{P} + \vec{F}, \quad (1)$$

式中, $\vec{P} = \frac{dM}{dt}\vec{W}$ ——喷气推力 (由于质量的排出而产生);
 $\vec{F}$ ——其余所有外力的合力。

方程(1)所表示的变质量质点运动的微分定律可叙述如下:
在运动过程中, 喷气中心的质量 M 与其加速度 dV/dt 的乘积任何时候都等于作用的外力 $\vec{F}$ 与喷气推力 $\vec{P}$ 的几何和。

A. A. 科斯玛杰米杨斯基高度评价 И. B. 墨歇尔斯基的科学遗著, 他在书中写道: “И. B. 墨歇尔斯基求得的变质量质点运动基本方程使确定各种特殊问题的定量规律成为可能。我们找不到国外作者的哪一本著作能在丰富的思想内容方面和这部‘老的’ И. B. 墨歇尔斯基的著作媲美。” ●

著名俄国科学家 К. Э. 齐奥尔科夫斯基在变质量物体力学方面作出了宝贵贡献, 在他于1903年所出版的《用喷气装置探索宇宙空间》●一书中最先探讨了一系列有关变质量物体 (火箭) 的直线运动问题。研究无外力作用的质点在介质中作最简运动时, К. Э. 齐奥尔科夫斯基最先推导出火箭熄火速度公式

$$V_{\text{к}} = W \ln \left(1 + \frac{M_{\text{т}}}{M_{\text{к}}} \right), \quad (2)$$

式中, $M_{\text{т}}$ ——飞行中消耗的推进剂质量; $M_{\text{к}}$ ——不包括推进剂的火箭质量 (熄火质量)。

公式 (2) 称为齐奥尔科夫斯基公式。К. Э. 齐奥尔科夫斯基于1914年以如下定理●阐述了 this 公式所表示的对数规律:

“如果火箭质量与喷气装置装药量之和以几何级数增大, 则

● Космодемьянский А. А. Курс теоретической механики. М., Учпедгиз, 1955.

● К. Э. 齐奥尔科夫斯基关于火箭技术方面的著作收集在他的论文集第二卷中, 苏联科学院出版社, 1954年。

● Космодемьянский А. А. «К. Э. Циолковский—его жизнь и работы по ракетной технике». М., Воениздат, 1960.

火箭速度以算术级数增大。”

实际上，如果将齐奥尔科夫斯基公式改写为

$$\frac{V_{\kappa}}{W} = \ln \frac{M_0}{M_{\kappa}} \quad (3)$$

并以几何级数形式给定

$$\frac{M_0}{M_{\kappa}} = m, m^2, m^3, m^4, m^5, \dots, \quad (4)$$

则速度变化遵循算术级数规律

$$\ln \frac{M_0}{M_{\kappa}} = \ln m, 2 \ln m, 3 \ln m, 4 \ln m, 5 \ln m, \dots, \quad (5)$$

(式中 m ——任意数)

齐奥尔科夫斯基公式是火箭动力学领域研究工作的基础。

A. A 科斯玛杰米杨斯基在关于质量按两种规律变化的质点动力学、飞行力学特定问题及航天飞机状态的著作中，最早提出了理论力学这门学科的新课题，将其归并入单独的知识领域——火箭动力学●。

书中，在考虑重量因素的基础上对火箭动力学方程尽可能地进行了综合分析。通常写成如下形式：

$$\bar{V}_{\kappa} = -\ln f(\tau) - \sigma(\theta_{\kappa}) \frac{1 - f(\tau)}{n_0}, \quad (6)$$

式中， τ ——排出积极质量的总时间； $V_{\kappa} = V_{\kappa}/W$ ——无因次熄火速度；

$$f(\tau) = \mu_{\text{э.л}} + (1 - \mu_{\text{э.л}})\varepsilon + kn_0 \quad (7)$$

取导数 $(d\bar{V}_{\kappa}/dn_0)$ 等于零。得

$$n_0 = n_0[\mu_{\text{э.л}}, \sigma(\theta_{\kappa}), \varepsilon, k], \quad (8)$$

式中， $\mu_{\text{э.л}}$ ——构件无因次重量； n_0 ——初始(起飞)过载； $\sigma(\theta_{\kappa})$ ——速度的重量损失系数； ε ——质量比； k ——发动机装置重量系数。

● 应用于火箭的《变质量质点动力学》称为《火箭动力学》

利用重量平衡方程

$\mu_{Ri} = \mu_{Ri}(\eta_0), \mu_{Ri} = \mu_{Ri}(\varepsilon), \mu_{Ri} = \mu_{Ri}(\lambda), \dots$ (式中 λ —— 推进剂舱段或箭体相对长度), 从理论火箭动力学原理求得了适用于飞行器构件实际飞行条件及工作情况的结论。

关于多级火箭的结论特别重要。书中求得了综合考虑各种动力学因素及质量-惯性因素时组合火箭按级分配质量的一般法则。阐述了新的定理并提出了无因次特性——参数 M 。参数 M 的数值与给定设计参数 (运载系数、结构有效系数、积极质量排气速度、重力损失、级数等) 有关。此定理的一般结论是: 当所有各级的特性参数 M 相等时, 所对应的质量分配为最佳。在科研和设计工作中选择各种类型和用途的火箭飞行器最佳参数时, 必须掌握这一飞行力学新定理。

在推导重量公式过程中, 引入了附加 (结构-工艺的) 修正系数, 其数值用比较理论重量和类似的实有结构重量的方法求得。书中在分析统计数据的基础上给出了这些系数的数值。通过分析各种火箭的统计数据表明, 几何形式和载荷相近但由不同设计单位研制的构件, 其重量可以相差很大。这是由于设计方法、生产工艺、工作人员技艺高低及其它方面的差异所致。根据同类火箭及其构件的统计资料, 就能估计函数 (参数) 表示式为已知的复杂的相关关系。还应指出, 有些弹性理论公式, 其中包括作为原始方程的欧拉公式都没有考虑具体工作条件及生产中产生的结构缺陷, 因此必须说明, 在第四章中所列举的关系式只有在对统计数据加以处理并引入修正系数的条件下方可应用。

多次使用的航天系统回返级, 其飞行的主要任务在于安全返回发射场或其它降落区。返回时可采用带正升力或负升力的准定态滑行、沿弹道式轨道再入稠密大气层、大气层“起伏式”飞行及其它飞行状态。解此类问题在于求出飞行速度、航程、航行高度、航行时间及纵向-横向过载。此外, 掌握有翼式火箭-航天系统各级在垂直平面和水平面内的机动飞行特性具有重要意义。苏

联及其他国家的科学家对这种多状态飞行方式作了大量研究。众所周知，非定态运动的全微分方程还不能用解析法最终求解。其精确解可用电子计算机求得。但是，当要求所得解不是以图解形式表示而是以能在短时间内完成大量计算的解析式形式来表示时，则不宜采用此法。因此，本书在探讨一系列问题的过程中，在每一种具体情况下都作了假设，这些假设保证了解析解能满足设计计算所需精度。

书中运用了由具体到一般的叙述方法。这种方法便于详细理解设计师思路并学会有关设计技能。

目前，飞行器的设计工作是使用电子计算机来进行的。本书基本上是写解析法，这种写法具有很重要的意义。当前，电子计算机领域的成就使得许多研究人员认为解析解是次要的并且其作用日益降低，实际上这是一种错觉。

用解析法进行研究的优越性在于它能明晰地解释物理意义，准确地预断参数，以及(或许是最重要的)揭示并陈述新的定律。可以预期，在实用火箭动力学今后的发展中，研究人员将致力于解析法及数值计算两者的结合。