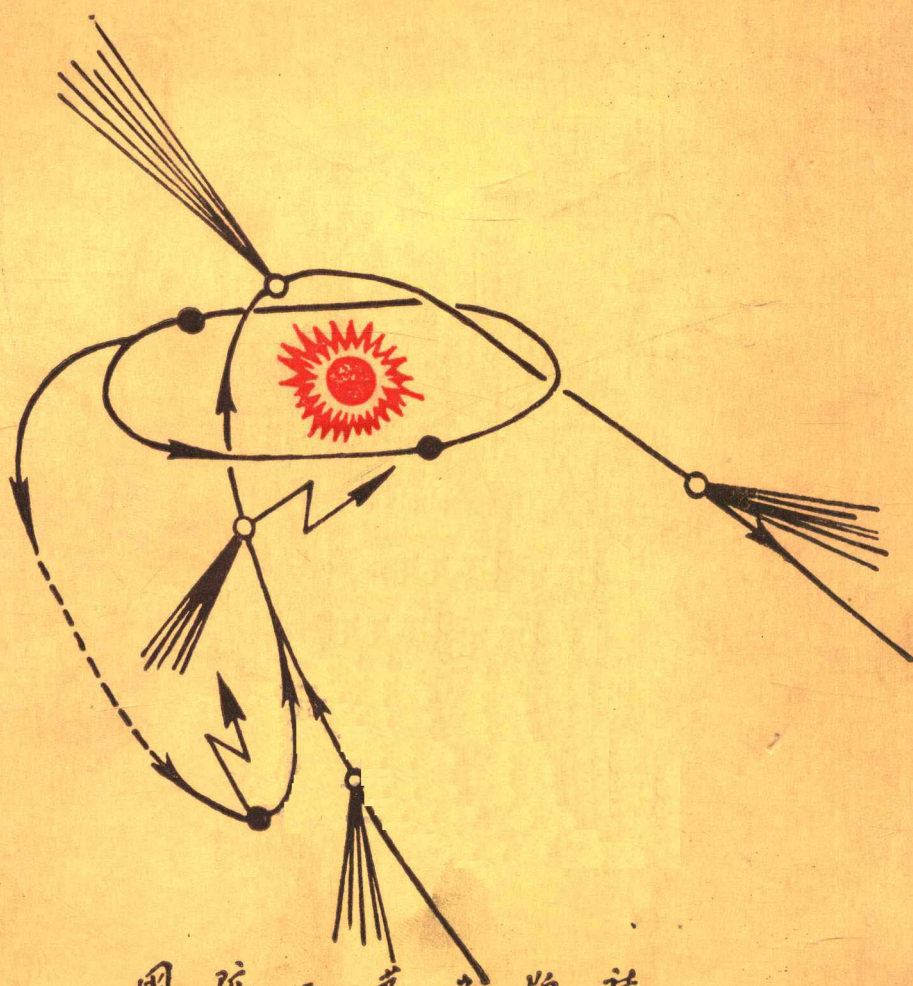


宇宙飞行力学基础



国防工业出版社

宇宙飞行力学基础

〔苏〕 В.И.列凡托夫斯基 著

凌福根 谢治权 马宗诚 等译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是宇宙飞行方面的基础性读物。全书共分五个部分。第一部分讲一般理论、宇宙飞行的推进系统以及引力场内的主动与被动飞行。其余四部分的内容依次为：近地飞行、向月飞行、行星际飞行和恒星际飞行。重点介绍设计与研究宇宙飞行轨道及有关问题的方法，讨论了有人驾驶的轨道站和宇宙飞船的飞行方法，列举了部分初等计算的实例，引用了国外公开发表的新近研究成果。全书以叙述为主，没有使用高深的数学工具，内容比较系统，可供有关方面的设计研究人员参考，也可供有关院校的师生阅读。

МЕХАНИКА КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

В ЭЛЕМЕНТАРНОМ ИЗЛОЖЕНИИ

В. И. ЛЕВАНТОВСКИЙ

«НАУКА» 1974

*

宇宙飞行力学基础

〔苏〕В. И. 列凡托夫斯基 著

凌福根 谢治权 马宗诚 等译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山西新华印刷厂印刷

*

787×1092¹/₁₆ 印张 17⁷/₈ 410 千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷 印数：00,001—10,000册

统一书号：15034·1788 定价：1.85元

译者的话

宇宙飞行是一门综合性的科学，涉及的科学领域很多，但宇宙飞行力学是它最主要的理论基础。从事空间事业的各方面专业人员都应该大致了解宇宙飞行力学的内容。本书以叙述性的方法介绍了这方面的基本内容，总结了国外宇宙飞行的现况，提出了宇宙飞行发展的可能方向，全书比较注重概念的介绍，具有一定的参考价值。因此我们本着洋为中用的精神，译成中文出版，供从事宇宙飞行事业的各方面人员参考。

书中对于苏联在宇宙飞行方面的工作渲染较多。另外，对于发展空间事业的某些观点也是错误的。为了保持内容的完整性，我们基本上没有加以删节，请阅读时注意。

一九七五年，吴国庭、凌福根、陈烈民、韦德森等同志根据第一版英译本转译成了本书的草稿，付印前发现苏联已经发行第二版。新版改正了第一版中的部分差错，并扩充了宇宙运输系统、向类木星飞行、小行星飞行以及向彗星飞行等方面的内容，收入了一九七〇年以后发表的部分新成果。因此我们又根据一九七四年的俄文第二版作了重新译校，但时间仓促，水平有限，肯定有很多错误，请批评指正。

序

本书取名为宇宙飞行力学，也可称为宇宙动力学。读者从本书学到的科学原理，实质上就是整个宇宙飞行理论的基础。

征服外层空间的问题，可以分为三个主要的科学技术领域：近地飞行（即发射各种用途的人造地球卫星）；向月球的飞行；向太阳系行星的飞行。大家知道，在这些领域内都已经取得了惊人的成绩。

本书分为三个主要部分（第二、第三和第四部分）论述前面提到过的三个研究领域。但各部分的载人飞行问题都是单独讨论的。第一部分讨论了宇宙动力学的一般问题。

讲恒星际飞行的第五部分是独立的。虽然这部分内容非常玄虚，但为了使本书的力学基本问题完整起见，没有给予省略。然而，新添的第二十三章内容比较粗糙。

根据书名，本书的内容与其他宇航书不一样，只讨论卫星、自动站和宇宙飞船的运动理论。如果读者对宇航医学、宇航生物学、宇宙通信、飞船生命保障系统设备、结构原理以及其他许多重要的宇航学问题有兴趣，可以参考相应的专业书籍。本书描述了空间站和飞行器的发射设备，这是很难得的例外。为了说明某些理论，本书还叙述了发射宇宙人造物体的方法。但从科学研究和解决技术设计的角度来看极端重要的一些学科，书中连提都没有提到。某些卫星的细节在本书中作了介绍，这些细节本身对宇宙研究不一定具有很大价值，但它们的运动特点、入轨方法等是很值得注意的。

为了使读者从宇宙物理学的角度形成某些理论上的适当概念，本书还简要地给出了由宇宙飞行得到的天体方面的研究成果。

各类火箭发动机的工作原理只作了一般性的解释。没有这方面的知识，要想理解飞行力学是不可能的。但是飞行力学问题实质上是选择飞行轨道的问题，叙述起来十分广泛。作者既不赞成对某些有趣的构思绝口不提，也不能对在外行中流传的某些错误解释缄默不语。本书主要是讲轨道的特征、动力消耗与速度、空间运行的性能、运载火箭的质量（重量）性能、宇宙飞行器和宇宙飞船的入轨等问题。这些基本上是宇宙飞行的关键问题。对于希望了解征服外层空间的困难和前途的人来说，那些知识是必不可少的。

宇宙飞行力学中有关宇宙飞行器相对于质心的旋转理论超过了本书的范围，应另行讨论。

只要有初等数学的知识就基本上可以理解本书所解释的问题。但本书不是消闲读物，它需要读者养成认真思考的习惯。全书的内容安排具有一定的逻辑性。因此对于初次熟悉这方面内容的读者来说，如果不读前文，单独阅读后面的某些章节就会很难理解。

本书虽然只讲基础内容，但叙述很严谨。尽量使读者能从科学的角度理解全文，而不是从直观上加以理解。

为了使本书适用于众多的读者，作者没有滥用公式。滥用公式往往使人们难以看到公式背后的光辉思想。虽然书中没有列出具体的计算过程，但是作者给出了具体计算所用的

部分公式。然而本书毕竟不是中学课本，因此公式的推导（纯属初等数学的、三角的知识）几乎没有。

本书是为所有对宇宙飞行理论基础有浓厚兴趣而且不怕耗费时间来熟悉这些内容的读者而写的。作者想到的读者包括学生、物理教师、数理学校高年级学生、科学家、技术人员和工程师，他们在宇宙飞行力学方面可能还不是专家。这里提到的科技工程人员包括那些已经在空间技术的某个领域工作但还缺乏完整的宇宙动力学基础知识的人员。许多受过专业技术教育的读者完全有能力根据专业书刊研究宇宙动力学并进行训练，但眼前他们往往没有这方面的书刊。作者希望本书能帮助他们。

有志于宇宙飞行力学的人们，可从本书入门。本书包罗了宇宙飞行力学专家们的现代研究成果。作者希望这些成果以及本书的其他内容也能使宇宙飞行力学的专家们有所受益。

书中内容的逻辑程序基本上与作者考虑的宇宙飞行理论基础教程相一致。在某些高等技术训练学院和师范学院已经安排过一些类似的教程（不过这些教程不是为了训练宇宙飞行研究人员及飞行器设计人员而设置的），这样作很重要。因为在我们这个时代，受教育的人员必须具有宇宙飞行方面一些基本而正确的知识。因此，学校教育“宇航化”是一个迫切需要解决的问题。而且学校里教的书本上的物理定律，应用到外层空间中也是一目了然的。

作者希望读者能通过本书学习了解专家们设计宇宙轨道的指导思想，能够估计实现这些宇宙飞行的严重困难。在需要的时候，还希望读者能够进行独立的计算，例如计算飞船进入近地轨道对行星进行探险所必需的初始质量等。书末附录 I 中的表，有助于读者对内容的理解。

当作者准备本书第二版时，在尽量不增加篇幅的情况下，摆进了本人搜集的一九七〇年以后出现的大量材料与观点。大大丰富了宇宙空间运输系统方面的材料，飞向类木星、飞向木星与火星间的小行星以及飞向彗星等方面的材料。关于行星际飞行还增加了一个专章。添加了内容索引并补充了简单的计算公式。

本书第二版的修订工作，于一九七三年春已基本就绪。一九七三年以后出现的文献材料，本书引用较少。

目 录

绪论	1	§ 4 轨道在地球大气层中的演化	44
§ 1 宇宙动力学——宇宙飞行的理论	1	§ 5 月球和太阳引力的影响	46
§ 2 力学基本定律	2	§ 6 秤动点上的卫星	48
§ 3 力和质量的单位	3	§ 7 太阳光压的影响	50
第一部分 火箭和宇宙动力学基础		§ 8 卫星相对于地球表面的运动	51
第一章 宇宙飞行的推进系统	5	第五章 卫星在近地空间内的主动运动	53
§ 1 火箭推进定律	5	§ 1 卫星的入轨	53
§ 2 火箭的结构	8	§ 2 轨道机动	54
§ 3 多级火箭	9	§ 3 改变轨道平面	56
§ 4 热化学火箭发动机	12	§ 4 离轨	57
§ 5 核热发动机	14	§ 5 卫星附近的相对运动	59
§ 6 太阳热发动机	15	§ 6 轨道交会	63
§ 7 电火箭发动机	16	§ 7 最后的接近和对接	65
§ 8 帆系统	18	§ 8 在近地空间中的小推力飞行	67
§ 9 光子(量子)火箭发动机	19	§ 9 用太阳帆加速	71
§ 10 推进系统的分类	19	§ 10 卫星的定向和稳定	72
第二章 在引力场中的自由飞行	22	第六章 人造地球卫星的应用	74
§ 1 飞行中作用在宇宙飞行器上的力	22	§ 1 近地空间内飞行的宇宙飞行器	74
§ 2 n 体问题和数值积分方法	23	§ 2 研究卫星	75
§ 3 失重	24	§ 3 气象卫星	78
§ 4 中心重力场	25	§ 4 通信卫星	80
§ 5 中心重力场内的轨道	26	§ 5 导航卫星	81
§ 6 一般二体问题	29	§ 6 其他应用卫星	81
§ 7 作用范围和轨道近似计算	30	§ 7 载人轨道空间站	82
第三章 宇宙飞行器的主动飞行	33	§ 8 人造重力	87
§ 1 自由轨道的获得	33	§ 9 宇宙运输系统	89
§ 2 在外层空间中的主动飞行	35	第三部分 向月球的飞行	
§ 3 过载	36	第七章 登月飞行	93
§ 4 宇宙飞行器运动的控制	37	§ 1 登月的平面问题	93
§ 5 宇宙飞行器相对于质心的运动	38	§ 2 登月的空间问题	96
第二部分 近地飞行		§ 3 月球轨道椭圆度、月球引力和月球大小的影响	99
第四章 人造地球卫星的运动	41	§ 4 地球扁率和太阳重力摄动的影响	100
§ 1 轨道参数	41	§ 5 制导精度	101
§ 2 卫星的摄动运动	42	§ 6 轨道修正	103
§ 3 地球扁率的影响	42	§ 7 月球着陆	103

§ 8 自动月球站的科学应用.....108	§ 8 行星际轨道的摄动.....179
第八章 飞越运行.....110	§ 9 行星际轨道的修正.....180
§ 1 飞越轨道.....110	第十三章 小推力飞行.....183
§ 2 返回时对地球的接近.....112	§ 1 到达行星的轨道.....183
§ 3 周期绕月飞行.....115	§ 2 飞到行星的卫星轨道.....184
§ 4 助推轨道.....117	§ 3 太阳帆.....186
§ 5 飞越轨道上的机动.....118	§ 4 小推力飞行的优点.....187
§ 6 飞越过程的科学应用.....118	第十四章 行星际空间的探测.....189
第九章 月球轨道器.....120	§ 1 人造行星的单脉冲轨道.....189
§ 1 月球捕获宇宙飞行器的可能性.....120	§ 2 黄道面之外的飞行.....191
§ 2 月球轨道器的发射.....121	§ 3 利用太阳能电火箭改变轨道平面.....192
§ 3 月球卫星轨道及其演化.....123	§ 4 双脉冲人造行星轨道.....193
§ 4 卫星相对于月球表面的运动.....126	§ 5 通过无限远完成过渡.....195
§ 5 月球卫星的机动.....127	§ 6 人造行星的应用.....195
§ 6 月球卫星的科学应用.....128	第十五章 向火星的飞行.....197
第十章 返回地球.....131	§ 1 行星轨道简化模型下的飞行轨道.....197
§ 1 返回轨道.....131	§ 2 火星轨道倾角和偏心率的影响.....199
§ 2 再入地球大气层与降落.....132	§ 3 向火星发射的地理条件.....201
§ 3 宇宙飞行器绕月飞行后返回地球.....134	§ 4 在火星上着陆.....201
§ 4 自动站在月球着陆后返回地球.....136	§ 5 人造火星卫星.....203
第十一章 月球考察.....138	§ 6 向火卫一和火卫二飞行.....204
§ 1 载人飞行轨道的特征.....138	§ 7 返回地球的绕火星飞行.....205
§ 2 地-月-地直接飞行(月球考察的第一种方案).....139	§ 8 火星的研究.....206
§ 3 空间交会及飞船装配(月球考察的第二种方案).....142	第十六章 向金星的飞行.....210
§ 4 在近月轨道上的分离与接近(月球考察的第三种方案).....143	§ 1 到达金星.....210
§ 5 “阿波罗”计划.....144	§ 2 在金星上着陆和金星卫星.....210
§ 6 通向月球的宇宙运输系统.....153	§ 3 绕金星的飞行.....211
§ 7 小推力月球货船.....154	§ 4 苏联、美国自动站向金星的飞行.....212
§ 8 绕月轨道站.....155	§ 5 金星的研究.....214
§ 9 月球科学站.....157	第十七章 向水星的飞行.....216
	§ 1 到达水星.....216
	§ 2 在水星上着陆以及水星的人造卫星.....216
	§ 3 绕飞金星后飞向水星.....217
	§ 4 利用太阳-电火箭的飞行.....218
	§ 5 水星的研究.....218
第四部分 行星际飞行	第十八章 向类木行星的飞行.....219
第十二章 大推力飞行.....159	§ 1 一类奇怪的行星.....219
§ 1 行星际飞行的主要特点.....159	§ 2 到达木星的条件.....219
§ 2 在地球作用范围内的运动.....161	§ 3 进入木星大气层.....220
§ 3 地球作用范围之外的日心运动.....165	§ 4 木星的人造卫星.....221
§ 4 霍曼和抛物线飞行.....167	§ 5 飞向木星的天然卫星.....222
§ 5 目标行星作用范围内的运动.....170	§ 6 直接飞向土星、天王星、海王星和冥王星.....222
§ 6 行星际的机动飞行.....173	
§ 7 行星的人造卫星.....175	

§ 7 利用小推力向类木行星飞行	223
§ 8 经木星飞向太阳	224
§ 9 多行星的绕飞	225
§ 10 利用小推力发动机进行多行星飞行	228
§ 11 类木行星的研究	229

第十九章 向小行星的飞行 232

§ 1 向小行星的飞行	232
§ 2 与小行星的交会	232
§ 3 进入绕飞小行星的轨道	233
§ 4 在小行星上着陆并返回地球	234

第二十章 向彗星的飞行 235

§ 1 脉冲式直接飞行	235
§ 2 顺路绕飞木星	236
§ 3 用小推力飞向彗星	237
§ 4 在彗星核近旁的飞行以及返回地球	238

第二十一章 载人行星际探险 239

§ 1 载人行星际探险的特点	239
§ 2 探险后返回地球	241
§ 3 绕行星的不停留载人飞行	242
§ 4 有停留的对称直飞载人探险	243
§ 5 用不对称轨道飞抵行星并返回的载人探险飞行	247
§ 6 在近行星轨道、飞行轨道以及行星表面上的操作	248

§ 7 到小行星探险	250
§ 8 小推力飞船的应用	251
§ 9 征服行星	253

第五部分 向太阳系外飞行

第二十二章 飞向恒星的开端 255

§ 1 行星外区域	255
§ 2 直接飞行与途经木星的飞行	256
§ 3 太阳附近的机动	256
§ 4 绕过木星和土星后在太阳附近的机动	257

第二十三章 恒星际飞行 259

§ 1 宇宙航行学——天体航行学的一个分支	259
§ 2 光子火箭——实现恒星际飞行的一种方法	259
§ 3 广义齐奥尔科夫斯基公式	260
§ 4 飞行时间	261
§ 5 关于宇宙飞船的“固有”速度	263
§ 6 梦想还是现实?	264

结束语 266

附录 I 书中图表目录 268

附录 II 运载火箭初始质量的计算 268

参考文献 270

绪 论

§1 宇宙动力学——宇宙飞行的理论

天体航行学是涉及各种科学技术分支的一门综合性科学。它利用宇宙飞行器（人造卫星、各种用途的自动站与载人飞船）对外层空间与天体进行研究，并且力求征服它们。

天体航行是人类长期的愿望。由于俄国学者К. Э. 齐奥尔科夫斯基（Циолковский）的研究，终于使天体航行成为一门科学。自从热心家和科学家的思想开始转向在设计部门以及工厂制造金属人造物体以来，天体航行的理论基础很长时间一直停留在三个方面：

1) 宇宙飞船^①的运动理论；2) 火箭技术；3) 关于宇宙的整体天文学知识。

后来，天体航行学中出现了新的科学技术内容，例如空间人造物体的控制系统理论、空间导航、宇宙通信系统和信息传送理论、宇宙医学和生物学等。没有这些学科的发展是很难具体想像天体航行的。但是，齐奥尔科夫斯基却是在天线电波仅仅进行第一次试验，并且认为空间通信不能采用无线电方法的时候，就奠定了天体航行学的基础。历史上曾有一段很长的时间考虑用太阳光射线输送信号作为通信方法。太阳光射线用布置在行星际飞行器上的反射镜反射到地球上。现在我们不再相信这一方法。对于直接观察来自月球表面的电视以及用无线电方法发送回来的火星表面照片，已经习以为常。因此我们可以断言，空间通信的理论不管怎么重要，已经不再是空间事业的主要研究课题。

外层空间中物体的运动理论才是主要的研究课题，它可以作为真正的宇宙飞行理论。在这个领域工作的专家，对这门学科有如下几种称呼：应用天体力学，天体弹道学，宇宙弹道学，宇宙动力学^②，宇宙飞行力学，人造天体运动理论。

所有这些称呼都具有同样的意思。最后一种说法比较确切。宇宙动力学是天体力学的一部分。天体力学是研究任何天体的科学，既研究自然界的天体（恒星、太阳、行星、行星的卫星、彗星、流星、宇宙尘埃等），也研究人造天体（自动宇宙飞行器和载人宇宙飞船）。宇宙动力学与天体力学是不可分的。它包含在天体力学中，使用着天体力学的方法，但超出了天体力学的传统范围。

经典天体力学不研究也无法研究天体的轨道选择问题。而应用天体力学的核心内容就是轨道的设计，即从可以到达某个天体（月球、火星、金星等）的大量（往往是无限的）可能轨道中选择一条轨道，这条轨道能使飞行器以最小的动力消耗或最短的飞行时间、用最简单的飞行控制方法、在最便于观察的情况下到达需要去的天体。这就是应用天体力学与经典天体力学的本质区别。从某种意义上讲，这种最好的轨道可以称为是最佳的。选择最佳轨道是宇宙动力学中最感兴趣的问题。

① 目前只是把设计用来载人飞行的物体称为宇宙飞船。但有时任何宇宙飞行器都用这个称呼。

② 有时也称为天体动力学。但这样称呼不太确切。因为从字面上讲，它可以理解为“星体的动力学”，就好像是已有很长历史的天文学方面的研究内容。

宇宙动力学不局限于研究选择轨道，而且研究轨道的修正和变换，即一般文章中的所谓轨道机动。这在经典天体力学中也是没有的。

宇宙动力学是宇宙飞行一般理论的基础（正象空气动力学是飞机、直升飞机、气船及其他大气层中飞行器的飞行理论基础一样）。它与火箭动力学（火箭运动的科学）紧紧地联系在一起，组成了空间技术的基础。这两门学科都是理论力学^①的分支。理论力学范围比较广，它是物理学的一个分支。

宇宙动力学是以数学方法进行研究的一门精确学科，具有一定的逻辑性。在哥白尼、伽利略和凯普勒等科学家的伟大发现之后，牛顿、欧拉、克莱洛特、达朗贝尔、拉格朗日、拉普拉斯等对数学力学研究有巨大贡献的科学家更加完整地建立了天体力学的基础。当代的数学家们仍在帮助解决宇宙动力学方面的问题。反过来，宇宙动力学中存在的问题也大大推动了数学的发展。

经典天体力学是一门纯理论的学科。它的结论是根据天文观察资料建立起来的。宇宙动力学为天体力学引进了实验，使天体力学第一次转为实验性科学，就象空气动力学是力学的实验性科学一样。宇宙动力学发展的趋势必然要超过消极的经典天体力学。宇宙飞行的每个新成就都证实了宇宙动力学的方法是有效而正确的。

§2 力学基本定律

在开始研究人造天体（卫星、月球和行星际飞行器、载人宇宙飞船等）的运动之前，让我们首先复习一下中学里学过的力学基本定律。这些定律在以后的内容中要经常用到。

牛顿第一定律（惯性定律） 任何质点都将保持匀速直线运动，直到作用力完全能改变它的状态为止。

匀速直线运动是速度大小和方向都不变的运动，也就是具有常数速度向量的运动（“惯性运动”）。

在任何情况下，只要速度向量有变化，就一定有加速度存在。特别是质点沿着圆周作匀速运动（例如图1中卫星绕地球的圆轨道运动）时也有加速度存在，因为此时速度向量是变化的（它的大小不变，但方向连续变化）。可以知道此时的加速度值 a 等于 v^2/r ，这里 v 为速度常数， r 为圆轨道的半径。圆周上各点加速度的方向均指向圆心（见图1）。

按照牛顿第一定律，有力才有加速度。在我们的例子中，卫星圆周运动的原因也是因为有力，这个力不允许卫星沿瞬时速度方向作直线运动。这个力就是地球的引力，在第二章中将对它作进一步讨论。

牛顿第二定律建立了力和加速度之间的关系。

牛顿第二定律 质点运动的加速度正比于作用在质点上的力，加速度的方向与作用力一致。

如果用 F 表示作用力的大小， a 表示加速度的大小，则

$$F = ma$$

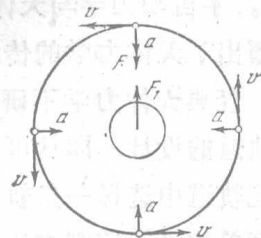


图1 卫星在圆轨道上的运动

① 天体力学同时是理论力学和天文学的分支。

第二定律中的量 m 是个比例因子，它表示了质点的惯性，称为质量。

在我们的例子中，如果已知卫星的质量和加速度 $a = v^2/r$ ，则可以用上述公式计算使卫星实现圆周运动的作用力。这个力及因而产生的加速度的方向都指向圆周运动的中心——地球。

“为什么卫星不落到地球上？”这个问题容易回答。卫星不落到地球上，即它的轨道不会与地面相交，是因为无法使它沿作用力方向运动。重力加速度向量的方向总是在作用力方向上，但无法使速度向量也指向这个方向，而只有速度向量才代表卫星的运动方向。

另一方面，如果知道力的大小和方向，就可以确定加速度的大小和方向（用公式 $a = F/m$ ），由此可以用数学方法确定运动物体的运动路线。

这里至少要遇到宇宙飞行力学的两个基本问题。

1) 确定作用力。由此作用力来控制宇宙飞行器，使它完成预定的运动。

2) 知道作用在宇宙飞行器上的力，确定宇宙飞行器的运动。

现在分别讲一下。第一个问题是宇宙动力学问题，着重于天体力学积极的方面。第二个问题带有经典天体力学的特色，经典天体力学研究“天然”天体的运动。

现在我们仍回过头来讨论牛顿定律。

一个物体上的作用力总是来源于另一个物体。而这另一个物体反过来又受第一个物体的影响。

牛顿第三定律 任何作用力都应有一个大小相等方向相反的反作用力。

用到我们的例子中，就是说地球作用在卫星上的作用力（ F ，方向指向地球）对应有一个反作用力 F_1 ，它由卫星作用在地球上，大小等于作用力，方向指向卫星。按牛顿第二定律，这个力当然也会使地球产生加速度，但它远远小于地球给卫星的加速度，因为地球的质量远远大于卫星的质量。地球的质量是 5973×10^{18} 吨，因此无论什么人造卫星，它给地球的加速度都是可以忽略的。所以我们不研究人造卫星、宇宙飞行器和载人宇宙飞船对天然天体的影响，不管这些影响产生的是引力还是其他力（例如因宇宙飞行器在月球表面降落而产生的冲击）。

§3 力和质量的单位

以后要深入研究作用在宇宙飞行器上的力。现在让我们先了解一下力和质量的度量单位。

在国际单位制中，质量单位是千克（kg），相应的力单位是牛顿（N），这个力能使 1 千克的质量产生 1 米/秒^2 （ m/s^2 ）的加速度，即 $1 \text{ 牛顿} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米/秒}^2$ 。

在很多技术领域中，却仍旧使用千克力（kgf）作为力的单位。而相应的质量单位是 $1 \text{ 千克力} \cdot \text{秒}^2/\text{米}$ 。这种单位制我们称为实用单位制。

国际单位制中质量的单位是 1 千克，实用单位制中力的单位是 1 千克力，两者常常会引起混淆。但我们不管这一点，仍旧同时使用这两套单位制，理由如下。

第一，牛顿力的单位还没有普遍使用。到目前为止，火箭技术中的推进力一般仍以克力、千克力和吨力来度量。为了不与国际单位制中相似的质量单位 g、kg、t 相混淆，我们把力的单位记为 gf、kgf、tf。但有时我们将用“牛顿（N）”作为力的单位。

第二，要在所有的地方免去千克作为质量单位是没有什么意义的。不仅因为这个单位在国际单位制中很有价值，而且也因为它说明了1千克质量会产生1千克力的负载，这就是众所周知的1千克重的概念。具体有 $1 \text{ 千克力} = 1 \text{ 千克} \cdot 9.8 \text{ 米/秒}^2$ ，因此 $1 \text{ 千克力} = 9.8 \text{ 牛顿}$ ④。

在说明火箭和宇宙飞行器的数量特征时，我们切忌使用“重量”这个名词。大家知道，重量是由物体的压力确定的，这个压力作用在支撑物体的行星表面上。因此在不同的天体上，重量自然是不同的。另外，外层空间中自由飞行的宇宙飞行器处于无支撑的状态，即失重的状态，因此更有理由要用质量而不用重量来说明飞行器的数量特征。

④ 关于力和质量的单位，我国规定质量用公斤、吨作单位（小于1公斤的用克或小数表示），力用公斤力、吨力作单位（小于1公斤力的以小数表示）。但一般工程上往往把力的单位简称为公斤、吨，此时为了不与质量单位混淆，一般沿用千克作为质量单位。——译者

第一部分 火箭和宇宙动力学基础

第一章 宇宙飞行的推进系统

§1 火箭推进定律

有关火箭推进的定律是宇宙飞行的理论基础之一。我们将首先研究这些定律。

宇宙飞行可以使用的火箭推进系统很多。这些推进系统采用的能源是不同的。但是在所有的情况下，火箭发动机都执行着同一个任务，即火箭以某种方式将储存在火箭内部的物质（称为工质）喷射出去。火箭对喷射物质作用了一定的力。按照牛顿力学基本定律作用力与反作用力相等，因此喷射物质就对火箭作用了一个大小相等、方向相反的力。它推动火箭运动，称为推力。

很明显，如果在单位时间内，火箭喷射的物质越多，喷射速度越大，则推力就越大。可以严格地证明推力与喷射物的质量和速度成正比，即

$$F = wq \quad (1)$$

这里 F —— 推力， w —— 喷射物质相对于火箭的喷射速度^①， q —— 单位时间内喷射物质消耗的质量（不是重量！），即质量流率。

如果公式(1)中喷射速度的单位是米/秒，质量流率的单位是千克/秒，则所得的推力单位就是牛顿。

在公式(1)的右边乘除地面的重力加速度 $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$ ，则有

$$F = wq = \frac{w}{g} gq$$

或写成

$$F = I_{yn} gq \quad (1')$$

其中 gq 为重量流率，单位是千克力/秒； $I_{yn} = w/g$ 为比冲，单位是(米/秒)/(米/秒²)，即秒。公式(1')右边各项用上述单位度量时，力 F 的单位就是千克力。显然，如果取 $9.8 \text{ 牛顿} = 1 \text{ 千克力}$ ，则使用公式(1)时推力的单位也是千克力。

比冲的大小表示每消耗 1 千克重的工质所产生的冲量（单位是千克力·秒），所以称为比冲。因此通常比冲的单位是千克力·秒/千克重，即秒。

也可以用另外一种说法：比冲是每秒消耗 1 千克重工质时所产生推力的千克力数。此时比冲就以 (千克力)/(千克重/秒) 为单位，还是秒。

① “相对于火箭”这个条件很重要。因为工质的喷射速度相对于地球与相对于天体是完全不同的，因此不能用喷射速度来表征火箭发动机。

最后还可作如下解释：比冲就是时间，在此时间里消耗了质量为 1 千克的工质，并持续地产生了 1 千克力的推力。这就是说，比冲表征了工质消耗的经济性。

为了解释比冲 I_{yn} 的物理意义，我们必须记住比冲有不同的量纲，相应的喷射速度也有不同的量纲，两者应完全对应。它们之间只差一个常量纲因子 $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$ ($w = gI_{yn}$)。

严格地讲，只有当喷射物质是固态或液态时，公式(1)和(1')才成立。但实际上从火箭喷射出来的是气体射流。为了推广使用前面的公式，就应该考虑气体对火箭的额外影响，把推力公式修改为

$$F = wq + S(p_r - p_a)$$

其中 p_r ——发动机喷管端部的气体压力（在下面介绍火箭发动机设备时将详细解释）， p_a ——外界大气压力， S ——喷管出口的截面积。从这个公式可以明显地看到，由于压力 p_a 随着高度的增加而下降，因此发动机的推力将随着火箭上升的高度而增加。后面我们把附加项 $S(p_r - p_a)$ 的影响考虑在 w 和 I_{yn} 里边，这样就可以继续使用(1)和(1')那样的简单公式。称已经考虑了 $S(p_r - p_a)$ 影响的 w 和 I_{yn} 为有效喷射速度和有效比冲。

在其他条件相同的情况下，有效喷射速度在真空中呈最大值，在海平面上呈最小值。在试车台上测量发动机的推力（用测力计）和工质流率，就可以确定有效喷射速度（或有效比冲）的大小。

除了推力之外，还有很多力作用在火箭上。例如地球及其他天体的引力、大气阻力、光压等。所有这些力作用的结果使火箭具有一个加速度。火箭的总加速度由每一个分力产生的加速度组合而成。下一章我们将广泛地研究各种力的影响，现在只讨论推力加速度或反作用加速度 a_p 。根据力学第二定律，这个加速度的值为

$$a_p = \frac{F}{m}$$

其中 F ——推力， m ——火箭在某瞬时的质量。火箭的质量随着工质的消耗而成正比地下降，反作用加速度就不断增加（为了使反作用加速度不增加，就必须同时以某种方式降低推力）。因此，用运动开始时推力所形成的初始反作用加速度来表征火箭发动机比较好。初始反作用加速度可以表示为

$$a_{p0} = \frac{F}{m_0}$$

其中 m_0 ——火箭的初始质量。我们常常用一个无量纲的比值“推力-重量”比来代替它。这个推力-重量比等于推力和初始重量的比值，它表明了每单位初始重量要由多大的推力来负担。很明显，推力-重量比等于初始反作用加速度除以 $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$ ，它在数值上等于以 g 作单位的初始加速度值。

反作用加速度（包括初始反作用加速度）是指火箭在只有推力而没有其他力作用的情况下所获得的加速度。也就是说，根据齐奥尔科夫斯基表达式，火箭处在假想的“自由”空间中。实际上这样的条件在太阳系中是不存在的。但这种火箭上没有外界力作用的“自由空间”的设想，是很有价值的。

我们想像把火箭放在上面所说的自由空间内，并启动它的发动机。发动机产生推力，

火箭就得到一定的加速度,开始以一定的速度沿着直线运动(假定推力不改变方向)。当火箭的质量从初始质量 m_0 减少到某一质量 m_k 时,火箭将获得多大的速度呢?如果我们认为火箭中工质的喷射速度不变(现代火箭基本上可以做到这一点),则火箭所达到的速度 v 可以用齐奥尔科夫斯基公式表示为

$$v = \omega \ln \frac{m_0}{m_k} = 2.30259 \omega \lg \frac{m_0}{m_k} \quad (2)$$

其中 $\ln$ 表示以 e 为底的自然对数, $\lg$ 表示以 10 为底的常用对数。公式(2)还可以写成

$$\frac{m_0}{m_k} = e^{v/\omega} \quad (2')$$

其中 $e = 2.71828$, 是自然对数的底。

用齐奥尔科夫斯基公式计算的火箭速度 v 表征了发动机的性能。这个速度称为理想速度或特征速度。可以看出,理想速度与工质的质量流率无关,而只与喷射速度 ω 和 $z = m_0/m_k$ 有关。 z 称为质量比或齐奥尔科夫斯基数。

喷射速度 ω 不变时,如果工质流率大(因此推力也大),则工质消耗快,火箭获得特征速度也快。如果工质流率低(因此推力也小),则消耗全部工质所需的时间就长,火箭获得特征速度也就慢。但是由于这两种情况的喷射速度一样,因此最终所获得的特征速度(理想速度)是相等的。

当然,这个结论只有在假想的自由空间中才成立。在实际情况中,由于外界力的干扰,火箭所获得的速度与理想速度(特征速度)是不同的。特别在小推力时,这种差别更明显。但是,如果推力和工质流率都很大,则工质在很短时间内就可以消耗完。此时外界力(远远小于推力)对火箭运动的影响与推力比较起来要微弱得多,因此火箭实际所获得的速度与理想速度差别很小。

下面我们将根据上述内容研究现代的主要火箭推进系统和有可能发展的新型推进系统。

在空间使用什么发动机,应根据反作用加速度 a_p 的大小来选择。例如,有时要在空间进行急剧的机动,则就应选用具有很大反作用加速度的发动机。反作用加速度太低的发动机甚至无法把宇宙飞行器送离地面。所有的发动机大致可以分成两类。一类是大推力发动机,即产生的反作用加速度大于重力加速度 $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$ 的发动机(更确切地讲是大反作用加速度的发动机)。另一类是小推力发动机,即产生的反作用加速度小于重力加速度 g 的发动机(更确切地讲是小反作用加速度的发动机)。

推进系统的性能一般是以比重来表征的。比重就是推进系统的重量与它所产生的推力之比。如果火箭只有一台发动机,那么它的比重就等于这台发动机的推力-重量比之倒数。发动机的比重大,它所产生的反作用加速度就小,这个发动机的性能就不好。以后我们主要用反作用加速度表征发动机的性能。

喷射速度 ω 也是一个很重要的特征量。发动机的喷射速度高,则理想速度也高,这样的推进系统就更适合作复杂的空间运行。

最后还要说明一下,对于一定的理想速度 v ,如果喷射速度 ω 比较高,则齐奥尔科夫斯基数 z 不必要求很大。这样就可以减少燃料的装载量,而使火箭能配置更重的有效载荷。

§2 火箭的结构

现代宇宙火箭是一个复杂的结构体。它由成千上万个零件组成，每个零件都有各自的用途。但是从火箭要加速到必要的速度这个力学观点来看，整个火箭的初始质量 m_0 可以分成两个部分：

- 1) 工质的质量；
- 2) 工质排完后火箭的质量 m_R 。

多数情况下，工质都是液体，因此常称排完工质后剩下的质量 m_R 为“干”质。前面已经说过，比值 m_0/m_R 称为齐奥尔科夫斯基数 z ，它与喷射速度一起表示了火箭的“高速能力”，因此设计火箭时就要尽可能增加 z 值。

“干”质量（也可以理解为“虚”质量，即工质排完后的火箭质量）包括结构和有效载荷两部分质量。其中结构不仅指火箭的骨架、外壳等，而且包括推进系统及其所有的零部件、控制系统、导航和通信设备等等。一句话，就是包括火箭正常飞行所需要的一切系统和部件。有效载荷包括科学仪器、无线电遥测系统、入轨的宇宙飞行器壳体、宇航员以及生活保障系统等等^①。如果不配置有效载荷，火箭当然也能正常飞行，但这种飞行毫无用处！



图2表示了我们所说的火箭结构。

如果设计水平高，就有可能尽量减少结构的重量，从而增加火箭的 z 值。结构和工质的总质量与结构质量之比，称为设计特征参数，记为 s ：

$$s = \frac{m_0 - m_n}{m_R - m_n} \quad (3)$$

其中 m_n ——有效载荷的质量。

任何火箭的 z 值都小于 s 值。如果设计水平比较高，能把尽可能多的工质集中到质量尽可能小的结构中去，在这种情况下再想提高火箭的速度则只有一条路——以减少有效载荷 m_n 的方法提高 z 值。如果完全不要有效载荷 ($m_n = 0$)， z 值就达到它的极限，与 s 值相等。但是在计划宇航任务时，即使能达到某个特征速度，没有有效载荷也是毫无意义的。我们称下面的值为相对初始质量：

$$p = \frac{m_0}{m_n}$$

它的倒数称为相对有效载荷或有效载荷因子。

用 m_0 除以公式 (3) 右边的分子分母，即可得到 s 、 z 和 p 三者之间的关系式：

$$s = \frac{1 - \frac{1}{p}}{\frac{1}{z} - \frac{1}{p}}$$

① 这样划分结构和有效载荷是不太确切的。例如月球航行时，领航员既是有效载荷又是火箭控制系统的一部分。将来还想用火箭的推进剂空箱作为宇航员在绕月轨道上和登月后的生活舱，也就是说火箭结构的一部分变成了有效载荷。但是现在为了简化，我们暂不考虑这些内容。