

宇宙飞行器研制的 理论基础



〔苏〕F. IO. 马克西莫夫 著

科学出版社

内 容 简 介

本书阐述了自动宇宙飞行器研制的物理—力学基础，给出了选择遥测系统、电源系统、姿态控制系统和天线等基本星上系统诸参数的先决条件，阐明了布局与结构研制的基础，其中，还分析了装载仪器设备的非密封舱的研制特点，并对运行中的宇宙飞行器的控制问题予以颇大的注意。最后一章，给出了宇宙飞行器合理设计的算法方案。

本书可供从事宇宙飞行器研制的工程师和科学工作者以及空间技术基础方面的大学生使用。

Г. Ю. Максимов
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

ИЗД. «НАУКА» 1980

宇宙飞行器研制的理论基础

〔苏〕Г. Ю. 马克西莫夫 著

李凡本 译

张正纲 校

责任编辑 宋义荣

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985年11月第一版 开本：787×1092 1/32

1985年11月第一次印刷 印张：9 1/2

印数：0001—1,000 字数：222,000

统一书号：15031·684

本社书号：4619·15—6

定 价： 2.35 元

前 言

自苏联发射第一颗人造地球卫星时起，空间技术已经存在二十多年了。在这个时期，以获得诸如载人宇宙飞行、自动科学站在月球上降落、宇宙飞船对接、宇航员登月探险、利用自动装置对太阳系行星的直接考察等这样卓越的技术成就而著名。空间技术的发展使我们能做出一系列重大的科学发现，如象地球附近辐射带的发现，金星和火星大气参数的确定，太阳风的发现，找到了整个宇宙中的 X 射线源和 γ 射线源等。此外，当今的公认事实是，空间技术不仅扩大了我们周围世界具有重大价值知识的范围，而且也给我们带来了直接的利益。不同国家发射的通信卫星、气象卫星和自然资源卫星，证实了这个论点。

与空间技术发展相并行，同时出现和发展了一些新的科学技术领域：飞行理论，质心运动控制理论，姿态控制理论及方法，导航理论，磁控系统，等等。在宇宙飞行器中，几乎任何系统或仪器的功能都依赖于其它系统、仪器的工作及飞行器的结构。然而，把宇宙飞行器作为某一统一整体而专门加以讲述的著作却几乎没有。

在深入研究所有宇宙飞行器的时候，这样综合考虑的必要性都会毫无例外地碰到。在确定各分系统、仪器和复杂组件的参数与特性时，在详细分析电路图和飞行器的控制仪器时，在建立工作程序乃至最后控制飞行器飞离地面时，都必须了解、分析与建立起宇宙飞行器各分系统之间的不同种类的联系，同时，还必须注意到各系统的工作与飞行器的轨道

及其结构之间的依赖关系。如果在设计的过程中渴求达到某一标准，例如要使飞行器的可靠性、工作寿命、科学仪器的质量等接近于极值，那么，上述那种考虑就更加必要。

本书是对自动宇宙飞行器研制的基本问题进行综合讲述的一个尝试。书中最大的注意力集中在讨论各服务分系统的参数、飞行轨道、结构和工作程序之间的各种联系方面。此外，书中还研究了宇宙飞行器在飞行中的某些控制问题，以及星上系统的仪器的工作逻辑和相互作用逻辑的概念，因为这些问题按作者的看法在现有的著作中都没能给予应有的注意。

本书关于分系统的知识讨论得较少。这些知识本书没有引出，读者可在苏联一般文献中查到。被例外编入的不过是一些少量的、有助于理解本书内容的材料。

宇宙飞行器的制造过程，如同其它的机器和仪器一样，包括计算工作，最佳结构与略图方案的筛选工作，以及采用实验室、实验样品与模型解决试验检验工作等。本书所讲述的基本上是计算和分析研究工作，而对结构和试验问题没有加以讨论。

本书的主要目的，是使读者能够解决自动宇宙飞行器制造时出现的各种具体工程问题，并给出关于研制这种飞行器综合设计途径方面的一些知识。应该注意，书中几乎所有被提及的问题，都属于载人宇宙飞行器方面，因为这种飞行器的很多程序都实行了自动控制。尽管载人飞行器，在控制、服务系统的组成、密封舱的气体介质以及结构等方面，都有一系列的特点。然而本书对此没有予以详细地研究。

假定读者已经了解宇航学的一般问题，也了解宇宙飞行器的飞行理论及姿态控制原理（例如，见参考文献〔18, 19, 22, 26〕）。

此外，还假定读者已经熟悉空间技术基础。因此，书中略去了对现有飞行器的论述。不纠缠于具体的轨道要求和具体的飞行器参数的先进布局方案的描述，似乎具有不合实际的性质，然而，实际上这同本书的主要任务——只讲述研制原理，而不涉及具体的技术问题，尤其不涉及具体的结构方案，则是一致的。

最后，我们还要强调指出，书中既没有讨论发射段上带有工作着的发动机的宇宙飞行器的入轨问题，也没有讨论降落段上宇宙飞行器向月球和行星着陆的问题，同样也没有讨论飞入地球和行星大气层中的问题，关于带有工作着的发动机的飞行器在飞行段上的情况，仅是在同轨道机动与修正有联系时才谈及。

作者清楚地认识到，这样的首次尝试，不可能不存在重大的缺点。因此，所有的意见和要求，作者都将怀着感激的心情予以采纳。

作者对提出了宝贵意见和建议的Б. В. 拉乌辛巴赫(Раушенбах)、Б. П. 斯科特尼科夫(Скотников)、Н. К. 斯米尔诺夫(Смирнов)和 М. И. 盖拉西莫娃(Герасимова)，以及对承担了本书某些部分初步浏览工作的Ф. В. 采特里恩(Цетлин)、А. А. 达什柯夫(Дашков)和 Н. И. 科列索娃(Колесова)，一并表示衷心的感谢。

目 录

前言.....	(iii)
绪论	(1)
第一章 宇宙飞行器的组成和基本服务系统	(8)
1.1 科学和服务设备。服务系统的组成和功能.....	(8)
1.2 无线电遥测系统.....	(15)
1.3 星上天线.....	(23)
1.4 电源系统	(30)
第二章 宇宙飞行器的定向	(52)
2.1 定向的主要任务和基本方法	(52)
2.2 解决某些定向任务的途径。摄动力矩	(59)
2.3 太阳-恒星定向	(87)
第三章 星上系统的控制 宇宙飞行器的相互作用	(104)
3.1 星上系统工作逻辑和相互作用逻辑的概念	(104)
3.2 用于控制的星上数字计算机	(122)
3.3 星上和地面控制方式的结合	(139)
3.4 宇宙飞行器的相互作用	(163)
第四章 仪器和系统工作条件的保证 对结构的基本要求	(185)
4.1 某些定义及对布局与结构的一些基本要求	(185)
4.2 给定温度的保证和温度控制原理	(190)
4.3 密封舱内的气体介质	(202)
4.4 非密封舱的研制特点	(218)
4.5 姿态控制系统的工作保证	(234)

4.6 宇宙飞行器的外部布局。光压产生的力与力矩的确定	(251)
第五章 宇宙飞行器合理设计问题的提出	(278)
5.1 关于设计过程的概念	(278)
5.2 合理设计的算法方案	(295)
参考文献	(304)

绪 论

本书研究运载火箭末级发动机关机后被送入人造地球卫星轨道、飞向月球轨道或日心轨道，并在地球和行星大气层外工作的宇宙飞行器。

宇宙飞行器有各种分类方案。以下详细研究其中的某些方案。

按轨道分类。根据轨道，宇宙飞行器可分为：地球卫星；轨道经由月球作用范围的月球飞行器；轨道经由行星作用范围的行星际飞行器；按日心轨道飞行，而轨道并不通过太阳系行星附近的宇宙探测器。月球飞行器照样也可以根据它在月球附近的轨道——保证向月面上降落与着陆的轨道，人造月球卫星轨道，靠近月球飞过的轨道，而加以分类。行星际飞行器具有本质上不同的轨道，这些轨道，既依赖于行星或一些目的行星，也依赖于飞行器在行星附近的运动方式——这同月球飞行器的轨道是类似的。各种宇宙探测器，可分为两种，即飞近太阳或飞离太阳的探测器和飞出黄道面的探测器。有时候，为了使探测器获得所需的轨道特性，利用某些行星的引力场，则是一种可能的方案。其中最令人感兴趣的，是利用金星的引力场使探测器飞出黄道面或飞向遥远行星的方案。如果利用某些行星的引力场去改变日心轨道参数，或进行引力机动飞行，那么，在同一运载火箭的条件下，与不采用引力机动而得到相同轨道参数的情况相比较，可以得到较大的飞行器起始质量。

按用途分类。根据用途，宇宙飞行器可以分为完成应用

任务的飞行器和专供科学研究用的飞行器两种。科学用宇宙飞行器同样还可以按照科学任务及研究课题而加以分类。例如，考察太阳、月球、行星的飞行器，考察黄道面外宇宙空间及红外源的飞行器等等。

完成应用任务的诸宇宙飞行器，可分为通信卫星、气象卫星、地球资源卫星等等。

按载人情况分类。宇宙飞行器可能是被操纵的、自动的与可载人的，它们的基本状态是自动工作。专供宇航员飞行用的飞行器，为达到训练目的以自动方式工作时，也是一种可能的方案。

第一章给出了宇宙飞行器的科学与服务设备的定义，列举出了可能的服务系统的种类，而且还包含关于基本系统——遥测系统、电源系统和星上天线系统的一些资料。之所以挑选这些系统作为基本系统，那是因为所有的宇宙飞行器都毫无例外地包含它们之故。我们的主要注意力并未放在这些系统的技术数据方面，而是集中到这些系统的参数与特性的选择原理，以及这些参数与特性同其它系统、轨道和飞行器结构的联系方面。本章中，从数个选择电源系统电能发生器功率及化学蓄电池容量的研究方案里，导出了其中的一个方案，并且，导出了确定太阳电池温度的计算公式，还详细地研究了不同比太阳能值条件下工作的行星际飞行器和探测器上的太阳电池参数的选择原则。此外，对于远离太阳并连续对地球定向的宇宙探测器上采用的平面静止式太阳电池的方案，还进行了分析。

宇宙飞行器在空间中的定向问题，书中占有相当多的篇幅。目前，对于绝大多数要定向的飞行器来讲，保持给定的姿态要求，对飞行器的布局方案，对它的结构和工作程序，都会产生极其深刻的影响。第二章研究了某些定向任务，

给出了关于基本方式的概念，同时列出了这些方式的清单。该章还包含对解决定向任务的各种途径和确定必要精度的某些方法的分析。并且，对强定向天线瞄准地面信息接收站、实现轨道修正和机动问题，给予了特别的注意。所指出的这些问题，都与姿态控制系统有关，而姿态控制系统却又同瞄准过程的本身、空间中飞行器的三轴稳定性以及飞行器的其它系统与结构，有极为重要的关系。因此，这是一个综合性的问题，也正是本书所要讲述的。

在空间技术中，飞行器的一个轴指向太阳，另一个轴指向某一恒星的太阳-恒星定向方法，已获得了极其广泛的应用。其中，为了修正轨道和引导强定向天线，便可利用这样的定向方法。第二章还详细地研究了太阳-恒星定向系统敏感器的各种方案，并且导出了为选择这个系统参数所必要的一些关系式。

定向系统敏感器方案的选择，同飞行器的布局及其轨道密切相关。这就决定了上述的材料应包含在本书之内。

研究宇宙飞行器的控制问题，寻求最佳的控制方式，以及建立工作程序，都应该包括在飞行器的研制过程之中。控制问题对宇宙飞行器的可靠性和操作的方便性，以及对星上一些仪器的特性，都会产生重大的影响。控制，通常由星上设备和地面设备来完成，对于星上设备，常常规定有一专门的星上仪器总体控制系统，而地面设备，则是专供向飞行器传送离散指令和数据用的。地面与星上控制设备的正确配合，是建造宇宙飞行器的必要条件。控制问题在第三章讲述。这一章特别给出了星上系统的工作逻辑和相互作用逻辑的概念，并以姿态控制系统工作中的一个例子对此进行了说明，同时还阐明了诸如场次、值班状态和星上时间这样一些概念。

因为近年来绝大多数宇宙飞行器都开始采用数字计算技术，所以在第三章中还研究了应用星上数字计算机解决某些控制任务的问题。最近，人们的较大注意力集中于在宇宙飞行器上完成失重条件下的工艺试验方面，与此相关，在这一章里导出了可估计飞行器舱内失重度的关系式，并且，以提出任务的方式，在本章里提出一个在安装工艺设备处降低质量水平的方法。

星上与地面设备之间的关系，在实施工作场次时，是十分重要的，这些场次的起始时间应该精确同步，然而，在实际轨道最后确定出之前，这一点预先却是未知的。其中，在发动机装置的推力值较大的条件下，并且是在行星附近实施的轨道修正场次，便属于那样的场次。第三章导出了为编制上述类型的起始场次的控制程序所必要的关系式。这里还详细研究了星上程序装置的各种工作方案，并同时考虑了地面设备暂时失去工作能力及在地面站分布区域内的不良气象条件这两种可能性。在同一章里还分析了在星上设置整定值的某些方法。并把这些方法按照设置正确与错误数的概率值进行了比较。

如果有几个执行同一任务的宇宙飞行器，那么，在解决控制问题时，就必须研究这些飞行器彼此之间相互作用的各种方案。在第三章中举出了一些宇宙飞行器总体的例子，并且详细地审查了工作在行星表面或下降段（着陆飞行器）的飞行器，同正飞过行星附近的飞行器或位于同一行星的人造卫星轨道上的飞行器之间相互作用的各种观点。在上述情况下，飞行器的相互作用表现在，着陆器的信息并不直接传向地球，而是传给位于卫星轨道上的飞行器，或传给正在行星近旁飞过的飞行器。在这些飞行器上，信息或者能够立即被中继到地球，或者能够被存贮起来。这样的信息中继证明是合

理的，它不但增加了可能进行无线电通讯的时间，减少了记忆装置的容量，增加了着陆器的可靠性，而且，最终还增加了信息传输速度或减少了发射机的功率。为了获得任何一个已指出的效果，书中导出了一些允许估算信息中继必要性的关系式。

为了使安装在宇宙飞行器上的仪器能够正常地发挥功能，必须保证它们一定的工作条件。我们把一些仪器相对于另外一些仪器，相对于自由宇宙空间和飞行器的结构部件的布置，仪器及其部件的温度状态，以及仪器内部及其周围的气体介质，理解为工作条件。对于姿态控制系统和运动控制系统来说，下列一些问题同样是重要的：光学敏感器对光学干扰及可能污染的防护问题，一些仪器相对于另外一些仪器和发动机装置的小角度位移问题，以及满足惯性椭球和惯性主轴相对于几何轴位置的某些要求问题。

这些问题在第四章中加以阐明。因为宇宙飞行器热状态的保证问题在苏联的一系列著作中均有论述，所以本书仅论述保证仪器与结构给定温度状态的一般性问题。所引用的关系式基本上带有定性的特点，并且是专供阐明温控原理和结构设施的作用而用的。温度控制的具体框图方案和这些框图及其各个元部件的计算方法，本书没有论及。

很多宇宙飞行器的一个特点是采用装有气体介质的密封舱，并把一些基本仪器放在此舱内。这样不仅保证了仪器及其元件都能处于给定的温度条件下，而且也减少了摩擦机构偶间的摩擦系数。然而，在很多情况下，舱的密封都会导致结构质量的增加，安装干燥器的必要性，也会造成飞行器发射准备工作的复杂化。此外，对于长期工作的宇宙飞行器，流星危险也将成为主要问题。就密封舱而言，击穿外壳会造成舱内气体压力的降低，由于压力的降低和散热元件的温度

越来越高，就可能引起某些仪器工作条件的改变。而对于非密封舱来说，流星对舱的撞击，只有当某些电路或元件遭到破坏时，才算是危险的。在有备份的条件下，这种损坏的概率比密封舱被击穿的概率要低一些。非密封舱的研制比密封舱的研制具有一系列的特点，考虑这些特点的方法在第四章中做了叙述。该章还提出了某些改善非密封舱里仪器工作条件的建议。

在宇宙飞行器研制的过程中，布局方案的选择是极其重要的。在第四章中给出了内部仪器与外部仪器的定义，并给出了飞行器的内部与外部布局的定义，同时阐述了对布局的主要要求。主要注意力放在作为最普遍的电能源发生器太阳能电池、它的分类和形状选择方法，以及光压形成的力与力矩的确定方面。书中导出了估计这些力与力矩的公式，以及为整理实验所获得的散光方向指示线必须用到的关系式。同时，在只知道散光方向指示线类型的条件下，提出了确定光压形成的力和力矩的方法。

最后，第五章，实质上是本书的结论。本章再次谈到了宇宙飞行器各分系统参数间的各种联系，也再次讨论了这些参数同轨道特性、工作程序及结构之间的依赖关系。上述这些联系，为与电联系相区别，叫做物理联系。此术语纯系一个规定。本章还举出了一些物理联系的例子；也讨论了一个宇宙飞行器的设计过程，并引入了合理设计的概念；解释了合理设计问题的技术含义及数学提法。合理设计要求建立在方案研究所定下的若干一般准则的基础之上，在比较新研制的宇宙飞行器的各种方案时，则需要力求达到它的极值。在第五章中引入并阐明了研制飞行器时可能遇到的一些准则。显然，在建造各分系统时所利用的局部准则，不应该与采纳的一般准则相矛盾。书中引入的算法方案，是合理设计的算法

方案之一。此算法，建立在搜寻布局方案、星上系统和工作程序方面最佳设计方案的直觉创造过程（第一阶段（下同）），与第一阶段中找到的某些飞行器方案的严格最优化（第二阶段）相结合的基础上。以上指出的方案，叫做基准方案。基准方案的最优化，必须求解在指定区间内寻找变化着的多变量函数的条件极值问题。星上系统的一些基本参数和飞行器的某些结构参数，以及确定着工作程序的一些参数之间的各种关系式，被采纳为联立方程组。此外，联立方程组，还应该包括从所研制的飞行器的技术任务中而来的一些限制和要求。第五章指出，当满足某些条件时，基准方案的最优化问题，可以简化为线性规划问题的一种个别情况。

近年来，阐述数字计算机在各种复杂系统设计过程中应用的著作，包括在飞行器设计过程中应用的著作，日益增多（例如，参见文献〔17〕）。本书提议的算法，只是在设计的第二阶段——对已找到的基准方案进行最优化，才打算利用现代计算技术。采用任何计算机方法对服务系统的组成和构造进行最优化，以及利用计算机方法寻找与优化飞行器的布局方案，都可以使设计的第一阶段——基准方案的搜寻，更为合理一些。但是，在任何情况下，设计阶段，仍然要建筑在研制人员的创造性洞察力和他们的工程技艺基础上。

第一章 宇宙飞行器的组成 和基本服务系统

1.1 科学和服务设备。服务系统的组成和功能

1.1.1 宇宙飞行器是为解决一个确定的任务或某些综合任务而建造的。根据这些任务，首先可以拟订出飞行器的飞行大纲。可以把飞行器的轨迹或具有轨迹基本特性的轨道，以及“依恋”于确定的轨道段而在星上发生的一些基本过程，理解为飞行大纲。为了解决宇宙飞行器所面临的任务，星上必须具备一些使该飞行器可履行某些独特职能的仪器或系统。这些职能可能包括：宇宙空间和天文目标的科学考察，气象探测，地球自然资源的调查，无线电-电视发射的中继，电话接谈的实现，等等。这些职能，在下面将称为科学任务，相应的设备，叫做科学设备。

飞行器所完成的飞行大纲和星载设备所完成的科学任务，决定着一个飞行器在任何一种分类方案中的位置。

如果说的是星载设备的完整总体，那么，就应该把不直接执行飞行器的科学任务的那些仪器和系统（没有它们，宇宙飞行器的科学任务便不可能完成）划分出来。通常，指这些仪器和系统为服务系统或公务系统，以此强调它们的辅助作用。

某些服务系统，照样地出现在所有的主动型宇宙飞行器上。尽管通常这些系统对于不同的宇宙飞行器具有不同的技

术特性，但是，我们所指的，自然是这些系统的名称与效用，而不是它们的技术特性。列入所指系统的有：无线电遥测，电源和天线馈电装置。我们把这些系统称做宇宙飞行器的基本服务系统。

以下详细列举的其余服务系统，在某些飞行器上可能没有。其中，星上设备综合控制系统的功能，便可能由一个包括在遥测系统中的按“固定”时间程序实现星上仪器接通与关闭的时间装置来完成。当然，这样做仅在最简单的宇宙飞行器上才有可能。姿态控制系统在非定向的飞行器上就不存在。

应该强调指出，提出“基本服务系统”这个术语，丝毫不降低其余系统的作用，而只是为了方便以后的叙述而已。

1.1.2 现在，履行服务系统功能的星上仪器设备总体，通常划分为下列一些系统：

星上设备总体控制系统。该系统的功能是，保证星上设备总体按照给定的时间程序，并符合于星上系统和仪器所给定的相互作用逻辑而工作。

无线电遥测系统。该系统的功能是保证对发送到星上的必要的控制指令的接收与译码，保证对各种数据的收集、存贮、预处理，以及将它们传输给遥测和信息接收站、轨道测量站。

电源系统。其功能是为飞行器的各种仪器和装置供应电能。

天线-馈电装置系统。它的功能是保证向空间辐射并接收高频无线电信号。该系统包括天线本身、同轴电缆和波导、转换与滤波装置。

姿态控制系统。该系统用于建立飞行器所需的姿态。它对于完成一系列的科学考察、保证太阳电池阵的正常工作，

对于指令飞行器制动、轨道修正和给出其它冲量，对于自主导航测量和某些天文与地球目标的摄像，以及对于强定向天线瞄准地面接收站，都是十分必要的。

发动机工作时飞行器质心运动的控制与姿态稳定系统。本系统在轨道修正与机动时，以及在向行星降落与从行星表面起飞时发挥作用。

靠近和对接系统；

发动机装置。该装置用于机动飞行、轨道修正、从轨道上降落、向行星着陆和从行星上起飞，以及飞行器的定向和稳定所必要的控制力矩的建立。

自主导航系统。

温度控制系统。为了维持仪器和结构的一定温度状态，该系统是必要的；

保证整个宇宙飞行器或其一部分（可降落的或可着陆的飞行器）能够在行星上或地球表面上降落或着陆的仪器与设备。

为定位和发现着陆后的着陆器所必要的一些仪器。

对于上述各系统需要做如下的说明：

2) 对于最简单的宇宙飞行器，温控系统可能蜕变为布局与结构措施的综合，它包含：仪器的一定配置，光学系数的选择，装置专门的绝热材料，以及各种仪器与飞行器结构的正确连接等。

6) 代替发动机装置的可能是一些移动的或固定的结构件，作用在它们上面的光压就能够形成定向控制或轨道变动所必要的力矩和力。此外，在某些情况下，可发现，形成控制力矩的自然界的手段原来也包括在姿态控制系统中，或者也应算作一个独立的系统。在这种情况下，上述的手段与相应的自动机械部分一起，有时叫做子系统执行机构，或系统