

降低航天任务的成本

REDUCING SPACE MISSION COST



[美] James R. Wertz 编
Wiley J. Larson

33759301

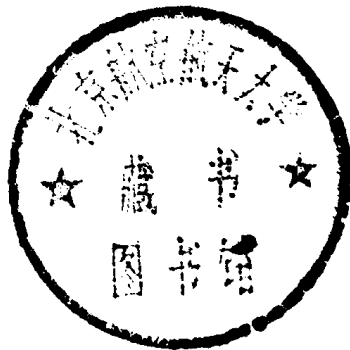
降低航天任务的成本

[美] James R. Wertz 编
Wiley J. Larson

HK60/01

潘科炎	李 果	何英姿	曹锡生	
姜 睿	孙宝祥	何 刚	周文飏	
欧阳兵	瞿晓东	徐 瑾	于海文	译
瞿 战	翦 明	马静平	于嘉茹	
章敏健	王晓磊			

潘科炎 王长龙 校



航天工业总公司北京控制工程研究所

1998年



C0446998

序

“降低航天任务的成本”一书首次全面地论述了当代航天这一最受人关注的领域即降低航天任务成本所采用的技术途径、方法和存在问题。降低航天任务成本需要我们各有关方面进行百折不挠的努力。

本书着重阐明，在不降低航天任务可靠性的前提下大大降低当前航天任务的成本是完全可能的，这对未来空间探索开发任务尤为重要。

本书上篇精辟地阐明了降低航天任务成本的各个技术领域，主要包括：降低成本的技术途径和方法；如何降低飞行任务系统工程成本，航天器设计、制造、发射和运营的成本；降低成本的实施方法和具体问题；降低成本的代价。本书下篇具体解剖了在科学研究任务、行星际探测、通信卫星以及试验和应用卫星等10个典型飞行任务中降低成本的技术途径及经验教训。附录A列出了本书所介绍的实例飞行任务数据、系统总体及分系统的实际成本数据。附录B列出了降低航天任务成本的实例研究小卫星的成本数据，由表中数据可知，小卫星的实际成本比用传统模型估计的预计成本要降低50%到90%以上。

本书虽然对各种降低成本的传统方法提出了挑战，但仍需承认，所有空间计划的运作都是按照它们的建造原则和运行规则力求降低成本的。书中着重介绍了降低新项目成本和正在研项目成本的实际经验和诀窍，还探讨了目前行之有效的研究工作，特别是美国政府在降低航天任务成本方面所做的工作。书中还指明，某些旨在降低任务成本的方法可能事与愿违，反而会无意识地增加成本。

本书同一主编 James R. Wertz 和 Wiley J. Larson 曾编著“航天任务的分析与设计”一书，该书被我们翻译成中译本出版后备受读者欢迎，业已成为我国从事航天任务研究、分析和设计领域的一本重要参考书。“降低航天任务的成本”是它的一个姊妹篇。它可供从事航天事业或空间科学研究的专业工作者、大学生、研究生和技术领导以及涉足空间实验科学的技术管理人员及科学家阅读和参考。

衷心希望本书的翻译出版有助于我国航天任务总体设计师和计划管理决策人员朝着“大幅度压缩当代航天计划经费预算”这一艰巨目标迈出可喜的一步。

屠善澄

1998年10月30日于北京

前 言

无论是负责制定航天任务总体要求和技術规范的总体设计师以及需要了解并掌握航天任务总体设计的有效载荷设计师，还是航天任务运营的决策者和计划管理师，大家都赞成必须降低航天任务的成本。但我们对如何降低航天任务的成本存在着各种不同的看法和认识。本书旨在归纳降低航天任务成本的论据，针对以前航天任务中所实现的以及打算在未来航天计划中采用的降低成本方法给出一些典型数据，同时提出一个降低航天任务的通用框架，按照这个框架，有望实现降低航天任务成本这一大目标，从而使我们能负担得起日益紧张的航天任务经费预算。

大量证据证明，在不降低航天任务可靠性的前提下，大大压缩当代航天任务的成本是可能的。30年来，苏联每周平均发射1~2颗卫星，其总经费预算与美国大体相当，或许比美国还少些。但苏联卫星的能力有限，因此其单位性能的成本可能与美国和西欧发射的卫星相当。然而，苏联发射卫星的数量以及所入轨器材的总质量远远超过西方发射的总和。这些事实说明，苏联卫星的单位质量成本大大低于美国和西欧卫星的单位质量成本。另一方面，近10年来，美国和欧洲的小卫星团体以传统卫星项目成本的十分之一不断开发了功能越来越强大的许多小卫星及其星座。据估计，苏联卫星和西方小卫星的可靠性与传统的大型卫星相当，甚至更高。本书中列举的小卫星研究实例其开发成本仅为按传统成本模型所估计的成本的50%~10%。

目前降低航天任务成本的传统方法仍是沿用在采购正统官方卫星或商用卫星的常规框架范围内的常规方法。这些方法有按成本设计(DTC)法(参见本书中第七章)，并行工程法等，它们代表了一种正规途径，旨在修改我们原先设计航天系统所沿用的方法以降低成本。由于这些方法不是根本性的变革，而且还可能包含使成本增长的因素，因此只可能使成本降低50%~10%。

与降低成本的传统途径相反，本书所提出的降低成本的技术途径是根本性的革命。由于卫星的采购、建造和运营方法与传统途径根本不同，因而可使成本降低50%~90%，甚至更多。这些方法试图改变卫星采购工作的标准模式，因此本书所提出的降低成本方法可能与传统的方法格格不入，各种方法之间也可能

大相径庭。在大多数情况下，这些降低成本的革命性方法要求改变“游戏规则”，最明显的变革是允许对系统总体要求进行折衷和协调，即通过对我们希望实现的目标与按低成本技术途径能实现的目标之间建立一个折衷的平衡点来满足飞行任务的总体目标。

降低航天任务成本的方法无论是传统方法还是革命性的办法，并不是先天的好方法。采用哪一种方法，或者进行任何一种降低成本的重大尝试是否合适，这取决于具体项目的性质。航天任务设计和研制的流行方法并不是由几个对成本漠不关心的人在真空环境中凭空产生的。降低成本的任何尝试都需要对几个关键总体性能指标进行反复折衷。本书第一章和第十章明确提出了这些问题，并探讨了确定成本与系统性能指标关系的方法。

我们并不指望本书能把所有的新设计思想都传授给航天界，或要求就“你的特定航天项目怎样做才是正确的”作出肯定的答案。本书力图收集、综合归纳和阐明我们今天的认识以及公众和组织机构对降低航天任务成本方法的有关建议，集思广益。本书也力图提供人们攻克降低航天任务成本这一难关的动力和方法，像20世纪初掀起飞机革命那样，向着真正掀起和发展航天革命这一目标迈出关键的第一步。我们能够大幅度地降低航天任务的成本，当前的形势也迫使我们必须这样做，只有大幅度地降低航天计划的经费预算，才能确保航天事业持续不断地发展，造福于人类。

全书内容丰富、文笔流畅、图文并茂，书中所引用的大量图表均是从工程实践中归纳、综合提炼而成的结论性成果，实用性极强，其中的曲线和数据可供航天任务总体设计师和运营管理决策人员直接引用。

本书是航天工业总公司北京控制工程研究所众多同志共同协作的成果。航天工业总公司五院计划处对本书的翻译出版提供了经费支持，没有他们的支持，本书的面世是不可能的。

全书篇幅甚巨，因此参加翻译的同志较多。各章节的译者均在有关章节的最后注明。全书由潘科炎、王长龙两同志负责译文校对。最后由潘科炎负责统稿、定稿和编辑，狄晓鸣同志为本书插图植字和加工，还有许多同志为本书的翻译出版提供了多方面的支持和帮助，在此一并致谢。

本书是由众多同仁共同完成的，成书仓促，译校错误和不当之处在所难免，敬请不吝指正。

潘科炎

目 次

序	(VI)
前言	(VII)
上篇 改变研制程序以降低成本	
第一章 绪论	(3)
1.1 成本选择范围	(4)
1.2 小卫星与低成本飞行任务之间的关系	(6)
1.3 从飞行任务实例研究中获得的经验教训	(7)
1.4 需要新的规范.....	(12)
第二章 改变研制程序以降低成本	(15)
2.1 政府关于降低成本的观点.....	(15)
2.2 降低成本的根本方法.....	(29)
第三章 降低飞行任务成本的技术	(45)
3.1 成本效益高的硬件和技术.....	(45)
3.2 软件.....	(80)
第四章 降低发射成本	(97)
4.1 发射成本高的影响.....	(99)
4.2 用现有运载工具降低发射成本	(100)
4.3 评估助推器效率的分析方法	(105)
4.4 发射成本高的原因	(107)
4.5 一些关键设计方法的优缺点	(112)
4.6 一些可能降低发射成本的设计方法	(123)
4.7 助推器成本与航天器成本的关系	(128)
4.8 总结	(130)
第五章 降低航天器成本	(134)
5.1 航天器研制周期	(134)
5.2 降低成本的一般策略	(141)
5.3 分系统研制	(145)
5.4 总装与测试	(157)
第六章 降低飞行任务运行成本	(160)
6.1 飞行任务运行的环境	(161)
6.2 低成本运行的例子	(164)
6.3 用程序化方法降低运行成本	(171)

6.4	在航天器系统设计中降低运行成本	(177)
6.5	在地面系统设计中降低运行成本	(180)
6.6	改进运行方案以降低运行成本	(182)
第七章	按成本设计航天任务	(189)
7.1	系统工程和管理按成本设计	(190)
7.2	一些基本概念	(193)
7.3	建立按成本设计的模型	(195)
7.4	航天任务按成本设计模型的两个实例	(198)
第八章	成本模型	(208)
8.1	航天任务成本模型简介	(208)
8.2	航空航天公司的小卫星成本模型	(218)
8.3	适应不断变化的计划	(231)
第九章	可靠性设计考虑	(237)
9.1	可靠性与成本之间的相互影响	(237)
9.2	低成本航天器的可靠性计划	(240)
9.3	避免故障的设计方法	(244)
9.4	容错	(247)
9.5	小结与结论	(249)
第十章	实施策略及问题	(251)
10.1	大多数项目适用的方法	(251)
10.2	降低新项目的成本	(258)
10.3	降低在研项目的成本	(271)
10.4	实施大幅度降低成本过程中遇到的问题	(276)
10.5	小结——保持平衡, 充满前景	(282)
10.6	有关航天系统与飞行任务系统工程的书籍介绍	(284)
下篇 飞行任务实例研究		
	附录成本数据的说明	(289)
第十一章	科学飞行任务	(292)
11.1	Φrested	(294)
11.2	Freja	(312)
11.3	SAMPEX	(331)
11.4	HETE	(343)
第十二章	行星际探测任务	(355)
12.1	克莱门汀航天器 (Clementine)	(357)
12.2	冥王星快速绕飞任务 (Pluto Express)	(376)

第十三章 通信、试验和应用卫星任务	(398)
13.1 RADCAL	(400)
13.2 ORBCOMM	(409)
13.3 AMSAT	(426)
13.4 PoSAT-1.....	(464)
附录 A 降低航天任务成本实例研究小卫星的成本汇总表	(490)
附录 B 降低航天任务成本实例研究小卫星的实际成本与预计成本之比	(493)
附录 C 典型的小型航天器 (1980~1995)	(494)

上篇 改变研制程序以降低成本

1. 绪论
2. 改变研制程序以降低成本
3. 低成本飞行任务的技术
4. 降低发射成本
5. 降低航天器成本
6. 降低飞行任务运行成本
7. 按成本设计航天任务
8. 成本模型
9. 可靠性设计考虑
10. 实施策略及问题



第一章 绪 论

James R. Wertz, *Microcosm Inc.*

- 1.1 成本选择范围
- 1.2 小卫星与低成本飞行任务之间的关系
- 1.3 从飞行任务实例研究中获得的经验教训
- 1.4 需要新的规范

本书的目的是通过以下几方面工作来加速降低空间飞行任务成本的进程：

- 检查成本高的原因
- 提供一种降低成本的明确方案
- 阐明在实际应用中哪些行得通和哪些行不通
- 提供适于具体问题的数据和数据的来源
- 提供具体例子

很明显，如何降低飞行任务成本的问题没有简单的答案。例如，如果我们通过简单地改变太阳阵的工艺技术或改变制造航天器的材料就能降低成本的话，那么在很久以前所有主承包商就已经这么做了，也就不再需要本书了。

本书提出的方法（该方法在第一章第三节、第二章和第十章有概述）简单、直接，却很巧妙，而且效果显著。通过采取其中的大部分措施，本书下篇给出的实例研究和附录所描述的型号与用传统方法设计的相比成本能降67%到90%以上，另外，以往经验似乎表明降低成本并不降低可靠性。虽然没有统计研究可供参考，但以往事例表明：小型低成本航天器与传统的、大型航天器相比具有同样或更高的可靠性。这在某种程度上是因为这些简单的航天器容差大、部件少，有助于大幅度提高可靠性。

本书由上下篇组成，上篇讨论降低成本的全过程，最后总结了如何降低新的及正在进行的任务成本的实用方法。介绍了对十个实例的研究情况，说明实际上是怎样做的，并给出了可得到的结果及可能遇到的潜在陷阱。

我们先介绍几个基本定义。在历史上，已经用成本模型对建造和运营航天器的成本进行过纯粹的经验估算。在这些模型中，成本被表示成飞行器参数如质量、功率或地面系统程序行数的简单函数。成本模型忽略了这样一个敏感问题，即我们如何安排和管理计划以回答下面这个基本问题：照上次的方法来完成，成本是多少？如8.2节中所述，有几个建立在以往实例基础上的成本模型，这些模型可以精确估计使用传统准则建造航天器所需的成本。为了便于比较，我们将使用在SMAD*第20章中介绍的成本模型，这是因为它的适用范围广，易

* SMAD——《Space Mission Analysis and Design》，2nd edition [Larson and Wertz, 1992]，中译本《航天任务的分析与设计》，航空工业出版社，1992。本书通篇引用这一缩写字。

于利用。我们把传统飞行任务定义为或多或少遵循 SMAD 一书中介绍的设计准则和成本估算方法的飞行任务。

与传统飞行任务相反，降低成本的飞行任务是指它的全寿命周期成本大大低于用传统成本模型对该飞行任务或航天器所作的估算值，例如，冥王星快车（Pluto Express）任务，估计的成本是1亿5千万美元，虽然被认为是非常昂贵的，但用传统的星际航天器标准来衡量，这显然是一个降低成本的飞行任务。

我们定义的低成本飞行任务是指它的寿命周期成本大大低于该种类型空间飞行任务的平均费用。这定义意味着我们的脑子里必须对平均成本是什么有个概念，当然这依赖于任务的类型、建造方法和建造的时间跨度。为了具体说明，表1-1列出了我们所说的低成本空间飞行任务的实用定义。

表1-1 一个低成本飞行任务的经验定义

我们把那种比典型飞行任务成本降低2/3或更多的任务称为低成本飞行任务。

类 型	典型成本 ¹ （百万美元）	低成本（百万美元）	典型飞行任务	低成本飞行任务
近地轨道	150~2000 ₊	<50	DMSP GRO	ALEXIS Freja
同步轨道	250~2500 ₊	<75	Intersat TDRS	Ball GEO Comsat ²
星际轨道	1500~3000 ₊	<500	伽里略（Galileo） 卡西尼（Cassini）	克莱门汀 （Clementine）

1. 全寿命成本包括研制成本、航天器成本、发射成本和运行成本。

2. 只是计划，未建造。

1.1 成本选择范围

如图1-1所示，我们可以从最低成本到最好性能的大范围内进行空间飞行任务的设计。图中所示的性能-价格曲线是一条偏移指数函数曲线。也就是说，即使把一块砖头送入轨道也是要花些钱的，超过这一最低成本后，为获得更好性能所投入的成本与已拥有的性能成比例。这个简单模型说明了空间飞行任务与许多其他开发活动具有很多共同特性。在曲线最低端，稍稍多投入一点钱，性能可以提高很多，而在曲线高端，追加的性能是非常昂贵的。

没有一种成本选择方法与其他选择方法相比一定更好或更差，它取决于我们所要达到的目标。关键是确定我们的成本目标是什么，并使航天器、飞行任务和运行的设计与这些目标相一致。换一种简单的说法就是我们需要在工程方案间进行平衡。对于投资十亿美元的科学项目，为节省十万美元而使用品质低劣的星敏传感器就毫无意义，同样，在研制价值二百万美元的地球观测平台时，把一百万美元花在高精度星敏传感器上也是不明智的。

下面对图1-1中列出的五种选择进行简要论述。

高性能选择：它的目标是为了获得可得到的最好性能。这种类型的飞行任务一般用于某些军事和科研任务，它的目的是为了推动技术发展，开辟了解宇宙的新途径，为国防提供关键信息。在科研领域的例子有，空间望远镜、GRO、AXAF；在军事领域有，军事星（MilStar）和各种侦察卫星。这些型号非常昂贵，性能最后再提高一点都需要大量投资。然

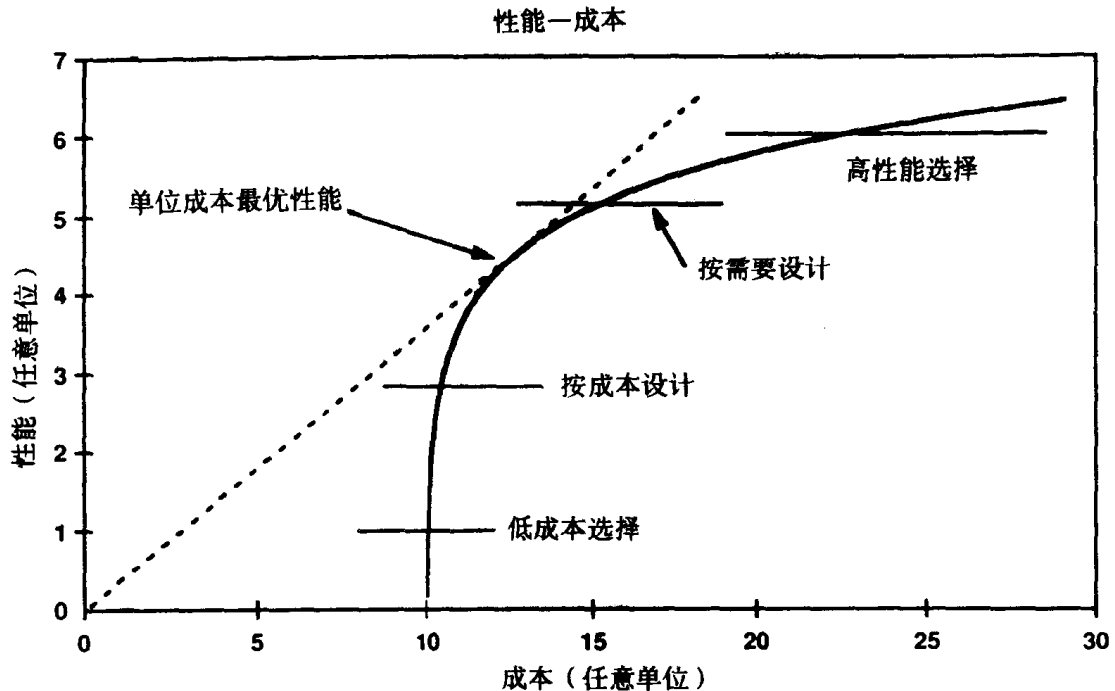


图1-1 成本选择范围

对于该曲线，我们假设发射任何东西入轨都有一个最低成本，超出这个低限，提高性能的费用与已达到的性能成比例，文中对此有详细论述。

而，他们推动了技术发展，并在研究的课题和有关高性能高精度航天器这两方面创造了新知识。

按要求设计：这是用于象 TDRS、DMSP 或 ISEE 这类大多数军事和科学任务的传统方法。我们也可以把按需设计的方法用于非常昂贵的高性能飞行任务，它的基本目标是用最低的成本和最小的风险满足一组预先规定的要求。由于任务要求是固定的，而成本是变化的，通常相当高且不易控制。虽然我们可以预先估算成本，但大多数情况下在航天器建造完成前我们并不知道它的确切费用。通常，这类航天器满足了运行需求，但不一定充分利用财政资源。

对单位成本进行性能优化：第三类是每花费一美元都要获得最好的性能。它被用在象长寿命通信系统这样的商用型号上。重要的不仅是每个航天器总共花了多少钱，而是单位性能的花费是多少，这样我们才能获得最好的投资回报。

在图1-1中，这些航天器被表示成一条过坐标原点与性能-成本曲线相切的直线，这条直线代表单位成本获得的最佳性能，因此它表示最佳卫星规模。总体看，从单位成本获得最优性能仍然意味着卫星昂贵，通常需要研制能产生巨大效益以补偿发射费用的大型航天器。这里列举的例子包括发射到地球同步轨道上的大量商用通信卫星，如 IntelSat 系列，这些卫星常常也是在按要求设计的基础上研制的。不论怎样，已经研制了许多这样的卫星，以致于可以把任务需求调整到与曲线中的最优点非常接近。使用按要求设计的目的是通过竞争投标，让那些既能满足所提要求、价格又最低的投标人来研制这类航天器。

按成本设计：在这一类中，它的目标是用给定的成本尽可能获得最佳性能，成本适中，

往往低于最优系统。由于成本是事先规定的，因此，一旦超支，方案就有被中断的可能。这种类型的任务正在变得越来越普遍，特别是要求常常变化的科学任务，发现者探险任务和冥王星快车任务（Pluto Express）就是例子。成本上限简直成了一种控制成本的方法，设计过程力图在固定成本范围内达到最佳性能。在第七章中将对这种过程进行更为详细的论述。

低成本飞行任务：这些是以非常低的成本获得适当性能为目的的最便宜的空间飞行任务，它被用在小卫星和一些空间试验中（见1.2节）。但它在多卫星系统中（由于卫星数量大，成本翻番）也有潜在的应用。随着预算越来越受到限制，低成本飞行任务的应用正在持续增长，例如 ALEXIS、GLOMR 和 UoSAT。当没有更多资金可投入项目时，通常选择这种方案。如果在预算范围内性能指标可接受，那么，工程就启动，否则，就简单取消了。

低成本飞行任务最优越的特性之一是象个人计算机那样可不断提高性能。在本书的下篇，许多飞行任务研究实例都是低成本选择的例子。在大多数情况下，它们的研制机构在保证成本非常低的同时不断提高性能。甚至连最廉价的业余爱好者无线电卫星在其复杂性和性能上也取得了重大的成就。因而，这种“低成本”选择正快速地推动性能的提高，在适当的时候，也有可能被更小的、成本更低的无线电微型卫星所替代，如 AeroAstro 公司所提供的卫星那样。

1.2 小卫星与低成本飞行任务之间的关系

虽然我们的目的是降低所有飞行任务的成本，但主要话题将集中在小卫星上。在本书中，我们定义的小航天器（也可称为小卫星或轻型卫星）是指包括推进剂在内重量小于 400kg 的任何航天器。小卫星成本不一定低，同样，低成本航天器也不一定小。但这两类之间有很多共同之处。我们也可以认为与低成本航天器或降低成本后的航天器相比，制造小卫星要容易得多。几乎所有航天器的重量都是知道的，而各航天器的成本却不一定知道，而且，成本的含义也是模糊不清的。所以，我们常把小卫星用作低成本卫星的同义词。虽然我们承认严格地说这是不正确的，但它为我们提供了一种评估技术参数和特性更容易的方法。

图1-2总结了从1990年到1994年之间卫星发射次数与卫星质量的分布情况。从图中可以清楚地看到小卫星的概念已经有了经济性的定义，我们选择400kg作为分界线的原因就是由于它覆盖了除图中用右边数据表示的我们称为传统大型航天器外的所有卫星。从图中可以清楚地看到，除传统大型航天器外，有各种不同类型的卫星。根据定义这些都是小卫星，另外，它们通常也是低成本卫星，但未必都如此。

我们也注意到小卫星并不是新出现的，早在空间计划的初期就已经有了小卫星。图1-3显示了大量关于小卫星的历史情况。在早期的空间计划中，特别是在美国，由于美国发射大飞行器的能力有限，所以它的大多数航天器都是小型的。在60年代后期产生阿波罗登月计划的时候，美国的太空计划发生了显著变化，它也代表了向占更大比例的我们称为大型传统航天器的转变。但在美国、苏联和世界其他地方，小卫星的发射还只占20%的比重。我们也可以看到，80年代后期美国挑战者号空难、90年代初苏联解体以及世界其他地方不断增加的空间活动的影响。

在附录中总结了许多小卫星的主要特性，这些航天器的数据取自 KISS 数据库。从大量小型低成本航天器中得到的重要信息之一是：对几乎所有类型的飞行任务我们都能大大降低其成本。检查这些飞行任务的结果表明：我们可以使用小型低成本航天器很好地完成科学

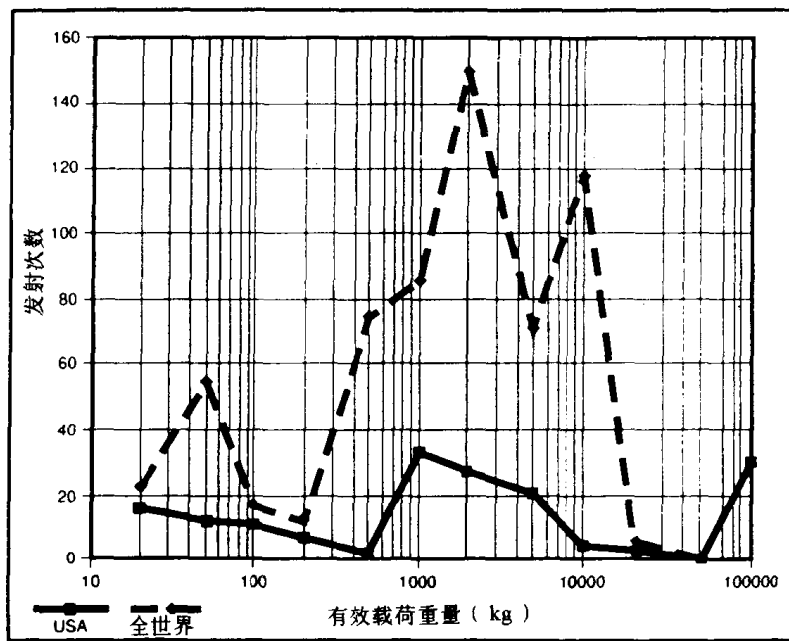


图1-2 按航天器质量绘制的1990年到1994年美国和全世界的空间发射图
注意图中明显地分为两个质量组，该数据表明我们可以把质量小于400kg的定义为小卫星。

研究、通信、试验及实际应用等飞行任务，同时，它们的可靠性与昂贵的航天器是完全一样的。我们不一定用小型低成本航天器这种办法来完成科学研究或应用任务，但它仍是好的科学研究卫星。

1.3 从飞行任务实例研究中获得的经验教训

表1-2列出了本书下篇介绍的飞行任务研究实例(成本数据汇总也可参看附录A和B)。同其他许多表一样，本书作为一本技术书籍，它列出了每项飞行任务的成本，这是很不寻常的。这具体说明了我们将称之为降低飞行任务成本的首要准则：

若我们只知道成本是什么的话，降低空间任务成本是很难的；若我们连成本是什么都不知道，要降低成本实际上就不可能了。

在政府和私营工业内部，都存在着不愿谈论真实成本的严重倾向。成本和价格数据是极其敏感的，其中很多是保密的。成本数据极难在型号生产线和部件之间进行比较。某个具体型号的数据不一定包含发射费用、地面站成本、运行费用、基础设施成本和支持人员费等。单个部件的成本与其说是取决于我们买什么不如说是取决于怎么买。文件、会议、分析、试验和报告的数量决定了成本。

成本数据常常被隐瞒，使成本看起来显得低些。成本可能被隐含在基础结构费用中，就象有时政府中心或公司部门不把支持项目的主管人和工程师的费用包括在内那样。成本中不一定包含诸如厂房整修或维修、支持设备等一次性费用。例如，没有人知道发射航天飞机的实际费用是多少。估计每次发射的费用在2亿美元到5亿多美元之间。也许最重要的是，泄露成本可能使项目难以获得投资，如果我们强调一个项目的全寿命成本，国会或系统采购

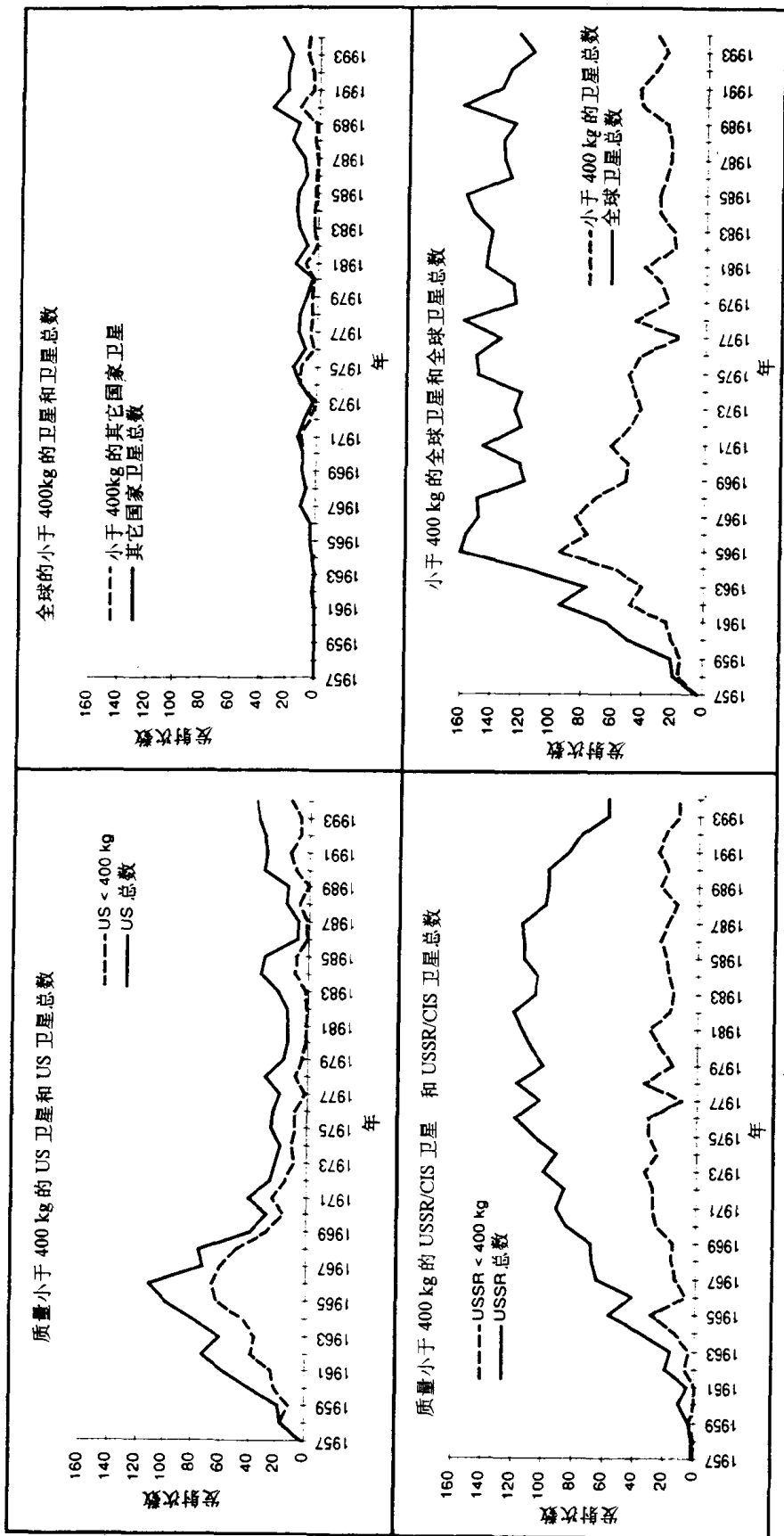


图1-3 每年世界上发射的小卫星与从空间计划开始后发射的航天器的比较

在将来,当开始发射近地轨道通信卫星星座且降低飞行任务成本的冲击开始反映到实际发射中去的时候,这些曲线可能发生变化。如文中所讨论的那样,几个历史趋势是显然的。

者可能会决定不值得投那么多钱。

表1-2 在降低空间飞行任务成本项目中使用的研究实例

更细的成本和技术总结可以参看附录 A 和 B 及下篇开头部分对研究实例的介绍以及针对每个实例研究的章节。成本指全寿命成本，以95年财政年度的百万美元为单位表示。

飞行任务	发射重量 (kg)	成本 (FY95 \$ M [*])	注 释
Φrsted	60	18.4	丹麦磁场任务
Freja	256	24.5	瑞典磁层任务
SAMPEX	160	72.6	SMEX 系列的第一颗
HETE	125	29.1	高能科学研究任务
Clementine	1693	85.0	执行任务中部分失效
Pluto Express	103	284	95财政年度的研制费用
RADCAL	92	16.6	不包括运行和维护成本
ORBCOMM	47	15.7	头两颗试验卫星
AO-13	140	1.24	业余无线电卫星
AO-16	9	0.20	微型业务无线电卫星
PoSAT-1	49	2.10	葡萄牙技术转让卫星

* FY95 \$ = 95年财政年度百万美元。

如果我们要进一步成功地降低成本，那么实际上对所有的空间项目，我们都必须谈论它们的实际成本，并公开成本数据。假如我们能成功地大幅度降低空间飞行任务成本，这正是空间商业必须变革的途径之一。

我们着手写本书时希望能从低成本飞行任务中归纳出几个共同特征，然后说明只要遵循几条简单的规则，低成本是不难实现的。但很不幸，这种想法还没有被证实是正确的。我们在低成本飞行任务中还没有找到一个共同特性。有些原理和方法是共同的，但是，对怎样实现降低成本还存在着较大的分歧。因此，我们怎样做比做什么要重要得多。我们管理和处理工程问题的方法以某种方式决定了一个任务是高成本还是低成本。对本书中给出的几乎所有“规则”，我们都能举出不符合这些规则的低成本飞行任务的反例。也有这样一些任务，用同样这些规则与其说是降低了成本，不如说是增加了成本。这意味着为了大大降低成本，我们必须改变研究任务和承担任务的方法，虽然这种观念似乎不明确，但对这些实例的研究表明，我们可以得到非常肯定的结果。在本章的最后，我们将回过头来讨论这个有关改变空间事业做法的问题。

记住前面关于使用规则要小心的告诫，表1-3总结了在上篇有关章节中提出的并在研究实例中实行的降低飞行任务成本的主要方法。几乎所有的方法都有优点和缺点，这取决于如何使用它们。有些规则，诸如大量使用微处理器或使用更自主的系统涉及到应用先进技术。但大多数规则，如对要求进行取舍、降低失效的代价、提供更大的裕度等规则更多地涉及到我们设计和建造空间系统的过程和方法。经验表明，降低成本的关键是我们如何处理飞行任务设计问题，而不是在哪儿或怎样采购部件。如前所述，成本的大幅度降低主要发生在小卫星上，尽管不全在小卫星上。小卫星的趋向是结构简单，成本低，通常有效载荷少，要求不高，限制也少。小项目常常更愿意冒险或满足于用适中的成本所能达到的目标，而不是一定要实现某个特定的飞行任务需求。这更使我们倾向于认为小卫星是低成本的，尽管我们