

33459603

降低现代小卫星 研制成本问题的研究

HK60/06



撰稿、翻译 王存恩 于家源
宋海丰 王 祥
审 校 王存恩 潘科炎
责任编辑 王 存 恩

航天工业总公司五〇二研究所

1999年2月



C0447007

前 言

航天技术的发展,运载能力的不断提高,使许多国家和空间组织都具备了发射大型卫星的能力,美国、俄罗斯、欧空局(ESA)、日本等都研制并发射了自己的大型、长寿命、多用途模块化卫星,多国参加研制的阿尔法空间站已进入发射组装阶段。这些大型航天器发挥并将进一步发挥着重要作用。不过人们也发现这种大型卫星(空间站)的研制周期太长(有的甚至要十多年),投资强度过大,有些刚刚设计时勘称为相当先进的技术,十多年后也就不一定先进、有的甚至已经落后了。

此外,伴随航天技术的发展和飞行实践,使人类的航天开发由技术实验进入了实际应用阶段,航天产业化的时机已经成熟,市场竞争日趋激烈;东西方冷战的结束,以往那种出于某种政治需要,“不惜一切代价一定要把卫星送上天”的时代已经一去不复返了,取而代之的是“必须重视投入产出比”、“优先考虑开发效益”。所以人们在考虑大卫星的一体化设计,实现模块化、标准化、系列化工作的同时,考虑发射形状小、重量轻、成本低、发射手段灵活的小卫星。近10年来,已有400多颗小卫星发射入轨,完成各种飞行任务,特别通过发射若干颗小卫星组成星座,实现以最理想的效费比完成某些大卫星都难以完成的飞行任务,更使小卫星倍受人们的青睐。但这并不意味着要以小卫星代替大卫星,而是要研究各自的优势,发挥各自所长,使其更好地为人类服务。

在研究过程中我们还发现,许多研制单位为在日趋激烈的卫星市场竞争中获得订单,过份地强调研制周期短、成本低,为完成订单而不去(也无暇)开发和采用新技术、新仪器、新部件,以全部采用经飞行验证的技术、仪器、部件,确保高可靠低成本已成为某些小卫星开发商的座右铭。这样,他们考虑问题只从短期效益出发,势必造成卫星研制与技术开发严重脱节,将使航天高技术的持续发展速度受到严重影响,这是一个必须引起足够重视并认真解决的大问题。

美国的“智能卵石计划”、“新盛世计划”、日本的“超星计划”的核心就是要在不断的研究与技术进步中发展小卫星。首先把小卫星作为实验和验证航天技术(包括低成本、技术先进、批量生产的民用器件)的手段,然后用在实用小卫星上,最后才推广到大卫星上应用,从而不仅可提高小卫星的有效载荷比,最后达到提高大卫星乃至所有航天器的有效载荷比,降低航天器成本、增加市场竞争力,使航天技术不断的进步,从而保持良好的发展势头。因此,降低小卫星成本课题组把降低现代小卫星研制成本作为研究课题是十分正确的,他们不仅搜集了国外大量降低小卫星成本的研究报告,翻译出版供大家参考,还撰写了“降低现代小卫星研制成本问题的研究”等研究报告和综述,从管理体制、一体化设计、模块化、标准化、系列化、降低风险级与发射轨道工作星和备份星,采用民用器件、增加有效载荷比和批量生产等七个方面阐述了降低小卫星成本的方法,提出了发展我国低成本现代小卫星的四点建议,是很正确的,希望本专集能对降低我国卫星研制成本,增强市场竞争力,促进我国卫星研制与技术发展发挥作用。

邹广瑞

1999年2月6日

目 录

降低现代小卫星研制成本问题的研究.....	(1)
关于航天器开发成本问题的研究	
——空间开发成本研究会研究报告	(10)
小卫星成本问题的研究	(24)
卫星成本分析及如何实现卫星低成本	(27)
通信卫星成本问题的研究	(31)
软件风险评估矩阵法——一种节约经费的技术途径	(34)
超星计划(卫星超小型、高性能化)	(41)
日本新世纪航天开发计划——超星计划的设想	(47)
小型、低成本卫星的开发	(53)
微小型卫星设计的风险管理	(59)
一种可适于多种飞行任务的小卫星	(67)
可执行多种飞行任务的小卫星公用舱	(72)
一体化设计思想适用于小卫星的系统设计	(76)
重新考虑设计思想可降低航天器的开发成本	(79)
日本用 H-II 火箭搭载发射的超小型卫星的前景分析	(82)
下一代不载人空间实验系统(USERS)计划	(95)
采用低轨道卫星通信方式调查海洋野生动物	(104)
监视母卫星用的超小型卫星	(112)
轨道碎片观测卫星	(117)
自由飞行有效载荷技术实验卫星	(140)

降低现代小卫星研制成本问题的研究

王存恩 于家源 宋海丰 王 祥

摘要 本文从加强计划管理、缩短研制周期、一体化设计、模块化、标准、系列化、降低风险级、采用民用器件、增加有效载荷比和批量化生产等角度阐述降低现代小卫星成本问题,提出加速我国技术先进的微小卫星发展的一点儿建议。

主题词 小卫星 研制成本 一体化设计 模块化 标准化 系列化

1 前 言

随着航天高技术的发展、航天产业化进程加快和竞争的日趋激烈,再也不能用“不惜一切代价都要把卫星送上天”的思想来指导航天技术开发工作了,取而代之的应该是以“优先考虑开发效益”、“重视投入产出比”的市场经济思想来指导航天开发工作。80年代倍受人们青睐的大型卫星因存在着研制周期过长、投资强度太大、见效太慢等众多制约因素而使开发者和投资商望而生畏。现代小卫星克服了传统小卫星的许多缺点,以其体积小、重量轻、成本低、研制周期短、发射手段灵活等优势登上航天大舞台。它的出现打破了大卫星一统天下的局面。然而由于一味地追求研制周期短、成本低而不得不大量、乃至全部采用经飞行验证的技术、仪器和部件,甚至无暇研究新技术、无精力去开发新产品。这样一来就会使研究与开发严重脱节,使航天高技术的发展速度放慢,甚至停滞不前。刚刚开发时还称得上“现代”或“先进”的小卫星,若干年后也就不“现代”、不“先进”了。

针对这一日趋明显的矛盾,美国人提出了“智能卵石计划”¹⁾、“新盛世计划”²⁾,日本人提出了“超星计划”^{3)、4)、5)}。这些计划都强调采用按新标准开发新技术、新仪器和新部件,在小卫星上验证后再用于多用途的大卫星上,使卫星进一步小型化,增加有效载荷比,降低卫星成本(包括大型卫星),也只有这样才能保证航天产业有发展后劲,使航天高技术有一个长期稳定发展的良好势头。

本文所研究的是如何降低可推动航天技术发展的小卫星(指类似“智能卵石”、“新盛世”和“超星”计划中的小卫星、超小型卫星)的成本,同时紧密地结合我国实际情况浅谈降低我国小卫星成本的一点儿建议。

2 建立适于小卫星开发的管理体制

对小卫星而言,依然像美国宇航局(NASA)、日本宇宙开发事业团(NASDA)、日本宇宙科学研究所(ISAS)那样采用矩阵式管理模式必然会造成管理机构庞大,等于拿大炮打麻雀,事倍功不到半,反而会出现人才浪费,增加开发成本等一系列问题。最为适于小卫星开发的是“臭鼬”管理模式^{1)、6)},其组成人员应该是少而精:由一位权威性的航天专家担任总经理(兼任总指挥、总工程师),由少数几位技术全面、责任心极强、履行诺言、肯于承担责任、善于管理、敢抓质量、懂得经营、调度的实干家组成领导小组。他们不是靠发文件、

打电话解决问题,而是置身于设计、制造工作当中(办公室就在设计室、实验室旁边),经常与专家们协调计划,对所存在的问题了如指掌,随时解决。他们作为开发队伍的一员,自始至终完成设计、生产、试验,参加发射和运行管理。这无疑可进一步加快研制速度,减少漏洞,使计划按期顺利进行,自然就可以起到降低成本的作用。

管理小组还应严格强化财政管理制度,从购置元部件,到引进仪器设备,质量验收,到资金分配,人员出差样样都要控管,做到既可不浪费一文钱,使经费控制在限额之内,又要确保质量可靠。

英国萨里大学卫星技术有限公司近百人,其管理人员仅4人;千叶大学鲸鱼生态观测卫星研究人员24人,总工程师林友直教授兼任管理组组长,专职管理人员仅1人;日本电气公司小卫星开发组28人,由开发组组长兼任管理干部。

对近10家从事小卫星的单位进行调查,他们中间有近90%的单位的管理人员就是质量管理小组的主要成员,统抓全面质量管理,仪器、部件进口及质量验收,还负责计划进度检查、经费使用情况审核,有的单位的管理人员还是小卫星研制小组中出差者的临时替班人,为计划按进度要求执行起到了“万能替补队员”的作用。

正是由于这种有效的管理,才能使计划按照承包合同要求,以制订的研制日程表进行,做到按要求或提前完成研制任务,即缩短研制周期。日本千叶大学林友直教授领导的鲸鱼生态观测卫星小组原计划开发周期为两年,通过严格、高效的计划管理使之仅用20个月就完成了,可降低成本12.7%。ISAS研制的卫星,有90%都是按当初制订的计划进度完成的,其中有25%是提前完成研制任务,确保了研制的低成本。

反之某些计划,如1984年启动的彗星交会和小行星绕飞(CRAF)计划,研制周期为10年,但到1991年底还未进入正样,卫星重量已是当初计划(780 kg)的两倍,经费用掉了计划拨款总额的93.7%。如果继续执行下去,成本可能要增加100%,研制周期起码还要拖3~4年。因此美国人不得不通过国会表决方式取消了这项计划⁷⁾。究其原因是机构庸肿、领导软弱、管理混乱。

类似管理不利,拖长研制周期、增加开发成本的实例很多。如:

绳系卫星系统延长研制周期5年零4个月,增加研制成本426%;

伽里略行星探测器延长研制周期8年,增加研制成本260%。

因此说只有建立适于小卫星开发的管理模式,进行严格的计划、质量和进度管理才是保证卫星按进度要求(或提前)、保证质量完成和降低成本的关键不无道理。

日本航空宇宙工业会的一项调查结果表明,采用新型的类似承包性质的这种小卫星开发用的“臭鼬”管理模式开发小卫星要比采用传统的矩阵式管理模式开发小卫星节约管理经费50~60%。^{8),9)}

3 采用一体化设计是降低成本的有效途径

一体化设计是把卫星当作一个整体来进行设计,它彻底地打破了传统的那种一开始就把卫星功能分给若干个分系统的做法,而是以星载计算机为核心、最大限度地使卫星功能,特别是信号处理和控制功能(包括遥测/指令、姿控、蓄电池充放电控制、散热控制、帆板驱动控制、展开机构定序控制和飞行任务仪器控制等)软件化^{10),11)}。NASA的JPL已成功地开发出航天器多学科专用辅助设计软件,它可通过将卫星多个系统的物理特性、技术特

点、设计程序等过程加以集成,提供一种可自动完成多种设计、绘制成套工程设备流程图的手段通过测试软件,判断每个部件的风险度的方法¹²⁾,东京工业大学狼教研室的教授和博士生、研究生们用此法设计出若干颗 50 kg 重的超小型卫星^{13)、14)}。

一体化设计的核心是以星载计算机为中心的一体化电子系统公用平台,近年来研制了许多新型计算机并在卫星上应用(如 Super SPARC、Pentium、Hitachi、Clementine、 α pentium 等),它采用单片微集成电路(MMIC)、微集成电路(MIC)、微机电系统和多芯片模块(MCM)等新技术,形成了一个以星上计算机为核心,与多片微处理器和附加硬件模块组成的一体化单机,由于提高了硬件的集成度,建立了专用的数据总线(如 NASA 的 MIL-STD-1553, NASDA 的 CU/RIU 等),增加了软件的数据处理能力,可使这种新型星载计算机(与采用分立元件的计算机相比)体积仅为原来的 1/50 ~ 1/80,重量仅为原来的 1/2 ~ 1/30,功耗仅为原来的 2/5 ~ 2/3,而性能(MEPE, 百万条指令/秒)却成比例增强。从参考文献 11 和 26 给出的两幅图(见本专辑 p.78 图 1 和 p.100 图 7)不难看出,一体化设计后大幅度地减轻了重量,减少了元器件数量和电子部件的种类,无疑还可降低成本(约为 22.5%)^{15)、16)}。

4 采用模块化、标准化设计,尽而形成系列化是缩短研制周期、增加有效载荷比、降低成本的最佳手段

模块化设计已在绝大多数卫星上采用,而日本日立公司提出的可满足多种飞行任务(即适于高、中、低三种轨道)的小卫星公用平台,它以 HAS 600 为基础,基础构形、分系统和部件保持相对不变,根据飞行任务变化,可改变太阳能电池帆板的装配形式和数量,可减少或取消冗余配置的控制部件和测量部件,可增加或减少推进剂的携带量,对静止轨道卫星,还可增加远地点发动机^{17)、18)}。

英国萨里大学开发的模块化公用舱,采取把有关的功能模块组装在一个抽屉式的标准化盒子之中(盒上有 8 个孔,为标准化总线走线通道),若干个这种标准化抽屉盒靠螺栓连在一起构成整星(当前完善的标准化整星由 12 个硬件模块、10 个软件模块组成),在轨运行过程中采用由并行计算机统一管理的方式,可完成存储-转发通信、科学实验、遥感、在轨演示、教育培训、医疗会诊等多种飞行任务,已基本形成系列^{19)、20)}。

NASA/喷气推进实验室正在按 NASA 要求开发第二代微型卫星,采用积木式模块化公用舱技术,其核心是相当于人的大脑的信息处理与控制模块,它包括高性能、低功耗的微型计算机、高效、高性能的神经处理器,高密度、永久性存储装置、自主的控制技术。该单元具备逻辑功能、模糊逻辑和运动功能。加之采用将支持姿态确定、自主导航、基本科学成像和成像光谱技术等敏感功能集成在一个单元内,并逐渐形成标准化、系列化产品,可大幅度减轻重量、缩短研制周期、降低成本。

美国的“新盛世计划”所提出的模块化多功能系统是将卫星的数据传输系统、热控和电源分配均集成到结构板内,可省掉那些采用通常方法无法省掉的大量电缆、连接板和基板,可减轻导线、电缆重量的 3/4,使卫星的有效载荷比增加 50%,在模块化的结构中重复使用获得专利或经过飞行验证的技术,软件模块化达 80 ~ 90%(建立了软件风险评估机制、在软件开发生命周期内引进了一系列量化测量方法,评估至关重要软件的风险,增大卫星功能,特别是各种信号处理和控制功能的软件化,大量的功能由层次化的软件来实现,

可加快开发速度、减少开发周期的迭代次数,缩短开发周期,降低开发成本)。1998年10月24日发射的“深空”1号探测器就是这种多功能的模块化小卫星,随着后续星的发射将形成系列化。

5 降低风险级、加强风险管理、采用发射双星法(轨道工作量和备份星)提高可靠性、降低成本

任何一个卫星研制单位都希望其开发的卫星出故障的概率最低,即使是出故障也不能是致命故障。一般是通过建立风险分析模型——故障模式及其影响危害性(FMECA)定性模型来进行全面分析,然后对设计过程中各个分系统的优先级别依次排队,在有限预算规定的条件下最大限度地提高卫星平台的可靠性,即使是预算资金得不到充分满足的情况下被迫降低风险级,也要对风险进行量化,按照部件危害性进行设计选择,加强风险管理,使故障率减少到安全水平¹⁹⁾。

就当前各类卫星飞行任务的风险情况而言,一般可分为5级,即

- A级:风险性最小;
- B级:风险与成本折衷;
- C级:可经济地再飞行;
- D级:单次飞行成本保证最低;
- E级:单次飞行、用于研究和实验

A级飞行任务,可靠性最高,因此其关键部分都是采用冗余设计、有效载荷与姿控系统等的关键部件均设备份、增加标准的故障保护功能、全部采用S级部件、设计、试验和分析要配齐标准化文件并一定要通过评审。不过其成本相当高,研制周期也很长,适于大型多用途卫星。各国航天专家们的大量分析与计算结果表明,要降低研制成本,缩短研制周期,就要采取美国国防部国防尖端技术开发局(DARPA)提出的降低风险级(采取C级飞行任务)的办法¹⁾。

JPL曾对发现者号(Discovery)计划的首次飞行任务——火星登陆实验器进行分析,如果选择A级飞行任务,其研制经费为5.86亿美元,如果选择C级飞行任务,采用臭鼬管理模式、模块化设计,有选择地采用备用件(取消系统级冗余)、控制对按新标准开发的新技术的使用,大量地利用现有的技术和产品、取消故障保护、采用B级部件或经飞行验证的部件,可使研制成本下降64%(约为2.08亿美元);有效地利用软件系统仿真技术,省掉部分分系统级试验,再通过精悍的管理队伍进行高效管理,采用经验证的部件等对策,可使研制周期由5年减至3.5年,成本又可下降12%,即由2.08亿美元降至1.26亿美元^{1),7)}。

选择A级飞行任务,采用S级部件、耗资5.86亿美元的卫星生存概率为0.9998,而C级飞行任务、B级部件,卫星的生存概率则降至0.86。为解决这一问题,最有效的办法是采用发射轨道工作星和轨道备份星的办法。斋藤宏文先生在进行了大量调研和分析计算后得出这样一个结论^{1),28)}:采用相同部件开发第二颗星仅为开发首颗星经费的25%。因此,采用C级飞行任务开发两颗星为 $1.26 + 1.26 \times 0.25 = 1.575$ 亿美元,仅为选择A级飞行任务的5.86亿美元的27%。

所以可以说,降低风险级,加强风险管理再通过发射轨道工作星和轨道备份星这一双

保险模式是降低卫星成本的有效方法。

6 认真地做好民用器件在星上应用的工作

按照成本估算关系式(CER公式)反复计算结果表明,采用民用器件仅是采用航天专用器件成本的1/10(因为研制阶段的费用已由民用开发费支付,同时这些民用器件,特别是电子部件都是大批量生产)。因此在星上采用民用器件也是降低卫星成本的有效途径之一^{(24)、(25)、(26)}。

NASA、NASDA、ISAS、ESA等都成立了高可靠性研究中心或公司,研究民用器件在航天上的应用问题。如ISAS的“飞天号”月球轨道探测器、NASDA的技术试验卫星VI(ETS-VI)、通信广播技术卫星(COMETS)以及空间实验用小卫星“鹤”上都采用了相当数量的民用器件并证明效果很好⁽²⁷⁾。日本高可靠性公司与三菱电机、日本电气、东芝、日立、索尼、松下、夏普公司等合作,为日本的民用器件在星上应用创造了条件。归纳起来其主要做法是:

- (1) 严格筛选,认真试验(高、低温、湿度、温度循环、振动、冲击、热真空、辐照等),检测、跟踪记录,保证将那些不适于星上用的产品剔除;
- (2) 将器件置于原子反应堆内照射 α 射线(一般照射剂量为 $5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-6}$ rad),确认其能否经受住空间苛刻环境的考验;
- (3) 将置于原子反应堆内经照射 α 射线实验验证过的同类器件搭载在大气球或探空火箭上进行飞行实验,再次确认其抗辐照等性能;
- (4) 将在经(3)实验后验证过的同类器件装于实验卫星(如空间实验用小卫星“鹤”等)上进行飞行实验,再确认其性能;
- (5) 将经(4)验证过的同类器件安装在各类卫星上作为备份进行运行实验,确认性能后在各类卫星上正式使用。

如日立公司的16 Mbit CMOS DRAM就是采用上述程序验证后先应用在日本的各类卫星,接着又外销到美、欧空局、法、英、德、俄、韩等20多个国家的^{(1)、(27)、(28)、(29)}。此外这家公司的CMOS SRAM、日本电气、三菱电机、索尼等公司的CMOS SRAM,索尼公司的锂电池(在空间实验用小卫星“鹤”上进行了飞行实验)以及一些继电器、电阻、电容和IC等都是按上述程序实验后在星上使用过并取得好的效果后才销到美、俄、英、法等国的。

为进一步推进民用器件在星上应用,日本不仅确立了在搭载在H-II火箭上发射的50 kg级超小型卫星上搭载15种民用器件⁽²⁵⁾,而且还决定在其下一代不载人空间实验系统(USERS)的留轨舱(公用舱)上全面采用民用器件(其中包括以全面采用汽车用电子器件组装的计算机作为星载计算机,以全部采用民用器件的CCD敏感器和惯性基准单元(IRU)作为姿态测量用敏感部件),通过在轨运行3年(返回舱在轨完成0.5年的超导实验后返回地面、留轨舱作为近地轨道小卫星公用平台继续在轨工作2.5年),在进行公用平台验证实验的同时验证这些以民用部件组装的各种设备^{(15)、(26)},为在包括大型卫星在内的各种卫星上应用这些民用产品开辟更广阔的前景,为大幅度地降低卫星成本开辟道路。

7 增加有效载荷比是降低小卫星成本的最有效方法

公用舱所占的重量比过大,使有效载荷重量比过低,是导致成本高的重要原因。如静止轨道通信卫星的有效载荷比仅为10%左右,日本技术试验卫星(ETS)-VI采用离子发动机

作为南北轨道控制用发动机、以碳纤维加固塑料(CFRP)的蜂窝式结构作为构体,采用相当数量的高密度安装的民用器件,才使有效载荷比达到 17.6%。而小卫星采用一体化设计、实现模块化、标准化,取消冗余,减少不必要的备份系统,采取采用微电子机械系统(MEMS)和多芯片模块(MCM)与三维封装相结合的封装技术、实现无电缆连接以及增加自主性等措施,可使公用舱的重量进一步下降,有效载荷的重量进一步增加,当前已增加到 50~60%⁷⁾,可望增加 80%^{3)、4)}。日本三菱电机公司提出的 100 kg 级小卫星的有效载荷比可达 60%²⁴⁾,而 NASDA 的超星计划明确提出了要使其 50 kg 级的小卫星的有效载荷比达 80% (它所设计的首颗卫星公用平台已达 76%),同时确定了这种 50 kg 级的小卫星要完成执行单一飞行任务的 500 kg 中型卫星所要完成的飞行任务^{4)、5)、31)}。而美国“新盛世”计划中提出的多功能结构小卫星的有效载荷比要从当前 30% 提高到 70%,将在其地球轨道(EO)3 号上实现。

这种高有效载荷比,可使卫星携带更多的执行飞行任务仪器(有效载荷),无异是更大幅度地降低卫星研制成本的有效方法。

8 批量化生产、扩大用户、降低卫星的研制成本

以往一个型号的卫星有时只生产一两颗,其成本是相当高的。随着航天高技术的不断发展,使人们对卫星的重大作用的认识进一步提高,需求在不断增加,许多领域的卫星,需要发几十颗、甚至上百颗组成星座,才能更好地为人类提供满意的服务。以“铱”星为代表的通信卫星星座已经建成并开始提供有关服务,就足以说明批量生产卫星的航天产业化时代已到来,不仅星上用部件可批量生产,就连卫星也可小批量生产。由 66 颗卫星组成的“铱”星系统,当前是 22 天就可组装一颗,而全球星每 10 天就装配 1 颗。不过负责“铱”星研制的摩托罗拉公司的最终目标更高,要 5 天装配一颗星⁶⁾。

原来需 9 个月才能装配的一颗星,而今仅用 22 天(50 个人),能节省多少钱、降低多少成本啊(比原来少用近 250 天,仅工时费即可节约:每人每天的平均工资 $\times 250 \times 50$) 美元。

而器件则更易实现批量化生产、降低成本^{7)、30)}。

70 年代,采用手工生产一个陀螺的成本为 10 万美元(框架式, 18 kg);

80 年代中,基本采用手工操作(少量自动化)生产一个陀螺的成本为 5~6 万美元(动态调谐式, 1.7 kg);

80 年代末,采用微精密加工、流水作业生产一个陀螺的成本为 1 万美元;

90 年代末,批量生产(达 10^4 个),生产一个螺陀的成本为 500 美元;

2000 年初,全自动化批量生产(达 10^7 个),生产一个陀螺的成本为 10 美元。

所有的部件均采用批量生产,减轻重量、降低功耗,提高可靠性,加之大幅度降低成本(仅为 90 年代末的 1/50),增加有效载荷比,将使卫星成本更大幅度下降。因此,三菱电机公司尖端技术研究所的井上正夫所说的“若干年后,卫星也将会像车辆和计算机一样成为个人所有的普通财产”并非绝不可能。

9 加速我国微小卫星发展的一点儿建议

航天产业化势不可挡,卫星,特别是小卫星(重量仅 50 kg,但可出色地完成 70、80 年代的单一功能的 500 kg 级中型卫星的飞行任务的卫星)的市场竞争会越来越激烈,需求量非

常大。美国、俄罗斯、日本、英国等都在开发这种先进的现代小卫星上下力气，瞄准了市场，而萨里大学已在市场上站住了脚。美、俄、ESA 除在大卫星上占据了一定市场外，在开发小卫星方面也格外努力，日本在大卫星上没有挤进国际市场，但在小卫星方面却格外努力，他们正在以器件打入国际市场为楔机，企图在小卫星上捞到实惠。我国作为第三个用自己的火箭发射完全采用本国技术研制的卫星的国家，大型卫星没能打入国际市场，在小卫星，特别是在某些部件上应当有所做为。因为在小卫星上验证某些关键技术和器件是推进技术发展的有效措施和最佳途径。因此我们建议，领导和从事小卫星研制工作的同志应在以下四方面积极开展工作：

(1) 全面跟踪国外卫星和星上器件微小型化研究工作的动向，掌握其发展趋势

1990年，以屠善澄首席科学家为代表的航天专家就曾提出研究国外现代小卫星发展趋势和加快我国小卫星开发的建议，并先后在怀柔、京丰宾馆等处主持召开了专题研讨会；陈芳允教授等也提出了发展我国低轨道通信卫星并建立星座的方案。然而由于种种原因，建议和方案并未被及时采纳。致使这项工作起步起码晚了3~5年。

今天，我国的小卫星开发工作不仅起步并捕获到了国际合作对象，应该说是一个良好的开端。但由于基础工业水平差，加之预先研究工作不够深入，对国外现代高性能微小卫星的现状和发展趋势，特别是器件微小型化的现状和未来发展趋势了解得不够，使我们的微小卫星没能体现出“小型”、“现代”、“高性能”，故缺少竞争力。特别是美国“新盛世计划”和日本“超星”计划的出现，更应使我们认识到星上器件不仅要小型化，还要微型化，因此必须掌握国外星上器件小型化，乃至微型化的发展趋势、关键技术，使我们深刻地认识到星上器件微小型化不仅对开发高性能现代小卫星，而且对开发技术先进的大卫星公用舱，实现一体化设计，做到模块化、标准化、系列化，提高有效载荷比都是非常重要的，从而增加紧迫感。为做好这项工作，应该成立一个调研组，它可在原总公司小卫星论证组的基础上组建，但必须由一位既了解国外、又了解国内情况，真正具有实践经验，敢于负责、说了就算的专家负责，成员应包括善于捕获信息的航天情报专家，从事微机械电子部件的专家，材料和工艺专家，卫星控制专家和总体设计人员。他们用1年时间搞清国外星上器件小型、微型化的发展趋势，关键技术以及国外从事该技术开发的具体厂家和技术负责人、在轨应用状况以及产品的市场价格。

(2) 制订出我国星上器件微小型化的目标和日程表

以调研组为核心，吸收计划管理和有关技术专家参加，明确目标，紧密配合，在既了解外国情况、发展趋势，又了解国内技术现状，确定在近期、中期(2005年前后)经努力可达到的水准，从而有的放矢地制订出适合我国国情的星上器件小型化(乃至微型化)的目标和具体日程表，包括用多长时间能开发出哪些器件，可达到哪家、哪一年代产品的水平，哪些可以依靠自己力量，哪些必须引进国外产品或技术才能实现微小型化，如果引进产品和技术，目标国和生产厂家都有哪些，价格是多少，同时在制订引进技术或产品那一天起，就要确定国产化的目标及具体措施，以确保微小型化器件国产化的比例不断增加，最后实现星上器件基本全部国产化。从而理顺技术引进与自主开发的关系，制订一个什么时间可达到国外当前的技术水平，什么时间可赶上美国等先进国家的技术水平的日程表，也只有这样才能做到有目标、有措施、可操作，才能真正加速我国星上器件微小型化。

(3) 建立民用器件在星上应用的研究机构，是加快星上器件微小型化的有利措施

美国、日本、英国、法国、德国等都有促进民用器件在星上应用的研究机构，如日本的高可靠性公司就是一家专门研究民用器件在星上应用的公司，它通过大量的研究、测试，认定日立公司的 DRAM 可满足 5×10^{-3} rad 的抗辐射(SEU)等性能要求，因此，日本的 H32/200 型星上计算机和美国数字记录仪等上面采用了这种 DRAM；美国劳伦斯利莫尔研究所认为经鉴定的索尼公司的 VS-61 系列便携电话机和手提式立体单放机用的锂电池性能非常好，可满足星上要求，准备在星上应用，故引进这一产品并将其用于小卫星上；美国的这类研究机构的出色工作使美国国防部(DOD)下决心在其研制的小卫星上均采用最新的民用存储器芯片(包括日立公司的 SRAM)，这对星上器件微型化，降低成本有着重要作用。我国目前尚未有这样的研究机构，但应尽快建立。我国生产“七专”产品的生产设备已不先进，生产的产品水平也已相对落后，而我国在电子、机械领域的许多生产厂家引进了国外先进的设备与技术，他们的产品(包括首钢与日本电气、四通与三菱电机公司等创办的合资企业生产的产品)的可靠性较高，通过尽早地建立这类机构，对我国有可能在星上应用的民用器件进行测试、分析，最后筛选出若干种并为其创造在大气球、探空火箭上搭载确认性能的机会，然后在我国技术试验用小卫星上验证性能，最后推广到各类卫星上应用，这无疑可加速我国星上器件微型化和国产化的进程，也利于降低成本，从而可降低卫星研制成本。

(4) 重视新材料、新工艺的研究

许多新材料，如碳-碳复合材料、形状记忆合金(SMA)¹⁾对星上器件微型化有着极其重要的作用，而三维 + MCM 封装，可使封装密度是传统的引线穿通式封装的 30~50 倍，这无疑可使器件小型化。而先进的封装技术也是确保工艺质量，提高器件性能和可靠性，减少在轨故障的关键。当前国内已开展了微加工工艺方面的研究，针对小卫星系统而有序地深入开展工作，将会取得重要成果，因此，必须引起足够重视。另外，还必须清楚地看到当前我们在新材料和封装工艺技术等方面的研究也远远落后于日本、美国等，因此我们必须加强这方面的研究，认真学习国外的先进技术，有组织、有计划地以请进来(讲授)、走出去(实际参观学习)的方式，掌握并尽快的应用这些先进技术，这是加速我国星上器件微型化的主要措施之一。

参 考 文 献

- [1] 王存恩、詹盛能. “国外微小型卫星公用舱器件微型化发展趋势”，微小卫星应用微小型技术讨论会论文集. 1997.11:9~29.
- [2] 梅 新. “面向 21 世纪的新盛世计划”，《空间了望》. 1996 年第 1 期，P.2~4.
- [3] 王存恩. 日本的“超星计划”，《控制工程》，1998 年第 6 期.
- [4] 王存恩译. 超星计划，见本专辑 p.41~46.
- [5] 王存恩译. 日本新世纪航天开发计划——“超星计划”的设想，见本专加 p.47~52.
- [6] 黄志澄. 现代小卫星与卫星小型化，微小卫星应用微小型技术讨论会论文集，1997.11.1~8.
- [7] 于家源、王存恩. 降低卫星开发成本的主要技术途径，空间技术情报研究(KQW-97)，369~384.
- [8] 日本航空宇宙工业会. 小卫星的低成本化，日本航空宇宙工业会小卫星研究的调查报告，1994.3:105~130.
- [9] 王存恩编译. 关于航天器开发成本问题的研究，见本专辑 p.10~23.

- [10] 陈芳允等. 关于开拓小卫星空间系统应用的可行性研究及其相关技术. 现代小卫星技术(三). 1998.5.182~187.
- [11] 王存恩编译. 一体化设计思想适用于小卫星的系统设计. 见本专辑 p.76~78.
- [12] 许滨. 微小卫星一体化技术中的几个关键性问题, 微小卫星应用微小型技术讨论会讨论集, 1997.11:85~90.
- [13] 王存恩译. 轨道碎片观测卫星, 见本专辑 p.117~139.
- [14] 王存恩译. 自由飞行有效载荷技术实验卫星. 见本专辑 p.140~156.
- [15] 王存恩译. 下一代不载人空间实验系统(USERS)计划, 见本专辑 p.95~103.
- [16] 王存恩译. 重新考虑设计思想可降低航天器的开发成本, 见本专辑 p.79~81.
- [17] 王存恩、于家源. 一种可执行多种飞行任务的小卫星公用舱, 见本专辑 p.67~71.
- [18] 王存恩译. 可执行多种飞行任务的小卫星公用舱, 见本专辑 p.72~75.
- [19] 宋海丰译. 微小型卫星设计的风险管理, 见本专辑 p.59~66.
- [20] 严拱天, 萨里大学小卫星的成功经验及控制系统的一些关键技术, 《现代小卫星》(二), 1996.8:59~62.
- [21] 李勇等译. 新盛世计划中航天器的自主性, 《现代小卫星》(三), 1998.5:218~235.
- [22] 潘科炎译. NASA 为未来小卫星开发的集成公用模块, 《现代小卫星》(二), 1996.8:206~214.
- [23] 王祥译. 软件风险评估矩阵法——一种节省经费的技术途径, 见本专辑 p.34~40.
- [24] 王存恩译. 小型、低成本卫星的开发, 见本专辑 p.53~58.
- [25] 王存恩. 日本用 H-II 火箭搭载发射超小型卫星的前景分析, 见本专辑 p.82~94.
- [26] 王存恩译. 卫星成本分析及如何实现卫星低成本, 见本专辑 p.27~30.
- [27] 王存恩. 日本的小卫星及其关键技术, 《现代小卫星》(一). 1995年元月:140~163.
- [28] 斋藤宏文. 美国小卫星的开发动向(日文). 1995.1.
- [29] 郭树玲译. 在太阳同步轨道上对非加固高密度 SRAM 单粒子翻转的观测结果, 《星上计算机及其抗辐射加固技术的新进展》. 1998.10:85~98.
- [30] 王存恩译. 小卫星的成本问题的研究, 见本专辑 p.24~26.
- [31] 王存恩编译. 采用低轨道卫星通信调查海洋野生动物, 见本专辑 p.104~111.
- [32] 王存恩. 日本卫星的计划管理. 《航天系统工程》专辑. 1997.11:1~15.

关于航天器开发成本问题的研究

——空间开发成本研究会研究报告

八坂哲雄

1 引言

1994年1月,来自日本国内的空间开发机构、航天制造企业以及各高校从事成本问题研究的专家自发地组成了“空间开发成本研究会”,并召开了成立大会。会上做出各成员要按自己所从事的研究领域和当前所面临的研究课题,深入地开展降低航天器开发成本的研究工作并尽快提交研究报告等决定。同时提出就以下三个方面开展研究工作:

(1) 创造一种降低成本的环境条件;

(2) 找出计算航天器成本和进行成本管理的科学方法;

(3) 研究影响成本的特殊技术问题。要尽快取得成果,同时还要就这些研究成果交换信息,制订出切实可行的计划,确定完成计划的指导方针。在开展上述工作的同时积极地积累有关数据。

该研究会成员约20人,通过大家精力充沛地开展工作,仅1年半多点的时间,就取得了一系列实质性的研究成果,参加研究的单位和个人以书面报告的形式提供了大量的研究数据和研究成果。接着还针对日本的航天开发形势,新启动了一项大型计划——降低H-II A火箭的开发成本研究计划,也取得了理想的成果。研究会所取得的成果以及提出的建议对今后开展的降低航天开发成本工作十分重要,这里归纳整理其重点,仅供参考。

2 对现状的看法

航天开发正面临一个新的转机。随着东西冷战结束,国际形势发生了急剧变化,航天高科技取得了新进展,期待着航天由当初的实验阶段尽快步入日趋成熟的产业化时期。

从1957年人类向太空成功地发射了第一颗人造地球卫星到现在满打满算还不到40年,人类就向太空发射了4000余颗人造卫星(包括发射直接探测太阳系的探测器,开展了观测空间高远位置的空间科学研究),人类飞离地球开展各项具有深远意义的研究活动,解开了迄今一直未解开的许多谜,使人类为之振奋,为之感动,这些活动本身也丰富了人类生活。不过,要在这短短的40年内把几千年来未解开的谜全部解开是不可能的。而在这40年时间把人类的那么多的梦想全部变为现实也更是不现实的,还需坚持不懈的努力。因此,从某种意义上讲,20世纪末和21世纪初是一个极其重要时期——证实和发挥人类聪明才智的关键时期。此间许多尚未解开之谜将被相继解开,尚未实现的梦想将变为现实。

要指出,这一时期也是受东西冷战这一特殊政治形势所支配的特殊时期,航天开发的进展不能说与这种政治形势无关。实际上航天开发水平代表一个国家的实力和威信,还有人认为当前发展航天技术是一个国家继续生存和发展的条件,因此许多国家都将发展航

天、开发天疆置于优先地位。冷战结束后，航天开发环境也在发生急剧变化，这就迫使世界各国都不得不调整其空间开发政策。不过日本所执行的是一条独立的空间开发政策，纵然世界环境在变化，对日本的影响也不明显。但不否认，也不能忽视，国外航天开发活动也刺激且支持了日本的空间开发活动。其实面对着飞跃发展、全球性变化的大潮，没有任何一个国家甘心情愿地处于“孤立”地位。

面对这样重大的环境变化，首先所应采取的对策是调整空间开发大纲，由原来的“优先考虑开发目的”转变为现在的“优先考虑开发效果”。大家都清楚，早在“阿波罗计划时代，航天开发的指导思想是“无论存在多大困难，投入多大的人力、物力和财力，一定要把飞船送上天”，今天这种指导思想早已站不住脚了，取而代之的是正在研制的阿尔法空间站等航天计划中所采用的一种非常现实的政策——把验证投资效果的稳妥性作为推进一项计划所需的必要条件。那么那种事先准备好“多用途可供用户选择”的方案的做法就易于达到所要达到的效果，而俄国人制造的火箭发动机组装到美国的火箭上就是其中的一例。在日本，日本人自己研制的应用技术卫星的国内市场受限制，不过如果仅仅将其理解为是国外施加政治压力的产物，不去追究可向用户提供应用技术卫星的国内厂商没能努力开发甚至放弃了向用户提供多种多性能、价格低廉的应用技术卫星的努力则过于浮浅，也可以说是错误的。

为什么提出要“优先考虑开发效果”呢？很简单，政治形势发生了变化，国家投资在减少，如果不从根本上解决问题——降低开发成本，航天开发事业则很难进一步扩大。许多国家和空间开发机构提出的低轨道通信卫星系统工程已经启动，该计划采用研制多颗采用同一设计方法、同一控制方案的同一类型的卫星，用同一火箭将这种相同类型的多颗卫星分批送入轨道的做法，无疑可降低研制和发射成本，无疑会取得好的开发效果。人们还编织了一个绚烂多彩的梦——建造太空工厂，在那里生产空间产品，利用太阳能和行星资源，建设太空旅馆，在太空接待旅游者，……。这样才能有力地推进航天开发活动。很清楚，如果不能大幅度地降低开发成本，大批量地加工出空间产品，不最大限度地利用太阳能、行星资源，不能在太空大批地接待旅游者，从而大幅度地降低空间运输系统以及太空运营操作费用，无论多么多、多么长、多么绚丽多彩的梦，也只能是个梦，不会变成现实。其实，航天产业发展到今天，就连对那些纯科学领域的开发也都提出了成本意识方面的要求，因此，研究重点已由筹措到更多的资金、完成更高级的课题转移到如何用限定的投资完成更多的研究课题方面来了。

航天开发已进入了成熟阶段，与此同时它也丧失了一直拥有的特权——在财政投资方面受到特别关照的“最惠国”待育权，也就是说它已不能像以往那样仅凭其在人们心目中所持有的特殊地位以及它向人们描绘的绚丽多彩的梦就可获得投资了，对于它，也和对其它任何科技领域一样，提出了“必须按经济原则办事”这一公正的要求。在这种情况下，在欧美各国出现了超越国界的企业合并或联合；美国则提出彻底实现卫星小型化要求。而这样就必须探索怎样使航天开发适应进入成熟阶段的各种变化。一般都认为，日本的航天产品的成本要比其它国家高，缺乏市场竞争力。如果某些国家采取的对策、探索的道路取得成功，肯定会拉大日本与这些国家的差距，这是一件令人十分担心的事儿。

但必须指出，日本在许多方面都取得了长足进展，如完成了 H-II 火箭的研制，M 火箭大型化不仅技术开发取得了突破性进展，而且首发成功。而 1996 年 1 月又对《宇宙开发政

策大纲》做了修改，明确规定，下一个要解决的课题就是如何在成本方向有一个新的突破，如获成功，其意义将更加深远。

3 研讨的主要内容

日本空间开发成本研究会下设三个专业委员会——火箭、卫星和系统专业委员会，每个专业委员会的成员都有自己承担的课题，分头开展研究。各专业委员会以各成员单位的研究内容及其实际取得的成果为素材开展研讨，研讨的内容非常丰富，体裁也相当广泛，下面就具有代表性的研究项目做介绍。

3.1 火箭成本的评估

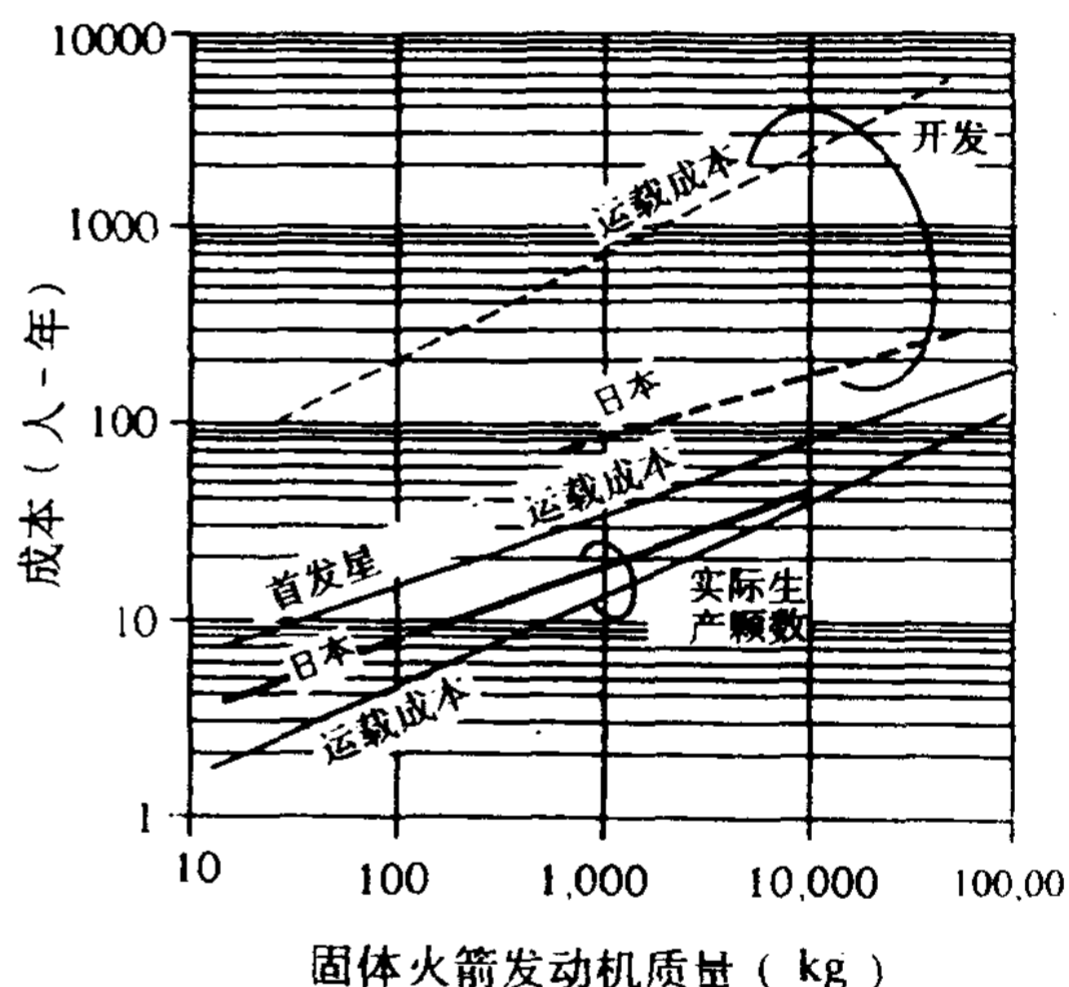
考虑向太空发射的成本时，不仅要考虑选用的是哪一种火箭，而且还必须考虑那种火箭的发射载荷重量，研制的颗数等，根据这些参数来估算火箭的成本，这时采用的是成本估算关系式(CER)。成本估算关系式为人们提供了一种估算成本的重要手段，也是一种科学的方法。CER可从统计学的角度分析可提供用于航天器发射用火箭的种类和以设计为基础的发射用火箭的成本数据，找出影响降低成本的主要原因及其影响程度。一般是用D.E.Koelle提出的运载成本模型(Transcost Model)来评估火箭的发射成本。

(1) 固体火箭发动机的成本评估

用运载成本模型对没包括在该运载模型内的日本的火箭发动机的成本也进行了分析。事实上成本可以用通常的货币金额表示，但必须把货币兑换率逐年变化因素考虑在内，必须修正物价指数，因此相当繁琐。所以一般不用货币金额而是用Koelle所倡导的工时数来表示。

以固体火箭发动机的总质量作为参数，分别调研了开发用火箭、首飞火箭和批量生产火箭的成本。设开发总质量为M的固体火箭发动机的开发成本为 F_M ， $F_M = aM^b$ 。开发成本采用了M-V火箭各级发动机的开发预算，实际火箭的成本则采用了观测火箭、发射卫星用火箭的助推器以及末级火箭等17种数据。图1给出了固体火箭发动机与运载成本相比较的曲线图，方程式中的系数如表1所示。

比较结果表明，日本的固体火箭发动机的研制费比欧美低，甚至能低一个数量级。实际上日本的首发运载火箭的制造费也比欧美的首发运载火箭的制造费低，不过尚未实现批量生产。而欧美的运载火箭已实现批量生产，因此使制造成本大幅度下降，相比之下，没实现批量生产的日本运载火箭的研制费



用运载成本模型(Transcost model)对欧美和日本的运载工具的成本进行比较。纵轴的单位为“人年”，它是一种不受货币兑换率和每年的通货膨胀影响的指标，是每个国家、每年的(航天开发产业计划的总成本)/(航天开发产业的从业人员总数)。例如，1994财政年度美国1人年的产值为20.9万美元；欧洲1人年的产值为18.5万欧洲货币单位；日本1人年的产值为2.880万日元

图1 固体火箭发动机的成本

自然也就显得高了。

表1 固体火箭发动机的成本估算式
成本 $F_M = aM^b$; M 为火箭发动机的总质量

F_M	运载成本		日 本	
	a	b	a	b
开发用火箭	19.4	0.507	10.8	0.314
首飞火箭	3.17	0.35	-	-
批量生产火箭	0.59	0.47	1.19	0.39

(2) 可重复使用式运载工具的成本比较

表2给出了可重复使用的运载工具中开发用运载工具和首飞运载工具的成本(按照运载成本模型,开发用运载工具和首飞运载工具的成本与运载本体重量成函数关系)。以此为基础,对未来可能投入使用的天地往返机的成本进行了研究,结果表明,采用返航助推器的可重复使用的运载工具其单位有效载荷重量的成本非常低,仅为当前广为使用的一次性运载工具的成本的1/3;通过对不同类型的天地往返机的比较可得出如下结论:有效载荷低于20吨时采用垂直着陆方式较为有利;而有效载荷很重(大于20吨)时采用水平着陆方式较为有利。

表2 运载本体的开发成本与制造成本

开发成本: $k_d = aM_d^b$; 首发运载工具的制造成本: $K_v = aM_d^b$;

M_d :包括发动机质量在内的干重量; M_v 为 M_d + 推进剂质量

运载工具的类型	开发 a	开发 b	制造 a	制造 b
带翅膀可重复使用型	18.4	0.358	0.909	0.628
弹道可重复使用型	4.68	0.465	0.282	0.628
弹道用后舍弃型	2.07	0.485	0.101	0.628

(3) 卫星发射成本

卫星发射成本包括两部分,一部分是硬件成本,一部分是非硬件成本。硬件成本系与火箭本体等硬件有关的成本;非硬件成本系发射阵地服务、运营服务等与硬件无关的成本。非硬件成本的含意不够清楚,如具体范围、如何分类、怎样进行定义等都不够明确,公开发表的数据也很少,因此很难进行评价。一般是以 Koelle 的定义为基础,按表3那样定义的。

要搞到表3所示的各项内容的具体清单是很难的。其中一个主要原因是既没有公开发表的数据,也不清楚成本与售价之间的关系。不过如在现有的发射系统成本估算式中导入一定的估算数据,则可获得运载工具、直接操作和间接操作费所占的比例,它们分别为70:20:10。其实这一结果是比较可信的,因为估算结果表明,无论是在欧美、还是在日本,获

得的统计数据与估算值基本上一致。但费用的绝对值会随着一年内发射次数的增加而下降。在 CER 模型中没有给出类似一年只发射一次这样发射频率相当低的情况下操作费究竟有多少，但通过外差关系式可求出与 H-II 火箭相当的运载工具的操作成本为 50 ~ 60 万日元，这与当前的估算值相当接近。

表 3 发射成本清单

总 发 射 成 本	硬件成本	运载工具	<ul style="list-style-type: none"> · 火箭制造成本（包括固体推进剂在内） · 备用件
	非硬件 成本	直接操作费	<ul style="list-style-type: none"> · 地面操作 · 发射管理控制 · 液体推进剂 · 运送费 · 发射场使用费 · 失败对策备用金
		间接操作费	<ul style="list-style-type: none"> · 程序管理费 · 运营费 · 技术维护费 · 分摊的开发费、专利费 · 利润、税收等
		保险费	<ul style="list-style-type: none"> · 发射保险 · 卫星保险

如前所述，CER 是以统计学的方法对现有的和已研讨过的各种运载火箭的成本数据进行分析而后得出的关系式。虽然尚未就其详细分类问题进行充分考虑，但这种估算式的优势在于它基本可估算出其成本，不过它本身也存在着极限性，那就是没有把采用新设计思想问题和一些特殊情况考虑进去。当前日本的火箭专家和制造商正集中精力解决降低 H-II 火箭的成本问题，此间，人们最感兴趣的一个问题就是如何将 H-II 火箭这种非连续的跳跃式降低成本的方程式与宏观上反映国际航天发射成本发展趋势的 CER 进行对比，并确定如何对待这种非连续的跳跃式降低成本方式。

3.2 实现火箭低成本问题的研讨

(a) 实现发动机低成本事例研究

分析液体火箭发动机的成本，从制造者的角度研究实现低成本的可能性。以 LE-7 发动机为例，从发动机的各种组成部件中找出导致成本增高的主要原因，研究在设计过程中如何避免提高成本的办法(表 4)。大量的研究表明，若采用降低发动机的燃烧压力，利用煤油作为燃料，采用简易喷注器，可大幅度地降低制造成本，仅为原来成本的 1/5 ~ 1/10。不过这样一来会使发动机的性能下降，而通过增加推进剂的携带量，可达到 H-II 火箭第一级相同的推力(重量由 100 吨增加到 150 吨)。