

文章编号: 1001-2486 (2002) 01-0009-05

基于全寿命周期费用分析的可重复使用运载器级数选择*

罗世彬, 罗文彩, 张海联, 王振国
(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 建立了可重复使用运载器全寿命周期费用模型, 并利用该费用模型分析了不同级数的可重复使用运载器方案的全寿命周期费用, 对全寿命周期费用的各部分组成比例及其随级数的变化规律进行了分析。研究表明两级入轨的可重复使用运载器方案全寿命周期费用最低, 是基于目前技术水平的一种较优的可重复使用运载器级数选择方案。

关键词: 费用模型; 可重复使用运载器; 级数选择; 经济性分析; 全寿命周期费用

中图分类号: V43 文献标识码: A

The Selection of the Stage Number for the Reusable Launching Vehicle Program Based on Life-Cycle-Cost Analysis

LUO Shi-bin, LUO Wen-cai, ZHANG Hai-lian, WANG Zhen-guo

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The launching cost model of reusable launching vehicle based on Life-Cycle-Cost (LCC) analysis is presented. The LCC of various reusable launching vehicle programs with different stages are calculated by applying the newly built analysis model. Components of the LCC are presented specially, and the relationship between each of the components of the LCC and stage number is also analyzed. The result indicates that the LCC of Two-Stage-to-Orbit (TSFO) reusable launching vehicle program is the lowest, so TSFO reusable launching vehicle program is the relatively optimal selection based on the present developing level.

Key words: cost model; reusable launching vehicle; stage number selection; economical analysis; life cycle cost

发展可重复使用运载器技术难度大、所需经费多, 是一项复杂的系统工程。历史经验证明, 全寿命周期费用的高低是决定航天工程成败的重要因素之一^[1]。因此在可重复使用运载器论证初期对其进行全寿命周期费用估算, 无论是对发展战略的制定、可行性方案的选择, 还是对具体的研制都是十分必要的。全寿命周期费用^[2, 3] (Life Cycle Cost, LCC) 是指系统从论证开始, 经过研制、改进、使用直至废弃的整个期间所耗费的研制费用、制造费用、使用与保障费用及最后的报废费用的总和。已有的运载器费用评估模型 (如 TRANSCOST 模型、NASCOM 模型等) 各有优缺点, 实际运用时, 常常需要采用几种模型相互补充的方法, 才能得到较为准确的结果^[4-7], 比较烦琐。本文在综合分析已有航天费用模型的基础上, 初步建立了可重复使用运载器的全寿命周期费用模型, 并对不同级数的可重复使用运载器方案进行了估算。计算数据参考美国 Kistler 航天公司设计的 K-1 可重复使用运载器方案^[9-11], 该方案大量采用目前已有的先进技术, 代表了当前最新技术水平。

1 全寿命周期费用模型

1.1 全寿命周期费用定义

假设可重复使用运载器的全寿命周期费用由运载器总研制费用、运载器制造费用、维修费用、回收费用、操作费用和其它费用构成^[10]。

$$LCC^R = C_{De}^R + n_1 C_{Ve}^R + n_2 (C_{Rf}^R + C_{Rec}^R + C_{Ops}^R) + C_{Other}^R \times Y \quad (1)$$

其中, LCC^R 为全寿命周期费用, n_1 为完成任务所使用的 RLV 架数, n_2 为单架运载器重复使用

* 收稿日期: 2001-11-01
基金项目: 国家 863 高技术项目资助 (863-2)
作者简介: 罗世彬 (1976-), 男, 博士生。

的次数, Y 是全寿命周期(单位为年), C_{De}^R 是总研制费用, C_{Ve}^R 是单架运载器制造费用, C_{Ref}^R 是单次发射的修复费用, C_{Rec}^R 是单次发射的回收费用, C_{Ops}^R 是单次发射的操作费用; C_{Other}^R 代表每年的其它费用。

1.2 一次性使用运载器的制造费用

一般认为一次性使用运载器的制造费用与运载器的干质量成正比。 C_{Ve}^E 为一次性使用运载器单位结构质量所占的制造费用。 N 为运载器总级数, M_{0i} 、 M_{ki} 为第 i 级运载器的起飞质量和关机质量, μ_{ki} 为第 i 级可重复使用运载器的最终质量比, μ_{pi} 为第 i 级可重复使用运载器有效载荷的相对质量。

$$C_{Ve}^E = C_{Ve}^E \sum_{j=1}^N (M_{kj} - M_{0j+1}) = C_{Ve}^E [(\mu_{k1} - \mu_{p1}) M_{01} + (\mu_{k2} - \mu_{p2}) M_{01} \mu_{p1} + \Lambda] \quad (2)$$

$$\mu_p = \frac{m^R}{M_{01}} = \prod_{i=1}^N \mu_{pi} \quad (3)$$

1.3 研制费用

假设可重复使用运载器的研制费用与可重复使用运载器的制造费用成比例关系, 可重复使用运载器的制造费用与一次性使用运载器的制造费用也成比例关系^[4-5]。

$$C_{De}^R = f_1 C_{Ve}^R \quad (4)$$

$$C_{Ve}^R = f_2 C_{Ve}^E \quad (5)$$

式中 f_1 为可重复使用运载器研制费用与制造费用的比例系数。 f_2 是可重复使用运载器与一次性使用运载器制造费用的比例系数。 C_{Ve}^E 是一次性使用运载器的标准制造费用。

1.4 维修费用

维修费用包括维修备件费、维修备件仓储费、维护人员的人工费等。假定维修费用与运载器的干质量成正比关系, C_{Ref}^R 为单位结构质量维修费用。

$$C_{Ref}^R = C_{Ref}^R \sum_{j=1}^N (M_{kj} - M_{0j+1}) \quad (6)$$

1.5 操作费用

设每次发射操作费用主要由消耗的推进剂费用 C_{Ops-1}^R 和发射管理、地面支持等费用 C_{Ops-2}^R 两类费用构成, 则:

$$C_{Ops}^R = C_{Ops-1}^R + C_{Ops-2}^R \quad (7)$$

$$C_{Ops-1}^R = C_{Ops-1}^R [(1 - \mu_{k1}) M_{01} + (1 - \mu_{k2}) \mu_{p1} M_{01} + \Lambda] \quad (8)$$

式中 C_{Ops-1}^R 为推进剂的单位质量费用。 C_{Ops-2}^R 主要包括管理发射操作、飞行控制、技术支持、发射场支持等几乎不随结构参数而变化的费用, 本模型假定 C_{Ops-2}^R 为常数。

1.6 回收费用

可重复使用运载器单次发射的回收费用 C_{Rec}^R 由运载器采取的返回方式(滑翔飞回式、降落伞式、气囊气垫式、海上溅落式等)、运载器的级数等因素确定。假设单次发射的回收费用 C_{Rec}^R 与运载器级数成正比。设运载器标准单级的回收费用为 $C_{Rec-Single}^R$, 则对于 N 级入轨的可重复使用运载器, 单次发射的回收费用为:

$$C_{Rec-N}^R = C_{Rec-Single}^R \times N \quad (9)$$

1.7 全寿命周期费用

将各式代入式(1), 可得到可重复使用运载器的寿命周期费用表达式:

$$LCC^R = [(f_1 + n_1) f_2 C_{Ve}^E + n_1 k C_{Ref}^R] [(\mu_{k1} - \mu_{p1}) M_{01} + (\mu_{k2} - \mu_{p2}) M_{01} \mu_{p1} + \Lambda] + n_1 k C_{Ops-1}^R [(1 - \mu_{k1}) M_{01} + (1 - \mu_{k2}) M_{01} \mu_{p1} + \Lambda] + n_1 k (C_{Ops-2}^R + N \times C_{Rec-Single}^R) + C_{Other}^R \times Y \quad (10)$$

2 级数选择

2.1 入轨约束条件

可重复使用运载器结构参数的选取要满足入轨条件。入轨速度可采用齐奥尔科夫斯基理想速度公式进行分析^[7, 8], 计及重力、空气阻力等因素引起的速度损失。

$$V_k = 0.833 \sum_{j=1}^N I_{spvj} \ln \frac{1}{\mu_{kj}} \quad (11)$$

式中 I_{spvj} 为可重复使用运载器第 j 级发动机的真空比冲。

2.2 参数选取

结构参数 μ_{ki} 和 μ_{pi} 满足如下关系式^[7]:

$$\mu_{ki} = \alpha_i + \mu_{pi}(1 - \alpha_i) + \beta_i m_i \quad (12)$$

其中 α_i 和 β_i 为可重复使用运载器结构质量的特性参数, m_i 为初始过载。取各级的特性参数相同, 可以保证送入地球轨道的经济准则费用最小^[7], 即整个运载器有最大的有效载荷相对质量 (即运载能力最大)^[7, 8]。由式 (3)、(11)、(12) 可得:

$$\mu_p = \frac{N}{\rho_i} = \left[\frac{\mu_{k0} - \alpha - \beta m}{1 - \alpha} \right]^N \quad (13)$$

$$\mu_{k0} = \exp \left[\frac{1.2 V_k}{-I_{sp} N} \right] \quad (14)$$

将式 (13) 代入全寿命周期费用表达式 (10), 可以得到:

$$\begin{aligned} LCC^R = & [(f_1 + n_1) f_2 C_{Ve}^E + n_1 k C_{Rgf}^R] \sum_{i=1}^N [(\mu_{k0} - \mu_p^{\frac{1}{N}}) \frac{m^R}{\mu_p} \mu_p^{\frac{i-1}{N}}] \\ & + n_1 k C_{Ops-1}^R \sum_{i=1}^N [(1 - \mu_{k0}) \frac{m^R}{\mu_p} \mu_p^{\frac{i-1}{N}}] + n_1 k (C_{Ops-2}^R + N \times C_{Rec-Single}^R) + C_{Other}^R \times Y \quad (15) \end{aligned}$$

2.3 全寿命周期费用计算

设有效载荷的入轨速度为 7800 m/s, 费用参数参考美国 Kistler 航天公司设计的 K-1 可重复使用运载器^[9-11]。

$$I_{spv} = 4000 \text{ m/s}, \alpha = 0.07, \beta = 0.01, m = 1.3, n_1 = 3, k = 100, f_1 = 30, f_2 = 1.2$$

$$m^R = 2951 \text{ kg}, C_{Ve}^E = 386.1 \text{ \$ / kg}, C_{Rgf}^R = 39 \text{ \$ / kg}, C_{Ops-1}^R = 0.3 \text{ \$ / kg}, C_{Ops-2}^R = 5.78 \text{ M \$}$$

$C_{Rec-Single}^R$ 和 C_{Other}^R 没有数据可以参考, 这里分别取为 0.05 M \$ / time. stage 和 5 M \$ / Year, 设可重复使用运载器全寿命周期为 15 年, 使用寿命和航天飞机相当。基于建立的全寿命周期费用模型和给定的分析数据, 分别计算了从单级可重复使用运载器到 5 级可重复使用运载器的全寿命周期费用和有效载荷相对质量 (有效载荷/运载器起飞重量)。

2.4 结果分析

由计算得到的两级入轨可重复使用运载器的研制费用为 5.62 亿美元 (如图 1 所示)、单次发射费用为 370.3 万美元, 与 Kistler 航天公司公布的 K-1 可重复使用运载器所需研制费用为 4 亿美元、单级发射费用为 466 万美元基本相符^[11], 证明本模型的计算结果有一定的可信度 (单次发射费用均按每架发射 200 次计算)。

图 1 给出了可重复使用运载器的全寿命周期费用的各组成费用随级数变化关系。与单级入轨相比, 两级入轨可重复使用运载器的研制费用、维修费用和制造费用都大幅度地减少, 都是随着级数增加, 上述费用基本持平。回收费用随级数的增加呈比例增大, 这是因为假定回收费用与级数成正比关系。从图 2 可以看出, 在全寿命周期费用的组成中, 操作费用和回收费用占了很大比重。二级入轨可重复使用运载器这两部分费用占到了全寿命周期费用的 91.7%。所以发展先进的运行与维护技术对于发展可重复使用运载器至关重要, 也是真正降低可重复使用运载器运载费用的有效途径。

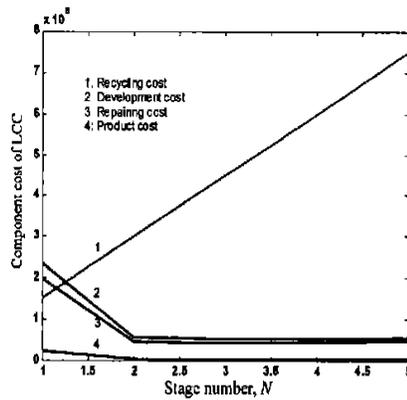


图 1 LCC 各组成费用随级数变化关系

Fig. 1 Component cost of LCC vs. stage number

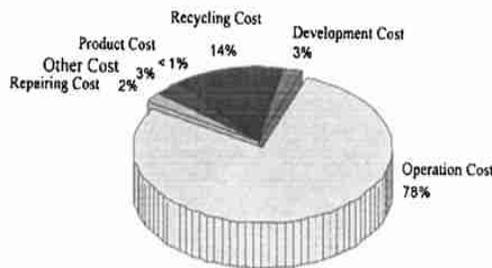


图 2 两级入轨可重复使用运载 LCC 组成部分

Fig. 2 Component cost of LCC for two-stage-to-orbit RLV

从图 3 可以看出,级数为 2 的可重复使用运载器全寿命周期费用最低,单级入轨的可重复使用运载器的全寿命周期费用比两级入轨高出了约 9.4%,这基本是合理的,因为以目前的技术水平,要实现可重复使用运载器单级入轨,在动力系统、热防护系统、运行维护等方面都还有大量关键技术有待突破,所以其研制费很高,是两级入轨可重复使用运载器的 3.17 倍。而以目前的航天技术水平实现两级入轨,则要容易得多,所需经费比单级入轨少得多。随着级数增加(级数大于 2 时),可重复使用运载器的全寿命周期费用基本成比例增加。因为运载器级数增加,则回收费用和重新装配等费用都会相应增长;另外运载器级数越多,系统所配备的控制系统和动力系统套数也越多,而这些部件都是运载器系统中耗资较高的部分,所以全寿命周期费用不可避免地上升了。

运载器有效载荷相对质量是反映运载器总体设计水平的重要指标,有效载荷相对质量越大,则表示将一定重量的有效载荷入轨需要的运载器起飞重量越小。运载器的研制费用、制造费用和维护费用等都直接与运载器起飞重量相关。从图 4 可以看出,可重复使用运载器的有效载荷相对质量随级数增加而增大。但从两级后,有效载荷相对质量随级数增加而增大幅度较小,三级以后,基本不变。两级入轨可重复使用运载器的有效载荷相对质量是单级入轨可重复使用运载器的 3 倍。主要因为单级入轨运载器在飞行的过程中,要将全部的结构重量的运载器干质量带入轨道,这部分“死重”大大降低了运载器运载有效载荷的能力,这也是到目前为止迟迟没有实现单级入轨的根本原因。三级入轨可重复使用运载器有效载荷相对质量比两级入轨可重复使用运载器仅高约 10%,但其全寿命周期费用要高 6.5%。

3 结论

(1) 根据全寿命周期费用思想,初步建立了可重复使用运载器的全寿命周期费用模型。研究结果表明本模型基本能够反映可重复使用运载器全寿命周期费用中各部分费用所占比重,可以用于可重复使用运载器全寿命周期费用的初步分析。

(2) 计算了不同级数可重复使用运载器方案的全寿命周期费用。计算结果表明基于目前的技术水

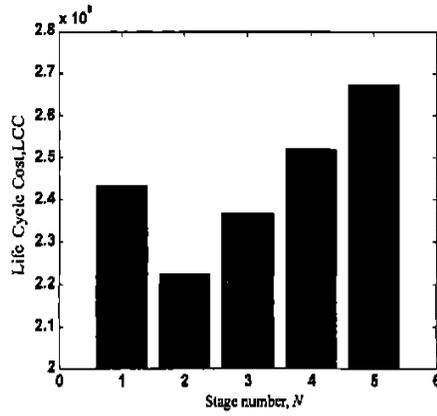


图3 可重复使用运载器全寿命周期费用与运载器级数关系

Fig.3 LCC of RLV vs. stage number

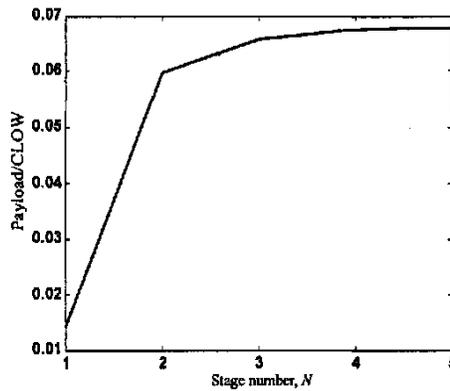


图4 可重复使用运载器有效载荷相对质量与运载器级数关系

Fig.4 Ratio of payload/ CLOW vs. stage number

平, 两级入轨型方案是一种较优的方案。

参考文献:

- [1] Fanciullo T. Cost Effective Propulsion for Commercial Launch Vehicles [C]. AIAA-2000-3804.
- [2] 徐哲等. 寿命周期费用评价法在航天工程项目管理中的应用 [R]. 863 航天技术通讯. 1996, 6 (26).
- [3] 贾春霖. 技术经济学 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.
- [4] Koelle D E. Economics of Fully Reusable Launch Systems (SSTO vs. TSTO Vehicles) [C]. IAA-96-IAA. 1. 1. 03.
- [5] Koelle D E. Launch Cost Assessment of Operational Winged Launch Vehicles [C]. AIAA-92-5021.
- [6] William B. Life-Cycle Cost Comparison of Reusable Launch Systems [C]. IAA-95-IAA. 1. 1. 02.
- [7] B. . 米申. 航天飞行器设计基础 [M]. 纪绍钧等译. 北京: 宇航出版社, 1989.
- [8] 甘楚雄, 刘翼湘. 弹道导弹与运载火箭总体设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [9] Limerick C D, Andrews J. An Overview of the K-1 Reusable Propulsion System [C]. AIAA-97-3120.
- [10] Kistler Aerospace Corporation. Reducing the Cost of Launching Satellites to Low Earth Orbit [R]. 1996.
- [11] 刘竹生. 多次重复使用运载火箭 [R]. 出国考察技术报告, 1998 年第 1 期.