

美国固体火箭发动机出厂 价格的分析与估算

黄 炜

(航空航天部四院47所)

摘 要

本文分析了美国发动机出厂价格与其技术性能、生产规模及采购环境等因素的相互关系,并通过对有关采购合同的数据所进行的统计回归,建立了具有良好估算精度并可供实用的估算模型,实现了在较高精度下对美国发动机出厂价格及采购合同的定量估算。还提出了产品成本-总量-性能之间存在着“成本=常量(总量)性能”的关系。

主题词: 成本分析、成本估算、固体火箭发动机、美国

一、美国发动机的采购及其出厂价格

美国固体火箭发动机的出厂价格(Fly-Away Cost)是生产厂家向客户交付产品的包括制造成本、广告、销售活动及产品利润在内的各项费用的总和。由于发动机的出厂价格通常发生在军方的采购活动中,因此对于军方来说,这也就是发动机的采购成本(对于导弹武器系统,其采购成本为导弹出厂价格与后勤费用及备件成本之和^[1])。与制造成本相比,出厂价格不仅受工厂内部经济活动的影响,而且因竞争及厂家的销售政策和军方采购政策的不同,出现较大的波动,因此其估算难度较大。在美国,军方对发动机产品的采购,经常使用固定价格合同,奖励比例为5~7%^[2];对一些成熟的发动机产品使用多年采购合同,采购成本减少8~9%^[3]。有时也将其综合起来,使用固定价格多年采购合同。所以在对美国发动机出厂价格进行估算时应当注意采购合同的类型以保证估算的精度。

二、美国发动机出厂价格的影响因素分析

1. 采购年份对出厂价格的影响

美国发动机采购年份对其出厂价格的影响主要表现在:一方面由于国内通货膨胀而使出厂价格逐年上涨;另一方面则由于生产制造技术的不断成熟,而使出厂价格不断下降。

为消除因通货膨胀所造成的影响,应使用《物价指数表》,对发动机出厂价格进行统一折

算。作者通过对有关文献及数据^[4-6]进行分析和处理,整理出了美国发动机1953年至1988年的物价指数(见表)。

美国固体火箭发动机物价指数表(δ 表)

年份	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962
指数	0.1920	0.1987	0.2095	0.2232	0.2329	0.2410	0.2504	0.2613	0.2732	0.2841
年份	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
指数	0.2976	0.3186	0.3198	0.3318	0.3484	0.3652	0.3865	0.4074	0.4272	0.4403
年份	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
指数	0.4649	0.5130	0.5577	0.5845	0.6219	0.6750	0.7359	0.8124	0.8853	0.9484
年份	1983	1984	1985	1986	1987	1988				
指数	0.9791	1.0000	(1.0434)	(1.1192)	(1.2279)	(1.3405)				

表中1984年的物价指数定为1, 1985年以后的指数为预测值。根据此表, 某一财政年度发动机的出厂价格除以该年的物价指数 δ , 即可以换算成1984年的价格。

在讨论采购年份对出厂价格的另一方面影响时, 我们引入采购年/初始生产年份差 Δy 的概念,

$$\Delta y = y_{\text{采购}} - y_{\text{初始生产}} + 1$$

同时假定出厂价格中制造成本所占的比例变化不大, 而且发动机产品的月产量 q 变化很小, 则发动机产品的平均出厂单价将同其平均单台制造成本一样, 在生产条件确定后将依照“学习曲线(Learnig Curve)”随产品累积生产数的增加而递减^[8, 9], 则有 $C_p = C_o Q^s$ 其中 C_p 为产品出厂价格, C_o 为产品首制件出厂价格, Q 为累积生产数, $Q = 12q\Delta y$ 。

选择一典型采购年/初始生产年份差 $\Delta y'$ (如二年或十年等), 则该典型年份差条件下的产品出厂价格为

$$C'_p = C_o (12q\Delta y')^s$$

由此得出采购年份对出厂价格的影响系数

$$\varphi = C_p / C'_p = (\Delta y / \Delta y')^s$$

不同发动机的生产条件及使用特点相差较大, 因此反映到出厂价格上, 其 $\Delta y'$ 及 s (或学习曲线渐进度 $\phi, \phi = 2^s$)均有所不同。例如, 导弹用发动机因其装备量大, 生产周期长, $\Delta y'$ 约为10年左右, ϕ 为0.8~0.85; 而各种航天用发动机则有采购量小, 技术要求高, 改型频繁等特点, 所以 $\Delta y'$ 约为2年, ϕ 则为0.9~0.95。

2. 发动机采购批量对其出厂价格的影响

为保持最大生产能力, 加速资金周转, 美国发动机生产厂家通常使用批量折扣的方法以降低出厂价格来诱使客户一次订购更多的产品。作者总结出批量折扣也可用公式表示

$$C_p = C_{p0} Q_p^{\beta}$$

式中 Q_p 为采购批量, C_{p0} 为 $Q_p = 1$ 时单台产品的出厂价格,

β 为折扣指数, $\beta = -(0.1569 + 0.02922 \lg I)$, I 为总冲*
这表明批量折扣的幅度随产品规模的增大而增加。

对于任何产品生产线来说, 生产规模与产品密切相关。对特定的发动机采购合同来说, 在一定合同期限内(一般约一年半), 其采购批量也变化不大。为方便起见, 这里引入“典型采购批量 Q'_p ”的概念, 它表示了一种发动机在通常情况下, 一笔合同所签订的(平均)采购批量。通过对10种发动机有关合同的统计, 得到典型采购批量为

$$Q'_p = 31.6228 \times 10^{0.02094(10 - \lg I)} 2.4694$$

采购批量对出厂价格的影响是

$$C_T = C_p (Q'_p / Q_p)^\beta$$

从而可将从采购合同中得到的数据折算到统一的 Q'_p 下进行分析和比较, 以减少因采购批量的不同而造成对出厂价格分析及估算精度的影响。

3. 发动机技术性能对出厂价格的影响

发动机产品出厂价格的分析和估算中, 常用其总量(如总重 W_t 、总冲 I)来做为主要的估算参数。如在美国, 发动机成本估算模型采用以下关系式(CER)

$$C = a W_t^b \quad (9, 10) \quad \text{或} \quad C = a I^b \quad (6, 11)$$

其中 W_t 为发动机总重(kg), $I = I_s \cdot W_p = I_s \mu W_t$ (I_s 为比冲, W_p 为推进剂重量, μ 为质量比)。所以总冲在一定程度上不仅体现了总重的大小, 而且还反映了工作性能(比冲 I_s 及质量 μ)的优劣。因此用 $C = a I^b$ 关系式更适于对发动机出厂价格的估算。如对潘兴Ⅰ发动机来说, 其比冲 I_s 每增加1%, 则其成本将增加20~40%。作者通过对发动机有关数据的统计, 总结出“成本 = 常量 · (总量)^{性能}”的成本估算关系式(CER)即

$$C = a W_t^b I_s^\mu \quad \text{或} \quad C = a I^b I_s^\mu$$

能更好地满足各类对技术性能要求苛刻的发动机有关成本及价格的估算, 并在对导弹用发动机及航天顶级发动机出厂价格估算中达到了较高的估算精度。

三、美国发动机出厂价格的估算

1. 发动机出厂单价CER的推算

作者从美国发动机有关采购合同^[12~15]中得到的出厂价格数据, 通过发动机出厂价格估算样本值

$$C_{ex} = \frac{C_p}{\phi} (Q'_p / Q_p)^\beta$$

统一折算到典型采购批量 Q'_p 及典型采购年份(1984年)下, 得到以1984年美元值计的出厂价格样本, 并使用最小二乘法对其进行统计回归, 推算出各类发动机出厂单价的估算公式, 进而建立了美国固体火箭发动机出厂价格的估算模型。

(1) 航天用固体助推器

$$C_{84} = 12.91517 I^{0.7013} \quad (1)$$

样本相关系数 $\gamma = 0.9996$, $\sigma = 3.49\%$

$$\phi = 1.086 (y_p - y_D + 1)^{-0.0987} \quad (2)$$

* 本文中总冲 I 的单位取kg·s, 比冲 I_s 的单位取s

其中 C_{84} 为以1984年美元值计的平均出厂单价估算值, y_D 为开始研制年份, y_p 为采购年份

(2) 航天顶级发动机

$$C_{84} = 653.2337 I_v^{0.001380} I_{sv} \mu \quad (3)$$

$$\gamma = 0.9176, \sigma = 15.43\%$$

$$\varphi = 1.1111(y_p - y_{Ip} + 1)^{-0.1520} \quad (4)$$

其中 I_v 为真空总冲, I_{sv} 为真空比冲, y_{Ip} 为初始生产年。

(3) 中小型导弹发动机 ($W_t \leq 500\text{kg}$)

$$C_{84} = 1157.50 W_t^{0.00256} I_{sv} \mu \quad (5)$$

$$\gamma = 0.9833, \sigma = 8.35\%$$

$$\varphi = 2.2431(y_p - y_{Ip} + 1)^{-0.3509} \quad (7)$$

(4) 大型导弹发动机 ($W_t > 500\text{kg}$)

$$C_{84} = 993.4807 W_t^{0.002598} I_{sv} \mu \quad (7)$$

$$\gamma = 0.9891, \sigma = 4.73\%$$

$$\varphi = 1.8308(y_p - y_{Ip} + 1)^{-0.2505} \quad (8)$$

对于凯夫拉壳体发动机

$$C_{k(84)} = 19(1 - \mu) C_{84} \quad (9)$$

2. 发动机出厂价格估算模型的算例

美国赫克里斯公司于1987年6月26日同海军空中系统司令部签订了价值23,224,679美元的固定价格合同(N00019-87-C-0009),用以制造3335台麻雀导弹用的MK-58固体火箭发动机及少量备件,并规定所有工作到1988年12月全部结束。MK-58发动机总重为93.5kg,比冲 $I_{sv} = 233\text{s}$,质量比 μ 为0.65,总冲 I 为14202kg·s,初始生产年是1980年。

(1) 根据发动机类型及参数求出 C_{84} 及估算误差限 E' :

$$C_{84} = 1157.50(93.5)^{0.002528 \times 233 \times 0.65} = 6568.70 \text{ 美元/台}$$

$$E' = \pm 2\sigma = \pm 16.70\%$$

(2) 求采购年份影响系数, $\varphi = 2.2431(1987 - 1980 + 1)^{-0.3509} = 1.0813$

(3) 查表得到采购年(1987年)所对应的物价指数, $\delta = 1.2279$

(4) 求典型采购批量

$$Q'_p = 31.6228 \cdot 10^{0.02094(10 - \lg 14202) \cdot 2.4694} = 1381.78 \approx 1382$$

(5) 求采购批量折扣指数, $\beta = -(0.1569 + 0.02922 \lg 14202) = -0.2782$

(6) 算出单台发动机平均出厂价估算值

$$\begin{aligned} \bar{C}_p &= \varphi \delta C_{84} (Q_p / Q'_p)^\beta = 1.0813 \times 1.2279 \times 6568.70 (3335 / 1382)^{-0.2782} \\ &= 6825.79 \pm 1139.90 \text{ 美元} \end{aligned}$$

(7) 采购合同总金额估算值为

$$C_{tot} = \bar{C}_p Q_p = 22,763,998 \pm 3,801,558 \text{ 美元}$$

由此可见,实际估算误差为-1.98%,此误差远小于估算误差限 E' 。

结 束 语

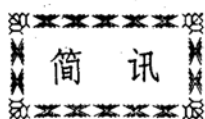
本文所介绍的成本估算模型适用于对美国制造的各类典型钢壳体-复合固体推进剂火箭

发动机出厂单价及采购合同（固定价格合同）总额的定量估量。对于有经验的估算人员或技术人员来说，根据具体情况对模型进行适当的修正，便可得到令人满意的估算结果，估算误差在 $\pm 20\%$ 以内。

这种成本估算方法，不仅适用于发动机，而且也适用于其它任何“有形产品”的成本估算。

参 考 文 献

- (1) Marx, Howard F., Comparative Cost of Military Aircraft, Fiction vs. Fact, AIAA 83-2565.
- (2) 许德云等：美军合同制概况，《现代兵器》，1987 No.4, 5.
- (3) Cost Saving from Multiyear Contracting, AD-A-153564, 1984.10.
- (4) Campbell, H.C., Aerospace Price Indexes, AD-718089, 1970.12.
- (5) Gille, Warren H Jr., Droop Support Inflation Program, AD-A-150839, 1984.12.
- (6) Thomas, Robert E., Practical Parametrics of Aerospace Pricing, AIAA-76-661.
- (7) Jordan, Raymond B., Learning Curve in Manufacturing Cost Estimates, Manufacturing Cost Estimating, SME 1980.
- (8) AD-A-161850, 1985.9.
- (9) Herschel Kanter et al, Cost Methodology for Aggregate U.S. and USSR Strategic Offensive Force Comparisons, AD-A-161808 1985.8.
- (10) AD-408987 1963.6.
- (11) McDonald, John A, et al, SAM-D Propulsion System, AD-A-017244, 1975.
- (12) Missiles and Rockets(include, Technology Week), 1960—1967.
- (13) DMS Aerospace Companise, 1981—1986.
- (14) Defense Industry Report, 1979—1987, 5.
- (15) World Aerospace/Defense Weekly, 1984—1987.



航天与导弹动力装置联合会议在山东泰安召开

由航天工业部科学技术委员会动力专业组、中国宇航学会固体推进专业委员会、液体推进专业委员会、中国航空学会动力分会和航天部动力装置情报网（三网）联合召开的“航天与导弹动力装置联合会议”，于1988年10月10日～15日在山东省泰安市举行。出席代表174人，会议共收到论文238篇，在会上宣读交流164篇，内容涉及航天飞机、战略、战术导弹用各种动力装置，最后评选出优秀论文21篇。这次会议对今后航天与导弹动力装置技术的发展将起到重要促进作用。参加会议的代表一致认为这种联合召开的会议效果好、效率高，值得提倡。

（刘克珩）

with the theoretically calculated results very well.

Keywords: Rocket engine case, Glass fiber reinforced plastic, Strength computation, Strain, Solid rocket engine.

A NEW METHOD FOR THE THERMODYNAMIC CALCULATION OF COMBUSTION CHAMBERS

Zhu Tianyu (Aeronautic Repair Research Institute of AF)

Chen Fugun (North-Western Polytechnical University)

Abstract

For the thermodynamic calculation of the gas turbine combustion chamber there are two methods to be selected, "Non-Iterative Precise Method" (NIPM) "Isothermal Enthalpy Difference Method" (IEDM). According to the principle of NIPM, a general solution of the energy equilibrium equation for main combustion chamber, the reheat combustor and the exhaust fired burners in the gas turbine and steam turbine combined cycle, using gaseous or liquid fuel is developed in this paper. With both methods analysed and compared, the internal relation between them are also discussed. It is shown that IEDM is the linear approximation of NIPM, and the fuel-air ratio calculated by the former is slightly less than that by the latter, but their relative difference won't exceed 0.5 percent. The general solution provided in this paper can be also conveniently applied to the thermodynamic calculation of all kinds of engine combustion chamber using gaseous or liquid fuel in aerospace.

Keywords: Gas turbine engine, Combustion chamber, Thermodynamics, Calculation method.

THE ESTIMATION ON THE U.S. SOLID ROCKET MOTOR'S FLY-AWAY COST

Huang Wei

(Information Research Department, Northwest
Chemical Power Co.)

Abstract

Under the thought to simulate the practical purchase processes and policies as realizably as possible, the relations among the US SRM's fly-away cost and the