

战术导弹火箭发动机经济性分析

陈德恩 杨建军

(空军导弹学院)

摘要: 本文以某型地空导弹为例,从寿命期费用的角度,对战术导弹采用液体火箭发动机(LRE)和固体火箭发动机(SRE)时的经济性进行了定性的和部分定量的分析,并对战术导弹动力装置的更新进行了讨论。

主题词: 战术导弹, 火箭发动机, 寿命周期, 成本, 经济分析

一、引言

以往在评价导弹动力装置的质量时,往往只着眼于它的技术性能指标,而对经济性指标缺乏足够的重视,尤其忽视购置以后在使用维修过程中即服役期中所需的费用。另外在维修过程中,也往往只重视可靠度水平的维持,而忽视它的最佳使用期限。本文试图对战术导弹采用液体火箭发动机(LRE)和固体火箭发动机(SRE)的经济性问题进行一些分析。

二、寿命期费用

一台发动机的寿命期费用,是指使用单位在整个寿命周期内所花的总费用。若对一新研制产品,它应是研制费用、生产制造费用和使用维修费用的总和。现将前两项合并一起称为军方购置费,后一项称为维持费。但鉴于战术导弹是一次使用的武器,火箭发动机工作时其寿命即结束,所以它的“使用维修”费用,实质上是指它的值勤、使用场所的数目与地理分布、运输、贮存、维修、管理等费用。因此,使用维修费用是指发动机出厂后,从服役开始至服役结束时的总费用。所以应确切地把寿命期费用理解为“服役期费用”。

三、发动机购置费

军方采购发动机所用的购置费如为 C_A ,则它与发动机的出厂价格 C_F 之间存在如下关系:

本文1989年10月24日收到。

$$C_A = (1 + \lambda)C_F$$

式中 λ 为加价系数。在国内市场上采购国产发动机时,通常 $\lambda \approx 0$;在国际市场上采购国外发动机时, λ 受到军品技术的转让,两国间关系的疏密程度及军火商的中间经营等因素的影响。买卖双方将依据各自在经济上、军事上、政治上的需要,共同商定一个双方都能接受的加价系数。如取 $\lambda = 0.5$ 的优惠加价系数,或取 $\lambda = 4$ 不等。

发动机的出厂价格 C_F ,虽然受到厂内经济活动、厂家的销售政策和军方采购政策的影响而出现一些波动,有些甚至出现较大的波动。但是,决定出厂价格的主要因素仍然是发动机的技术性能、购置批量和采购年份(包括当时的物价指数)。专家们在分析了美国固体火箭发动机出厂价格与上述因素的相互关系后,总结出若干有实用价值的估算公式^[1]。例如,在分析发动机比冲、质量比等技术指标对出厂价格的影响时,提出了成本=常数·(总量)性能的成本估算关系式,即:

$$C_F = aW_t^{bI_s\mu}$$

或

$$C_F = aI^{bI_s\mu}$$

式中 W_t ——发动机总重(kg)

I_s ——比冲(N·s/kg)

$\mu = W_p/W_t$ ——质量比

I ——总冲(N·s)

W_p ——推进剂总重(kg)

a, b ——常数

对潘兴Ⅱ发动机来说,比冲 I_s 每增加1%, C_F 将增加20~40%。因此,军方在采购发动机时,既要注重性能指标的先进性,又不得不顾及购置费的经济性。

当地空导弹采用LRE为动力装置时,其购置费一般应包括:

- 1) 推力室、贮箱和推进剂输送系统的费用;
- 2) 推进剂费用;
- 3) 用于加注推进剂的设备和车辆的费用(与以SRE为导弹动力装置的购置费相比较),该项费用由服役期内所加注过的导弹数(或枚次)分摊。

例如,某型导弹主航用的LRE,总冲为1157kN·s,其中1)项的费用约占全弹的30%左右;而该弹用固体助推器,总冲 $I \geq 980$ kN·s,购置费仅占全弹的6~7%。这是因为SRE没有专用贮箱(由推力室兼任)和推进剂输送系统。至于为LRE系统服务的成套加注设备和车辆,如氧化剂加注车、氧化剂槽罐车、燃烧剂加注车、燃烧剂运输车、中和冲洗车以及烘干设备等的购置费,更是相当于单台LRE1)项费用的20倍,或相当于购买6发导弹的总费用。

从上述粗略对比可见,在主要性能参数,总冲大体相当条件下,战术导弹采用SRE,成本低,经济性好。

四、发动机维持费

维持费 C_s 是整个服役期内各种与使用维修有关的人员费用、以及物质器材、动力、设施等费用的总和。使用部门一旦决定购买某型号发动机,就意味着它将承担今后整个服役期内的费用,直至退役。有时,它比购置费还要大。因此,使用部门在采购之前必须用寿命期费用的观点,权衡维持费与购置费在寿命期费用中所占的比例,即平衡分析。例如,1976年美国国防部曾对战斧巡航导弹陆射型(GLCM)与战区作战的快速反应飞机F-16战斗机相比

较,认为在执行单一的战斗任务条件下,GLCM的10年寿命期费用约为F-16费用的13.7%——分别为230万美元和1690万美元(按1977年美元值计算)。GLCM的10年费用相当低,是因为人力和维修费用低。每枚GLCM的维修费仅为75万美元,而每套F-16的维修费高达683万美元^[2]。相比之下,巡航导弹是一种便宜的武器。

当前,导弹的大量积存和超期,是各国军方普遍关注的一大问题。他们都积极寻求延长服役期限的办法。如美国早期的“民兵”推进系统,设计寿命为3年,实际服役寿命超过14年;瑞士“RBS-70”的实际寿命达到15年。又如我国某型导弹,实际担任战备的设计寿命为2年,现已延长使用至15年,其中LRE系统的服役寿命为17年,SRE的服役寿命为20年。

然而,服役寿命愈长,维持费愈高。以某型导弹LRE的使用维修情况为例,LRE使用的氧化剂是硝酸和四氧化二氮的混合物,毒性大,腐蚀性强。导弹库存期间不加注。但担任战备时,氧化剂需事先加注到导弹贮箱内。这样长时间与氧化剂接触的一些另件、组合件、管路、活门等会受到严重的腐蚀。从进厂修理的近千发导弹的故障分布看,其自然失效占导弹动力装置总故障的56%。氧化剂箱内的吸液器,由于受腐蚀,生成的结晶物堵塞吸液器的活动间隙,造成旋转不灵甚至卡死,达不到高、低温及常温下气密性和灵活性的基本要求,必须每两年更换一次。燃烧剂箱内的吸液器,每4~6年更换一次。膜行组合件、波纹管接头等须适时更换。贮箱须在9年之内送导弹修理厂进行强度试验和气密性检验。

而SRE在长期战备中,壳体与包装箱接触部位因潮湿而锈蚀。固体推进剂药柱在贮存期出现老化现象,从而导致失效。然而自由装填或药柱可以在服役寿命到期之前更换。可见SRE的使用和维修比LRE简便得多。

发动机在服役期内逐渐陈旧,可靠度 R 逐渐下降。通过维修和更换另件、组合件,使可靠度得到部分的恢复,维持在所要求的水平 R_0 ($R \geq R_0$),以达到完成任务的目的。服役期内可靠度 R 的变化曲线呈锯齿状,如图1所示。

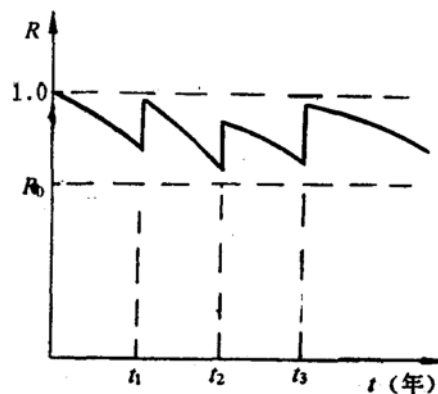


图1 可靠度随时间变化关系

可见发动机在服役期中,一方面要保持正常的可靠度要求,又受到费用的制约。只有通过必要的维修,才能保证合格的可靠度要求。但通过维修后的可靠度的维持,又是建立在维持费逐年增加的基础上。

图2中曲线1表示:到第 n 年止,购置费与各年维修费(折算到第1年年初的价格)的总和。

维持费的准确计算是相当复杂和困难的,它包括人员、工时、器材、设备、运输、物价指数等一系列因素。其中运输费用还随部队驻地与修理厂的距离和运输方式的不同而异。而LRE的加注设备和车辆的维持费以及加注人员的开支等,应分摊到LRE系统上。总之,较准确的估算必须在建立有效的费用核算和大量的数据统计基础上。

五、发动机的更新

假定一台发动机的购置费为 C_1 ,连续使用中各年的维持费为 C_i ,每年的年初付出,年

利率均为 r 。令

$$x = \frac{1}{(1+r)}$$

$$\overline{C}_n = \frac{C_A + \sum_{i=1}^n C_i x^{i-1}}{\sum_{i=1}^n x^{i-1}}$$

$$\overline{C}_{n-1} = \frac{C_A + \sum_{i=1}^{n-1} C_i x^{i-1}}{\sum_{i=1}^{n-1} x^{i-1}}$$

式中 x ——费用折算因子

$\overline{C}_n$ ——到 n 年为止各年费用的加权平均值,

$\overline{C}_{n-1}$ ——到 $(n-1)$ 年为止各年费用的加权平均值。

根据设备更新理论, 当 $C_{n+1} > \overline{C}_n$, $C_n < \overline{C}_{n-1}$ 时, 第 n 年为最佳更新时间(时段)。在相同设备反复更新的总时间内, 如果更新周期过长, 虽然购置费减少, 但维持费却要增加, 从而使总的费用加大; 更新周期过短, 维持费虽可减少, 但更新次数增加, 使购置费用增加, 同样使总的费用加大。

例如, 某战术导弹的LRE系统的购置费 $A_A = 10$ 万元, 若各年的维持费 C_i (万元) 依次为0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.3, 1.6, 2.0, 2.4, 3.0, 3.7, ……(万元), 年利率均为11.9%。经计算知, 第7、8年为止, 各年费用的加权平均数分别是 $\overline{C}_7 = 2.957$ 万元和 $\overline{C}_8 = 2.912$ 万元。与各年的维持费 C_i 相比较可知: $C_9 > \overline{C}_8$, $C_8 < \overline{C}_7$ 。因此, 第8年为最佳更新时段。

如果准备用新型号替代旧型号发动机, 从某种意义上讲, 即准备用新型号战术导弹替代旧型号战术导弹, 应该在旧型号发动机用过一个时期(m 年)后才淘汰更新。当 $D_{m+1} > \overline{C}_n$, $D_m < \overline{C}_{n-1}$ 时, 第 m 年为旧型号发动机淘汰改用新型号发动机的最优时间。 D_{m+1} 为旧型号发动机第 $(m+1)$ 年所需的维持费, $\overline{C}_n$ 为新型号发动机在未来 n 年内各年费用的加权平均值。

以上讨论仅考虑了经济费用, 尚未考虑导弹性能和军事需要等, 在实际工作中应进行综合考虑。

六、结 论

1. 固体火箭发动机(SRE)作为战术导弹动力装置时, 具有使用简便和寿命期费用较低的特点, 比液体火箭发动机(LRE)具有明显的优势。

2. 动力装置的维修使用和更新, 应从作战需要、经济性、使用性和国防费用等因素综合考虑。发动机型号的更新, 实质上可以认为是导弹型号的更新, 其研制和生产费用耗资甚巨, 和平时期是技术贮备时期, 研制多, 生产少, 新型号的购置费必然十分昂贵。所以, 现存旧型号导弹虽面临着淘汰更新的问题, 但从经济角度考虑, 又应继续使用一个相当长的时期。

(下转封三)

on relative thrust uncertainty and 0.01% on three year stability.

The comprehensive design idea combining electric and mechanic parts, the development and the application of AD-1 precision data amplifier and simulating signal generator, and the programing method including man-machine communication are also discussed in this paper, which will be used to develop the stable, reliable and high precision test system.

Keywords: Solid rocket engine, Thrust measurement, Measuring technique, Development

(上接第41页)

3. 发动机维持费用的估算,既需要做大量的数据统计又需按工程管理中的经济分析方法进行比较,它与发动机性能以及环境条件的数学关系,还有待进一步去探讨。

参 考 资 料

- (1) 黄炜:美国固体火箭发动机出厂价格的分析与估算,《推进技术》,1989, No. 1。
- (2) 巡航导弹成本,曹运红译自《Survival》。
- (3) 地空导弹维修工程基础,空军司令部高炮部,1988,8出版。