

电动气活门的可靠性设计*

郭凤英 何洪庆

黄应坤 周炽九

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072) (北京丰源机械研究所, 北京, 100076)

摘 要: 将传统设计与可靠性理论相结合的可靠性设计方法, 应用于液体火箭发动机电动气活门设计中, 证明了这种思路的可行性与合理性, 对部件设计的可靠度保证大有裨益。

主题词: 液体推进剂火箭发动机, 电动气活门, 可靠性设计

分类号: V434.2

THE RELIABILITY DESIGN OF ELECTRO-PNEUMATIC VALVE

Guo Fengying He Hongqing

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Huang Yingkun Zhou Chijiu

(Beijing Fengyuan Machinery Inst., Beijing, 100076)

Abstract: A new idea of reliability design is presented in this paper. The reliability theory is used to command traditional engineering design of performance and structure of components that is the traditional engineering design is combined with reliability design. The feasibility and reasonableness can be illustrated by the application of the new idea to a small component the electro-pneumatic valve in liquid rocket engine system. The reliability of component design is improved greatly. The new idea can also be used in other engineering design.

Subject terms: Liquid propellant rocket engine, Electro-pneumatic valve, Reliability design

1 引 言

液体火箭发动机工作过程中对推进剂的及时输送、切断或调节, 均要通过电动气活门进行。电动气活门工作的可靠性影响发动机的性能。本文选择电动气活门为对象, 探求传统设计与可靠性理论相结合的可靠性设计的思路, 以保证部件的可靠度。

2 电动气活门的可靠性设计

电动气活门的可靠性设计按流程图1进行, 其原理示意图见图2, 主要零件是线圈、电磁铁、阀门(活门)、弹簧和壳体。

2.1 电动气活门的总可靠度

根据故障统计和分析, 壳体、弹簧和线圈不发生故障, 要进行可靠性设计的主要功能块

* 收稿日期: 19960926, 修回日期: 19961111

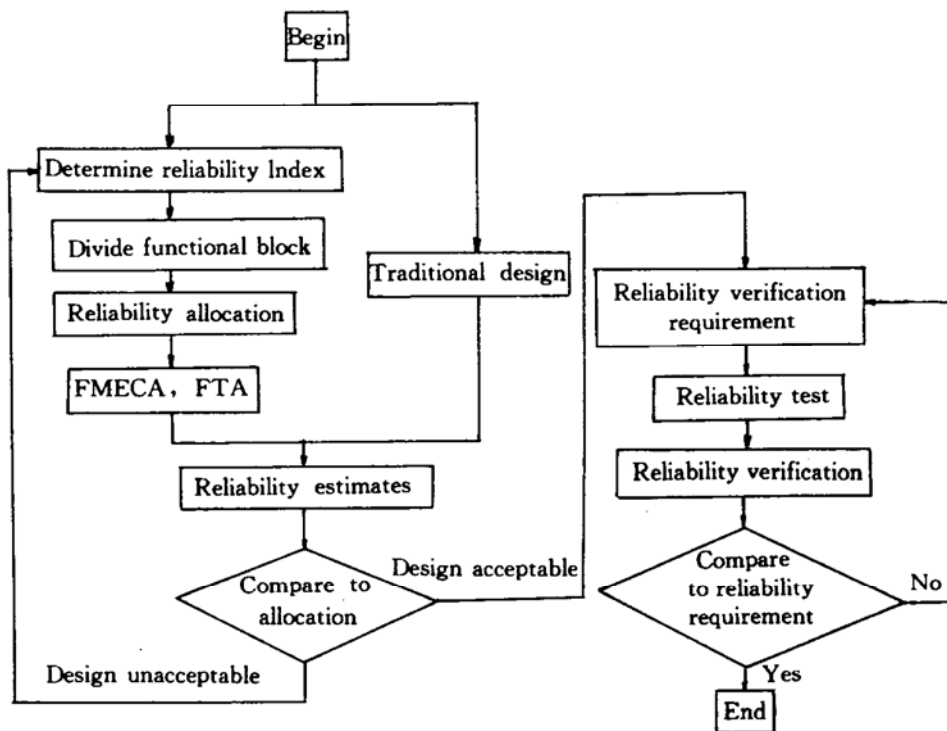


Fig. 1 Reliability design flow

是电磁铁的吸力,在电磁铁的工作过程中,要产生温升,温升后吸力会降低,因此对温升应有限制。密封故障应考虑密封比压设计和随机的屑物对阀门密封性的影响。这样,电气活门的总可靠度 R 为

$$R = R_{\text{吸力}} \cdot R_{\text{温升}} \cdot R_{\text{比压}} \cdot R_{\text{随机}}$$

在电气活门总可靠度为0.9999时,分别分配为0.99999, 0.99999, 0.99997, 0.99996。

2.2 电气活门可靠性设计与传统设计相结合

传统设计中,电磁铁的计算很复杂。初算时,需确定导磁体的尺寸,线圈的磁势,线圈的尺寸和导线的线径;复算时,需校核线圈的层数、匝数,进行磁路计算等;最后还要验算温升,用麦克斯威尔公式和能量关系分别验算吸力等。密封设计主要是根据作用在阀门上的力、阀门尺寸、材料等确定密封比压。在此仅以一个重要的吸力公式为例,阐述如何通过与传统设计公式相结合的可靠性设计,来确定实心衔铁的半径 r 。

设电磁铁的吸力服从正态分布,则吸力的可靠度为:

$$R_{\text{吸力}} = P(F \geq F_1) = \Phi(\mu_F - F_1)/\sigma_F \quad (1)$$

其中 F_1 为限定的最小吸力值,而吸力的计算式为:

$$F = (\pi r^2 B_s^2 / 2\mu_0) \times 10^{-4} \quad (2)$$

其中: B_s 为工作气隙的磁通密度; r 为实心衔铁半径; μ_0 为真空磁导率,值为 $1.25 \times 10^{-6} \text{H/m}$ 。

吸力的均值和标准差分别为:

$$\mu_F = (\pi r^2 \bar{B}_s^2 / 2\mu_0) \times 10^{-4} \quad (3) \quad \sigma_F = [(\partial \bar{F} / \partial r)^2 \sigma_r^2 + (\partial \bar{F} / \partial B_s)^2 \sigma_{B_s}^2]^{1/2} \quad (4)$$

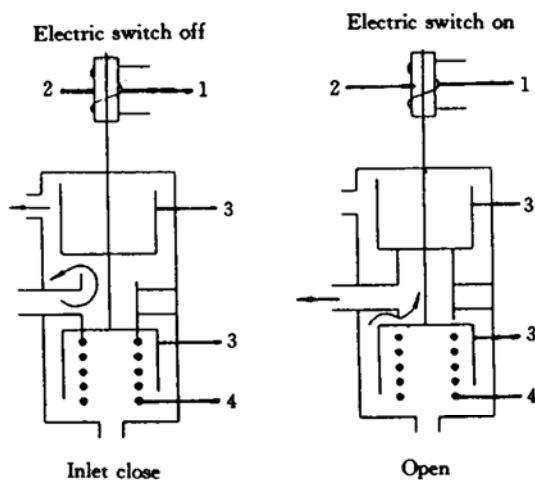


Fig. 2 Electro-pneumatic valve

1. Coil 2. Armature 3. Valve 4. Spring

其中: $\partial \bar{F} / \partial \bar{r} = (\pi \bar{r} \bar{B}_s^2 / \mu_0) \times 10^{-4}$; $\partial \bar{F} / \partial \bar{B}_s = (\pi \bar{r}^2 \bar{B}_s / \mu_0) \times 10^{-4}$ 。

由正态分布的特性, 标准差为1/3尺寸公差, 如取公差为 $0.015\bar{r}$, 则衔铁半径 r 的标准差为: $\sigma_r = 0.005\bar{r}$, 将式 (3)、(4) 代入联结方程:

$$z = (\mu_F - F_1) / \sigma_F \quad (5)$$

根据分配给吸力的可靠度 $R_{\text{吸力}}$, 查标准正态分布表得 z , 便可确定实心衔铁半径 r 。

设 $R_{\text{吸力}} = 0.99999$ (即 $z = 4.265$), $F_1 = 21.36\text{N}$, $B_s = (1.1, 0.0015)\text{T}$, 通过计算得 $r = 0.38\text{cm}$ 。

可见实心衔铁的半径 r 不是单纯由传统设计公式确定, 而是根据电磁铁吸力的正态分布特性, 通过可靠性理论和分配给吸力的可靠度, 与传统设计公式相结合而确定的。在这种可靠性设计中, 同时引入了诸如可靠性分配、故障分析、可靠性试验和可靠性评定等一系列可靠性方法, 因此所设计的部件将使可靠度得到保证。

2.3 电动气活门的可靠性预估

仍以电磁铁吸力为例。 $R_{\text{吸力}}$ 可按公式 (1) 预估。当 $F_1 = 21.36$, $B_s = (1.1, 0.0015)\text{T}$, $r = (0.38, 0.0019)\text{cm}$ 时, 由式 (3)、(4) 得 $\mu_F = 22.3511$, $\delta_F = 0.2317$, 因此 $z = 4.28$ 。查标准正态分布表, 得 $R_{\text{吸力}} = 0.99999$, 与分配给吸力的可靠度一致, 因此认为设计合格, 按图 1, 进入“可靠性验证要求、试验、评定”步。

2.4 电动气活门的可靠性验证要求、试验和评定

可靠性验证要求是根据部件的可靠性设计对可靠性试验提出要求, 获得可靠性试验的数据就可进行可靠性验证或评定。

设电动气活门寿命 (开闭次数) 服从威布尔分布, 相应的失效密度函数和可靠性函数分别为:

$$f(N, m, \eta) = \frac{m}{\eta^m} N^{m-1} e^{-(N/\eta)^m}; \quad R(N, m, \eta) = e^{-(N/\eta)^m}.$$

其中: N 为电动气活门的开闭次数; m 为形状参数; η 为尺度参数。

假设电动气活门寿命试验共进行 n 次, 获得 n 组数据, 每组试验的开闭次数为 $N_1, N_2, \dots, N_n$, r 为试验出现失效的次数。用极大似然估计法 (MLE) 可求得如下方程:

$$\frac{1}{m} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i^m \ln N_i}{\sum_{i=1}^n N_i^m} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln N_i \quad (6) \quad \eta = \left(\frac{\sum_{i=1}^n N_i^m}{r} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

当无失效时, 令 $r=1$, 这是一种比较保守的处理方法, 即认为存在有第一次失效即将发生的可能性。通过迭代法解上述方程可求得 m 和 η 以及估计值 $\hat{m}$ 和 $\hat{\eta}$ 。

给定置信度 α , 按下列公式, 近似求得 m 、 η 的置信下限:

$$\hat{m}_L = \hat{m} \exp\left(\frac{-0.78u_\alpha}{\sqrt{n}}\right) \quad (8) \quad \hat{\eta}_L = \hat{\eta} \exp\left(\frac{1.05u_\alpha}{\hat{m} \sqrt{n}}\right) \quad (9)$$

其中: u_α 为标准正态分布分位数。

给定置信度 α , 对给定的时间 t_0 , 可靠度下限 $\hat{R}_L(t_0)$ 由以下公式求出:

$$\hat{u} = [\ln(t_0) - \ln(\hat{\eta})] \cdot \hat{m} \quad (10) \quad \text{Var}(\hat{u}) = (1.168 + 1.1\hat{u}^2 - 0.1913\hat{u})/n \quad (11)$$

$$u' = \hat{u} + u_a \sqrt{\text{Var}(u)} \quad (12) \quad \hat{R}_L(t_0) = \exp[-\exp(u')] \quad (13)$$

电动气活门的15组寿命试验值(开闭次数)如表1,其中都无失效。给定置信度 α 为0.6,则可由式(6)~(13)得到开闭次数为100次时的可靠度置信下限: $\hat{R}_L(100)=0.9999$,该可靠度值符合电动气活门总可靠度的要求。

Table 1 Test life of electro-pneumatic valve

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Life-span	190	230	190	150	150	200	190	200	150	150	190	150	150	200	180

3 结束语

本文建立了电动气活门传统工程设计和可靠性理论相结合的可靠性设计方法,并采用 Borland C++3.1 编制了程序,设计了汉字菜单式操作命令,为用户提供了良好的界面。算例表明,以可靠性要求来进行设计,可使部件更为合理。这种可靠性设计方法的思路,可推广应用于火箭发动机及其各部件,以及其它产品。

参 考 文 献

- 1 孙国庆. 航天发射暴露的发动机故障. 导弹与航天运载技术, 1995(1)
- 2 Hara K J O. Rocket engine propulsion system reliability. AIAA 92-3421
- 3 刘国球. 液体火箭发动机原理. 北京: 宇航出版社, 1993

(上接第81页)

参 考 文 献

- 1 Wang Xingfu, etc. Influence of gas-injector geometry on atomization performance of aerated-liquid nozzles. International Journal of Turbo and Jet Engine, 1989, 6: 271~279
- 2 Rossler T C, Lefebvre A H. Studies on aerated-liquid atomization. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1989, 6(3~4)
- 3 Chen S K, etc. Influence of ambient air pressure on effervescent atomization. AIAA 1992, 4
- 4 Lefebvre A H, etc. Spray characteristics of aerated-liquid pressure atomizers. AIAA 87-0063
- 5 Chin J S, Lefebvre A H. A design procedure for effervescent atomizers. ASME 1995, 117(4)
- 6 Whitlow J D, etc. Experimental studies on effervescent atomizers with wide spray angles. AGARD meeting, 1993, 5
- 7 范全林. 气泡雾化喷嘴的特性研究. 航空动力学报, 1996(4)
- 8 范全林. 新型重油催化裂化进料喷嘴的研究: [学位论文]. 北京航空航天大学研究生院, 1996