基于系统可靠度的发动机组方案优化选择方法

黄 敏 杨 军 赵 宇 唐素萍

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100191) (上海齐耀动力技术有限公司, 上海 201203)

摘 要: 某大型系统的动力装置由三台发动机构成,动力装置的设计方案有2种:两台以额定功率运行一台贮备,一台故障后切换贮备发动机的冷储备方案和三台同时降功率工作,一台故障后另两台以额定功率运行的降功率方案.假设每台发动机寿命服从威布尔分布的情况下,对这两种方案分别建立了可靠性模型,并依据额定功率和降功率下的发动机的寿命分布,分别给出在这两种设计方案下的动力装置的可靠度随时间变化的曲线.然后,根据这两种不同方案下可靠度随时间变化的曲线,选择此动力装置的发动机组的最佳优化方案.最后,给出实例说明此方法的可行性.

关 键 词: 可靠度模型; 冷贮备; 降功率; 可靠度曲线

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)11-1287-03

Optimization method of schemes of engine groups based on system reliability

Huang Min Yang Jun Zhao Yu

(Dept of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Tang Suping

(Shanghai Micro Powers Ltd, Shanghai 201203, China)

Abstract: The power equipment of a large system consists of three engines, which has two kinds of design scheme: cold standby and down-rating. The cold standby design scheme is that two engines run in power rating and the left one is reserved; after one failure, the cold reserved engine is switched. Yet the down-rating design scheme is that three engines work at the same time; once one fails, the other two run in power rating. On condition that each engine's life distribution follows the different Weibull distributions, the reliability models were established for these two design schemes. Based on the life distributions of engines in power rating situation and down rating situation, the time-varying reliability curves of these two design schemes were given. Then according to the comparison with the two design scheme's reliability curves with time varying, the better design scheme was chosen. At the end, the example shows that the method is reasonable.

Key words: reliability model; cold standby; derating; reliability curve

某大型系统的动力装置由三台发动机组成,要求动力装置的输出功率120 kW,每台发动机的额定输出功率为60 kW,根据试验和分析,如果发动机降功率使用,可提高其可靠性.

进行动力装置的方案设计,主要考虑的因素是动力装置的任务可靠度达到最佳[1].现有两种方案可供选择:一种是用两台发动机串联,以额定功率(60 kW)同时工作,另一台非工作贮备,任务过程中,工作的发动机如有一台故障,则贮备发动机起动,以额定功率工作,该方案简称冷贮备方案[2-3];另一种方案是三台发动机串联以降功率(40 kW)同时工作,任务过程中,如有一台发动机

收稿日期: 2008-10-17

作者简介: 黄 敏(1968-),女,湖南邵阳人,副教授, hm@buaa.edu.cn

故障, 则其他两台发动机升至额定功率 (60 kW) 工作, 该方案简称降功率方案. 这里, 发动机在任务过程中不可维修.

本文根据经验和统计分析表明, 发动机寿命服从威布尔分布, 假定发动机在额定功率和降功率下工作, 其寿命分别服从威布尔分布 $W(m, \eta)$ 和 $W(m^*, \eta^*)$[4], 在前述的两种方案下建立可靠度模型并计算可靠度, 然后通过可靠度曲线的比较进行方案选择, 最后给出一个模拟实例.

1 冷贮备方案下可靠度模型

在冷贮备方案中, 记冷贮备发动机为 3号, 开始工作的发动机为 1, 2号发动机, 它们组成分系统 A, 并且令 2号为首先失效的发动机. 分系统 A 的工作寿命记为 T_1, 其失效率记为 $\lambda_A(t)$, 失效密度函数记为 $f_A(t)$. 在 2号发动机失效时, 用 3号发动机更换, 这样 3号和工作了 T_1 时间的 1号发动机构成分系统 B, 记系统 B 的工作寿命记为 T_2, 其失效率记为 $\lambda_B(t|T_1)$, 失效密度函数记为 $f_B(t|T_1)$. 整个系统失效指 A, B 分系统相继失效, 整个系统的寿命 $T = T_1 + T_2$, 注意 T_2 依赖于 T_1, 见图 1. 于是, 整个系统在 t时刻的可靠度为

$$R(t) = 1 - \int_0^t f_A(t_1) \int_{t-t_1}^{t} f_B(t_2 \mid t_1)\,\mathrm{d}t_2\,\mathrm{d}t_1 \quad (1)$$

下面的任务是计算 $f_A(t)$和 $f_B(t|T_1)$. 为此分析分系统的失效率. 分系统 A 的失效率 $\lambda_A(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) = (2m/\eta)(t/\eta)^{m-1}(t \geqslant 0)$相应的寿命密度函数为

$$f_A(t) = \frac{2m}{\eta^m} t^{m-1} \exp\left\{-\frac{2}{\eta^m} t^m\right\} \quad (2)$$

在 $T_1 = t_1$ 的条件下, 分系统 B 的失效率:

$$\lambda_B(t \mid T_1 = t_1) = (m/\eta)[((t + t_1)/\eta)^{m-1} + (t/\eta)^{m-1}]$$

因此, 在 $T_1 = t_1$ 的条件下, 分系统 B 的寿命密度函数为

$$f_B(t \mid T_1 = t_1) = (m/\eta^m)[(t + t_1)^{m-1} + t^{m-1}] \times \exp\left\{-\int_0^t (m/\eta^m)[(x + t_1)^{m-1} + x^{m-1}]\,\mathrm{d}x\right\} \quad (3)$$

将式 (2)、式 (3)代入式 (1), 就可以计算整个系统在 t时刻的可靠度:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f_A(t_1) \int_{t-t_1}^{t} f_B(t_2 \mid t_1)\,\mathrm{d}t_2\,\mathrm{d}t_1 = 1 - \int_0^t f_A(t_1) \int_{t-t_1}^{t} \varphi(t_2) \times \exp\left\{-\int_0^t \varphi(x)\,\mathrm{d}x\right\} \mathrm{d}t_2\,\mathrm{d}t_1$$

其中

$$f_A(t) = 2m\eta^{-m} t_1^{m-1} \exp\{-2t_1^m \eta^{-m}\}$$

$$\varphi(x) = m\eta^{-m} \times [(x + t_1)^{m-1} + x^{m-1}]$$

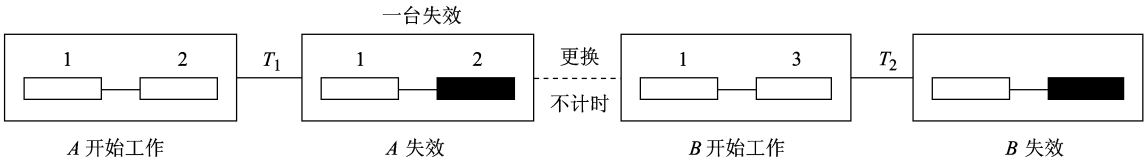

图 1 冷贮备方案发动机组工作的过程图

2 降功率方案下可靠度模型

在降功率使用方案中, 记降功率 (40 kW)使用中最先失效的发动机为 3号, 然后升功率 (60 kW)使用后首先失效的发动机为 2号, 余下的一个记为 1号. 三台降功率使用构成分系统 C, 分系统 C 的工作寿命记为 T_3, 其失效率记为 $\lambda_C(t)$, 失效密度函数记为 $f_C(t)$; 而 3号发动机失效后, 升功率额定使用的两台构成分系统 D, 分系统 D 的工作寿命记为 T_4, 其失效率记为 $\lambda_D(t|T_3)$, 失效密度函数记为 $f_D(t|T_3)$. 整个系统失效指 C, D 分系统相继失效, 整个系统的寿命 $T^* = T_3 + T_4$, 注意 T_4 依赖于 T_3, 见图 2

于是, 整个系统在 t时刻的可靠度为

$$R^*(t) = P(T^* > t) = 1 - \int_0^t f_C(t_3) \int_{t-t_3}^{t} f_D(t_4 \mid t_3)\,\mathrm{d}t_4\,\mathrm{d}t_3 \quad (4)$$

下面的任务是计算 $f_C(t)$和 $f_D(t)$. 为此分析

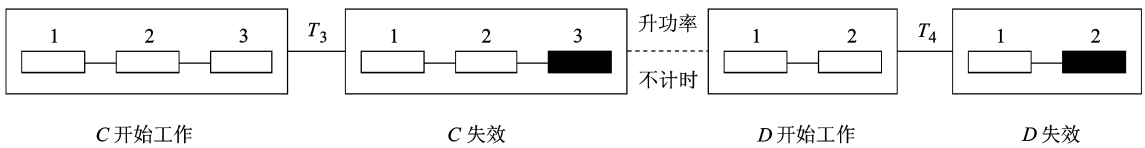

图 2 降功率方案发动机组工作的过程图

分系统的失效率,分系统 C 的失效率:

$$\lambda_4(t) = (3m^*/\eta^*)(t/\eta^*)^{m^*-1}$$

相应的寿命密度函数为

$$f_C(t) = \frac{3m^*}{(\eta^*)^{m^*}} t^{m^*-1} \exp\left\{-\frac{3}{(\eta^*)^{m^*}} t^{m^*}\right\} \quad (5)$$

记发动机 1在额定功率下的可靠度为 $R_1(t)$,而在降功率下的可靠度为 $R_1^{(1)}(t)$. $T_3 = T_3$ 的条件是指发动机 1和 2在进入 D 以前在降功率条件已工作了 t_3 的时间,假设 $\exp\{-(t'_3/\eta)^m\} = \exp\{-(t_3/\eta^*)^{m^*}\}$.

这相当于 1和 2在额定功率条件下工作了 t'_3 时间,即 $R_1(t'_3) = R_1^{(1)}(t_3)$ 于是 $t'_3 = \eta \times (t_3/\eta^*)^{m^*/m}$. 因此 $\lambda_D(t|t_3) = (2m/\eta^m)(t+\eta\times(t/\eta^*)^{m^*/m})^{m-1}$,所以在 $T_3 = t_3$ 的条件下,分系统 D 的寿命密度函数为

$$f_D(t|t_3) = \frac{2m}{\eta^m}(t+\eta\times(t_3/\eta^*)^{m^*/m})^{m-1} \cdot \exp\{2/\eta^m[(\eta^m\times(t_3/\eta^*)^{m^*}) - (t+\eta\times(t_3/\eta^*)^{m^*/m})^m]\} \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(4),即得降功率方案下系统可靠度 $R^*(t)$ 的值.

3　基于可靠度的方案选择及实例

根据第 2和 3节的方法计算发动机组在两种方案下的可靠度 $R(t)$ 和 $R^*(t)$,然后根据实际的任务时间要求,选取多个时间点,画出两种方案下的可靠度曲线,然后从图上就可以比较出两种方案的优劣.下面通过两个模拟例子来说明该方法.

例 **1**　假设额定功率时发动机寿命服从 $W(1.2, 200)$,降功率时寿命服从 $W(1.8, 300)$,两种方案下的可靠度曲线见图 3,这时降功率方案较优.

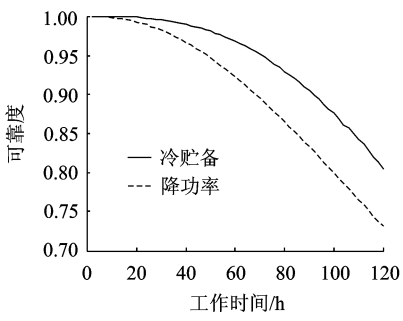

图 3　方案一曲线图

例 **2**　假设额定功率时发动机寿命服从 $W(1.2, 200)$,而降功率时寿命服从 $W(1.5, 200)$,两种方案下的可靠度曲线见图 4,这时冷贮备方案较优.

在实际工程应用时,应根据发动机在额定功率和降功率情况下的寿命试验数据,进行参数估计,然后用本文的方法画出两种方案下的可靠度曲线,进行比较和优化选择.

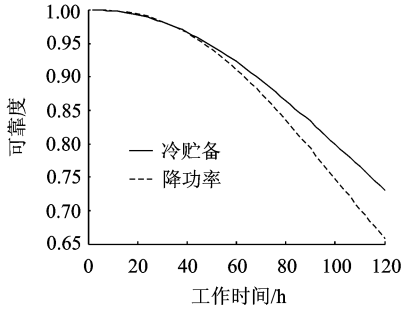

图 4　方案二曲线图

4　结 束 语

本文通过计算冷贮备和降功率使用两种方案下发动机组的可靠度,画出相应的可靠度曲线,进行方案的比较和选择.这里以威布尔分布为例讨论,至于其他分布也可类似讨论,特别对于指数分布,只需要比较分系统 A 和分系统 C 的失效率即可.另外,这里的冷贮备方案可直接推广到"备 1"的方案,降功率使用方案也可以进一步推广.

参考文献 (**References**)

[1] Wang Wendai. Reliability/availability of K-out-of-N system with M cold standby units[C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Washington: IEEE, 2002: 450-455

[2] 李才良,蒲冰远,唐应辉,等.两不同部件冷贮备系统的可靠性分析[J].电子科技大学学报,2003,32(4):447-450
Li Cailiang, Pu Bingyuan, Tang Yinghui, et al. Reliability analysis of a cold standby repairable system with two dissimilar units[J]. Journal of UEST of China, 2003, 32(4): 447-450 (in Chinese)

[3] 贾积身.冷备可修系统的二元最优更换策略[J].系统工程与电子技术,2003,25(2):254-256
Jia Jishen. Two variable optimal replacement policy for cold standby repairable system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(2): 254-256(in Chinese)

[4] 鹿祥宾.复杂系统的可靠性分配和优化[J].北京航空航天大学学报,2004,30(6):565-568
Lu Xiangbin. Reliability allocation and optimization for complex systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(6), 565-568(in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)