

ACT 验证机 FBW 系统的 率模可靠性分析

蔡开元 李 赞 李沛琼

(北京航空航天大学三系, 北京, 100083)

PROFUST RELIABILITY ANALYSIS OF FLIGHT-BY-WIRE SYSTEM FOR AN ACT VERIFICATION AIRCRAFT

Cai Kai-yuan, Li Zan, Li Pei-qiong

(Third Department of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘 要 率模(Profust)可靠度是一种新的可靠性指标,能全面刻画系统的可靠性行为。将 ACT 验证机 FBW 系统的故障分为三个等级:影响安全的故障、影响任务的故障和需要维修的故障,从而对该系统进行率模可靠性分析。还基于率模不可靠度定义故障危害度,使得故障危害度不仅可以合理比较不同故障模式的影响大小,而且直接反映故障模式对系统可靠性行为的影响程度。结论是将率模可靠度作为系统的一个设计指标是可取的。

关键词 故障模式, FBW 系统, 率模可靠度, 复盖率

Abstract Conventional reliability theory is based on binary-state assumption and probability assumption. However in many cases the binary-state assumption is not acceptable, i.e., the system failure cannot be reasonably defined in a crisp way but should be in a fuzzy way, and thus fuzzy-state assumption should be taken in place of the binary-state assumption. Profust reliability theory is a form of fuzzy reliability theory and based on the fuzzy-state assumption and the probability assumption. Therefore profust reliability is a new reliability index and can be used to comprehensively characterize system reliability behavior. Failures of the longitudinal flight-by-wire system in an ACT test aircraft are divided into three classes: safety-fatal, task-fatal and maintenance-required, and do profust reliability analysis for this system. Further, a new index of failure criticality on top of profust unreliability is defined so that this new index is not only adequate to reasonably distinguish effects of distinct failure modes, but also able to directly account for the effects of failure modes on system reliability behavior. The conclusion of this paper is that it is reasonable to take the profust reliability as the system design index.

Key words failure mode, flight-by-wire system, profust reliability, coverage factor

实现主动控制技术(ACT)的一个关键是采用电传操纵(FBW)系统替代机械操纵系统,大大改善飞机飞行品质^[1]。但飞行安全完全依赖于FBW系统的良好功能。而一个电子元件的失效率远高于一个机械元件的失效率,所以在FBW系统中采用冗余技术并对FBW系统可靠性加以全面分析是十分必要的。

FBW系统可以发生多种不同的故障,处于不同等级的故障状态。依据常规的可靠性

1990年7月19日收到,1991年4月23日收到修改稿

指标试图对 FBW 系统可靠性行为作全面分析是不可能的。这就要求提出新的可靠性指标以全面刻划 FBW 系统的可靠性行为。另一方面,常规的可靠性指标不能直接反映和比较不同等级的故障对系统可靠性行为的影响程度。

本文论证了蔡开元提出的率模(Profust 取自 Probability assumption+Fuzzy-State assumption. 相应地,“率模”取自概率假设和模糊状态假设)。可靠度^[2-6]这一新指标不仅可以全面刻划 FBW 系统的可靠性行为,而且可以比较不同等级故障对系统可靠性行为的影响程度。

1 ACT 验证机 FBW 系统

可靠性分析对象是 ACT 验证机纵向数字 FBW 系统,逻辑框图如图 1 示。认为子系统以串联方式联结,任一子系统失败导致整个 FBW 系统失败。子系统则采用余度技术,其中 k/nG 表示该子系统由 n 个通道组成,只要 k 个($k \leq n$)通道工作正常,该子系统则工作正常。图 1 给出的是可靠性逻辑框图,而不是物理结构图。同一物理部件可能同时反映于多个子系统可靠性逻辑框图,如接口 A、B、C 和二次电源等。各部件上的数字表示该部件的编码。

FBW 系统可以出现不同等级的故障。对于 2/4G 的子系统,1 个通道失效,系统出现需要维修的故障,2 个通道失效,系统出现影响任务的故障,3 个通道失效,系统出现影响安全的故障。(不考虑 4 个通道失效的情况)。对于 1/3G 的子系统,1 个通道失效,系统出现需要维修的故障,2 个通道失效,系统出现影响任务的故障,3 个通道失效,系统出现影响安全的故障。对于主油源和助力油源,其中之一失效,系统出现影响任务的故障,二者皆失效,系统出现影响安全的故障。对于助力器左和助力器右,任一者失效导致系统出现影响安全的故障,本文将军标中危害度为前两个等级的故障归结为同一类故障。这样 FBW 系统有三类程度不同的故障:A 类为影响安全的故障,B 类为影响任务的故障,C 类为需要维修的故障。

表 1 部件失效率($\times 10^{-6}/h$)

部 件	失 效 率		
	高	中	低
杆力传感器(111-114)	40	25	10
杆力放大器(121-124)	40	25	10
过载传感器(211-214)	50	40	30
动压传感器(511-513)	30	25	20
静压传感器(611-613)	30	25	20
速率陀螺(311-314)	50	40	30
攻角传感器(411-413)	150	100	50
接 口 (31-34)	0.3	0.165	0.03
二次电源①(11-14)	30	17.5	5
二次电源②(21-24)	30	20	10
CPU/IO (711-714)	125	87.5	50
A/D-D/A (721-724)	125	87.5	50
LVDT 接口 (811-814)	0.3	0.165	0.03
伺服放大系统(821-823)	250	195	140
舵 机 (831-832)	120	95	70
助 力 器(91-92)	1.0	0.75	0.5
主 油 源(1222)	0.01	0.0055	0.001
助力油源 (1221)	0.01	0.0055	0.001

表 1 给出了三组典型的部件失效率,分别对应于高失效率,中失效率和低失效率。假设部件寿命服从指数分布。

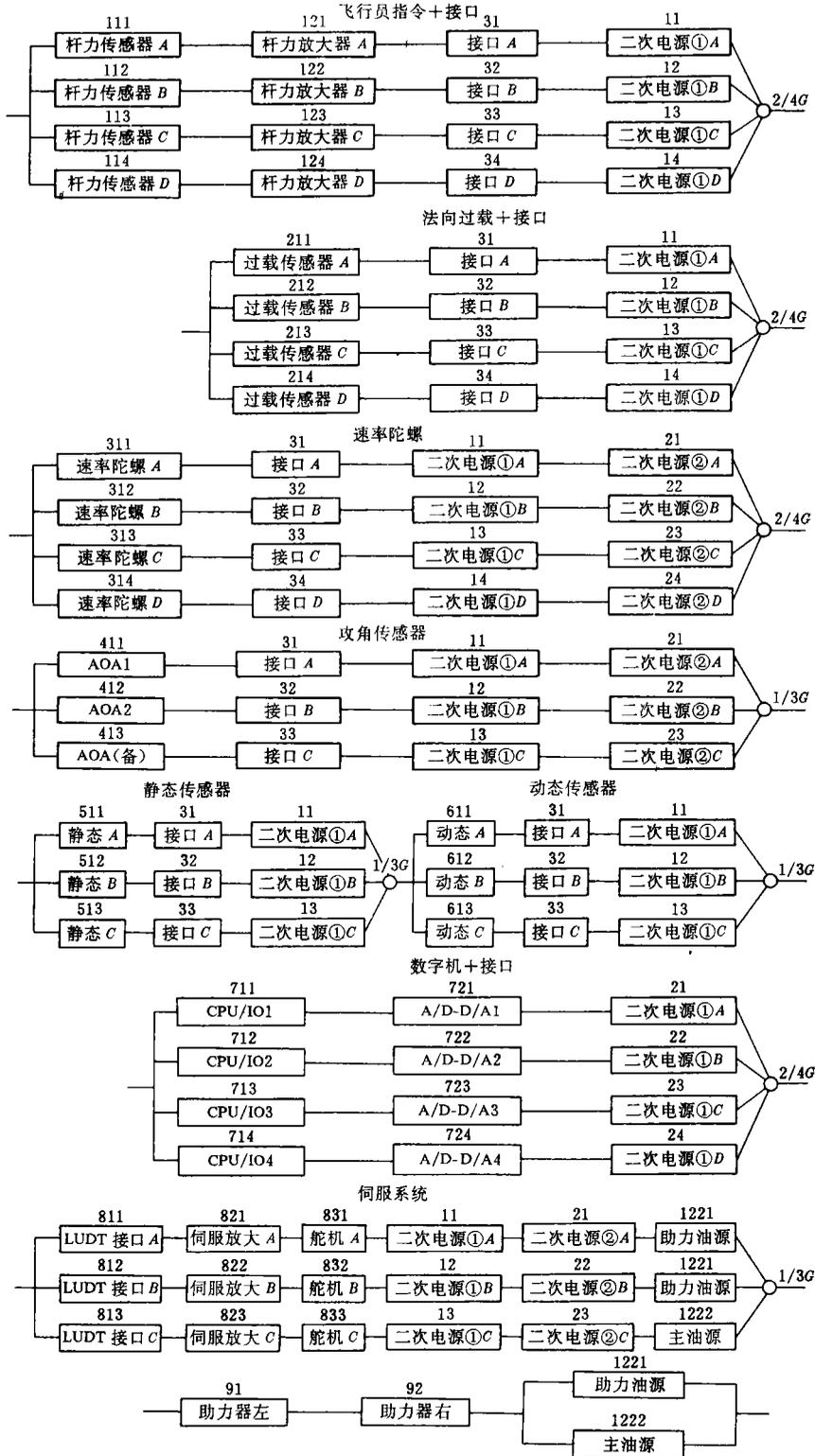


图 1 纵向 FBW 系统可靠性逻辑框图及编码

2 率模(Profust)可靠性理论

经典可靠性理论基于两个基本假设^[2~6]:

- (1) 概率假设: 系统可靠性行为可以概率方式刻画;
- (2) 二态假设: 系统只有两类状态, 要么完全正常, 要么完全故障。

这两个假设在许多情况下是成立的, 但也有不合理的情况。譬如, FBW 系统具有 A 类、 B 类和 C 类故障, 故障程度不同, 不能同等看待, 不能说 FBW 系统要么完全故障, 要么完全正常。这时二态假设不成立, 而应以模糊状态假设替代。对于小样本问题, 概率假设不成立, 而应以可能性假设替代^(7,8)。率模(Profust)可靠性理论是基于概率假设和模糊状态假设(Probability+Fuzzy-State)。能双(Posbist)可靠性理论是基于可能性假设和二态假设(Possibility+Binary-State)⁽⁸⁾。而能模(Posfust)可靠性理论是基于可能性假设和模糊状态假设。率模可靠性理论、能双可靠性理论和能模可靠性理论统称为模糊可靠性理论。经典可靠性理论则称为率双(Probist)可靠性理论(Prbability+Bonary-State)。

设系统有 n 个非模糊状态 S_1, \dots, S_n 。令 $U = \{S_1, \dots, S_n\}$ 是论域。在此论域上定义 Fuzzy 成功状态为

$$S = \{S_i, \mu_S(S_i), i = 1, \dots, n\} \quad (1)$$

Fuzzy 故障状态为

$$F = \{S_i, \mu_F(S_i), i = 1, \dots, n\} \quad (2)$$

这里 $\mu_S(S_i)$ 和 $\mu_F(S_i)$ 为相应的隶属函数。记 $U_T = \{m_{ij}, i, j = 1, \dots, n\}$, $m_{i,j}$ 表示从状态 S_i 到状态 S_j 的转移。定义

$$T_{SF} = \{m_{ij}, \mu_{T_{SF}}(m_{ij}), i, j = 1, \dots, n\} \quad (3)$$

这里

$$\mu_{T_{SF}}(m_{ij}) = \begin{cases} \beta_{F/S}(S_j) - \beta_{F/S}(S_i), & \text{如果 } \beta_{F/S}(S_j) > \beta_{F/S}(S_i) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta_{F/S}(S_i) = \frac{\mu_F(S_i)}{\mu_F(S_i) + \mu_S(S_i)} \quad (5)$$

这样 T_{SF} 表示从 Fuzzy 成功到 Fuzzy 故障的转移, 并可视为一个 Fuzzy 事件。Profust 区间可靠度定义为

$$\begin{aligned} R(t_0, t_0 + t) &= P\{T_{SF} \text{ 在 } [t_0, t_0 + t] \text{ 内不发生}\} \\ &= 1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_{T_{SF}}(m_{ij}) P\{m_{ij} \text{ 在 } [t_0, t_0 + t] \text{ 内发生}\} \end{aligned} \quad (6)$$

这里 m_{ij} 被限制为不经任何中间状态的状态转移。Profust 区间不可靠度为

$$\begin{aligned} \bar{R}(t_0, t_0 + t) &= P\{T_{SF} \text{ 在 } [t_0, t_0 + t] \text{ 内发生}\} \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_{T_{SF}}(m_{ij}) P\{m_{ij} \text{ 在 } [t_0, t_0 + t] \text{ 内发生}\} \end{aligned} \quad (7)$$

这里 m_{ij} 被限制为不经任何中间状态的状态转移。

假设

$$\mu_S(S_i) = 1 - \mu_F(S_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

则可证明^[2-4]

$$R(t_0, t_0 + t) = E\mu_S^{(t_0 + t)} \quad (9)$$

$$\bar{R}(t_0, t_0 + t) = E\mu_F^{(t_0 + t)} \quad (10)$$

这里 $\mu_S^{(t_0 + t)}$ 、 $\mu_F^{(t_0 + t)}$ 分别表示 μ_S 和 μ_F 在 $(t_0 + t)$ 时刻的取值,是随机变量。而 E 则表示数学期望。

分别记 Profust 可靠度和 Profust 不可靠度为 $R(t)$ 和 $\bar{R}(t)$, 定义为

$$R(t) = R(0, t) \quad (11)$$

$$\bar{R}(t) = \bar{R}(0, t) \quad (12)$$

3 FBW 系统的 Profust 可靠性分析

前已指出, FBW 系统可出现 A 类故障、 B 类故障和 C 类故障。这样 FBW 系统有 4 个非模糊状态 A 、 B 、 C 、和 D , 其中 A 表示系统处于 A 故障状态, B 表示系统处于 B 类故障状态, C 表示系统处于 C 类故障状态, D 表示系统处于无任何故障状态, 这些状态之间的转移方向只可能为 $D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$, 而不可能出于相反的情况。这是因为感兴趣的是飞行阶段的 FBW 系统可靠性行为, 不是地面阶段的 FBW 系统的可靠性行为, 而飞行过程中不会对失效部件加以维修。

定义 FBW 系统的 Fuzzy 成功状态为

$$S = \{X, \mu_S(X), X = A, B, C, D\} \quad (13)$$

随着 $\mu_S(X)$ 的取值不同, S 可以表示不同的物理概念, 如“基本正常”, “非常成功”, “不太正常”。定义 FBW 系统的 Fuzzy 故障状态为

$$F = \{X, \mu_F(X), X = A, B, C, D\} \quad (14)$$

同样, 随着 $\mu_F(X)$ 的取值不同, F 可以表示不同的物理概念, 如“基本失败”, “彻底失败”, 这些概念是无法以常规(精确)的故障概念加以反映的

$$\text{令} \quad \mu_F(X) = 1 - \mu_S(X), \quad X = A, B, C, D \quad (15)$$

那么由式(9)~式(12), FBW 系统的 Profust 可靠 Profust 不可靠度分别为

$$R(t) = \mu_S(A)p_A(t) + \mu_S(B)p_B(t) + \mu_S(C)p_C(t) + \mu_S(D)p_D(t) \quad (16)$$

$$\bar{R}(t) = \mu_F(A)p_A(t) + \mu_F(B)p_B(t) + \mu_F(C)p_C(t) + \mu_F(D)p_D(t) \quad (17)$$

这里 $p_X(t)$ 表示 t 时刻 FBW 系统处于状态 X 的概率, 且

$$p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) + p_D(t) = 1 \quad (18)$$

由式(16)、式(17)可知, $R(t)$ 和 $\bar{R}(t)$ 综合反映 FBW 系统的可靠性状况, 不仅考虑各类故障的出现概率, 而且考虑各类故障对系统工作的影响程度。

假设飞行开始时 FBW 系统各部件处于完好状态, 对应于时刻 $t=0$ 。又假设各部件寿命服从指数分布。这样就可以利用马尔科夫链计算 t 时刻系统处于各状态的概率^[9], 其结果如表 2~表 4 所示。这里假设复盖率 $e=1$, 就是说, FBW 系统各子系统导致的 B

类和 C 类故障的通道均可被完全检测和隔离。由于感兴趣的是 FBW 系统的飞行阶段, 这里取 $t=1, 2, \dots, 10h$ 。

表 2 高失效率时 FBW 系统各状态概率

$t(h)$	$p_A(t)$	$p_B(t)$	$p_C(t)$	$p_D(t)$
0	0	0	0	1
1	.2000E-05	.1638E-05	.4722E-02	.9953
2	.4002E-05	.6511E-05	.9444E-02	.9905
3	.6006E-05	.1462E-04	.1417E-01	.9858
4	.8014E-05	.2597E-04	.1889E-01	.9811
5	.1003E-04	.4055E-04	.2361E-01	.9763
6	.1205E-04	.5836E-04	.2833E-01	.9715
7	.1407E-04	.7941E-04	.3305E-01	.9669
8	.1611E-04	.1037E-03	.3778E-01	.9621
9	.1816E-04	.1312E-03	.4250E-01	.9574
10	.2022E-04	.1620E-03	.4722E-01	.9526

表 3 中失效率时 FBW 系统各状态概率

$t(h)$	$p_A(t)$	$p_B(t)$	$p_C(t)$	$p_D(t)$
0	0	0	0	1
1	.1500E-05	.7777E-06	.3201E-02	.9968
2	.3001E-05	.3089E-05	.6402E-02	.9936
3	.4502E-05	.6933E-05	.9603E-02	.9804
4	.6005E-05	.1231E-04	.1280E-01	.9872
5	.7509E-05	.1922E-04	.1601E-01	.9840
6	.9016E-05	.2767E-04	.1921E-01	.9808
7	.1053E-04	.3764E-04	.2241E-01	.9775
8	.1204E-04	.4916E-04	.2561E-01	.9743
9	.1356E-04	.6220E-04	.2881E-01	.9711
10	.1508E-04	.7678E-04	.3201E-01	.9679

表 4 低失效率时 FBW 系统各状态概率

$t(h)$	$p_A(t)$	$p_B(t)$	$p_C(t)$	$p_D(t)$
0	0	0	0	1
1	.1000E-05	.2576E-06	.1680E-02	.9983
2	.2000E-05	.1026E-05	.3360E-02	.9966
3	.3000E-05	.2306E-05	.5041E-02	.9950
4	.4001E-05	.4098E-05	.6721E-02	.9933
5	.5002E-05	.6400E-05	.8401E-02	.9916
6	.6004E-05	.9214E-05	.1008E-01	.9899
7	.7006E-05	.1254E-04	.1176E-01	.9882
8	.8009E-05	.1637E-04	.1344E-01	.9865
9	.9012E-05	.2072E-04	.1512E-01	.9849
10	.1002E-04	.2558E-04	.1680E-01	.9832

3.1 相对于时间的 Profust 可靠性行为

取 $\mu_S(A) = 0, \mu_S(B) = 0.2, \mu_S(C) = 0.8, \mu_S(D) = 1$, 那么 Profust 可靠度为

$$R_1(t) = 0.2p_B(t) + 0.8p_C(t) + p_D(t) \tag{19}$$

依据表 2~表 4 可得 $R_1(t)$ 的计算结果, 如表 5 示。据此可画出曲线, 如图 2。

表 5 Profust 可靠度($\mu_S(A) = 0, \mu_S(B) = 0.2, \mu_S(C) = 0.8, \mu_S(D) = 1$)

t (小时)	$R_1(t)$		
	高失效率	中失效率	低失效率
0	1	1	1
1	.9991	.9994	.9996
2	.9981	.9987	.9993
3	.9971	.9981	.9990
4	.9962	.9974	.9987
5	.9952	.9968	.9983
6	.9942	.9962	.9980
7	.9934	.9954	.9976
8	.9923	.9948	.9973
9	.9914	.9942	.9970
10	.9904	.9935	.9966

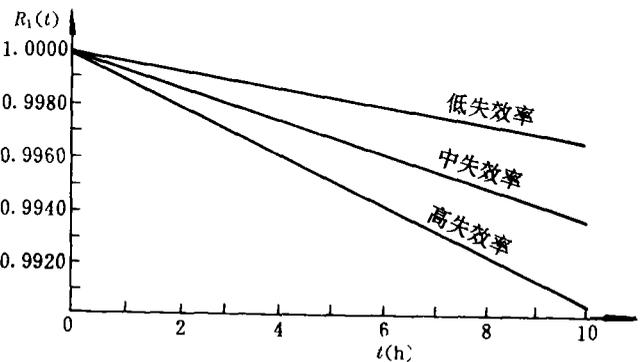


图 2 相对于时间的 Profust 可靠度行为

从表 5 和图 2 可以看出

(1) 在感兴趣的飞行时间内($t=0\sim 10\text{h}$),FBW 系统 Profust 可靠度取值于 0.99~1.00 之间。这就是说, 如果以 Profust 可靠度(或 Profust 不可靠度)为 FBW 系统的设计指标, Profust 不可靠度应为 10^{-3} 这一数量级;

(2) 部件失效率愈高, 系统的 Profust 可靠度愈低。

(3) 不论部件失效率为高、中或低, FBW 系统的 Profust 可靠度与飞行时间几乎成负线性关系。

(4) 部件失效率愈高, FBW 系统的 Profust 可靠度下降速率愈大。

3.2 与常规可靠度指标的比较

在式(16)中取 $\mu_S(A)=0$, $\mu_S(B)=0$, $\mu_S(C)=1$, $\mu_S(D)=1$, 则

$$R_2(t) = p_C(t) + p_D(t) = 1 - p_A(t) - p_B(t) \quad (20)$$

取 $\mu_S(A)=0$, $\mu_S(B)=1$, $\mu_S(C)=1$, $\mu_S(D)=1$, 则

$$R_3(t) = p_B(t) + p_C(t) + p_D(t) = 1 - p_A(t) \quad (21)$$

这样 $R_2(t)$ 即为常规的任务可靠度, $R_3(t)$ 为常规的安全可靠度。由式(20)知, 任务可靠度不反映故障等级对系统的影响程度。另一方面, 不论系统处于 A 类故障状态和处于 B 类故障状态概率为何值, 只要它们之和不变, 任务可靠度不变。即任务可靠度不能直接反映不同故障状态概率的变化。对于安全可靠度, 情况类似。相反, 由式(19), FBW 系统 Profust 可靠度不仅反映故障等级对系统的影响程度, 而且直接反映故障状态概率的变化。总之, Profust 可靠度全面刻划了系统的可靠性行为, 这是常规的任务可靠度和安全可靠度无能为力的。

3.3 危害度

在常规的 FMECA 中, 危害度的估计有两种方法^[10]: 利用危害度网络进行估计和利用解析式计算。前一种方法是以故障等级为纵坐标, 以其发生概率为横坐标, 并从原点出发来确定一个矢量, 其长度为危害度。这样以原点为中心确定的圆周上的各点所对应的故障危害度相同, 于是难以合理比较不同故障的危害程度。利用解析式计算危害度, 则需取故障发生概率的 10 倍值, 那么为什么取 10 倍值而不取 20 倍值? 没有客观依据。另一方面, 无论以网络估计或利用解析式计算, 危害度都没有直接反映故障对系统可靠性的影响程度。

以 Profust 不可靠度来定义故障的危害度。令

$$\alpha_X(t) = \frac{\mu_F(X) p_X(t)}{\bar{R}(t)} \quad (22)$$

其中 X 为故障状态, $\bar{R}(t)$ 则为系统的 Profust 不可靠度。对于 FBW 系统, $X=A, B, C$, 而 $\bar{R}(t)$ 则由式(17)确定。称 $\alpha_X(t)$ 为故障模式 X 在 t 时刻的危害度。 $\alpha_X(t)$ 不仅可以合理比较不同故障模式的影响大小, 而且直接反映故障模式对系统可靠性行为的影响程度。

例如令式(19)成立, 那么对于高失效率的情况和 $t=1\text{h}$

$$\alpha_A(t) = \frac{1 \times 0.2000 \times 10^{-5}}{9.47711 \times 10^{-4}} = 2.1103 \times 10^{-3}$$

$$\alpha_B(t) = \frac{0.8 \times 0.1639 \times 10^{-5}}{9.47711 \times 10^{-4}} = 1.3835 \times 10^{-3}$$

$$\alpha_C(t) = \frac{0.2 \times 0.4722 \times 10^{-2}}{9.47711 \times 10^{-4}} = 0.9965$$

可见 C 类故障危害程度最严重, 其对系统可靠性行为的影响要比 A 类和 B 类故障高出三个数量级。

3.4 复盖率的影响

在冗余系统中, 如果某一通道故障未被检测并隔离, 则该故障没有被复盖。这时整个系统故障复盖率就是通道故障被复盖的概率。对于 FBW 系统, 有一次复盖率和二次复盖率之分, 前者对应于第一次发生的通道故障, 后者对应于第二次发生的通道故障。仅考虑二次复盖率而忽略一次复盖率。这是因为发生第一次通道故障(C 类故障)时, 系统采用比较检测策略, 这时 C 类故障不被检测的概率很小, 可忽略不计。而发生第二次通道故障(B 类故障)时, 系统采用自检检测策略, B 类故障不被复盖而升级为 C 类故障的概率未必很小。下面简称二次复盖率为复盖率, 以 c 记之。

表 6~表 8 列出了不同复盖率下 FBW 系统各状态概率和 Profust 可靠度。这里取 $t=1h$, 并令式(19)成立。从表中可知, 不论部件失效率为高、中、低, 由于它们数值均很小, 结果二次复盖率的大小对 FBW 系统的 Profust 可靠度几乎不发生影响(有效数字 4 位不变)。回忆前述, 如果以 Profust 可靠度为设计指标, FBW 系统的 Profust 不可靠度应达 10^{-3} 数量级。这就是说, 如果以 Profust 可靠度为设计指标, 只要部件失效率足够小, 不应过多追求高复盖率, 而应较多关心 Profust 可靠度随飞行时间增加而下降的情况。

表 6 高失效率时不同复盖率下 FBW 系统各状态概率及 Profust 可靠度

C	$p_A(t)$	$p_B(t)$	$p_C(t)$	$p_D(t)$	$R_f(t)$
1	.2000E-05	.1638E-05	.4722E-02	.9953	.9991
0.9	.2018E-05	.1328E-05	.4722E-02	.9953	.9991
0.8	.2070E-05	.1051E-05	.4722E-02	.9953	.9991
0.7	.2152E-05	.8067E-06	.4722E-02	.9953	.9991
0.6	.2267E-05	.5914E-06	.4722E-02	.9953	.9991
0.5	.2415E-05	.4145E-06	.4722E-02	.9953	.9991
0.4	.2595E-05	.2669E-06	.4722E-02	.9953	.9991
0.3	.2807E-05	.1516E-06	.4722E-02	.9953	.9991
0.2	.3052E-05	.6871E-07	.4722E-02	.9953	.9991
0.1	.3329E-05	.1818E-07	.4722E-02	.9953	.9991
0.0	.3638E-05	.0	.4722E-02	.9953	.9991

表 7 中失效率时不同复盖率下 FBW 系统各状态概率及 Profust 可靠度

C	$p_A(t)$	$p_B(t)$	$p_C(t)$	$p_D(t)$	$R_i(t)$
1	.1500E-05	.7777E-06	.3201E-02	.9968	.9994
0.9	.1508E-05	.6309E-06	.3201E-02	.9968	.9994
0.8	.1533E-05	.4995E-06	.3201E-02	.9968	.9994
0.7	.1572E-05	.3834E-06	.3201E-02	.9968	.9994
0.6	.1627E-05	.2826E-06	.3201E-02	.9968	.9994
0.5	.1697E-05	.1971E-06	.3201E-02	.9968	.9994
0.4	.1783E-05	.1271E-06	.3201E-02	.9968	.9994
0.3	.1883E-05	.7230E-07	.3201E-02	.9968	.9994
0.2	.2000E-05	.3287E-07	.3201E-02	.9968	.9994
0.1	.2131E-05	.8767E-08	.3201E-02	.9968	.9994
0.0	.2278E-05	.0	.3201E-02	.9968	.9994

表 8 低失效率时不同复盖率下 FBW 系统各状态概率及 Profust 可靠度

C	$p_A(t)$	$p_B(t)$	$p_C(t)$	$p_D(t)$	$R_i(t)$
1	.1000E-05	.2576E-06	.1680E-02	.9983	.9996
0.9	.1003E-05	.2088E-06	.1680E-02	.9983	.9996
0.8	.1011E-05	.1652E-06	.1680E-02	.9983	.9996
0.7	.1024E-05	.1266E-06	.1680E-02	.9983	.9996
0.6	.1042E-05	.9322E-07	.1680E-02	.9983	.9996
0.5	.1065E-05	.6490E-07	.1680E-02	.9983	.9996
0.4	.1093E-05	.4170E-07	.1680E-02	.9983	.9996
0.3	.1127E-05	.2360E-07	.1680E-02	.9983	.9996
0.2	.1165E-05	.1062E-07	.1680E-02	.9983	.9996
0.1	.1209E-05	.2756E-08	.1680E-02	.9983	.9996
0.0	.1258E-05	.0	.1680E-02	.9983	.9996

参 考 文 献

- 1 李学国.主动控制技术在飞机设计中的应用.北京:航空工业出版社,1985;7
- 2 Cai K Y, Wen C Y. Street-Lighting Lamps Replacement: A Fuzzy Viewpoint. Fuzzy Sets and Systems, 1990;37:161~172
- 3 Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Fuzzy Reliability Modeling of Gracefully Degradable Computing Systems. Reliability Engineering and System Safety, 1991;33:141~157
- 4 Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Survivability Index for CCNs: a Measure of Fuzzy Reliability. Reliability Engineering and System Safety, 1991;33:71~99
- 5 Cai K Y, Wen C Y, Chen Z J. A Preliminary Analysis of CIMS Reliability with Fuzzy Viewpoint. Proc. Beijing International Conference on System Simulation and Scientific Computing, 1991;771~775
- 6 蔡开元.模糊可靠性研究.北京航空航天大学博士学位论文,1990
- 7 Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. A Critical Review on Software Reliability Modeling. Reliability Engineering and System Safety, 1991;32: 357~371
- 8 Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Fuzzy Variables as a Basis for a Theory of Fuzzy Reliability in the Possibility Context. Fuzzy Sets and Systems, 1991;42:145~172
- 9 李赞. ACT验证机FBW系统故障模式及影响分析.北京航空航天大学学士学位论文,1990
- 10 梅启智,廖炯生,孙惠中.系统可靠性工程基础.科学出版社,1987.156