

文章编号: 1001-0920(2004)02-0134-05

故障诊断和检测策略的综合研究

苏保河

(暨南大学 珠海学院, 广东 珠海 519070)

摘要: 研究系统的故障诊断和检测策略问题。假定系统有两种工作状态(正常状态及异常状态)和一种故障状态, 为判断系统是正常还是异常, 每隔一段随机时间对系统检测一次。利用概率分析、补充变量和最优化方法, 导出了系统一些新的运行指标、诊断参数的最优临界值和最优检测周期。

关键词: 故障诊断; 检测周期; 运行指标

中图分类号: TP206.3; C931.1 **文献标识码:** A

Compositive research on the trouble diagnosis and inspection policy

SU Baohe

(Zhuhai College, Jinan University, Zhuhai 519070, China. E-mail: subh@163.com)

Abstract: The trouble diagnosis and inspection policies were discussed for a system having two working modes (normal mode and abnormal mode) and a failure mode. While the system is working, it is inspected once every random time period to make sure it is in normal mode or abnormal mode. Each inspection consisted in measuring the value of a diagnostic parameter. And the duration of inspection is a general continuous random variable. The new operation indices, the optimal diagnostic critical value and the optimal inspection cycle are derived by using probability analysis, the supplementary variable technique and optimization method.

Key words: trouble diagnosis; inspection cycle; operation indices

1 引言

在实际工程中, 检测策略需要进行两种决策: 一种是知道检测结果后采取什么措施, 例如是修理系统还是让系统继续工作; 另一种是决定两次检测之间的时间间隔, 即确定检测周期。因此, 检测策略的决策空间是一个 2 维空间。近年来, 一些文献^[1~4]对此类系统进行研究, 但检测的目的通常是在系统长期运行下($t \rightarrow \infty$), 使单位时间内平均费用最小, 或使单位时间内平均利润最大^[3,4]。由于科学技术飞速发展, 系统(或设备)不断更新换代, 新系统的价格和性能往往与旧系统有很大的不同; 另外, 由于市场竞争造成优胜劣汰, 也使系统不可能永远运行下去。因此, “系统长期运行”这一假设

与实际情况不符。

为解决这一问题, 必须引入吸收状态, 系统或早或晚必然被吸收。随之而来的问题是: 几乎所有稳态运行指标都将失去意义, 例如稳态可用度和稳态故障频度都将为 0。这就需要引入新的运行指标, 并在此基础上对系统进行深入分析, 研究如何确定检测周期和诊断参数的临界值。本文利用概率分析、补充变量和最优化方法, 定义并计算了系统新的运行指标; 以此为基础, 进一步导出系统的最优检测周期和诊断参数的最优临界值。

2 系统描述

1) 系统有两种工作状态(正常及异常)和一种故障状态, 依次由正常经过异常到达故障。系统开

收稿日期: 2002-10-14; 修回日期: 2003-01-25

作者简介: 苏保河(1958—), 男, 山东泰安人, 教授, 从事可靠性分析、故障诊断和检测策略的研究。

始工作后, 为判断是正常还是异常, 每隔一段随机时间 U 对它检测一次, 直到系统故障或检测结果为“异常”为止 随机变量 U 称为随机检测周期, 其分布函数和均值分别记为

$$U(t) = \int_0^t u(x) dx = 1 - \exp\left[-\int_0^t \alpha(x) dx\right],$$

$$\alpha^{-1} = \int_0^\infty t dU(t);$$

检测的持续时间 V 是任意连续型随机变量, 称为检测时间, 其分布函数和均值分别记为

$$V(t) = \int_0^t v(x) dx = 1 - \exp\left[-\int_0^t \beta(x) dx\right],$$

$$\beta^{-1} = \int_0^\infty t dV(t).$$

2) 系统的诊断参数 X 是一个随机变量 当系统正常时, X 的分布函数记为 $F_1(x)$, 当系统异常时, X 的分布函数记为 $F_2(x)$. X 的临界值为 x_1 , X 的检测值为 x .

检测后的决策为: 如果检测值 $x < x_1$, 则判定系统正常, 系统继续工作; 如果 $x > x_1$, 则判定系统异常, 立刻修理系统

3) 系统开始工作时处于正常工作状态 当系统正常工作时, 以失效率 λ_1 转移到异常工作状态; 当系统异常工作时, 以失效率 λ_2 转移到故障状态 系统处于正常状态但检测结果出现错误后, 或检测出系统异常后, 立刻对系统进行修理 修理时间是不同的任意连续型随机变量, 其分布函数和均值分别记为

$$G_i(t) = \int_0^t g_i(y) dy = 1 - \exp\left[-\int_0^t \mu_i(y) dy\right],$$

$$\mu_i^{-1} = \int_0^\infty t dG_i(y), i = 1, 2$$

4) 系统的前期投资(例如购买系统等)为 L_0 , 系统开始工作前的前期准备时间为 T_0 , 系统正常和异常时工作单位时间的平均利润分别为 R_1 和 R_2 , 对系统检测一次的平均费用为 L_1 , 修理一次异常的平均费用为 L_2 , 由于检测结果错误而“修理”(实为详细检查)一次正常状态的平均费用为 L_3 , 系统故障后终止运行, 善后工作所需平均费用为 L_4 , 所需平均时间为 T_4 . 系统修复如新后, 所有随机变量相

互独立

显然, 系统检测的结果有可能发生错误 系统正常时检测结果正确的概率 p_1 , 检测结果错误的概率 $q_1 = 1 - p_1$, 系统异常时检测结果正确的概率 p_2 , 检测结果错误的概率 $q_2 = 1 - p_2$ 分别为

$$p_1 = F_1(x_1), q_1 = 1 - F_1(x_1);$$

$$p_2 = 1 - F_2(x_1), q_2 = F_2(x_1).$$

系统状态定义如下:

(i, n) : $i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示系统处于正常工作、正常且停工检测、异常工作、异常且停工检测; n 表示从系统最近一次进入正常($i = 1, 2$)或异常($i = 3, 4$)工作状态以来, 已经进行了 n 次检测, $n = 0, 1, \dots$

$(5, j)$: 5 表示系统处于停工状态; $j = 1, 2$ 分别表示修理正常(由于发生误断)和异常, $j = 3$ 表示系统故障 其中 $(5, 3)$ 是吸收状态

用 $S(t)$ 表示系统在时刻 t 所处的状态 引入补充变量如下: $X(t)$ 表示在时刻 t 检测周期已逝去的时间, $Y_1(t)$ 和 $Y_2(t)$ 分别表示在时刻 t 已用去的修理正常和异常的修理时间, $Z(t)$ 表示在时刻 t 已逝去的检测时间

为方便起见, 引入如下符号:

$$\bar{f} = 1 - f,$$

$$f^*(s) = L[f(t)] = \int_0^\infty f(t) \exp(-st) dt \text{ (Laplace 变换)},$$

$$v = v^*(s), u_i = u^*(s + \lambda_i),$$

$$U_i = \bar{U}^*(s + \lambda_i),$$

$$U_{i0} = \bar{U}^*(\lambda_i), i = 1, 2$$

3 系统的状态概率

系统的状态概率定义如下:

$$P_m(t, x) dx = P\{S(t) = (i, n), x - X(t) < x - dx\},$$

$$i = 1, 3, n = 0, 1, \dots;$$

$$P_m(t, z) dz = P\{S(t) = (i, n), z - Z(t) < z - dz\},$$

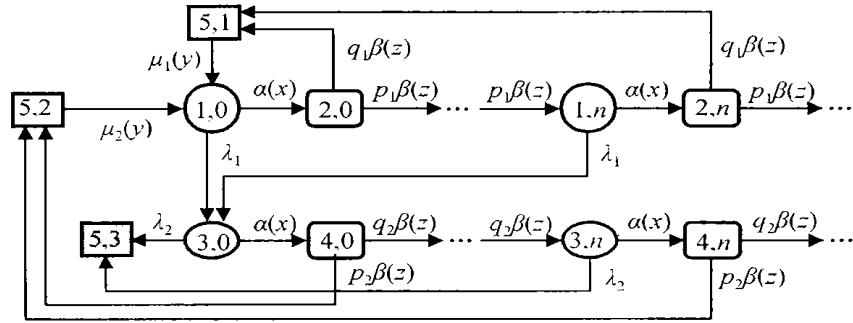
$$i = 2, 4, n = 0, 1, \dots;$$

$$P_{sj}(t, y) dy = P\{S(t) = (5, j), y - Y_j(t) < y - dy\},$$

$$j = 1, 2$$

系统的各个状态及其转移情况如图 1 所示

根据系统状态转移图, 利用文献[3~5]中方法可建立系统状态概率的微积分方程组, 解之可得系统状态概率的 Laplace 变换式如下:



○ 正常工作状态 ○ 异常工作状态 □ 检测状态 □ 修理状态 □ 吸收状态

图1 系统状态及其转移情况

$$P_{1n}^*(s, x) = (\lambda - \lambda_1)(1 - p_1 v u_1)(1 - q_2 v u_2) \times p_1^n v^n u_1^n \bar{U}(x) e^{-(s + \lambda_1)x} / B(s), \quad (1)$$

$$P_{2n}^*(s, z) = (\lambda - \lambda_1)(1 - p_1 v u_1)(1 - q_2 v u_2) \times p_1^n v^n u_1^{n+1} \bar{V}(z) e^{-sz} / B(s), \quad (2)$$

$$P_{30}^*(s, x) = \lambda_1(1 - q_2 v u_2) \bar{U}(x) \times [e^{-(s + \lambda_1)x} - e^{-(s + \lambda_2)x}] / B(s), \quad (3)$$

$$P_{3n}^*(s, x) = \lambda_1(u_1 - u_2)(1 - q_2 v u_2) \times q_2^n v^n u_2^{n-1} \bar{U}(x) e^{-(s + \lambda_2)x} / B(s), \quad (4)$$

$$P_{4n}^*(s, z) = \lambda_1(u_1 - u_2)(1 - q_2 v u_2) \times q_2^n v^n u_2^n \bar{V}(z) e^{-sz} / B(s), \quad (5)$$

$$P_{51}^*(s, y) = q_1(\lambda - \lambda_1) v u_1(1 - q_2 v u_2) \times \bar{G}_1(y) e^{-sy} / B(s), \quad (6)$$

$$P_{52}^*(s, y) = p_2 \lambda_1 v(u_1 - u_2) \bar{G}_2(y) e^{-sy} / B(s). \quad (7)$$

其中

$$B(s) = (\lambda - \lambda_1)(1 - q_2 v u_2) \times [1 - p_1 v u_1 - q_1 v u_1 g_1^*(s)] - p_2 \lambda_1 v(u_1 - u_2) g_2^*(s). \quad (8)$$

4 系统的运行指标

4.1 系统故障前时间

从系统开始工作到故障需要经历一段随机时间, 该随机时间 T 称为系统故障前时间. 显然, T 是一个随机变量, 其分布函数称为系统故障前时间分布, 记为 $H(t)$. 由定义知

$$H(t) = P\{T \leq t\} = 1 - P\{T > t\},$$

其中 $P\{T > t\} = \bar{H}(t)$, 表示事件“在时刻 t 系统没有进入吸收状态”的概率. 因此

$$\bar{H}(t) =$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} P_{1n}(t, x) dx + \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} P_{2n}(t, z) dz +$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} P_{3n}(t, x) dx + \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} P_{4n}(t, z) dz + \sum_{i=1}^2 \int_0^{\infty} P_{5i}(t, y) dy. \quad (9)$$

对式(9)关于 t 取 Laplace 变换, 并利用式(1)~(8)可得

$$\begin{aligned} \bar{H}^*(s) = & \{[\lambda_1(u_1 - u_2) + (\lambda - \lambda_1)u_1(1 - q_2 v u_2)] \times \\ & \bar{V}^*(s) + \lambda_1(1 - q_2 v u_2)U_1 - \lambda_1(1 - q_2 v u_1)U_2 + \\ & q_1(\lambda - \lambda_1)v u_1(1 - q_2 v u_2)] \bar{G}_1^*(s) + \\ & p_2 \lambda_1 v(u_1 - u_2) \bar{G}_2^*(s)\} / B(s), \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $B(s)$ 由式(8)给出

系统故障前时间 T 的数学期望 $E(T)$ 称为系统故障前平均时间. 由式(10)易得

$$\begin{aligned} E(T) = \bar{H}^*(0) = & \{p_2(\lambda - \lambda_1)\beta^{-1} + [p_2\lambda - \lambda_1(q_2\lambda_1 + \\ & p_2\lambda)\beta^{-1}]U_{10} + [-p_2\lambda_1 + \lambda_1(p_2\lambda_1 + \\ & q_2\lambda)\beta^{-1}]U_{20} + q_2[\lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_1\lambda(\lambda - \\ & \lambda_1)\beta^{-1}]U_{10}U_{20} + q_1(\lambda - \lambda_1)(p_2 - \\ & p_2\lambda_1)U_{10} + q_2\lambda U_{20} - q_2\lambda_1\lambda U_{10}U_{20}\} \mu_1^{-1} + \\ & p_2\lambda_1(-\lambda_1 U_{10} + \lambda U_{20}) \mu_2^{-1}\} / B(0), \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$B(0) = \lambda_1\lambda[p_2U_{10} - p_2U_{20} + q_2(\lambda - \lambda_1)U_{10}U_{20}] \quad (12)$$

4.2 系统的正常可用度和异常可用度

从系统开始工作到故障, 在任意时刻 t , 系统可能处于正常状态, 也可能处于异常状态. 系统在时刻 t 处于正常工作状态的概率 $P_1(t)$ 称为系统在时刻 t 的瞬时正常可用度; 系统在时刻 t 处于异常工作状态的概率 $P_2(t)$ 称为系统在时刻 t 的瞬时异常可用度. 根据系统的特征, 它们的表达式分别为

$$\begin{cases} P_1(t) = \int_0^t P_{1n}(t, x) dx, \\ P_2(t) = \int_0^t P_{2n}(t, x) dx. \end{cases} \quad (13)$$

对式(13)关于 t 取 Laplace 变换, 并利用式(1)~(8) 可得

$$\begin{cases} P_1^*(s) = (\lambda - \lambda_1)U_1[1 - q_2v + q_2(s + \lambda)vU_2]/B(s), \\ P_2^*(s) = \lambda[(1 - q_2v)U_1 - (1 - q_2v) \times U_2 + q_2(\lambda - \lambda_1)vU_1U_2]/B(s). \end{cases} \quad (14)$$

从系统开始工作到故障, 系统处于正常工作状态的平均时间 T_1 称为系统的平均正常工作时间, 系统处于异常工作状态的平均时间 T_2 称为系统的平均异常工作时间。根据上述定义进行概率分析, 并利用定积分元素法、Laplace 变换终值定理和积分性质, 可得

$$\begin{aligned} T_1 &= \int_0^{\infty} P_1(t) dt = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t P_1(t) dt = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \int_0^{\infty} P_1(t) dt = \lim_{s \rightarrow 0} P_1^*(s) = \\ &= (\lambda - \lambda_1)U_{10}(p_2 + q_2\lambda U_{20})/B(0), \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $B(0)$ 由式(12) 给出

同理, 可得系统平均异常工作时间

$$T_2 = \lambda_1[p_2U_{10} - p_2U_{20} + q_2(\lambda - \lambda_1)U_{10}U_{20}]/B(0). \quad (16)$$

4.3 系统的检测频度和异常检出频度

系统开始工作后, 为了判断是正常还是异常, 每隔一段随机时间 U 对系统检测一次。单位时间内对系统的平均检测次数称为系统的检测频度。根据文献[5] 中转移频度的计算方法和系统状态转移图, 在时刻 t 系统的瞬时检测频度为

$$W_1(t) = \int_0^t \alpha(x)[P_{1n}(t, x) + P_{2n}(t, x)] dx. \quad (17)$$

对式(17)关于 t 取 Laplace 变换, 并利用式(1)~(8) 可得

$$\begin{aligned} W_1^*(s) &= \\ &= \{(\lambda - \lambda_1)(1 - q_2v) - [q_2v\lambda_1 + (1 - q_2v)\lambda_2](s + \lambda_1)U_1 + [(1 - q_2v)\lambda_1 + q_2v\lambda_2](s + \lambda)vU_2 - q_2v(\lambda - \lambda_1) \times (s + \lambda)(s + \lambda)vU_1U_2\}/B(s). \end{aligned} \quad (18)$$

从系统开始工作到故障, 对系统的平均检测次

$$\begin{aligned} N_1 &= \int_0^{\infty} W_1(t) dt = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t W_1(t) dt = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \int_0^{\infty} W_1(t) dt = \lim_{s \rightarrow 0} W_1^*(s) = \\ &= [P_2(\lambda - \lambda_1) - \lambda_1(q_2\lambda_1 + p_2\lambda_2)U_{10} + \lambda_2(p_2\lambda_1 + q_2\lambda_2)U_{20} - q_2\lambda_1\lambda_2(\lambda - \lambda_1)U_{10}U_{20}]/B. \end{aligned} \quad (19)$$

根据系统检测结果, 单位时间内正确判断出系统处于异常状态的平均次数称为异常检出频度。利用上述方法可类似求出在时刻 t 异常的瞬时检出频度

$$W_2(t) = \int_0^t p_2\beta(z)P_{4n}(t, z) dz. \quad (20)$$

$W_2(t)$ 的 Laplace 变换式为

$$W_2^*(s) = p_2\lambda v[(s + \lambda)vU_2 - (s + \lambda)U_1]/B(s). \quad (21)$$

从系统开始工作到故障, 根据检测结果正确判断出系统处于异常状态的平均次数 N_2 称为异常的平均检出次数。利用计算 N_1 的方法容易求得

$$N_2 = p_2\lambda_1(\lambda U_{20} - \lambda U_{10})/B(0). \quad (22)$$

4.4 检测的误断频度和漏断频度

根据系统的特征, 检测结果有可能出现两类错误: 1) 将正常状态判断为异常状态, 这种错误称为误断; 2) 将异常状态判断为正常状态, 这种错误称为漏断。单位时间内出现误断的平均次数称为检测的误断频度; 单位时间内出现漏断的平均次数称为检测的漏断频度。根据系统状态转移图, 利用上述方法可类似得到系统在时刻 t 的瞬时误断频度, 即

$$\begin{cases} W_3(t) = \int_0^t q_1\beta(z)P_{2n}(t, z) dz, \\ W_4(t) = \int_0^t q_2\beta(z)P_{4n}(t, z) dz. \end{cases} \quad (23)$$

它们的 Laplace 变换式分别为

$$\begin{cases} W_3^*(s) = \\ q_1(\lambda - \lambda_1)v[1 - q_2v - (1 - q_2v)(s + \lambda)U_1 + q_2v(s + \lambda)U_2 - q_2v(s + \lambda)(s + \lambda)vU_1U_2]/B(s), \\ W_4^*(s) = q_2\lambda v[-(s + \lambda)U_1 + (s + \lambda)U_2]/B(s). \end{cases} \quad (24)$$

从系统开始工作到故障, 系统检测发生误断的平均次数称为检测的平均误断次数; 系统检测发生漏断的平均次数称为检测的平均漏断次数。根据定义易得检测的平均误断次数和平均漏断次数, 即

$$\begin{cases} N_3 = q_1(\lambda_2 - \lambda_1)(p_2 - p_2\lambda_1 U_{10} + \\ \quad q_2\lambda_2 U_{20} - q_2\lambda_1\lambda_2 U_{10} U_{20})/B(0), \\ N_4 = q_2\lambda_1(-\lambda_1 U_{10} + \lambda_2 U_{20})/B(0). \end{cases} \quad (25)$$

5 最优临界值和最优检测周期

为减少故障造成的损失并提高整体经济效益,需要寻找使系统获得最大利润的最优诊断参数临界值和最优检测周期。系统从前期投资到开始工作,再运行到故障,可能经历准备工作、正常工作、异常工作、检测和修理等各种状态,系统工作时将获得利润,检测和修理时需要投入。根据系统状态转移图和上节有关结果,可导出系统在该时间段内获得的平均总利润 L 为

$$L = R_1 T_1 + R_2 T_2 - L_0 - L_4 - \sum_{i=1}^3 L N_i \quad (26)$$

系统前期准备时间、善后工作平均时间与故障前平均时间之和 $T_0 + T_4 + E(T)$,称为系统的总平均运行时间;系统在总平均运行时间内,单位时间的平均利润 L_u 称为系统的平均利润率。显然,平均利润率 L_u 等于平均总利润 L 与总平均运行时间之比,即

$$L_u = L / [T_0 + T_4 + E(T)] \quad (27)$$

要确定诊断参数的最优临界值和最优检测周期,只需适当选择 x_1 和随机检测周期 U 的分布函数 $H(x)$ 中参数值,使利润率函数 L_u 取得最大值。例如采用固定检测周期,即当 $U = x_2$ 时立即检测,此时只需取下式即可:

$$\begin{cases} U(t) = \begin{cases} 0, & t < x_2; \\ 1, & t \geq x_2; \end{cases} \\ U_{i0} = \lambda_i^{-1} [1 - \exp(-\lambda_i x_2)]; \\ i = 1, 2 \end{cases} \quad (28)$$

另外,如果系统的诊断参数服从正态分布(当不服从正态分布时,可利用其分布函数类似地计算),在系统正常和异常状态下,其均值和方差分别为 (u_1, σ_1^2) 和 (u_2, σ_2^2) ,此时有

$$F_i(x) = \Phi[(x - u_i)/\sigma_i], \quad i = 1, 2$$

其中 $\Phi(x)$ 表示标准正态分布函数。由系统的特征可知

$$\begin{cases} p_1 = \Phi[(x_1 - u_1)/\sigma_1], \\ q_1 = 1 - \Phi[(x_1 - u_1)/\sigma_1], \\ p_2 = 1 - \Phi[(x_1 - u_2)/\sigma_2], \\ q_2 = \Phi[(x_1 - u_2)/\sigma_2] \end{cases} \quad (29)$$

将式(29)代入式(27),易知利润率函数 L_u 是 x_1 和 x_2 的有明显解析表达式的二元函数,记为 $L_u = L_u(x_1, x_2)$ 。诊断参数的最优临界值和系统的最优检测周期,就是函数 $L_u = L_u(x_1, x_2)$ 的最大值点 (x_1^*, x_2^*) 。该最优值使系统在总平均运行时间中,单位时间内获得的平均利润最大,可用分析方法或数值方法求出该最优值。

例1 某系统的前期投入 $L_0 = 105\,000$ 元,前期准备时间 $T_0 = 140$ h,其他运行参数如下: $\lambda_1^{-1} = 1\,120$ h, $\lambda_2^{-1} = 228$ h, $\mu_1^{-1} = 14$ h, $\mu_2^{-1} = 56$ h, $\beta^{-1} = 6$ h, $R_1 = 1\,950$ 元/h, $R_2 = 1\,205$ 元/h, $L_1 = 1\,400$ 元/次, $L_2 = 24\,500$ 元/次, $L_3 = 1\,750$ 元/次, $L_4 = 12\,650$ 元, $T_4 = 80$ h。当系统正常工作时,诊断参数服从正态分布 $N(68, 14^2)$;当系统处于异常状态时,诊断参数服从正态分布 $N(102, 19^2)$ 。采用固定检测周期并利用微机,容易由式(26)~(29)得到诊断参数的最优临界值和最优检测周期 $(x_1^*, x_2^*) = (83\,808.4, 148\,625)$,系统每小时获得的最大平均利润

$$L_u = L_u(x_1^*, x_2^*) = L_u(83\,808.4, 148\,625) = 1\,614.72 \text{ 元}$$

6 结论

本文综合研究一类系统的故障诊断和检测策略问题。在系统处于正常和异常状态的时间分别服从参数不同的指数分布,系统的修理时间是一般连续型随机变量,诊断参数和检测周期是任意随机变量的假定下,定义了系统的一些新的运行指标,并利用概率分析、补充变量和最优化方法求出这些运行指标。以此为基础,进一步求出诊断参数的最优临界值和最优检测周期,该最优值使系统在从开始投资到故障善后结束这段总平均时间中,单位时间内获得的平均利润最大。最后的算例说明本文方法是有效的。

参考文献(References):

- [1] Thomas S C, Gaver D P, Jacobs P A. Inspection models and their application [J]. *IMA J of Mathematics Applied in Business and Industry*, 1991, 34(3): 283-304.
- [2] Chelbi A, Ait Kadi D. An optimal inspection strategy for randomly failing equipment [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1999, 63(2): 127-131.

(下转第142页)

(15), 并忽略 $O(\lambda)$ 高阶项, 可求得顶事件的模糊故障概率为

$$\tilde{\Phi}_\lambda = [0.0091 + 0.0009\lambda, 0.0109 - 0.0009\lambda]$$

当 $\lambda = 1$ 时, $\tilde{\Phi}_\lambda = 0.01$, 即各底事件发生的概率不具有模糊性时, 悬浮系统发生故障而不能工作的概率为 1%; 当 $\lambda = 0$ 时, $\tilde{\Phi}_\lambda = [0.0091, 0.0109]$, 即当各底事件模糊性很明显, 故障概率的不确定性较大时, 悬浮系统失效的概率在 0.91% ~ 1.09% 之间变化

5 故障诊断算法研究

当悬浮系统发生故障时, 需要快速查找故障源并对故障予以排除。悬浮系统的故障诊断主要是通过对所建故障树的节点逐层搜索来完成, 诊断算法实现时利用各事件模糊故障概率(参考历史数据)作为启发信息, 采用广度优先搜索技术, 对树中的所有故障进行查找, 直到最深层所有叶子节点被搜索为止。故障诊断程序流程如下:

- 1) 若悬浮系统故障 TX 事件没有发生, 程序跳转至 5);
- 2) 取下一层节点集 Q , 计算 Q 的模糊概率均值并对其排序 $\text{Sort}(Q)$, 若节点集 Q 为空集, 转 5);
- 3) 节点 $\text{TestOne} = \text{first}(Q)$, $\text{Remove}(\text{TestOne}, Q)$, 若 TestOne 发生故障, 记录故障;
- 4) 若节点集 Q 为空集, 程序跳转至 2); 否则, 程序跳转至 3);
- 5) 显示故障诊断结果, 结束

6 结 语

本文在介绍悬浮系统工作原理的基础上, 建造了磁悬浮列车悬浮系统的模糊故障树并对其作了定

量分析。通过分析可知, 在充分考虑各事件故障概率的不确定性时, 悬浮系统失效的概率在 0.91% ~ 1.09% 之间变化, 尽管这一分析结果具有一定的模糊性, 但比用精确的概率分析更有实际意义, 更能说明悬浮系统的可靠性程度。通过对悬浮系统的故障诊断算法进行研究, 并在首尾车的主监控计算机内进行了实验, 因故障树搜索时利用了各事件的模糊概率作为启发信息, 所以提高了诊断搜索过程的速度。

参考文献(References):

- [1] 徐章遂, 房立清, 王希武, 等. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 58-95.
- [2] Long Zhiqiang, Lu Zhiguo, Hong Huajie. Reliability design and analysis of auto-monitoring system on maglev train [A]. *The 5th Int Conf on Reliability, Maintainability and Safety* [C]. Hong Kong: Technology Exchange Ltd, 2001: 475-480.
- [3] 赵艳萍, 贡文伟. 模糊故障树分析及其应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(6): 31-35.
(Zhao Yanping, Gong Wenwei. Fuzzy fault tree analysis and its application [J]. *J of China Safety Science*, 2001, 11(6): 31-35.)
- [4] 史定华, 王松瑞. 故障树分析技术、方法和理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1993: 5-20.
- [5] 左健民, 王书城. 基于模糊故障树理论的液压系统故障诊断方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(6): 716-720.
(Zuo Jianmin, Wang Shucheng. Research of fault diagnosis system in hydraulic system based on fuzzy fault tree analysis method [J]. *J of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 1999, 31(6): 716-720.)

(上接第 138 页)

- [3] Su Bao-he. An optimal inspection and diagnosis policy for a multimode system [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002, 76(2): 181-188.
- [4] 苏保河. 四状态可修系统的可靠性和检测策略研究[J]. 自动化学报, 1999, 25(1): 100-104.

- (Su Bao-he. Reliability and check study of a four-mode system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(1): 100-104.)
- [5] 史定华. 随机模型的密度演化方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 81-122.