

特殊状态需要特殊修理的诊断可修系统

刘宝友¹ 苏保河²

¹(石家庄铁道学院基础部 石家庄 050043)

²(暨南大学珠海学院 珠海 519070)

摘要 研究了特殊状态需要特殊修理的诊断可修系统. 假设系统有三种运行状态: 正常状态、异常状态和故障状态, 有些异常状态和故障状态需要特殊的修理, 但哪些异常状态和故障状态需要特殊修理必须诊断后才能知道. 利用概率分析和补充变量方法, 求得了系统的重要可靠性指标.

关键词 特殊异常状态, 特殊故障状态, 特殊修理, 诊断, 可靠性指标

中图分类号 TP277

DIAGNOSTIC REPAIRABLE SYSTEM OF SPECIAL STATE AND SPECIAL REPAIR

LIU Bao-You¹ SU Bao-He²

¹(Department of Basic Courses, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043)

²(Zhuhai College, Jinan University, Zhuhai 519070)

Abstract This paper deals with the diagnostic repairable system of special state and special repair. Assume that the system has three modes: normal, partial failure and total failure. Some partial failure and total failure need special repair. It must be diagnosed to make sure which partial failure and total failure need special repair. By using probability analysis and supplementary variable method, the reliability index is obtained.

Key words Special partial failure, special total failure, special repair, diagnosis, reliability index

1 引言

系统通常有三种运行状态: 正常状态、异常状态和故障状态. 前二者为系统的工作状态, 但异常状态为不正常的工作状态, 因此系统的异常状态和故障状态均需修理. 由于种种原因, 系统的维修人员不能修理所有的异常状态和故障状态. 例如: 很多国家从国外引进了先进的设备, 同时培训了相关的人员管理和维护这些设备. 由于培训的时间、经费和人员素质的限制, 这些人员并不能修理设备运行过程中出现的所有异常状态和故障状态. 当他们遇

到较罕见的解决不了的问题时,必须请出口单位的专家来解决,由于专家不在现场,所以必须等待修理. 地方政府和地方司法机构解决不了管理和司法系统中出现的所有问题,当国家的有些政策或法律的某些内容不能适应形势发展时,地方政府和司法机构无权进行调整和修改,只能等待国家高级权力机构进行调整和修改. 地方的普通人员不能解决大江、大河防洪系统中由特大洪水造成的管涌、漫堤等异常状态和决堤等故障状态. 针对这一重要事实给出如下定义:称不能修理系统所有的异常状态和故障状态的维修人员或机构为系统的一般修理工,称他们能解决的异常状态和故障状态分别为一般异常状态和一般故障状态;称他们不能解决的异常状态和故障状态分别为特殊异常状态和特殊故障状态;称能修理特殊异常状态和特殊故障状态的人员或机构为系统的特殊修理工. 当系统处于工作状态时由一般修理工进行诊断系统处于正常状态还是异常状态,当诊断系统处于异常状态时,系统停止运行. 当系统处于故障状态时由一般修理工诊断是一般故障状态还是特殊故障状态. 当诊断为一般异常状态和一般故障状态时,一般修理工立即进行修理. 当诊断为特殊异常状态和特殊故障状态时,系统必须等待特殊修理工进行特殊修理. 有学者研究过只有正常和故障两种运行状态的可修系统^[1,2],也有学者研究过三种运行状态的可修系统^[3~6],但均未考虑上述重要事实.

2 系统的假定

系统的假定如下

1) 在系统的三种运行状态中,异常状态又分为一般异常状态和特殊异常状态,故障状态又分为一般故障状态和特殊故障状态. 当系统处于正常状态时,分别以失效率 $\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}$ 转移到一般故障状态、特殊故障状态、一般异常状态和特殊异常状态. 当系统处于一般异常状态时,以失效率 a_{31} 转移到一般故障状态. 当系统处于特殊异常状态时,以失效率 a_{41} 转移到特殊故障状态.

2) 系统有一般修理工和特殊修理工. 一般修理工只能修理一般异常状态和一般故障状态. 特殊异常状态和特殊故障状态只有特殊修理工才能修理. 系统处于哪种状态由一般修理工进行诊断后才能知道,不会误诊. 当系统处于正常状态、一般故障状态、特殊故障状态、一般异常状态、特殊异常状态时需要的诊断时间分别服从分布函数为 $G_{01}(t), G_{11}(t), G_{21}(t), G_{31}(t), G_{41}(t)$ 的连续型分布. 当诊断为一般故障状态和一般异常状态时,一般修理工立即进行修理,修理时间分别服从分布函数为 $G_{13}(t), G_{33}(t)$ 的连续型分布. 当诊断为特殊故障状态和特殊异常状态时,系统等待修理,等待时间分别服从分布函数为 $G_{22}(t), G_{42}(t)$ 的连续型分布. 特殊修理工到系统现场后立即进行修理. 特殊修理工修理特殊故障和特殊异常状态的时间分别服从分布函数为 $G_{23}(t), G_{43}(t)$ 的连续型分布. $G_{ij}(t) = \int_0^t g_{ij}(x) dx = 1 - \exp\left(-\int_0^t b_{ij}(x) dx\right), \mu_{ij}^{-1} = \int_0^\infty t dG_{ij}(t), (ij) = (0,1), (1,1), (2,1), (3,1), (4,1), (2,2), (4,2), (1,3), (2,3), (3,3), (4,3)$.

3) 系统修复如新,各随机变量互相独立.

4) 开始时系统处于正常状态.

定义系统的状态如下

状态 $(0, 1, n)$ 表示系统处于正常诊断状态且已被诊断过 n 次, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. 状态 (i, j) 表示: $i = 1, 2, 3, 4$ 分别代表系统处于一般故障状态、特殊故障状态、一般异常状态和特殊异常状态, $j = 1, 2, 3$ 分别表示诊断、等待修理和修理. $(i, j) = (1, 1), (2, 1), (3, 1), (4, 1), (2, 2), (4, 2), (1, 3), (2, 3), (3, 3), (4, 3)$.

用 $S(t)$ 表示系统在 t 时刻所处的状态, 引入补充变量: $X_{01}(t)$ 表示当 $S(t) = (0, 1, n)$ 时系统用去的诊断时间. $X_{i1}(t)$ 表示当 $S(t) = (i, 1)$ 时系统用去的诊断时间, $i = 1, 2, 3, 4$. $Z_{i2}(t)$ 表示 $S(t) = (i, 2)$ 时系统用去的等待时间, $i = 2, 4$. $Y_{i3}(t)$ 表示 $S(t) = (i, 3)$ 时系统用去的修理时间, $i = 1, 2, 3, 4$. 引入补充变量后, 得到高维马尔可夫过程.

系统 t 时刻的状态概率定义如下

$$P_{01n}(t, x)dx = P\{S(t) = (0, 1, n), x \leq X_{01}(t) < x + dx\}, n = 0, 1, 2, 3, \dots;$$

$$P_{i1}(t, x)dx = P\{S(t) = (i, 1), x \leq X_{i1}(t) < x + dx\}, i = 1, 2, 3, 4;$$

$$P_{i2}(t, z)dz = P\{S(t) = (i, 2), z \leq Z_{i2}(t) < z + dz\}, i = 2, 4;$$

$$P_{i3}(t, y)dy = P\{S(t) = (i, 3), y \leq Y_{i3}(t) < y + dy\}, i = 1, 2, 3, 4.$$

系统的所有状态及其转移情况由图 1 表示.

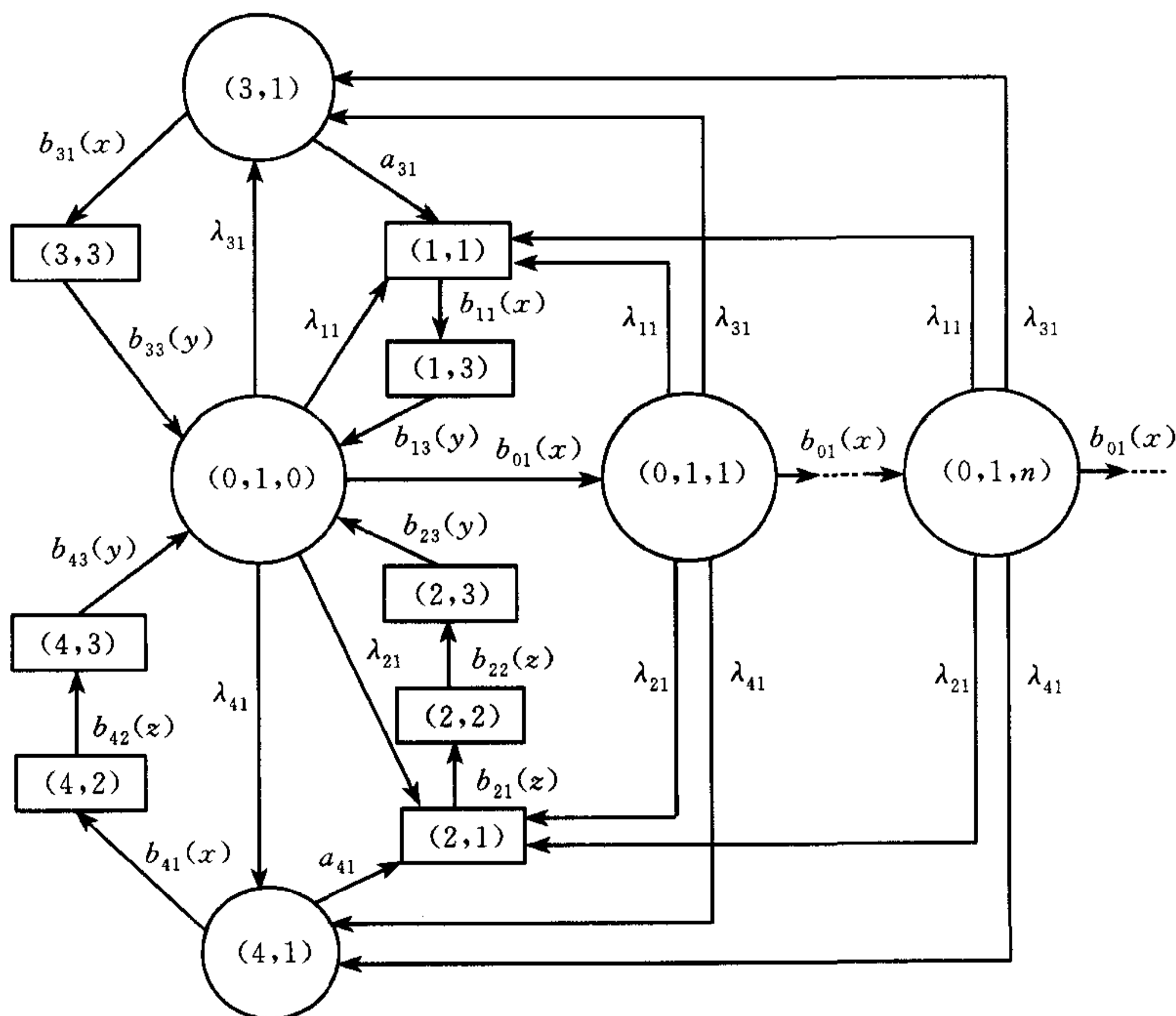


图 1 系统状态转移图

注. ○ 工作状态 □ 故障状态

3 系统的可靠性指标

根据系统假定, 利用图 1 对各状态进行概率分析可得状态概率的微积分方程组, 利用

方程组解的 Laplace 变换可求得系统可靠性指标^[2,4]. 文中出现的 $c(s)$, c 均由如下两式给出

$$c^{-1}(s) = s + \sum_{i=1}^4 \lambda_{i1} - \{ [\lambda_{11} + \lambda_{31} a_{31} \bar{G}_{31}^*(s + a_{31})] g_{11}^*(s) g_{13}^*(s) + [\lambda_{21} + \lambda_{41} a_{41} \bar{G}_{41}^*(s + a_{41})] \times \\ g_{21}^*(s) g_{22}^*(s) g_{23}^*(s) + \lambda_{31} g_{31}^*(s + a_{31}) g_{33}^*(s) + \lambda_{41} g_{41}^*(s + a_{41}) g_{42}^*(s) g_{43}^*(s) \} \quad (1)$$

$$c^{-1} = 1 + \lambda_{31} \bar{G}_{31}^*(a_{31}) + \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41}) + \frac{\lambda_{31} g_{31}^*(a_{31})}{\mu_{33}} + \lambda_{41} g_{41}^*(a_{41}) \left[\frac{1}{\mu_{42}} + \frac{1}{\mu_{43}} \right] + \\ [\lambda_{11} + \lambda_{31} a_{31} \bar{G}_{31}^*(a_{31})] \left[\frac{1}{\mu_{11}} + \frac{1}{\mu_{13}} \right] + [\lambda_{21} + \lambda_{41} a_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41})] \left[\frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{22}} + \frac{1}{\mu_{23}} \right] \quad (2)$$

3.1 可用度

系统 t 时刻的可用度 $A(t)$ 的 Laplace 变换 $A^*(s)$ 和稳态可用度 A 分别为

$$A^*(s) = [1 + \lambda_{31} \bar{G}_{31}^*(s + a_{31}) + \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(s + a_{41})] c(s) \quad (3)$$

$$A = [1 + \lambda_{31} \bar{G}_{31}^*(a_{31}) + \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41})] c \quad (4)$$

3.2 特殊异常状态频度、特殊异常状态漏检频度、特殊故障状态频度

3.2.1 特殊异常状态频度

系统 t 时刻单位时间内从正常状态转移到特殊异常状态的平均次数称为瞬时特殊异常状态频度, 用 $W_{41}(t)$ 表示. 系统在 $(0, t]$ 这段时间内从正常状态转移到异常状态平均次数称为 $(0, t]$ 内的特殊异常状态频度, 用 $M_{41}(t)$ 表示. 称 $M_{41} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{M_{41}(t)}{t}$ 为系统稳态特殊异常状态频度. 由文献[2]有

$$W_{41}(t) = \lambda_{41} \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^{\infty} P_{01k}(t, x) dx \quad (5)$$

$$M_{41}(t) = \int_0^t W_{41}(x) dx \quad (6)$$

$W_{41}(t)$ 的 Laplace 变换和系统的稳态特殊异常状态频度为

$$W_{41}^*(s) = \lambda_{41} c(s) \quad (7)$$

$$M_{41} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{M_{41}(t)}{t} = \lim_{s \rightarrow 0} s W_{41}^*(s) = \lambda_{41} c \quad (8)$$

3.2.2 特殊异常状态漏检频度

若系统处于特殊异常状态且在转移到特殊故障状态之前又未被诊断出来, 则称发生一次漏检. 依照 3.2.1 中的定义可定义瞬时漏检频度, $(0, t]$ 这段时间内的漏检频度及稳态漏检频度, 分别用 $W_{42}(t)$, $M_{42}(t)$, M_{42} 表示. 由文献[2]有

$$W_{42}(t) = a_{41} \int_0^{\infty} P_{41}(t, x) dx \quad (9)$$

$$M_{42}(t) = \int_0^t W_{42}(x) dx \quad (10)$$

$W_{42}(t)$ 的 Laplace 变换和系统的稳态特殊异常状态漏检频度为

$$W_{42}^*(s) = c(s) \lambda_{41} a_{41} \bar{G}_{41}^*(s + a_{41}) \quad (11)$$

$$M_{42} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{M_{42}(t)}{t} = \lim_{s \rightarrow 0} s W_{42}^*(s) = a_{41} \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41}) c \quad (12)$$

3.2.3 特殊故障状态频度

仿照 3.2.1 中定义, 可定义系统的瞬时特殊故障状态频度, $(0, t]$ 内特殊故障状态频

度,稳态特殊故障状态频度,分别用 $W_{21}(t), M_{21}(t), M_{21}$ 表示,由文献[2]有

$$W_{21}(t) = a_{41} \int_0^{\infty} P_{41}(t, x) dx + \lambda_{21} \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^{\infty} P_{01k}(t, x) dx \quad (13)$$

$$M_{21}(t) = \int_0^t W_{21}(x) dx \quad (14)$$

$W_{21}(t)$ 的 Laplace 变换和系统稳态故障频度为

$$W_{21}^*(s) = [\lambda_{21} + \lambda_{41} a_{41} \bar{G}_{41}^*(s + a_{41})] c(s) \quad (15)$$

$$M_{21} = [\lambda_{21} + a_{41} \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41})] c \quad (16)$$

以上三个指标在系统中非常重要,指标的大小与一般修理工的配置和系统本身有关.如果系统的一般修理工水平较低,达不到系统要求水平,那么就会有较多的异常状态和故障状态不能处理或较多的异常状态漏检,导致三个指标过大.例如,有些国家的某些单位尽管引进了先进设备,但由于使用这些设备的人员管理和技术水平低,导致较多的异常情况和故障情况不能处理.如果系统本身不完善,也会导致三个指标过大.例如,如果大江大河的防洪系统质量差、功能低下,那么不论为系统配备什么样的一般修理工,总会有较多的洪灾造成的异常状态和故障不能处理.再如司法系统中如果法律本身不健全,那么无论什么人执法总会有很多处理不了的问题.因此上述三个指标是为系统配备和改进配备一般修理工的依据,也是改进系统本身的依据.

3.3 系统特殊状态等待修理的概率、特殊状态修理概率、特殊状态概率

3.3.1 系统特殊状态等待修理的概率

t 时刻系统等待修理的概率 $P_2(t)$ 的 Laplace 变换和系统稳态等待修理的概率为

$$P_2^*(s) = \{ \lambda_{41} g_{41}^*(s + a_{41}) \bar{G}_{42}^*(s) + [\lambda_{21} + \lambda_{41} a_{41} \bar{G}_{41}^*(s + a_{41})] g_{21}^*(s) \bar{G}_{22}^*(s) \} c(s) \quad (17)$$

$$P_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_2(t) = \lim_{s \rightarrow 0} P_2^*(s) = c \left[\frac{\lambda_{41} g_{41}^*(a_{41})}{\mu_{42}} + \frac{\lambda_{21} + \lambda_{41} a_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41})}{\mu_{22}} \right] \quad (18)$$

3.3.2 系统特殊状态修理概率

t 时刻系统处于特殊修理状态的概率 $P_3(t)$ 的 Laplace 变换和系统稳态特殊修理的概率为

$$P_3^*(s) = c(s) \{ [\lambda_{21} + a_{41} \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(s + a_{41})] g_{21}^*(s) g_{22}^*(s) \bar{G}_{23}^*(s) + \lambda_{41} g_{41}^*(s + a_{41}) g_{42}^*(s) \bar{G}_{43}^*(s) \} \quad (19)$$

$$P_3 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_3(t) = \lim_{s \rightarrow 0} P_3^*(s) = c \left[\frac{\lambda_{21} + a_{41} \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41})}{\mu_{23}} + \frac{\lambda_{41} g_{41}^*(a_{41})}{\mu_{43}} \right] \quad (20)$$

3.3.3 系统处于特殊状态的概率

t 时刻系统处于特殊状态的概率 $P_{24}(t)$ 的 Laplace 变换和系统稳态特殊状态概率为

$$P_{24}^*(s) = c(s) \{ \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(s + a_{41}) + \lambda_{41} g_{41}^*(s + a_{41}) \bar{G}_{42}^*(s) + \lambda_{41} g_{41}^*(s + a_{41}) g_{42}^*(s) \bar{G}_{43}^*(s) + [\lambda_{21} + a_{41} \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(s + a_{41})] [\bar{G}_{21}^*(s) + g_{21}^*(s) \bar{G}_{22}^*(s) + g_{21}^*(s) g_{22}^*(s) \bar{G}_{23}^*(s)] \} \quad (21)$$

$$P_{24} = \lim_{s \rightarrow 0} P_{24}^*(s) =$$

$$c \left\{ \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41}) + \lambda_{41} g_{41}^*(a_{41}) \left(\frac{1}{\mu_{42}} + \frac{1}{\mu_{43}} \right) + [\lambda_{21} + a_{41} \lambda_{41} \bar{G}_{41}^*(a_{41})] \left(\frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{22}} + \frac{1}{\mu_{23}} \right) \right\} \quad (22)$$

上面三个指标也是非常重要的,特殊状态等待修理概率反映了系统对特殊情况处理的反应速度,或对特殊状态负有维修责任的单位对特殊维修要求的反应快慢程度.因此这个指

标对于那些要求对特殊情况反映速度较高的系统如自动化系统,军事防御系统等是非常重要的.特殊状态修理概率反映了系统对特殊情况的处理能力或负有维修责任的单位的修理能力.系统处于特殊状态的概率反映了系统本身的功能和系统对特殊状态的总体处理水平.

3.4 系统首次进入特殊异常状态及特殊故障状态的时间

令状态(4,1),(2,1)为吸收状态,可列出各状态概率微积分方程组,利用其解的 Laplace 变换可得系统 t 时刻不被吸收的概率 $P(t)$ 的 Laplace 变换为

$$P^*(s) = \{1 + [\lambda_{11} + \lambda_{31}a_{31}\bar{G}_{31}^*(s + a_{31})][\bar{G}_{11}^*(s) + g_{11}^*(s)\bar{G}_{13}^*(s)] + \lambda_{31}\bar{G}_{31}^*(s + a_{31}) + \lambda_{31}g_{31}^*(s + a_{31})\bar{G}_{33}^*(s)\}c_1(s) \quad (23)$$

其中 $c_1(s)$ 由下式给出

$$c_1^{-1}(s) = s + \sum_{i=1}^4 \lambda_i - [\lambda_{11} + \lambda_{31}a_{31}\bar{G}_{31}^*(s + a_{31})]g_{11}^*(s)g_{13}^*(s) - \lambda_{31}g_{31}^*(s + a_{31})g_{33}^*(s) \quad (24)$$

系统首次进入特殊异常状态或特殊故障状态前的平均时间

$$\text{MTTFSF} = \int_0^{\infty} P(t)dt = \lim_{s \rightarrow 0} P^*(s) = \left\{1 + [\lambda_{11} + \lambda_{31}a_{31}\bar{G}_{31}^*(a_{31})] \left(\frac{1}{\mu_{11}} + \frac{1}{\mu_{13}}\right) + \frac{\lambda_{31}g_{31}^*(a_{31})}{\mu_{33}} + \lambda_{31}\bar{G}_{31}^*(a_{31})\right\} \frac{1}{\lambda_{21} + \lambda_{41}} \quad (25)$$

系统首次进入特殊状态前的平均时间也是系统的重要指标,系统首次进入特殊状态前时间越长开始效益越好,为系统的可持续发展提供条件.

结果表明系统所有上述可靠性指标与系统正常状态时的诊断时间分布毫无关系.这是符合实际情况的,因为正常状态时的诊断不影响系统的运行情况,但正常状态时的诊断是必要的.

参 考 文 献

- 1 曹晋华,程侃. 可靠性数学引论. 北京:科学出版社,1986
- 2 史定华. 计算可修系统在 $(0, t]$ 中平均故障次数的新方法. 应用数学学报, 1985, 8(1):351~356
- 3 Schneeweiss W G. Duration of hidden faults in randomly checked systems. *IEEE Trans. Reliab.* 1977, 26(3):328~330
- 4 Su Bao-He. On a two-dissimilar-unit system with three modes and random check. *Microelectron. Reliab.*, 1997, 37(8):1233~1238
- 5 苏保河. 系统的故障诊断和检测策略研究. 系统工程学报, 1998, 13(4):98~103
- 6 苏保河. 系统可靠性与最优检测周期的综合研究. 应用数学与计算数学学报, 1998, 12(1):29~36

刘宝友 1988年毕业于西安交通大学数学系应用数学与计算数学研究生班,现为石家庄铁道学院基础部讲师.主要研究兴趣为可靠性理论与应用.

苏保河 见本期 119 页.

$$M_3(u, v) = p_2 \lambda \lambda_2 \lambda_3 (e^{-\lambda u} - e^{-\lambda_3 u}) / b(u, v) \quad (8)$$

$$M_4(u, v) = \lambda \lambda_3 [(\lambda_3 - \lambda_1) e^{-\lambda u} - \lambda_2 e^{-\lambda_3 u} - q_2 (\lambda_3 - \lambda) e^{-(\lambda + \lambda_3) u}] / b(u, v) \quad (9)$$

4) 系统检测的误断频度和漏断频度

单位时间内系统检测发生误断(漏断)的平均次数称为系统的误断(漏断)频度. 在时刻 t 系统的瞬时误断频度 $W_5(t, u, v)$ 和漏断频度 $W_6(t, u, v)$ 的 L 变换式分别为

$$W_5^*(s, u, v) = q_1 (\lambda_3 - \lambda) (s + \lambda) (s + \lambda_3) [e^{-(s+\lambda)u} - q_2 e^{-(2s+\lambda+\lambda_3)u}] / C(s, u, v),$$

$$W_6^*(s, u, v) = q_2 \lambda_2 (s + \lambda) (s + \lambda_3) [e^{-(s+\lambda)u} - e^{-(s+\lambda_3)u}] / C(s, u, v).$$

在平稳状态下, 系统检测的误断频度和漏断频度分别为

$$M_5(u, v) = q_1 \lambda \lambda_3 (\lambda_3 - \lambda) [e^{-\lambda u} - q_2 e^{-(\lambda + \lambda_3) u}] / b(u, v) \quad (10)$$

$$M_6(u, v) = q_2 \lambda \lambda_2 \lambda_3 (e^{-\lambda u} - e^{-\lambda_3 u}) / b(u, v) \quad (11)$$

3 系统的最优检测策略

根据系统假定和上节有关结果, 可以导出系统的最优检测策略, 即系统的最优检测周期和诊断参数的最优临界值. 在时间段 $[0, t]$ 内, 系统在正常和异常状态下的平均工作时间 $D_1(t, u, v), D_2(t, u, v)$, 系统发生正常和异常故障的平均次数 $E_1(t, u, v), E_2(t, u, v)$, 修理系统异常状态的平均次数 $E_3(t, u, v)$, 对系统检测的平均次数 $E_4(t, u, v)$ 和修理系统正常状态的平均次数 $E_5(t, u, v)$ (因为发生了误断) 分别为

$$D_i(t, u, v) = \int_0^t A_i(t, u, v) dt, \quad i=1, 2, \quad E_i(t, u, v) = \int_0^t W_i(t, u, v) dt, \quad i=1, 2, 3, 4, 5.$$

系统在 $[0, t]$ 内获得的平均利润 $L(t, u, v)$ 的 L 变换式为

$$L^*(s, u, v) = \left[\sum_{i=1}^2 R_i A_i^*(s, u, v) - \sum_{i=1}^5 E_i W_i^*(s, u, v) \right] / s;$$

在平稳状态下, 系统单位时间内获得的平均利润为

$$L(u, v) = \lim_{t \rightarrow \infty} L(t, u, v) / t = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 L^*(s, u, v) = \sum_{i=1}^2 R_i A_i(u, v) - \sum_{i=1}^5 E_i M_i(u, v) \quad (12)$$

由式(1), (2)可知, p_1, q_1, p_2, q_2 均为 v 的函数, 故 $L(u, v)$ 是关于检测周期 u 和诊断参数临界值 v 的有明显解析表达式的二元函数. 系统的最优检测周期 $u^\#$ 和诊断参数的最优临界值 $v^\#$ 就是 $L(u, v)$ 的最大值点 $(u^\#, v^\#)$, 该最优值使系统在平稳状态下单位时间内获得的利润最大.

参 考 文 献

- 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论. 北京: 科学出版社, 1986
- Luss H. An inspection policy model for production facilities. *Management Science*, 1983, **29**:1101~1109
- Su Baohe. On a two-dissimilar-unit system with three modes and random check. *Microelectron. Reliab.*, 1997, **37**(8):1233~1238
- 苏保河. 四状态可修系统的可靠性和检测策略研究. 自动化学报, 1999, **25**(1):100~104
- 史定华. 计算可修系统在 $(0, t]$ 中平均故障次数的新方法. 应用数学学报, 1985, **8**(1):101~110

苏保河 1982年毕业于石家庄铁道学院师资班, 现为暨南大学珠海学院教授. 主要研究兴趣为可靠性理论与应用、系统的检测策略与故障诊断.