

多传感器融合系统的可靠性模型研究

李 军, 刘君华

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为有效评价多传感器融合系统硬件的可靠性, 提出了一种新的三模冗余结构 (TMR) 半马尔可夫过程模型. 该模型以系统单元寿命服从负指数分布、系统单元修复时间服从广义任意分布 (修复率是时间的函数) 为前提, 通过引入补充变量, 可以转化为马尔可夫过程模型进行求解, 从而获取系统有效性和可靠性的一些重要指标. 理论分析和数值结果表明, 传统可靠性建模的方法可以作为新模型简化的特例, 利用新模型的 TMR 冗余结构多传感器融合系统与无冗余的单传感器系统相比, 系统的平均无故障时间 (MTBF) 提高了两个数量级. 因此, 提出的新模型可以准确地描述系统的实际工作状况, 为有效评估多传感器融合系统可靠性提供了理论依据.

关键词: 多传感器融合系统; 半马尔可夫过程; 有效性; 可靠性

中图分类号: TP274.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)08-0775-04

Study of Reliability Model for the Multi-Sensor Fusion System

Li Jun, Liu Junhua

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel semi-Markov process model based on three-model redundant (TMR) architecture is proposed to effectively evaluate the hardware reliability for multi-sensor fusion system. The semi-Markov process mode is established under the condition that the natural life of each unit of the system is assumed to conform with a negative exponential distribution and repair time of each unit with generalized arbitrary distribution where the repair rate is considered as a function of time. Simultaneously, the novel model is converted to Markov process model by supplementary variable, and then some universal reliability and availability indices of the system model are obtained. Theoretical analysis and numerical result confirm that the traditional method can be regarded as a special case of the proposed model. Furthermore mean time between fail (MTBF) of the TMR system employing proposed model for the multi-sensor fusion two order of magnitude increases over the single sensor system. The semi-Markov process model illustrates more accurately the operating characteristics of the system and provides theoretical basis to evaluate effectively the reliability of the multi-sensor fusion system.

Keywords: multi-sensor fusion system; semi-Markov process; availability; reliability

多传感器融合系统是指对来自多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理与综合, 从而获得更精确、更可靠的有用信息与结果. 与只采用单一传感器的系统相比, 来自多个传感器的信息具有冗余性、互补性、关联性, 基于分布式多传感器的融

合系统具有很强的容错性能, 可靠性高. 评价多传感器融合系统的硬件可靠性对于多传感器融合系统的配置具有一定指导意义^[1-3]. 本文对多传感器融合系统硬件冗余配置的可靠性建模进行了研究, 并针对典型的三模冗余 (TMR) 结构配置, 给出表征系统可

收稿日期: 2003-12-02 作者简介: 李 军 (1969~), 男, 博士生; 刘君华 (联系人), 女, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60276037).

靠性的半马尔可夫过程模型^[4,5]及相应的可靠性指标,为该类系统的可靠性评价和建模提供理论指导.

1 系统模型建立

多传感器融合系统的硬件冗余结构如图1所示.在该传感器融合系统中,根据 Marzullo^[6]的结论,认为只要有一半以上的传感器正常工作,该系统就能得到准确的输出.因此,该系统可靠度的模型为 $(N, N/2 + 1)$ 并联结构,即在由这 N 个传感器构成的冗余系统中,当有 $N/2 + 1$ 个或 $N/2 + 1$ 以上个传感器正常工作时,系统就可以正常工作.基于这一表决系统模型,我们可以对系统的硬件可靠性进行分析.

以具有代表性的 TMR (三取二) 冗余表决结构配置的多传感器系统为例,建立多传感器融合系统硬件可靠性的一种模型.

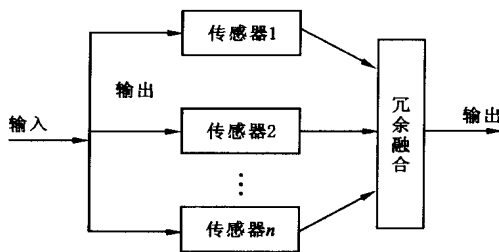


图1 多传感器表决冗余结构

在分析系统可靠性指标时,为了问题的简化,传统方法往往认为设备的失效率、修复率均为常数,建立系统马尔可夫过程模型进行求解^[3].本文以更普遍的情形分析,认为修理时间服从任意分布,即单位时间内的修复率是时间的函数,这是因为修理时间 T 与维修人员、维修方式的先进程度有关.由此建立多传感器融合系统可修复 TMR 冗余结构的一种半马尔可夫过程模型.

在分析系统可靠性指标时应用随机过程理论,通过引入补充变量,将描述系统可靠性的半马尔可夫过程模型转化为马尔可夫过程模型,推导出相应的系统可靠性及有效性指标公式.

2 系统有效性数学分析

2.1 建立系统的状态转移图

对于由3个相同传感器单元构成的 TMR 结构的多传感器融合系统,传感器单元的寿命可认为服从负指数分布,即失效率可视为常数.当3个单元同时工作时,设单元的失效率为 λ ,修理时间更广义地认为可以服从任意分布,维修时间分布函数(即维修

度函数)设为 $G(t)$.由于单元修理时间为任意分布,即单位时间内的修复率是时间的函数,因而各状态转移概率不仅与在 t 时刻内有几个单元发生失效有关,而且还与正在修理的单元已修理了多长时间有关.这样,系统可用一个半马尔可夫过程模型描述.

该系统共有3个状态,其中: S_0 为3个单元正常工作; S_1 为其中1个单元发生故障,其他2个单元正常工作,系统正常; S_2 表示整个系统发生故障,1个单元在修,1个单元待修.

定义 $M(t)$ 为在 t 时刻系统的失效单元数,则 $M(t) = 0, 1, 2$ 分别对应系统3个状态的单元失效数,其相应状态的出现概率以 P_0, P_1, P_2 表示.

为了求解模型的可靠性指标参数,考虑引入新的补充变量 $T(t)$, 定义为 t 时刻正在修理的单元已经修理的时间,并有

$$M(t) = 0; \quad T(t) = 0$$

$$M(t) = 1, 2; \quad T(t) = T$$

引入补充变量后,系统的半马尔可夫过程模型就转化为一个时间连续的 $\{M(t), T(t), t \geq 0\}$ 马尔可夫过程,可以应用马氏模型来处理.

设 $\mu(T)$ 为失效单元已修理了 T 时间后的修复率,则在 Δt 时间间隔内,系统的有效性状态转移如图2所示.系统中的任一个单元失效,系统由 S_0 转到 S_1 状态,转移概率为 $3\lambda\Delta t$. 剩余2个工作单元中的任意一个失效,系统就由 S_1 转到 S_2 状态,转移概率应为 $2\lambda\Delta t$.

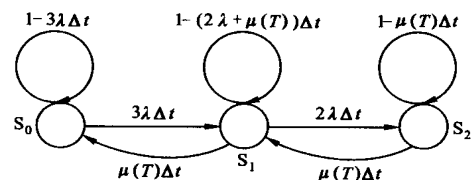


图2 系统的有效性状态图

2.2 系统有效性状态方程

为了求解系统的有效性参数,需要建立系统的状态方程并求解之.由可靠性理论^[7]知道,维修时间分布函数及维修密度函数分别表示如下

$$G(T) = 1 - \exp\left[-\int_0^T \mu(\tau) d\tau\right] \quad (1)$$

$$g(T) = \mu(T)[1 - G(T)] = \mu(T)\exp\left[-\int_0^T \mu(\tau) d\tau\right] \quad (2)$$

式中: $g(T)$ 为维修密度函数; $G(T)$ 为维修度函数; $\mu(T)$ 为失效单元已修理了 T 时间后的修复率.假定 $t = 0$ 时,系统3个单元均处于工作状态,则系统

的初始条件

$$P_0\{M(t)=0\}=1; P_1\{0, T\}=P_2\{0, T\}=0 \quad (3)$$

在 t 时刻经过 Δt 时间后,结合图 2 分析状态转移概率的变化,由于 Δt 很小,在此间隔内假定不会发生状态的两次转移。

(1) 状态 $M(t+\Delta t)=0$, 指 $M(t)=0$, 且在 $t \sim t+\Delta t$ 内单元不发生失效,或指 $M(t)=1, T(t)=T$, 且在 $t \sim t+\Delta t$ 内失效的单元被修复,因此 $M(t+\Delta t)=0$ 的状态概率为

$$P_0(t+\Delta t)=P_0(t)[1-3\lambda\Delta t]+\left[\int_0^{\infty} P_1(t, T)\mu(T)dT\right]\Delta t \quad (4)$$

(2) 状态 $M(t+\Delta t)=1, T(t+\Delta t)=T+\Delta t$, 指的是在 t 时刻已有一个单元失效,即 $M(t)=1$, 且在 $t \sim t+\Delta t$ 内没有单元继续失效,而且失效单元也没有被修复,因此有

$$P_1(t+\Delta t, T+\Delta t)=P_1(t, T)\{1-[2\lambda+\mu(T)]\Delta t\} \quad (5)$$

(3) 状态 $M(t+\Delta t)=2, T(t+\Delta t)=T+\Delta t$, 可由两种状态转移而来: $M(t)=2, T(t)=T$, 且在 $t+\Delta t$ 时间间隔内,失效单元没有被修复; $M(t)=1, T(t)=T$, 且在 $t \sim t+\Delta t$ 时间间隔内,工作单元又失效。于是有

$$P_2(t+\Delta t, T+\Delta t)=P_2(t, T)[1-\mu(T)\Delta t]+2\lambda\Delta t P_1(t, T) \quad (6)$$

对式(4)~式(6)整理有

$$\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -3\lambda P_0(t) + \int_0^{\infty} P_1(t, T)\mu(T)dT \\ \frac{\partial P_1(t, T)}{\partial t} + \frac{\partial P_1(t, T)}{\partial T} &= -P_1(t, T)[2\lambda+\mu(T)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_2(t, T)}{\partial t} + \frac{\partial P_2(t, T)}{\partial T} = -P_2(t, T)\mu(T) + 2\lambda P_1(t, T) \quad (8)$$

另外,系统必然处于上述 3 种状态之一,故有

$$P_0(t) + \int_0^{\infty} P_1(t, T)dT + \int_0^{\infty} P_2(t, T)dT = 1 \quad (9)$$

2.3 系统的有效性参数

为求解系统的有效性指标,对 2.2 小节中建立的系统状态方程式(7)~式(10)取拉氏变换,并考虑初始条件式(3),有

$$sP_0(s) - 1 = -3\lambda P_0(s) + \int_0^{\infty} P_1(s, T)\mu(T)dT \quad (10)$$

$$sP_1(s, T) + \frac{d}{dT}P_1(s, T) = -P_1(s, T)[2\lambda+\mu(T)] \quad (11)$$

$$sP_2(s, T) + \frac{d}{dT}P_2(s, T) = -P_2(s, T)\mu(T) + 2\lambda P_1(s, T) \quad (12)$$

$$P_0(s) + \int_0^{\infty} P_1(s, T)dT + \int_0^{\infty} P_2(s, T)dT = \frac{1}{s} \quad (13)$$

对式(12)变换,并利用式(1),得

$$P_1(s, T) = P_1(s, 0)[1 - G(T)]\exp[-(s+2\lambda)T] \quad (14)$$

将式(15)代入式(11),并应用式(1)和式(2),得

$$sP_0(s) - 1 = -3\lambda P_0(s) +$$

$$P_1(s, 0) \int_0^{\infty} [1 - G(T)]\mu(T)\exp[-(s+2\lambda)T]dT - 3\lambda P_0(s) + P_1(s, 0)g(s+2\lambda)$$

式中

$$g(s) = \int_0^{\infty} \exp(-sT)dG(T) = \int_0^{\infty} \exp(-sT)g(T)dT$$

所以有下式

$$P_0(s) = P_1(s, 0) \frac{g(s+2\lambda)}{s+3\lambda} + \frac{1}{s+3\lambda} \quad (15)$$

式(13)为一阶线性微分方程,解之得

$$P_2(s, T) = \exp\left[-\int_0^T [s+\mu(\tau)]d\tau\right] \cdot \left\{ P_2(s, 0) + \int_0^T 2\lambda P_1(s, y) \exp\left[-\int_0^y [s+\mu(\tau)]d\tau\right] dy \right\}$$

代入式(15)及初始条件 $P_2(s, 0)=0$, 并应用式(1), 得

$$P_2(s, T) =$$

$$2\lambda \exp(-sT)[1 - G(T)] \int_0^T P_1(s, 0) \exp(-2\lambda\tau) d\tau = P_1(s, 0)[1 - G(T)] \exp(-sT)[1 - \exp(-2\lambda T)] \quad (16)$$

将式(15)~式(17)代入式(14),得

$$P_1(s, 0) = \frac{3\lambda}{sg(s+2\lambda) + (s+3\lambda)[1 - g(s)]} \quad (17)$$

由式(17)、式(18)可得

$$P_2(s, T) =$$

$$\frac{3\lambda[1 - G(T)] \exp(-sT)[1 - \exp(-2\lambda T)]}{sg(s+2\lambda) + (s+3\lambda)[1 - g(s)]} \quad (18)$$

系统的瞬态有效度 $A(t)$ 是系统逗留在可靠工作状态 S_0 或 S_1 的概率,所以其拉氏变换式为

$$A(s) = 1 - \int_0^{\infty} P_2(s, T)dT \quad (19)$$

将式(19)代入式(20),得

$$A(s) = \frac{(s+2\lambda)[1-g(s)] + g(s+2\lambda) + 3\lambda[1-g(s+2\lambda)]}{(s+2\lambda)\{sg(s+2\lambda) + (s+3\lambda)[1-g(s)]\}} \quad (21)$$

系统的稳态有效度(即系统的利用率)

$$A = \lim_{s \rightarrow 0} sA(s) = \frac{3\mu - \mu g(2\lambda)}{6\lambda + 2\mu g(2\lambda)} \quad (22)$$

其中

$$\mu = \frac{1}{\int_0^{\infty} Tg(T) dT}$$

3 系统可靠性数学分析

求解可修的 TMR 结构的多传感器融合系统可靠性指标参数时,需进行与第2节类似的分析。

3.1 系统可靠性状态方程的建立与求解

系统可靠性状态转移如图3所示,状态 $M(t+\Delta t)=0$, 状态 $M(t+\Delta t)=1$, $T(t+\Delta t)=T+\Delta t$, 与2.2小节中所讨论的完全相同。因此,状态方程式(11)、式(12)仍然成立,相应地式(15)、式(16)也成立。

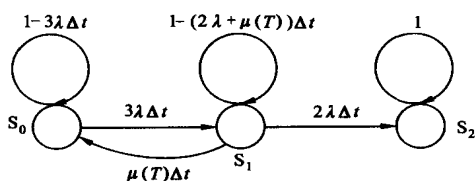


图3 系统可靠性状态

状态 $M(t+\Delta t)=2$, $T(t)=0$, 这是因为在 t 时刻内,一个单元已经失效,在 $t \sim t+\Delta t$ 内另一个单元发生失效,系统进入 S_2 状态。 S_2 状态是吸收状态,进入此状态后便不再转移,因而无须考虑另一失效单元已修理了多长时间。故

$$3\lambda P_0(t) = P_1(t,0) \quad (23)$$

对式(23)进行拉氏变换得

$$3\lambda P_0(s) = P_1(s,0) \quad (24)$$

对式(15)、式(16)、式(24)用类似2.3小节中的方法求解,得

$$P_0(s) = \frac{1}{s+3\lambda[1-g(s+2\lambda)]} \quad (25)$$

$$P_1(s,T) = \frac{3\lambda[1-G(T)]\exp[-(s+2\lambda)T]}{s+3\lambda[1-g(s+2\lambda)]} \quad (26)$$

3.2 系统的可靠性参数

由所求得系统逗留在各状态的瞬态概率可以求解系统的重要可靠性参数:可靠度 $R(t)$ 及系统的

平均无故障时间 t_{MTBF} 。

可靠度 $R(t)$ 是状态 S_0 、 S_1 的概率之和,故有

$$R(s) = P_0(s) + \int_0^{\infty} P_1(s,T) dT \quad (27)$$

由式(25)~式(27),得到可靠度的拉氏变换式

$$R(s) = \frac{s+2\lambda+3\lambda[1-g(s+2\lambda)]}{(s+2\lambda)\{s+3\lambda[1-g(s+2\lambda)]\}} \quad (28)$$

系统的 t_{MTBF} 为

$$t_{\text{MTBF}} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \lim_{s \rightarrow 0} R(s) = \frac{5-3g(2\lambda)}{6\lambda[1-g(2\lambda)]} \quad (29)$$

4 实例与应用

例1 考虑维修时间 t 为负指数分布的情况,即此时修复率为常数,这是传统建模时,为了简化分析时常做的假设,即有 $\mu(t) = \mu$ (常数), $g(t) = \mu \exp(-\mu t)$ 。而

$$g(s+2\lambda) = \int_0^{\infty} g(t) \exp[-(s+2\lambda)t] dt = \frac{\mu}{s+2\lambda+\mu}$$

令 $s=0$, 即得 $g(2\lambda)$, 所以根据式(22),有

$$A = \frac{3\mu - \mu g(2\lambda)}{2[3\lambda + \mu g(2\lambda)]} = \frac{3\lambda\mu + \mu^2}{6\lambda^2 + \mu^2 + 3\lambda\mu} \quad (30)$$

根据式(29),有

$$t_{\text{MTBF}} = \frac{5-3g(2\lambda)}{6\lambda[1-g(2\lambda)]} = \frac{5\lambda + \mu}{6\lambda^2} \quad (31)$$

可见与 TMR 结构系统在修复率为常数时的假设下的可靠性参数公式一致^[7]。因此,本文模型所推导的公式具有普遍性和一般性,即修复率为常数的情况可以看作模型的特例。

例2 对某3个相同传感器构成的 TMR 结构多传感器融合系统,设单个传感器失效率 λ 取常见的 $1.0 \times 10^{-4} \text{ h}$, 寿命服从指数分布。如果改进维修性,完善失效检测装置,维修时间分布具有使大多数失效在短时间内修复的物理含义,可令维修密度函数 $g(t) = a^2 t \exp(-at)$, $a=0.5$, 则 $g(2\lambda)$ 为单机维修密度函数在 $s=0$ 时的拉氏变换

$$g(2\lambda) = \int_0^{\infty} \exp[-(2\lambda)t] dG(t) = \frac{a^2}{(2\lambda+a)^2} = 0.9980$$

$$\mu = \frac{1}{\int_0^{\infty} t dG(t)} = \frac{1}{\int_0^{\infty} a^2 t^2 \exp(-at) dt} = \frac{a}{2} = 0.25$$

系统的利用率即稳态有效度及系统的平均无故障工作时间分别为

(下转第795页)

统,仍需要在以后的工作中继续研究.

参考文献:

- [1] Moulines E, Duhamel P, Cardoso J, et al. Subspace methods for the blind identification of multichannel FIR filters [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1995, 43(2): 516 - 525.
- [2] Li Y, Ding Z. ARMA system identification based on second order cyclostationarity [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1994, 42(12): 3 483 - 3 494.
- [3] Hua YB, An SJ, Xiang Y. Blind identification of FIR MIMO channels by decorrelating subchannels [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(5): 1 143 - 1 155.
- [4] Tugnait J K, Luo W L. Linear prediction error method for blind identification of periodically time varying channels [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(12): 3 070 - 3 082.
- [5] 王 勇, 刘文江, 孙连明. 控制系统的一种直接盲辨识方法[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 611 - 614.
- [6] 李 嘉, 胡怀中, 胡 军. 基于过采样的 Hammerstein 模型最小方根辨识算法[J]. 陕西工学院学报, 2003, 19(2): 25 - 28.
- [7] 胡 军, 李 嘉, 胡怀中. 一种新的系统盲反向辨识方法[J]. 陕西工学院学报, 2003, 19(3): 13 - 17.
- [8] 王布宏, 王永良, 陈 辉. 利用局域子空间投影提高子空间类 DOA 估计算法的谱分辨力 [J]. 电子学报, 2003, 31(3): 459 - 463.

(编辑 刘 杨)

(上接第 778 页)

$$A = \frac{3\mu - \mu g(2\lambda)}{2[3\lambda + \mu g(2\lambda)]} = 0.998\ 8$$

$$t_{\text{MTBF}} = \frac{5 - 3g(2\lambda)}{6\lambda[1 - g(2\lambda)]} = 1.67 \times 10^6\ \text{h}$$

可见与单个传感器的 t_{MTBF} ($t_{\text{MTBF}} = 1/\lambda_1 = 1/10^{-4} = 10\ 000\ \text{h}$) 相比, 提高两个数量级.

5 结 论

本文研究了多传感器融合系统的可靠性模型, 针对一般情况下的 TMR 结构, 建立了系统的半马尔可夫过程模型, 得到了表征系统性能评价的可靠性参数公式. 新模型的建立可以准确地描述系统的实际工作状况, 从而为多传感器融合系统的可靠性评价提供了理论依据. 该模型还可以推广应用于 TMR 冗余计算机系统的广义可靠性模型分析上, 因此具有很好的指导意义和实用价值.

参考文献:

- [1] 刘贵喜, 杨万海. 多传感器融合系统最小代价冗余与优

化算法[J]. 东南大学学报, 2000, 30(1): 68 - 72.

- [2] Paula H M, Roberts M W, Battle R E. Reliability performance of fault-tolerant digital control systems[J]. IEEE Trans on Reliability, 1995, 44(3): 413-418.
- [3] 沈 洁, 单 东. 三模冗余计算机联锁系统可靠性安全性分析[J]. 北方交通大学学报, 1998, 22(5): 111 - 114.
- [4] 董海鹰, 李 军. 双机冗余系统的非马尔可夫模型研究[J]. 铁道学报, 2001, 23(6): 35 ~ 38.
- [5] Perman M, Senegacnik A, Tuma M. Semi-Markov models with an application to powerplant reliability analysis [J]. IEEE Trans on Reliability, 1997, 46(4): 526 - 532.
- [6] Marzullo K. Tolerating failures of continuous-valued sensors [J]. ACM Trans on Computer System, 1990, 8(4): 284 - 304.
- [7] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京: 清华大学出版社. 1990.

(编辑 杜秀杰)