

基于 Markov 模型的分布式监测系统可靠性研究*

易朋兴 杜润生 杨叔子 刘世元

(华中科技大学机械学院 武汉 430074)

摘要：监测系统作为一种保证复杂系统正常工作与提高其运行可靠性的重要手段被广泛应用。监测可靠度指监测系统能成功地对被控对象进行监测的概率，它是评价监测系统性能的一个重要尺度。以可靠性理论为指导，结合集中分布式监测系统的结构特性，对该类型监测系统的监测可靠性进行深入研究，提出一种基于 Markov 模型的监测可靠性分析方法。随后，以捏合机监测系统为例进行验证与分析。分析表明该方法对监测系统设计及其维护有一定的应用价值。

关键词：集中分布式监测系统 监测可靠度 Markov 链 可用度

中图分类号：TP302.7 TB114.3

0 前言

随着科学技术的进步，人类开发了许多新的大型复杂设备和系统，例如自动生产线系统，计算机网络系统，大型现代制造系统等等。这些系统是复杂的人—硬件—软件系统，它们一旦发生故障，将会对社会、经济和环境等方面造成不同程度的损害。因此对系统效能中最重要的指标之一——可靠性就应予以严肃认真的考虑^[1,2]。

目前，监测系统作为一种保证复杂系统正常工作与提高其运行可靠性的重要手段被广泛应用^[3~6]。同时，在生产过程中人们对监测系统的依赖性也越来越大。由此带来一些不容忽视的问题——二次诊断与可靠性问题，即监测系统自身的可靠性问题和怎样设计满足要求的具有高度可靠性的监测系统问题等。

胡，杜等^[4,7]针对制造系统的特殊性提出一种面向制造系统的监测系统模型并对其可靠性问题进行探讨。在其研究的基础上结合某一类分布式监测系统——集中分布式监测系统(CDMS)的结构特性，探讨其监测可靠性问题，提出一种基于 Markov 模型的监测可靠性分析方法，为监测系统的设计、日常管理及其提高其工作可靠性提供一定依据。

1 集中分布式监测系统(CDMS)

多数的分布式监测系统可以定义为 CDMS(Con-

centrated-distributed monitoring system)，这一类的监测系统由一些异构或者同构的监测子系统组成，每个子系统的功能不一样，这些子系统获得的各种监测信息传送到监控中心进行分析与处理^[7,8]。该类监测系统具体结构见图 1。

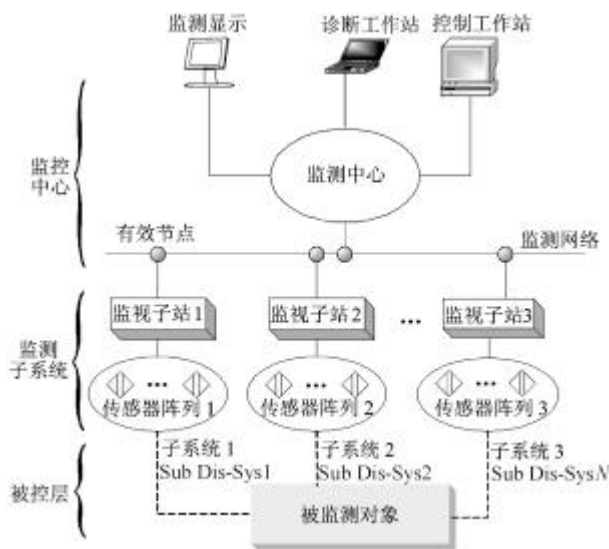


图 1 集中分布式监测系统结构

监控中心包括监测中心和一系列工作站。监测中心能有效存储、管理和分析各个监测子系统通过监测网络传过来的实时监测数据，有效节点指一些能够执行各种功能的单元如 CPU、内存以及监测中心所带的其他器件等^[9]。监测中心实时分析结果在监测显示界面上显示或传到控制站，为操作人员提供操作依据。同样，诊断工程师可以依据监测中心的各种结果和数据对被控系统的状况进行分析，对系统故障进行预测与诊断。

* 国家自然科学基金(50205009)和教育部智能制造技术重点实验室资助项目。20040721 收到初稿，20050115 收到修改稿

监测子系统(Sub Dis-Syst1, ..., N)由监视子站和传感器阵列等单元组成。监视子站主要完成信息的预处理,如完成监测信号的A/D转换、滤波等。传感器阵列对被控对象进行监测,获得监测信息。根据被控对象生产环境和要求的不同,每个子系统的拓扑结构和传感器类型亦有所不同。子系统与监测中心通过监测网络进行数据交换。

在被控系统工作过程中,监测是不可间断的,监测系统可靠性的高低直接影响到整个被控系统的正常运行。因此,系统的监测可靠性分析极为重要。

2 CDMS 监测可靠性分析

在对 CDMS 监测可靠性进行分析之前,下面作一些基于统计独立性的假设^[10]。

- (1) 子系统工作状态及可靠度相互独立。
- (2) 监测中心提供的各种服务、存储的各种文件和程序相互独立。
- (3) 各工作单元、传递通道可靠性相互独立。
- (4) 每个单元处于什么状态是相互独立的。
- (5) 子系统的各单元正常工作的概率为常数。

2.1 CDMS 可靠性评价指标

在可靠性分析中,系统分为可修复型和不可修复型两类,CDMS 是由多数可修复的器件模块和部分不可修复的传感器阵列组成的可修复系统,其可靠性大小可以用可靠度、可用度等参数来描述^[4,11]。

定义 1 单元可靠度:单元正常工作事件发生的概率

$$R_i = P\{E(i)\} \quad (1)$$

式中 R_i ——单元可靠度

P ——正常工作时事件发生的概率

$E(i)$ ——第 i 个单元正常工作事件

定义 2 子系统可靠度:子系统可靠度的物理意义为监测子系统能正确工作的概率大小,即

$$RSS_i = P\{E(subsys_i)\} \quad (2)$$

定义 3 可用度:对于给定的一个随机时间 t ,在 t 时刻系统处于可用状态的概率。可用度是给定随机时间 t 的函数,也叫瞬时可用度,记为 $A(t)$ 。

定义 4 监测中心可用度:给定 t 时刻监测中心处于可用状态的概率,记为 $A_m(t)$ 。

定义 5 监测可靠度:监测可靠度的物理意义为监测系统能正常对被控对象进行监测的概率,即

$$RS = P\{E(sys)\} \quad (3)$$

2.2 CDMS 监测可靠性通用模型

CDMS 的工作过程包括信号的正常采集、数据

的网络传输、监视子站完成数据的预处理并将数据通过网络传到监测中心、监测中心分析传过来的数据形成数据分布曲线或者数据表等,每一个环节对其监测可靠性都有一定的影响。

CDMS 正常工作时,各数据采集单元、传输网络、监视子站以及监测中心的运行都应该是正常的。同时监测中心既能随时为监控工程师提供可用的数据或者指令,又能正常地接收与分析监视子站上传的数据,既监测中心是随时可用的。因此,监测中心可用度分析极为重要。

监测中心作为 CDMS 中的一个核心模块,配有专门的维修人员,二者构成一可修复系统。它一旦出现故障就不能正常工作,修复后重新开始工作。可以用取值为 1, 2 的二值随机函数 $X(t)$ 来描述 t 时刻监测中心的状态,即

$$X(t) = \begin{cases} 1 & t \text{ 时刻监测中心工作} \\ 2 & t \text{ 时刻监测中心故障} \end{cases} \quad (4)$$

t 时刻监测中心的可用度 $A_m(t)$ 可以用 $X(t)$ 等于 1 的概率表示,即

$$A_m(t) = P\{X(t) = 1\} \quad t \geq 0 \quad (5)$$

根据前面的假设和分析, $X(t)$ 是一个齐次 Markov 链^[1,10,11]。下面按照 Markov 过程分析监测中心的可用度。

CDMS 监测中心是一个完整的计算机系统,工程实践^[3,4,7,9]表明其故障通常都是由软件故障引起的,其可用度主要取决于所带软件系统的可靠性。软件可靠性模型有很多种,其中 Goel 和 Okumoto 提出的 GO 模型应用较多^[8,12]。设监测中心的失效率函数为 $I(t)$, 维修时间服从修复率为 m 的指数分布。根据 GO 模型,监测中心失效率函数为

$$I(t) = ab \exp(-bt) \quad (6)$$

式中 a ——预期的能最终被发现的软件故障数

b ——软件故障率

设监测中心在 t 时刻开始工作的概率为 $P_1(t)$, $P_2(t)$ 为在 t 时刻发生故障的概率,则相应的 Kolomogorov 方程^[1,8]为

$$\begin{cases} P_1(t) = mP_2(t) - IP_1(t) \\ P_2(t) = 1 - P_1(t) \end{cases} \quad (7)$$

设边界条件 $P_1(0) = 1, P_2(0) = 0$, 可得到监测中心 t 时刻开始工作的概率

$$P_1(t) = \left[\int_0^t m \exp(mx - a \exp(-bx)) dx + \exp(-a) \right] \times \exp(-mt + a \exp(-bt)) \quad (8)$$

这也是 t 时刻 CDMS 监测中心可用度 $A_m(t)$ 的计算公式。

从图 1 知道，子系统中监测信号从检测单元到监测中心要经过多个环节，每个环节对其可靠性都有一定的影响，影响大小主要取决于子系统的复杂程度。但是，当系统结构确定后，不管一个子系统有多么复杂，其可靠度都可以用所有单元可靠度构成的可靠度函数表示^[11,13]。如果简化后 CDMS 的第 i 个子系统有 M 个单元，那么它的可靠度

$$RSS_i = f(R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{iM}) = \sum_{h=1}^m \left[a_h \prod_{j=1}^M R_{ij}^{k_{hj}} \right] \quad (9)$$

式中 R_{ij} ——第 i 个子系统中 j 单元的可靠度，
 $j=1, 2, \dots, M$

m ——可靠度函数中乘积式的项数

a_h ——可靠度函数中第 h 项乘积式的系数，
 $h=1, 2, \dots, m$

k_{hj} ——第 h 项乘积式中 j 单元可靠度的幂次

一个完整的 CDMS 中包括 N 个子系统和一个监测中心，它们当中任何一个出现故障就认为系统不能正常工作，则其可靠性模型是一个有 $N+1$ 个单元的串联系统。按照前面的假设，在 t 时刻它的监测可靠度

$$RS(t) = A_m(t) \prod_{i=1}^N RSS_i \quad (10)$$

3 应用实例与分析

捏合机监测系统是保障某厂正常生产的关键，该系统包括一个监测中心和 3 个监测子系统，是一个典型的 CDMS 系统。下面就用前述 CDMS 可靠性模型对其进行分析。

3.1 捏合机 CDMS 结构

捏合机监测系统的拓扑结构见图 2。图中 MS (Monitoring station) 为监测中心，与其相连的是三个子系统 DS_i (1,2,3)， MSS_i 为各子系统对应监测子站。温度监测子系统 DS_1 包含两个不同的温度传感器阵列 A_1 和 A_2 ，其中 $S_1(a_1), S_1(a_2), S_1(a_3)$ 是同类型传感器，三者中任意一个能正常工作就认为 A_1 工作正常； $S_1(b_1), \dots, S_1(b_4)$ 是同类传感器，四者中任意两个能够正常工作就认为 A_2 工作正常；当 A_1, A_2 中的任意一个、 MSS_1 以及各传输链路正常工作时就认为温度监视子系统工作正常。压力、液位监测子系统 DS_2 只有一个同类传感器阵列 (S_{21}, \dots, S_{23})，任何一个传感器通道失常就认为它故障。位置子系统 DS_3 也只有一个同类传感器阵列，它的四个传感器 (S_{31}, \dots, S_{34}) 通道任意一个能正常工作就认为该子系统工作正常。图 2 中方括号中内数字是为对系统结构进一步

分析而对每一个单元设置的节点号。

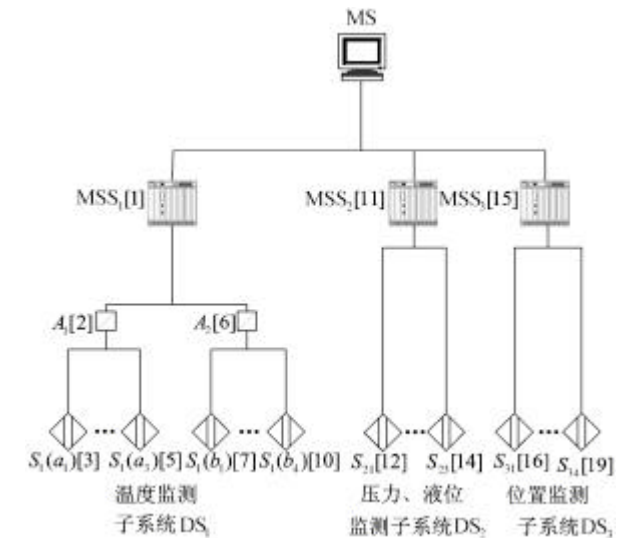


图 2 捏合机 CDMS

按照胡、杜等^[3,7,9]的方法将图 2 所示系统中的每个工作单元用一个节点 i 表示，两个工作单元之间的相应信号传递通道用一条有向边 e_i 表示，得到捏合机监测系统的网络模型图如图 3。其中 S 代表被监测的捏合机，MS 表示监测中心。图中其余每个节点表示原系统中相应工作单元，每条边表示原系统中相应工作单元之间的信号传递通道，边上的箭头表示相应两个工作单元间的信号传递方向。

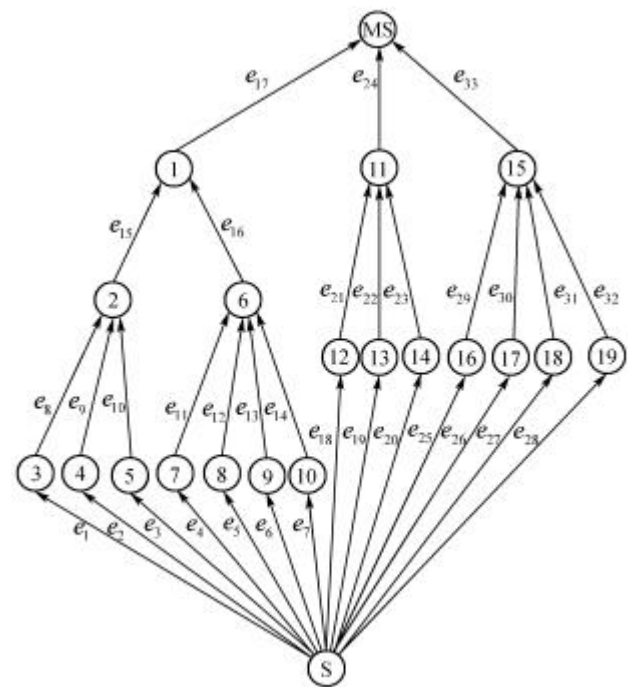


图 3 捏合机 CDMS 网络模型

3.2 监测中心可用度函数

捏合机 CDMS 监测中心本身是一个完整的计算机系统，配有专门的工作人员对其进行维护，二者

构成一个可修系统。根据参考文献[7]取 $a = 10$, $b = 0.01$, 则监测中心可靠度

$$A_m(t) = \left[\int_0^t m \exp(mx - 10 \exp(-0.01x)) dx + \exp^{10}(-10) \right] \times \exp(-mt + 10 \exp(-0.01t)) \quad (11)$$

3.3 子系统可靠度

图 3 中从左至右共有 3 个子系统, 分别用 DS_1 , DS_2 , DS_3 表示, 它们各自的结构如图 4。图 4 中 $MS_i (i=1,2,3)$ 表示监测中心负责处理第 i 个子系统信息的硬件模块, 在实际工作中, 监测中心的硬件和被监测对象一般不会出故障, MS_i 和 S 可以看作是绝对可靠的^[7]。各传感器阵列、数据采集单元、监视子站以及传递通道如果出现故障, 一般难以修复, 通常是以新器件予以替换, 按照不可修复系统对子系统的可靠性进行分析^[9,11]。

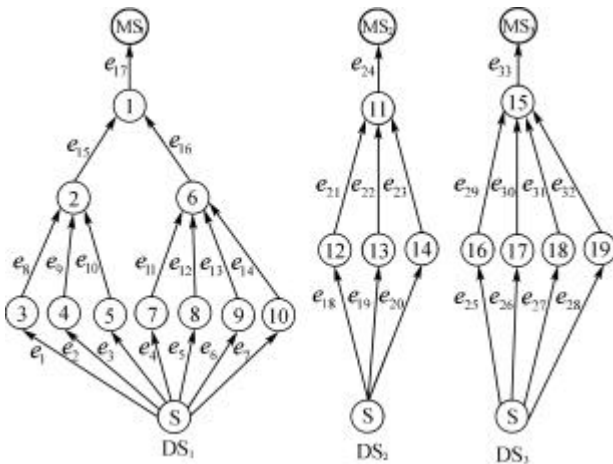


图 4 子系统各自网络拓扑图

从图 4 可知, 节点 1~10、传递通道 $e_1 \sim e_{17}$ 、被监测对象 S 和监测中心 MS_1 构成 DS_1 , 按照图 4 系统的构成情况和假设条件, DS_1 是一个复杂的不可修复系统, 其可靠性框图见图 5。

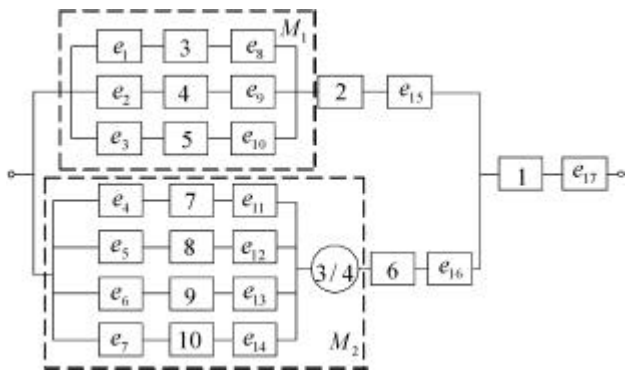


图 5 DS_1 可靠性框图

图 5 表明 DS_1 可靠性模型是一个由串联模块、并联模块和 3/4(G) 模块构成的复杂混联系统^[10]。节点

3~5 及各自前后传递通道构成串—并联系统 M_1 ; 节点 7~10 及其前后传递通道构成 3/4(G) 表决系统 M_2 。 M_1 与节点 2 及传递通道 e_{15} 成为串联旁路, M_2 与节点 3 以及传递通道 e_{16} 构成另外一个串联旁路, 这两个旁路形成一个并联系统, 该并联系统与节点 1 以及传递通道 e_{17} 构成一个串联系统。先单独计算各模块和旁路的可靠度, 并将每个模块或旁路当作一个环节, 层层计算得到 DS_1 的可靠度

$$RSS_1 = R_1 R_{e_{17}} [1 - (1 - R_{M_1} R_2 R_{e_{15}})(1 - R_{M_2} R_3 R_{e_{16}})] \quad (12)$$

节点 11~14、传递通道 $e_{18} \sim e_{24}$ 与监测中心 MS_2 及被监测对象 S 构成监测子系统 DS_2 。根据捏合机 CDMS 的结构特点, 任何一个环节故障则 DS_2 故障。可见, DS_2 的可靠性模型为一个所有单元串在一起构成的串联系统, 其可靠度

$$RSS_2 = \prod_{i=0}^3 R_{11+i} \prod_{j=0}^6 R_{e_{18+j}} \quad (13)$$

节点 15~19、传递通道 $e_{25} \sim e_{33}$ 与监测中心 MS_3 及被监测对象 S 构成监测子系统 DS_3 , 其可靠性框图见图 6。节点 16~19 及各自前后的传递通道构成一个具有 4 个串联支路的串—并联系统 M_3 , M_3 与节点 15 及传递通道 e_{33} 构成一个具有 3 个环节的串联系统, 根据式(9)可以得到 DS_3 的可靠度

$$RSS_3 = R_{15} R_{e_{33}} R_{M_3} = R_{15} R_{e_{33}} \left[1 - \prod_{i=0}^3 (1 - R_{16+i} R_{e_{25+i}} R_{e_{29+i}}) \right] \quad (14)$$

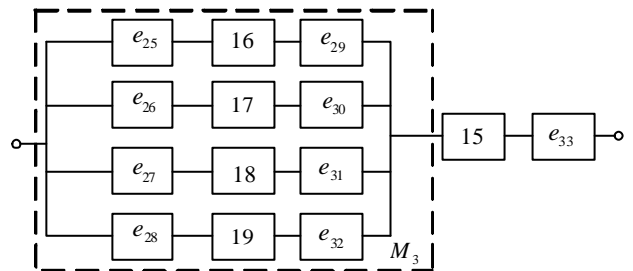


图 6 DS_3 可靠性框图

实际情况下, 传感器与被监测对象 S 之间的传递通道可以看作是绝对可靠的, 即

$$R_{e_i} = P[E(e_i)] = 1$$

$$i = 1, 2, \dots, 7, 18, \dots, 20, 25, \dots, 28 \quad (15)$$

若各子系统中所有工作单元和传递通道的可靠度为 0.995, 按照上述计算过程得到下表中的结果。

表 子系统可靠度计算

子系统	DSR_1	DSR_2	DSR_3
可靠度	0.989 9	0.965 5	0.990 0

3.4 CDMS 监测可靠度

根据式(7)~(11)和表的计算结果可以得到 t 时刻捏合机 CDMS 可靠度

$$RS(t) = A_m(t) \prod_1^3 RSS_i = 0.9462 \times \left[\int_0^t m \exp(mx - 10 \exp(-0.01x)) dx + \exp(-10) \right] \times \exp(-mt + 10 \exp(-0.01t)) \quad (16)$$

当 $m=0.5$ 或 $m=0.8$ 时, 捏合机 CDMS 监测可靠度 $RS(t)$ 可以用图 7 表示。根据图 7 所示监测可靠度变化曲线得出下面结论。

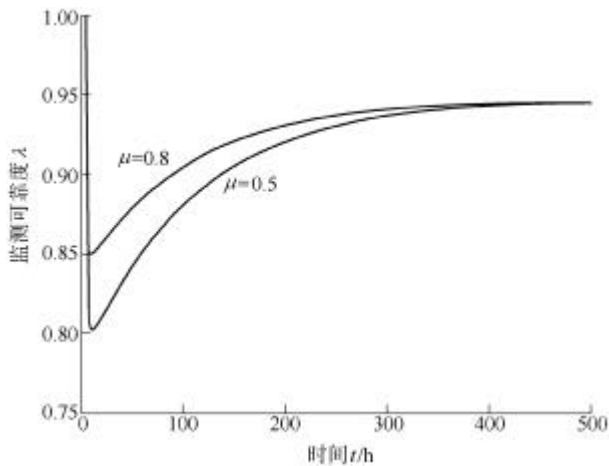


图 7 CDMS 监测可靠度时变曲线

(1) CDMS 的最小监测可靠度并没有出现在 $t=0$ 时刻, 而是在其后某一点。原因在于: 给定边界条件是 $P_1(0)=1$, 即 CDMS 监测中心在 $t=0$ 处可用度为 1。最初监测系统本身不完善, 随着分析与服务任务加重, 各种故障迅速出现, 导致系统可靠度急剧下降。

(2) 当 t 大于系统最小可靠度对应的时刻后, 监测可靠度上升。原因在于: 随着维护工程师对整个系统越来越熟悉, 故障被逐渐排除, 故障率下降, 监测可靠度不断提高, 并向各子系统可靠度的乘积 0.9462 靠近。

(3) 监测中心修复率越高, 系统监测可靠度越高。因此, 给监测中心配备熟练的维护人员和模块化部件对提高 CDMS 的监测可靠度有重要意义。

(4) 监测中心是 CDMS 的核心, 它的可用度大小决定着 CDMS 监测可靠度的高低。因此, 在生产中对监测中心的维护至关重要。

4 结论

通过对集中分布式监测系统的结构特性进行分析, 提出一种通用的分布式监测系统监测可靠性分

析方法, 并通过一个实例进行分析和验证。例证表明该方法对于监测系统的设计, 日常维护及其故障诊断与预测具有一定的指导意义。

二次诊断与可靠性问题的研究是一个较新的研究领域, 本研究只是结合集中分布式监测系统的特殊性对其进行整体可靠性建模与分析, 还有很多问题有待进一步研究。如各因素(软件故障率、子系统各单元的修复特性以及子系统维护特性等)对系统监测可靠性的影响问题, 多设备、多工序生产过程监测系统的可靠性分析与分配问题等等都是下一步需要研究的问题。

参 考 文 献

- 程侃. 寿命分布类与可靠性数学理论. 北京: 科学出版社, 1999
- 张峥嵘, 袁清珂. 21 世纪制造业的特点及其关键技术. 机械工程师, 1999(1): 1~3
- Chou J H. Study of condition monitoring of bridges using genetic algorithms. [PhD dissertation]. USA: Urbana, U of Illinois, 2000
- 胡友民, 杜润生, 杨叔子. 冗余式分层监测系统可靠性分析. 机械工程学报, 2003, 39(8): 110~115
- Thomas R B, Jane M B, Keller-McNulty S, et al. Testing the untestable: reliability in the 21st century. IEEE Trans on Reliab, 2003, 52(1): 118~124
- Endrenyi J, Aboresheid S, Allan R N, et al. The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 638~646
- 胡友民. 状态监测系统可靠性研究 [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2003
- Dai Y S, Xie M, Poh K L, et al. A study of service reliability and availability for distributed systems. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 79: 103~112
- 胡友民, 杜润生, 杨叔子. 集中式监控系统可靠性分析. 振动、测试与诊断, 2003, 23(1): 6~9
- 陆传贵. 工程系统中的随机过程. 北京: 电子工业出版社, 2000
- 高社生, 张玲霞. 可靠性理论与工程应用. 北京: 国防工业出版社, 2002
- Okumoto K, Goel A L. Optimum release time for software systems. IEEE Trans on Reliab, 1979, CH1515-6: 500~503
- 郭余庆, 王岩. 系统可靠性理论与应用. 北京: 煤炭工业出版社, 1991

STUDY ON MARKOV MODEL BASED RELIABILITY FOR DISTRIBUTED MONITORING SYSTEM

*Yi Pengxing Du Runsheng Yang Shuzi
Liu Shiyuan*

*(School of Mechanical Science & Engineering,
Huazhong University of Science & Technology,
Wuhan 430074)*

Abstract: As an important means of improving the reliability of complex systems and ensuring that they can function better, distributed monitoring systems are usually designed and used in many areas. A centralized distributed monitoring system, which is usually used in monitoring system design, is presented. Based on reliability theory and the characteristics of this type of

systems, monitoring reliability defined as the probability of successfully measuring and monitoring the object which is under control, an important performance measure for the distributed monitoring systems, is investigated. Furthermore, a case of application is used to illustrate the procedure. Analysis results show that the method proposed here is practical and valuable for designing monitoring systems and their maintenance.

Key words : Centralized distributed monitoring system

Monitoring reliability Markov chain Availability

作者简介:易朋兴,男,1974年出生,博士研究生。主要研究方向为机电控制、机械故障诊断与预报等。

E-mail : pongshinyee@hotmail.com

杜润生,男,1949年出生,教授。

杨叔子,男,1933年出生,教授,中国科学院院士,博士生导师。

刘世元,男,1969年出生,副教授。