

文章编号: 1001-0920(2007)03-0309-04

考虑环境因素的分布式系统可靠性建模及其分析

原菊梅, 侯朝桢, 王小艺, 吴 勤
(北京理工大学 信息科学技术学院, 北京 100081)

摘 要: 为建立可变工作环境下分布式系统可靠性模型, 提出受控混合随机 Petri 网, 即用连续库所中的托肯控制离散变迁的变迁率, 以此反映工作环境对部件可靠性的影响, 从而推理出环境对系统可靠性的影响. 在此模型的基础上, 采用蒙特卡罗方法进行不同环境下系统可靠性仿真求解, 解决了可变工作环境下分布式系统的可靠性建模及其分析问题. 最后, 以一个 C⁴ISR 系统为例说明了该方法是一种考虑可变工作环境影响的分布式系统可靠性分析的可行方法.

关键词: 可变工作环境; 分布式系统; 受控混合随机 Petri 网; 可靠性分析

中图分类号: TB114 **文献标识码:** A

Distributed system reliability modeling and analysis considering environment factors

YUAN Ju-meí, HOU Chao-zhen, WANG Xiaoyi, WU Qin

(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.

Correspondent: YUAN Ju-meí, E-mail: yuanjm2005@126.com)

Abstract: In order to build a system reliability model which works in variable environment, controlled hybrid stochastic Petri net is proposed. It uses tokens in continuous places to control the rate of discrete transitions, and reflects the effect of work environment to the component reliability. Thereby the working environment which impacts system reliability is expressed. Based on this model, Monte Carlo method is used to obtain simulation solution of system reliability in different environment. Reliability modeling and analysis of distributed system in work-variable environment are solved. Finally, a C⁴ISR system illuminates feasibility of this method.

Key words: Work-variable environment; Distribution system; Controlled hybrid stochastic Petri net; Reliability analysis

1 引 言

分布式系统所包括的设备分别工作于不同的地域, 其工作环境各不相同, 同一设备在不同的时间其工作条件也在不断变化. 工作环境和条件的变化会对产品的可靠性产生不同程度的影响, 使得仅按理想工作条件或设备标称值估计的系统可靠性指标与实际不符. 关于环境对产品可靠性的影响, 已有一些相关的研究, 如传统的综合环境试验法^[1], 降级危险函数模型法^[2,3], 马尔可夫法^[4]和云模型方法^[5]. 但是, 对于可变工作环境对分布式系统可靠性影响的研究还较为少见.

Petri 网具有较强的表达系统动态行为的能力, 经过 40 多年的发展, 针对不同的应用目的各种扩展

的 Petri 网已不断提出^[6,7]. 本文在随机 Petri 网^[8]和混合 Petri 网^[9]的基础上, 针对工作环境会对系统的可靠性产生影响提出受控混合随机 Petri 网 (CHSPN), 即用连续库所中的托肯控制离散变迁的变迁率, 以此来建立分布式系统可靠性分析模型.

2 受控混合随机 Petri 网及其对产品可靠性的建模

2.1 定 义

给 P/T 网的每个变迁相关联一个实施速率, 得到的模型就是随机 Petri 网^[8]. 用这种随机 Petri 网进行可靠性建模时, 其实施速率只由产品本身的寿命分布来确定, 不能描述环境因素对产品可靠性的影响. 混合 Petri 网是为了描述既具有连续变量动

收稿日期: 2005-10-31; 修回日期: 2006-01-03.

基金项目: 国防基础研究基金项目.

作者简介: 原菊梅 (1965—), 女, 山西河津人, 博士, 从事武器系统可靠性与维修性的研究; 侯朝桢 (1938—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 从事计算机控制、高级仿真体系结构等研究.

态又具有离散事件动态的混合系统而提出的一种建模工具^[9]。为了描述环境因素对产品可靠性的影响,本文给出受控混合随机 Petri 网及其使能条件和引发规则的定义如下:

定义 1 一个受控混合随机 Petri 网定义为 7 元组,即

$$CHSPN = (P, T, F, I, O, m_0,) .$$

其中: $P = P_d \cup P_c \cup ?P_c$ 是库所的有限集合, P_d 表示离散库所, P_c 表示连续库所, $?P_c$ 表示连续不确定库所; $T = T_d \cup T_c$ 是变迁的有限集合, T_d 表示离散随机变迁, T_c 表示连续变迁; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是弧的有限集合; I 为输入函数, 定义了从 P 到 T 的有向弧的权集合, 当 P 为离散库所时, $P \times T \rightarrow \mathbb{N}$, 当 P 为连续不确定库所时, $P \times T \rightarrow \mathbb{R}^n$, n 表示影响产品可靠性的环境因素的维数; O 为输出函数, 定义了从 T 到 P 的有向弧的权集合, 当 P 为离散库所时, $T \times P \rightarrow \mathbb{N}$, 当 P 为连续库所时, $T \times P \rightarrow \mathbb{R}$; $m_0 = (m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0P})$ 是初始标识; $\tau_d = \{ \tau_{d1}, \tau_{d2}, \dots, \tau_{dT_d} \}$ 是离散随机变迁引发率集合, 受其连续输入库所控制。

定义 2 在当前标识 m 下, 对于连续变迁, 当其输入库所中所有离散库所中的托肯数大于等于其输入弧上的权值时, 定义其为使能的。使能变迁引发后, 在其输出的连续库所中产生一个实值托肯, 而其所有输入库所中的标识都不改变, 即相当于一个转换器。

对于离散变迁, 连续输入库所对其使能条件没有影响, 仅取决于离散输入库所, 并且使能条件与引发规则与 SPN 相同, 只是其中的变迁率是受其连续输入库所中托肯的改变而改变。

2.2 基于 CHSPN 的产品可靠性模型

产品总是工作在一定的环境中, 工作环境的改变会对产品的使用寿命产生影响, 产品在其理想工作环境条件下寿命最长, 越偏离理想工作条件寿命越短, 当工作环境超出使用范围时则不能工作。即产品的寿命除了由自身的失效机理决定外还受工作环境的影响, 因此建立产品的可靠性 CHSPN 模型如图 1 所示。其中: P_g 表示产品的工作状态; P_b 表示产品的失效状态; $?P_e$ 表示可变的工作环境; X 表示主要环境因子, 即对产品可靠性产生影响的主要环境因素; P_{eg} 表示由环境确定的产品失效率值; 变迁 t 表示产品的失效行为, 其变迁率由位置 P_{eg} 中的实值托肯来确定; 环境适应性变迁表示产品的环境适应能力, 所谓环境适应能力是对被评价对象在工作条件改变时可靠性变化的量度^[10], 其模型的确定方法可以根据所掌握的资料多少采用不同的方法, 如

上面提到的降级危险函数法、马尔可夫法或云模型法, 若具有较多的环境实验数据时还可以采用神经网络法, 当然, 不同的方法得到的产品失效率估计值的精确度是不同的, 在此用 $f(X)$ 表示。

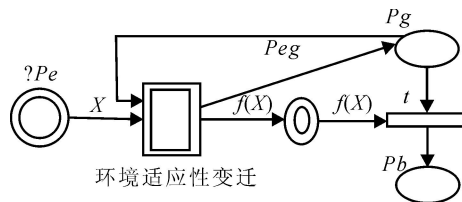


图 1 产品可靠性的 CHSPN 模型

图 1 中, 所有的连续部分用双线表示, 离散部分用单线表示, P_g 和环境适应性变迁之间的连接弧表示只有在产品处于正常状态时环境才对其可靠性产生影响。

3 基于 CHSPN 的系统可靠性模型及其分析方法

3.1 基于 CHSPN 的系统可靠性模型

在产品可靠性的 CHSPN 模型基础上, 通过 Petri 网的逻辑表达能力表示系统的成功和失效关系就得到系统可靠性的 CHSPN 模型。如以位于 3 个不同地理位置且各自具有一个冗余 (其中一个为热冗余, 其他两个为冷冗余, 不考虑切换失效和冷储备失效) 的子系统组成的分布式系统为例, 其可靠性的 CHSPN 模型如图 2 所示。其中各库所和变迁所代表的意义如表 1 所示。

表 1 各库所和变迁的意义

	意义
P_{ig}	各子系统均处于完好状态, 位置中的托肯数表示投入使用的子系统数
P_{id}	正在工作的子系统失效, 等待切入冷冗余子系统, 热冗余子系统直接投入工作
P_{is}	各子系统的冷冗余
P_{idg}	冗余子系统投入使用, 且处于完好状态
P_{ib}	子系统处于失效状态
P_{sf}	系统失效
t_{ig}	主子系统失效变迁
t_{id}	冗余子系统失效变迁
t_{is}	冷冗余子系统切入变迁
t_{if}	子系统失效变迁
$?P_{ie}$	子系统所处环境
P_{ieg}	当时环境下主子系统失效的变迁率
P_{ied}	当时环境下冗余子系统失效的变迁率
t_{iga}	主子系统环境适应性变迁
t_{ida}	冗余子系统环境适应性变迁
X_i	各子系统的主要环境因子

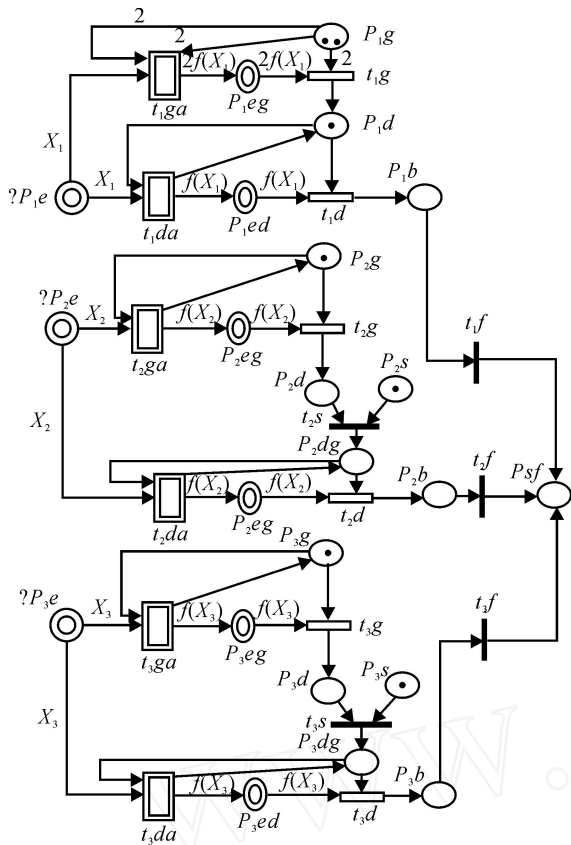


图 2 系统可靠性的 CHSPN 模型

3.2 分析方法

系统可靠性分析的步骤如下：

Step1：确定各子系统的寿命期环境剖面和对可靠性产生影响的主要环境因素。比如，以一年为一个周期来考虑各子系统所经历的环境变化过程。

Step2：确定各子系统的环境适应性模型。如降级危险函数法、马尔可夫法、云模型法或神经网络法。

Step3：对系统任务进行时段划分。在环境变化较大的情况下，任务时段应划分的短些；相反，在环境变化较小时，任务时段应划分的相对长些。

Step4：将各时期各子系统所处的环境条件作为各自环境库中所的托肯值，根据各子系统的环境适应性模型确定出该时期各子系统的失效率。

Step5：用蒙特卡罗方法^[11,12]估计出该时段系统的可靠度。由于是基于 Petri 网的蒙特卡罗仿真，要首先置初始标识，然后随机产生一个时间值，根据各子系统的失效率判断每个离散变迁是否有权触发，最后根据库所 \$P_{s,f}\$ 中是否有托肯来判断本次仿真的系统是否失效，直至达到仿真次数为止，从而，系统成功的次数与总仿真次数的比值即为本时段的可靠度。

Step6：重复 Step4 和 Step5，直至系统任务期结束。

4 应用实例

假设图 2 所示的例子是一个简单的 C⁴ISR 系统，其中：子系统 1 表示两个互为备份的指挥中心，子系统 2 表示二中取一的冷储备岸基雷达子系统，子系统 3 表示二中取一的冷储备预警机子系统。不考虑相互间的通信失效和储备子系统的切换失效，采用 3.2 节的方法对它进行可靠性分析如下：

Step1：指挥中心一般处于恒温、恒湿、恒电压的理想工作环境。岸基雷达子系统工作于陆上环境，影响其可靠性的主要环境因素有工作电压、湿度和温度；战时雷达为油机供电，油机发电机的电压变化范围为 $220 \pm 30 \text{ V}$ ，假设表示为

$$220 + 30 \cos(314t);$$

温度的变化以东南地区为例，高温条件时，每天气温为 $30 \sim 40$ ，低温条件时，每天气温为 $-5 \sim -10$ ，假设表示为

$$15 + 15 \sin\left(\frac{2}{365 \times 24}t\right) + 10 \sin\left(\frac{2}{24}t\right);$$

湿度会随着温度的变化而变化，因此不再考虑湿度的影响。预警机工作于空中环境，影响其可靠性的主要环境因素是气流的变化，当风力超过 6 级时，预警机无法起飞，每年的 8 ~ 10 月期间，东南地区为台风多发季节，会对预警机的可靠性产生影响，假设表示为

$$4 \left| \sin\left(\frac{2}{365 \times 24}t - 30 \times 24\right) \right| + \sin\left(\frac{2}{24}t\right) + 1.$$

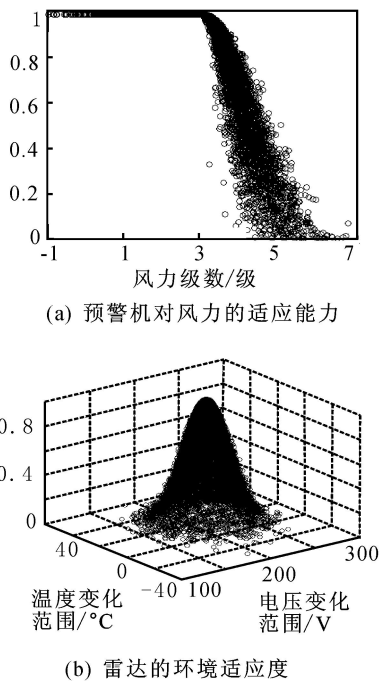
Step2：假设现在没有各子系统的实验数据，根据各子系统的标称值确定环境适应性模型为：岸基雷达在 220 V ， 20 时，MTBF 为 $5\,000 \text{ h}$ ，温度适用范围为 $-15 \sim 55$ ，电压适用范围为 $180 \sim 260 \text{ V}$ ；预警机在风力小于 3 级时，MTBF 为 $5\,000 \text{ h}$ ，风力适用范围在小于 6 级的情况。因此，采用云模型方法建立雷达的环境适应性模型为 $l(20, 220), (10, 20), (1, 2)$ ，预警机的环境适应性模型为 $(0 \sim 3, 1, 0.2)$ ，相应的图形表示如图 3 所示。

指挥控制中心的可靠度不受环境影响，假设 MTBF 为 $10\,000 \text{ h}$ 。因为这些系统基本上为电子系统，假设其寿命分布均服从指数分布。

Step3：确定一年中环境变化情况，以 h 为单位进行时段划分。

Step4：根据 Step1 中的环境变化规律确定每个时刻点的环境条件，将其代入 Step2 确定的各子系统的环境适应性云模型中，确定出各子系统在当前时刻的失效率云滴。

Step5：以这些失效率云滴分别作为各子系统的失效率，利用蒙特卡罗方法仿真估计出该时段系



(a) 预警机对风力的适应能力

(b) 雷达的环境适应度

图3 雷达和预警机的环境适应性云模型表示系统可靠度云滴,并以这些云滴的中心点作为该时刻系统可靠度的估计值。

Step6: 重复 Step4 和 Step5,直至估计出环境变化一周中系统可靠度为止。仿真结果如图4所示。图4中,上方实线表示理想工作条件下系统的可靠度曲线;下方的点表示环境不确定时系统可能的可靠度分布云滴;云滴中间的实线表示环境不确定时系统可靠度的估计值。

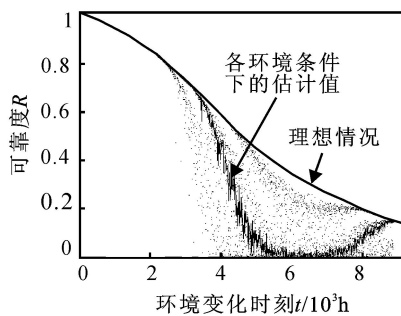


图4 环境变化对可靠度的影响

由图4可以看出,系统在前3000h内工作可靠度与理想工作条件时相差不大,系统具有较大的可靠度;2500~5000h之间,系统可靠度开始偏离理想值,这是由于此时的温度值可能达到最大;5000~7000h间偏离程度较大,其中在6000h时,系统可靠度偏离理想值达最大,这是由于此时环境温度达到最低且风力达到最大;此后,系统可靠度重新开始靠近理想工作条件时的可靠度值。平均故障前时间的变化过程与此相似,在此省略。即从环境适应性考虑,这套系统适于春季使用,夏季和冬季也尚可,

但不适于秋季工作。

在本例中,各子系统对环境的适应性选用的是云模型方法,因此结果具有较大的模糊性和随机性。若具有各子系统环境实验数据时,可以采用神经网络或其他的插值方法来建立环境适应性模型,这时,系统在各种环境条件下的可靠度和平均无故障工作时间估计就会更加准确。

5 结 论

本文提出的考虑环境因素的分布式系统可靠性建模与分析方法有效地解决了分布式系统中各子系统工作于不同工作环境下的系统可靠性评价问题。对正在设计中的系统,可以对所设计的系统工作于不同环境时的可靠性做出估计。对已投入使用的系统,利用 Petri 网模型可视化的特点,可以在线动态观察到各子系统在当前时刻的失效率,同时估计出当前时刻全系统的可靠性指标,为系统的决策提供一定的理论依据。

参考文献(References)

- [1] 刘松,等. 武器系统可靠性工程手册[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
(Liu S, et al. Weapon system reliability engineering manual[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1992.)
- [2] Eghbali G, Elsayed E A. Reliability estimate using degradation data[R]. New Jersey: Rutgers University, 1999: 99-118.
- [3] Wang P Coit, David W. Reliability prediction based on degradation with multiple changing stresses[R]. New Jersey: Rutgers University, 2001: 99-102.
- [4] Leuschen M L, Walker I D, Cavallaro J R. Evaluating the reliability of prototype degradable systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 72(1): 9-20.
- [5] 宋远骏,李德毅,杨孝宗,等. 电子产品可靠性的云模型评价方法[J]. 电子学报,2000,28(12): 74-76,68.
(Song Y J, Li D Y, Yang X Z, et al. Reliability evaluation of electronic products based on cloud models[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 74-76, 68.)
- [6] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京:电子工业出版社,1998.
(Yuan C Y. Petri nets theory[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 1998.)
- [7] 蒋昌俊. Petri 网的行为理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
(Jiang C J. Behavior theory and application of Petri net[M]. Beijing: High Education Press, 2003.)

(下转第 317 页)

- flight-path control using online function approximation [J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2003, 26(6): 885-897.
- [5] Xu H J, Mirmirani M, Ioannou P A. Robust neural adaptive control of a hypersonic aircraft [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit. Austin: AIAA, 2003: 1-8.
- [6] Xu H J, Mirmirani M. Robust adaptive sliding control for a class of MIMO nonlinear systems [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit. Montreal: AIAA, 2001: 1-10.
- [7] Xu H J, Ioannou P A, Mirmirani M. Adaptive sliding mode control design for a hypersonic flight vehicle[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2004, 27(5): 829-838.
- [8] Wang Q, Stengel R F. Robust nonlinear control of a hypersonic aircraft [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit. Portland: AIAA, 1999: 413-423.
- [9] Marrison C I, Stengel R F. Design of robust control systems for a hypersonic aircraft [J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(1): 58-63.
- [10] Wang Q, Stengel R F. Robust nonlinear control of a hypersonic aircraft [J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(4): 577-584.
- [11] Lian B H, Bang H, Hurtado J E. Adaptive backstepping control based autopilot design for reentry vehicle[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit. Providence: AIAA, 2004: 1-10.
- [12] Singh S N, Steinberg M. Adaptive control of feedback linearizable nonlinear systems with application to flight control[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(4): 871-877.
- [13] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
(Hu Y M. Nonlinear control systems theory and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.)

(上接第 308 页)

- [6] 刘鸣, 邵诚. 异步电动机的自抗扰控制器及其参数整定 [J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 540-544.
(Liu M, Shao C. Auto-disturbances-rejection controller and its parameter adjusting for asynchronous motor [J]. Control and Decision, 2003, 18(5): 540-544.)
- [7] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用 [J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 285-288.
(Zhang T, Wang H W, Wang Z C. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application [J]. Control and Decision, 1999, 14(3): 285-288.)
- [8] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制器[J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 221-225.
(Han J Q, Zhang W E. ADRC control for large time-delay systems[J]. Control and Decision, 1995, 10(3): 221-225.)
- [9] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
(Han J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18.)
- [10] 徐峰, 李东海, 姜学智, 等. 基于 Monte-Carlo 试验的 PID 参数整定比较方法[J]. 清华大学学报, 2002, 42(12): 1651-1654.
(Xu F, Li D H, Jiang X Z, et al. Monte-Carlo simulation of PID tuning methods [J]. J of Tsinghua University, 2002, 42(12): 1651-1654.)

(上接第 312 页)

- [8] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
(Lin C. Stochastic Petri nets and system performance evaluation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [9] 江志斌. Petri 网及其在制造系统建模控制中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
(Jiang Z B. Petri nets and its application in manufacture systematic modeling and control [M]. Beijing: China Mechanic Industrial Press, 2004.)
- [10] Martorell S. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 64(1): 19-31.
- [11] 肖刚, 李天柁. 系统可靠性分析中的蒙特卡罗方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
(Xiao G, Li T T. Monte carlo methods in systematic reliability analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [12] 王芳, 侯朝桢. 用蒙特卡罗和 Petri 网方法估计随机流网络的可靠性[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(7): 604-608.
(Wang F, Hou C Z. Evaluation of the reliability of stochastic flow network using monte carlo method and the petri net[J]. J of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(7): 604-608.)