

电子系统的 Markov 模型和云可靠性评价方法

覃庆努, 魏学业, 韩磊, 吴小进

(北京交通大学电子信息工程学院, 100044, 北京)

摘要: 针对传统的 Markov 模型可靠性评价方法难以体现复杂可变工作条件对电子系统可靠性影响的问题, 根据云模型融合随机性和模糊性的特点, 将云模型和 Markov 模型相结合, 提出了基于 Markov 模型的云可靠性评价方法. 首先根据电子产品和维修人员的特点, 建立失效率和修复率关于环境条件和维修人员生理状况的适应能力云模型, 然后根据实际的工作条件情况建立工作条件云模型, 最后由适应能力云模型和工作条件云模型通过 X 条件云发生器生成失效率云和修复率云, 并作为输入参数代入 Markov 模型进行可靠性评价. 该方法考虑了环境条件和维修人员生理状况对系统可靠性的影响, 其评价结果更接近于系统的真实情况. 采用该方法对某双机冷备系统的分析表明: 在温暖、电压稳定和维修人员身体状况良好时, 工作条件变化导致系统可靠度和可用度的下降幅度低于 0.5%; 在寒冷、电压不稳和维修人员身体状况一般时, 工作条件变化导致系统可靠度和可用度的下降幅度最大可达 90%, 与实际情况相符.

关键词: 可靠性; Markov 模型; 云模型; 环境条件; 生理状况

中图分类号: TN60; TB114 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)08-0087-07

Reliability Evaluation of Electronic System Based on Markov Model and Cloud Theory

QIN Qingnu, WEI Xueye, HAN Lei, WU Xiaojin

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Since the traditional reliability evaluation method based on Markov model can't reflect the effects of complex and variable working conditions on the reliability of electronic system, a reliability evaluation method based on Markov model and cloud theory is proposed by combining Markov model with cloud model. Suitability cloud models of failure rate and repair rate are built according to the characteristics of environment and maintainers. Then working condition cloud models are made in terms of the real working conditions. The failure rate cloud and the repair rate cloud are generated from the suitability cloud models and the working condition cloud models through X condition cloud generator. Finally the failure rate cloud and repair rate cloud are used as input parameters of Markov model to evaluate the reliability. Since the effects of environmental conditions and physiological condition are taken into account in the proposed method, the reliability evaluation is more accurate than that of the method based on Markov model. Analysis of hot-standby system using the proposed method shows that the variation of conditions will cause 5% or fewer decline under good work conditions and up to 90% decline under bad work conditions, which is in accordance with the system's actual situation.

Keywords: reliability; Markov model; cloud model; environmental condition; physiological condition

在传统的 Markov 可靠性模型中,系统部件的失效率和修复率通常是不变的^[1],但实际上并非如此.对于电子系统而言,其部件的失效率要受温度、湿度等环境条件的影响,而修复率除环境条件外,还要受维修人员生理状况的影响.实际中的电子系统很多处于复杂、变化的工作条件中,这些条件具有很大的模糊性和随机性,很难以精确数值表示,这就使得失效率和修复率不可能是不变的常量,而是些同时具有很强模糊性和随机性的变化的量.因此,传统的 Markov 可靠性模型难以描述复杂、变化工作条件对系统可靠性的影响,其评价结果往往与实际情况存在较大差异.许多学者将模糊理论引入 Markov 可靠性模型^[2-4],在一定程度上解决了模糊性问题,但仍没有很好地解决随机性问题.

为解决科学研究中同时存在模糊性和随机性的问题,李德毅院士在概率论和模糊数学理论交互的基础上,提出了以云模型为核心的云理论^[5-6].云模型把模糊性和随机性有机的集成到一起,构成定性和定量之间的相互映射,为模糊性和随机性相结合的信息处理提供了强有力的手段^[7].近年来,许多学者将云模型引入可靠性领域,获得了卓有成效的进展:文献[8-9]采用云模型建立产品的环境适应能力模型和工作条件模型,提出了可变环境条件下计算机和电子产品的可靠性评价方法;文献[10]采用云模型研究了可变环境条件下串-并联系统的可靠性问题;文献[11]将云理论和故障树相结合,研究了环境因素对自动监测系统可靠性的影响.但是,以上文献一方面并没有涉及对 Markov 模型的研究,另一方面也没有考虑维修人员的生理状况对系统可靠性的影响.本文提出一种基于 Markov 模型的云可靠性评价方法,将云理论与 Markov 模型相结合,根据产品、维修人员的条件适应能力和工作条件情况,生成相应的失效率云和修复率云并代入 Markov 模型进行可靠性计算,实现了复杂变化工作条件下电子系统的可靠性评价.

1 云理论

1.1 云的定义及数字特征^[5-7]

设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数,即 $\mu: U \rightarrow [0, 1] \quad \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$,则 x 在论域 U 上的分布称为云,每一个 x 称为一个云滴.云的数字特征用期望 E_x 、熵 E_n 和超

熵 H_e .这3个参数表示,如图1所示.

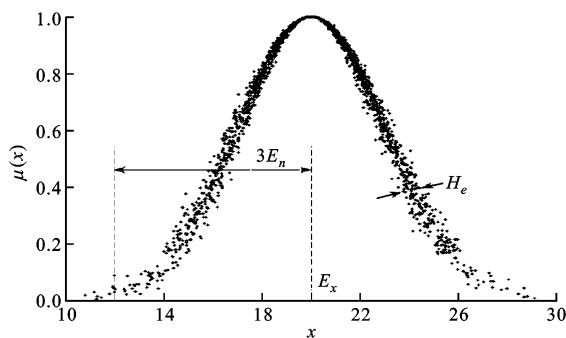


图1 云及其数字特征

(1)期望 E_x :是在论域空间中最能够代表定性概念的点,反映了代表此定性概念的云滴群的重心.

(2)熵 E_n :定性概念的不确定性度量,由概念的随机性和模糊性共同决定,反映了随机性和模糊性之间的关联性.

(3)超熵 H_e :熵的不确定性度量,即熵的熵,反映了熵的离散程度.

此外,还可以用半云模型表示具有单侧不确定性特征的定性概念,即 E_x 左半或右半部分的云.

1.2 云发生器

根据云产生的机理和方向,云发生器(CG)可分为正向、逆向和 X 条件云发生器等,发生器原理如图2所示.

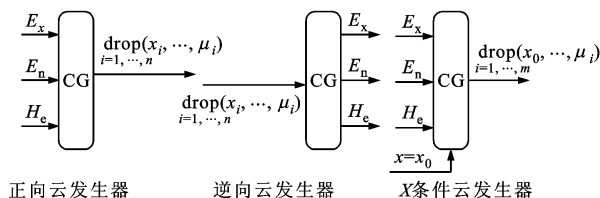


图2 云发生器原理图

正向云发生器:给定云的3个数字特征 E_x 、 E_n 和 H_e ,产生满足上述特征的正态云分布规律的二维点 $\text{drop}(x_i, \mu_i)$ (即云滴).逆向云发生器:给定若干个符合正态云分布规律的云滴样本 $\text{drop}(x_i, \mu_i)$,产生云的3个数字特征. X 条件云发生器:给定云的3个数字特征和特定 x 值($x=x_0$),产生满足条件的云滴 $\text{drop}(x_0, \mu_i)$.各种云的生成算法可参阅文献[7].

2 基于 Markov 模型的云可靠性评价

实际中影响电子系统可靠性的条件有环境条件和维修人员的生理状况等,同一项影响条件可分为

具体条件和复杂条件. 具体条件是指以精确数值表示的条件,例如温度为 24 ℃,电压为 24 V 等. 生理状况的具体条件可用 $[0,1]$ 内的精确数值表示. 复杂条件指变化的、很难用精确数值表示的条件,通常只能以取值范围,或者定性语言进行描述. 例如:温度用酷热、温暖、凉爽、寒冷等表示;电压用稳定、不稳等表示;生理状况用良好、一般、生病等表示. 每一复杂条件都是无数具体条件有规律或无规律的集合.

2.1 适应能力模型

对于实际中的电子产品和维修人员,技术手册通常只给出其对影响条件的适应范围和其在理想条件或典型条件下的失效率和修复率,其他条件下的失效率和修复率则很难获知. 我们知道:产品在理想条件下失效率最低,修复率最高;偏离理想条件越多,失效率越高,修复率越低;超出适应范围,产品和维修人员无法工作. 因此,本文采用一维正态云描述失效率、修复率对单项环境条件的适应能力,一维正态半升云描述修复率对维修人员生理状况的适应能力,称为适应云,表达式如下

$$S_{\lambda} = \lambda_{\text{ideal}}/S_P \quad (1)$$

$$S_u = u_{\text{ideal}} S_E S_M \quad (2)$$

$$S_P = \bigcap_{i=1}^n S_{P_i} = C_P[(E_{x1}, \dots, E_{x_n}), (E_{n1}, \dots, E_{n_n}), (H_{e1}, \dots, H_{e_n})] \quad (3)$$

$$S_E = \bigcap_{i=1}^n S_{E_i} = C_E[(E_{x1}, \dots, E_{x_n}), (E_{n1}, \dots, E_{n_n}), (H_{e1}, \dots, H_{e_n})] \quad (4)$$

$$S_M = C_{Msr}[E_x, E_n, H_e] \quad (5)$$

式中: S_{λ} 和 S_u 分别为失效率适应云和修复率适应云; λ_{ideal} 和 u_{ideal} 为理想条件下的失效率和修复率; n 为需考虑的环境条件数; S_{P_i} 为产品对第 i 项环境条件的适应云. S_{E_i} 为维修人员对第 i 项环境条件的适应云. S_P 和 S_E 的 3 个数字特征可由前期测试数据通过逆向云发生器给出;缺乏足够的测试数据时,数字特征可根据文献[8]中的指标近似法给出. S_M 为维修人员生理状况的一维半升适应云(用下标 sr 表示半升云),根据前述的生理状况数值表示和指标近似法,可以得到 $S_M = C_{Msr}[1, 0.33, 0.03]$.

图 3 给出了理想电压为 24 V、适应范围为 16 V ~ 32 V 的产品的电压适应云.

2.2 工作条件模型

实际中的电子系统大多处于复杂、可变的工作条件下,这些条件通常以数值范围或者定性语言表示,本文采用云模型来描述这些工作条件

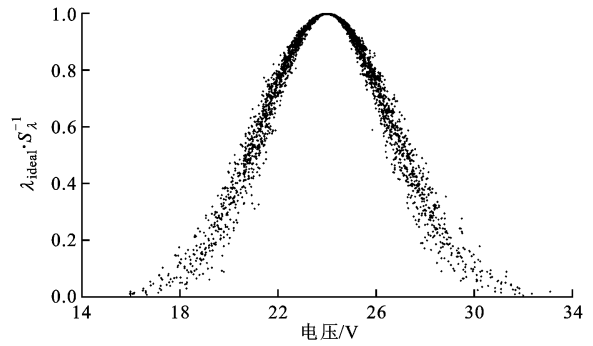


图 3 电压适应云

$$W = \bigcap_{i=1}^n W_i = C_W[(E_{x1}, \dots, E_{x_n}), (E_{n1}, \dots, E_{n_n}), (H_{e1}, \dots, H_{e_n})] \quad (6)$$

式中: W 为 n 维工作条件云; W_i 为第 i 项工作条件的云表达式. 数值范围表示的工作条件,其云模型的数字特征可以由指标近似法给出;定性语言表示的工作条件,其云模型的数字特征由人们的常识和对工作条件的认识程度给出. 根据工作条件模型我们可由正向云发生器还原出复杂工作条件下的若干个具体条件(WC).

对于人的生理状况,本文认为健康(包括良好和一般)的情况约为 70%,良好的情况约为 50%. 根据文献[7]的贡献度算法可以算出,对于半升云 $C_{sr}[1, 0.33, 0.03]$,区间 $[0.66, 1]$ 内的云滴对半升云的贡献约为 70%,区间 $[0.78, 1]$ 内的云滴的贡献约为 50%. 由前述修复率的生理适应情况,本文取 $[0.78, 1]$ 、 $[0.66, 0.78]$ 和 $[0, 0.66]$ 分别作为良好、一般、生病的双边约束,由指标近似法得相应的条件模型分别为: $C[0.89, 0.037, 0.004]$ 、 $C[0.72, 0.02, 0.002]$ 和 $C[0.33, 0.11, 0.01]$.

2.3 Markov 模型的云可靠性评价方法

适应能力模型给出了某一具体条件下产品失效率和维修人员修复率的取值,工作条件模型给出了复杂工作条件下具体条件的变化情况,将式(6)还原出的若干个具体条件作为适应云的 X 条件,通过 X 条件云发生器可以得到复杂工作条件下的失效率云 C_{λ} 和修复率云 C_u ,即

$$C_{\lambda} = \lambda_{\text{ideal}}/S_{P|X=W} \quad (7)$$

$$C_u = u_{\text{ideal}}(S_E S_M)_{|X=W} \quad (8)$$

取可靠度和可用度作为评价指标,则用 C_{λ} 和 C_u 分别代替失效率 λ 和修复率 u 代入系统的 Markov 模型进行可靠性计算,即可得出复杂条件下系统的可靠度和可用度. 评价步骤如下:

(1) 根据电子系统的特点,建立其 Markov 模

型,并计算可靠度、可用度关于时间 t 、失效率 λ 和修复率 u 的符号表达式 $R(t)$ 、 $A(t)$;

(2)根据专家经验或测试数据,得出系统部件的环境适应云 S_P 、维修人员的环境适应云 S_E 和一维生理适应云 S_M ,然后由式(1)和式(2)得出失效率适应云 S_λ 和修复率适应云 S_u ;

(3)根据实际工作条件情况得出该工作条件的云模型,并由模型还原出若干个具体条件;

(4)将步骤(3)得出的若干具体条件作为 X 条件,通过 X 条件云发生器和式(7)、式(8)得出 C_λ 和 C_u ;

(5)用 C_λ 和 C_u 代替 $R(t)$ 、 $A(t)$ 表达式中的 λ 和 u ,得到可靠度、可用度的云表达式 $R_c(t)$ 、 $A_c(t)$;

(6)将 $R_c(t)$ 、 $A_c(t)$ 的所有云滴取均值,得到可靠度、可用度等指标的精确值 $\bar{R}(t)$ 、 $\bar{A}(t)$ 作为评价。

由于影响条件的随机性和模糊性,每次重复步骤(1)至(6)得出的结果会有微小的差别,此时可取多次结果的均值作为系统的可靠度和可用度。方法评价结果的准确度一方面取决于适应能力模型和工作条件模型的精确度,另一方面受步骤(2)和(3)生成云滴数量的影响,一般而言,云滴数越多,评价结果越接近于实际情况。

3 实例分析

本文以比较常见的双机冷备系统为例,来说明基于 Markov 模型的云可靠性评价方法。系统结构如图 4 所示,其中,部件 1、2 结构完全相同,开关完全可靠,修理工为 1 个。仅当部件 1 失效后,开关闭合,部件 2 接替工作。部件 2 冷备时失效率为 0。

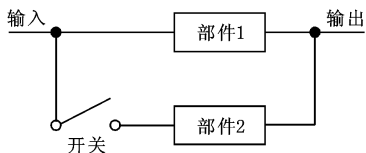


图 4 双机冷备系统结构图

影响部件工作的主要环境条件为温度和电压,部件工作的温度范围为 $-5 \sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$,电压范围为 $16 \sim 32\text{ V}$ 。部件工作的理想条件为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 24 V ,理想条件下部件的失效率为 $1.4 \times 10^{-3}\text{ h}^{-1}$ 。

影响修复率的主要条件为温度和维修人员的生理状况。维修人员工作的温度范围为 $5 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。维修人员工作的理想条件为温度 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、生理状况值为 1,理想条件下的修复率为 $1.7 \times 10^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。

根据 Markov 模型建模方法,定义系统的 3 个

不同状态,用结构函数 $X(t)$ 表示系统状态

$$X(t) =$$

$$\begin{cases} 0, & \text{时刻 } t \text{ 两部件均正常,部件 1 工作,部件 2 冷备} \\ 1, & \text{时刻 } t \text{ 部件 1 故障,部件 2 接替工作} \\ 2, & \text{时刻 } t \text{ 两部件均故障,系统故障} \end{cases}$$

(9)

则可得系统状态转移图如图 5 所示。

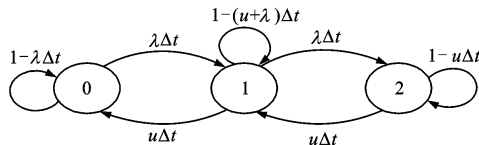


图 5 系统状态转移图

令 $P_j(t)$ 表示 t 时刻系统处于状态 j 的概率,即 $P_j(t) = P\{X(t) = j, j = 0, 1, 2\}$,则可得状态微分方程组

$$\begin{bmatrix} P'_0(t) \\ P'_1(t) \\ P'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 \\ u & -\lambda - u & \lambda \\ 0 & u & -u \end{bmatrix} \quad (10)$$

设初始状态为部件均正常工作,即 $P_0(0) = 1$, $P_1(0) = P_2(0) = 0$,解微分方程组(10)可以得到

$$P_2(t) = \frac{\lambda^2}{A_1 A_2} + \frac{\lambda^2}{A_1 (A_1 - A_2)} e^{A_1 t} + \frac{\lambda^2}{A_2 (A_2 - A_1)} e^{A_2 t} \quad (11)$$

式中: $A_1, A_2 = -\lambda - u \pm (\lambda u)^{1/2}$ 。可用度为

$$A(t) = 1 - P_2(t) = 1 - \frac{\lambda^2}{A_1 A_2} - \frac{\lambda^2}{A_1 (A_1 - A_2)} e^{A_1 t} + \frac{\lambda^2}{A_2 (A_1 - A_2)} e^{A_2 t} \quad (12)$$

为求系统可靠度,把状态 2 作为吸收态,状态转移图如图 6 所示。可得状态微分方程组如下

$$\begin{bmatrix} P'_0(t) \\ P'_1(t) \\ P'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 \\ u & -\lambda - u & \lambda \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

代入初始条件,解微分方程组(13)可得

$$P_2(t) = 1 - \frac{A_4}{A_3 - A_4} e^{A_3 t} + \frac{A_3}{A_3 - A_4} e^{A_4 t} \quad (14)$$

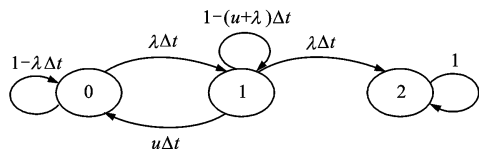


图 6 状态 2 为吸收态时的系统状态转移图

式中: $A_3, A_4 = \frac{1}{2}[-2\lambda - u \pm (4\lambda u + u^2)^{1/2}]$. 可靠度为

$$R(t) = 1 - P_2(t) = \frac{A_3}{A_3 - A_4} e^{A_4 t} - \frac{A_4}{A_3 - A_4} e^{A_3 t} \tag{15}$$

将理想条件下的失效率值和修复率值代入式(12)、(15),得到理想条件下的可靠度和可用度为

$$\begin{aligned} R(t) &= 1.005 1e^{-1 \times 10^{-4} t} - 0.51 \times 10^{-2} e^{-1.97 \times 10^{-2} t} \\ A(t) &= 0.993 8 + 1.48 \times 10^{-2} e^{-1.35 \times 10^{-2} t} - \\ &\quad 8.6 \times 10^{-3} e^{-2.33 \times 10^{-2} t} \end{aligned}$$

根据式(1)~(5)及系统情况,可得到失效率 and 修复率的适应云如下

$$S_\lambda = \frac{1.4 \times 10^{-3}}{C[(25, 24), (10, 2.67), (1, 0.25)]} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} S_u &= 1.7 \times 10^{-2} C[(22.5, 1), \\ &\quad (5.83, 0.33), (0.6, 0.03)] \end{aligned} \tag{17}$$

本文对以下几种工作条件下系统的可靠性进行研究.

3.1 工作条件 1

采用定性语言表示,温度为温暖,电压为稳定,维修人员身体状况为良好. 本文认为温度约为 21~27 ℃时为温暖,电压约为 23~25 V 时为稳定,因此可以得到工作条件模型

$$\begin{aligned} W &= C[(24, 24, 0.89), (1, 0.33, 0.037), \\ &\quad (0.1, 0.03, 0.004)] \end{aligned} \tag{18}$$

由 W 还原出 5 000 个 WC 并将其作为 X 条件,根据 X 条件云发生器和式(16)、(17)得到该条件下的失效率云 C_λ 和修复率云 C_u ,如图 7、图 8 所示.

将 C_λ 和 C_u 代入式(12)、(15),并对所得可靠度云和可用度云里的所有云滴取均值,可以得到工作条件 1 下的平均可靠度和平均可用度如下

$$\bar{R}(t) = 1.006 3e^{-1.13 \times 10^{-4} t} - 0.006 3e^{-1.8 \times 10^{-2} t} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} \bar{A}(t) &= 0.992 + 1.82 \times 10^{-2} e^{-1.2 \times 10^{-2} t} - \\ &\quad 1.02 \times 10^{-2} e^{-2.13 \times 10^{-2} t} \end{aligned} \tag{20}$$

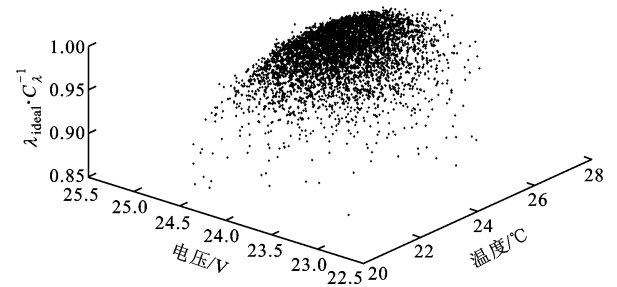


图 7 工作条件 1 下的失效率云

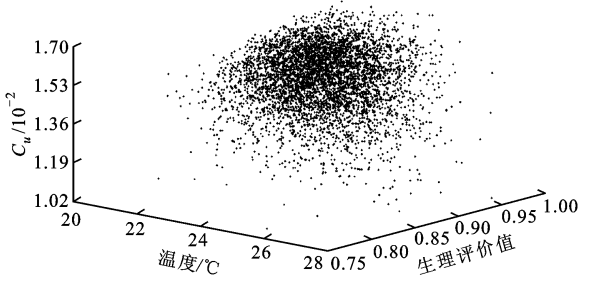


图 8 工作条件 1 下的修复率云

图 9 给出了工作条件 1 下和理想条件下系统的可靠度、可用度的比较.

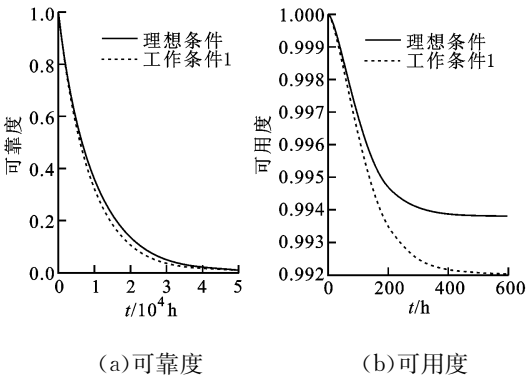


图 9 工作条件 1 与理想条件下的可靠度、可用度比较

经验表明,在温暖、电压稳定、维修人员状况良好的情况下,系统的可靠度和可用度与理想条件下基本一致. 从图 9 可以看出,用本文方法得出的系统可靠度和可用度较理想条件下的值稍有下降,下降幅度低于 0.5%,这和实际情况相符. 这说明,在较好的工作条件下,可以用理想条件下的系统可靠度和可用度近似代替系统实际的可靠度和可用度.

3.2 工作条件 2

工作条件 2 亦用定性语言表示,温度为寒冷,电压不稳,维修人员身体状况一般. 本文认为温度约为 -5~10 ℃时为寒冷,电压在 16~32 V 内接近正态规律随机波动为电压不稳,由此可得工作条件模型

$$\begin{aligned} W &= C[(2.5, 24, 0.72), (2.5, 2.67, 0.02), \\ &\quad (0.25, 0.25, 0.002)] \end{aligned} \tag{21}$$

由 W 还原出 5 000 个 WC,根据 X 条件云发生器和式(16)、(17),得到工作条件 2 下的失效率云 C_λ 和修复率云 C_u ,如图 10、图 11 所示.

将 C_λ 和 C_u 代入式(12)、(15),并对所得可靠度云和可用度云里的所有云滴取均值,可以得到工作条件 2 下的平均可靠度和平均可用度为

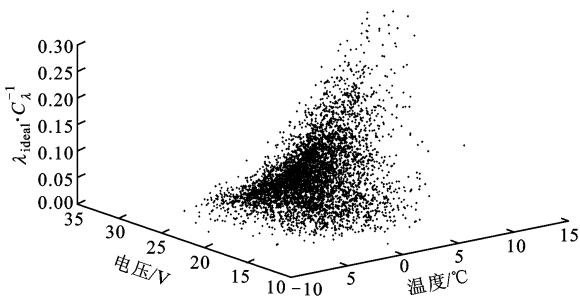


图 10 工作条件 2 下的失效率云

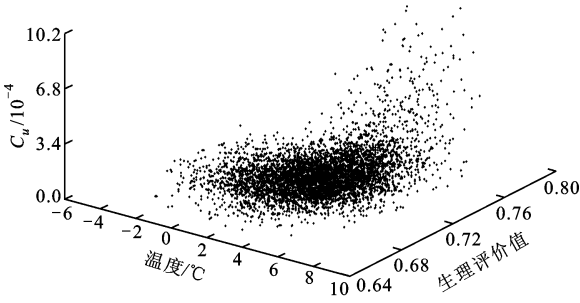


图 11 工作条件 2 下的修复率云

$$\bar{R}(t) = 7.87e^{-2 \times 10^{-2}t} - 6.87e^{-2.29 \times 10^{-2}t} \tag{22}$$

$$\bar{A}(t) = 0.0046 + 7.8592e^{-2 \times 10^{-2}t} - 6.8638e^{-2.29 \times 10^{-2}t} \tag{23}$$

图 12 给出了工作条件 2 下和理想条件下系统的可靠度、可用度的比较。

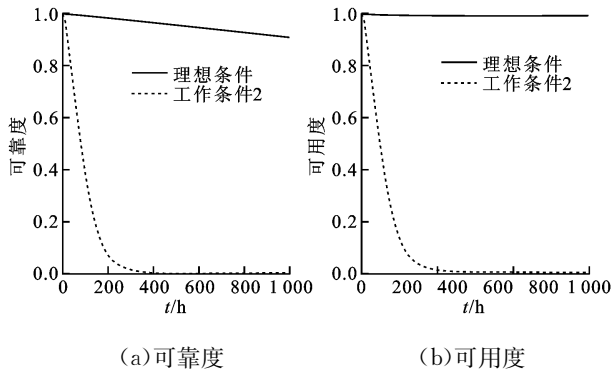


图 12 工作条件 2 与理想条件下的可靠度、可用度比较

从图 12 可以看出,条件 2 和理想条件下得出的可靠度和可用度随着时间的增长,两者的差距会逐渐变大,最大可达 90% 以上. 实际中也可以看到,恶劣的工作条件会严重影响系统的可靠性,采用本文方法得出的结果与实际情况也是相互吻合的. 如果在较为恶劣的条件下根据传统 Markov 模型,采用技术手册给出的失效率和修复率进行可靠性评价,必然会导致评价结果与实际情况的严重脱离.

3.3 给出多个失效率和修复率时两种方法的比较

以上例子为技术手册只给出理想条件下失效率

和修复率的情况. 对于技术手册给出理想条件和多个典型条件下失效率和修复率的情况,传统 Markov 评价方法通常按以下方式进行处理:

- (1)根据使用环境,由《GJB/Z 299C-2006 电子产品可靠性预计手册》确定环境类别和环境系数;
- (2)根据某一算法或经验公式取得影响条件的均值,然后取与该均值最接近的典型条件的失效率和修复率作为基本失效率和基本修复率;
- (3)将基本失效率乘以环境系数作为工作失效率,将基本修复率作为工作修复率,并将两者代入 Markov 模型进行可靠性计算.

例如产品固定于室外,温度为 10~20 °C,已知 10 °C、15 °C、20 °C、25 °C 时的失效率和修复率. 根据手册查得环境系数为 2.4;根据各温度出现时长对温度作时间平均,设得出的温度平均值为 14 °C,则取 15 °C 时的失效率乘以 2.4 作为工作失效率,15 °C 时的修复率作为工作修复率,并将两者代入 Markov 模型进行可靠性计算.

传统 Markov 评价方法的缺点有以下几点.

- (1)确定环境类别时需要考虑的因素较少,某些影响条件未能纳入;环境系数将各种影响因素综合考虑,未能分别体现各种影响条件对系统的影响;环境系数不能体现环境因素对修复率的影响.
- (2)影响条件和失效率、修复率并不一定成线性关系,采用影响条件的均值来映射失效率和修复率的均值并不合理;得出影响条件的均值通常并不就是典型条件下的值,采用典型值代替平均值必将带来较大的误差.
- (3)未考虑维修人员生理状况对修复率的影响.

采用本文方法时,由于有理想条件和典型条件下的失效率和修复率值作为先验数据,可得出更为准确的适应云模型,由适应云模型直接得出失效率和修复率,其误差远比由映射带来的误差要小;采用本文方法得到的失效率和修复率的均值是由云模型得出的真正均值,准确度比传统方法更高;本文方法考虑了维修人员生理状况对系统可靠性的影响. 由以上分析可知:对于给出理想条件和典型条件下失效率和修复率的情况,用本文方法得出的可靠性亦比传统方法得出的可靠性更接近于系统的实际情况. 由于该情况下两种方法的建模、仿真和分析比较过程与理想条件下一致,且实际中给出理想条件和数个典型条件下失效率和修复率的情况较少,本文限于篇幅,不再给出具体实例进行详细论述.

4 结 论

实际中的很多电子系统都处于复杂、变化的工作中,传统的 Markov 模型方法难以准确描述工作条件的不确定性对系统可靠性造成的影响. 本文根据云模型综合模糊性和随机性的特点,将云模型与 Markov 模型结合,综合考虑各种影响条件并建立起相应的工作条件云以及失效率、修复率适应云,生成与环境条件和生理状况相关的失效率云和修复率云并代入 Markov 模型进行可靠性计算. 本文方法考虑了环境条件和生理状况对系统可靠性的影响,为多种变化条件和模糊条件下电子系统的可靠性评价提供了一条有效的途径,得出的系统可靠性比传统的 Markov 模型方法更加接近于系统的实际情况.

参考文献:

- [1] 曹晋华,程侃. 可靠性数学引论[M]. 修订版. 北京:高等教育出版社,2006:182-244.
- [2] CUGNASCA P, ANDRADE M, CAMARGO JR J. A fuzzy based approach for the design and evaluation of dependable systems using the Markov model [C] // Proceedings of 1999 Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing. Los Alamitos, CA, USA; IEEE Computer Society, 1999: 112-119.
- [3] DUQUE O, MORINIGO D. A fuzzy Markov model including Optimization techniques to reduce uncertainty [C] // Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2004: 841-844.
- [4] GE Haifeng, ASGARPOOR S. Reliability evaluation of equipment and substations with fuzzy Markov processes [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3):1319-1328.
- [5] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器

[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.

LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.

- [6] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.
- [7] 李德毅,杜鹤. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社, 2005: 137-186.
- [8] 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.
SONG Yuanjun, LI Deyi, YANG Xiaozong, et al. Reliability evaluation of electronic products based on cloud models [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 74-76.
- [9] 宋远骏,李德毅,杨孝宗,等. 考虑环境因素的计算机可靠性云模型评价[J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(5): 631-636.
SONG Yuanjun, LI Deyi, Yang Xiaozong, et al. Reliability count evaluation of computers based on cloud models for environmental factors [J]. Journal of Computer Research and Development, 2001, 38(5): 631-636.
- [10] FU Qian, CAI Zhihua, WU Yiqi, et al. A novel reliability evaluation method for series-parallel systems based on cloud model [J]. Journal of Computational Information Systems, 2010, 6(10): 3237-3245.
- [11] SHAO Ying, LI Xiaoming. Simulation and analysis of the reliability of the cloud model-based automatic environmental monitoring system [C] // Proceedings of 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2011: 1-5.

(编辑 刘杨)