

嵌入式实时控制系统软件可靠性建模与应用

郭荣佐^{1*}, 黄 君²

(1. 四川师范大学 计算机科学学院, 成都 610068; 2. 四川工商职业技术学院 基础部, 四川 都江堰 611830)

(* 通信作者电子邮箱 gyz00001@163.com)

摘 要: 嵌入式实时控制系统(ERCS)广泛应用于各种控制系统中,其软件不同于普通软件,除满足实时性要求外,可靠性也是相当重要的。首先对嵌入式实时控制系统软件进行形式化抽象定义,然后对不可再分的软件模块进行可靠性建模,并应用 Copula 函数对软件系统进行建模,最后应用建立的模型,对具体的系统进行了软件可靠性计算。通过实例计算可知,用 Copula 函数建立的嵌入式实时控制系统软件可靠性模型,考虑了软件各个模块的相依性,进而得到嵌入式实时控制系统软件模块相依的可靠度较各模块独立时有所提高。

关键词: 嵌入式实时控制系统;软件可靠性;Copula 函数;建模

中图分类号: TP302.7;TP202.1 **文献标志码:** A

Modeling and application for software reliability of embedded real-time control system

GUO Rongzuo^{1*}, HUANG Jun²

(1. College of Computer Science, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan 610068, China;

2. Department of Basic Courses, Sichuan Technology and Business College, Dujiangyan Sichuan 611830, China)

Abstract: Embedded Real-time Control System (ERCS) is widely used in all kinds of control systems. Its software is different from other common software. Besides to meet the real-time requirements, the software needs to be reliable. At first, abstract formalization for the software of embedded real-time control system was defined. Then, reliability modeling was given for software modules which can not be subdivided, and the reliability modeling for software of embedded real-time control system was also provided by applying Copula function. The reliability of specific system software was calculated by using the model. The results show that the reliability model established with Copula function takes account of the correlation between software modules, therefore the reliability of software modules of embedded real-time control system was improved compared with the independent modules.

Key words: Embedded Real-time Control System (ERCS); software reliability; Copula function; modeling

0 引言

嵌入式实时控制系统(Embedded Real-time Control System, ERCS)是以嵌入式技术、实时控制技术等为基础,以具体控制为中心的软硬件可裁剪的专用控制系统。ERCS 是专门为某方面的控制而定制的典型嵌入式系统,具有嵌入式系统的所有特点,其可靠性表现为硬件、软件及综合可靠性,而软件可靠性是尤其重要的。

在软件可靠性研究中,通常将软件划分为不同功能的组件、构建或模块,且假定这些组件、构件或模块的运行是相互独立同分布的。事实上,该假设无法得以实现,因组成软件的不同功能的组件、构件或模块之间不可能完全独立;另一方面,这些是组件、构件或模块因执行要求和提供的条件不同,不可能完全服从相同类型的分布,且组件、构件或模块之间是相互联系、相互影响的^[1]。而 ERCS 软件又有其自身的特点,主要体现在实时性、约束性和不确定性^[2],其约束性是指软件各个模块间的相互约束、相互依赖,不确定性则是指实现不同控制功能的软件模块组合的不同。文献[3]用两类不同条件的失效函数对软件的失效率进行了计算,但两类失效率函数必须具有联合分布函数;文献[4]用非齐次泊松过程(Non-Homogeneous Poisson Process, NHPP)分析影响实时控制软件

可靠性的因素,探讨提高实时控制软件可靠性的方法;文献[5]用冗余理论研究分布式实时控制系统软件可靠性。以上研究,仅从某一方面对实时控制系统软件可靠性进行了研究,未从软件内部入手对其进行定性/定量分析,且未将组成系统软件的各个模块间的相关性考虑进去。

Copula 函数理论为研究软件可靠性提供了新的理论依据和方法^[6];文献[7]用 Copula 函数对相依部件系统从定性/量方面进行寿命分析。文献[8]用 Copula 函数对具有相依性的 k/n 表决系统的可靠性进行了研究;文献[9]用 Copula 函数研究两相依部件并联冗余系统的可靠性。这些研究,促进了 Copula 理论的完善及其可靠性方面的应用,但对 Copula 函数在嵌入式实时控制系统软件可靠性方面的研究还未涉及。因此,本文利用 Copula 函数研究嵌入式实时控制系统软件可靠性。

1 目标 ERCS 软件定义

ERCS 由软件和硬件两部分组成,其软件子系统由板级支持包(Board Support Package, BSP)、嵌入式实时操作系统(Embedded Real-time Operating System, ERTOS)、设备驱动程序(Device Driver Program, DDP)、操作系统抽象程序(Operating System Abstract Program, OSAP)、文件系统(Files

收稿日期:2012-08-20;修回日期:2012-09-25。 基金项目:四川省教育厅自然科学基金重点项目(10ZA008)。

作者简介:郭荣佐(1973-),男,四川开江人,副教授,主要研究方向:嵌入式实时系统、物联网感知、计算机控制系统; 黄君(1974-),女,重庆人,讲师,硕士,主要研究方向:应用数学。

System, FS)、网络协议(Network Protocol, NP)、图像用户接口(Graphical User Interface, GUI)和实时控制应用程序(Real-time Control Application Program, RCAP)等组成。而每部分又由不同功能的软件组件、构件或模块构成,为描述方便,在此将软件组件、构件或模块统称为模块。

要实现特定 ERCS 的功能,必须在需求分析完成后,对系统功能进行划分,给出各个功能得以实现的软件组件。ERCS 软件组成及其约束: BSP 需要初始化的硬件 I_{BSP_1} 不超过 N_1 、可选的 RTOS I_{RTOS_2} 不能超过 N_2, \dots , RCAP I_{RCAP_n} 不超过 N_n 个模块。

若 C_{SERCS} 为 ERCS 软件中所有模块的集合,则 C_{SERCS} 为一个 n 元组,即 $C_{SERCS} = (M_{BSP_1}, M_{RTOS_2}, \dots, M_{RCAP_n})$,其中 $M_{BSP_1}, M_{RTOS_2}, \dots, M_{RCAP_n}$ 是与组成 ERCS 软件的各种相关的模块。

定义 1 设 ERCS 软件由 M 个模块组成,即: $E_{SERCS} = \{S_1, S_2, \dots, S_M\}$,则每个软件模块对应多个可选的组件集合,即:

$$\begin{aligned} S_1 &\rightarrow \{C_{SERCS_{11}}, C_{SERCS_{12}}, \dots, C_{SERCS_{1a}}\} \\ S_2 &\rightarrow \{C_{SERCS_{21}}, C_{SERCS_{22}}, \dots, C_{SERCS_{2b}}\} \\ &\vdots \\ S_M &\rightarrow \{C_{SERCS_{m1}}, C_{SERCS_{m2}}, \dots, C_{SERCS_{mn}}\} \end{aligned}$$

其中: $C_{SERCS} = (M_{BSP_1}, M_{RTOS_2}, \dots, M_{RCAP_n})$; a, b, \dots, n 是常数,分别表示 S_1, S_2, \dots, S_M 所对应的可选模块的数目。

因此,ERCS 软件设计问题就是寻求一个 C_{SERCS} 的组合算法或组合模型,组合满足:

$$\begin{aligned} S_1(M_{BSP_{11}}, M_{BSP_{2j}}, \dots, M_{BSP_{mk}}) &\leq N_1 \\ S_2(M_{RTOS_{11}}, M_{RTOS_{2j}}, \dots, M_{RTOS_{mk}}) &\leq N_2 \\ &\vdots \\ S_n(M_{RCAP_{11}}, M_{RCAP_{2j}}, \dots, M_{RCAP_{mk}}) &\leq N_n \end{aligned}$$

其中 S_1, S_2, \dots, S_n 分别对应为不同软件组件 $M_{BSP_1}, M_{RTOS_2}, \dots, M_{RCAP_n}$ 和约束 N_1, N_2, \dots, N_n ,用来分析和计算由多个组件组成的 ERCS 软件^[10]。由此可得 ERCS 软件结构模型如图 1 所示。

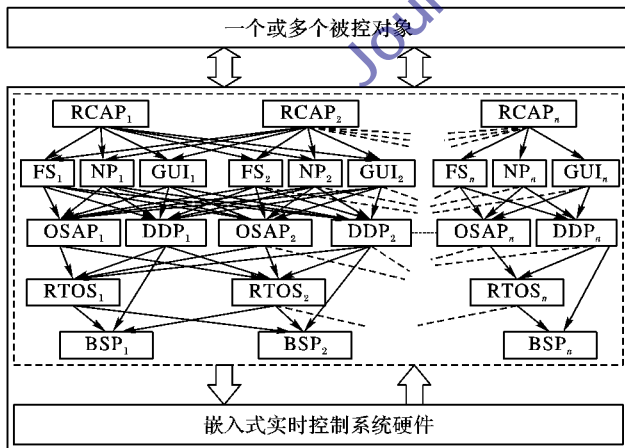


图1 ERCS 软件结构模型

由图 1 可知,某个 RCAP 组件,可能与多个 FS、NP 和 GUI 相关或相依,某个 GUI 组件又可能与多个 OSAP 和 DDP 相关或相依。由此可见,RCAP 各个组件不是相互独立,且整个 ERCS 的软件子系统的各个模块间并不相互独立。

2 ERCS 软件 Copula 可靠性模型

Copula 理论是分析随机变量相关性的有力工具,而 ERCS

软件由相互间并不独立的不同的模块组成,因此,可利用 Copula 理论研究 ERCS 软件可靠性。

2.1 单个软件模块可靠性

ERCS 在软件上有其自身的特点:每个模块具有规范接口和确定的上下文依赖关系,模块可单独开发成为不透明的二进制功能单元,模块是不透明的功能实现,各模块互相作用构成系统。ERCS 软件模块从实时性角度将其分为周期模块和非周期模块,周期模块以时间为触发条件,非周期模块以事件为触发条件。在此不对 ERCS 系统的实时性进行讨论。

若 ERCS 的软件模块仅有正常和失效两种状态。模块失效可分为模块内部可改正的错误所致的模块失效,模块内不可改正的错误所致模块失效和模块正确而模块运行所需的硬件故障所致的失效等,不同原因引起的失效导致其失效率不相同。依据文献[4]得到 ERCS 的软件模块失效率为

$$\lambda_i = abe^{-bt} + e^{-at} + \alpha e^{-at} \quad (1)$$

其中: a 为软件模块的错误个数的平均值; b 为比例常数; c 为常数; α 为难以确定的因素造成模块失效次数的期望。

若模块出现故障,需进行修改使其能正常运行。用 Markov 理论^[11]建立状态转移图,如图 2 所示,则可得如下方程:

$$P_i'(t) = A P_i(t) \quad (2)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} -\lambda_j(t) & \mu_j(t) \\ \lambda_j(t) & -\mu_j(t) \end{bmatrix}$, 初始条件为 $(p_{j0}(0), p_{j1}(0)) = (1, 0)$ 。解此微分方程有:

$$\begin{cases} p_{j0} = \exp\left(-\int_0^t (\lambda_j(y) + \mu_j(y)) dy\right) \\ p_{j1} = 1 - p_{j0} \end{cases} \quad (3)$$

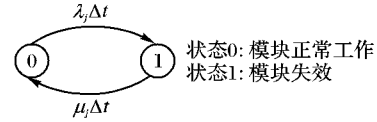


图2 软件模块状态转移图

而 ERCS 的软件具有很强的实时性要求,即所有软件模块必须在规定时间 t_0 内完成,若时间超出 t_0 ,则视为模块失效。式(2)描述的模块正常运行的概率为无时间约束的,即模块正常运行概率为 p_{j0} 。

定义 2 若 ERCS 软件模块 i 由状态 0 到状态 1 转换时,访问状态 0 的次数 V_{i0} 可定义如下:

$$V_{i0} = \sum V_{i1} \cdot p_{i01} + p_{i0}(0) \quad (4)$$

其中: V_{i0} 表示访问状态 0 的次数; p_{i01} 表示一步转移概率; $p_{i0}(0)$ 表示状态 0 的初始概率。

由图 2 可知,模块 i 的 $p_{i01} = 1 - p_{i0}$, $p_{i0}(0) = 1$,则式(4)变为: $V_{i0} = 1 + \sum V_{i1} \cdot (1 - p_{i0})$ 。

模块运行需要一定时间。假设每次访问状态 0 的时间为 t_i ,则可用 $V_{i0}t_i$ 表示模块运行时在状态 0 上需要的平均时间^[12],模块 i 运行所需的时间为:

$$\bar{t}_i = \sum_{i=1}^n V_{i0}t_i \quad (5)$$

其中 V_{i0} 表示访问状态 0 的次数。

定义 3 ERCS 软件模块 i 的可靠度表示该模块的正常运行的概率,用 $R_i(t)$ 来描述模块在规定时间 t 内的正常运行概率,则可定义 $R_i(t)$ 如下:

$$R_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(y) dy\right) \quad (6)$$

其中: R_i 表示模块 i 的可靠度; $\lambda_i(t)$ 表示模块 i 的失效密度函数; x 表示访问模块 i 的平均时间。

由此,将式(2)、(3)、(4)、(5) 联立起来,进行运算即可得到模块 i 的可靠度可描述为

$$R_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(y) dy\right) = \exp(-\varphi(t)) \quad (7)$$

其中: $\varphi(t) = \int_0^t \left(\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^{V_{i1} \cdot p_{i1} + 1} \lambda_i(y)) dy\right)$, $\lambda_i = abe^{-bt} + e^{-at} +$

$\alpha e^{-\alpha t}$ 。

2.2 Copula 函数可靠性模型

由前面论述可知,ERCS 的软件系统由 BSP、RTOS、DDP、OSAP、FS、NP、GUI 和 RCAP 等模块组成。每个模块由若干个子模块共同协作完成其功能,也就是 BSP 最多由 N_1 个子模块组成,RTOS 最多由 N_2 个子模块组成,……,RCAP 最多由 N_n 个模块组成。因此,ERCS 的软件系统可由图 1 进行抽象,其抽象图如图 3 所示,其中图(a)为图 1 的示意图,图(b)为抽象图。

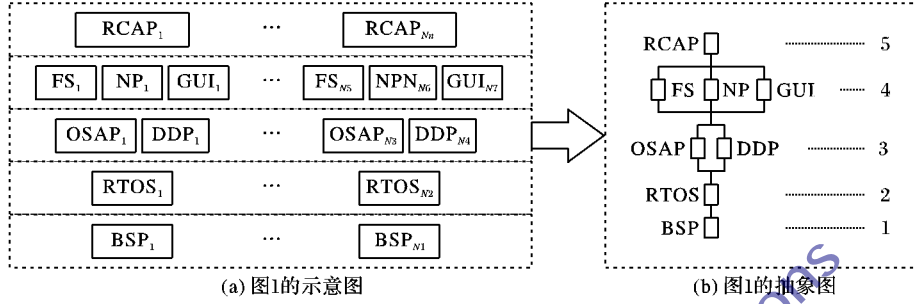


图3 ERCS 软件结构及抽象

ERCS 软件的模块又可划分为多个子模块,各个子模块通过相依或相互独立的串联、并联和混合等方式构成 ERCS 软件的模块。假设子模块分别为 X_1, X_2, \dots, X_n , 且各模块具有相依性;在 $t = 0$ 时刻,若所有子模块为新的且同时开始工作,则模块的寿命 X 为

$$X = \min\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (8)$$

则可得其联合分布函数为

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n) = P\{X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n\} \quad (9)$$

在此假设每个子模块的可靠度由式(7) 给定,则由 Copula 函数理论有,存在一个 n 维的 Copula C^n ,使得

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n) = C^n(F_1(t_1), F_2(t_2), \dots, F_n(t_n)) = C^n(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (10)$$

由式(7) 可知 $R_i(t)$ 在定义域内为连续函数,可推知 $F_i(t_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 在定义域 $t_i \in [0, +\infty)$ 内同样具有连续性,故 Copula C^n 是唯一的。

ERCS 的模块内部无冗余项,且必须在规定时间内完成实时控制功能,以便接受新的实时任务。故可得 ERCS 功能模块内各个子模块为串联相依,模块的可靠度^[13-14]为

$$R_{mc}(t) = \sum \text{sgn}(F) C^n(F) \quad (11)$$

其中: $F = (F_1, F_2, \dots, F_n)$, $F_i = F_i(t_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 或 1, 因 $F_i(\infty) = 1$, $\text{sgn}(F) = \begin{cases} 1, & \text{有偶数个子模块 } F_i = F_i(t) \\ -1, & \text{有奇数个子模块 } F_i = F_i(t) \end{cases}$ 。

由图 3(b) 有,OSAP 与 DDP 可以用并联相关 Copula 对其进行可靠度计算,即: \exists Copula C^2 使得

$$H(x_{\text{OSAP}}, x_{\text{DDP}}) = C(F_{\text{OSAP}}(x_{\text{OSAP}}), F_{\text{DDP}}(x_{\text{DDP}}))$$

成立。由此可得该结构的可靠度为

$$R_3(t) = P\{\max(X_{\text{OSAP}}, X_{\text{DDP}})\} = 1 - P\{\max(X_{\text{OSAP}}, X_{\text{DDP}}) \leq t\} = 1 - C(1 - R_{\text{OSAP}}(t), 1 - R_{\text{DDP}}(t)) \quad (12)$$

其中 $R_{\text{OSAP}}(t), R_{\text{DDP}}(t)$ 服从式(11)。

同理可得到 FS、NP 和 GUI 组成的三模块并联相关结构的可靠度为:

$$R_4(t) = 1 - C(1 - R_{\text{FS}}(t), 1 - R_{\text{NP}}(t), 1 - R_{\text{GUI}}(t)) \quad (13)$$

其中 $R_{\text{FS}}(t), R_{\text{NP}}(t), R_{\text{GUI}}(t)$ 服从式(11)。

综上,由图 3(b) 得到 ERCS 的软件可靠度为

$$R_{\text{swr}}(t) = 1 - \sum_{i=1}^5 (1 - R_i(t)) + \sum_{1 \leq i < j \leq 5} C^2(1 - R_i(t), 1 - R_j(t)) - \sum_{1 \leq i < j < k \leq 5} C^3(1 - R_i(t), 1 - R_j(t), 1 - R_k(t)) + \sum_{1 \leq i < j < k < m \leq 5} C^4(1 - R_i(t), 1 - R_j(t), 1 - R_k(t), 1 - R_m(t)) - C^5(1 - R_1(t), 1 - R_2(t), 1 - R_3(t), 1 - R_4(t), 1 - R_5(t)) \quad (14)$$

其中: R_1, R_2, R_5 分别表示模块 BSP、RTOS、RCAP 的可靠度,由式(11)进行描述; R_3, R_4 分别由式(12)、(13) 给定。

由此可知,若 ERCS 按照图 1 的结构并以图 3 进行抽象,应用 Copula 理论即可得到式(14) 所示的 ERCS 软件子系统的相依可靠度,进一步计算可得到其他可靠性指标。

3 模型应用

参考文献[15] 设计了基于先进 RISC 处理器(Advanced RISC Machine, ARM) 的造纸机控制器,现利用本文提出的 ERCS 软件可靠性模型对其软件的可靠性指标进行计算。对文献[15] 的软件结构进行抽象,可形象表示为如图 4 所示。

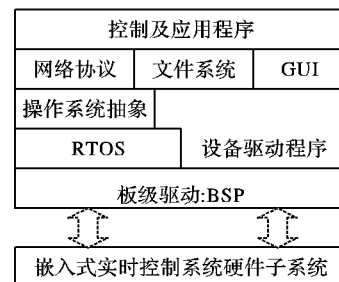


图4 控制器软件结构抽象图

依据参考文献[15] 和造纸机工艺要求可知,控制器需在规定时间 t_{sg} 实现控制功能,这就要求控制器的软件必须在规定时间 t_{sg} 内完成规定功能,且有 $t_{\text{sg}} > t_{\text{sg}}$ 而软件各模块的执

行时间具有一定的差异,若任一模块*i*的执行时间为 t_i ,且 $0 < t_i < t_0 < t_{sg}$,则有:

$$\sum_{i=1}^n t_i \leq t_{sg} < t_{sg} \quad (15)$$

其中: n 为软件的模块数, $i=1,2,\dots,n$ 。若 t_i 一旦确定,代入式(7)可得模块*i*的可靠度函数。

控制器用 S3C2410x 作为控制核心,其最高主频为 266 MHz,且单周期指令集,以提高控制速度。而控制器控制的造纸机要求 $t_{sg}=60\text{ ms}$, $t_{ng}=50\text{ ms}$,进而需要估算各个模块在最坏情况下执行时间(Worst Cases of the Execution Time, WCET)上限^[16],与各个模块的规定时间 t_i 进行比较,若所估算得到的 WCET 大于 t_i ,则需进行重新设计和估算。经过计算和实验得到如表 1 所示的数据,从而得到 $\sum t_i=10.9\text{ ms}$,满足式(15)之要求。

表 1 各模块预计和规定执行时间 μs

模块	t_i	WCET
BSP	100	80
ERTOS	4 000	3 760
OSAP	100	40
DDP	100	40
FS	100	40
NP	2 000	1 880
GUI	500	380
RCAP	4 000	3 760

为计算方便和便于理解,现假设控制器软件子系统的各个组成模块为相同类型,即各个组成模块服从相同的概率分布^[17]。对造纸机控制器而言,一旦研制完成即投入现场运行,其软件子系统就不可维修,应用前面理论,即可得到模块的可靠度为:

$$R_i(t) = \exp \left(- \int_0^t \lambda_i(y) dy \right) = \exp \left(- \int_0^t \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n V_{ij} \cdot (1 - \exp(-\int_0^y \lambda_j(y) dy)) \right) \lambda_i(y) dy \right) \quad (16)$$

利用式(16)进行计算,得到造纸机控制器软件模块(此处模块为不可再分的)的可靠度为 0.999 99,其中 $\lambda_i(t) = (t/2)^{0.1}$, $V_{ii} = 6 \times 10^2$, $t = 3.6 \times 10^6\text{ s}$, $n = 6 \times 10^7$, $t_i = 2.3 \times 10^{-5}\text{ s}$ 。

控制器软件的每个功能模块由多个子模块通过相依关系构成,因此式(11)可得到各个功能模块的相依可靠度,如表 2 所示。

表 2 模块内子模块独立、相依可靠度

功能模块	子模块数	可靠度	
		独立	相依
BSP	3	0.999 97	0.999 98
ERTOS	20	0.999 80	0.999 83
OSAP	2	0.999 98	0.999 99
DDP	9	0.999 91	0.999 94
FS	3	0.999 97	0.999 98
NP	20	0.999 80	0.999 83
GUI	5	0.999 95	0.999 96
RCAP	40	0.999 60	0.999 65

由表 2 与式(14)进行计算,得到 $MTTF_{xyi} =$

$\int_0^{3.6 \times 10^7} R_{swr}(t) dt = 3.598 73 \times 10^7\text{ s}$,若系统各个功能模块相互独立,则可计算得到 $MTTF_{duli} = 3.597 66 \times 10^7\text{ s}$ 。

通过上述计算可知,造纸机控制器软件的功能模块若相互独立,则其软件系统的 MTTF 小于相依时的 MTTF。

4 结语

ERCS 的可靠性问题是一个综合性很强的问题,不仅与系统软/硬件相关,还与系统的实时性相关。国内外学者对软件可靠性进行了深入研究与分析,但对 ERCS 的软件可靠性涉足甚少。本文从 ERCS 软件内部组成入手,对不可再分模块的可靠性进行定量计算,用 Copula 函数对 ERCS 软件进行可靠性建模,并可进行定量计算。本文首先对 ERCS 软件进行抽象定义,并为不可再分模块建立可靠性模型,然后用 Copula 函数建立 ERCS 软件可靠性模型,最后用所建立的 Copula 函数模型对嵌入式造纸机控制器进行了可靠性分析与计算。

参考文献:

- [1] 陈未如,石帅,黄宁. 基于软件架构的可靠性分配算法[J]. 计算机工程与设计,2010,31(4):706-708.
- [2] 艾骏,陆民燕,阮廉. 实时嵌入式软件可靠性测试数据自动生成方法[J]. 测控技术,2007,26(3):59-61.
- [3] COX D R. Regression models and life tables (with discussion) [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Methodological, 1972,34(2):187-202.
- [4] 胡仁胜. 实时控制软件系统的可靠性分析[J]. 华南师范大学学报:自然科学版,2001,33(1):103-107.
- [5] 蒋敏,孔军,单家芳. 实时控制系统软件的可靠性[J]. 计算机工程,2007,33(21):47-49.
- [6] NELSEM R B. An introduction to Copulas [M]. New York: Springer, 2005.
- [7] 唐家银. 基于 Copula 对随机元间相依性的研究及其应用[D]. 成都:西南交通大学,2005:2-20.
- [8] 易文德,卫贵武. 基于 Copula 函数的相依部件表决系统的可靠性研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2007,32(6):52-55.
- [9] KOTZ S, LAI C D, XIE M. On the effect of redundancy for systems with dependent components [J]. IIE Transactions, 2003,35(12):1103-1110.
- [10] 王培东,徐海涛. 遗传退火算法在软硬件划分中的应用[J]. 计算机工程,2009,35(15):179-181.
- [11] 李裕奇,李永红. 随机过程[M]. 北京:国防工业出版社,2005:214-258.
- [12] GOKHALE S S, WONG W E, TRIVEDI K S, et al. An analytical approach to architecture-based software reliability prediction [C]// IPDS '98: IEEE International Conference on Computer Performance and Dependability Symposium. Piscataway: IEEE, 1998:13-22.
- [13] 易文德. 应用 Copula 探讨可靠性理论中的相依性[D]. 成都:西南交通大学,2005.
- [14] 钟波,孙永波. 基于 Copula 的部件相依并联系统可靠性分析[J]. 数理统计与管理,2011,30(2):363-369.
- [15] 郭荣佐,郭进,王霖,等. 基于 ARM 的造纸机控制器设计[J]. 微计算机信息,2008,24(28):69-71.
- [16] 吴国伟,姚琳. 一种嵌入式软件 WCET 估计新方法[J]. 大连理工大学学报,2004,44(6):912-915.
- [17] 郭荣佐,黄君,王霖. 基于 Markov 链的嵌入式系统硬件可靠性研究[J]. 计算机应用,2012,32(4):1152-1156.