

ARM 嵌入式系统可靠性模糊综合评价方法

石剑飞^{1,2}, 闫怀志^{1,3}

1. 北京理工大学计算机网络攻防对抗实验室, 北京 100081
2. 北京理工大学机电学院机电工程与控制实验室, 北京 100081
3. 北京理工大学软件学院, 北京 100081

摘要 为保障和提高 ARM 嵌入式系统的可靠性, 引入模糊综合评价方法对典型 ARM 嵌入式系统的可靠性进行全面评估。根据功能和集成特点, 将系统硬件部分、软件部分和系统扩展部分 3 个部分分别划分成为不同的模块。根据对系统整体可靠性的影响, 对 ARM 嵌入式系统各组成模块进行重要性级别区分。建立 4 层评价指标体系, 结合模糊方法将定性问题量化, 利用模糊矩阵变换解决了矩阵一致性问题, 并由此得出系统可靠性评价结论。基于 ARM 的导弹垂直发射控制系统是安全关键系统, 使用本文方法对其可靠性进行评估, 结果表明该方法为 ARM 嵌入式系统可靠性评估的一种有效的新方法, 利用该系统可以更好地掌握该系统可靠性情况并采取相应措施。

关键词 ARM 嵌入式系统; 可靠性; 模糊综合评价; 模块化

中图分类号 TP393

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)19-0047-05

ARM Embedded System Reliability Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

SHI Jianfei^{1,2}, YAN Huaizhi^{1,3}

1. Laboratory of Network Defense Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Laboratory of Mechatronics Engineering and Control, School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
3. School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract According the IEEE definition, the embedded system is a device used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants. The embedded system usually supports real-time task, provides storage area protection, extends processor architecture and with very low power consumption. Based on these features, people have developed various kinds of embedded

systems. Among them, ARM embedded system is the most important one and is applied widely in many areas, especially in safety critical system, where its reliability determines the reliability of the system. In order to ensure and enhance the reliability of the ARM embedded system, this paper proposes a fuzzy comprehensive evaluation method to realize a more overall and more accurate assessment of the reliability of the typical ARM embedded system. According to the characteristics of functions, the overall ARM embedded system is divided into different modules, including three parts: the hardware part, the software part and the system extension part. Because each module has different impacts on the reliability of the entire system, it is necessary to distinguish the different important level of the ARM embedded system modules. Based on the different important level of the ARM embedded system modules, the evaluation architecture is established, which is divided into three layers, a fuzzy method is introduced to solve the quantitative or qualitative problems. To deal with the matrix inconsistency problem, a fuzzy matrix transformation is used, to get the fuzzy consistency matrix. The evaluation matrix is constructed from the bottom to the top layers, and the rating column vector is combined to get the whole system reliability. Vertical missile launch control system based ARM

收稿日期: 2009-07-16

基金项目: 中国高技术研究发展计划(863 计划)项目(2009AA01Z433)

作者简介: 石剑飞, 博士研究生, 研究方向为软件可靠性分析, 电子信箱: jfshi0311@163.com; 闫怀志(通信作者), 副教授, 研究方向为软件安全性逆向分析, 电子信箱: yhzhi@bit.edu.cn

is a safety critical system, with high reliability requirements. This model is put into application for the ARM embedded system reliability evaluation. The results show that the evaluation model gives an effective method to assess the ARM embedded system reliability.

Keywords ARM embedded system; reliability; fuzzy comprehensive analysis; modular

0 引言

嵌入式系统是以应用为中心,以计算机技术为基础,软硬件可裁剪,能适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统^[1]。一方面,嵌入式系统工作环境恶劣,受电噪声干扰影响较大;另一方面,由于其软件复杂度高,导致系统的运行稳定性问题日益严峻,故可靠性成为影响嵌入式系统优劣的重要因素。军用嵌入式系统的可靠性要求更高,多将可靠性作为嵌入式系统设计的最重要指标之一。

目前常见的嵌入式系统架构有 ARM、X86 等,而 ARM 的地位尤为重要。基于 ARM 架构的产品占市场的大部分份额,居于垄断地位,因而基于 ARM 的嵌入式系统可靠性一直是人们关注的重点。

目前基于 ARM 的嵌入式系统可靠性方面的研究大都集中在开发或测试阶段对其可靠性进行保障,如基于故障的系统测试手段、抗干扰技术、构件化技术、基于可靠性增长模型的测试方法^[2-7]等,另一方面可靠性技术的研究大都集中于可靠性的增长模型和可靠性的度量^[8-9],而对其系统总体可靠性评价方面的研究相对较少。

传统的测试方法和抗干扰技术等存在系统可靠性保证上存在一定的局限性,只关注某一方面而忽略了系统整体的可靠性。对基于 ARM 嵌入式系统进行可靠性评价是保证该系统运行正确和提高系统可靠性基本有效的手段。基于 ARM 的嵌入式系统可靠性评估具有复杂性和模糊性,故引入模糊分析方法。为降低系统分析的复杂性,其评价形式应该为容易理解的层次结构。本文将模糊综合分析引入模块化 ARM 嵌入式系统可靠性评价,并根据对整体可靠性的重要程度区分了模块的不同级别,给出了 ARM 嵌入式系统可靠性分析一般模型,并将评价模型应用在一个典型的系统可靠性评价中。实验表明,该模型为 ARM 嵌入式系统可靠性评价提供了一种操作性较强的新途径,能够更加全面、准确地评价系统的可靠性。

1 模块化 ARM 嵌入式系统可靠性及其评价特点

ARM 嵌入式系统可靠性是从嵌入式系统的持续无失效工作时间、故障修正率等基础上发展起来的一个总体概念。嵌入式系统故障查出率、单位时间失效概率、嵌入式系统模块适配能力等都是针对可靠性某个方面定性或定量的描述。由于决定系统可靠性的各因素具有涌现性,嵌入式系统可靠性并非若干属性的简单叠加,其可靠性的评价也不是已有各

种嵌入式系统属性研究的累加,而是一个综合各因素定性与定量有机结合的分析过程。根据嵌入式系统可靠性的不同决定因素,可以将其可靠性分解为如图 1 所示的形式。

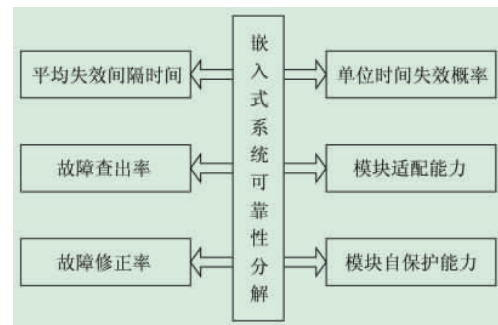


图 1 ARM 嵌入式系统可靠性分解图

Fig. 1 A decomposition of reliability of ARM embedded system

嵌入式系统是一个由硬件、软件组成的有机整体,应该从硬-软件综合系统的角度分析其可靠性。ARM 嵌入式系统是由若干相对独立的模块组成,即系统可以划分为不同的模块,各模块的功能、作用不同,对系统总体可靠性影响也不同。整体来说,分为硬件、软件和系统扩展 3 个部分,每个部分还包含若干子模块,如图 2 所示。其中硬件部分包含的子模块有 ARM 处理器、RAM/ROM 控制器、以太网控制器、USB 控制器、中断控制器、ADC 控制器、LCD 控制器、DMA/GPIO 控制器等;软件部分包含的子模块有应用程序、嵌入式实时操作系统、设备驱动、板级支持包、BootLoader、硬件抽象层等;系统扩展部分的包含的子模块有时钟系统、人机接口、存储器系统、输入/输出接口等。图 2 是三个部分所包含子模块的示

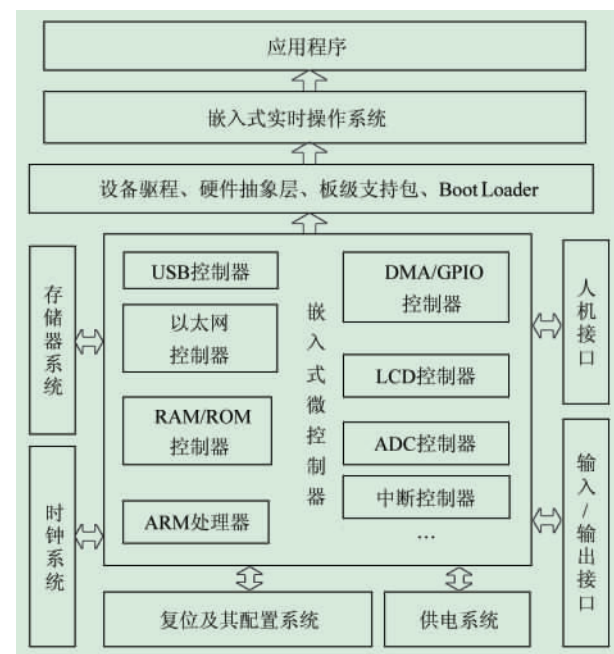


图 2 ARM 嵌入式系统模块结构框图

Fig. 2 ARM embedded system modular architecture

计算得到模糊一致矩阵 M_{TA} :

$$M_{TA} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.9 \\ 0.3 & 0.5 & 0.7 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

得到指标层 B 对于目标层 A 的层次总排序

$$I_A = [0.467, 0.333, 0.2]$$

子指标层 C 中的 6 个子指标与指标层 B 中的一级模块 B1 相关, 6 个子指标对于一级模块 B1 的影响排序计算如下, 用矩阵 M_{B1} 表示为

$$M_{B1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C1 & C2 & C3 & C4 & C5 & C6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \\ C5 \\ C6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.8 & 0.8 & 1.0 & 1.0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.8 & 0.8 & 1.0 & 1.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.6 \\ 0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$M_{B1} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.78 & 0.78 \\ 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.78 & 0.78 \\ 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.58 & 0.58 \\ 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.58 & 0.58 \\ 0.22 & 0.22 & 0.42 & 0.42 & 0.5 & 0.5 \\ 0.22 & 0.22 & 0.42 & 0.42 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

计算得出子指标层 C 的 6 个子指标对于指标层 B 中的一级模块 B1 的排序向量

$$I_{B1} = [0.22, 0.22, 0.153, 0.153, 0.127, 0.127]$$

同理, 子指标层 C 各属性对指标层 B 的二级模块 B2, 三级模块 B3 的重要排序分别用向量 I_{B2} 、 I_{B3} 表示, 计算过程不再赘述, 排序计算结果为

$$I_{B2} = [0.3, 0.26, 0.22, 0.22]$$

$$I_{B3} = [0.75, 0.25]$$

至此, 计算出模块化嵌入式系统每层各因素针对上层某个因素的权重向量, 下一步从下而上构造评价矩阵。

3.3 构造由方案层到指标层的评价矩阵

1) 由群组评价的结果构建评判矩阵。对于方案层每个具体各子属性的实现方案的测试或评价结果分为优、良、中、差 4 个级别, 对应百分制评分列向量 $S_0 = [90, 75, 60, 45]^T$ 。评价矩阵 $E_{n \times 4}$ 中的元素 e_{ij} 表示将 i 因素评为级别 j 的人数占所有参与该因素评价人数的比例。

2) 根据具体实现方案 (测试或评价结果) 由人员直接给出 C 层各个子指标的评价矩阵 $E_{C_{6 \times 4}}$ 。

3) 由对 C 层子指标的评价结果及 C 层针对 B 层各因素的权重向量, 分别得到针对 B 层每个元素的评价比例向量

$$V_{B1} = I_{B1} \cdot E_{B1}$$

式中 E_{B1} 、 E_{B2} 、 E_{B3} 分别为与 B1、B2、B3 相关因素的评价结果。同理, 可以得到 V_{B2} 和 V_{B3} 。

4) 由以上结果计算 B 层针对目标层 A 的评价比例向量

$$E_B = [V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}]^T$$

$$V_A = I_A \cdot E_B$$

3.4 目标综合评价

目前综合评价的最终期望是得到系统可靠性的直观表现形式, 本文以百分制来表达系统的可靠性。得到目标层的评价比例向量后, 根据评价分数的列向量, 计算该模块化软件系统的可靠性的所得分数 R :

$$R = V_A \cdot S_0$$

根据计算的分数和系统对分数的要求, 判断该系统的可靠性分数是否达标。

4 应用实例

某基于 ARM 嵌入式系统开发的 ARM 导弹垂直发射控制系统是典型的模块化嵌入式系统, 也是武器系统的安全关键系统, 对可靠性要求严格, 故用本文方法对该系统的可靠性进行评价, 以整体把握该系统可靠态势。根据该武器系统的功能和性能特点, 将硬件系统中的 ARM 控制器、以太网控制器、RAM/ROM 控制器、中断控制器, 以及软件系统中的设备驱程、板极支持包、BootLoader、系统扩展部分的时钟系统定义为一级模块; 将硬件系统中的 DMA/GPIO 控制器、LCD 控制器、ADC 控制器、软件系统中的嵌入式实时操作系统、系统扩展部分的输入输出接口等定义为二级模块; 将硬件系统中的 USB 控制器等、软件系统中的应用程序等、系统扩展部分的人机接口、存储器系统等定义为三级模块。

首先对影响因素的 6 个子指标分别进行评价, 评价方法是采用定量测试和定性评价相结合的方法, 如单位时间失效概率、故障修正率等采用不同人员独立定量测试的方法, 对于模块适配能力、模块自保护能力等无法量化的指标采用定性评价的方法, 根据测试或评价给出优、良、中、差的结论, 人员之间的决策相互独立, 评价独立给出。拟定了 20 个组员的评价小组对子指标层 C 进行评价, 评价结果为

$$E_C = \begin{matrix} & \begin{matrix} 优 & 良 & 中 & 差 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \\ C5 \\ C6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

如对于 B 层指标 B1, 与 C1~C6 都相关; 指标 B2, 与 C1, C3, C5, C6 相关; 指标 B3, 与 C1, C5 相关。即

$$E_{B1} = E_C$$

$$E_{B2} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{B3} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由第 3.2 节知:

$$I_{B1}=[0.22, 0.22, 0.153, 0.153, 0.127, 0.127]$$

$$I_{B2}=[0.3, 0.26, 0.22, 0.22]$$

$$I_{B3}=[0.75, 0.25]$$

由第 3.3 节 3) 得到:

$$V_{B1}=I_{B1} \cdot E_{B1}=[0.624, 0.23, 0.1246, 0.022]$$

$$V_{B2}=I_{B2} \cdot E_{B2}=[0.626, 0.24, 0.104, 0.03]$$

$$V_{B3}=I_{B3} \cdot E_{B3}=[0.625, 0.225, 0.075, 0.075]$$

由第 3.3 节 4) 得到:

$$E_B=\begin{bmatrix} 0.6239 & 0.2295 & 0.1246 & 0.022 \\ 0.6260 & 0.24 & 0.104 & 0.03 \\ 0.625 & 0.225 & 0.075 & 0.075 \end{bmatrix}$$

$$V_A=I_A \cdot E_B=[0.6248, 0.2321, 0.1078, 0.0353]$$

$$R=V_A \cdot S_0=81.8$$

由于本系统为安全关键系统, 故本系统可靠性得分 80 以上为达标, 80 以下需要重新检查调整, 本次评价得到分数为 81.8, 故认为该系统可靠性能程度达到要求。

5 结论与展望

为解决模块化 ARM 嵌入式系统可靠性评价中的复杂性和模糊性, 本文引入模糊综合分析法对其可靠性进行评价。对影响系统总体可靠性的不同模块进行了类型划分, 区分开了不同类型的模块对整体可靠性的影响。对各类模块的可靠性进行分解, 根据分解的指标层和子指标层, 结合各项具体实现方案, 运用群组评价和测量来进行方案判断。一个典型的 ARM 嵌入式系统实例证明, 本文提出的评价方法给出了模块化 ARM 嵌入式安全关键系统可靠性分析的定性定量的结合方法, 给出了其可靠性评价的一种新方法。三级模块的划分可以根据实际系统的应用情况适当调整, 本文只针对某武器系统安全关键系统的特点进行有针对性的划分, 下一步的工作应集中于能给出一个通用性划分的方法, 使得模块化的可靠性分析更具普适性。

参考文献 (References)

- [1] 胡伟. ARM 嵌入实行系统基础与实践[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
Hu Wei. ARM embedded system basis and practice[M]. Beijing: Beihang University Press, 2007.
- [2] 徐晓露. 基于故障注入的嵌入式系统测试 [D]. 杭州: 浙江大学计算机科学与技术学院, 2008.
Xu Xiaolu. Embedder system test based on fault injection[D]. Hangzhou: College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, 2008.
- [3] 古友鹏. 嵌入式实时软件的构件化开发技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学计算机科学与工程学院, 2005.
Gu Youpeng. Research of the embedded real-time component-based software development technology [D]. Chengdu: School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2005.
- [4] 殷永峰, 刘斌, 陆民燕. 实时嵌入式软件测试脚本技术研究[J]. 计算机工程, 2003(1): 118-119.
Yin Yongfeng, Liu Bin, Lu Minyan. Computer Engineering, 2003 (1):

118-119.

- [5] Jeske D R, Zhang X, Pham L. Adjust software failure rates that are estimated from test data [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, 54 (1): 107-114.
- [6] Malaiya Y K, Li M N, Bieman J M. Software reliability growth with test coverage[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2002, 51(4): 420-426.
- [7] Zou F Z. A change-point perspective on the software failure process[J]. *Software Testing, Verification and Reliability*, 2003(13): 85-93.
- [8] Hall J B, Mosleh A. A reliability growth projection model for one-shot systems[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(1):174-181.
- [9] Huang C Y, Huang W C. Software reliability analysis and measurement using finite and infinite server queuing models [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(1): 192-203.
- [10] Mahmoud H, Fahmy A. Reliability evaluation in distributed computing environments using the AHP [J]. *Computer Networks*, 2001, 36(5/6): 597-615.
- [11] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311-314.
Xu Zeshui. *Journal of Systems Engineering*, 2001, 16(4): 311-314.

(责任编辑 岳臣)

·学术动态·



“第 12 届中国机器学习会议”征文

“第 12 届中国机器学习会议”(CCML2010) 将于 2010 年 8 月 6-8 日, 在济南市召开。此次会议由中国人工智能学会机器学习专业委员会和中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会联合主办, 山东大学承办, 河北大学协办。该系列会议每两年举行一次, 已经成为国内机器学习界重要的学术活动之一。会议将邀请国内机器学习领域的著名学者做精彩报告, 会议期间还将评选优秀论文奖和优秀学生论文奖。

此次会议的征稿范围(不限于)包括: 机器学习的新理论、新技术与新应用, 人类学习的计算模型, 计算学习理论, 监督学习, 非监督学习, 半监督学习, 强化学习, 多示例学习, 神经网络, 集成学习, 多策略学习, 特征选择, 流形学习与降维, 基于案例的推理, 增量学习与在线学习, 对复杂结构数据的学习, 增强学习系统可理解性, 数据挖掘与知识发现, 聚类, 生物特征识别, 进化计算, 人工生命, 模糊集与粗糙集, 多 Agent 系统中的学习, 模式识别, 信息检索, 生物信息学, 语音、图像处理与理解, 自然语言理解等。

会议录用的论文将推荐给《计算机研究与发展》、《模式识别与人工智能》、《山东大学学报》(工学版)、《计算机工程与应用》、《广西师范大学学报》和《广西大学学报》等期刊的正刊上发表。

会议论文采用在线投稿方式, 网址: <http://ccml2010.sdu.edu.cn>。征文截稿日期: 2010 年 1 月 20 日。

联系方式: 电话: 0531-88391367; 电子信箱: ccml2010@sdu.edu.cn。