

基于连续协同机器学习算法的嵌入式软件可靠性预测模型研究

原创 张博云 等 嵌入式系统专家之声 2025年09月27日 08:00 北京

点击上方“蓝字” 关注我们！



嵌入式系统专家之声

嵌入式系统专家之声依托嵌入式系统联合会专家团队，汇集嵌入式系统产、学、研和媒体...
209篇原创内容

公众号

本文字数：5510

2025.09.27

预计阅读时长：14分钟

摘要

为优化嵌入式软件可靠性预测智慧可控感知机制，构建了基于连续协同机器学习算法的嵌入式软件可靠性预测模型。构建连续协同机器学习算法机制实现嵌入式软件可靠性精准预测，利用深度LSTM构建时间正序下的嵌入式软件核心要素样本精准预测机制。利用DCNN对数据池后置测试集进行隐性知识感知并输出最优预测结果。最后，对模型开展了工程应用实践验证，结果表明，模型满足嵌入式软件可靠性预测智慧化改造需求，大幅度优化了嵌入式软件可靠性预测智慧可控感知机制。

关键词

嵌入式软件；可靠性预测；连续协同机器学习；深度LSTM；DCNN算法

作者：张博云¹，海诗婧²，魏佳庆²

中图分类号：TP391.9

文献标识码：A

0 引言

随着嵌入式应用系统目标数据量迅速增长，对嵌入式软件的依赖性越来越强，嵌入式软件逻辑规模呈指数增长^[1]，由于内部逻辑混乱或者外部条件突变触发故障发生的概率大大提高。嵌入式软件核心进程一旦发生故障，造成的损失往往具有归零属性，开展嵌入式软件可靠性预测模型研究具有重要的学术与工程价值^[2]。构建了基于连续协同机器学习算法的嵌入式软件可靠性预测模型，利用某型号战斗机机载嵌入式软件历史可靠性核心要素数据集开展了模型先验环境下的仿真验证，选取某型号战斗机机载嵌入式软件为工程实践分析载体，开展了模型工程应用实践验证，基于机载嵌入式应用系统现有软硬件设备，采用软件进程扩展的方式搭建了验证环境^[3]，从定性定量两个层面开展模型工程实践效能对比分析，多维度验证了模型的可行性及优越性。

1 嵌入式软件可靠性预测模型体系架构设计

把嵌入式软件可靠性预测模型完整生命周期运行逻辑进行目标导向下的任务分解，构建了基于连续协同机器学习算法的嵌入式软件可靠性预测模型体系架构，具体如图1所示。其中，嵌入式软件可靠性核心要素样本池化处理子架构主要完成目标嵌入式软件可靠性核心要素样本的采集、传输、暂存、计算、池化处理，对数据池进行训练集和测试集分区划分，为未来较长周期内的嵌入式软件核心要素样本精准预测及嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测提供统一的数据集支撑；嵌入式软件核心要素样本精准预测子架构主要完成较长周期内的嵌入式软件核心要素样本精准预测^[4]，引入深度LSTM神经网络对数据池训练集分区进行特征辨识，构建要素特征与可靠性之间的物理映射机制，实现时间正序下的嵌入式软件核心要素样本精准预测，为嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测提供学习数据集；嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测子架构主要完成嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测，引入深度卷积神经网络DCNN对数据池测试集分区进行隐性知识感知，利用学习数据集对隐性知识进行逻辑修正，借助嵌入式软件可靠性预测函数输出最优预测结果。

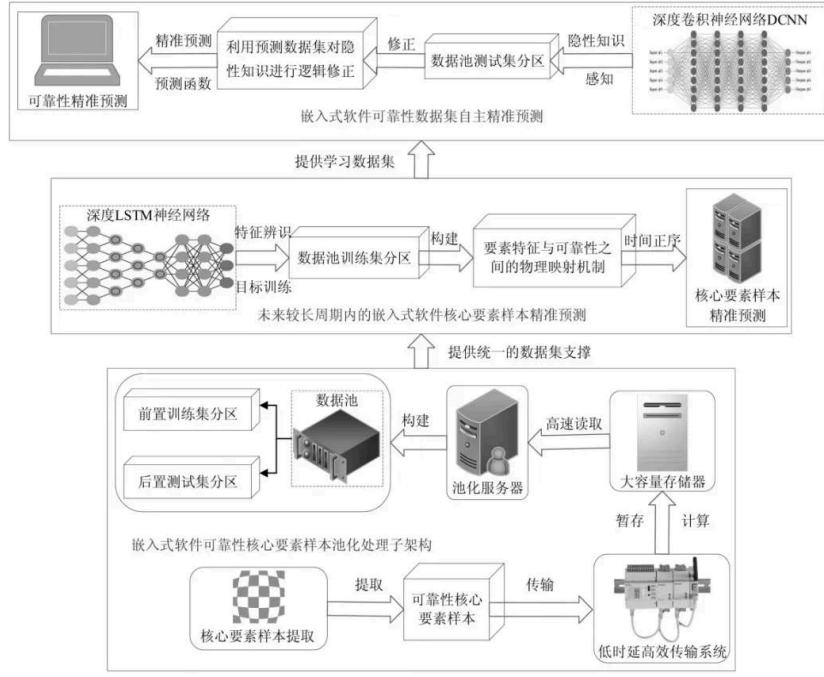


图1 嵌入式软件可靠性预测模型体系架构示意图

2 嵌入式软件可靠性预测模型核心算法设计

2.1 未来核心要素样本精准预测算法

未来核心要素样本精准预测算法主要完成未来较长周期内的嵌入式软件核心要素样本精准预测，引入包含8层隐含层的深度LSTM神经网络对数据池训练集分区进行特征辨识，构建要素特征与可靠性之间的物理映射机制，实现时间正序下的嵌入式软件核心要素样本精准预测，为嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测提供学习数据集。初始化深度LSTM神经网络的深度及节点数、网络学习速率、网络序列长度等，深度LSTM神经网络通过对时间正序数据池训练集分区进行训练，利用内部有监督机制进行特征微调，持续进行迭代循环，使先验时序数据可以学习到未来时序数据的特征，实现较长周期内的嵌入式软件核心要素样本精准预测，为了加快深度LSTM神经网络的收敛进程^[5]，避免梯度发散现象，利用粒子群算法PSO对深度LSTM神经网络的初始值进行反复优化，定义深度LSTM神经网络预测误差的均方差值作为适应度函数，用MSE表示，则深度LSTM神经网络预测局部最优解的均方差值MSE_i和深度LSTM神经网络预测全局最优解MSE_g分别为：

$$MSE_i = \frac{1}{p} \sum_{s=1}^p \sum_{j=1}^N (d_{isj} - y_{isj})^2 \quad (1)$$

$$MSE_g = \min_{i=1}^n (MSE_i) = \min_{i=1}^n \frac{1}{p} \sum_{s=1}^p \sum_{j=1}^N (d_{isj} - y_{isj})^2 \quad (2)$$

式中，n表征粒子群算法PSO的粒子数目，p表征数据池训练集分区的数据数目，N表征深度LSTM神经网络的节点数量^[6]，d_{isj}和y_{isj}分别表征预测数据集和真实数据集。式（2）构建了要素特征与可靠性之间的物理映射机制，定义YJC_{t+}表征时间正序下的嵌入式软件核心要素样本精准预测生成集合，则有：

$$YJC_{t+} = \min_{i=1}^n \sum_{s=1}^p \sum_{j=1}^N (d_{isj} - y_{isj})^2 P_i^{\text{ref}} c(t) \Delta t \quad (3)$$

式中，P_i^{ref}表征数据校正因子，通过数据集基本逻辑格式筛选剔除生成的无效预测数据，c(t)表征时间校正因子，保证数据集始终按照时间正序进行预测生成，Δt表征预测数据集与特征辨识数据集的换算系数^[7]，保证预测数据集的密度与训练数据集平行。利用式（2）构建PSO种群分层结构，利用式（3）筛选全局最优适应度值，利用全局最优粒子位置定位最优深度LSTM神经网络的权重值，正序时间流控制下实现嵌入式软件核心要素样本数据集精准预测生成。

2.2 嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测算法

嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测算法把深度LSTM神经网络生成的时间正序下的嵌入式软件核心要素样本预测集作为学习数据集，实现嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测，引入深度卷积神经网络DCNN对数据池测试集分区进行隐性知识感知，利用学习数据集对隐性知识进行逻辑修正^[8]，借助嵌入式软件可靠性预测函数输出最优预测结果。初始化深度卷积神经网络DCNN的输入策略块为 16×16 、32个 5×5 的卷积核、卷积步长设置为1，每个卷积核需要学习的参数为 $p \times q$ ，卷积输入数据集为 I ，卷积核为 K ，卷积步长为 λ_1 和 λ_2 ，则基于学习数据集的训练卷积层为：

$$C(j,k) = \sum_p \sum_q K(p,q) I(j-p+\lambda_1, k-q+\lambda_2) \quad (4)$$

为了改善式（4）的误差反向传播性能，提高深度卷积神经网络DCNN低层网络的梯度值，在各层神经网络之间引入门控机制，通过耦合第 i 层和 $(i-k)$ 层的聚合信息产生正则化效果，降低深度卷积神经网络DCNN的误差累积，提高深度卷积神经网络DCNN的训练效率，在此基础上，利用改进的深度卷积神经网络DCNN对数据池测试集分区进行隐性知识感知，利用预测数据集对隐性知识进行逻辑修正^[9]，定义数据池测试集分区隐性知识输出函数为 $Y(j,k)$ ，定义修正过的数据池测试集分区隐性知识输出函数为 $X(j,k)$ ，DCNN的激活函数采用Sigmoid函数并定义为 f ，则有：

$$Y(j,k) = f(C(j,k)) \left(\sum_{i \in p_j} k_{i,j}^t * y_i^{t-1} + b_j^t \right) \quad (5)$$

$$X(j,k) = \text{down}(Y(j,k)) \beta_j^t \quad (6)$$

式中， t 表示DCNN的深度， k_i^j 表示卷积核， $*$ 表示平面卷积操作， b_j 表示偏置误差， p_j 表示输入的隐性知识数据集^[10]， β 为修正权重， $\text{down}(\cdot)$ 表示池化采样函数。式（6）给出了修正过的数据池测试集分区隐性知识输出函数，可以准确给出隐藏在大数据背后的隐性知识，为嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测提供隐性知识支撑，定义嵌入式软件可靠性预测函数用 \mathfrak{R} 表征，为了降低非核心参数对优化策略生成的干扰，引入多特征的数据融合算法，引入深度层权重概念^[11]，根据嵌入式软件核心要素样本对可靠性预测生成的贡献度，在DCNN的全连接层后附加一层各类参数的贡献权重层，则权重层可以表示为式（7）。其中， μ^n 为参数 n 的权重， e^n 表示参数 n 的误差， e^n 越低的参数其权重越高，则嵌入式软件可靠性预测函数可以表征为式（8）：

$$\mu^n = 1/e^n / \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{e^i} \right) \quad (7)$$

$$\mathfrak{R} = \sum_{n=1}^N \mu^n y^n \quad (8)$$

2.3 先验环境下的模型仿真验证

为了从理论层面验证模型的有效性及优越性，开展先验环境下的模型仿真验证，仿真验证硬件载体为戴尔Precision 5530移动工作站，配置4G专用高带宽内存，内置Ubuntu18.04操作系统，仿真验证软件框架基于Tensor-flow，分别对深度LSTM神经网络和深度卷积神经网络DCNN进行初始化，保证两个网络处于激活状态。引入16层深度卷积神经网络框架并利用缓冲池机制改善深度LSTM神经网络的预测收敛迟滞问题，设置Target-action Value神经网络以及Action Value神经网络实现未来核心要素样本精准预测，利用Target-action Value神经网络当中输入当前状态可以输出Next Q值^[12]，将当前的状态输入Action Value神经网络当中获得eval Q值，实现嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测。不失一般性，选取某型号战斗机机载嵌入式软件核心要素样本数据构建仿真数据集，选取仿真数据集集中的16000例数据作为算法的前置训练集，选取仿真数据集集中的8600例数据作为算法的后置测试集，引入常用目标优化算法作为对照，利用Python语言编程实现，在PyCharm集成环境下进行图形化仿真，仿真结果如图2所示。

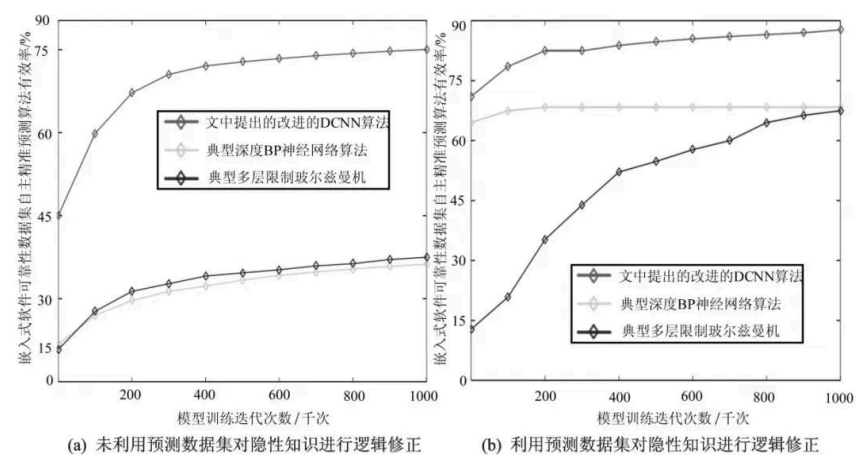


图2 嵌入式软件可靠性数据集自主精准预测算法性能仿真图

3 嵌入式软件可靠性预测模型工程实践效能分析

在某型号战斗机载嵌入式应用平台目前装备的嵌入式软件进程可视化实时监测平台基础上，增加核心要素样本特征数据池生成、未来核心要素样本精准预测、可靠性数据集自主精准预测三个软件子进程，均采用热触发方式，三个软件子进程均与主进程保持时间均衡，共享数据包及内外通信端口，进程数据实时刷新并在人机交互界面显示。上述三个软件子进程在数据流层面从属于可视化实时监测平台主进程，在控制流层面具有耦合独立性，可以对数据池形成、核心要素样本预测、可靠性数据集预测等进行独立控制。选取某型号战斗机载嵌入式应用平台目前装备的嵌入式软件进程可视化实时监测平台为对照系统，选取核心参数差异化设置的嵌入式软件可靠性预测模型为跟随系统，利用某型号战斗机载嵌入式软件雷达告警进程可靠性先验及预测数据构建效能对比融合数据池，从模型核心要素样本特征数据集预测精准率（JZ）、模型特征数据池隐性知识感知覆盖率（FG）、模型可靠性数据集自主精准预测有效率（YX）等方面进行定量分析，围绕嵌入式软件可靠性预测模型工程实践效能分析验证环境人机交互友好性（JH）、软件可靠性预测智能化程度（ZH）、动态预警信息互联推送（YC）等方面进行定性分析，具体如表1所列。

表1 嵌入式软件可靠性预测模型工程实践效能分析对比表

对比系统	JZ	FG	YX	JH	ZH	YC
验证系统	91.28%	93.72%	90.87%	很好	很好	较好
跟随系统	77.32%	80.62%	78.07%	较好	一般	较差
对照系统	90.93%	92.27%	91.39%	很好	很好	较好

4 结语

本文研究了利用连续协同机器学习算法实现嵌入式软件可靠性自主精准预测，构建了基于连续协同机器学习算法的嵌入式软件可靠性预测模型并进行了先验环境下的仿真验证。采用软件进程扩展的方式搭建了嵌入式软件可靠性预测模型工程实践效能分析验证环境，从定性和定量两个层面对嵌入式软件可靠性预测模型进行了多维工程实践效能分析。分析结果表明，嵌入式软件可靠性预测模型较好地改善了传统基于显性知识的嵌入式软件可靠性预测机制在工程实践中日益凸显的若干不足，满足智能化改造需求，大幅度优化了可控感知机制，嵌入式软件可靠性预测模型核心参数符合工程实践要求。

参考文献

.....

[1]曲以堃, 张伟. 嵌入式软件系统体系结构可靠性分析方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(10):3053-3057.

[2]崔三俊, 张贵斌, 韩明. 基于代码路径的嵌入式软件可靠度评估[J]. 微电子学与计算机, 2020,37(11):79-82.

[3]马振宇, 张威, 吴纬, 等. 基于优化SVR的军用软件可靠性预测方法[J]. 火力与指挥控制, 2019,44(11):151-155.

[4] Diwaker C,Tomar P,Solanki A,et al. A New Model for Pre-dicting Component - Based Software Reliability Using Soft Computing[J].IEEE Access,2019,180(7):147191-147203.

刘明强 彭耀光 其工险电概率公招的嵌λ式系统可靠件设计方法[1] 单片


(作者单位: 1. 西安理工大学, 西安710048; 2. 东北财经大学 萨里国际学院)

(本文由《单片机与嵌入式系统应用》杂志社授权发表, 原文刊发在2022年第1期)

END

 嵌入式系统专家之声推荐搜索


嵌入式软件 | 物联网 | 软件开发


【点击上方  搜索词条可查看号内更多其他内容】



 **微信搜一搜**

 **嵌入式系统专家之声**

 ----- 关注我们, 了解更多精彩内容 ----- 

 转发, 点赞, 在看, 安排一下?

期刊论文 · 目录

上一篇 · 面向未知环境的机器人动态路径规划算法研究

内容含AI生成图片, 注意甄别