

基于体系结构能耗建模的 CPS 软件可信性评估方法

张广泉^{1,2}, 张侃^{1,3}, 祝义⁴, 周航⁵

(1. 苏州大学计算机科学与技术学院, 江苏苏州 215006; 2. 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏南京 210093;
3. 中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室, 北京 100190; 4. 江苏师范大学计算机科学与技术学院, 江苏徐州 221116;
5. 南京航空航天大学民航学院, 江苏南京 210016)

摘要: 信息物理融合系统(Cyber Physical Systems, CPS)是一种计算系统和物理环境紧密结合的网络化嵌入式系统,软件作为其重要的使能部件,如果在其设计阶段能够考虑能耗影响等问题,则能有效提高软件及系统的可信性.软件体系结构在设计阶段为构造软件的结构、行为和关键属性提供设计模型和指导,对 CPS 软件体系结构能耗进行建模,分析和评估能耗对 CPS 软件可信性的影响,可以在设计阶段发现其体系结构能耗设计缺陷,并重新设计软件体系结构,从而有效提高 CPS 软件可信性.基于此,首先基于能耗时间 Petri 网建立了 CPS 软件体系结构能耗模型,并分析了影响 CPS 软件可信性的能耗问题;针对这些问题,将分析得到的能耗数据作为建立可信性指标模型的基础,提出了基于能耗指标模型的 CPS 可信性评估方法;最后通过实例建模和分析,进一步说明该方法的有效性.

关键词: 信息物理融合系统; 软件可信性评估; 可信性指标模型; 能耗建模

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 11-2270-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.11.025

Trustworthiness Evaluation Method for CPS Software Based on Software Architecture Energy Consumption Modeling

ZHANG Guang-quan^{1,2}, ZHANG Kan^{1,3}, ZHU Yi⁴, ZHOU Hang⁵

(1. School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China; 2. State Key Lab. for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; 3. State Key Lab. of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 4. School of Computer Science and Technology, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 5. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: CPS is a kind of networked embedded system. Its trustworthiness and cost are impacted by energy consumption. Because software is the main component of CPS, it is influenced by the energy consumption of CPS. So it has become a major challenge for CPS development to design low-power, high trustworthiness CPS software. Existing analysis and evaluation methods have problems such as the experimental high cost and big price. If the trustworthiness problem of software can be found in the design phase, it can effectively reduce the cost and improve development efficiency. So modeling, analyzing and evaluating the software architecture energy consumption of the CPS software architecture design stage can help find the energy consumption design defects. It can effectively improve the trustworthiness of the CPS software and reduce development costs. Against this, first build the CPS software architecture energy consumption based on the energy consumption time Petri nets; then by analyzing the trustworthiness problems of the CPS software influenced by the energy consumption, propose the evaluation method for CPS software based on the energy consumption model; finally, indicate the effectiveness of the proposed methods through an instance.

Key words: (CPS) cyber physical systems; software trustworthiness evaluation; trustworthiness indicator model; energy consumption modeling

1 引言

信息-物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS)是一种基于嵌入式设备的高效能网络化的嵌入式系统^[1],

它将众多的嵌入式设备通过网络连接起来.而嵌入式设备具有能量有限的特性,故系统能耗直接影响整个 CPS 系统的可信性.而软件作为 CPS 的重要使能部件,其可信性也受能耗约束^[2].

软件可信性评估是对软件实体的所有非功能性属性(又称可信属性)是否遵从预定规则集的评价,目前国内国外已有的一些评估方法^[3~5]均未考虑能耗对软件可信性的影响.CPS 通常部署在一些关键基础设施及安全性要求很高的领域^[6~9],这些领域的系统维护和更新较复杂,已有评估方法不能适应 CPS 的环境.为了提高软件开发效率、降低成本、避免在开发后期因能耗问题而重新设计开发软件,本文提出一种基于体系结构能耗建模的 CPS 软件可信性评估方法,通过对 CPS 软件体系结构能耗进行建模,分析和评估能耗对 CPS 软件可信性的影响,可以在设计阶段发现其体系结构能耗设计缺陷,并重新设计软件体系结构,从而有效提高 CPS 软件可信性.下面首先介绍 CPS 软件体系结构能耗建模与分析方法.

2 CPS 软件体系结构能耗建模与分析

2.1 CPS 软件体系结构能耗建模

首先基于时间 Petri 网进行能耗扩展,给出能耗时间 Petri 网的 ETPN 模型定义如下.

定义 1 ETPN = $(P, T, F, M_0, \alpha, \beta, e)$ 是七元组,其中:(1) $(P, T, F, M_0, \alpha, \beta)$ 是一个时间 Petri 网;(2) $e: T \rightarrow Q^+$ 是变迁能耗函数,表示单位时间变迁消耗的能量.

下面通过引入能耗时间变迁系统的概念来讨论 ETPN 的语义模型.

定义 2 ETPN 的语义定义为一个能耗时间变迁系统 $ETTS_{ETPN} = (S, \Sigma, s_0, \rightarrow, \omega)$,其中:(1) S 是标识集的集合;(2) $\Sigma \subseteq (T \times N)$ 是 (t, σ) 的集合,表示变迁 t 实施时间为 σ ;(3) $s_0 = m_0$ 表示标识集初始状态;(4) $\rightarrow \subseteq (S \times \Sigma \times S)$ 表示变迁关系;(5) ω 是已发生变迁的能耗,

$\forall t \in T, m \xrightarrow{t, \sigma} m'$, 则 $\omega = \sigma \times e(t)$.

状态可达图是分析 Petri 网相关性质的重要方法,下面给出能耗区间的定义,在此基础上定义 ETPN 的状态可达图.

定义 3 令 $E = [a, b]$,若 $a, b \in Q^+$,则 E 是一个能耗区间.用 EI 表示所有能耗区间的集合,设 $E_1, E_2 \in EI, E_1 = [a, b], x \in Q^+$,用 $\downarrow E_1 = a, \uparrow E_1 = b, E_1 + E_2 = [\downarrow E_1 + \downarrow E_2, \uparrow E_1 + \uparrow E_2], E_1 \times x = [\downarrow E_1 \times x, \uparrow E_1 \times x]$ 表示能耗区间的一次和二次运算,那么 $E_1 + E_2, E_1 + x, E_1 \times x$ 也是能耗区间.

定义 4 状态可达图 $G = (M, \theta, E, TS)$ 是一个有向图,其中:(1) M 是标识集;(2) θ 是已发生变迁的总时间区间;(3) E 是已发生变迁的总能耗区间;(4) (M, θ, E) 是结点集,每个结点表示一个状态类;(5) $TS: (M, \theta,$

$E) \xrightarrow{t} (M', \theta', E')$ 是边的集合,表示状态转移关系.

为状态类扩展了能耗以后,需要讨论状态的合理性和完备性.

定理 1 对于由初始状态类 (M_0, θ_0, E_0) 可达的状态类 (M_n, θ_n, E_n) ,其 E_n 一定是能耗区间;且从 (M_0, θ_0, E_0) 到 (M_n, θ_n, E_n) 的任何变迁实施序列总能耗肯定落在 E_n 内.

证明 首先采用数学归纳法证明 E_n 一定是一个能耗区间.由条件知,从 (M_0, θ_0, E_0) 出发有一个变迁实施序列 $t_0 t_1 t_2 \dots t_{n-1}$ 到达 (M_n, θ_n, E_n) .若 $n = 0$,则 (M_n, θ_n, E_n) 为 (M_0, θ_0, E_0) ,定理 1 成立.假设 $n \leq k - 1$ 时定理 1 成立,则 E_k 是能耗区间;若 $n = k, E_{k+1} = E_k + [\alpha(t_k) \times e(t_k), \beta(t_k) \times e(t_k)]$,由定义 4 可知 $[\alpha(t_k) \times e(t_k), \beta(t_k) \times e(t_k)]$ 是一个能耗区间,又已知 E_k 是一个能耗区间,则由定义 4 能耗区间的二次运算可知 E_{k+1} 也是能耗区间.

同样,采用数学归纳法证明从 (M_0, θ_0, E_0) 到 (M_n, θ_n, E_n) 的任何变迁实施序列的总能耗肯定落在 E_n 内.若 $n = 0$,则总能耗 $AE_0 = 0$,定理 1 成立.假设 $n \leq k - 1$ 时定理 1 成立,则变迁序列 $t_0 t_1 t_2 \dots t_{k-1}$ 实施后的总能耗 AE_{k-1} 肯定落在 E_k 内.若 $n = k$,则变迁 t_k 的实施能耗 C_k 肯定落在 $[\alpha(t_k) \times e(t_k), \beta(t_k) \times e(t_k)]$ 区间内,那么 $AE_{k-1} + C_k$ 肯定落在 $E_k + [\alpha(t_k) \times e(t_k), \beta(t_k) \times e(t_k)]$ 内,而 $E_{k+1} = E_k + [\alpha(t_k) \times e(t_k), \beta(t_k) \times e(t_k)]$,故变迁序列 $t_0 t_1 t_2 \dots t_k$ 的实施总能耗 AE_k 落在 E_{k+1} 内.

2.2 CPS 软件体系结构能耗分析

由于 CPS 软件具有实时性,其在某一时间期限内期望的行为动作序列一般是有限的,因此下文不考虑无限行为动作序列情况下的能耗问题.

(1) 最小能耗分析

定理 2 在状态可达图中,到达任一结点的最小能耗路径一定是简单路径.

证明 采用反证法.不妨设到达状态可达图中某一结点 C_m 的最小能耗路径是一条非简单路径,形为 $\epsilon = C_0 \xrightarrow{t_0} C_1 \xrightarrow{t_1} \dots \xrightarrow{t_{j-1}} C_j \xrightarrow{t_j} \dots \xrightarrow{t_{k-1}} C_k \xrightarrow{t_k} \dots \xrightarrow{t_{m-1}} C_m$,该路径的能耗为 AE .其中至少存在一条子路径包含环,不妨设该环为 $\epsilon_1 = C_j \xrightarrow{t_j} \dots \xrightarrow{t_{k-1}} C_k$.再取 ϵ 中剩余的子路径 $\epsilon_2 = C_0 \xrightarrow{t_0} C_1 \xrightarrow{t_1} \dots \xrightarrow{t_{j-1}} C_j, \epsilon_3 = C_k \xrightarrow{t_k} \dots \xrightarrow{t_{m-1}} C_m$.设 $AE = AE_1 + AE_2 + AE_3, AE' = AE_2 + AE_3$,显然 $AE > AE'$.因此,如果用状态 C_j 替换掉环 ϵ_1 后,得到路径的能耗要比原路径小,这与条件 ϵ 为最小能耗路径矛盾.证毕.

根据定理 2 构造的最小能耗路径算法如下.

算法 1 寻找最小能耗

输入: 状态可达图 G , 目标结点 C_m ;

输出: 最小能耗 \min_AE ;

$\min_AE = \infty, AE = 0$; // \min_AE 记录最小能耗值, AE 记录当前路径能耗值

$\min_path = \varphi$; // \min_path 记录最小能耗路径

$current_path = \langle C_0 \rangle$; // $current_path$ 记录当前路径

do

node = $current_path$ 中最后一个结点;

if node 没有新的子结点 then 删除 $current_path$ 中的最后一个结点;

else

node = node 的新子结点;

if node = C_m then

计算 $current_path$ 的 AE 值;

if $AE < \min_AE$ then

$\min_AE = AE$;

$\min_path = \varphi$;

$\min_path = current_path \cup C_m$;

else $current_path = current_path \cup node$;

while $current_path = \langle \rangle$

return \min_AE ;

if node = C_m then

计算 $current_path$ 的 AE 值;

if $AE > \max_AE$ then

$\max_AE = AE$;

$\max_path = \varphi$;

$\max_path = current_path \cup C_m$;

else $current_path = current_path \cup node$;

while $current_path = \langle \rangle$

return \max_AE ;

引理 1 对于一个有界的 ETPN, 算法 1 和算法 2 一定会终止.

证明 对于有界的 ETPN, 其标识和状态类个数都是有限的. 所以, 一个有界 ETPN 的能耗区间也是有界的. 显然, $C = (M, \theta, E)$ 的数量是有限的, 即状态图中的结点是有限的, 而算法 1 和算法 2 的复杂度与状态图中的结点数成正比. 因此, 算法 1 和算法 2 对于有界 ETPN 一定会终止.

3 基于体系结构能耗的 CPS 软件可信性评估方法

3.1 基于体系结构能耗的可信性指标模型

首先建立基于体系结构能耗的可信性指标模型, 可信性指标模型通常满足树型逻辑结构.

定义 5 可信性指标树中的结点表示可信属性, 树中的每一个结点都是可信属性, 这些属性的评估方法以能耗为对象, W_i ($1 \leq i \leq n$) 表示可信属性权重.

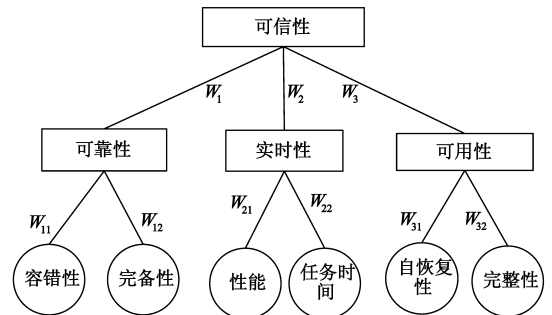


图1 可信指标树

获得评估结果后, 需要制定符合用户要求的可信决策规则集^[8]. 例如表 1 是一个简单的可信决策规则集, 其中 v 表示综合评估值, $l = d(v)$ 表示可信性等级函数, $r(d(v))$ 表示决策规则函数.

表 1 可信决策规则集示例

v	$l = d(v)$	$r(d(v))$
$[0, 0.25)$	Poor	不可信, 需要演化
$[0.25, 0.5)$	Low	可信度低, 需要演化
$[0.5, 0.75)$	Medium	可信度适中, 不需要演化
$[0.75, 1]$	High	可信度高, 不需要演化

(2) 最大能耗分析

定理 3 如果给定到达任一结点的时间期限, 那么到达该结点的路径中存在最大能耗路径.

证明 不失一般性, 设要到达的结点为 C_m . 由于变迁消耗时间, 在给定时间期限后, 任一到达 C_m 的路径长度肯定是有限的, 因此路径的能耗和个数也是确定的. 故在给定时间期限内, 确定了到达 C_m 的所有路径及其能耗后, 肯定可以找到一条路径的能耗大于或等于其他路径的能耗. \square

根据定理 3 构造的最大能耗路径算法如下.

算法 2 寻找最大能耗

输入: 状态可达图 G , 时间期限 T_D , 目标结点 C_m ;

输出: 最大能耗 \max_AE ;

$\max_AE = \infty, AE = 0$; // \max_AE 记录最大能耗值, AE 记录当前路径能耗值

$T = 0$; // T 记录当前路径消耗时间

$\max_path = \varphi$; // \max_path 记录最大能耗路径

$current_path = \langle C_0 \rangle$; // $current_path$ 记录当前路径

do

node = $current_path$ 中最后一个结点;

if node 没有新的子结点 then 删除 $current_path$ 中的最后一个结点;

else

node = node 的新子结点;

if $T + t(\text{node}) \leq T_D$ then

3.2 基于能耗指标模型的可信性评估

算法 3 单个软件可信性评估

输入:可信指标树 T , 能耗分析结果集 E , T 的叶子的评估方法集 $F()$

输出:单个软件可信性

Level = T .getLevel(); // Level 表示树的高度

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{Num}) = 0$; // θ_i 表示树中各结点的评估结果

while(还有未遍历的叶子)

if(当前结点为叶子)

$\theta_{T.getNode().name} = f_{T.getNode().name}(e), f \in F, e \in E$;

$F = F - f_{T.getNode().name}$;

回溯;

while(Level \neq 0) // 评估树的内部结点

$\theta_j^{level-1} = \sum w_j \theta_j^{level}, \sum w_j = 1$;

Level - -;

return θ^0 ;

4 实例建模与分析

机载防撞预警系统(Traffic Alert and Collision Avoidance System, TCAS)是不依赖于任何陆地信息的空中交通管制系统,其一般包括三个模块:距离探测软件,防撞管理软件和飞行控制软件,对 TCAS 进行建模,结果如图 2 所示,其中各变迁的具体动作名称、执行时间和执行能耗如表 2 所示。

表 2 变迁信息

变迁	名称	执行时间	执行能耗
T_1	探测飞机距离	[3, 8]	20
T_2	发送危险距离	[1, 3]	8
T_3	发送安全距离	[1, 2]	7
T_4	收到危险距离	[2, 3]	9
T_5	收到安全距离	[1, 2]	8
T_6	发出警告信息	[2, 4]	8
T_7	发出安全信息	[1, 3]	7
T_8	避让	[3, 7]	21
T_9	恢复	[3, 6]	17
T_{10}	收到警告信息	[2, 5]	8
T_{11}	收到安全信息	[2, 4]	7
T_{12}	发出避让动作	[1, 4]	9
T_{13}	发出恢复动作	[1, 3]	7
$T_{14}, T_{15}, T_{16},$ T_{17}, T_{18}, T_{19}	通信	[1, 2]	10

根据图 2 的 ETPN 模型,构造 TCAS 的状态可达图如图 3 所示.限于篇幅且标识集不是本文关注的重点,在图 3 中不再给出各标识集的具体内容。

基于 TCAS 状态可达图,可以采用上文提出的方法

分析 TCAS 的相关能耗问题.在对图 3 实施算法 1 和算法 2 后,得出最小能耗路径为 $\langle M_0, M_1, M_{10}, M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{14}, M_{15}, M_{16}, M_{17}, M_0, \rangle$, 能耗为 184.最大能耗路径为 $\langle M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_0, \rangle$, 能耗为 526.假设 T_2 和 T_3 的执行概率分别为 0.3、0.7,那么,该系统的平均能耗为 323.6.

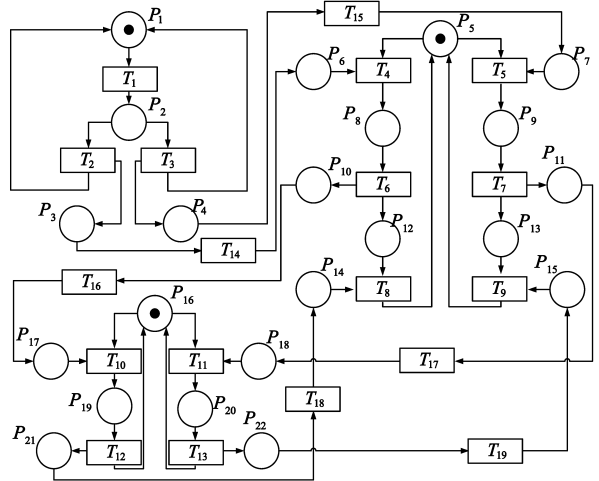


图2 TCAS的ETPN模型

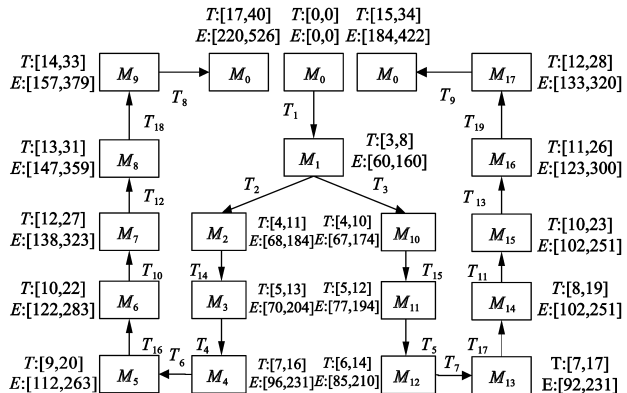


图3 TCAS状态可达图

在分析出 TCAS 的体系结构能耗后,就可以对 TCAS 的可信性进行评估.通过分析需求,TCAS 可信属性集合包含可用性、可靠性、性能、实时性、稳定性和可持续性,其权重分配结果如表 3 所示。

根据可信属性集合和属性权重分配集合,建立可信指标树,如图 4 所示,其中每个叶子结点即为可直接度量的可信属性。

表 3 软件的可信属性权重分配

软件名称	可用性	可靠性	性能	安全性	实时性	稳定性	可持续性
距离探测软件	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
防撞管理软件	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
飞行控制软件	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1

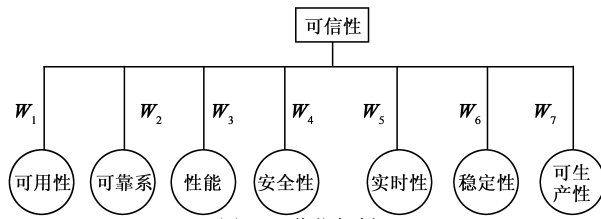


图4 可信指标树

结合能耗对这些属性的影响,可以定义这些可信属性的基于能耗的度量方法,如表4所示,用于度量的能耗由之前的体系结构能耗分析获得。

表4 可信属性度量方法

可信属性名称	度量方法
可用性	$\text{If } En_Sup \geq Ave_En \text{ then } d_U(En) = 1 - \frac{Ave_En}{En_Sup} \text{ else}$ $d_U(En) = 0 \quad En_Sup \text{ 为理论总能耗最大值, } Ave_En \text{ 为平均能耗}$
可靠性	$\text{If } En_Sup \geq En_Con \text{ then } d_R(En) = 1 - \frac{En_Con}{En_Sup} \text{ else}$ $d_R(En) = 0 \quad En_Con \text{ 为实际总能耗}$
性能	$d_P(En) = \frac{Ave_En}{Max_En}, \quad Ave_En \text{ 为实际平均能耗,}$ $Max_En \text{ 为最高性能的最大能耗}$
安全性	$\text{If } Ave_En < Req_En \text{ then } d_S(En) = \frac{Ave_En}{eReq_En} \text{ else}$ $d_S(En) = 1 \quad Req_En \text{ 为最小能耗}$
实时性	$\text{If } Ave_En < Theo_En \text{ then } d_{RR}(En) = \frac{Ave_En}{eTheo_En} \text{ else}$ $d_{RR}(En) = 1 \quad Theo_En \text{ 为最小能耗}$
稳定性	$d_M(En) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ Act_En_i - Ave_En }{Ave_En}, \quad Act_En_i$ <p>表示软件运行平均能耗</p>
可持续性	$\text{If } En_Sup \geq Ave_En \text{ then } d_L(En) = 1 - \frac{Ave_En}{En_Sup} \text{ else}$ $d_L(En) = 0$

表5 可信属性评价结果

软件名称	可用性	可靠性	性能	安全性	实时性	稳定性	可持续性
距离探测软件	0.84	0.82	0.95	0.96	0.91	0.95	0.87
防撞管理软件	0.92	0.87	0.86	0.95	0.85	0.89	0.93
飞行控制软件	0.81	0.93	0.87	0.88	0.83	0.87	0.95

根据 CPS 软件可信性评估方法的算法3,可以评估各软件的可信属性,各可信属性评估结果如表5所示。

根据表5给出的软件可信属性评估结果及表3给出的可信属性权重分配,利用算法3可以计算出各软件的可信性,结果如表6所示。以表1作为具体的决策规则集,确定每种软件都是高可信等级。

表6 软件可信性

软件名称	距离探测软件	防撞管理软件	飞行控制软件
可信性	0.89	0.892	0.876

5 相关工作介绍

嵌入式系统的能耗问题已经引起相关研究人员的关注,但是目前研究工作大多停留在指令级、代码级的能耗分析与估算^[10~12],而在更高抽象层次如体系结构级的能耗研究相对较少,本文的软件能耗分析就是基于体系结构层次展开的。文献[13]通过扩展控制/数据流程图优化进程并发管理过程,如合并进程、传输数据批量化、计算迁移、选择高效通信方式等方法,可以有效降低系统能耗。文献[14]提出软件体系结构级特征量与软件能耗之间存在非线性函数关系的假设,提取软件体系结构级的5个特征量,分析了其影响软件能耗的过程并对其进行度量。文献[15]中提出了一种基于进程代数 CSP 的能耗模型,该模型以接口为基本研究对象,并对系统的最大、最小和平均能耗进行了定义,但该文缺乏对该模型有效性的验证。

此外,在软件可信性评估研究领域,研究者针对软件可信性评估提出了许多不同的评估方法^[3~5]。但是,这些评估方法都是针对传统的软件特征,如软件错误次数、软件执行时间、软件代码行数等特征,而缺乏对软件能耗的描述和评估。

6 总结

目前关于 CPS 可信性已有相关研究成果,如文献[16]提出了一种用于检验 CPS 的设计和实现能否满足实际需求的建模与属性验证框架。但是,其并未考虑能耗对 CPS 可信性的影响。针对这一问题,本文提出了一种基于体系结构能耗的 CPS 软件可信性评估方法,并通过一个实例说明了提出方法的有效性。

在通过分析评估发现软件存在的可信性问题后,需要对软件进行重新设计和演化,而可信性评估结果可作为软件设计和演化依据,因此下一步需考虑如何利用评估结果对 CPS 软件进行重新设计和演化。此外,由于 CPS 与物联网结构相似,也可以参考物联网的研究方法^[17,18]来研究 CPS。

参考文献

- [1] Poovendran R. Cyber-physical systems: close encounters between two parallel worlds[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(8): 1362-1366.
- [2] Sandeep K S G, Tridib M, Georgios V, et al. Research directions in energy-sustainable cyber physical systems[J]. Sus-

- tainable Computing; Informatics and Systems, 2011, 1(1): 57 – 74.
- [3] 丁帅, 鲁付俊, 杨善林, 等. 一种需求驱动的软件可信性评估及演化模型[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(4): 647 – 655.
Ding S, Lu F J, Yang S L, et al. A requirement-driven software trustworthiness evaluation and evolution Model[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(4): 647 – 655. (in Chinese)
- [4] 杨善林, 丁帅, 褚伟. 一种基于效用和证据理论的可信软件评估模型[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(7): 1152 – 1159.
Yang S L, Ding S, Chu W. Trustworthy software evaluation using utility based evidence theory[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(7): 1152 – 1159. (in Chinese)
- [5] Uzma R, Marietta J. T. Defining and evaluating a measure of open source project survivability [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2012, 38(1): 163 – 174.
- [6] 温景容, 武穆清, 宿景芳. 信息物理融合系统[J]. 自动化学报, 2012, 38(4): 507 – 517.
Wen J R, Wu M Q, Su J F. Cyber-physical system[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(4): 507 – 517. (in Chinese)
- [7] 王中杰, 谢陆路. 信息物理系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157 – 1166.
Wang Z J, Xie L L. Cyber-physical systems; A survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1157 – 1166. (in Chinese)
- [8] Zhang G Q, Zhang Z L, Fan J X. A locally-adjustable planar structure for adaptive topology control in wireless Ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(10): 1387 – 1397.
- [9] 张侃, 张广泉, 张茗泰. 一种可信的信息物理融合系统设计框架初探[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(z2): 242 – 246.
Zhang K, Zhang G Q, Zhang M T. A preliminary framework for designing the trusted cyber-physical systems[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(z2): 242 – 246. (in Chinese)
- [10] Konstantakos V, Chatzigeorgiou A, Nikolaidis S, et al. Energy consumption estimation in embedded systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(4): 797 – 804.
- [11] Euseong S, Sangwon K, Seonyeong P, et al. Dynamic alteration schemes of real-time schedules for I/O device energy efficiency[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2010, 10(2): 23.
- [12] Lei Yang, Robert P. Dick, Haris Lekatsas, et al. Online memory compression for embedded systems[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2010, 9(3): 27.
- [13] Fei Y, Ravi S, Raghunathan A, et al. Energy-optimizing source code transformations for operating system-driven embedded software[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2007, 7(1): 1 – 26.
- [14] 刘啸滨, 郭兵, 沈艳, 等. 嵌入式软件体系结构级能耗建模方法[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 230 – 239.
Liu X B, Guo B, Shen Y, et al. Embedded software energy modeling method at architecture level [J]. Journal of Software, 2012, 23(2): 230 – 239. (in Chinese)
- [15] 张滕滕, 吴晓, 李长德, 等. 基于 CSP 的构件化嵌入式软件能耗分析与评估方法研究[J]. 计算机学报, 2009, 32(9): 1876 – 1883.
Zhang T T, Wu X, Li C D, et al. On energy-consumption analysis and evaluation for component-based embedded system with CSP [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(9): 1876 – 1883. (in Chinese)
- [16] 朱敏, 李必信, 陈乔乔, 等. 基于微分动态逻辑的 CPS 建模与属性验证[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1126 – 1132.
Zhu M, Li B X, Chen Q Q, et al. Transforming hybridUML to hybrid program for CPS property verification [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1126 – 1132. (in Chinese)
- [17] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023 – 1029.
Qian Z H, Wang Y J. IoT technology and application [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023 – 1029. (in Chinese)
- [18] 何秀青, 王映辉. 物联网服务动态评价选择方法研究[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 117 – 122.
He X Q, Wang Y H. service selection algorithm based on dynamic assessment for Web of Things [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 117 – 122. (in Chinese)

作者简介



张广泉(通信作者) 男, 1965 年出生于江苏连云港. 苏州大学计算机科学与技术学院教授、博士/博士后、CCF 高级会员. 研究方向为可信软件与服务计算、云计算与物联网(CPS)等.
E-mail: gqzhang@suda.edu.cn



张侃 男, 1988 年出生于江苏太仓. 苏州大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 研究方向为 CPS、软件可信性评估.
E-mail: 20104227016@suda.edu.cn