

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003169

基于UPPAAL的手机功耗流量建模方法研究*

张贵玲 朱正伟 蒋威 诸燕平 朱晨阳

(常州大学 计算机与人工智能学院 常州 213164)

摘要:由于智能手机电池容量有限,应用程序的功耗是其主要消耗之一,因为应用程序可能会产生意外功耗或能源错误,其中大多数是设计错误。为分析应用程序功耗和通信流量特性,提出使用基于模型检测的功耗流量分析方法。把手机各硬件组件作为研究对象,对时间自动机模型进行扩展,使用模型检测工具UPPAAL构建模型。该方法可以在开发的早期阶段使用,为应用程序的设计和分析提供了异步功耗的形式化模型。设计WiFi省电模式实例进行研究分析,验证分析该模型的主要属性,然后用手机应用QQ进行了实验对比。分析结果表明,该模型符合一般模型验证需求,与PowerTutor的测量结果相比,其相对误差均低于7%,能为复杂手机系统提供可参考的建模分析思路。

关键词: 智能手机;模型检测;时间自动机;UPPAAL;WiFi

中图分类号: TP31 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520

Power consumption and traffic modeling of smartphone based on UPPAAL

Zhang Guiling Zhu Zhengwei Jiang Wei Zhu Yanping Zhu Chenyang

(College of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Due to the limited battery capacity of smartphones, the power consumption of applications is one of its main consumptions, because applications may produce unexpected power consumption or energy bugs, most of which are design bugs. In order to understand the characteristics of application power consumption and traffic, a model-based method of power consumption and traffic analysis is proposed. Taking the hardware components of the mobile phone as the research object, the time automata model is extended, and the model checking tool UPPAAL is used to build the model. This method can be used in the early stages of development and provides a formal model of asynchronous power consumption for application design and analysis. Designs an example of WiFi power saving mode for research and analysis, verifying and analyzing the main attributes of the model, and then uses the mobile phone application QQ for experimental comparison. The analysis results show that the model conforms to the general model verification requirements. Compared with the measurement results of PowerTutor, its relative error is less than 7%, which can provide reference-based modeling and analysis idea for complex mobile phone systems.

Keywords: smartphone; model checking; time automata; UPPAAL; WiFi

0 引言

近年来智能手机越来越普遍,应用程序(如Android应用程序)也越来越丰富,但手机电池续航短的问题一直存在。以锂离子电池为例,其使用寿命是有限的,不断的充放电会导致其剩余寿命衰减^[1]。手机应用程序的功耗

是主要放电因素之一,且某些应用程序虽然在功能上是正确的,但会产生意外的功耗,这被称为能源错误(energy bugs)^[2]。这种能源错误通常可以由能量分析器检测到,文献[3-4]在运行时监视程序的执行,以查看是否存在功耗异常行为。而这种方法存在如下缺点:检测需要通过运行程序来进行;检测范围受到测试数据或测试环境的限制。为克服以上缺点,需使用一种基于模型

的方法来检测能耗问题,因此,了解手机通信特征、建立合适的抽象功耗模型对于开发高效的调度程序、实现高的服务质量等有很大的必要。

智能手机采用积极的节能策略用来节省电池电量。但是,某些应用程序即使在不活动期间也会使手机保持唤醒状态。Android 框架提供了用于电源管理的应用程序接口(application program interface, API)。API 是一把双刃剑,不当使用 API(如 WakeLock 等)可能会产生能源错误。由于这些错误是设计中的错误,所以可以在开发的早期阶段将其检测出来并修改。

手机功耗模型的研究主要分为硬件方面^[5-6]和软件方面^[7]。硬件方面,文献[8]提出一种基于系统调用的功耗建模方法,构建了 FSM(finite state machines)模型,并在 Android 和 Windows Mobile 上对不同应用程序进行实验,结果证实新模型显著提高了细粒度以及整个应用程序的能耗精度;文献[9]在 FSM 基础上进一步完善 eprof 工具,利用系统调用指令来获取硬件使用信息,着重分析了 I/O 组件的能耗,并建立了准确度较高的能耗模型,但几乎没有考虑尾部能耗的影响;文献[10]分别采用 WiFi 和 GPRS 两种接入网络策略,研究手机系统功耗的变化。在两台 Android 系统真机上进行实验,发现 WiFi 模式比 GPRS 模式省电。结果表明,研究手机移动网络模块的功耗对手机整体模块功耗具有十分重要的意义;文献[11]通过场景测试收集的数据进行拟合分析,构建了重要硬件组件对应的能耗模型。通过该模型可以得到各硬件在常见情况下的功耗水平,为降低手机能耗提供可用的数学模型。软件方面,文献[12]通过调用软件系统层的 WakeLock 以及中断信息构建了所有基本硬件子系统,即 CPU、屏幕、图形处理、GPS、音频、麦克风、WiFi 的能耗计算系统。由于充分考虑到各个子系统的执行状态,得到的系数在一定时间内可以保持恒定;文献[13]以网络应用为重点,通过对手机能耗数据的研究得到关于某一地区比较重要的、十分消耗电池的应用软件,可以给软件开发者提供相关的建议;文献[14]从软件体系结构层出发,基于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,提出了一种利用 BP 神经网络估算软件能耗的模型。但是,BP 神经网络也有一些缺点,训练时间较长、计算复杂等。

本文针对智能手机的硬件提出使用一种基于模型检测来分析能源错误和分析通信流量的建模方法。它使用一种功耗流量自动机模型来分析 Android 智能手机中的功耗。它可以看成线性混合自动机(linear hybrid automata, LHA)^[15]的一个子类,可以用时间自动机验证工具 UPPAAL^[16]来表示和分析。本文使用 WiFi 省电模式(power save mode, PSM)^[17]示例来说明该方法的动机和技术细节。

1 相关理论

1.1 模型检测方法

模型检测(model checking)是一种自动验证有限状态转移系统是否满足规范的形式化方法。时间自动机(timed automata, TA)是建模和验证实时系统的一个有效工具,工具 UPPAAL 就是基于时间自动机理论开发的^[18]。

时间自动机是一个定义了时钟变量的有限状态机,它可以为实时系统的行为建模和检验提供了形式化方法,在实时系统的规范说明和模型检验方面拥有很大优势。通常时间自动机被定义为六元组,传统时间自动机的定义参考文献[16]。一般包括初始状态、状态集、字符集、时钟集以及转换关系等。时钟约束是时间自动机与其他自动机的区别之处。

时钟约束,令时钟变量集为 X , x 是 X 中的一个时钟变量,则定义时钟约束 δ 如下: $\delta = x \leq c \mid c \leq x \mid -\delta_1 \delta_2$, 其中, c 为常数, $c \in Q$, Q 为非负有理数集,可作为时间常量的集合。

1.2 Android 电源管理机制

Android 系统主要采用 Linux 内核,其电源管理机制的实现主要在于内核层(kernel)和框架层/framework)。其中内核层包括核心硬件部件(如 CPU、内存的功耗管理)和设备模块(如 WiFi、3G/4G、屏幕、Flash 存储器的电源控制);在框架层包括唤醒锁(wakelock)的管理、系统休眠机制的管理、电池电量的评估和管理。

图 1 所示为 Android 智能手机的电源配置。Android 框架和内核一起为(App)和服务(service)提供了基本功能。Android 应用程序是具有 GUI 界面的应用程序进程,而 Android 服务不使用 GUI,是一种守护进程。它们都可以是单线程或多线程的。应用程序进程使用其他硬件组件,如屏幕、网络或外围设备,它们都是电池的消耗者。

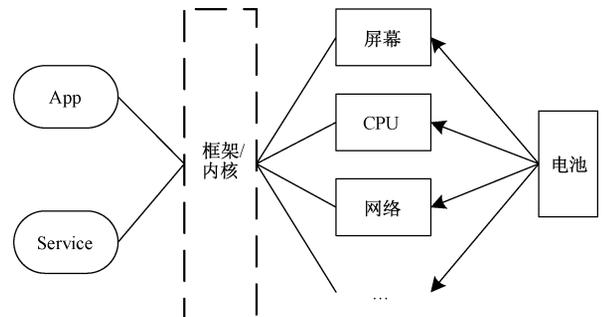


图 1 Android 手机的电源配置

Fig. 1 Power configuration of Android phone

Android 框架把底层组件封装了起来,使开发人员不

能准确了解功耗行为。如该框架会采用一些节能策略：当用户在一段时间内不触摸屏幕时，电源控制系统会自动强制系统进入睡眠状态以节省电量。而且智能手机配备的 CPU 具有动态电压频率调整 (dynamic voltage-frequency scaling, DVFS) 功能^[11,19]，会根据 CPU 使用情况在运行时选择适当的电压和频率，这使得功耗更加难预测。

Android 框架还为电源管理提供了唤醒锁机制，应用程序可以通过使用唤醒锁 WakeLock 请求 CPU 资源。Android 仅在没有持有 WakeLock 时关闭 CPU。开发人员要小心使用它们，获取的唤醒锁必须通过匹配的释放调用才能被释放。否则，即使调用程序被销毁，唤醒锁也仍然有效。有些错误是唤醒锁使用不当的结果^[1]。

唤醒锁的释放概念适用于各种组件的电源管理，如 WifiManager 提供了一种获取 WifiLock 的方法：WifiManager.WifiLock 类，允许应用程序对 Wifi 状态进行管理。

2 Android 手机功耗流量建模

2.1 WiFi 组件的功耗流量分析

图 2 所示为 Android 手机 WiFi 组件功耗近似曲线^[20]。智能手机的 WiFi 客户端或站点以被动扫描模式工作，接入点 (access point, AP) 定期发送信标通知 WiFi 客户端开始传输数据。图 2 中 WiFi 客户端首先处于深度睡眠状态 (Deep Sleep)，功耗约为 10 mW；当客户端接收到一个 TIM (traffic indication message) 时，然后进入高功耗状态 (high power) 以交换帧，功耗约为 600 mW；在高功耗状态 WiFi 客户端偶尔会保持空闲监听状态 (idle listen)，以查看是否还会有其他帧，此时功耗约为 400 mW；在数据传输的情况下，当 WiFi 客户端识别到不再有数据标志时，将进入轻睡眠状态 (light sleep)，功耗约为 120 mW，轻睡眠状态会保持一段时间，以便未来有数据传输时可以快速重新启动；当所有传输结束且识别到 no_more_data 标记或非活动计时器发生超时事件时，WiFi 客户端强制为深度睡眠状态。对应的 WiFi 流量传输速度也会随着数据传输和时间的变化发生变化。

设 $F(t)$ 为图 2 的功耗函数，则从时间 $0 \sim T$ 的总能耗 $E(T)$ 可以通过累加或积分获得。

$$E(T) = \int_0^T F(t) dt \quad (1)$$

而设流量传输函数为 $L(t)$ ，则从时间 $0 \sim T$ 的总数据流量 $Q(T)$ 也可通过累加或积分获得。

$$Q(T) = \int_0^T L(t) dt \quad (2)$$

由图 2 可知，WiFi 客户端状态通过事件 (信标) 和时

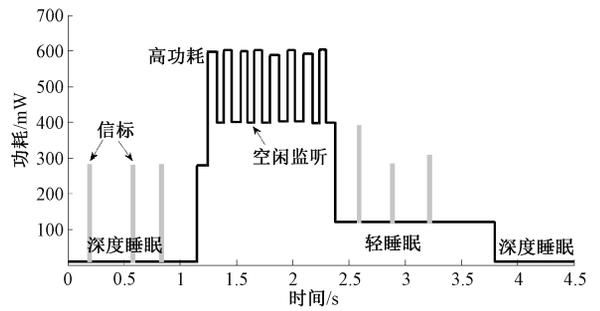


图 2 WiFi 功耗曲线示例

Fig. 2 Example of WiFi power consumption curve

间 (周期或超时) 触发产生改变。这种变化可以用状态转换表示，如图 3 所示。这种行为是抽象的，只显示了电源的状态变化，每个状态都可称为功耗状态，它们以特定的速率消耗能量。

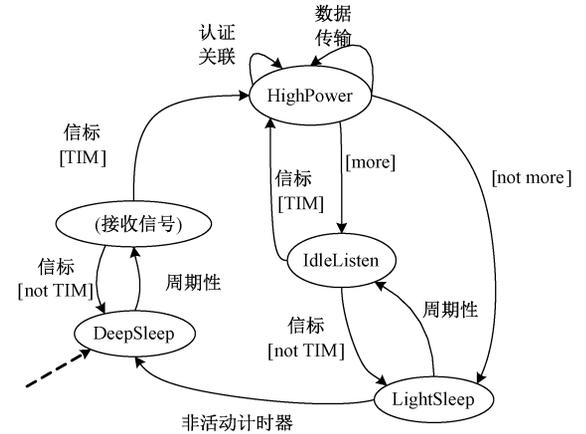


图 3 WiFi 客户端的状态转换

Fig. 3 WiFi client state transition diagram

如果基于时间的函数将功耗近似为在每种状态下都是线性的，则可以简化 $F(t)$ 。设 $P^j t$ 为在状态 j 停留 t 时间的能耗，其中 P^j 为常数，该值实际上是停留在特定电源状态的功耗。 $E(T)$ 是所有状态下能耗的总和。

$$E(T) = \sum_{j=1}^K P^j t^j \quad (3)$$

随着状态转换的继续，电源状态会被访问多次。而通信状态也会随着 WiFi 客户端状态发生改变。简化 $L(t)$ ，设 F^j 为在状态 j 时的传输速率。 $Q(T)$ 是所有状态下流量的总和。

$$Q(T) = \sum_{j=1}^K F^j t^j \quad (4)$$

2.2 功耗流量自动机

图 3 含有对于功耗分析不必要的信息，简化图 3 如图 4 所示，功耗流量自动机模型。它的边是协议事件 (如信标的到达) 或时间触发事件 (如非活动计时器超时)，

节点是电源状态。

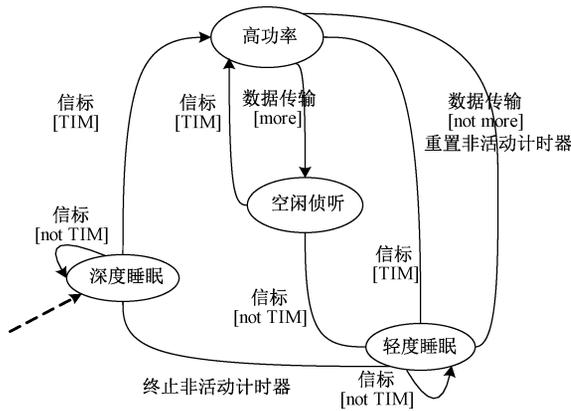


图 4 WiFi 客户端的功耗流量模型

Fig. 4 Power consumption and traffic model of WiFi client

功耗流量自动机可以看成是 LHA 的子类^[15]。LHA 是一种混合自动机,它的警卫、更新和不变量都是线性表达式,并且这些微分不等式是对一阶导数的线性约束。在功耗流量自动机中, P^i 负责计算状态 j 在 t 时间内消耗的总能耗。它是 $dP/dt = P^i$ 的微分等式,是一阶导数 (dP/dt) 上的线性约束。

3 基于 UPPAAL 的分析方法

3.1 UPPAAL 建模

本文使用模型检测工具 UPPAAL^[16,19] 的时间自动机模型来表示和验证分析功耗流量自动机。时间自动机可以将时钟变量的一阶导数设置为 0 或 1 (指定为位置不变式)。值 0 表示时钟变量不在该位置进行,而值 1 允许时钟进行。

1) 为每个电源状态引入一个时钟变量,时钟变量仅在特定状态下进行。这可以通过使用时间自动机来完成。假设 X_s 是为电源状态 S 引入的时钟变量,将不变量 $dX_s/dt = 0$ 添加到除状态 S 之外的所有状态中。在状态 S 中,将 X_s 设置为继续进行,则该状态的不变量应为 $dX_s/dt = 1$ 。

2) 引入形式为 $A[] (X_s \leq A_s)$ 的验证表达式,其中 A_s 是一个常数,表示特定电源状态所允许的最大功耗。当使用模型检测进行验证分析时,如果该状态下的功耗超过允许的最大值,则 UPPAAL 验证工具将返回一个反例。

3) 再引入 $A[] (X_s \leq B_s)$ 进行验证,其中 B_s 是一个常数,表示特定电源状态所允许的最大通信流量。

3.2 WiFi 组件示例分析

Android 框架提供了 WiFi Lock 类,以允许应用程序

管理 WiFi 状态。acquire() 方法将唤醒 WiFi,直到调用 release() 才将其关闭。

WiFi Lock 在 UPPAAL 中引用计数锁的模型如图 5 所示,结果表明 acquire() 和 release() 是平衡的,类似于计数信号量。图 6 所示为 UPPAAL 中的时间自动机模型,在图 5 的描述中添加了锁定功能所需的转换。如当数据传输结束而未将 more 标志打开时,如果唤醒被锁定,则图 6 的自动机即使在关闭 more 标志的情况下也保持在空闲监听状态。

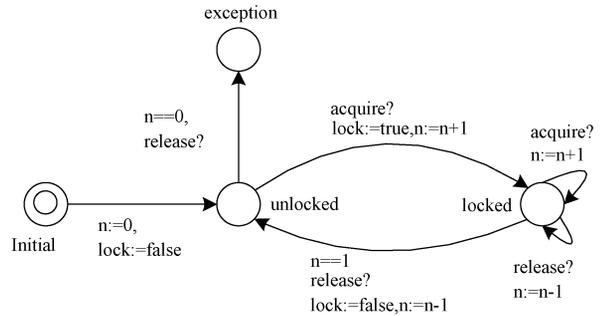


图 5 WiFi Lock 的计数模型

Fig. 5 WiFi Lock counting model

为 WiFi 客户端引入 4 个本地时钟变量,用于记录在特定状态下停留的时间。例如,在高功耗以外的所有状态下, x_{HP} 的一阶导数 (x_{HP}') 都设置为 0,以停止计数。

UPPAAL 中的模型是时间自动机网络,它必须是封闭的系统。因此,必须构建 UPPAAL 模型环境以及 WiFi 客户端,它们包括 WiFi Lock 的计数锁(图 5),一个 AP 和一个使用 WiFi 的应用程序。定义 AP 和应用程序遵循简单的用例,AP 模型发送信标 (beacon!), 并与 WiFi 客户端 (transfer!) 进行进一步通信。在特定的分析用例中,发送信标和数据帧的时间间隔以及数据帧的数量被视为参数。

3.3 模型验证

为了验证模型的正确性,使用 UPPAAL 建立模型后,需要进一步提取关键属性,对 WiFi 客户端时间自动机模型进行关键属性的验证。验证的主要属性和对应的表达式如下。

1) 所建模型无死锁;

表达式: $A[]$ not deadlock

2) 上述研究实例中的 WiFi 客户端可以正常进入到 Light Sleep 状态;

表达式: $E<>$ WiFiClientPower. LightSleep

3) WiFi 客户端停留在轻睡眠状态发生超时,例如时间超过 1 000 个滴答时,会返回一个反例。Power_Profile.xml 中的常数 P^{LS} 用来计算总消耗量;

表达式: $A[]$ (WiFiClientPower. xLS <= 1000)

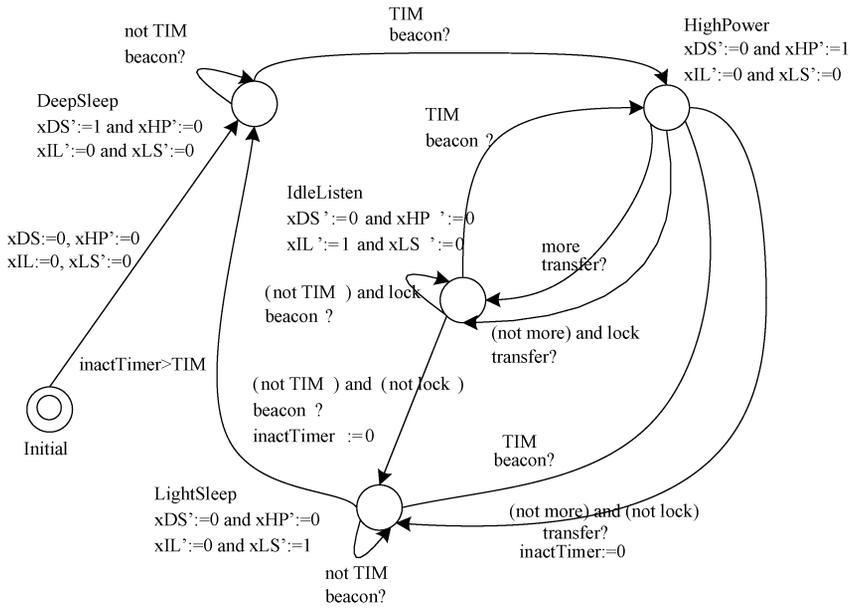


图 6 WiFi 客户端时间自动机模型

Fig. 6 WiFi client time automaton model

4) 客户端停留在 Light Sleep 状态的流量数据包不能超过 100 个, 否则, 将返回一个反例。

表达式: $A[]$ (WiFiClientTraffic. xLS \leq 100)

表 1 为上述属性在 UPPAAL 中的验证结果。从验证结果可知, 自动机模型满足前述需求属性, 不存在死锁, 系统能正常进入轻睡眠状态, 在轻睡眠状态的时间超过设定时间时会返回一个反例。此外, 根据对属性公式的验证耗时和内存使用峰值情况可以判定系统模型是否满足使用时限和资源限制。从表 1 可以看出, 模型属性的验证时间都在秒级, 而内存使用峰值都在兆级, 符合常规内存使用情况。

表 1 系统属性验证结果

Table 1 System property validation results

属性公式	验证结果	验证时间/s	内存使用峰值/KB
$A[]$ not deadlock	满足	0.027	8,264
$E \ll \text{WiFiClientPower. LightSleep}$	满足	0.013	7,182
$A[]$ (WiFiClientPower. xLS \leq 1000)	满足	0.186	17,104
$A[]$ (WiFiClientTraffic. xLS \leq 100)	满足	0.121	11,235

为了进一步评估自动机模型, 将本文的模型与实时应用程序 QQ 的活动结合起来, 通过 PowerTutor^[21] 记录一段时间内的 WiFi 能耗, 并根据自动机模型预测 WiFi 能耗。通过对比测量值和预测值的相对误差来评估模型的准确性。

$$\varepsilon = \frac{|E_{\text{meas}} - E_{\text{pred}}|}{E_{\text{meas}}} \cdot 100\% \quad (5)$$

式中: ε 为相对误差; E_{meas} 为测量能耗; E_{pred} 为预测能耗。

实验主要对比研究了 WiFi 的能耗特性。

实验步骤是首先关闭手机其他不必要的硬件组件以及应用程序, 然后接入 WiFi 无线网, 运行 QQ, 打开 PowerTutor 分析器, 设计在 2 min 内传输大小不一、数量不等的文件。QQ 是一款即时通信类应用, 主要有在线聊天、传输文件等功能。该实验主要测试在线接收文件的能耗, 测量时长均为 2 min。5 种不同的数据传输如下。

- 1) 在 2 min 内传输一个 659 KB 的文件;
- 2) 在 2 min 内传输两个文件, 1 min 传输 1 个, 大小分别为 386、399 KB;
- 3) 在 2 min 内传输 3 个文件, 每 40 s 传输 1 个, 大小分别为 1 975、1 979、3 767 KB;
- 4) 在 2 min 内传输一个 38.299 KB 的文件;
- 5) 在 2 min 内传输 4 个文件, 每 30 s 传输 1 个, 大小分别为 6 517 B、7 086、10 266、15 928 KB。

为了减少环境因素可能产生的偶然误差, 本文对以上每种测试用例都进行了 10 次测量, 并在此基础上计算平均值来作为最终测量结果。

图 7 所示为自动机模型的预测值与 PowerTutor 测量值的对比结果。其中 ‘a’、‘b’、‘c’、‘d’、‘e’ 分别代表不同的数据传输。从图 7 可以看出自动机模型能很好的反映 QQ 的能耗真实值, 其相对误差均没有超过 6.59%。此外, 从图 7 可以发现, 当传输的文件数量不同, 但大小几乎相同时, 数量相差越多, 相对误差越大。通过分析, 预测值比测量值略低的主要原因是模型没有考虑状态转换时产生的能耗和 WiFi 网络的尾功耗, 以及忽略了其他硬件的影响。

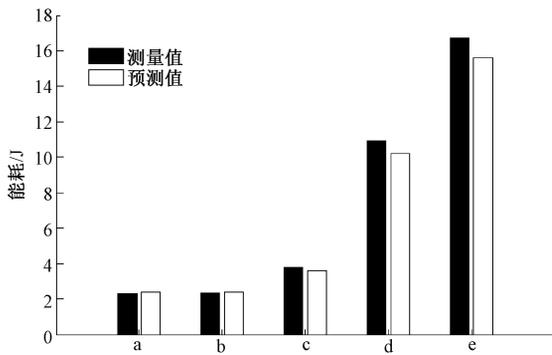


图 7 QQ 能耗测量值与预测值比较

Fig. 7 Comparison between measured and predicted values of QQ energy consumption

以上验证分析表明, WiFi 客户端的时间自动机模型满足系统验证需求, 同时由于模型的通用性, 它们还能被复用, 有效降低复杂系统的建模难度, 提升建模效率。对 WiFi 客户端示例的应用研究验证了手机功耗流量建模与验证方法的正确性和有效性。

4 结 论

本文通过对手机功耗流量模型检测技术的研究, 提出了使用功耗流量自动机来为 Android 应用程序的功耗和流量建模的方法。以 WiFi 组件为例进行了建模, 并对该模型进行了验证评估, 实验结果表明该方法是切实可行的, 为复杂手机系统提供了可参考的建模验证思路, 这对手机功耗流量建模工作具有重要意义。在接下来的工作中, 将对 WiFi 流量数据进行研究, 并在已有研究基础上为手机其他组件构建自动机模型, 进一步完善手机功耗流量的分析和验证。

参考文献

- [1] 丁阳征, 贾建芳. 改进 PSO 优化 ELM 预测锂离子电池剩余寿命[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 72-79.
DING Y ZH, JIA J F. Improved PSO optimized extreme learning machine predicts remaining useful life of lithium-ion battery [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2): 72-79.
- [2] PATHAK A, HU Y C, ZHANG M. Bootstrapping energy debugging on smartphones: A first look at energy bugs in mobile devices [C]. Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, 2011.
- [3] BANERJEE A, CHONG L K, BALLABRIGA C, et al. EnergyPatch: Repairing resource leaks to improve energy-efficiency of android apps [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2018, 44(5): 470-

490.

- [4] ZHANG L, GORDON M S, DICK R P, et al. ADEL: An automatic detector of energy leaks for smartphone applications [C]. 8th IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, 2012: 363-372.
- [5] PERRUCCI G P, FITZEK F H P, WIDMER J. Survey on energy consumption entities on the smartphone platform[C]. Vehicular Technology Conference, IEEE, 2011: 1-6.
- [6] 王双星. 基于 Android 系统的能耗计算研究[D]. 西安: 西北大学, 2014.
WANG SH X. Research on energy consumption calculation based on Android system [D]. Xi'an: Northwestern University, 2014.
- [7] 张加省. 面向智能手机应用程序节能优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
ZHANG J SH. Energy-saving optimization of smartphone applications [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [8] PATHAK A, HU Y C, ZHANG M, et al. Fine-grained power modeling for smartphones using system call tracing[C]. Proceedings of the 6th Conference on Computer Systems, ACM, 2011: 153-168.
- [9] PATHAK A, HU Y C, ZHANG M. Where is the energy spent inside my app fine grained energy accounting on smartphones with eprof[C]. Proceedings of the 7th ACM European Conference on Computer Systems, 2012: 29-42.
- [10] 张立, 韩银和, 袁小龙. 一种基于 Android 系统网络模块功耗的评估和分析[J]. 计算机科学, 2012, 39(6): 289-292.
ZHANG L, HAN Y H, YUAN X L. Estimation and analysis of network modules power consumption based on Android system [J]. Computer Science, 2012, 39(6): 289-292.
- [11] 程茹洁, 陆建, 蒋厚明, 等. 智能移动终端的能耗模型研究[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(12): 128-132, 138.
CHENG R J, LU J, JIANG H M, et al. Research on energy consumption model on smartphones [J]. Computer Technology and Development, 2017, 27(12): 128-132, 138.
- [12] MURMURIA R, MEDSGER J, STAVROU A, et al. Mobile application and device power usage measurements [C]. IEEE Sixth International Conference on Software Security & Reliability, IEEE Computer Society, 2012.
- [13] FOWDUR T P, HURBUNGS V, BEEHARRY Y. Statistical analysis of energy consumption of mobile

- phones for web-based applications in mauritius [C]. International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2016: 1-8.
- [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.
- [15] ALUR R. Formal verification of hybrid systems [C]. Embedded Software, 2011: 273-278.
- [16] DAVID A, LARSEN K G, LEGAY A, et al. Uppaal SMC tutorial [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2015, 17(4): 397-415.
- [17] MANWEILER J, ROY CHOUDHURY R. Avoiding the rush hour-s: WiFi energy management via traffic isolation[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, 2011: 253-266.
- [18] WAEZ M T B, DINGEL J, RUDIE K. A survey of timed automata for the development of real-time systems [J]. Computer Science Review, 2013(9): 1-26.
- [19] 吴群群, 王兴起. 基于时间自动机的符号状态拆分优化算法 [J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(7): 1866-1871.
WU Q Q, WANG X Q. Symbol state splitting optimization algorithm based on timed automata [J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(7): 1866-1871.
- [20] MITTAL R, KANSAL A, CHANDRA R. Empowering developers to estimate app energy consumption [C]. Proceedings of the 18th Annual International Conference

on Mobile Computing and Networking, ACM, 2012: 317-328.

- [21] ZHANG L, TIWANA B, DICK R P, et al. Accurate online power estimation and automatic battery behavior based power model generation for smartphones [C]. IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign & System Synthesis, 2010: 105-114.

作者简介



张贵玲, 2017 年于常州大学怀德学院获得学士学位, 现为常州大学硕士研究生, 主要研究方向为手机能耗分析和应用程序检测。

E-mail: 1551028341@qq.com

Zhang Guiling received her B. Sc. degree from Changzhou University Huaide College in 2017. Now she is a M. Sc. candidate at Changzhou University. Her main research interests include mobile phone energy consumption analysis, application testing.



朱正伟, 1984 年于东南大学获得学士学位, 1997 年于华东理工大学获得硕士学位, 2006 年于南京理工大学获得博士学位, 现为常州大学教授, 主要研究方向为无线传感器网络、智能检测技术及应用。

E-mail: zhuzw@cczu.edu.cn

Zhu Zhengwei received his B. Sc. degree from Southeast University in 1984, M. Sc. degree from East China University of Science and Technology in 1997, Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2006. Now he is a professor at Changzhou University. His main research interests include wireless sensor network, intelligent detection technology and application.