

# 多核系统动态温度管理 TAPE 策略的形式化验证

屈媛媛 洪 玫 孙 琳

(四川大学计算机学院 成都 610025)

**摘要** 多核系统中,分布式 DTM 策略因其良好的可扩展性得到了广泛应用。在部署分布式 DTM 策略前,必须验证其可靠性。为了克服传统分析方法的局限,模型检测技术被应用于分布式 DTM 策略的分析中。提出使用统计模型检测技术来验证多核系统中分布式 DTM 策略(以 TAPE 策略为例)的方案。使用 UPPAAL SMC 对 TAPE 策略的验证证明了 TAPE 策略的安全性、有效性、活性以及稳定性,从而验证 DTM 策略方案的可靠性。

**关键词** 动态温度管理策略,统计模型检测,多核系统

**中图分类号** TP306.7 **文献标识码** A

## Formal Verification of TAPE Strategy for Dynamic Temperature Management in Multi-core System

QU Yuan-yuan HONG Mei SUN Ning

(Department of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610025, China)

**Abstract** Distributed DTM strategy in multi-core system is widely used because of its scalability. Before a distributed DTM policy is deployed, its reliability must be verified. In order to overcome the limitations of the traditional analytical methods, the model checking technique is applied to the analysis of distributed DTM strategies. This paper analyzed a TAPE policy which is a distributed DTM policy instance in a multicore system using statistical model checking techniques. The verification of TAPE strategy by UPPAAL SMC proves the security, validity, activity and stability of TAPE strategy, and proves the reliability of DTM scheme.

**Keywords** Dynamic temperature management strategy, Statistical model checking, Multi-core system

## 1 绪论

为了维持多核系统的温度在阈值之下并最大化计算机的性能,近年来出现了多种温度管理技术。其中分布式 DTM 策略因其良好的可扩展性得到了广泛的应用。基于任务迁移机制的分布式 DTM 策略是解决多核系统面临的温度问题的一个好方法<sup>[1]</sup>。该类策略通过相邻核之间的任务迁移获取温度平衡。尽管 DTM 策略能控制多核处理器的温度,但如果策略做出了无效的决策,可能会产生热点,从而影响芯片的可靠性,因此需要验证该策略的可靠性。

传统方法是通过仿真或者在实际系统中运行来进行验证的,但是仿真是非穷尽的,尤其在多核系统中,随着核数量的增长,配置情形呈指数级增长。为了克服该限制,模型检测技术被提出,并用于 DTM 策略的验证。鉴于 DTM 策略安全攸关的本质,符号化模型检测技术被应用于验证 DTM 策略<sup>[2]</sup>。但是,符号化模型检测技术容易产生状态爆炸,并且其对连续型变量做离散化处理会影响验证结果的精度。

本文提出使用统计模型检测技术来验证 DTM 策略的可靠性。用 UPPAAL SMC 统计模型检测工具<sup>[3]</sup>对 DTM 策略的一个实例 TAPE<sup>[1]</sup>进行建模并验证。对于多核系统中的分布式 DTM 策略,需要验证的性质主要有 3 点:1)安全性,如它不会影响任务的可调度性;2)有效性,即使用了 DTM 策略后能有效降低处理器温度;3)活性和稳定性,即处理器中的每个核的温度都不会超过一定的阈值,若某个核的温度低于温度平均值,那么在下一个状态该核上的任务不会发生任务迁

移。实验表明,多核系统中 TAPE 策略对任务的可调度性没有影响,能够有效地控制温度,并对 TAPE 策略的活性和稳定性进行了验证。实验结果证明了 TAPE 策略是可靠的。

## 2 相关工作

传统验证 DTM 策略使用仿真技术或在实际系统中运行。Rao<sup>[4]</sup>针对同构的多核处理器利用热方程矩阵特殊的稀疏结构有效地计算芯片温度。Ukhov 等人<sup>[5]</sup>用电导热矩阵的对称结构,解决了抽样的线性时间复杂度问题。Mohaquq<sup>[6]</sup>基于马尔科夫观点推导出了稳态温度的概率密度函数,并计算出了系统的可靠性和功率消耗。Shukla<sup>[7]</sup>提出了一种形式化的方法,将系统建模为有限状态 Kripke 结构,对 DTM 策略进行模型检测分析。Norman<sup>[8]</sup>使用概率模型检测对 DTM 策略进行分析。Lungu<sup>[9]</sup>使用概率模型检测验证 DTM 策略的高阶早期模型的安全性和有效性。

Ismail<sup>[2]</sup>使用 SPIN 模型检测器和 Lamport 时间戳算法的方法,对分布式 DTM 策略的一个实例进行验证。Bukhari<sup>[10]</sup>使用 NuXMV 分析 DTM 中分布式任务迁移算法。Iqtedar<sup>[11]</sup>使用 PRISM 将分布式 DTM 策略建模为马尔科夫模型,并验证其定量性质。符号化模型检测技术验证 DTM 策略时,穷尽搜索状态空间,存在状态爆炸问题,将变量离散化<sup>[2,11]</sup>可以缩小系统模型的大小,但它在形式化验证的穷尽性上做出了妥协。本文提出的使用统计模型检测验证多核系统中的 DTM 策略,验证了 DTM 的活性和稳定性,同时验证了 DTM 策略是否会影响系统的可调度性,在该方案中我们

对连续型变量(如温度、能耗)进行了精细的处理,在验证的过程中得到了详细的能耗值信息。

### 3 基于 UPPAAL SMC 的 TAPE 策略形式化验证方案

本文主要对分布式 DTM 策略的一个实例——TAPE 策略进行验证,提出了使用统计模型检测技术对多核系统中的 TAPE 策略进行形式化验证的方案。

#### 3.1 DTM 实例:TAPE 策略简介

TAPE 策略是多核系统中一个有效的分布式 DTM 策略,它利用了完全分布式基于代理系统的概念,可以处理多核系统中复杂的温度管理任务。每一个核对应一个代理,通过与邻居核之间的局部交换可单独分配多核系统中每一块的功率单元,如图 1 所示。

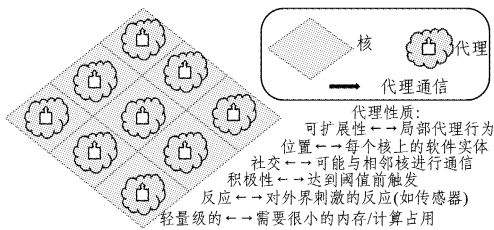


图 1 分布式 TAPE 策略

最初,所有代理上都分配了一个预定义数量的功率单元,这些功率单元分为两类:used 单元指当前部署于运行任务的功率单元;free 单元是指在核上可用,未运行所分配的任务的功率单元。这些功率单元被每个代理用来计算 buy 值和 sell 值,并以此进行功率单元的交换。buy 值和 sell 值根据功率单元的供应/需求而变化。开始时,一个任务随机映射到一个核上,每隔一定的时间,代理 n 首先计算它本身的 buy/sell 值,然后将它们与邻居代理的 buy/sell 值进行比较,公式如下:

$$(sell_n - buy_n) - (buy_n - sell_n) > \tau_n \tag{1}$$

其中,τ<sub>n</sub> 是代理 n 的 sell 阈值,该值确保无冗余交换,如两个代理一直连续来回地交换一个 free 功率单元。如果任意邻居 i 满足式(1),那么代理 n 就会放弃一个功率单元给具有最大 sell<sub>i</sub> - buy<sub>i</sub> 值的邻居。若代理上还有空闲的功率单元,则只需要将它的空闲功率单元数减 1,否则该代理就必须放弃一个 used 功率单元,并且对任务进行重映射。

#### 3.2 TAPE 策略形式化验证框架

本文基于统计模型检测技术对多核系统中的分布式 TAPE 策略进行形式化验证,以获得满足分布式 TAPE 策略性质的概率区间。该方案包括系统建模、性质描述、统计模型检测和结果解释,其框架及具体的分析流程如图 2 所示。

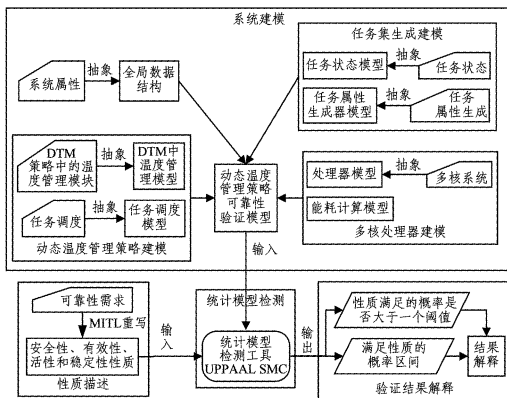


图 2 形式化验证 TAPE 策略框架

## 4 带 TAPE 策略的多核系统建模

将带 TAPE 策略的多核系统划分为应用程序、TAPE 策略算法和系统运行平台三大模块。其中,应用程序模块包括任务属性生成器以及一组实时任务;TAPE 策略算法模块包括任务调度器和代理协商;系统运行平台模块包括多核处理器和能耗计算。

### 4.1 任务集生成模型

任务集生成模型由任务属性生成器模型和任务状态模型组成。任务属性生成器根据应用程序的信息生成每一个任务的属性,任务状态模型表示任务的状态,并根据参数化生成的任务属性实例化任务,同时与其他模型协作表达任务的行为。

#### 4.1.1 任务属性生成器模型

任务集生成中有两个重要参数:任务集基数 n 和任务集利用率 u,即所有任务利用率之和  $U = \sum_{i=1}^n U_i = u$ ,其中  $u_i = \frac{WCET_i}{P_i}$  是 τ<sub>i</sub> 的利用率。UUniFast-Discard 算法<sup>[12]</sup>是一个生成多核系统任务属性的有效算法,其生成没有偏差的利用率值,范围为 [0, μ];每一个任务的利用率在范围 [0, 1] 内,并支持参数独立性。一旦确定了一个任务的周期,它的 WCET 和 WCEC 都可以被计算出来。多核系统任务集的总利用率可能大于 1。

基于 UUniFast-Discard 算法,使用 UPPAAL SMC 中的时间自动机模板对任务属性生成器构建的模型如图 3 所示。

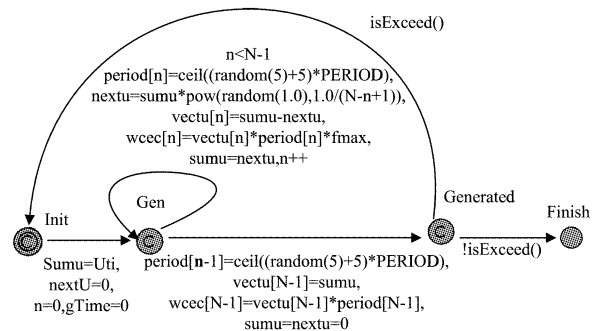


图 3 任务属性生成器模型

#### 4.1.2 任务状态模型

根据多核系统中任务调度以及 TAPE 策略问题的实际需求,以操作系统的五状态任务模型为基础,将任务抽象为 5 个状态:新建、就绪、运行、完成和错误。将挂起状态和就绪状态合并为同一个状态,因为在验证中两个状态下任务有同样的行为,同时引入错误状态表示任务超过截止时间的状态。任务状态如图 4 所示。

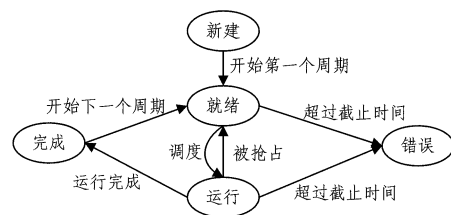


图 4 任务状态图

根据任务状态模型,使用 UPPAAL SMC 中的模版建立任务随机时间自动机模型,如图 5 所示。

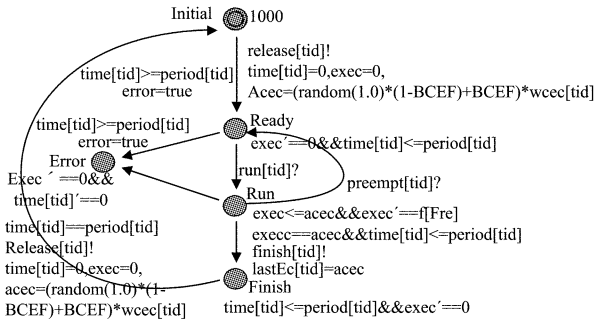


图5 任务状态模型

4.2 TAPE 策略模型

TAPE 策略中,任务映射和代理协商是两个非常重要的模块。因此在 TAPE 策略建模模块中,将任务映射功能建模在任务调度器的随机时间自动机模型(见图6)中,将代理协商功能单独建模为随机时间自动机模型(见图7)。

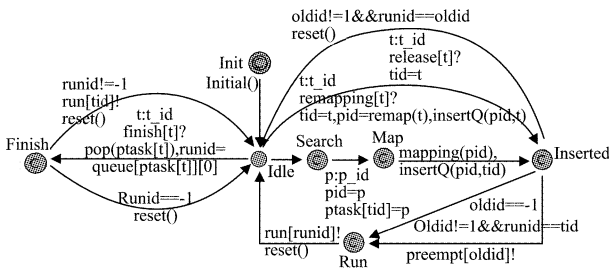


图6 任务调度器模型

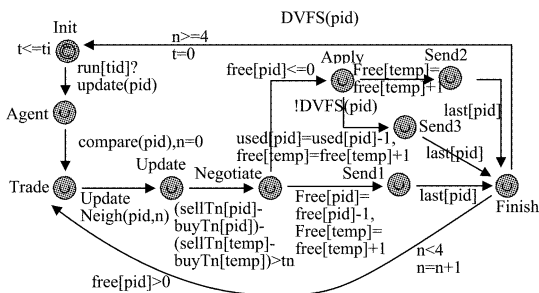


图7 代理协商模型

4.3 多处理器模型

对多处理器进行建模主要包括功能和温度分析模型、单个处理器模型以及多核系统所对应的整个处理器的全局模型。

4.3.1 功耗和温度分析模型

处理器功耗包括动态功耗( $P_{dyn}$ )、静态功耗( $P_{sta}$ )和短路功耗3个部分。短路功耗相对于动态功耗和静态功耗来说极小,可以忽略不计。处理器操作时有两个模式:空闲模式,只消耗静态功耗;活跃模式,处理器正在执行任务,消耗动态功耗和静态功耗<sup>[13]</sup>。动态功耗一般采用下述公式表示:

$$P_{dyn} = C_l \cdot N_{sw} \cdot V_{dd}^2 \cdot f \quad (2)$$

其中,  $C_l$  为负载电容,  $N_{sw}$  为电路翻转频率,  $V_{dd}$  为供应电压,  $f$  为时钟频率。而处理器的运行频率一般线性依赖于供应电压<sup>[14]</sup>, 表示为:

$$f = k \cdot \frac{(V_{dd} - V_t)^2}{V_{dd}} \quad (3)$$

其中,  $k$  为常量,  $V_t$  为阈值电压。为了简化计算,将式(3)代入式(2),在供应电压  $v_k$  下的动态功耗可以用下述公式<sup>[15]</sup>表示:

$$P_{dyn}(v) = C_0 \cdot v_k^3 \quad (4)$$

其中,  $C_0$  表示处理器相关的常量。

近年来,静态功耗或漏功耗在总功耗中的比重逐渐增加,其可以用公式表示为:

$$P_{sta} = N_{gate} \cdot I_{leak} \cdot V_{dd} \quad (5)$$

其中,  $N_{gate}$  表示门控电路总数,  $I_{leak}$  表示漏电流,与供应电流呈非线性指数关系,静态功耗可以近似地用下述公式计算:

$$P_{sta}(V_k) = (C_1(k) + C_2(k) \cdot (T - T_0)) \cdot V_k \quad (6)$$

其中,  $C_1(k)$  和  $C_2(k)$  是处理器相关电压敏感系数,  $T$  是处理器温度。

因此,处理器在活跃模式时的总功耗可以表示为:

$$Pow(V_k) = C_0 \cdot v_k^3 + (C_1(k) + C_2(k) \cdot (T - T_0)) \cdot V_k \quad (7)$$

最后,处理器的温度变化可以表示为:

$$\frac{\partial T(t)}{\partial t} = \rho \cdot Pow(t) - \beta \cdot (T(t) - T_0) \quad (8)$$

其中,  $\rho$  和  $\beta$  是处理器特定的温度系数<sup>[15]</sup>,  $Pow(t)$  和  $T(t)$  是瞬时功耗和温度,  $T_0$  表示环境温度。

4.3.2 处理器模型

在处理器模型中,有两个状态 Idle 和 Run,表示处理器操作中的两种模式,如图8所示。

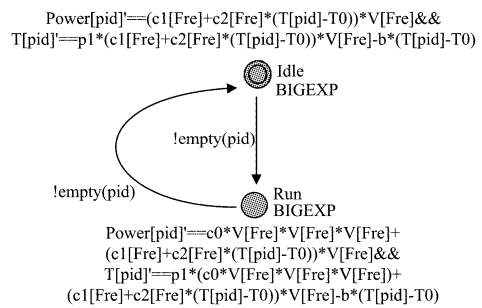


图8 处理器模型

处理器模型中参数  $pid$  用于区别不同的核实例,  $pid \in [0, P-1]$ , 表示核的编号。在处理器的局部声明中,声明了局部混合时钟变量  $Power$ , 用于保存每个核的能量消耗。全局时钟变量  $T[pid]$  保存瞬时的核的温度。两个状态上的不变量基于式(7)描述了  $Power$  和  $T$  随时间的变化,这样的处理使得  $Power$  和  $T$  值比文献[16-17]对温度的处理更为精确。每个状态上都有一个常数  $BIGEXP$  表示高指数率 ( $BIGEXP=10000$ ), 用来控制执行的精度,即根据指数延迟分布,平均每个时间单元对条件判断 10000 次。函数  $empty(pid)$  判断核  $pid$  的任务队列是否为空。

4.3.3 全局自动机模型

在多核系统中,为了能够计算整个处理器的能耗  $Energy$ 、温度平均值  $Tavg$  以及处理器温度的最高值  $T$ , 建立了一个全局自动机模型,如图9所示。其中只有一个状态,设置指数率精度为 10000, 从而保证总能耗值和温度平均值一直刷新。

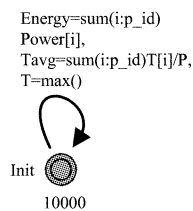


图9 全局自动机模型

5 带 TAPE 策略的多核系统验证性质描述

模型检测除了正确地使用随机时间自动机来描述系统之

外,还需要利用时态逻辑来表达验证的性质,下面描述了对应的验证性质语句。

### 5.1 可调度性

多核系统中任务的可调度性通过利用率边界值估计来验证,寻找一个算法的任务集利用率边界是一个假设检验的问题。对于一个给定的任务集利用率  $\mu$ ,验证任务集不可调度的概率是否小于或等于阈值  $q$ 。在验证的过程中逐渐增加  $\mu$  的值,直到性质语句首次不被满足,最终  $\mu$  的值就为算法的利用率边界值。该性质的语句形式化如下:

$$Pr[\leq B](\langle \rangle error) \leq q \quad (9)$$

式(9)的语义为:在  $B$  时间单元内,存在  $error$  的概率是否小于或等于  $q$ 。如果验证该性质是满足的,表示任务集在该算法下是可调度的。

### 5.2 有效性

多核系统中 DTM 策略的有效性是通过处理器的最高温度值来验证的。对于多核处理器中温度的估计分析需要每个核最大温度的期望值,从中找出最高的温度作为处理器的最高温度值。其中每个核最大温度的期望值和处理器的最大温度期望值对应的性质语句形式化如下:

$$E[\leq B; N](\max; T[i]) \quad (10)$$

$$E[\leq B; N](\max; T) \quad (11)$$

式(10)的语义为:在  $B$  个时间单元内,执行  $N$  次并返回核  $i$  最大温度的期望值。式(11)的语义为:在  $B$  个时间单元内,执行  $N$  次并返回处理器的最大温度的期望值。

### 5.3 活性

在 TAPE 策略的验证中,其需要验证的活性性质主要包括以下内容:

当系统中某个核的温度  $T$  大于温度平均值,那么该核的温度最终会降低并且低于温度阈值,从而避免热点的发生,性质语句如下:

$$Pr[\leq B](\langle \rangle exists(i; p_{id})((T[i] > T_{avg}) \rightarrow ([0, N_1] T[i] \leq T_{avg}))) \quad (12)$$

式(12)的语义为:在  $B$  个时间单元内,如果存在某个核温度大于阈值温度,那么在之后的  $N_1$  时间单元内,该核的温度会降低到阈值温度以下的概率是多少?

如果系统中某个核的温度  $T$  小于温度平均值  $T_{avg}$  时,那么就不需要将核上的任务迁移到邻居核上去,对应的模型检测性质语句如下:

$$Pr[\leq B](\langle \rangle exists(i; p_{id})((T[i] < T_{avg}) \rightarrow ([0, N_2] Processor.Run))) \quad (13)$$

其中,  $N_2$  表示时间单元,其值很小, Processor.Run 表示处理器处于 Run 状态。式(13)的语义为:在  $B$  个时间单元内,如果存在某个核温度小于阈值温度,那么处理器的状态会一直保持在 Run 状态的概率是多少?

### 5.4 稳定性

在 TAPE 策略算法中,稳定性表示所有核的温度最终都会低于或等于设定的温度阈值  $T_s$ 。其对应的模型检测性质语句如下:

$$Pr[\leq B](\langle \rangle forall(i; p_{id})((T[i] < T_s)) \quad (14)$$

其中,  $T[i] < T_s$  表示核上的温度  $T$  小于或等于一个阈值  $T_s$ 。式(14)的语义为:在  $B$  个时间单元之内,处理器中所有的核上的温度都会低于或等于一个阈值温度的概率是多少?

## 6 模型检测和结果分析

通过具体的实验验证多核系统中的 TAPE 策略,对检测

结果进行分析,证明统计模型检测对分布式 DTM 策略是可行的。

### 6.1 验证方案设计

从 3 个方面来验证 TAPE 策略的可靠性:使用了 TAPE 策略之后,多核系统的可调度性是否会受到影响;是否可以有效地管理温度,并将温度控制在阈值内;TAPE 策略的活性和稳定性。

在可调度性验证中,首先以某一步长逐步增加任务集利用率值以验证式(9)是否满足,直到在某个任务集利用率值下式(9)不满足,然后缩小步长再验证式(9),找到式(9)首次不满足的利用率值,该值即为该算法的利用率边界值  $U_b$ 。设计一个对比实验,将一个不可调度的任务集手动加入到系统模型中,以验证式(9)是否满足。

在有效性验证中,验证式(10),得到单个核的最高温度期望值。然后不断增加任务集利用率值,验证式(11),得到处理器的最高温度期望值  $T_{m1}$ 。将系统模型中的 TAPE 策略算法部分替换为一个不考虑温度管理的多核处理器调度算法,在新模型中验证式(11),得到没有使用 TAPE 策略的多核系统的最高温度期望值  $T_{m2}$ ,对比  $T_{m1}$  和  $T_{m2}$ 。

在活性和稳定性验证中,分别验证式(12)式(14),得到性质的验证结果。然后将温度阈值调小,再对式(14)进行验证,得到验证结果,对比两次验证式(14)的结果。

### 6.2 可调度性验证结果及其分析

任务集是由任务集生成器模块生成的,设置任务集利用率在范围[3,5]内以步长 0.05 变化。任务集基数值和任务周期分别设置为 10 和 100。逐步增加任务集利用率并验证式(9)是否满足。

从任务集利用率值为 3.0 开始验证,直到当任务集利用率为 4.75 时任务集都是可调度的;当任务集利用率值为 4.8 时抽样 3797 次,费时 4584s,在常驻内存和虚拟内存的使用峰值分别为 7592kB 和 27124kB 的情况下,验证结果为“不满足该性质”,即在任务集利用率为 4.8 时任务集是不可调度的。

为了得到更加准确的边界值,将任务集利用率增长的步长改为 0.01。验证发现任务集利用率为 4.77 时抽样 3797 次,费时 4777s,在常驻内存和虚拟内存的使用峰值分别为 7372kB 和 26964kB 的情况下,式(9)的验证结果是“满足”,即任务集是可调度的,而当任务集利用率为 4.78 时任务集是不可调度的。因此,多核系统中使用了 TAPE 策略后的任务集利用率边界值为 4.77。

根据对任务集利用率值的研究,多核系统中最大的任务集利用率值计算公式为:

$$U = (m+1)/2 \quad (15)$$

最小的任务集利用率值计算公式为:

$$U = m^2 / (2m-1) \quad (16)$$

其中,  $m$  为核的数量。在本实验中多核处理器具有 9 个核,利用式(15)和式(16)计算出任务集利用率边界在范围[4.76, 5.0]之间,验证结果得出任务集利用率边界为 4.77,这表明该实验结果是正确的。

### 6.3 策略有效性验证结果及其分析

设置运行次数  $N$  为 5000,时间单元  $B$  为 10000,任务集利用率值  $U_{ti} = 3.2$ ,将核的编号  $i$  设置为 0,对式(10)进行验证,抽样 5000 次,费时 58319s,在常驻内存和虚拟内存的使用峰值分别为 7940kB 和 27624kB 的情况下,核 0 上的最高温

度的期望值为  $37.8338 \pm 0.0285415$ , 温度概率密度分布情况如图 10 所示。

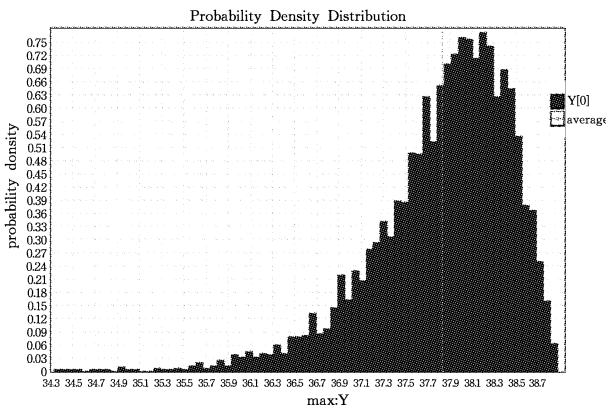


图 10 编号 0 的核上的温度概率分布

在图 10 中, 横坐标为温度值, 纵坐标为温度值的概率密度。抽样的所有最高温度期望值落在区间  $[34.3303, 38.8696]$  之内。

将核的编号从 0 依次增加到 8, 随着任务集利用率在范围  $[2, 4.8]$  内以步长 0.2 变化, 得到每个核在使用 TAPE 策略和未使用 TAPE 策略时最高温度期望值的变化情况, 如图 11 所示。

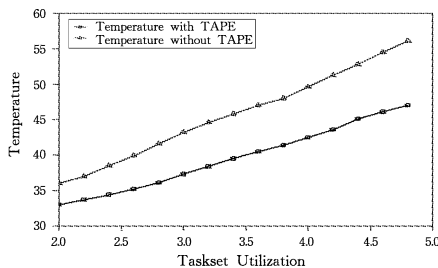


图 11 任务集利用率对处理器最高温度值的影响

从图 11 中可以看出, 使用 TAPE 策略的多核系统的最高温度期望值明显低于未使用 TAPE 策略的多核系统的最高温度期望值。处理器最高温度期望值随着任务集利用率的增加而升高, 这是因为随着任务集利用率增加, 任务运行时间增加, 消耗更多的能源, 从而引起温度的升高。

#### 6.4 活性和稳定性性质验证结果及其分析

设置任务集利用率值  $Utili = 3.2$ , 阈值温度  $T_s = 47^\circ\text{C}$ , 对 TAPE 策略进行活性和稳定性的验证。

##### 6.4.1 活性

验证式(12), 抽样 3797 次, 费时 4632s, 在常驻内存和虚拟内存的使用峰值分别为 7892kB 和 27424kB 的情况下, 得到的概率区间为  $[0.998, 1]$ 。

验证式(13), 抽样 3797 次, 费时 4763s, 在常驻内存和虚拟内存的使用峰值分别为 7796kB 和 27360kB 的情况下, 得到的概率区间为  $[0.998, 1]$ 。因为  $[0.998, 1]$  是接近于 1 的区间, 所以我们认为 TAPE 策略满足活性要求。

##### 6.4.2 稳定性

验证式(14), 抽样 3797 次, 费时 4709s, 在常驻内存和虚拟内存的使用峰值分别为 7460kB 和 26972kB 的情况下, 概率区间为  $[0.998, 1]$ 。

其他参数不变, 将温度阈值设置为  $46^\circ\text{C}$ , 验证式(14), 费时 562s, 在常驻内存/虚拟内存的使用峰值分别为 7512kB 和 27120kB 的情况下, 概率区间为  $[0, 0.002]$ , 即多核系统中存

在温度高于阈值的核, 系统中存在热点。

**结束语** 本文针对多核系统中 DTM 策略的形式化验证, 提出了基于统计模型检测技术的多核系统中 DTM 策略进行形式化验证的方案。通过一个具体的实例——TAPE 策略来验证本文所提出的方案, 使用 UPPAAL SMC 对多核系统中的 TAPE 策略进行形式化验证。

针对 TAPE 策略, 阐述其形式化建模的过程。将 TAPE 策略算法与系统环境分别抽象建模, 对于不同的 DTM 策略, 只需要更换 DTM 策略算法模型, 就可以提高模型的可扩展性。

本文以多核系统中的 TAPE 策略为实例进行形式化验证, 并设计了具体的实验进行验证。实验表明, 多核系统中 TAPE 策略对任务的可调度性没有影响, 能够有效控制温度, 并对 TAPE 策略的活性和稳定性进行了验证。实验结果证明了 TAPE 策略是可靠的。

#### 参考文献

- [1] EBI T, FARUQUE M, HENKEL J. Tape: Thermal-aware agent-based power econom multi-/many-core architectures[C]// IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design-Digest of Technical Papers (ICCAD 2009). IEEE, 2009: 302-309.
- [2] ISMAIL M, HASAN O, EBI T, et al. Formal verification of distributed dynamic thermal management[C]// Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design. IEEE Press, 2013: 248-255.
- [3] DAVID A, LARSEN K G, LEGAY A, et al. Time for statistical model checking of real-time systems[C]// Computer Aided Verification. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 349-355.
- [4] RAO R, VRUDHULA S. Fast and accurate prediction of the steady-state throughput of multicore processors under thermal constraints[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2009, 28(10): 1559-1572.
- [5] UKHOV I, BAO M, ELES P, et al. Steady-state dynamic temperature analysis and reliability optimization for embedded multiprocessor systems[C]// Proceedings of the 49th Annual Design Automation Conference. ACM, 2012: 197-204.
- [6] MOHAQE QI M, KARGAHI M, MOVAGHAR A. Analytical leakage-aware thermal modeling of a real-time system[J]. IEEE Transactions on Computers, 2014, 63(6): 1378-1392.
- [7] SHUKLA S K, GUPTA R K. A model checking approach to evaluating system level dynamic power management policies for embedded systems[C]// Sixth IEEE International High-Level Design Validation and Test Workshop. IEEE, 2001: 53-57.
- [8] NORMAN G, PARKER D, KWIATKOWSKA M, et al. Using probabilistic model checking for dynamic power management [J]. Formal Aspects of Computing, 2005, 17(2): 160-176.
- [9] LUNGU A, BOSE P, SORIN D J, et al. Multicore power management: Ensuring robustness via early-stage formal verification [C]// Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Conference on Formal Methods and Models for Codesign. IEEE Press, 2009: 78-87.
- [10] BUKHARI S A A, LODHI F K, HASAN O, et al. Formal Verification of Distributed Task Migration for Thermal Management in On-Chip Multi-core Systems Using nuXmv [M]. Formal Techniques for Safety-Critical Systems. Springer International Publishing, 2014: 32-46.

(45.49,111.07)。可以看出,相比于基于航线的匹配方式,基于区域的匹配方式的所得结果更为优越。

表 4 两种匹配方式的优化方案

匹配方式	加油量 1/kg	加油量 2/kg	适应度	总油耗/kg	加油点 1 位置	加油点 2 位置
1	1239.3	3086.1	3.2340	25448	37.64,100.57	37.09,107.57
2	2044.5	6204.2	3.6012	34179	36.74,100.68	45.49,111.07

**结束语** 本文针对运输机空中加油点选取所需考虑因素,依据总耗油量最少、运输机航程最短、威胁代价最小的原则,建立模型并进行求解;对 DG-FPSO 算法进行了性能测试,对比 SPSO 算法,得出 DG-FPSO 算法性能更为优越;使用 DG-FPSO 算法对两种匹配方式下的加油点选取进行求解并进行对比,得出在基于区域匹配方式下所得结果更优,计算出加油点的选取位置,给出空中加油的合理方案。

### 参 考 文 献

- [1] 陆宇平,杨朝星,刘洋洋. 空中加油系统的建模与控制技术综述[J]. 航空学报,2014,35(9):2375-2389.
- [2] BARANS J W, WILEY V D, MOORE JT, et al. Solving the Aerial Fleet Refueling Problem using Group Theoretic Tabu Search[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2004, 39(6-8):617-640.
- [3] PFLIEGER C H. Models for the optimization of air refueling mission[R]. Ohio, USA: Air Force Institute of Technology, ADA 262392, 1993.
- [4] BUSH B A. Analysis of Fuel Consumption for an Aircraft Deployment[R]. North Carolina: North Carolina State University, 2006:12-45.
- [5] ANNABALLI R J. A Multiple Ant Colony Optimization Metaheuristic for the Air Refueling Tanker Assignment Problem [R]. Ohio: Air Force Institute of Technology Graduate School of Engineering and Management, 2002:6-23.
- [6] BEARD R W, MCLAIN T W. Coordinated Target Assignment and Intercept for Unmanned Air Vehicles[J]. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*(SI042-2962), 2002, 18(6):911-922.
- [7] 徐亚涛,原淼. 一种特定情形下的空中加油模型设计[J]. 系统仿真学报,2011,23(1):340-342.
- [8] 刘健豪,艾剑良. 飞机空中加油航路规划的最优化研究[J]. 复旦学报(自然科学版),2014,53(1):141-146.
- [9] 俞桦,艾剑良. 基于遗传算法的空中加油航路规划[J]. 系统管理学报,2009,18(3):350-354.
- [10] 秦前付,赵景龙,徐洸. 空中加油计划优化模型及其遗传算法求解[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(35):219-221.
- [11] 计秀敏. 空中加油机的发展及其作战使用[M]. 北京:航空工业出版社,2004:71-76
- [12] 胡春鹤,陈宗基. 多无人机空中加油的最优会合航路规划[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(10):1400-1406.
- [13] 董新民,徐跃鉴,陈博. 自动空中加油技术研究进展与关键问题[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2008, 9(6):1-5.
- [14] 程路尧,朱建冲,蔡纪伟. 无人作战飞机空中加油航路问题研究[J]. *航空兵器*, 2008(5):12-15.
- [15] 刘娇龙,薛建平,董新民,等. 空中加油变质量飞机建模与仿真[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(30):8971-8975.
- [16] 李艺辉,韩旭东. 基于遗传算法的战场空中加油空域规划[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(8):58-62.
- [17] ROSKAM J. Airplane flight dynamics and automatic flight controls[OL]. <http://pdf114.yobabooks.com/book/978-1884885181>.
- [18] SHI Y, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[C]// *Proc IEEE Int Conf on Evolutionary Computation*. Seoul, Korea, 2001:101-106.
- [19] 罗强,李瑞裕,易东云. 基于模糊文化算法的自适应粒子群优化[J]. *计算机工程与科学*, 2008, 30(1):88-92.
- [20] URSEM R K. Diversity-guided evolutionary algorithm[C]// *The 7th Int'l Conf on Parallel Problem Solving from Nature*, LNCS2439. Berlin: Springer, 2002:462-474.
- [21] 邵鹏,吴志健. 基于改进 PSO 算法的 Rosenbrock 函数优化问题的研究[J]. *计算机科学*, 2013, 40(9):194-197.
- (上接第 546 页)
- [11] IQTEDAR S, HASAN O, SHAFIQUE M, et al. Formal probabilistic analysis of distributed dynamic thermal management[C]// *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2015. IEEE, 2015:1221-1224.
- [12] DAVIS R I, BURNS A. Priority assignment for global fixed priority pre-emptive scheduling in multiprocessor real-time systems [C]// *Real-Time Systems Symposium (RTSS 2009)*. IEEE, 2009:398-409.
- [13] LIAO W, HE L, LEPAK K M. Temperature and supply voltage aware performance and power modeling at microarchitecture level [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2005, 24(7):1042-1053.
- [14] ZHURAVLEV S, SAEZ J C, BLAGODUROV S, et al. Survey of energy-cognizant scheduling techniques[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(7):1447-1464.
- [15] MOHAQEQUI M, KARGAHI M, MOVAGHAR A. Analytical leakage-aware thermal modeling of a real-time system[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2014, 63(6):1378-1392.
- [16] ISMAIL M, HASAN O, EBI T, et al. Formal verification of distributed dynamic thermal management[C]// *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design*. IEEE Press, 2013:248-255.
- [17] IQTEDAR S, HASAN O, SHAFIQUE M, et al. Formal probabilistic analysis of distributed dynamic thermal management[C]// *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. IEEE, 2015:1221-1224.