

一种混合优先级的防危调度算法

万 明, 张凤鸣, 樊晓光

(空军工程大学工程学院, 西安 710038)

摘 要: 为增强实时系统任务过载时的防危性, 提出一种混合优先级的防危调度算法, 其优先级由相对截止期优先级和相对松弛度优先级组成, 通过相对松弛度预测任务的可完成性, 并采用完全抢占方式防止处理器资源的竞争抖动。仿真结果表明, 该算法可充分利用处理器资源, 能在发生瞬时过载时有效降低任务的截止期错失率。

关键词: 实时系统; 防危调度; 调度算法; 任务优先级; 截止期错失率

Safety Schedule Algorithm Based on Mixed Priority

WAN Ming, ZHANG Feng-ming, FAN Xiao-guang

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

【Abstract】 To improve the safety of real-time system at transient overload, a schedule algorithm based on mixed priority is proposed. The priority of the algorithm consists of relative deadline priority and relative slack priority. With relative slack, whether tasks will miss deadline can be predicted. Through the complete CPU preemption, frequent context switch can be avoided. Simulation results show that the presented algorithm improves the efficiency of task schedule and effectively decreases the Missed Deadline Percentage(MDP) at transient overload.

【Key words】 real-time system; safety schedule; schedule algorithm; task priority; Missed Deadline Percentage(MDP)

1 概述

实时系统是一个用来处理具有定时限制工作负载的任务处理系统^[1], 在实时系统的任务调度中, 研究主要集中于调度算法的应用, 其中, 使用最多的是基于优先级的调度算法。基于优先级的调度算法主要有单调速率^[2]、最早截止期优先(Earliest Deadline First, EDF)^[3]、最小松弛度优先(Least Laxity First, LLF)^[4]、最早放行优先、最早可达截止期优先^[1]等算法, 其中, EDF 和 LLF 算法是讨论极为广泛的 2 种调度算法。

由于实时系统一般包含多个任务, 任务的个数在整个系统的运行期间随着应用环境的变化而变化, 在某一时刻会出现任务量瞬时过载的情况, 会有一些任务不可避免地错过其截止期。因此, 实时系统的任务调度算法必须具有一定的防危调度能力, 尽可能降低任务的截止期错失率^[5]。本文提出一种混合优先级的实时任务调度算法, 融合了 EDF 和 LLF 的设计思想, 能够有效提高调度的防危性。

2 现有调度算法的防危性

定义一个含有 n 个任务的集合 $S=\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$, 集合中的任务用 $\tau_i(A_i, C_i, D_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ 来表示。其中, A_i 、 C_i 和 D_i 分别表示任务 τ_i 的到达时间、剩余执行时间和截止期。基于优先级的抢占式调度算法, 即为系统中所有到达任务根据某种策略分配优先级 P_i , 当多个任务同时到达时, 具有较高优先级的任务先执行。若具有较高优先级的任务到达, 可抢占当前任务的处理器资源。

2.1 最早截止期优先算法

EDF 算法根据任务的截止期分配优先级, 截止期越早则任务的优先级越高。EDF 算法能很好地支持周期动态变化的任务, 且在单处理器情况下是最优的。EDF 算法的主要缺点是不能预测任务计算的成功性, 即在执行前并不能预测任务能否完成计算任务。

2.2 最小松弛度优先算法

任务松弛度 L_i 定义为截止期与剩余执行时间之差。LLF 算法根据松弛度分配优先级, 松弛度越小则任务的优先级越高。LLF 算法的主要缺点是存在竞争抖动问题, 即当 2 个以上任务的松弛度相同时, 一个任务占用一个时间片, 然后被另一个任务抢占, 此时多个任务轮流占用处理器资源。这种竞争会浪费有限的处理器资源, 同时使得任务切换过于频繁。

2.3 防危性分析

截止期错失率(Missed Deadline Percentage, MDP)是指系统中错过截止期的任务个数与参加调度的任务个数之比, 它与调度成功率呈反比。EDF 和 LLF 算法都不能很好地应用于实时系统瞬时过载的情况, 即缺乏防危性。优先级仅仅由某个特征参数来确定是不够的^[6], 例如松弛度小的任务不一定截止期早, 反之亦然。因此, 需要研究利用多个特征作为任务的优先级参数, 构造使系统防危性更好的实时调度算法。

3 ELM 防危调度算法

3.1 ELM 算法的优先级

定义 1 任务 $\tau_i(A_i, C_i, D_i)$ 的相对截止期 $d_i(t)$ 定义为 D_i 与当前时刻 t 之差, 即:

$$d_i(t)=D_i-t \quad (1)$$

定义 2 任务 $\tau_i(A_i, C_i, D_i)$ 的相对松弛度 $l_i(t)$ 定义为截止期 D_i 与剩余执行时间 C_i 、当前时刻 t 之差, 即:

$$l_i(t)=D_i-C_i-t \quad (2)$$

根据相对截止期和相对松弛度, 可构造 ELM 调度算法的优先级结构, 其任务优先级由相对截止期优先级和相对松弛

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 万 明(1979—), 男, 博士, 主研方向: 实时操作系统; 张凤鸣, 教授、硕士; 樊晓光, 教授、博士

收稿日期: 2010-06-11 **E-mail:** afwanming@163.com

度优先级两部分组成,如图1所示。

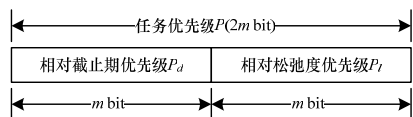


图1 ELM调度算法的任务优先级结构

$\forall \tau_i \in S$, 任务 τ_i 的优先级可定义为相对截止期与相对松弛度的函数, 即:

$$P_d(\tau_i, t) = \begin{cases} 2^m - 1 - d_i(t) & A_i \leq t, C_i > 0, l_i(t) \geq 0 \\ -1 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_l(\tau_i, t) = \begin{cases} 2^m - 1 - l_i(t) & A_i \leq t, C_i > 0, l_i(t) \geq 0 \\ -1 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

其中, t 为当前时刻; $d_i(t)$ 根据式(1)计算; $l_i(t)$ 根据式(2)计算; m 满足 $2^m > \max_{1 \leq i \leq n} D_i$; $A_i \leq t$ 表示任务已到达; $C_i > 0$ 表示任务未完成; $l_i(t) \geq 0$ 表示任务在剩余的时间中可完成。优先级计算公式的含义为对于已到达、未完成, 且在剩余时间中可以完成的任务才有意义, 否则一律计算为-1, 即表示此类任务已无法完成且不进行调度。

3.2 ELM调度算法

根据 ELM 算法的优先级策略, 可以构造如下的任务调度算法:

(1) 对于任务集合 $S = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ 和当前时刻 t , 计算各任务的 P_d , 选择 P_d 最高的任务执行;

(2) 如果 2 个以上任务的 P_d 相等, 则计算这些任务的 P_l , 选择其中 P_l 最高的任务执行;

(3) 如果 2 个以上任务的 P_d 相等, 且 P_l 也相等, 则选择任意一个任务(例如已执行时间较长或下标较小的任务)执行, 直至其执行完。

调度算法每单位时刻调度 1 次, 仅当出现式(3)中的情况时, 暂停调度直至被选择的任务执行完毕。在 ELM 算法中, 第(1)步的设计思想与 EDF 算法的设计思想相同, 即选择截止期较早(此时相对截止期也较早)的任务执行, 不同之处是要考虑任务能否完成, 即提高了任务能否完成的预测能力; 第(2)步的设计思想与 LLF 算法的设计思想相同, 即选择松弛度较小(此时相对松弛度也较小)的任务执行, 不同之处是在出现多个任务具有相同松弛度时在第(3)步中通过某个任务的处理器完全抢占, 防止了任务的竞争抖动现象。

4 仿真实例

为进一步说明 ELM 算法的有效性, 记 $R(x, y)$ 表示在 x 和 y 之间的均匀随机整数。对于一组任务 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, 取 $n=20$ 、 $A_i=R(0,3)$ 、 $D_i=R(10,20)$ 、 $C_i=R(1,(D_i-A_i)/5)$, 当出现 2 个以上任务的 P_d 和 P_l 均相等时, 选择下标较小的任务执行。共仿真 10 批, 每批 100 组, 对每组任务, 分别采用 EDF、LLF 和 ELM 算法进行调度, 并各自统计一次 MDP 。针对这 3 种算法, 分别统计每批 MDP 的平均值, 结果如图 2 所示。

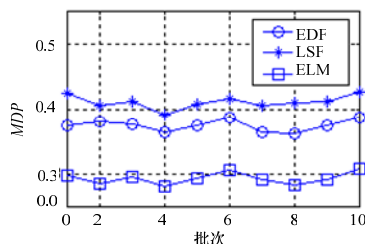
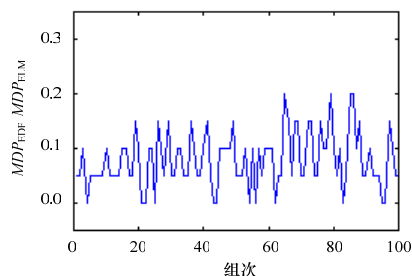


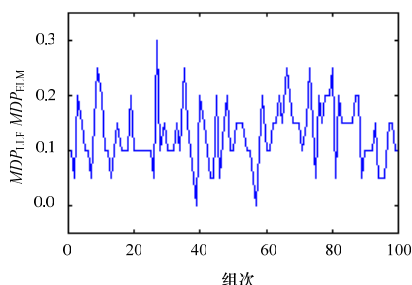
图2 3种算法的MDP曲线

可以看出, EDF 算法的防危性高于 LLF 算法的防危性, 而 ELM 算法的防危调度性均优于这 2 种算法。

记 MDP_{EDF} 为基于 EDF 算法的 MDP , MDP_{LLF} 为基于 LLF 算法的 MDP , MDP_{ELM} 为基于 ELM 算法的 MDP 。图 3 分别给出某批 $MDP_{EDF}-MDP_{ELM}$ 曲线和 $MDP_{LLF}-MDP_{ELM}$ 曲线。



(a) $MDP_{EDF}-MDP_{ELM}$ 的曲线



(b) $MDP_{LLF}-MDP_{ELM}$ 的曲线

图3 MDP偏差曲线

由图 3(a) 可知, 在该批的 100 组任务中, 满足 $MDP_{EDF}-MDP_{ELM} < 0$ 的个数为 0, 等于 0 的个数为 12, 大于 0 的个数为 88, 其中, 41(0.05), 29(0.10), 14(0.15), 4(0.20), 括号内的数据是截止期错失率的差值, 括号外的数据为该差值的个数。由图 3(b) 可知, 在此 100 组中, 满足 $MDP_{LLF}-MDP_{ELM} < 0$ 的个数为 0, 等于 0 的个数为 2, 大于 0 的个数为 98, 其中, 15(0.05), 35(0.10), 27(0.15), 15(0.20), 5(0.25), 1(0.30)。从仿真结果中可以得到以下结论:

(1) 由图 3(a) 可知, 与 EDF 算法相比, 通过 ELM 算法调度, 除个别几组任务以外, 大多数任务组的截止期错失率得到降低。在这 100 组任务中, 得到降低的比例达到 88%, 持平的比例为 12%, 没有截止期错失率升高的现象出现。

(2) 由图 3(b) 可知, 与 LLF 算法相比, 通过 ELM 算法调度, 除个别几组任务以外, 大多数任务组的截止期错失率得到降低。在这 100 组任务中, 截止期错失率降低的比例达到 98%, 持平的比例为 2%, 也没有截止期错失率升高的现象出现。

实际上在仿真过程中, 对于所有任务集 ELM 算法都未出现过截止期错失率升高的现象。综上所述, 通过对优先级的综合设计, ELM 的任务截止期错失率大大低于 EDF 和 LLF 的截止期错失率。

5 结束语

实时系统的防危调度能力是衡量其任务调度算法的重要性能之一。因此, 本文借鉴 EDF 算法和 LLF 算法的设计思想, 提出了一种综合任务相对截止期和相对松弛度 2 个特征参数的混合优先级防危调度算法。仿真实验表明, 在系统瞬时过载的情况下, 该算法可有效降低任务的截止期错失率。该算法可广泛应用于采用动态优先级且实施抢占调度的单处理器实时系统。

(下转第 258 页)

到 AS 层的路由获得。Skitter 项目是由 CAIDA 启动的一个著名的基于主动探测的项目，它在全球部署了几十台专用于测量的服务器。本文所用的 AS 级拓扑数据都是 Skitter 项目 2006 年发布的最新数据集 ITDK304。

4.2 性能分析

为验证改进 PFP 模型的有效性，本文将产生的拓扑图与 PFP 模型进行比较分析。

首先分别测试改进 PFP 与 PFP 对无尺度特性的满足情况。在仿真实验中，从 ITDK304 中提取基础拓扑数据，生成 5 次拓扑图，然后取平均值进行分析。为了节约空间，只考虑幂律 1 和幂律 4 的满足情况，如图 2、图 3 所示，改进 PFP 能更好地满足幂律分布，更适合于 Internet 的建模。

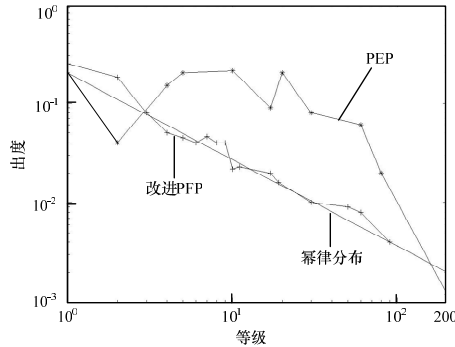


图 2 幂律 1 的满足情况

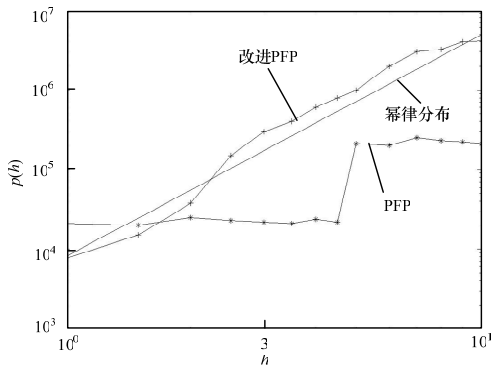


图 3 幂律 4 的满足情况

其次分析了当前流行拓扑模型的小世界特性满足情况。

Internet 具有小世界特性，其 AS 级拓扑图的特征路径长度一般在 4 跳以内。本文分别测试了改进 PFP、PFP、PLRG、BA 拓扑模型的特征路径长度，在对改进 PFP 的仿真实验中，采用了多次生成拓扑图，然后取平均值进行分析。各种拓扑模型和真实 AS 级拓扑图的比较如表 2 所示，可见，改进 PFP 模型与实际 AS 级拓扑具有更大的相似度，能较好地模拟 Internet 的聚类特性。

表 2 各种拓扑模型和真实 AS 级拓扑的比较

指标	真实 AS 级拓扑	改进 PFP	PFP	PLRG	BA
节点数	10 966	10 966	10 966	10 966	10 966
特征路径长度/跳	3.72	3.70	4.57	4.24	3.86
群集系数	0.74	0.72	0.66	0.65	0.89

5 结束语

拓扑建模是进行 Internet 研究的基础。PFP 是一种目前较为流行的 Internet 拓扑模型，本文分析 PFP 拓扑演化模型的不足，针对这些不足以及对 Internet 测量数据的分析，提出一种改进的动态拓扑生成模型。改进 PFP 模型综合考虑了 AS 节点的产生、消亡和链接的产生、消亡，实验结果表明，改进模型能很好地满足 Internet 中的各种拓扑特征。如何动态描述 Internet 的特征仍然是一个开放性的问题，研究面临着很多的困难。下一步将在拓扑建模的过程中加入一个可变化的时间步长模拟 Internet 的动态性特征。

参考文献

- [1] Zhou Shi, Mondragon R J. Accurately Modeling the Internet Topology[J]. Physical Review E, 2004, 70(6): 96-108.
- [2] Zhang Beichuan, Raymond L, Daniel M, et al. Collecting the Internet AS-level Topology[J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Reviews, 2005, 35(1): 53-61.
- [3] Siganos G, Faloutsos M, Faloutsos P, et al. Power-laws and the AS-level Internet Topology[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(4): 514-524.
- [4] Wang Xiaofan, Chen Guanrong. Complex Networks: Small-world, Scale-free and Beyond[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2003, 3(1): 6-20.
- [5] Zhou Shi. Understanding the Evolution Dynamics of Internet Topology[J]. Physical Review E, 2006, 74(1): 16-24.

编辑 陆燕菲

(上接第 255 页)

参考文献

- [1] 刘云生, 何新贵, 唐常杰, 等. 特种数据库技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 彭德坤, 宋红军, 刘博阳. 基于 RM 调度的任务抢占次数最多分析[J]. 计算机工程, 2009, 35(8): 263-265.
- [3] Haritsa J R, Livny M, Carey M J. Earliest Deadline Scheduling for Real-time Database Systems[C]//Proc. of IEEE Real-time Systems Symposium. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 1991.

- [4] Jensen E D, Locke C D, Toduda H. A Time-driven Scheduling Model for Real-time Operating Systems[C]//Proc. of IEEE Real-time Systems Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society Press, 1985.
- [5] 胡志刚, 胡周君. 基于多 Qos 目标的工作流调度算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(10): 126-128.
- [6] 金 宏, 王宏安, 王 强, 等. 一种任务优先级的综合设计方法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 376-382.

编辑 顾姣健