

文章编号: 1001-0920(2005)03-0246-05

控制系统中实时任务的动态优化调度算法

刘怀¹, 费树岷²

(1. 南京师范大学 电气与电子工程学院, 江苏 南京 210042; 2. 东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 提出一种新的调度算法——带有非周期服务器的EDF调度算法。分析了所有任务的可调度性, 给出了可调度条件, 并给出一种新的周期性任务模型以及主优先级和辅助优先级的概念。它们在保证任务可调度的前提下, 对周期性任务的采样频率和控制延时进行优化。仿真结果表明, 该算法可以提高周期性任务的采样频率, 并降低控制延时, 即能优化系统的性能。

关键词: 采样频率; 周期性任务; 非周期任务; 非周期服务器; 控制延时

中图分类号: TP316 **文献标识码:** A

Optimal dynamic scheduling algorithm for real-time tasks in digital control systems

LIU Huai¹, FEI Shumin²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China; 2. Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: LIU Huai, E-mail: liuhuai@njnu.edu.cn)

Abstract: A novel scheduling algorithm, named Earliest Deadline First (EDF) with sporadic server, is presented. The schedulability of all tasks including the periodic tasks and the sporadic tasks is investigated, and the schedulability test is given. A new periodic task model and concepts of main priority and assistant priority are presented. By using them, the sampling frequencies of periodic tasks are optimized under maintained schedulability and the control delay of periodic task is reduced. The result of simulation shows that the sampling frequencies of periodic tasks can be increased and the control delays of periodic tasks can be reduced.

Key words: sampling frequency; periodic task; sporadic tasks; sporadic sever; control delay

1 引言

数字控制系统运行于计算机上, 主要完成数据采集、控制计算、控制输出及报警等功能。随着微处理器性能的迅速增加, 经常用一个处理器控制多个回路。这可以充分利用处理器资源, 减少软、硬件投资, 但它涉及到实时多任务的调度问题。在实时控制系统中, 周期性任务(如数据采集、控制计算和控制输出等)和非周期任务(如报警、人机交互等)共存。它们都是强实时任务, 如果任务没有在时限内完成, 便会产生灾难性后果。

对实时系统中任务的调度算法的研究较早。Liu

和Layland^[1]针对周期性任务模型, 提出了著名的RMS算法和EDF算法, 但是这两种算法都要求任务的时限等于它们的周期。为此, Audsley^[2]提出了DMS算法。这些算法只适用于周期性任务的调度。为调度非周期任务, 多种非周期服务器被引入调度算法^[3~6], 但这些算法主要是为了提高处理器的利用率, 且要求非周期任务都是软实时的。

对控制系统中实时任务调度的研究主要集中在周期性任务的调度上。Seto等^[7]给出了优化调度算法。为降低控制延时, Gervin^[8]给出了周期性任务分解模型。Marco等^[9]通过重新设置任务时限来提高

收稿日期: 2003-09-22; 修回日期: 2004-02-11

基金项目: 南京师范大学科研基金项目(2003KZXXGQ 2B 88)

作者简介: 刘怀(1971—), 男, 河北承德人, 副教授, 博士后, 从事实时控制系统、智能控制等研究; 费树岷(1961—), 男, 安徽宣城人, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统、鲁棒控制等研究。

任务的可调度性 Buttazzo 等^[10]给出了一种弹性任务模型以适应速率控制 所有这些任务模型和调度算法都仅考虑了周期性任务, 所以它们不适用于控制系统 基于此, 本文针对控制系统设计了更适用的调度算法, 并对采样周期和控制延时进行优化, 给出了优化的调度算法

2 控制系统的任务模型

一般来说, 实时控制系统的结构可考虑图 1 所示的形式 实际上, 图 1 只是一个控制回路, 可将其看作周期任务, 周期为采样周期, 而采样周期可在一定范围内选择 为了提高控制系统的性能, 在不同状态下采用不同的控制算法, 故任务执行时间也在一定范围内变化

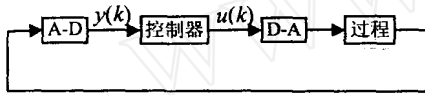


图1 实时控制系统的结构形式

基于此得到周期性任务模型如下:

定义 1 一个周期性任务 τ_{pi} 可描述为 $\tau_{pi} =$

$C_{pi}, C_{pi}^{max}, f_{pi}, f_{pi}^{min}$, 式中 $C_{pi}, C_{pi}^{max}, f_{pi}$ 和 f_{pi}^{min} 分别是任务 τ_{pi} 的执行时间、最大执行时间、采样频率和最小采样频率

然而, 控制系统中的任务并不都满足上述模型, 如报警任务 这种任务是非周期的, 实例的到达间隔时间必然存在一个最小值, 其模型可描述为:

定义 2 一个非周期任务 τ_{api} 可描述为 $\tau_{api} =$

$C_{api}, T_{api}^{min}, \lambda$, 式中 C_{api}, T_{api}^{min} 和 λ 分别表示任务 τ_{api} 的最大执行时间、最小达到间隔时间和平均到达率

为了便于设计和分析调度算法, 作如下假设和定义:

假设 1 1) 任务是独立的;

2) 任务不存在释放抖动;

3) 周期性任务时限等于其周期, 非周期任务时限等于其最小间隔时间;

4) 任何任务的执行时间在其到达后可确定;

5) 控制系统中仅存在一个周期性任务集 S_H 和一个非周期任务集 S_S, S_H 包含 n 个周期性任务, S_S 由 m 个非周期任务组成, n 和 m 都是整数, 且 S_H 和 S_S 由一个处理器完成;

6) 令

$$U^m(S_S) = \sum_{i=1}^m C_{api} / T_{api}^{min}$$

$$U^m(S_H) = \sum_{i=1}^n C_{pi}^{max} f_{pi}^{min}$$

定义 3 一个任务是可调度的, 是指它的实例

在任何情况下都不丢失时限 如果一个任务集中的所有任务都是可调度的, 则称它是可调度的

3 动态调度算法

对于前述的任务模型, 设计如下调度算法:

调度算法 1

1) 用非周期服务器(简称服务器)调度非周期任务, 它们的优先级相同 任务 τ_{api} 对应的服务器为 C_i , 周期为 T_{api}^{min} , 容量为 C_{api} ;

2) 任务优先级采用抢占式 EDF 算法设置;

3) 为充分利用服务器容量, 当没有非周期任务实例到达或执行时, 比其优先级低的周期性任务实例可先执行, 并将所用的服务器容量存贮到该周期性任务中;

4) 如果在一个服务器周期内没有非周期任务实例到达, 则清除其占有容量(包括寄存到周期任务的部分), 并重新计时;

5) 非周期任务到达后, 它在其服务器的容量中执行(包括寄存到周期任务的部分)。

4 可调度性分析

引理 1^[11] 对于周期性任务集 $S = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$, 采用抢占式 EDF 算法, 当且仅当 $\sum_{i=1}^n C_i / T_i \leq 1$ 时, 任务集是可调度的, 其中 C_i 和 T_i 分别表示任务 τ_i 的执行时间和周期

定理 1 若任务集 S_H 和 S_S 采用调度算法 1, 则任务集可调度的充分必要条件为

$$U^m(S_H) + U^m(S_S) \leq 1 \quad (1)$$

证明 充分性: 对于第 2 节的任务模型, 最坏情况是非周期任务实例以最快速度到达, 且任务执行时间都是最大值 如果此种情况下任务集是可调度的, 则任务集在任何情况下都是可调度的 此时非周期任务可看作周期性任务(周期为 T_{api}^{min}), 周期性任务频率可选为 f_{pi}^{min} . 处理器利用率为

$$U(S_H) + U(S_S) = \sum_{i=1}^n f_{pi}^{min} C_{pi}^{max} + \sum_{i=1}^m C_{api} / T_{api}^{min} = U^m(S_H) + U^m(S_S) \leq 1$$

由定理 1 可知任务集是可调度的

必要性: 假设任务集 S_H 和 S_S 当 $U^m(S_H) + U^m(S_S) > 1$ 时仍是可调度的 在最坏情况下, 任务集总利用率为

$$U(S_H) + U^m(S_S) = \sum_{i=1}^n C_{pi}^{max} f_{pi}^{min} + U^m(S_S),$$

则

$$U(S_H) + U^m(S_S) = \sum_{i=1}^n C_{pi}^{max} f_{pi}^{min} + U^m(S_S) > 1$$

这与引理 1 相矛盾,所以假设不成立

5 系统性能的分析与优化

5.1 基于处理器利用率的优化

Seto 等^[7]发现控制系统性能随采样频率的降低而降低,它们之间的关系可表示为

$$\Delta J_{pi}(f_{pi}) = |J_{pi} - J_{pi}(f_{pi})| = \alpha_{pi} e^{-\beta_{pi} f_{pi}} \quad (2)$$

式中: J_{pi} 和 $J_{pi}(f_{pi})$ 分别表示连续控制的性能指标和采样频率为 f_{pi} 时的性能指标, α_{pi} 和 β_{pi} 为放大系数和衰减率. 在任务集 S_H 和 S_S 可调度情况下,对于第 2 节的任务模型,根据定理 1,优化问题变为求目标函数(3)在条件(4)下的极值问题,即

$$\min_{(f_{p1}, \dots, f_{pn})} \Delta J = \sum_{i=1}^n w_{pi} \Delta J_{pi}(f_{pi}) = \sum_{i=1}^n w_{pi} \alpha_{pi} e^{-\beta_{pi} f_{pi}} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n f_{pi} C_{pi} = 1 - U^m(S_S),$$

$$f_{pi} C_{pi} = f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

式中 $w_{pi} (i = 1, 2, \dots, n)$ 为周期性任务的权重系数. 权重越大,任务的采样频率越高

定理 2 在约束条件(4)下,存在唯一的一组优化采样频率使目标函数(3)最优,当所有任务满足时, $f_{pi}^{\text{opt}} > f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max} / C_{pi}, i = 1, 2, \dots, n, f_{pi}^{\text{opt}}$ 由下式给出:

$$f_{pi}^{\text{opt}} = \frac{1}{\beta_{pi}} \left[\ln \mu_{pi} - \frac{\sum_{i=1}^n C_{pi} \frac{\ln \mu_{pi}}{\beta_{pi}} - 1 + U^m(S_S)}{\sum_{i=1}^n \frac{C_{pi}}{\beta_{pi}}} \right] \quad (5)$$

式中 $\mu_{pi} = w_{pi} \alpha_{pi} \beta_{pi} / C_{pi}$. 否则由下式给出:

$$f_{pi}^{\text{opt}} = f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max} / C_{pi}, \quad i = 1, 2, \dots, p,$$

$$f_{pj}^{\text{opt}} = \frac{1}{\beta_{pj}} \left(\ln \mu_{pj} - \left[\sum_{m=p+1}^n C_{pm} \ln \mu_{pm} / \beta_{pm} - 1 + U^m(S_S) + \sum_{k=1}^p f_{pk}^{\min} C_{pk}^{\max} \right] / \left[\sum_{m=p+1}^n C_{pm} / \beta_{pm} \right] \right), \quad j = p + 1, \dots, n. \quad (6)$$

式中 p 满足

$$\sum_{k=1}^p f_{pk}^{\min} C_{pk}^{\max} + \sum_{j=p+1}^n \frac{1}{\beta_{pj}} \left[\ln \mu_{pj} - \left(\sum_{m=p+1}^n C_{pm} \ln \mu_{pm} / \beta_{pm} - 1 + U^m(S_S) + \sum_{k=1}^p f_{pk}^{\min} C_{pk}^{\max} \right) / \left[\sum_{m=p+1}^n C_{pm} / \beta_{pm} \right] \right] C_{pj} = 1 + U^m(S_S) \quad (7)$$

的最小整数,且任务按如下顺序排列:

$$\mu_{p1} \exp(-f_{p1}^{\min} C_{p1}^{\max} \beta_{p1} / C_{p1}) \quad \dots$$

$$\mu_{pn} \exp(-f_{pn}^{\min} C_{pn}^{\max} \beta_{pn} / C_{pn}).$$

证明 引入 Lagrangian 因子 $\lambda = 0, \lambda = 0, i = 1, 2, \dots, n$, Lagrangian 函数为

$$L = \sum_{i=1}^n \alpha_{pi} w_{pi} e^{-\beta_{pi} f_{pi}} + \lambda \left(\sum_{i=1}^n f_{pi} C_{pi} - 1 + U^m(S_S) \right) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \left(\frac{f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max}}{C_{pi}} - f_{pi} \right), \quad (8)$$

则 Kuhn-Tucker 条件为

$$\lambda_i (f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max} / C_{pi} - f_{pi}^{\text{opt}}) = 0, \quad (9a)$$

$$\lambda \left(\sum_{i=1}^n f_{pi}^{\text{opt}} C_{pi} - 1 + U^m(S_S) \right) = 0, \quad (9b)$$

$$f_{pi}^{\text{opt}} > f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max} / C_{pi}, \quad (9c)$$

$$\sum_{i=1}^n f_{pi}^{\text{opt}} C_{pi} = 1 - U^m(S_S). \quad (9d)$$

根据 Kuhn-Tucker 定理,可得优化采样频率满足

$$-\mu_{pi} e^{-\beta_{pi} f_{pi}^{\text{opt}}} + \lambda - \lambda / C_{pi} = 0, \quad (10)$$

其中 $\mu_{pi} = w_{pi} \alpha_{pi} \beta_{pi} / C_{pi}$. 由于 $\lambda = 0$, 则 $\lambda > 0$ 由式(9b)有

$$\sum_{i=1}^n f_{pi}^{\text{opt}} C_{pi} = 1 - U^m(S_S).$$

设 $f_{pi}^{\text{opt}} > f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max} / C_{pi}$, 根据式(9a)有 $\lambda = 0$, 则

$$-\mu_{pi} e^{-\beta_{pi} f_{pi}^{\text{opt}}} + \lambda = 0, \text{ 且 } e^{-\beta_{pi} f_{pi}^{\text{opt}}} = \lambda / \mu_{pi}. \text{ 于是}$$

$$f_{pi}^{\text{opt}} = (\ln \mu_{pi} - \ln \lambda) / \beta_{pi}, \quad (11)$$

则有

$$\sum_{i=1}^n C_{pi} (\ln \mu_{pi} - \ln \lambda) / \beta_{pi} = 1 - U^m(S_S).$$

整理得

$$\ln \lambda = \frac{\sum_{i=1}^n C_{pi} \frac{\ln \mu_{pi}}{\beta_{pi}} - 1 + U^m(S_S)}{\sum_{i=1}^n \frac{C_{pi}}{\beta_{pi}}}. \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可得式(5). 如果 $f_{pi}^{\text{opt}} > f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max} / C_{pi}$, 则任务 τ_{pi} 是可调度的; 否则, 任务 τ_{pi} 不可调度, 即任务 τ_{pi} 不能优化. 为使任务 τ_{pi} 可调度, 令 $f_{pi}^{\text{opt}} = f_{pi}^{\min} C_{pi}^{\max} / C_{pi}$. 设有 p 个任务满足这些条件, 只有任务 $\tau_{pi} (i = p + 1, \dots, n)$ 可以优化. 这时用 $1 - U^m(S_S) - \sum_{k=1}^p f_{pk}^{\min} C_{pk}^{\max}$ 代替式(5)中的 $1 - U^m(S_S)$, 可得式(5).

根据定理 2, 给出计算优化采样频率的算法:

算法 1 在系统设计阶段, 根据任务的重要性确定参数 w_{pi} , 并确定各任务的 $C_{pi}, C_{pi}^{\max}, f_{pi}^{\min}, C_{api}, T_{api}^{\min}$; 再计算 $U^m(S_S)$. 根据式(5)~(7)便可计算出优化采样频率

在系统运行阶段, 任务 τ_{pi} 实例到达后确定其执

行时间 C_{pi} , 其优化采样频率为 $f_{pi}^{opt} = f_{pi}^{opt} C_{pi} / C_{pi}$, 从而确定下一个实例到来时刻; 然后根据 EDF 算法设置各任务实例的优先级, 并确定应执行的任务

5.2 控制延时

定义 4 对于一个反馈控制回路, 从数据采集到控制信号输出所需时间称为控制延时, 用 Dd_i 表示

Byung^[12] 揭示了 Dd_i 对控制系统二次性能指标的影响, Dd_i 越小, 控制系统的性能指标越好. 为了优化系统的性能, 应减小 Dd_i . 为此, 可使与 Dd_i 有关的控制回路部分先完成, 其他部分后完成, 从而减小 Dd_i . 根据第 2 节的分析, 一个控制回路要完成几种功能, 各功能相对独立, 所以每个功能部分可看作该回路任务的一个子任务. 据此给出子任务模型:

定义 5 设某任务 τ_{pi} 可分解为 m_i 个子任务, 每个子任务完成一种或几种功能, 子任务 τ_{pik} ($1 \leq k \leq m_i$) 定义为 $\tau_{pik} = C_{pik}, C_{pik}^{max}, D_{pik}$, 式中 C_{pik}, C_{pik}^{max} 和 D_{pik} 分别为执行时间、最大执行时间和时限

显然有 $C_{pik} = C_{pi}, C_{pik}^{max} = C_{pi}^{max}$, 且所有子任务 τ_{pik} 的周期(频率)为任务 τ_{pi} 的周期(频率); 任务 τ_{pi} 的实例一到达, 其所有子任务实例同时到达

定义 6 根据控制系统的要求和最小化 Dd_i 需要确定的子任务顺序 $\tau_{pil}, \dots, \tau_{pil_i}, \dots, \tau_{pil_i}$ 称为子任务的执行顺序. 其中 $\tau_{pil}, \dots, \tau_{pil_i}$ 是在控制信号输出前必须完成的子任务

为控制子任务的执行顺序, 引入主优先级和辅助优先级的概念:

定义 7 非周期任务和周期任务优先级称为主优先级; 用于控制子任务执行顺序的优先级称为辅助优先级

为简化调度算法, 采用 DM S 算法设置子任务的辅助优先级, 通过如下方法设置子任务时限

定理 3 对于任务 τ_{pi} , 所有子任务时限用如下方法设置, 可保证子任务的执行顺序

$$D_{pij} = T_{pi} - \sum_{k=j+1}^{m_i} C_{pik}, \quad (13)$$

式中 $T_{pi} = 1/f_{pi}$ 为任务 τ_{pi} 的采样周期

证明略

基于此给出如下动态优化调度算法:

调度算法 2

- 1) 当一个周期性任务实例到来时, 根据算法 1 确定下一个实例到来的时刻;
- 2) 根据调度算法 1 确定任务的主优先级;
- 3) 确定子任务 τ_{pij} 的执行时间 τ_{pij} ;
- 4) 根据式 (13) 确定所有子任务的时限, 并根据

DM S 算法设置子任务辅助优先级;

5) 根据主优先级和辅助优先级确定应执行的任务实例

定理 4 如果任务集 S_H 在调度算法 1 下是可调度的, 则它在调度算法 2 下依然是可调度的

证明 考虑子任务 τ_{pij} 的一个实例, 如图 2 所示. 其到达时间为 t , 时限为 $d_{ij} = t + D_{pik}$.

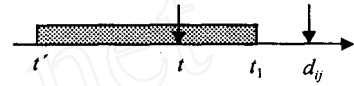


图 2 实例图示

设 t_1 是该实例的完成时间. 根据第 3 节的调度算法, 设 t 为 t 前最后一个时刻系统没有到达时刻比 t 早和时限在 d_{ij} 前的挂起实例. 因此, t 必须是一个任务实例的到达时刻, 且在 $[t, t_1]$ 之间没有空闲, 同时只有子任务在 t 或其后到达且时限早于 d_{ij} 的实例执行. 设 R_{ij} 为子任务 τ_{pij} 的响应时间, 则有

$$R_{pij} = \sum_{k=1, k \neq i}^n \sum_{l=1}^{m_k} \left[\frac{t + D_{pij} - T_{pk} - t}{T_{pk}} \right] C_{pkl} + \sum_{l=1}^{m_i} \left\{ \left[\frac{t - t}{T_i} \right] - 1 \right\} C_{pil} + \sum_{k=1}^m \left[\frac{t + D_{pij} - T_{apk}^{min} - t}{T_{apk}^{min}} \right] C_{apk} + \sum_{l=1}^j C_{pil} - (t - t).$$

式中 $[x]$ 表示小于等于 x 的最大整数. 由于任务集 S_H 在调度算法 1 下是可调度的, 根据定义 5 可得

$$R_{pij} = \sum_{k=1, k \neq i}^n \left[\frac{t + T_{pi} - T_{pk} - t}{T_{pk}} \right] C_{pk} + \left\{ \left[\frac{t - t}{T_i} \right] - 1 \right\} C_{pi} + \sum_{k=1}^m \left[\frac{t + T_{pi} - T_{apk}^{min} - t}{T_{apk}^{min}} \right] C_{apk} + C_{pi} - (t - t) - \sum_{l=j+1}^{m_i} C_{pil} \\ R_{pi} - \sum_{l=j+1}^{m_i} C_{pil} - T_{pi} - \sum_{l=j+1}^{m_i} C_{pil} = D_{pij}$$

这说明子任务 τ_{pij} 是可调度的

由定义 6 可知, 对于任务模型定义 5, Dd_i 为子任务 τ_{pil_i} 的响应时间; 而对于任务模型定义 1, 它是任务 τ_{pi} 的响应时间. 根据定理 4 的证明, 有如下结论:

推论 1 采用调度算法 2 时的控制延时比采用调度算法 1 时的小

证明略



6 计算机模拟

假设系统中存在3个周期性任务和两个非周期任务,它们的参数见表1和表2表中时间单位为ms,仿真时间为1000s采用调度算法1时,仿真结果(平均控制延时) $Dd_1 = 22, Dd_2 = 102, Dd_3 = 356$ 处理器利用率为 $\sum_{i=1}^n C_{pi}^{max} f_{pi}^{min} + \sum_{i=1}^m C_{api}/T_{api}^{min} = 0.6333 < 1$, 周期任务的采样频率可以优化通过计算得出周期任务频率分别为: $f_{p1}^{opt} = 8.56, f_{p2}^{opt} = 8.76, f_{p3}^{opt} = 8.82$ 采用调度算法1得到仿真结果为 $Dd_1 = 41, Dd_2 = 73, Dd_3 = 45$. 设只有子任务 τ_{p1} 和 τ_{p2} 与控制延时有关,采用调度算法2,仿真结果为 $Dd_1 = 36, Dd_2 = 68, Dd_3 = 35$ 显然采用调度算法2时,任务的控制延时降低且采样频率增加,因此控制系统的性能得到了改善

表1 周期性任务的参数

Task	C_{pi}	C_{pi}^{max}	f_{pi}^{min}	C_{p1i}	C_{p2i}	C_{p3i}
τ_{p1}	20	25	5	5	10	5
τ_{p2}	25	30	4	8	12	5
τ_{p3}	35	44	2	10	15	10

Task	C_{p1i}^{max}	C_{p2i}^{max}	C_{p3i}^{max}	w_{pi}	α_{pi}	β_{pi}
τ_{p1}	8	12	5	1	2	10
τ_{p2}	10	15	5	2	2	10
τ_{p3}	12	20	12	3	2	10

表2 非周期任务的参数

Task	C_{api}	T_{api}^{min}	λ_i
τ_{ap1}	20	200	2
τ_{ap2}	30	150	4

7 结 语

本文在分析控制系统特点的基础上,给出了任务模型基于此提出了带有非周期服务器的抢占式EDF调度算法,分析了任务集的可调度性,给出了可调度条件.由于控制系统的性能受采样频率和控制延时的影响,本文给出了系统性能优化的调度算法引入主优先级和辅助优先级的概念及子任务模型,提出了优化采样频率的计算方法和基于双优先级的任务优化调度算法.仿真结果说明本文给出的任务模型和调度算法能够降低控制延时和提高采样频率,从而提高了控制系统的性能

参考文献(References)

[1] Liu C L, Layland J W. Scheduling algorithms for multiprogramming in hard real-time environment[J]. *J of Association for Computing Machinery*, 1973, 20(1): 46-61.

[2] Audsley N C, Burns A, Richardson M F, et al. Deadline monotonic scheduling[A]. *The 8th Workshop on Real-time Operating Systems and Software* [C]. Atlanta, 1991.

[3] Lehoczky J P, Sha L, Strosnider J K. Enhanced aperiodic responsiveness in hard real-time environments[A]. *Proc of Real-time Systems Symposium* [C]. San Jose, 1987: 261-270.

[4] Speunt B, Sha L, Lehoczky J. Aperiodic task scheduling for hard-real-time system [J]. *J of Real-time Systems*, 1989, 3(1): 27-60.

[5] Mok A K. Fundamental design problems of distributed systems for hard-real-time environment[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1983.

[6] Marco Spuri, Giorgio Buttazzo. Scheduling aperiodic tasks in dynamic priority systems[J]. *Real-time Systems J*, 1996, 10(1): 179-210.

[7] Seto D, Lehoczky J P, Sha L, et al. On task schedulability in real-time control system[A]. *Proc of IEEE Real-time Systems Symposium* [C]. Washington, 1996: 13-21.

[8] Cervin A. Improved scheduling of control tasks[A]. *Proc of the 11th Euramicro Conf on Real-time Systems* [C]. York, 1999: 4-10.

[9] Marco Caccamo, Giorgio Buttazzo, Lui Sha. Elastic feedback control[A]. *The 12th Euramicro Conf on Real-time Systems* [C]. Stockholm, 2000: 121-128.

[10] Buttazzo G C, Lipari G, Abeni L. Elastic task model for adaptive rate control[A]. *Proc of the 19th IEEE Real-time Systems Symposium* [C]. Madrid, 1998: 286-295.

[11] Chetto H, Chetto M. Some results of the earliest deadline scheduling algorithm [J]. *IEEE Trans on Software Engineering*, 1989, 15(10): 1261-1269.

[12] Byung Kook Kim. Task scheduling with feedback latency for real-time control systems[A]. *The 5th Int Conf on Real-time Computing Systems and Applications Proc* [C]. Hiroshima, 1998: 37-41.