

基于 GA 的控制系统中实时任务的优化调度

刘 怀¹, 谢东风², 刘 宁³, 黄建新¹

(1 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042; 2 云南省烟草公司, 云南 昆明 650011;
3 东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

[摘要] 控制系统中任务的调度不仅影响系统的资源利用率, 而且影响系统的控制性能, 是控制系统设计和实现的关键技术之一。首先分析了周期性实时任务, 并给出了任务模型。基于此, 采用了 EDF 调度算法, 给出了任务的可调度性条件。根据系统的性能指标与任务的采样周期和控制延迟之间的关系, 对系统性能进行优化。由于采样周期和控制延迟之间存在相互影响, 为此采用了浮点数编码的遗传算法对采样周期进行优化, 以提高系统的性能。为了加快收敛速度和不陷入局部极值, 采用了排序选择算法、算术交叉算子和非一致变异算子。仿真结果表明, 通过采用遗传算法, 在保证系统中任务实时性的条件下, 可以显著地提高系统的性能指标。

[关键词] 控制系统, 调度算法, 遗传算法, 采样周期, 控制延迟

[中图分类号] TP301.6 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2007)04-0013-05

Optimal Scheduling for Real-time Tasks in Control Systems Based On GA

Liu Hua¹, Xie Dongfeng², Liu Ning³, Huang Jianxin¹

(1 School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China
2 Yunnan Tobacco Corp, Kunming 650011, China
3 Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Task scheduling in the control system influences not only the resource utilization of the system, but also the control performance of the system, and thus is one of the key techniques for designing and realizing the system. Firstly, real-time periodic task is investigated and task model is given. Based on these, EDF algorithm is adopted to schedule this kind of task and schedulable condition is prevented. According to the relationship of the performance of control system and sampling periods and control delays of tasks, the performance is optimized. Because sampling periods and control delays have influences on each other, genetic algorithm based on floating-point coding is adopted to optimize sampling period so as to improve the performance of the system. In order to converge to global optimum more quickly and not to plunge a local extremum, rank-based selection algorithm and arithmetic crossover operator and non-uniform mutation operator are adopted. Simulation results indicate that the performance index of control system can be improved obviously by adopting genetic algorithm under the condition of guaranteeing the real-time of the tasks in the system.

Key words control system, scheduling algorithm, genetic algorithms, sampling period, control delay

0 引言

实时控制系统是运行于计算机系统上, 主要完成数据采集、控制计算、控制输出及报警等功能实时系统。为了充分利用处理器资源, 减少系统的软硬件投资, 往往在一个处理器上处理多个回路。但系统中的任务必须在一定的时间内完成, 否则会出现灾难性后果^[1], 这就涉及了实时多任务的调度问题。

针对实时任务的调度算法, Liu 和 Layland^[2]给出了著名的速率单调调度算法 (Rate Monotonic Schedu-

收稿日期: 2007-01-27

基金项目: 南京师范大学青年科学基金 (200411XQNBDQ41)资助项目。

作者简介: 刘 怀 (1971-), 副教授, 博士后, 主要从事实时控制系统、综合自动化系统以及智能控制等方面的教学与研究。

E-mail: Lihua@njnu.edu.cn

ing RMS)和最早截止期优先调度算法 (Earliest Deadline First EDF), 这两种算法都是针对周期性任务的调度算法. 对于数字控制系统, 其结构形式一般考虑为如图 1 所示的形式^[3], 系统以一个固定的频率通过 A/D 转换器从物理过程获得测量数据, 经控制计算得出控制量, 再通过 D/A 转换器将控制信号送到被控对象.

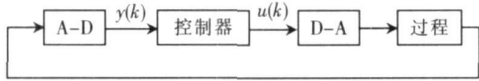


图 1 控制系统的结构
Fig.1 The structure of control system

由于控制系统的性能与控制系统的采样周期和控制延迟有关^[3 4], 因此出现了结合对系统性能进行优化的调度算法. 文献 [4]给出了计算优化采样频率的方法; 文献 [5]给出了使系统性能优化的动态调度算法; 文献 [6]为了加快控制信号的输出和降低控制延时, 给出了周期性任务的分解模型和调度算法. 但是这些优化调度算法都是对采样周期 (频率) 的优化, 或者是对采样周期和频率单独进行优化, 没有考虑二者之间的联系. 基于此, 本文对控制系统设计调度算法, 并基于遗传算法对采样周期和控制延迟进行优化, 从而改善系统的性能.

1 任务模型

图 1 实际上表示的只是一个控制回路, 根据系统的需要它要完成多种功能, 各功能之间既相互联系、相互影响又相互独立, 所以可将其作为一个任务. 另外系统的采样周期 (采样频率) 并非固定不变的, 可以在一定范围内变化. 在保证控制回路稳定的前提下, 根据系统的动态、静态性能指标要求以及对象的数学模型可以确定回路的采样周期^[7]. 这一采样周期为其最大值, 是必须予以保证的, 记为 T_i^{max} , 而为了保证系统的正常运行, 系统的采样周期存在最小值 (如必须大于该控制回路的采样、控制计算和控制输出的执行时间), 记为 T_i^{min} .

在控制系统中, 一般来说当控制算法、数据采集和控制输出的方法确定后各任务的执行时间是确定的.

基于以上分析, 本文给出控制系统的周期性任务模型如下:

定义 1 一个控制系统中的任务集可表示为 $S = \{ \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n \}$, 其中 $n \geq 1$; τ_i 为一个回路任务, 可表示为如下的形式:

$$\tau_i = \langle C_i, T_i^{max}, T_i^{min}, T_i, D_i \rangle \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{1}$$

式中, $C_i, T_i^{max}, T_i^{min}, T_i, D_i$ 分别为任务的执行时间、最大的采样周期、最小采样周期、采样周期和任务时限.

控制系统中除了回路任务外, 还存在诸如报警等非周期任务. 这类任务只要在一一定的时间内调度完成即可, 故可通过给非周期任务预留一定的处理器资源来实现对其调度, 如采用带非周期服务器的调度算法^[7], 因此本文主要研究回路任务的优化调度算法.

为了分析和设计调度算法的方便, 本文做如下假设:

- (1) 回路任务之间相互独立;
- (2) 回路任务时限等于周期;
- (3) 所有回路任务不存在释放抖动, 即任务到达就释放;
- (4) 所有的任务在同一处理器上完成.

定义 2 控制延迟为控制回路中由传感器采集数据, 经控制计算, 然后将控制信号送到被控对象所需要的时间, 用 L_i 表示.

定义 3 若所有回路任务的子任务的所有实例都能在其时限前完成, 则称任务集 S 是可调度的.

2 调度算法及优化

由任务模型可知, 控制系统中的任务均为周期性任务, 故可采用 Liu 和 Layland^[2] 给出的 RMS 算法和 EDF 算法. 考虑到 EDF 可以获得更高的处理器利用率, 本文采用抢占式 EDF 调度算法. 由文献 [2]可知,

EDF 调度算法的可调度条件如下:

引理 1 对于周期性任务集, 采用抢占式 EDF 算法, 当且仅当

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq 1 \quad (2)$$

时, 任务集是可调度的.

根据 Kim Byung Kook^[3] 的研究知, 控制系统的性能与采样周期和控制延迟有关, 它们与控制系统的二次性能指标存在如下关系:

$$J_i = c_i e^{(aT_i + bL_i)}, \quad (3)$$

式中, c_i , a_i , b_i 为常数, 可通过控制算法曲线获得. 由文献 [3-4] 可知, J_i 越小系统性能越好.

然而控制延迟是受采样周期影响的, 当采样周期小时, 系统的利用率高, 显然根据调度算法, 任务的响应时间增加, 即控制延迟增大, 反之亦然, 但它们之间不存在显式表达式, 只能通过仿真确定 (仿真时间要足够长). 当前的优化调度算法^[3-6] 或是只考虑了采样周期 (频率), 或是将采样周期和控制延迟分开独立优化. 由于控制延迟与采样周期的关系不存在显示函数关系, 采用搜索算法又存在精度问题, 遗传算法是一类模拟自然过程, 特别是模拟生物界自然进化和遗传过程的随机搜索算法, 具有在复杂空间求解问题近似最优解的能力^[8-9], 所以本文采用遗传算法对调度算法进行优化. 由式 (3) 可知, 减小采样周期和控制延迟有利于减小 J_i , 即提高系统性能. 由于各控制回路重要性不尽相同, 结合前面任务的可调度性和采样周期的取值范围, 则优化问题为:

$$\min_{(T_1, \dots, T_n)} J(T) = \sum_{i=1}^n w_i J_i(T_i) = \sum_{i=1}^n w_i c_i e^{(aT_i + bL_i)}, \quad (4)$$

约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq 1 \\ T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

显然, 当 $\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i^{\max}} = 1$ 时, 刚好满足可调度条件, 只能选择 T_i^{\max} 作为各回路任务的采样周期, 不存在优化问题. 只有当 $\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i^{\max}} < 1$ 时, 才存在优化问题. 而利用凝聚函数法, 并通过准精确惩罚函数^[10], 去掉约束条件 (5) 式中的不等式部分, 使得优化问题变为:

$$f(T) = J + p \ln \left[\left(1 + \exp \left[\max \left\{ 0, \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} - 1 \right\} \right] \right) \right] / 2. \quad (6)$$

式中, p 为正常数, 用于调整对不合法个体的惩罚程度, 这样保证个体合法时 $f(T) = J$. 则约束条件化为:

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

下面采用遗传算法通过优化采样周期来优化系统的性能指标:

(1) 个体编码

对于有 n 个任务的控制系统, 个体采用浮点数向量方式对采样周期 T_i 进行编码, 即每个基因个体为向量 $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T$, 其中每个分量 T_i 表示任务 T_i 的周期, 为十进制的浮点数且 $T_i \in [T_i^{\min}, T_i^{\max}]$ 以满足约束条件 (7).

(2) 群体初始化

首先确定种群的规模 M , 就是确定产生的基因个体的数目. 每个个体随机产生, 即基因个体中的每个分量 T_i 为 $[T_i^{\min}, T_i^{\max}]$ 上的随机数.

(3) 选择操作

采用选择操作实现从当前群体中选出优良个体, 决定哪些个体可以进入下一代. 本文采用排序选择和轮盘选择相结合的策略, 首先将个体按照目标函数由小到大的顺序排序, 并将其中的前 m 个个体直接复制为新一代个体, 将剩余的个体按序号计算适应度, 计算方法如下^[11]:

$$P(T) = \left[m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min}) \frac{(n - \text{Rank}(T))}{n - 1} \right] / n, \quad (8)$$

式中, M 为群体规模, $\text{Rank}(T)$ 为个体 T 排序后的序号, $\text{min} + \text{max} = 2$ 且 $\text{max} \in \{1, 5, 2\}$. 这样便于提高个体的适应能力并保证一定的选择压力.

(4) 交叉和变异运算

交叉选择浮点数交叉策略, 即:

$$\begin{aligned} X' &= rX + (1-r)Y \\ Y' &= rY + (1-r)X, \end{aligned}$$

(9)

式中, r 为区间 $[0, 1]$ 上的随机数, X, Y 为父代个体, X', Y' 是由父代个体 X, Y 通过交叉操作生成的新个体.

本文采用非一致变异算法, 对于个体 T , 若个体中的 T_i 分量被选择变异, 则

$$T'_i = \begin{cases} T_i + \Delta(G, T_i^{\text{max}} - T_i) & \text{rand}(0, 1) = 0 \\ T_i - \Delta(G, T_i - T_i^{\text{min}}) & \text{rand}(0, 1) = 1 \end{cases}$$

(10)

$$\Delta(G, y) = y \left[1 - \frac{G}{G_{\text{max}}} \right]^b.$$

(11)

式中, G, G_{max} 分别为当前演化代数和最大演化代数; b 为决定非均匀度的系统参数; r 为区间 $[0, 1]$ 上的随机数. $\Delta(G, y)$ 为区间 $[0, y]$ 里的一个值, $\Delta(G, y)$ 靠近 0 的概率随代数 G 的增加而增加.

定理 1 本文的交叉算法和变异算法可保证新产生的个体的合法性.

证明 对于交叉策略: 对于新个体中的每一个分量 T'_{iX} , 由于其父个体对应的分量为 T_X 和 T_{iY} 均属于区间 $[T_i^{\text{min}}, T_i^{\text{max}}]$, 显然有 $T_i^{\text{min}} \leq T'_{iX} \leq T_i^{\text{max}}$ 和 $(1-r)T_i^{\text{min}} \leq (1-r)T_{iY} \leq (1-r)T_i^{\text{max}}$, 所以有 $T_i^{\text{min}} \leq T'_{iX} \leq T_i^{\text{max}}$. 所以新个体 X' 合法. 同样可证明新个体 Y' 合法.

对于变异策略: 因为 $\left[1 - \frac{G}{G_{\text{max}}} \right]^b \leq 1$, 所以 $\Delta(G, y) \leq y$. 当 $\text{rand}(0, 1) = 0$ 时, $\Delta(G, T_i^{\text{max}} - T_i) \leq T_i^{\text{max}} - T_i$, 故 $T_i^{\text{min}} \leq T_i \leq T_i + \Delta(G, T_i^{\text{max}} - T_i) \leq T_i^{\text{max}}$, 同样当 $\text{rand}(0, 1) = 1$ 时, $\Delta(G, T_i - T_i^{\text{min}}) \leq T_i - T_i^{\text{min}}$, 故 $T_i^{\text{max}} \geq T_i \geq T_i - \Delta(G, T_i - T_i^{\text{min}}) \geq T_i^{\text{min}}$. 所以新个体合法.

3 仿真

针对前述调度算法和遗传优化算法进行仿真, 验证算法的性能. 随机产生 10 个任务, 各任务的参数如表 1 所示.

仿真中选择 $a_i = 0.005$, $b_i = 0.001$ 和 $c_i = 1.0$ 用于计算目标函数, 惩罚系数为 $p = 0.2$ 对不合法的个体进行动态惩罚. 遗传算法中的交叉概率为 $P_c = 0.9$, 变异概率为 $P_m = 0.12$, 进化代数为 200 代, 群体规模为 100 个. 为计算目标函数时, 需要参数控制延迟和采样周期, 其中采样周期是每个个体的分量; 对于控制延迟, 本文设为任务的响应时间, 得到的方法是通过选择一个仿真时间 ($\text{SimulationTime} \gg T_i$, 本文取 $\text{SimulationTime} = 2\,000\,000$), 对每个个体按 EDF 调度算法进行仿真, 并求取每个任务的平均响应时间作为该任务的控制延迟. 所有的结果数据为在相同参数下仿真 10 次的平均值, 这样便于消除随机影响, 得到的目标函数和进化代数之间的关系如图 2 所示.

由图 2 可见, 随着进化代数的变化, 目标函数逐渐降低, 并最终收敛于一个最小值, 这一最小值为最初目标函数的 0.5 左右, 说明采用遗传算法可以使目标函数大大降低, 即使系统的性能得到极大地优化, 进而得到使目标

表 1 任务及其参数时间

Table 1 Tasks and their parameters				
任务号	最大周期	最小周期	任务权重	执行时间
1	960	580	0.011 323 422	83
2	960	580	0.004 409 164	63
3	940	560	0.188 103 951	69
4	890	530	0.121 538 351	55
5	1000	600	0.077 178 635	67
6	980	590	0.322 821 365	65
7	990	590	0.278 461 649	63
8	940	560	0.211 896 049	59
9	910	550	0.395 590 836	55
10	980	590	0.388 676 578	70

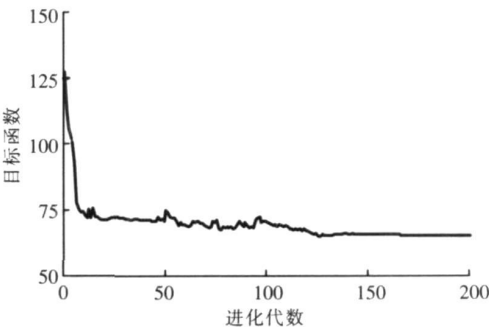


图 2 目标函数和进化代数之间的关系

Fig.2 The relationship of goal function and the number of evolution generation

函数优化的采样周期和此时的平均控制延迟, 如表 2 所示.

表 2 采样周期和控制延迟的最佳值

Table 2 The optimal value of sampling periods and control delays

任务序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
采样周期	652. 59	877. 69	659. 80	614. 77	777. 79	673. 86	650. 54	703. 62	567. 29	697. 13
控制延迟	149. 25	303. 18	129. 20	91. 43	227. 49	136. 80	118. 15	157. 97	71. 07	159. 38

由优化的采样周期和任务的执行时间可得 $\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} = 0.9463 < 1$ 满足可调度性要求, 但处理器的利用率没有达到 1, 即采样周期没有达到最小值. 因为处理器的利用率达到 1 时仅是采样周期最优, 而此时任务被抢占的概率增加, 从而使任务的控制延迟必然增加, 造成系统的性能指标降低, 因而最优的性能指标必然是较小的采样周期和较小的控制延迟的结合. 这说明本文给出的优化方法是有效的.

4 结论

本文首先分析了控制系统中的周期性实时任务, 给出周期性任务模型, 基于此采用了著名的 EDF 调度算法调度任务, 并给出了任务的可调度性条件. 考虑到系统的性能指标与任务的采样周期和控制延迟有关, 而采样周期和控制延迟之间相互影响, 但无法用显示表达式表示, 因此采用遗传算法对采样周期进行优化, 以获得最佳的系统性能. 在保证任务实时性的基础上, 给出了优化采样周期的具体的遗传算法和目标函数. 仿真结果表明, 本文提出的优化调度算法可以显著地提高系统的性能指标.

[参考文献] (References)

[1] 刘怀, 沈捷, 费树岷. 用双优先级算法调度控制系统的实时周期性任务 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(2): 190-193.
Liu Huai, Shen Jie, Fei Shum in. Scheduling real-time periodic task of control system with dual priority algorithm [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(2): 190-193 (in Chinese)

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

[3] Kim Byung Kook. Task scheduling with feedback latency for real-time control systems [C] // The 5th International Conference on Real-Time Computing Systems and Applications Proceedings. Los Alamitos, CA: IEEE Press, 1998, 37-41

[4] Seto D, Lehoczky J P, Sha L, et al. On task schedulability in real-time control system [C] // The Proceedings of the 17th IEEE Real-Time Systems Symposium. Washington DC, USA: IEEE Computer Society Press, 1996, 13-21

[5] 刘怀, 费树岷. 控制系统中实时任务的动态优化调度算法 [J]. 控制与决策, 2005, 20(3): 246-250
Liu Huai, Fei Shum in. Optimal dynamic scheduling algorithm for real-time tasks in digital control systems [J]. Control and Decision, 2005, 20(3): 246-250 (in Chinese)

[6] Cervin A. Improved scheduling of control tasks [C] // Proceedings of the 11th European Conference on Real-Time Systems. York, England: IEEE Computer Society Press, 1999, 4-10

[7] 马善凯. 选择采样周期的一种新方法 [J]. 自动化学报, 1995, 21(4): 481-486
Ma Shankai. A new method of selecting sampling period [J]. Acta Automatica Sinica, 1995, 21(4): 481-486 (in Chinese)

[8] 钟求喜, 谢涛, 陈火旺. 基于遗传算法的任务分配与调度 [J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(10): 1197-1203
Zhong Q iux i, X ietao, Chen huowang. Task matching and scheduling by using genetic algorithm [J]. Journal of Computer Research and Development, 2000, 37(10): 1197-1203 (in Chinese)

[9] 刘清. 多点正交交叉的遗传算法研究 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2005, 5(2): 481-486
Liu Qing. Research on genetic algorithm with multi-point orthogonal crossover operation [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2005, 5(2): 481-486 (in Chinese)

[10] 李纯莲, 王希诚, 赵金城. 基于浮点数编码的信息熵控制多种群遗传算法 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2004, 28(5): 453-456
Li Chunlian, Wang Xicheng, Zhao Jincheng. Multi-population genetic algorithm controlled by information entropy based on floating-point coding [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2004, 28(5): 453-456 (in Chinese)

[11] 张彤, 张华, 王子才. 浮点数编码的遗传算法及其应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(4): 59-61
Zhang Tong, Zhang Hua, Wang Zicai. Float encoding genetic algorithm and its application [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(4): 59-61 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]