

# 面向控制流密集型电路的高层次低功耗方法\*

孙 强, 樊持杰, 司巧梅

(牡丹江师范学院 计算机科学与技术系, 黑龙江 牡丹江 157012)

**摘要:** 通过对控制流密集型电路的分析和研究, 提出一种面向控制流密集型电路的高层次低功耗综合方法。在调度过程中, 应用分支控制和多电压两种方法对设计电路功耗进行双重优化。实验结果表明, 在相同的时间和资源约束下, 该方法比单独应用分支控制的调度方法功耗平均降低 19.04%, 比单独应用多电压的调度方法功耗平均降低 5.74%。

**关键词:** 高层次综合; 低功耗; 分支控制; 多电压

中图分类号: TP302.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)08-3027-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.08.057

## High-level low power method for control flow intensive circuit

SUN Qiang, FAN Chi-jie, SI Qiao-mei

(Dept. of Computer Science & Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang Heilongjiang 157012, China)

**Abstract:** This paper proposed a high-level low power synthesis method for control flow intensive circuit based on the analysis and study of control flow intensive circuit. The combination of branch control and multiple voltages could be used to realize double-optimization of power consumption of design circuits in the procedure of scheduling. Experimental results show that the combined use of the two methods has reduced power consumption averagely by 19.04% and 5.74%, compar respectively with the separate use of branch control and multiple supply voltages, in the same time and resource constraint.

**Key words:** high-level synthesis; low power; branch control; multiple voltages

集成电路的集成度和时钟频率不断提高, 使得功耗问题日渐突出<sup>[1]</sup>。当前许多研究表明高层次设计能够最大程度地实现功耗优化, 这是因为它对算法和架构的选择自由度高。国内外对于高层次功耗优化问题有很多的研究, 文献[2]通过提前调度控制单元, 关闭不需要执行的条件分支来降低功耗。文献[3]通过分支控制功耗管理方法, 调度过程根据条件分支优先级选择关闭分支, 实现功耗优化。文献[4]通过调度和互连两种手段来降低功耗。文献[5]通过划分并行操作集合的方法来最大化地降低功耗。文献[6,7]采用多电压方法来降低功耗。

现存的高层次低功耗方法大多应用于数据流密集型电路, 而对控制密集型电路则少有论述, 相关低功耗方法报道也比较少, 对于控制占主导的电路设计也需要相关的功耗优化方法。本文通过对控制流密集型电路特点的分析和研究, 提出了一种面向控制流密集设计的高层次低功耗调度方法。首先运用文献[2,3]提出的分支功耗管理, 在控制节点与传递扇入节点之间建立新的控制边, 避免不必要的条件分支执行, 实现功耗的优化; 然后运用文献[4~7]中的多电压调度方法对控制数据流图中灵活性不为零的节点进行再调度, 实现功耗的进一步优化。

### 1 术语及符号表示

#### 1.1 CMOS 电路功耗的主要来源

开关功耗占整个电路功耗的 80% 以上, 低功耗设计应主

要考虑开关功耗。计算公式为

$$P_D = C_{eff} V_{dd}^2 f \quad (1)$$

其中:  $f$  为时钟频率;  $C_{eff}$  为有效开关电容;  $V_{dd}$  为供应电压。

#### 1.2 问题表示及概念定义

**定义 1** 控制数据流图(control data flow graph, CDFG)。该图是一个有向无环图  $G = (V, E)$ 。其中:  $V$  是节点集合,  $E$  是边集合。每个节点表示一个操作, 节点  $v_i$  到  $v_j$  的边表示  $v_i$  先于  $v_j$  执行。

**定义 2** 时间约束(time constraint, Tc)。它是指系统中所给定的控制步数最大限制。一般系统要求在给定控制步内必须完成所有操作。

**定义 3** 资源约束(resource constraint, Rc)。它是在每一控制步内, 允许同时执行同类操作的个数。本文将不同电压下同种类型的操作视为不同操作。

**定义 4** 尽可能早调度方法(as-soon-as-possible, ASAP)。在不考虑资源约束条件下, 操作节点  $v_i$  可以开始执行的最早时间称为该操作的最早控制步。用  $ASAP(v_i)$  表示为

$$ASAP(v_i) = \begin{cases} \max_{v_i \in V_{pre}} \{ASAP(v_i) + D(v_i)\} & \text{if } V_{pre} \neq \emptyset \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $D(v_i)$  是  $v_i$  的延迟时间,  $V_{pre}$  是操作节点  $v_i$  的直接前驱。

**定义 5** 尽可能晚调度方法(as-late-as-possible, ALAP)。在最大控制步下, 不考虑资源约束, 操作节点  $v_i$  可以开始执行

收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-02-24 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60273081); 黑龙江省教育厅科学技术研究面上项目(11551512, 11551513); 牡丹江师范学院博士科研启动基金资助项目(MSB200901); 牡丹江师范学院青年专项基金创新项目(QC200901); 牡丹江师范学院教学改革工程项目(10-XY01056)

作者简介: 孙强(1979-), 男, 副教授, 博士, CCF 会员, 主要研究方向为电子设计自动化、组合优化、NP 难问题求解算法等(sq143@126.com).

的最迟时间称为该操作的最迟控制步。用  $ALAP(v_i)$  表示为

$$ALAP(v_i) = \begin{cases} \max_{v_j \in V_{suc}} \{ASAP(v_j) - D(v_i)\} & \text{if } M_{step} \neq \emptyset \\ M_{step} - D(v_i) + 1 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $M_{step}$  是所需要的最大控制步数目约束条件,  $M_{step}$  是操作节点  $v_i$  的直接后续集。

**定义 6** 控制节点的目标 ( $M_i$ ) 及目标的传递扇入集合 ( $F_i$ )。假设 CDFG 所有条件都被表示成一个多路选择器节点, 进入多路选择器的控制输入边对应一个控制关系, 控制输入边的直接扇出称为控制节点, 多路选择器称为该控制节点的目标。对于给定的 CDFG:  $G = (V, E)$ ,  $V_c \subset V$ , 为控制节点的集合。  $V_c = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ ,  $C_i$  为第  $i$  个控制节点,  $C_i$  的目标为  $M_i$ 。目标  $M_i$  输入的传递扇入节点集合为  $F_i$ 。每个节点  $v \in F_i$ , 执行时的功耗值称为该节点的权值  $W_v$ 。

## 2 基于分支控制的功耗管理调度

分支控制的功耗管理调度方法最早是由 Monteiro 等人<sup>[2]</sup>提出的。该方法对控制数据流图中控制节点进行调度调整, 使它在所控制的多路选择器传递扇入节点之前执行, 并在控制节点与传递扇入节点之间建立新的控制边, 避免不必要的条件分支执行, 达到功耗节省的目的。

### 2.1 分支控制功耗管理对节点灵活度的影响

功耗管理过程需要在 CDFG 中添加额外的控制边, 这样有可能降低设计电路的性能或者需要更多的资源。添加控制边的 CDFG 在调度完成之后是满足时间约束的, 当且仅当所有节点的灵活度非负, 即  $Mobility(v) \geq 0, \forall v \in V$ 。

一般来说, 当在控制节点  $C_i$  与传递扇入节点  $v_j$  建立控制边后, 由于节点  $v_j$  和其传递扇出的 ASAP 值有可能增大, 会导致其灵活度降低; 同样, 由于控制节点  $C_i$  与其传递扇入 ALAP 值有可能减小, 会导致其灵活度降低。

### 2.2 分支控制功耗管理对控制节点的选择

分支控制功耗管理调度方法对控制节点的选择非常重要。图 1 是一个有两个多路选择器和两个控制节点的 CDFG, 时间约束是五个控制步。由于控制步约束, 不能同时调度两个控制节点, 使它们都能与相应的操作节点建立控制边。存在两种调度结果: 图 1(a) 在控制节点  $C_1$  与两个乘法操作之间添加控制边; (b) 在控制节点  $C_2$  与两个加法操作之间添加控制边。由于乘法功耗比加法功耗大, 图 1(a) 的调度结果对功耗节省是最好的选择。通过上述例子可以看出, 由于时间约束, 不能将 CDFG 中所有的控制节点与多路选择器的传递扇入建立控制边, 只有选择功耗节省权值高的操作节点, 才能保证功耗节省的最大化。

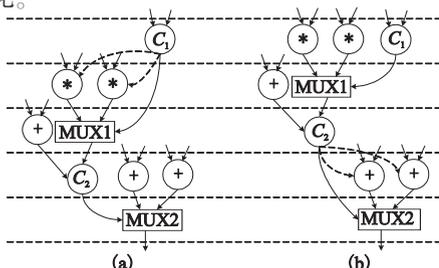


图1 CDFG选择不同控制节点的调度结果

另外, 添加控制边时, 控制节点的传递扇入节点和目标的传递扇出节点的灵活度都会降低, 称为灵活度费用。因

此, 基于分支控制功耗管理调度过程的策略是: 调度过程要用最小的灵活度费用, 得到最大的功耗优化。通过分析可以看出, 节点的权值和目标灵活度对功耗优化影响巨大。为了全面考虑影响节点功耗的各种因素, 本文采用由目标的平均权值和目标灵活度组成的优先级函数作为控制节点选择的依据<sup>[3]</sup>。

**定义 7** 目标的平均权值 ( $AW_i$ )。该值是目标  $M_i$  所有 0 和 1 输入的传递扇入节点权值的平均值。计算公式为

$$AW_i = \frac{\sum_{v \in F_i} W_v}{|F_i|} \quad (4)$$

**定义 8** 目标的灵活度 ( $Mobility(M_i)$ )。该灵活度是用来衡量当调度控制节点与其目标的传递扇入之间建立控制边时, 导致的灵活度损失的大小。计算公式为

$$Mobility(M_i) = ASAP(M_i) + ALAP(M_i) - ASAP(C_i) - ALAP(C_i) \quad (5)$$

目标  $M_i$  对应的优先级  $PR_i$  的计算公式为

$$PR_i = n \times AW_i + m \times Mobility(M_i) \quad (6)$$

其中:  $n$  和  $m$  为系数,  $AW_i$  和  $Mobility(M_i)$  由式(4)和(5)定义。

### 2.3 基于分支控制功耗管理调度技术的算法描述

本节给出基于分支控制功耗管理调度技术的算法, 其描述如下:

a) 输入为 CDFG 及调度的时间约束  $T_c$  和资源约束  $R_c$ 。

b) 求出 CDFG 中每个节点的 ASAP、ALAP 和灵活度值并保存。

c) 求解未被处理的控制节点  $C_i$  的目标  $M_i$  输入的传递扇入集合  $F_i$ ; 然后求得传递扇入集合的平均权值作为目标  $M_i$  的权值; 再求得  $M_i$  灵活度费用; 最后通过系数将两个值组合相加作为  $M_i$  调度的优先值。在所有控制节点中选取其目标  $M$  的优先值最大的控制节点  $C_{max}$ 。

d) 在时间和资源约束下, 对  $C_{max}$  进行调度, 添加控制边, 获得最大的功耗优化。

e) 如果  $C_{max}$  调度结果不违反时间和资源约束, 保存控制节点的调度和添加的控制边, 并标记该控制节点已被处理完毕, 还有未被处理的控制节点返回步骤 b); 否则结束程序。

## 3 基于多电压的调度

由于供应电压和动态功耗成二次平方关系, 降低供应电压是最有效的功耗优化方法, 多电压调度在高层次综合功耗优化中广泛应用。从图 1 中可以看到, 关键路径上的节点没有灵活度, 但非关键路径上的节点还是有较大的灵活度。现在对图 1 中的非关键路径上的节点进行多电压调度, 结果如图 2 所示。从这个例子可以看出, 对进行了基于分支控制功耗管理方法以后的设计, 再进行基于多电压的调度仍然可以进一步优化功耗。

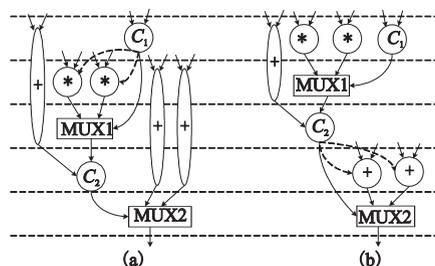


图2 CDFG采用多电压调度的结果

### 3.1 基于多电压调度的节点选择

本文基于多电压的调度是针对完成基于分支控制功耗管理调度完成的 CDFG 进行的,在保证不违反基于分支控制功耗管理调度结果的基础上开展的功耗再优化过程。与基于分支控制功耗管理方法类似,基于多电压的调度也会引起灵活度费用。所以,多电压调度过程要解决的问题就是:在时间和资源约束下,如何分配节点的供应电压,使调度结果功耗最小。其中最基本的问题就是:如何选择重新调度的候选节点。通过分析发现,节点的灵活度、能耗延迟增量比率和疏密度对多电压调度节点选择和功耗优化有很大影响。所以,本文在节点选择过程中采用综合考虑上述三个因素的增益度函数作为节点选择的优先级函数。

**定义 9** 节点的灵活度(Mobility( $v$ ))。节点 ALAP 时间与 ASAP 时间差。计算公式为

$$\text{Mobility}(v) = \text{ALAP}(v) - \text{ASAP}(v) \quad (7)$$

**定义 10** 疏密度(Density( $v$ ))。它是指操作在调度过程中的平均利用率。计算公式为

$$\text{Density}(v) = \frac{\text{Length}(\text{CDFG}) - \text{Mobility}(v)}{\text{Length}(\text{CDFG})} \quad (8)$$

其中:Length(CDFG)是 CDFG 中关键路径的长度,Mobility( $v$ )为节点  $v$  的灵活度值。

**定义 11** 能耗延迟增量比率(energy-delay increment rate, ED( $v$ ))。它是指 CDFG 中的节点电压改变前后,能耗增量和延迟增量的比率。计算公式为

$$ED(v) = \frac{E(v, V_{\text{new}}) - E(v, V_{\text{old}})}{D(v, V_{\text{old}}) - D(v, V_{\text{new}})} \quad (9)$$

其中: $E$ 为节点  $v$  的能耗; $D$ 为节点  $v$  的延迟; $V_{\text{new}}$ 为改变后的电压; $V_{\text{old}}$ 为改变前的电压。

**定义 12** 增益度(Gain( $v$ ))。它是衡量节点优先度的一个综合指标。计算公式为

$$\text{Gain}(v) = a \times ED(v) + b \times \text{Mobility}(v) + c \times \text{Density}(v) \quad (10)$$

其中: $a$ 、 $b$ 和  $c$ 为系数;Mobility( $v$ )为节点  $v$  的灵活度;ED( $v$ )为节点  $v$  的能耗延迟增量比率;Density( $v$ )为节点  $v$  的疏密度。

### 3.2 基于多电压调度方法描述

本文提出了一种启发式的多电压再调度方法,使用式(10)定义的增益度函数作为再调度算法中节点选择的依据。具体的算法描述如下:

a)输入完成基于控制边的功耗管理的 SCDFG 和时间资源约束。

b)计算 SCDFG 中每个节点的 ASAP、ALAP 和灵活度。

c)计算灵活度不为零且未被处理节点的能耗延迟增量比率、疏密度和增益度函数,在所有的操作中找到 Gain 最高的操作集合  $O_{\text{max}}$ 。

d)如果  $O_{\text{max}}$  为空转 f);否则从  $O_{\text{max}}$  中任选一个节点  $O_j$ ,标记  $O_j$  已经被处理,根据  $O_j$  操作类型和灵活度选择一个合适的低电压功能单元,重新对 SCDFG 调度。如果调度结果不违反时间资源约束,则保存调度结果转 b)。

e)从  $O_{\text{max}}$  中删除节点  $O_j$ ,如果  $O_{\text{max}}$  不为空转 d);否则计算所有节点的灵活度,如果存在灵活度不为零的节点转 b)。

f)结束程序并输出 SCDFG。

## 4 基于分支控制功耗管理和多电压功耗优化的调度

将基于分支控制功耗管理方法与多电压功耗优化的调度

方法相结合,构成了基于分支控制功耗管理和多电压功耗优化的调度算法:PMMVSA。其具体描述如下:

a)输入 CDFG、时间约束  $T_c$  和资源约束  $R_c$ ,并假设每个操作工作电压为 5 V 延迟为一个控制步,完成初始化调度输出 SCDFG。

b)如果 SCDFG 中存在控制节点,则进行基于分支控制的功耗管理方法,通过控制节点对多路选择器传递扇入的尽早控制,避免不必要传递扇入操作的执行,实现功耗的优化。

c)如果 SCDFG 中存在灵活度不为零的节点,应用基于多电压功耗优化调度方法进一步优化设计电路功耗。

d)输出完成全面功耗优化的 SCDFG。

## 5 实验结果

实验中选择了三个控制流密集基准电路,即 GCD、Dealer 和 PixelGen;三个数据流密集基准电路,即 DiffEq、EWF 和 Wavelet。功能单元的功耗和延迟参照文献[8]。式(6)和(10)的参数设置为  $a=5$ ,  $b=1$ ,  $c=1$ ,  $n=5$ ,  $m=1$ 。时间约束  $T_c$  设置为在最高电压下 ASAP 调度时间  $T$  的 1.5 倍和 2 倍。资源约束  $R_c = n$  表示在每个控制步中,同一类资源在 5 V、3.3 V 和 2.4 V 电压下允许的最大个数为  $n$ 。表 1 是控制流密集型电路功耗实验结果。表 1 中  $E1$  表示所有的资源在 5 V 的单供应电压下的功耗; $E2$  表示在 5 V、3.3 V 和 2.4 V 三个级别的供应电压下采用文献[6]的多电压调度方法获得的功耗; $E3$  表示采用文献[3]的功耗管理方法获得的功耗; $E4$  表示采用本文方法所获得的功耗。 $ER1 = (E1 - E2)/E1 \times 100\%$ ,表示文献[6]的方法相对于 5 V 单电压方法功耗优化的百分比; $ER2 = (E1 - E3)/E1 \times 100\%$ ,表示文献[3]的方法相对于 5 V 单电压方法功耗优化的百分比; $ER3 = (E1 - E4)/E1 \times 100\%$ ,表示本文方法相对于 5 V 单电压方法功耗优化的百分比。

表 1 控制流密集型电路功耗实验结果

| Bench mark | Rc | Tc   | E1 /pJ | E2 /pJ | E3 /pJ | E4 /pJ | ER1 /% | ER2 /% | ER3 /% |
|------------|----|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Dealer     | 1  | 1.5T | 3861   | 2415   | 2901   | 2383   | 37.45  | 24.63  | 38.28  |
|            |    | 2T   | 3861   | 1345   | 2686   | 1134   | 65.16  | 30.45  | 70.62  |
|            | 2  | 1.5T | 3861   | 2342   | 2764   | 2263   | 39.34  | 28.41  | 41.39  |
|            |    | 2T   | 3861   | 1219   | 2519   | 1072   | 68.43  | 34.76  | 72.24  |
| GCD        | 1  | 1.5T | 2849   | 2105   | 2391   | 2095   | 26.11  | 16.08  | 26.47  |
|            |    | 2T   | 2849   | 1143   | 1836   | 983    | 59.88  | 35.56  | 65.50  |
|            | 2  | 1.5T | 2849   | 1954   | 2186   | 1852   | 31.41  | 23.27  | 34.99  |
|            |    | 2T   | 2849   | 1065   | 1653   | 863    | 62.62  | 41.98  | 69.71  |
| PixelGen   | 3  | 1.5T | 14387  | 11678  | 10841  | 9845   | 18.83  | 24.65  | 31.57  |
|            |    | 2T   | 14387  | 6319   | 5762   | 5473   | 56.08  | 59.95  | 61.96  |
|            | 4  | 1.5T | 14387  | 10462  | 8915   | 7915   | 27.28  | 38.03  | 44.99  |
|            |    | 2T   | 14387  | 5156   | 4986   | 3843   | 64.16  | 65.34  | 73.29  |

从表 1 中可以看出,在相同的时间和资源约束下,对于控制流密集型电路,本文方法比文献[3]方法功耗平均降低 18.62%,比文献[7]方法功耗平均降低 12.51%。表 2 是数据流密集型电路功耗实验结果。从该表中可以看出,在相同的时间和资源约束下,对于数据流密集型电路,本文方法比文献[3]方法功耗平均降低 19.46%,比文献[7]方法功耗平均增加 1.03%。从以上实验数据可以看出,由于数据流密集型电路的控制分支较少,导致文献[3]中的分支控制功耗管理方法起不到作用或作用很小,而本文方法在控制分支较少的数据流密集型电路中,将退化为文献[7]中的方法。

表 2 数据流密集型电路功耗实验结果

| Bench mark | Rc | Tc   | E1    | E2    | E3    | E4    | ER1   | ER2   | ER3   |
|------------|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            |    |      | /pJ   | /pJ   | /pJ   | /pJ   | /%    | /%    | /%    |
| EWF        | 1  | 1.5T | 22965 | 18567 | 22965 | 18567 | 19.15 | 0     | 19.15 |
|            |    | 2T   | 22965 | 13829 | 22965 | 13829 | 39.78 | 0     | 39.78 |
|            | 2  | 1.5T | 22965 | 17361 | 22965 | 17361 | 24.40 | 0     | 24.40 |
|            |    | 2T   | 22965 | 12635 | 22965 | 12635 | 44.98 | 0     | 44.98 |
| Diffeq     | 1  | 1.5T | 15929 | 15132 | 15451 | 15217 | 3.09  | 1.04  | 2.54  |
|            |    | 2T   | 15929 | 14895 | 15451 | 14632 | 4.60  | 1.04  | 6.29  |
|            | 2  | 1.5T | 15929 | 14951 | 15451 | 14827 | 4.25  | 1.04  | 5.04  |
|            |    | 2T   | 15929 | 12469 | 15451 | 12283 | 20.14 | 1.04  | 21.33 |
| Wavelet    | 4  | 1.5T | 73180 | 53927 | 68351 | 54927 | 26.31 | 6.60  | 24.94 |
|            |    | 2T   | 73180 | 28185 | 54672 | 27591 | 61.49 | 25.29 | 62.30 |
|            | 5  | 1.5T | 73180 | 39261 | 67638 | 46827 | 46.35 | 7.57  | 36.01 |
|            |    | 2T   | 73180 | 23598 | 53894 | 22863 | 67.75 | 26.35 | 68.76 |

图 3 为三种调度方法的平均功耗优化比较。图 4 为四种方法在四种不同约束下的平均功耗比较。通过图 3 和 4 可以清楚地看出,本文提出的方法在不同的约束条件下,对于控制流密集型电路,功耗优化能力优于其他两种方法;对于数据流密集型电路,与文献[7]中的方法相当,优于文献[3]中的方法。

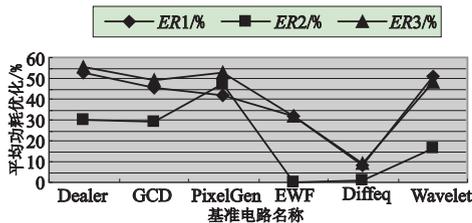


图 3 三种调度方法的平均功耗优化比较

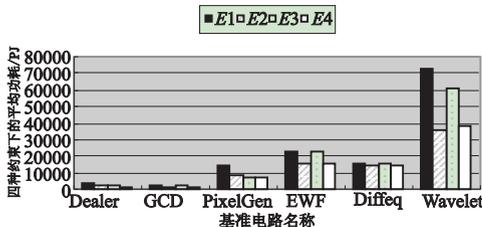


图 4 四种方法在四种不同约束下的平均功耗比较

6 结束语

本文提出的基于分支控制功耗管理与多电压功耗优化的

调度相结合的高层次低功耗调度算法,在算法开始首先对 CD-FG 中的控制节点进行调度,在控制节点与其目标的传递扇入之间建立控制边,关闭不必要的操作节点来最大化功耗的节省;然后再对进行充分分支控制功耗管理的 SCDFG 运用多电压功耗优化方法进行再调度,实现设计电路最大功耗优化。该算法既适用于控制流密集的设计,也可以对数据流密集的设计进行优化;同时还可以与其他高层次综合方法方便地结合,具有很好的通用性。实验结果表明,该算法对功耗优化具有可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 刘志鹏,边计年,周强. 高层次综合中面向功耗优化的方法与技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007,19(11):1374-1379.
- [2] MONTEIRO J, DAVADAS S, ASHAR P, et al. Scheduling techniques to enable power management [C]//Proc of the 33rd Annual DAC. New York: ACM Press,1996: 349-352.
- [3] CHEN Chun-hong, SARRAFZADEHC M. Power-manageable scheduling technique for control dominated high-level synthesis [C]//Proc of Design Automation and Test Europe Conference in and Exhibition. Washington DC: IEEE Computer Society,2002: 1016-1020.
- [4] 温东新,杨孝宗,王玲. 一种 VLSI 高层次综合低功耗设计方案及实现[J]. 计算机研究与发展,2007,44(7):1259-1264.
- [5] KUMAR A, BAYOUMI M, ELGAMEL M. A methodology for low power scheduling with resources operating at multiple voltages [J]. The VLSI Journal,2004,37(10):29-62.
- [6] 王玲,温东新,杨孝宗. 时间约束下低功耗的综合方案[J]. 半导体学报, 2005,26(1):287-293.
- [7] WANG Ling, JIANG Ying-tao, SELVARAJ H. Scheme for low power designs with multiple supply voltages by heuristic algorithms [C]// Proc of ITCC '04. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004: 826- 830.
- [8] MANZAK A. Temperature aware datapath scheduling [J]. Integrated Circuit and System Design,2005,37(8):99-106.
- [9] WANG W, TAN T K, LUO J, et al. A comprehensive high-level synthesis system for control-flow intensive behaviors [C]//Proc of the 13th ACM Great Lakes Symposium on VLSI. New York: ACM Press, 2003:11-14.
- [6] HHRWITZ A. Uber die bedingungen, unter welchen eine gleichung nur wuezeln mit negativen reellen teilenbrsitzt [J]. Math,Ann,1995, 46:273- 284.
- [7] SCHUR I. Uber potenzreihen, die in innern des einheitkreises beschrant sind [J]. ReinAngew Math,1918,147(1917):205-232.
- [8] KHARITONOV V L. Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of system of linear differential equations [J]. Differential Equations,1997,14(11): 2086-2088.
- [9] BARLETT A, HOLLOT C, HUANG Lin. Root locations of an entire polytop of polynomials: it suffices to check the edges [J]. Mathematics of Control, Signals and Systems,1998,1(1): 61-71.
- [10] KWOK K Y, SHAH S L. Long-range predictive control with a terminal matching condition [J]. Chemical Engineering Science,1994, 49(9):1287- 1300.
- [11] MILLER R M, KWOK K E, SHAH S L, et al. Development of a stochastic predictive PID controller [C]//Proc of American Control Conference. 1996:4204-4208.

(上接第 3023 页)

参考文献:

- [1] WATANABE K, ITO M. A process model control for linear system with delay [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1981,26(6): 1261-1266.
- [2] ASTROM K J, HANG C C, LIM B C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time [J]. IEEE Trans on Automatic Control,1994,39(2):343-345.
- [3] ZHANG Wei-dong, SUN You-xian. Modified Smith predictor for controlling integrator/time delay process [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,1996,35(8):2769 -2772.
- [4] MANATUSEK M R, MICIC A D. A modified Smith predictor for controlling press with an integrator and long dead-time [J]. IEEE Trans on Automatic Control,1996,41(8):1199-1203.
- [5] MANATUSEK M R, MICIC A D. On the modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time [J]. IEEE Trans on Automatic Control,1999,44(8):1603-1606.