

# 数字系统硬件描述及实现

何 斌

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 论述了数字系统硬件描述和实现的方法和过程, 提出了可编程逻辑器件设计的具体应用方法。

**关键词:** 数字系统; 硬件描述; 可编程逻辑

## 1 引 言

ASIC 和可编程门阵列技术的迅速发展, 虽然降低了数字系统设计对器件工艺和生产厂家的依赖程度, 但却使设计规模和复杂程度大幅度提高, 因此, 只有采用层次化设计方法才能高质量地完成数字系统设计。层次化设计方法一般有两种形式, 自顶向下和自底向上。在自顶向下层次化的设计过程中, 每一层次的设计者对于他们所要描述的细节和精确度都只有一定的要求, 达到这一要求就无须进一步追究。也就是说, 对系统的每一级描述都有必要压缩某些较低抽象级别的细节, 从而降低在上一个较高级别问题的复杂性, 使设计者从更大的范围去观察和处理问题。自底向上层次化设计从最小基本单元做起, 逐级向上完成设计, 最后得到完整的数字系统。自顶向下设计为自底向上设计提供系统描述和基本电路实现(如门级等), 自底向上设计为自顶向下设计提供物理实现的可行性验证。两种形式是一个有机的整体, 构成一个完整的层次化设计体系。EDA 技术就是在计算机上建立了一套层次化设计环境, 将层次化设计方法的两种形式有机的结合在一起, 在统一的仿真模型和物理参数数据库支持下, 完成数字系统的设计。同时可以对数字系统各个层次的任一状态进行模拟仿真, 验证数字系统描述的正确性和精确程度。然而, 如何在 EDA 设计环境中, 运用层次化设计方法进行 ASIC 和可编程器件的设计是数字系统设计者普遍关心的问题。本文着重讨论在 EDA 层次化设计环境中如何进行数字系统的可编程器件设计问题。

## 2 数字系统的硬件描述

### 2.1 数字系统的结构

大多数的数字系统由两部分组成: 控制部分和数据部分。控制部分由控制时序电路组成; 数据部分由数据寄存器和组合逻辑电路组成。

数字系统可以描述为如图 1 所示结构, 其中控制电路经由控制线向数据部分传送控制信号, 使数据部分的寄存器之间进行数据传送。数据部分将执行信号的情况以及现在数据状态反馈给控制电路。

数据部分是数字系统设计关键, 其结构如图 2 所示。寄存器 Reg1 是由时钟信号相位 Level1 控制的输入寄存器, 电路的另一端是时钟信号和相位 Level2 控制的输出寄存器 Reg2。在两个寄存器中间是实现某一功能的组合逻辑电路。

任何单独的数据处理可以认为是由输入寄存器给组合逻辑电路至第二个寄存器的传输。一连串这样的操作, 可以用一系列这样的由寄存器间隔的组合电路数据流完成。

由上可知, 数字系统可以看成是一些寄存器的集合  $\{\text{Reg}_i\} (i=1, 2, \dots, n)$ , 数据在 RegX 和 RegY 这间传送, 并且在传送中间对数据进行某些逻辑操作。因此, 对数字系统的描述, 也就是对寄存器及组合逻辑

电路的结构描述, 对寄存器之间传输的行为描述。同样, 数字系统的设计就归结为对寄存器和组合逻辑电路不同组成结构的设计。

### 2.2 硬件描述

数字系统的硬件描述是由硬件描述语言来完成。硬件描述语言类似于程序设计语言, 有确定的语法和语义, 它可以对数字系统硬件的结构的行为进行精确的描述, 并用专门的编译器进行编译生成可模拟仿真的文件。

数字系统硬件描述语言, 按其描述的层次划分为四个等级, 系统级, 寄存器传输级, 逻辑门级, 电路级。各级可以有不同的硬件描述语言, 在应用数字系统设计过程, 主要采用寄存器传输级的硬件描述语言, 如 VHDL, Verilog-HDL 语言, 对设计的系统进行描述。

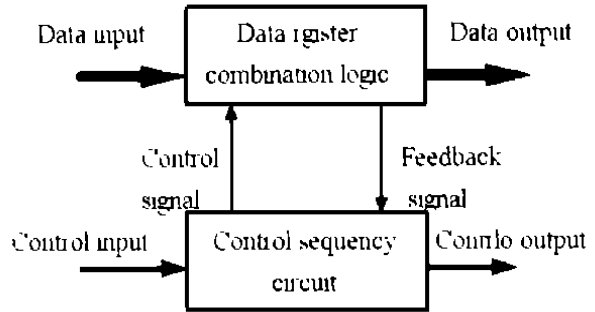


Fig. 1 Digital system model

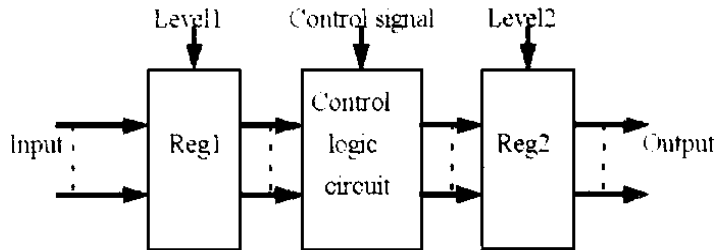


Fig. 2 Data stream model

无论用什么硬件描述语言,对数字系统的描述都分为两个部分:系统的结构描述,系统的行为描述。

在系统的结构描述中,主要说明系统的硬件结构,包括硬件单元组合逻辑和它们之间的连接关系的描述。具体描述方法,采用说明语句描述数字系统的存储器,寄存器,I/O接口的结构,以及硬件连接线的内部关系;用组合逻辑函数描述系统的组合逻辑电路的拓扑结构。

在系统的行为描述中,主要描述所有寄存器与寄存器之间传输以及它们发生的时间和条件。具体描述方法,运用事件触发,条件判断操作描述数字系统各寄存器,存储器之间的数据传输过程,这个过程可以是并发时间块或顺序时间块。用专用说明语句描述系统内部各功能级,门级之间的延时,信号强弱。对数字系统行为描述精确性,完全取决于定义的基本时间单位(一般取 $n_s$ 或 $p_s$ )。

由上可知,对于2.1提出的数字系统结构,硬件描述语言可以精确的描述其结构和行为。

### 3 硬件描述的实现

数字系统的硬件描述只是设计思想的体现,设计的目的是物理实现。由于硬件描述完全是一个设计思想较为理想的表达,而物理实现将涉及到许多非理想问题。因此,物理实现要比硬件描述复杂。这里仅对采用可编程器件实现硬件描述进行讨论。

#### 3.1 可编程器件的基本特点

尽管可编程器件种类很多,但不论是GAL、EPLD,还是FPGA器件,它们的基本结构都是组合逻辑网络和寄存器的组合结构。只是具体的运行方式有所不同。一般有以下几个基本特点:

- (1) 用户可设计性。这是硬件描述实现的前提条件;
- (2) 组合逻辑网络和寄存器集成器件。具有2.1提出的数字系统结构模型;
- (3) 统一的时钟脉冲。主要完成系统中同步时序电路的功能。

依据上述特点,可编程器件可以作为硬件描述实现器件。

#### 3.2 硬件描述的综合<sup>[1]</sup>

由于可编程器件设计是同步时序电路设计,所以这里仅讨论同步时序电路系统硬件描述综合问题。系统的综合主要是根据预定的逻辑功能,选定记忆元件(触发器),导出最经济的输出方程和激励方程。要完成这一任务大致进行如下步骤:

- (1) 根据电路的逻辑要求采用不同的方法导出原状态表。
- (2) 状态化简。把原状态表中的内部状态数减到最小或接近最小的过程。
- (3) 状态分配。对每一个可能的输入状态,输出状态以及内部状态都分配一个适当的二进制代码,以使电路的总价格最低。
- (4) 求出最简的输出方程组和激励方程组。

虽然(2)(3)(4)步都有完整的算法,可以采用计算机编程实现,但(1)是所有数字系统设计过程中比较困难的一步。由2.2可知,若采用硬件描述语言,那么就可以较为方便的实现原状态表的构造。具体实现方法如下:

- (1) 在统一时钟下,给出数字系统的时序图。

(2) 根据时序图, 采用硬件描述语言对其进行行为描述, 也可以直接采用原理图输入方式。

(3) 对硬件描述进行仿真, 验证描述系统是否正确, 若仿真结果正确, 那么就把硬件描述文件确定为原状态表输入文件; 否则, 返回(2) 修改描述。

因为数字系统的时序关系波形图的设计, 不需要详细的考虑全部状态之间的关系, 所以依据它进行硬件描述比较方便实用。

### 3.3 物理实现

若设输入变量为  $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 输出变量  $\bar{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_m)$ , 内部状态变量  $\bar{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_r)$ , 激励输入  $\bar{D} = (D_1, D_2, \dots, D_r)$ , 则有

$$\bar{Z} = f(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (1)$$

$$\bar{D} = G(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (2)$$

(1)(2) 分别为简化输出方程组, 激励方程组。

物理实现的意义就是寻找一种可编程器件或几种可编程器件的组合, 以最低的价格实现方程组(1)(2)。因此物理实现的过程是一个优选过程, 优选目标为最低价格。换句话说, 就是在保证数字系统软件的前提下, 寻求最少的器件数量, 最低价格的器件种类。同时也是对已有的实际可编程器件的筛选过程。为了完成此过程, 前提条件是具备多种类型的可编程器件数据库, 然后应用下述几步就可以得到物理实现。

(1) 给出输出方程组和激励方程组。

(2) 对将要完成物理实现的数字系统定义物理约束条件: ①时钟频率②实现所需要的时间

③采用何种电路(如 CMOS, ECL 等) ④允许的额定电流 ⑤期望外封装形式⑥器件数量

(3) 依据(1)(2)对数据库中的所有可编程器件进行筛选, 并输出可能的选择方案。

(4) 生成可完成数字系统要求的可编程器件的仿真模型。(5) 在 EDA 设计环境中对已经写入的可编程器件进行仿真, 验证是否满足系统要求。

由上可知, 这种物理实现过程, 已经不是一般的逻辑方程写入过程, 而是一个器件优选模拟过程, 它将提高系统质量, 并优化产品价格。

## 4 实际应用

设计简码处理器数字系统, 主要包括: 加法器、控制器、存储器、寄存器、计数器。用可编程器件设计计数器。具体分以下几步。

(1) 采用 Verilog HDL 语言对计数器进行硬件描述。(描述程序略)

(2) 求出方程组(1), (2), 运用逻辑原理图表示为 Fig. 3。

(3) 给出物理实现的约束条件为: 时

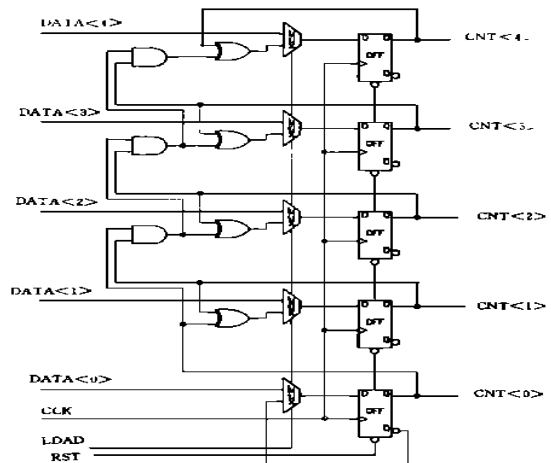


Fig. 3 Counter model

钟频率 40 MHz; 实现时间 40 ns; CMOS 电路; DIP 式封装; 电流  $I = 40 \text{ mA}$ ; 器件数量定为一件。

优选结果有五种。可选择方案, 依据具体情况选择 P18CV 8 系列的 PEEL18CV 8P- 25 器件作为物理实现。

(4) 经过模拟仿真, 满足系统要求。

## 5 结 论

综上所述, 硬件描述和实现方法是数字系统设计的有效手段, 特别是对可编程器件以及 ASIC 的设计较为方便实用, 并可提高工程设计的效率和质量。

### 参 考 文 献

[1] 沈嗣昌, 计算机辅助逻辑综合, 北京: 高等教育出版社, 1982, p153- 196

## Hardware Description and Realization on Digital System

He Bin

(*Chanchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Chanchun 130022*)

### Abstract

The method and procedure on hardware description and realization of digital system is stated. The detail applied method is provided with the design on programmable logic device.

**Key words:** Digital system, Hardware description, Programmable logic device

何 斌 男, 1961 年 7 月生, 1990 年毕业于北京理工大学研究生院自动控制专业, 获硕士学位。现为助理研究员, 主要从事 EDA 方面的工作, 在国内学报上发表论文 10 余篇。