

## ISCP-TCAM: 一种低功耗高速路由查找引擎结构

杨奎武, 魏 博, 张效义, 李 鸥

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

(yangkuiwu@yahoo.com.cn)

**摘 要:**提出一种高速、低功耗路由查找引擎结构 ISCP-TCAM (Improved Stage-Control Pipeline Ternary Content Addressable Memory), 这种结构不但具有传统内容可寻址寄存器 (TCAM) 管理简单、更新容易、查找快速等优点, 而且功耗要比同等容量的 TCAM 小得多。同时为进一步评估其性能利用 ALTERA 公司的逻辑可编程门阵列 (FPGA) 实现了这一结构。该结构在低功耗高速路由查找引擎的设计中是一个较好的选择。

**关键词:** TCAM; ISCP-TCAM; 路由表查找; 低功耗

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## ISCP-TCAM: a high speed power-efficient routing table search engine architecture

YANG Kui-wu, WEI Bo, ZHANG Xiao-yi, LI Ou

(College of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

**Abstract:** Propose the ISCP-TCAM (Improved Stage-Control Pipeline Ternary Content Addressable Memory), a high speed power-efficient routing table search architecture. This architecture not only has the merits of easy managing and updating of conventional Ternary Content Addressable Memory (TCAM), but also power-efficient compare with the TCAM with the same size. In order to evaluate its performance, we implement it with FPGA of ALTERA company. It is a good selection in the design of high speed power-efficient routing table search engine.

**Key words:** TCAM; ISCP-TCAM; routing table search; power-efficient

### 0 引言

路由器设计主要问题在于可靠性和速度<sup>[1]</sup>, TCAM 器件的出现使高速路由查找成为可能, 但其容量小价格高, 尤其是功耗大的缺点限制了它的应用。

文献[2]指出 TCAM 芯片的功耗同参与查找的路由表项及比特数成正比。在这一结论的基础上提出了很多降低功耗的方法, 这些方法一般分为两类: 压缩路由表<sup>[3]</sup>和将 TCAM 芯片分块查找<sup>[4,5]</sup>。然而这两类方法都没有突破 TCAM 器件的结构, 不能从根本上解决功耗问题。本文在 SCP-TCAM<sup>[6]</sup> (Stage-Control Pipeline TCAM) 查找引擎结构的基础上提出了 ISCP-TCAM 结构, 该结构采用流水线设计, 查找速度快, 管理简单, 且功耗只有传统 TCAM 器件的 1/4 ~ 1/18。

### 1 SCP-TCAM 结构分析

图1为传统的 TCAM 框图。当有关键字进行查找时, TCAM 同时并行搜索所有的表项并返回一个地址最低的匹配表项。这种所有表项都参与查找的并行查找结构使得器件的功耗较高。由于功耗与参与查找的表项数目和比特数成正比, 并且任意一个表项只要其中有一个比特没有匹配上那么整个表项都不会匹配, 基于这两点文献[6]等提出了 SCP-TCAM 结构。

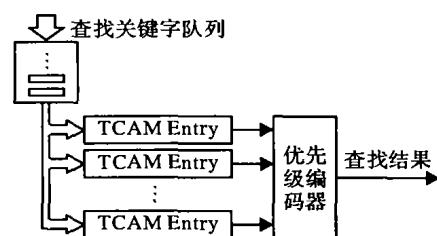


图1 传统 TCAM 结构

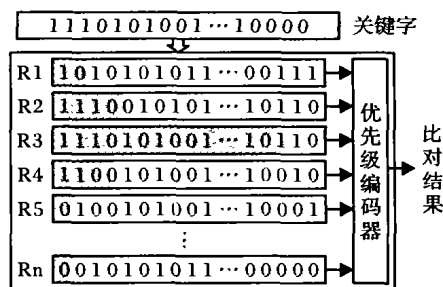


图2 SCP-TCAM 路由表查找示意

SCP-TCAM 结构保留了传统 TCAM 并行比较和优先编码的特点, 关键的更新之处在于它采用了能够降低功耗的流水线分级控制 (SCP) 方法。如图2所示, 对一个表项的查找可以这样描述: 在第一个时钟周期关键字的第一比特 (最左边) 同表项的第一比特相比对, 如果比对不成功 (不同), 那么就发送一个 stop 信号给该表项的第二个比特停止该表项继续

收稿日期: 2004-09-10; 修订日期: 2004-11-03

作者简介: 杨奎武 (1978-), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 主要研究方向: 第三代移动通信; 魏博 (1980-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 第三代移动通信; 张效义 (1966-), 男, 河南开封人, 教授, 主要研究方向: 第三代移动通信; 李鸥 (1961-), 男, 河南郑州人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: IPv6 及核心路由器。

比对,如果成功那么就发送一个 go on 信号,下一周期继续进行第二比特的比对,如此依次下去直到所有比特比对完成。在这种分级控制的机制下,表项中每个比特是否进行比对要受到上一级比对结果的控制,与传统 TCAM 中表项的所有有效比特都进行比对的方法相比显然降低了功耗。图 3、图 4 通过将 IP 地址为 216.43.57.196 的关键字在传统 TCAM 器件与 SCP-TCAM 中进行查找,更直观地表明了 SCP-TCAM 比传统 TCAM 功耗低的原因,其中阴影区表示需要比对的区域。

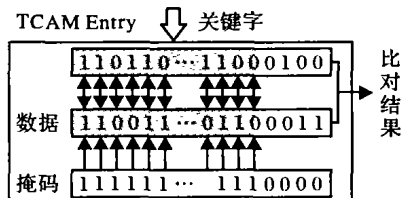


图3 传统 TCAM 功耗

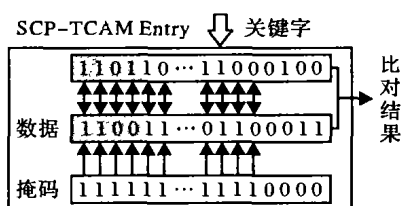


图4 SCP-TCAM 功耗

图 5 为 SCP-TCAM 的硬件结构框图。 $n$  代表 SCP-TCAM 中表项的宽度。在流水线控制器中有  $n$  个  $n$  比特关键字寄存器 KREG 和  $n$  个 1 比特的比特寄存器 BREG,它们是用来存储关键字和每次比对所用的比特位。每一个时钟周期关键字都被传送到下一个 KREG 中,同时相对应的比特位同各个表项进行比对,直到结果出来。该种结构与传统的 TCAM 相比可以将功耗降低 5~20 倍。

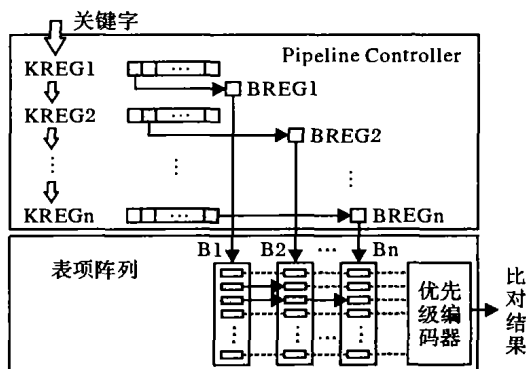


图5 SCP-TCAM 硬件结构

## 2 ISCP-TCAM:改进的 SCP-TCAM 结构

SCP-TCAM 结构虽然可以降低功耗,但是在进行关键字长度为 32 的路由查找时,查找的结果要等待 32 个时钟周期才能出现,因此采用这种结构设计路由查找引擎对报文存储容量提出了较高的要求,因为每个报文转发都需要 32 个时钟周期,所以要提供大的存储空间来存储路由器端口接收的报文,同时由于每一比特都要进行比对所以结构上也趋于复杂。为了解决这些问题,针对路由查找本文提出了一种改进的 ISCP-TCAM 结构。相对于 SCP-TCAM 结构 ISCP-TCAM 关键的改进点有两处:1) ISCP-TCAM 是将 SCP-TCAM 与传统的 TCAM 相结合的结构,其中 SCP-TCAM 是用来查找前缀长度小于 25 的表项,而 TCAM 是用来查找前缀长度大于等于 25

的表项,这样有效降低了 SCP-TCAM 流水线的深度,降低路由查找时间;2) ISCP-TCAM 采用 SCP-TCAM 的流水线结构,不同之处在于每个时钟周期比对多个比特位,同样降低了路由查找的时间,也使得结构简单化。

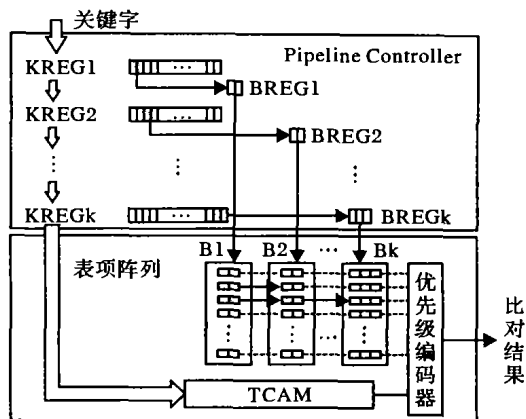


图6 ISCP-TCAM 硬件模型

图 6 是 ISCP-TCAM 结构框图。图 6 中每一个关键字的查找要经过  $k$  级( $k$  个时钟周期),第一级同时比对所有表项的前 2 个比特,第二级同时比对表项接下来 2 个比特,第  $k$  级同时比对最后 3 个比特。关键字送入 KREG $k$  中锁存后,在下一个时钟周期关键字的最后 3 个比特送入 BREG $k$ ,同时关键字也送入 TCAM 中进行查找。综上,由于前缀长度大于 25 的路由表项是在 TCAM 中查找,而小于 25 的表项是通过多级查找进行的,而且每一级参与查找的比特数目的增加,缩短了路由查找的时间,降低了查找结构的复杂度。

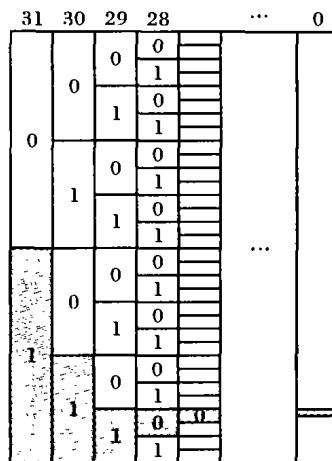


图7 路由表倒树表示法

## 3 ISCP-TCAM 性能分析及实现

### 3.1 性能分析

文献[7]指出前缀长度大于 24,小于 16 的路由表项占整个路由表的 2% 还不到。因此 ISCP-TCAM 结构中 TCAM 的容量大小一般应是整体容量的 2%。因此 TCAM 的功耗在整个结构中是很小的一部分(2%)。将 IPv4 的路由表用图 7 倒树的方式表示。其中阴影部分表示表项为 11100xx...x/L( $L > 5$ )的路由前缀。通过对来源于 WAE-WEST 的 28 896 个路由前缀<sup>[8]</sup>及中国教育和科研网(China Education and Research Network, CERNET)的 145 736 个路由前缀<sup>[9]</sup>的分析,我们得到路由前缀的前 4bit(31, 30, 29, 28)在整个路由表中的比重如表 1 所示。而路由前缀的其他比特位上 0,1 的分布基本上是随机的。因此,只要设定好查找的级数和每一级参与查找的

比特数,就可以根据各比特位 0,1 的分布情况计算出最坏和最好情况下 ISCP-TCAM 中参与查找的比特数占总比特数的百分比,也就可以计算出最坏和最好情况下功耗的情况(实际上就是解决条件极值问题)。由于同时匹配多个表项时所增加的参与查找的比特数目远小于路由表的大小,所以匹配多个表项的情况这里不予考虑。表 2 通过计算得出不同分级时 ISCP-TCAM 在最坏和最好情况下的功耗与传统 TCAM 功耗相比节约的情况。同 SCP-TCAM 相比,ISCP-TCAM 结构虽然在功耗方面比前者稍有降低,但明显降低了查找的时间,也使得结构设计简单化。

### 3.2 硬件实现

利用 VHDL 语言和 ALTERA 公司 FPGA 芯片 APEX20KE1500E-3,分别实现了容量为 32x100 的五级 ISCP-TCAM 结构和传统 TCAM 结构。由表 3 可以看出 ISCP-TCAM 结构最高的时钟频率可以达到 51MHz(每秒钟进行 51M 次的查找),而传统的 TCAM 结构由于受到片内 RAM 速度的限制最高只能达到 35MHz(每秒钟进行 35M 次的查找);但 ISCP-TCAM 结构在占用的逻辑单元和查找的时间上不及传统 TCAM 结构;在功耗方面,利用 QUARTUS2 软件的 HardCopy 功能对 ISCP-TCAM 结构和传统的 TCAM 结构进行了分析,结果表明在各自最高时钟速率下 ISCP-TCAM 结构的功耗约为

传统的 TCAM 结构的 1/3 强,如果进一步降低 ISCP-TCAM 的时钟速率则功耗还可以降低。可见 ISCP-TCAM 结构由于工作中常用资源远小于占用资源所以使得功耗较低。

表 1 路由前缀的前 4bit 在整个路由表中的比重

31	30	29	28	WAE-WEST	CERNET
0	0	0	0	1.56%	1.14%
0	0	0	1	3.40%	2.01%
0	0	1	0	0.41%	0.24%
0	0	1	1	3.73%	4.75%
0	1	0	0	5.65%	12%
0	1	0	1	0.11%	2.56%
0	1	1	0	0%	0%
0	1	1	1	0%	0%
1	0	0	0	4.03%	3.20%
1	0	0	1	3.65%	2.43%
1	0	1	0	4.30%	2.89%
1	0	1	1	0%	0%
1	1	0	0	51.82%	44.40%
1	1	0	1	21.42%	24.41%
1	1	1	0	0%	0%
1	1	1	1	0%	0%

表 2 ISCP-TCAM 性能表

级数(每级参与查找比特数)	4 级(2,2,4,16)	5 级(1,2,3,4,14)	6 级(1,2,2,3,5,11)
关键字查找时间(周期)	4	5	6
功耗(与传统 TCAM 比较)	26% ~ 15%	28% ~ 5.6%	26 ~ 5.6%

表 3 ISCP-TCAM 与传统 TCAM 结构

	最高频率/MHz	占用逻辑单元	占用片内 RAM	常用资源 占用资源 %	功耗/mw	查找时间/周期
ISCP-TCAM	51	10956	0	<5	21.28	5
传统 TCAM	35	687	4096	100	77.03	2

目前较新的降低 TCAM 结构功耗的方法是在 TCAM 结构设计中加入分块信号线,通过这些信号线可以将 TCAM 结构分成若干区域,每次查找只在某一区域内进行,这样可以降低 TCAM 器件的功耗,但是这些信号线的加入也使得 TCAM 表项的更新算法更加复杂,管理难度加大。

## 4 结语

目前路由查找是路由器的主要工作同时也是其性能的瓶颈<sup>[10]</sup>。本文根据 SCP-TCAM 结构提出了改进的 ISCP-TCAM 路由查找引擎设计结构,在保证路由表更新复杂度与 TCAM 相同的情况下,不但可以有效地降低功耗还可以加快报文的查找速度,降低报文存储容量,改进了 SCP-TCAM 结构的性能,更适合在高速路由查找中应用。

### 参考文献:

- [1] KESHAV S, SHARMA R. Issues and Trends in Router Design[J]. IEEE Communication Magazine, 1998, 36(5): 144 - 151.
- [2] RAVIKUMAR VC, MAHAPATARN, BHUYANLN. EaseCAM: An Energy and Storage Efficient TCAM-based Router Architecture[EB/OL]. <http://courses.cs.tamu.edu/rabi/cpsc689/lectures/UCR%20present-EaseCAM.ppt>, 2004.
- [3] LIU H. Reducing routing table size using ternary-CAM[EB/OL]. <http://www.stanford.edu/~huanliu/hoti01.ppt>, 2001.
- [4] BRAYTON R, HACHTEL G, MCMULLEN C, et al. Logic Minimization Algorithms for VLSI Synthesis[M]. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1984.
- [5] ZANE F, NARLIKAR G, BASU A. CoolCAMs: Power-efficient TCAMs for forwarding engine[EB/OL]. [http://www.ieee-info-com.org/2003/papers/02\\_01.PDF](http://www.ieee-info-com.org/2003/papers/02_01.PDF), 2003.
- [6] LI XD, LIU Z, LI W. SCP-TCAM: A Power-Efficient Search Engine for Fast IP Lookup[A]. International Conference on Communication and Broadband Network[C]. 2004.
- [7] HUSTON G. Analyzing the Internet's BGP Routing Table[J]. The Internet Protocol Journal, 2001, 4(1): 2 - 15.
- [8] Network Processing Forum[EB/OL]. <http://www.npforum.org>, 2004.
- [9] CERNET BGP VIEW Global Internet[EB/OL]. <http://bgpview.6test.edu.cn/bgp-view/index.shtml>, 2001 - 11 - 11.
- [10] 李鸥, 戚文芽, 邬江兴, 等. 一种分段式高速 IP 路由查找方法[J]. 通信学报, 2001, 22(5): 93 - 97.