



WP245 (v1.1.1) 2006 年 7 月 7 日

使用 Virtex-5 系列 FPGA 获得 更高系统性能

作者: Adrian Cosoroaba 和 Frédéric Rivoallon

Virtex™-5 器件包括基于第二代高级硅片组合模块 (ASMBL™) 列架构的多平台 FPGA 系列。集成了为获得最佳性能、更高集成度和更低功耗设计的若干新型架构元件, Virtex-5 器件达到了比以往更高的系统性能水平。

要获得最佳系统性能, 就必须均衡组合逻辑结构、片上 RAM、DSP 模块和 I/O 这些高性效比的 FPGA 组件。本文以新型 ExpressFabric™ 技术为重点, 说明用 Virtex-5 系列构建模块所能达到的性能水平。本文主要描述这项新技术的主要功能, 包括新型 6 输入 LUT。本文还介绍了提高逻辑及算术功能性能的量化示例, 同时介绍片上 RAM、DSP 模块和 I/O 的其他增强项。

© 2006 Xilinx, Inc. All rights reserved. All Xilinx trademarks, registered trademarks, patents, and further disclaimers are as listed at <http://www.xilinx.com/legal.htm>. All other trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. All specifications are subject to change without notice.

NOTICE OF DISCLAIMER: Xilinx is providing this design, code, or information "as is." By providing the design, code, or information as one possible implementation of this feature, application, or standard, Xilinx makes no representation that this implementation is free from any claims of infringement. You are responsible for obtaining any rights you may require for your implementation. Xilinx expressly disclaims any warranty whatsoever with respect to the adequacy of the implementation, including but not limited to any warranties or representations that this implementation is free from claims of infringement and any implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose.

有潜可挖的性能

据基于客户设计的性能基准测试显示，与前一代 Virtex-4 器件相比，Virtex-5 系列的 ExpressFabric 技术平均提高 30% 的性能，这大约相当于两个速度等级。

Virtex-5 系列是高性能设计的选择平台；其逻辑结构和硬 IP 模块可以在 550 MHz 时钟速率下运行。例如，其逻辑结构中的许多功能都有能力在这一时钟速率下运行，如计数器、加法器以及 LUT 结构的存储器 (RAM/ROM)。硬 IP 模块（存储器 and DSP）也是为了在同样速度下运行而设计的。

ExpressFabric 技术

新型 ExpressFabric 技术以使用对角对称互连模式的 6 输入 LUT 架构和布线为基础。

6 输入 LUT 架构

查找表 (LUT)、特别功能（如进位链和专用复用器）和触发器 (FF) 的组合以及连接这些元件的方法决定着实现逻辑及算术功能的性能和效率。

Virtex-5 系列 ExpressFabric 技术是在 Xilinx 多年经验的基础上演进的一步。自从二十世纪八十年代中期推出和生产第一款 FPGA 以来，大多数 FPGA 都是以相同的基础架构为基础，即 4 输入 LUT。过去，所有 FPGA 的一个共同特点是，需要四个以上输入的功能必须使用若干 LUT 和 / 或复用器的组合才能实现。

Virtex-5 系列是第一个提供具有完全独立（非共享）输入的真正 6 输入 LUT 的 FPGA 平台。这一点带来了一些令人瞩目的优势。为了提高逻辑结构的性能，至关重要的是要通过 LUT 尽量缩短关键路径延迟。

LUT 的输入架构是决定性因素。65 nm 的 6 输入 LUT 实现了关键路径延迟与晶片设计尺寸之间的精妙平衡，如图 1 所示。

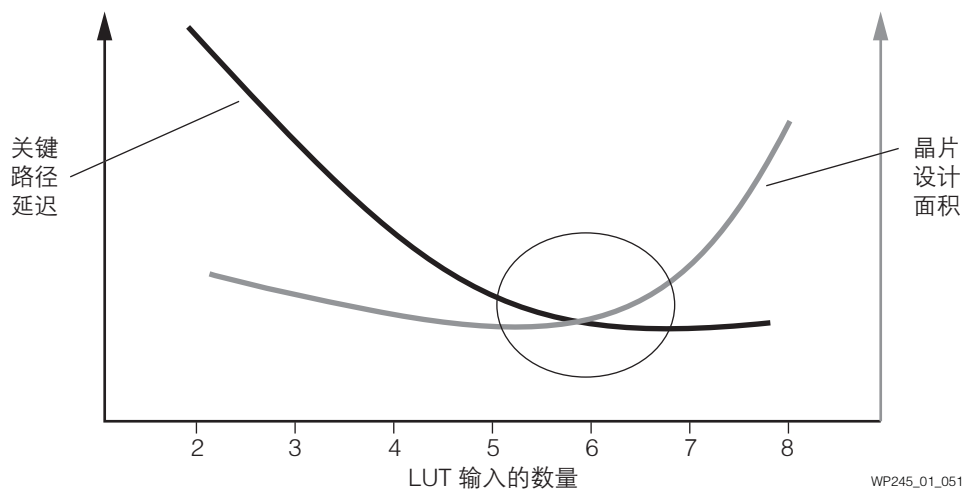


图 1: 实现 65 nm LUT 架构的精妙平衡

使用较宽的 LUT 输入，关键路径延迟缩短了，但在 6 输入以上 LUT 中，输入数越远离 6 的倍数，关键路径延迟就越大。另一方面，对于 6 输入以上 LUT 来说，由于宽输入 LUT 的使用效率低，晶片设计尺寸也增大了。

Virtex-5 系列在逻辑架构上也有所不同。表 1 概述了 Virtex-4 与 Virtex-5 系列可配置逻辑块 (CLB) 之间的区别。

表 1: Virtex-4 与 Virtex-5 CLB 逻辑资源对比

CLB	Virtex- 4 FPGA	Virtex- 5 FPGA
Slice 数	4 个	2 个
LUT 数	8 个	8 个
触发器数	8 个	8 个
时钟、时钟使能和复位数	各 4 个	各 2 个
分布式 RAM	64 位	256 位
移位寄存器长度	64 位	128 位
复用器	16 选 1	2 个 16 选 1

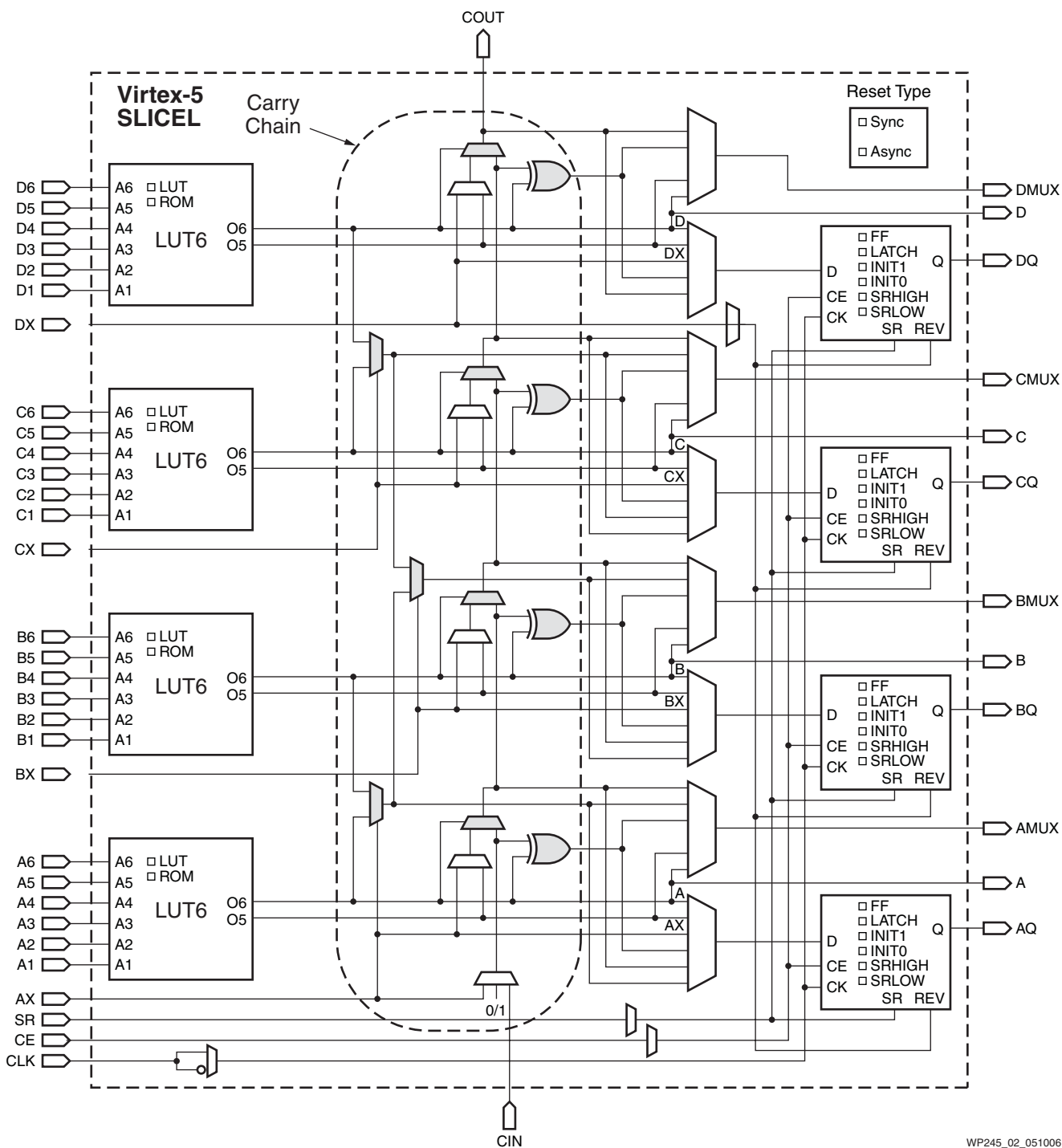
为了更好地理解新 Virtex-5 系列架构引入的变化，有必要简要概述 Virtex-4 的架构。

Virtex-4 系列的基本逻辑元件由一个 4 输入 LUT 和一个触发器及其他元件（如一个功能扩展器和一个算术单元）组成。功能扩展器的作用是允许构建较大的 LUT 结构（如 5 输入或 6 输入 LUT）。在 RAM 模式下，Virtex-4 LUT 可实现一个 16 位存储元件和一个 16 位移位寄存器，甚至还能实现一个可以在运行中改变其内容的可加载 LUT。Xilinx FPGA 特有的这种分布式 RAM 模式可提供效率很高的小型存储器。

与过去的 Xilinx FPGA 系列一样，Virtex-5 SLICEL 可以用专用的进位链实现逻辑功能、寄存器和算术功能。请见图 2。

稍复杂的 SLICEM 增加了用 LUT 实现分布式 RAM 和移位寄存器 (SRL) 的功能。

新型 6 输入 LUT 另有一个输出端，可用来初始化进位链或者将 6 输入 LUT 变成两个共用输入端的 5 输入 LUT。请见图 3。



WP245_02_051006

图 2: Virtex-5 SLICEL 框图

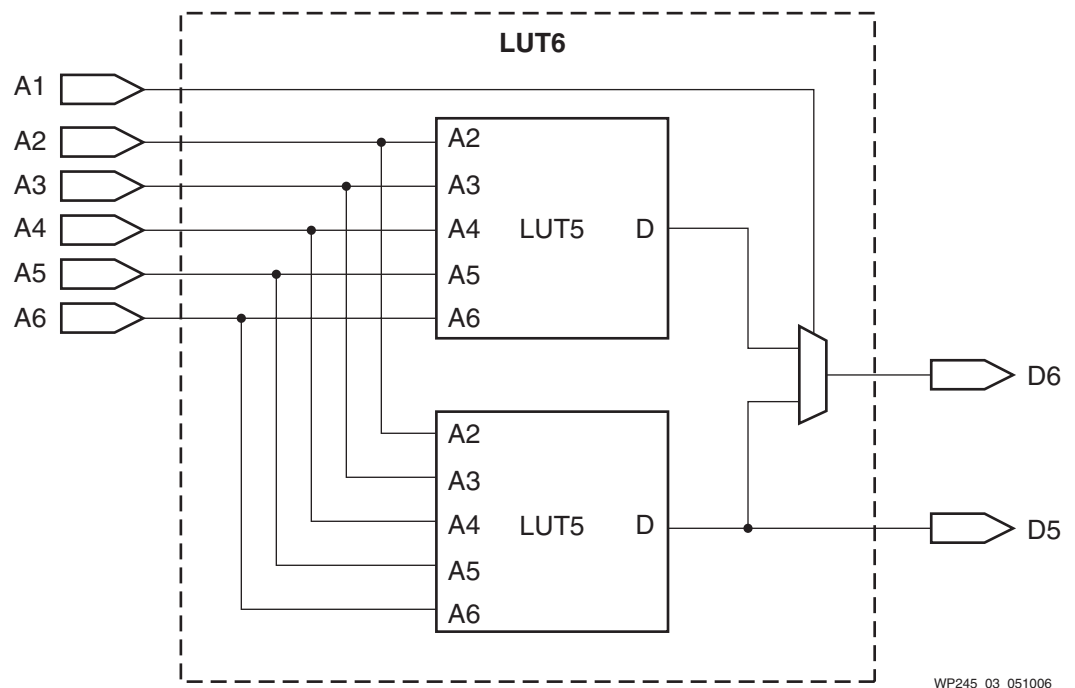


图 3: Virtex-5 的 6 输入 LUT 框图

6 输入 LUT 带来的几点好处:

- 由于它直接在 LUT 中实现较宽的功能, 使寄存器之间的逻辑级数减少, 从而提高了性能。
- 它实现的逻辑显著大于四输入 LUT。
- 较大 LUT 减少了所需互连 (布线资源) 量, 从而降低了功耗。

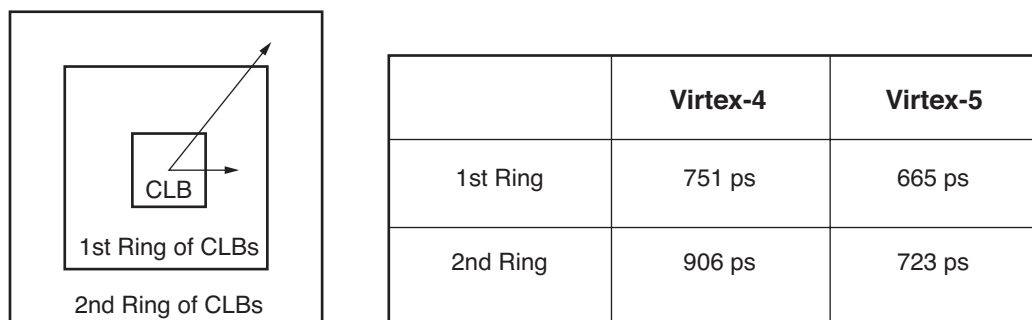
Virtex-5 系列 SLICEM LUT 还提供了其他好处:

- 分布式 RAM 的新长宽比: 每个 LUT 都可以配置成 64 x 1 或 32 x 2 分布式 RAM。给设计人员带来的好处是, 能够以高得多的密度和速度以及更大的灵活性实现分布式 RAM。
- 更长的 SRL 链: 一个 LUT 即可支持一个 32 位的 SRL。因此, 一个 Slice 即可实现一个多达 128 位的移位寄存器, 与过去的架构相比, 显著节约了面积并减少了布线资源。只有 Xilinx 器件中才有移位寄存器这种功能。Xilinx ISE™ 软件封装机自动封装两个共用寻址但不同数据的 16 位 SRL。换言之, 如果应用需要, 在一个 Slice 中即可实现 16 位长和 8 位宽的移位寄存器。

布线和互连架构

随着处理技术的进步, 互连时序延迟可占关键路径延迟的 50% 以上。专为 Virtex-5 系列开发的新型对角对称互连模式能以较少中继段到达较多地点, 从而提高性能。这种新模式允许在 2 到 3 个中继段之内制作更多逻辑连接。而且, 更规则的布线模式使 Xilinx ISE 软件可以更容易地找到最佳布线。所有互连功能对于 FPGA 设计人员都是透明的, 但却能转化为更高的整体性能和更容易的设计可布线性。从本质上说, Virtex-5 系列的互连模式可根据距离提供快速、可预见结果的布线。

图 4 比较了 CLB 中一个源寄存器引起的延迟，该 CLB 用于驱动一个 LUT，这个 LUT 与周边一个 CLB 中的另一寄存器封装在一起，其目的是衡量布线延迟增大对 Virtex-4 和 Virtex-5 系列两种架构的影响。



WP245_04_050106

图 4: Virtex-4 FPGA 和 Virtex-5 FPGA 的布线延迟比较

设计示例

下列示例详细说明了新型 6 输入 LUT 架构的优点。

复用器

最简单的示例之一是复用器。一个 4 输入 LUT 可以实现一个 2:1 的 MUX。具有两个以上输入的每种复用器都需要额外的逻辑资源。在 Virtex-4 架构中，一个 4:1 的 MUX 需要两个 4 输入 LUT 和一个 MUXF。现在使用新型 6 输入 LUT，用一个 LUT 即可实现这个 4:1 的 MUX。在 Virtex-4 器件中，一个 8:1 的 MUX 需要四个 LUT 和三个 MUXF。使用新型 Virtex-5 系列架构，只需要两个 6 输入 LUT，因而性能和逻辑利用率更高。请见图 5。

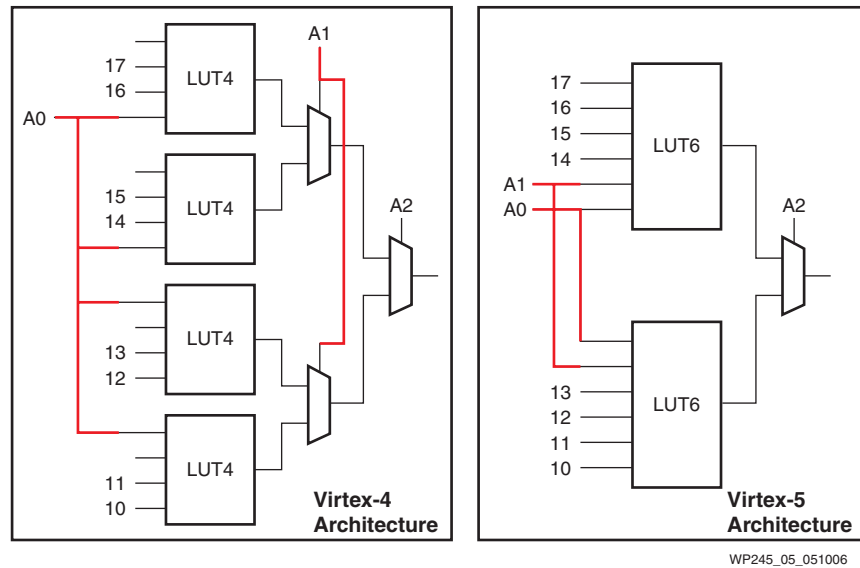


图 5: 用 Virtex-4 和 Virtex-5 架构实现 8:1 的 MUX

分布式 RAM 和移位寄存器

分布式存储功能 (LUT RAM) 从几个方面受益于较大的 LUT。新的长宽比可显著提高小型存储功能的封装密度，从而产生显著的性能效益。请见图 6。

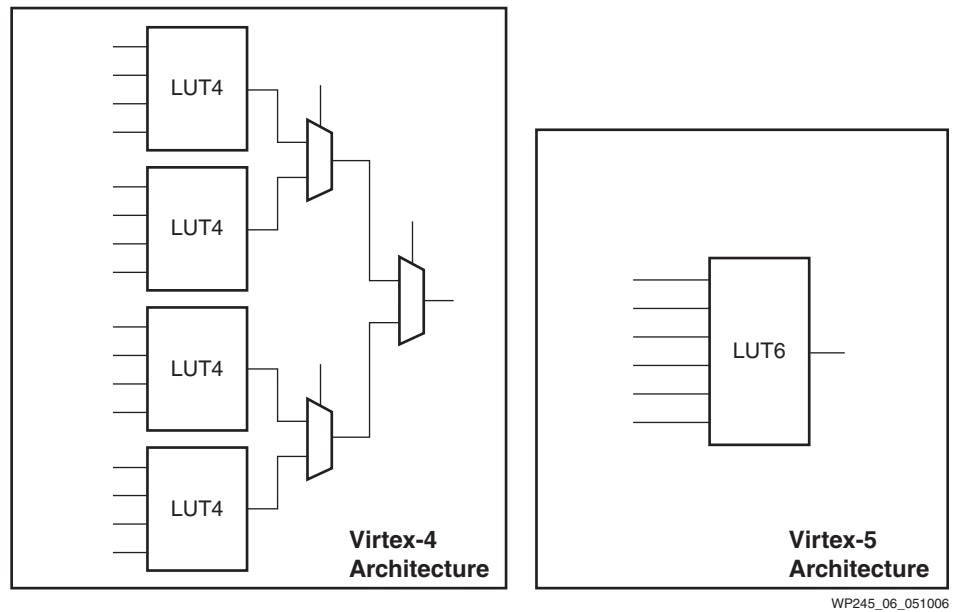


图 6: 在 Virtex-4 FPGA 和 Virtex-5 FPGA 中实现 64 位 LUT RAM

算术功能

在 Virtex-5 系列架构中实现的算术功能也有几项改进：

- 支持三进制加法（使用一个进位链）
- 复杂进位启动逻辑

- 用于初始化进位功能的“自由”地线或 V_{CC}

以路径延迟衡量的算术功能性能显著改善，如图 7 所示。

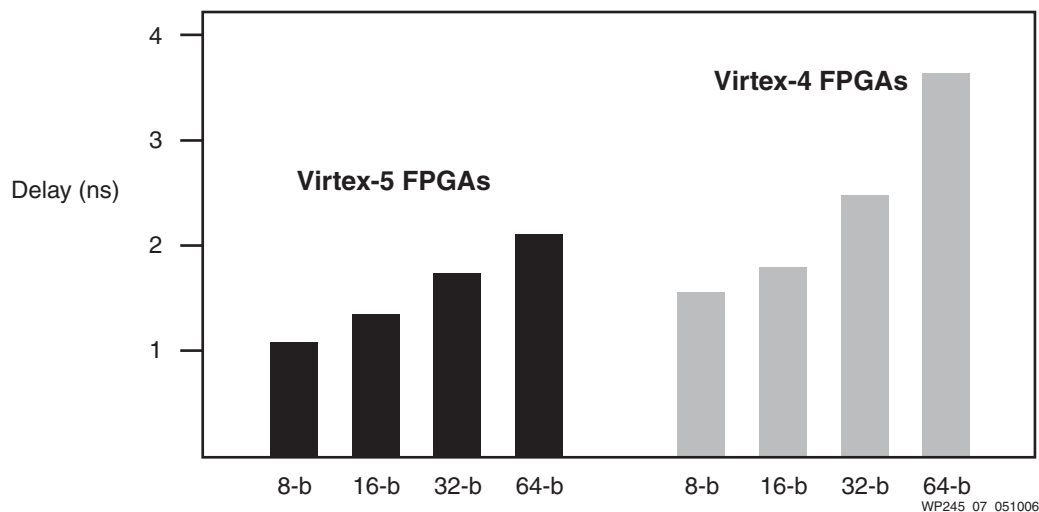


图 7: Virtex-4 FPGA 和 Virtex-5 FPGA 的多位加法器时序比较

功能模块的性能优势

表 2 所示为 Virtex-4 与 Virtex-5 系列之间的逻辑和算术功能性能比较。所示特性是针对各器件系列的最高速度等级。各设计是通过 ISE 8.1i 软件运行的。

表 2: 功能模块的性能比较

	Virtex- 4 FPGA	Virtex- 5 FPGA
6 输入功能 ⁽¹⁾	1.1 ns	0.9 ns
加法器, 64 位	3.5 ns	2.5 ns
三进制加法器, 64 位	4.3 ns	3.0 ns
桶式移位器, 32 位	3.9 ns	2.8 ns
幅值比较器, 48 位	2.4 ns	1.8 ns
LUT RAM, 128 x 32 位	1.4 ns	1.1 ns

注:

1. Virtex-5 FPGA 使用一个 6 输入 LUT；Virtex-4 FPGA 使用两个 4 输入 LUT

Block RAM

Virtex-5 系列的 Block RAM 基址大小已经从 Virtex-4 系列的 18 Kbit 增加到 36 Kbit。这就使得在 Virtex-5 器件中构建较大存储器阵列更为容易。另外，可以将 36 Kb 的 Block RAM 用作两个独立的 18 Kbit Block RAM；因此，构建多个 18 Kbit 的或更小的片上 RAM 阵列实质上不会有任何问题。

Virtex-5 系列的 Block RAM 可在简单双端口模式下运行，从而有效地加倍 Block RAM 的带宽。简单双端口模式允许将 Virtex-5 系列的 Block RAM 宽度扩展到 32 位以上，每个 Block RAM 可高达到 72 位。

新型（即增强）Block RAM 的功能包括：

- 带有可选纠错回写功能的集成 64 位 ECC
- 硬编码同步 FIFO 选项
- 支持 FIFO 可达单块宽度 72 位
- 双端口总宽度可达 x36
- 简单双端口宽度可达 x72
- Block RAM 中的新型电源管理电路：在每个 18K 的块内；如果使用 9K 或以下，另一半自动关闭（减少约 50%）
- 内建级联逻辑，允许将相邻的 Block RAM 级联成一个 64Kx1 的 RAM
- Block RAM 运行频率高达 550 MHz，可提供比 500 MHz 的 Virtex-4 FPGA 更高的性能水平

DSP

Virtex-5 系列采用了 DSP48E Slice，这种新型 DSP Slice 与 Virtex-4 FPGA 中的 DSP48 Slice 相比有重大提升：

- 增加了乘法器宽度：Virtex-5 的 DSP48E Slice 以 25 x 18 位的乘法器为基础（与 Virtex-4 器件中的 18 x 18 位形成对比）。增加到 25 x 18 位可以减少级联的级数，从而提高总体性能和使用率。

浮点运算是使用较强乘法能力的一种应用，这种运算使用 24 x 24 位的无符号乘法器进行单精度浮点乘法运算。两个 DSP48E Slice 构建一个 24 x 24 位无符号乘法器，这是 Virtex-4 DSP48 Slice 所需数量的一半。支持单精度浮点运算的实际上是两个 DSP48E Slice 所提供的 35 x 25 位能力的一个子集。在 Virtex-4 器件中，两个 DSP48 Slice 创建一个 35 x 18 位乘法器；而四个 DSP48 Slice 创建一个 24 x 24 位无符号乘法器，其中一个 24 x 24 位无符号乘法器是一个子集。

- 独立的 C 寄存器：在 Virtex-5 器件中，可用于 DSP48E Slice 的信号数量增加了，因而允许使用独立的 C 寄存器。这使 DSP 算法更为灵活且更容易实现。
- 逻辑单元的功能性：在 Virtex-5 器件中，加法器的级已经扩展到可以支持逻辑功能。所支持的部分逻辑功能有：按位“异或”功能、按位“异或非”功能、按位“与”功能以及当第一级乘法器旁路时的按位“非”功能。
- 运行频率高达 550 MHz 的 DSP48E Slice：可提供比 500 MHz 的 Virtex-4 FPGA 更高的性能水平。

并行 I/O

使 FPGA 实现高速内部运行只完成了任务的一半。最高系统性能需要 FPGA 与其他系统组件之间的高性能互连。

Virtex-5 系列的 SelectIO™ 技术包含 Virtex-4 器件中的许多热门功能，如支持单端与差分功能的 ChipSync™ 技术和数控阻抗 (DCI)。

增强项包括：

- 每插槽 40 个 I/O：这是从 Virtex-4 器件的每槽 64 个 I/O 减少后的数量，因此可以使间隔尺寸更小。

- 多达 1,200 个用户 I/O：其中每个 I/O 中都有 ChipSync 技术。
- ODELAY：在 Virtex-4 系列的 ChipSync 逻辑中，为便于时钟数据对齐，在所有输入端上都提供了可编程的 IDELAY 元件。在 Virtex-5 系列中，可对模块进行编程以提供输入或输出延迟。输出延迟对解决 PCB 偏移问题很有用。

Virtex-5 系列 I/O 的性能是单端每秒 800 Mb，差分每秒 1.25 Gb。

LVDS 带宽

借助其更高性能的差分 I/O 功能和更大的封装，Virtex-5 器件有能力实现每秒 $600 \times 1.25 \text{ Gb} = 750 \text{ Gb}$ 的流量。

存储器接口

每个 I/O 中内建的 ChipSync 技术使高性能存储器接口具有无与伦比的可靠性。它针对加大的设计余量提供了可调整的数据时钟校准，其分辨率为 75 ps。这种调整可以补偿系统变化，如处理过程、电压和温度的变化。

Virtex-5 器件可以为最新的存储架构实现更宽和更快的接口。请见表 3。

表 3: 存储器接口的带宽性能

存储器接口	数据速率 (Mb/s)	数据宽度 (位数)	带宽 (Gb/s)
DDR2 SDRAM	667	576	384
QDR II SRAM	600	2 x 324	389
RLDRAM II	600	648	389

性能增强技术

Virtex-5 FPGA 采用了一种低偏移、低抖动的 550 MHz 差分时钟结构，从而可确保时钟与数据信号的一致性。新型时钟管理模块将针对精密时钟合成的数字时钟管理器 (DCM) 与针对减少抖动的锁相环 (PLL) 结合起来，从而显著提高了灵活性。

由 ASMBL 专利技术和大量 PWR/GND 引脚促成的稀疏锯齿形 (Sparse chevron) 封装技术和倒装芯片组装技术，实现了封装和 PCB 电感最小化，从而提高了信号的完整性。片上有源信号终端技术为最佳化调整组件互连提供了数控阻抗 (DCI)，同时极大地降低了系统的组件数和成本。有关详情，请参阅白皮书 WP247 《Virtex-5 系列的先进封装》，网址是：

<http://www.xilinx.com/cn/bvdocs/whitepapers/wp247.pdf>。

较低的每兆赫功耗在您的功率预算内提高了性能。在利用 65 nm 技术降低动态功耗的同时，Virtex-5 FPGA 还用三栅极氧化层技术将静态功耗降至最低。有关详情，请参阅白皮书 WP246 《65 nm FPGA 功耗》，网址是：

<http://www.xilinx.com/cn/bvdocs/whitepapers/wp246.pdf>。

设计输入方法和性能基准测试

为了进一步评价 Virtex-5 系列的性能改进，我们用 ISE 软件实现了一组客户设计。最大的改进是在具有众多逻辑级数的设计上观测到的。与 Virtex-4 FPGA 相比，新型 ExpressFabric 技术将这些设计的性能提高了高达 58%。将所有设计考虑在内，性能平均提高了 30%，如图 8 所示。

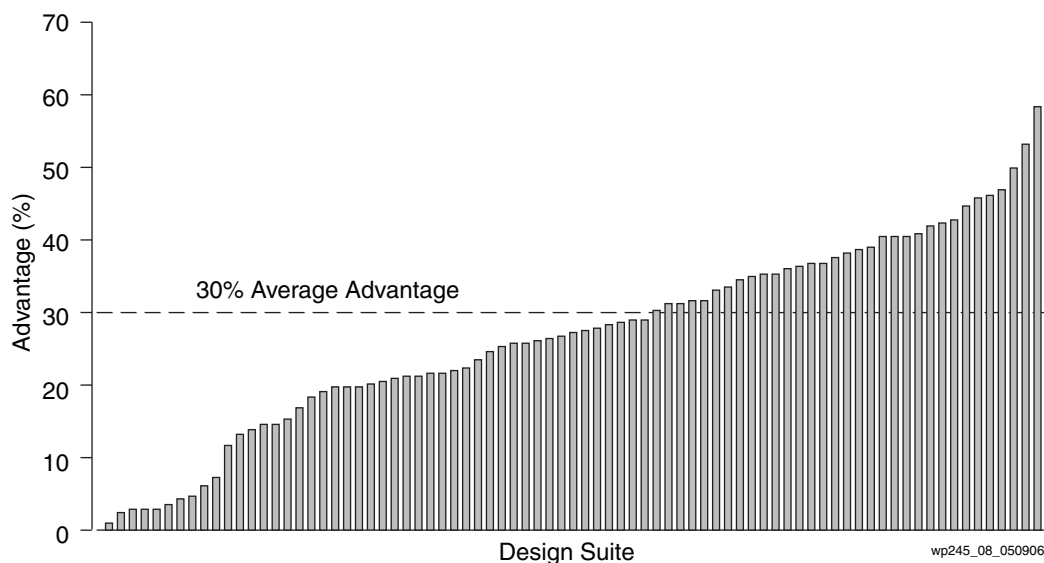


图 8: Virtex-5 FPGA 与 Virtex-4 FPGA 之间的逻辑性能基准测试结果对比

本对比中使用的所有设计都是基于 RTL (VHDL 和 Verilog) 的设计。其中几个包含了 CORE Generator™ 软件的 EDIF 格式网表，用来实现 FIFO 和存储器。

合成过程使用了 XST，然后运行了 ISE 布局布线，其难度等级设置为 HIGH。时钟约束以 5% 小量递增迭代收紧，直到出现负松弛。

有关如何达到最佳性能的详细信息和提示，请参阅白皮书 WP218 《在 Virtex-4 FPGA 中实现性能突破》的最后部分，网址是：

<http://www.xilinx.com/cn/bvdocs/whitepapers/wp218.pdf>。

结论

借助其新型 ExpressFabric 技术与其他较高性能的硬 IP 模块和 I/O 的紧密结合，与上一代架构相比，Virtex-5 系列表现出了显著的性能提升。

修订历史

下表说明此技术文档的修订历史。

日期	版本	修订
2006 年 5 月 12 日	1.0	Xilinx 最初版本。
2006 年 5 月 17 日	1.1	更新 “DSP” 部分。本修订版刊登在《FPGA 与结构化 ASIC》杂志上： www.fpgajournal.com 。
2006 年 7 月 7 日	1.1.1	进行版面改动。