

高频锁相环的可测性设计

可测性设计 (Design for Test, DFT) 最早用于数字电路设计。随着模拟电路的发展和芯片集成度的提高,单芯片数模混合系统应运而生,混合电路测试,尤其是混合电路中模拟电路的测试,引起了设计者的广泛关注。边界扫描是数字电路可测性设计中常用的技术,基于 IE EE1149 1 边界扫描技术。本文针对一款应用于大规模集成电路的 CMOS 高频锁相环时钟发生器,提出了一种可行的测试方案,重点讲述了锁相环的输出频率和锁定时间参数的测试,给出了具体的测试电路和测试方法。对于应用在大规模电路系统中的锁相环模块,该测试方案既可用于锁相环的性能评测,也可用于锁相环的生产测试。

1 锁相环结构及原理

本文所要测试的是用于大规模集成电路的锁相环时钟发生器,他是一款基于 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS 数字工艺设计的高频电荷泵锁相环 (Charge Pump Phase Locking Loop, CPPLL),最高输出频率达 1.2 GHz。

此锁相环的电路结构如图 1 所示,他包括输入分频器、鉴频鉴相器 (Phase Frequency Detect, PFD)、电荷泵 (Charge Pump, CP)、压控振荡器 (Voltage Controlled Oscillator, VCO)、环路低通滤波器 (Lowpass Filter, LPF) 和反馈分频器等基本单元。输入信号经过输入分频器分频为参考信号,压控振荡器的输出信号经过反馈分频器分频为反馈信号;参考信号和反馈信号在鉴频鉴相器中进行相位比较,得到相位差信号;电荷泵和低通滤波器将相位差信号转换为相应的电平信号;该电平信号控制压控振荡器的输出频率。通过反馈环路,最终达到相位锁定。锁定状态时,参考信号和反馈信号同频同相。

为了更好地抑制噪声,锁相环采用了差分的电路结构。其中,压控振荡器采用环形振荡器结构实现,主要由 3 个完全相同的延迟单元顺次连接而成。

2 测试方案

模拟电路传统的测试方法比较简单,将输入输出信号直接引出,检测输入信号对应的输出响应即可。随着工作频率的升高,封装管脚和引线寄生参数不容忽视,传统的测试方法也受到挑战。由于模拟信号的抗干扰能力差,轻微的扰动都可能会影响电路的性能,测试电路应该尽量简单,以避免引入不必要的噪声。

最高输出频率、输出频率范围和锁定时间等都是高频锁相环需要测试的重要性能参数。对于工作频率高达 GHz 的高频锁相环,显然难以采用传统的测试方

法来完成，需要进行专用测试电路设计，即在芯片内设计一定的测试电路以便投片后进行测试。

2.1 输出频率测试

作为时钟发生器，锁相环一般工作于整个电路系统的最高频率，而压控振荡器工作于锁相环的最高频率。如图 1 所示，锁相环的输出频率就是压控振荡器的工作频率，因此锁相环的输出频率测试实质上是对压控振荡器的最高振荡频率和振荡范围的测试。

由于输出管脚的引线存在寄生的电感电容，这些寄生参数容易引入较大的高频耦合噪声；高频信号经过这些引线输出到管脚通常会产生较大的衰减。因此，压控振荡器的高频输出信号很难引出芯片外直接测量。另一方面，高频信号的测试对测量仪器要求很高，测试板上的外加信号一旦经过高频通路耦合到电路内部，就会影响测试结果，甚至干扰电路的工作。

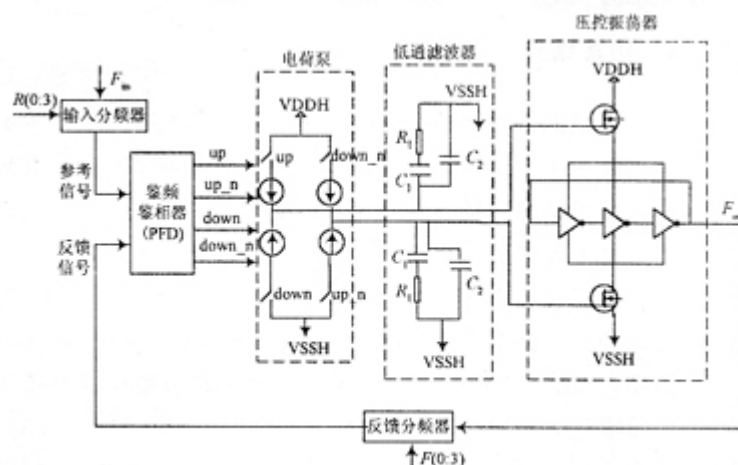


图 1 电荷泵锁相环结构框图

一种简单的测试方法就是将输出频率分频，通过测量分频后的频率 f_{out} 推算 VC O 的振荡频率。这种分频器测试方法比较简单，只需要在 VCO 的输出端增加输出分频器，检测降频后的信号频率，即可由公式：

$$f_{vco} = N \times f_{out} \quad (1)$$

推算出 VCO 的振荡频率。式中 N 为输出分频器的分频值。

按照分频测试的方法来测试，每次都必须在锁相环达到稳定的锁定状态时才能测量。GHz 高频锁相环的锁定时间一般为微秒量级，于是锁相环的频率测量通常需要几毫秒。对于电路测试来说，这是一个相对较长的时间。更为理想的

测试方法是尽量采用简单的硬件资源，在不影响电路性能的情况下，在较短的测试时间内完成测试。

边界扫描是目前大规模集成电路中常用的测试方法。IEEE1149-1 规范了边界扫描方法和指令。基于集成电路中常见的边界扫描单元电路，本文将介绍一种边界扫描的测试方案来测试锁相环。

如前所述，要测试的锁相环采用了环形 VCO 振荡器，环形 VCO 的振荡频率与

$$f_{vco} = \frac{1}{2 \times T_{delay}} \quad (2)$$

其中： T_{delay} 是环形振荡器的延迟时间； f_{vco} 是 VCO 的振荡频率。采用边界扫描电路测量出 VCO 模块的延迟 T_{delay} ，进而计算振荡器的工作频率。

VCO 的输出频率受控制电压的控制，可通过改变控制电压的大小并检测每个控制电压对应的 VCO 延迟，利用式 (2) 计算输出频率，最后得到输出频率范围。

这种方案将闭环电路的频率测量转换成开环电路的延迟测量(通常该延迟为纳秒量级)，时间的节省将非常可观。同时，已经成熟的边界扫描技术，并不会增加太大的设计难度和测试复杂度，对设计者和测试者来说，只需遵照一定的规范完成即可。采用标准的边界扫描单元，硬件的开销也不大。对大规模集成电路中的锁相环电路，采用边界扫描测试方案显然优于前一种分频测试方案。

2.2 锁定时间测试

锁相环的锁定时间是锁相环的重要指标。如何判断锁相环已经达到锁定状态以及锁定时间的计算也是锁相环要测试的内容。

根据锁相环的原理，锁相环的重要功能就是锁定相位。电路锁定时，鉴频鉴相器的 2 个输入信号：参考信号和反馈信号相差为 0，鉴频鉴相器输出无效电平，电荷泵开关处于开启状态，VCO 的控制电压保持恒定。因此，参考信号和反馈信号、鉴频鉴相器的输出信号、VCO 的控制电压等都可以作为电路锁定的判别依据。本文选取了 VCO 的控制电压作为判断依据，当 VCO 的控制电压稳定时，锁相环就达到锁定状态。锁定时间即电路从失锁状态到锁定状态的时间，VCO 的控制电压从最初的不稳定状态到稳定状态的时间差就是锁相环的锁定时间。

3 测试电路实现

3.1 测试电路

按照边界扫描测试方案设计的测试电路如图 2 所示。针对差分结构锁相环，在电路中相应地采用了 2 个边界扫描单元。边界扫描单元用于检测 VCO 的延迟，根据该延迟可推算 VCO 的振荡频率。利用 VCO 的 2 个控制信号 Vctl 和 Vctl_n 可以完成输出频率范围和锁定时间的测试。

在压控振荡器的控制信号处设置开关，开关闭合时，锁相环处于正常工作模式；开关打开时，锁相环处于测试模式。在测试模式时，Vctl 和 Vctl_n 是输入信号，控制 VCO 的振荡频率，同时利用边界扫描单元测量振荡频率，调整输入控制电压的大小，就能测量 VCO 的振荡频率范围。正常工作模式时，Vctl 和 Vctl_n 是输出信号，其电压值就是电路正常工作时 VCO 的控制电压，测量该信号就能推算锁相环实际的输出频率大小和范围。

锁定时间的测试必须要求电路完成锁定过程才能测量，因而相对较慢。在电路正常工作时，VCO 的控制信号 Vctl 和 Vctl_n 是输出信号，观察该信号是否稳定就能判断环路是否达到锁定状态。测量控制信号从不稳定到稳定的时间差就是锁相环的锁定时间。

3.2 边界扫描电路

边界扫描单元电路如图 3 所示。Vvco 是 VCO 的输出信号，Vvco_intest 是边界扫描的测试矢量输入，test_vco 是 VCO 的测试模式选择信号，shift_DR，clk_DR，update_DR 都是边界扫描单元要求的时钟或控制信号。这些信号与集成电路中的边界扫描控制信号配合使用即可。相应另一个边界扫描单元的信号也与此类似，只是 VCO 的输入输出取相反信号。

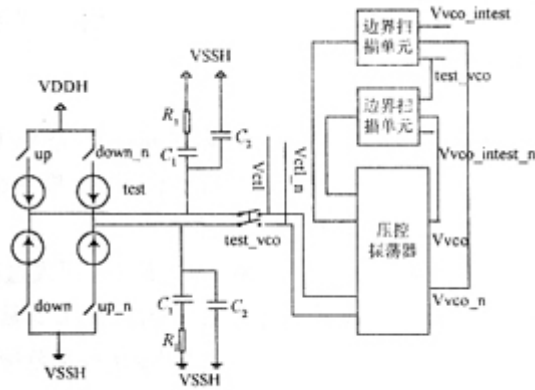


图2 测试电路图

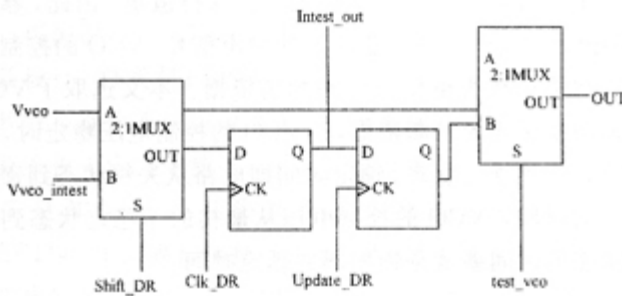


图3 边界扫描单元电路图

锁相环正常工作时，边界扫描只相当于一根连线；在测试模式时，VCO 的振荡环路被打开，测试信号从边界扫描电路输入，经过 VCO 后再从输出端输出，检测这些信号在 VCO 内部的延迟 T_{delay} ，就能推算出 VCO 的振荡频率。该延迟是 VCO 控制电压的函数，扫描控制电压的值就可得到 VCO 的工作频率和振荡范围。

边界扫描单元的工作用 IEEE1149.1 标准中的 Intest 指令来完成。Intest 指令借助于一个测试矢量来进行内部扫描测试。一旦该指令被装载到指令寄存器，测试矢量信号（VCO 的输入信号 V_{vco_intest} 和 $V_{vco_intest_n}$ ）就被存储于边界扫描单元中的扫描寄存器，经过各级延迟在 VCO 输出端输出 [2]。

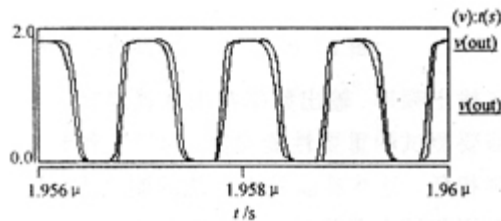


图4 增加测试电路前后仿真波形图

4 仿真结果

理想的测试电路既可以有效地测试电路性能又不影响电路的正常工作。锁相环作为时钟发生器，需要给大规模电路提供稳定的时钟信号，因此影响锁相环性能的测试方案是不可取的。

为了检测本文所述的边界扫描测试方案的有效性，对增加测试电路前后的锁相环电路网表分别进行了 Hspice 仿真，如图 4 所示的波形是增加测试电路前后锁定时锁相环的输出波形图。

由图 4 看到，对 1 GHz 的高频输出，增加测试电路后信号周期没有明显变化，经测量两者最大相位差为 25 ps。由测试电路仿真结果可以看出，该测试方案对原锁相环的功能特性影响不大，是有效可行的。

5 结语

本文将基于 IEEE1149.1 标准的边界扫描技术应用于模拟电路可测性设计中，对一款高频锁相环提出了测试方案，并给出了相应的测试电路。并对采用该方案进行测试的高速锁相环在增加测试电路前后电路的仿真结果进行了比较。结果表明，本文所提出的高频锁相环测试方案对锁相环本身的功能影响很小。

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>