

提高硅微谐振系统性能的一项有效措施

夏敦柱, 王寿荣, 周百令

(东南大学仪器科学与工程系, 南京 210096)

【摘要】 介绍了硅微谐振器系统的工作原理, 重点给出了一种基于新型的 DDS 器件 AD9954 的智能谐振系统设计与实现。详细分析了 AD9954 作为智能精密驱动源的粗扫搜索两种阶段工作流程并给出与 DSP 器件的数字接口技术。结合实验数据和扫频曲线, 得出在不同真空度环境下谐振器的两种扫频结果, 并对谐振系统的工作情况给予评价。

【关键词】 直接数字合成 (DDS); 硅微谐振器; AD9954; 数字信号处理 (DSP)

【中图分类号】 U666.1 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1009-1742(2006)10-0071-04

1 引言

硅微型静电梳状驱动谐振器是各种微惯性仪表中的核心部件^[1], 其工艺与微机械加工技术兼容。谐振器的频带宽度窄, 横向驱动阻力小, 而品质因素高, 是一种常见的机电系统的理想组成部件。用它实现的惯性仪表正愈来愈广泛地应用于航天测控和车载导航系统中。由于它的工作机理是静电驱动, 且谐振器的工作稳定性直接关系到惯性仪表的精度, 所以在检测极微小电容的情况下, 对谐振器的驱动源提出了非常高的要求。设计了多种驱动源并对其性能进行比较之后, 发现经典的文氏桥振荡器和模拟集成芯片 XR2206 等产生的正弦信号频率和幅度稳定性较差, 使用自动增益控制 (AGC) 技术也不能保证两者都能满足指标要求。后来采用了数字技术的脉宽调制 (PWM) 技术和晶振分频滤波法。PWM 技术采用 TI 公司的 2X 系列的 DSP 专用接口进行编程实现, 再通过高阶低通滤波器处理, 频率得到稳定, 但幅度稳定性很不理想; 晶振分频滤波法产生的正弦信号虽然频率稳定, 但是幅度稳定性不理想, 且容易出现谐波失真, 甚至出现时钟噪声和波形畸变的现象。采用 AD 公司最新

的集成 DDS 芯片 AD9954^[2] 来构建高性能的驱动源, 能保证谐振器稳定地工作。

2 硅微谐振系统结构

硅微谐振闭环系统的框图如图 1 所示, 当 DDS 芯片 AD9954 信号合成器产生一个初始的稳频稳幅的正弦信号和参考直流信号共同施加到硅微谐振器的两侧驱动电极上, 由于存在静电力矩的作用导致 MEMS 谐振器发生同频振动。此时微弱信号提取模块将位移电流检测出来并放大到适当的程度, 再通过相关检测方法将振动幅度解调出来。经过高精度的 A/D 转换器将转换的结果送到 DSP 处理器, 由 DSP 处理器根据谐振器响应曲线进行算法搜索, 计算下一步 DDS 发生器应该产生的信号频率。如此闭环控制, 最终找到谐振器的最佳工作点——最大谐振点处, 系统工作稳定于一个平衡状态。对数字信号处理 (DDS) 输出变频信号的过程中, 要始终保证输出的幅度恒定。该系统中采用 AGC, 可以使幅度精度控制在 0.1 mV 左右, 完全满足系统检测精度的要求。该系统的微弱信号检测采用低漂移低噪声的电荷放大器^[3]。位移信号的相关检测采用稳幅开关解调方案, 这比用乘法器解调方法的精度

【收稿日期】 2005-10-05; **修回日期** 2005-12-28

【基金项目】 “八六三” 国家高技术研究发展计划资助项目 (2002AA812038); “十五” 计划国防预研资助项目 (41308050109)

【作者简介】 夏敦柱 (1978-), 男, 南京市人, 东南大学博士研究生

要高得多。A/D 转换器使用 16 b 的 AD677，它与 DSP 的接口方便连接，而且控制速度和精度均能满足实验要求。

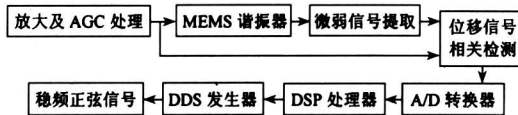


图 1 硅微谐振闭环系统驱动框图

Fig.1 Micro-silicon resonator closed loop driving system frame

3 基于 AD9954 的系统工作原理

AD9954 通过采用相位累加循环查固定 COS 函数表的方法，将 COS 函数值通过内置高速、高

性能的 14 b D/A 转换输出，实现数字编程控制的高精度频率合成器，产生高达 200 MHz 的正弦波，并通过低通滤波反馈回内置超高速比较器，产生同频的方波，这些信号都可以作为硅微谐振器的驱动源；同时，AD9954 内含 1024 × 32 b 静态双向 RAM，利用该 RAM 实现高速调制，并支持几种扫频模式，AD9954 还提供自定义的线性扫频操作模式（区别于 RAM 方式）。AD9954 内部总共有 11 个 32 B 的寄存器，地址编号分别从 0x00 号到 0x0B 号，它们的功能映像与工作模式有关。通过 AD9954 的串行 I/O 口输入控制字可实现快速变频且具有良好的频率分辨率和幅度输出稳定性。

AD9954 的工作模式如表 1 所示。

表 1 AD9954 的工作模式表

Table 1 Working mode table of AD9954

模式名称	实现功能	模式控制位
单一模式	默认方式，输出单一频率信号	CFR < 31 > = 0: 启动 RAM 工作方式, RSCW < 7:5 > = * * *
直接切换	可以实现多进制 FSK 和 PSK 调制	CFR < 31 > = 1: 启动 RAM 工作方式, RSCW < 7:5 > = 000
RAM 控制操作模式	上斜坡	从任选内存段首地址到末地址，按扫描定时器间隔逐一装载频率字（单向一次）
	双向斜坡	通过控制方位实现从内存段首地址到末地址及其反方向的扫描，且可以被中断反向
	连续双向斜坡	从任选内存段首地址到末地址之间，循环往复按扫描定时器间隔逐一装载频率字
连续循环	从任选内存段首地址到末地址，按扫描定时器间隔逐一装载频率字，并且循环单向	CFR < 31 > = 1: 启动 RAM 工作方式, RSCW < 7:5 > = 100
线性扫描方式	一般线性扫描	检测 PS < 0 > 高电平时，上斜坡按 Δf_1 从 FTW0 增频至 FTW1，然后等待 PS < 0 > 为低电平下斜坡按 Δf_2 从 FTW1 减频至 FTW0
	特殊线性扫描	检测 PS < 0 > 上升沿，上斜坡按 Δf 从 FTW0 增频至 FTW1，然后跳回 FTW0 等待 PS < 0 > 上升沿再次触发

说明：CFR < n > 表示 CFR（地址为 0x00 的寄存器）的第 n 位。RSCW # < m:n > 表示 RSCW #（地址为 0x07 - 0x0A 的寄存器）的第 n 到 m 位。

该系统中 AD9954 的工作方式主要分为粗扫描阶段和精搜索阶段，如图 2 所示。

1) 粗扫描阶段

当硅微谐振器的工作谐振频率未知的情况下，仅仅根据机械设计和加工理论值估算确定硅微谐振器的谐振频率范围，首先将 AD9954 设定在 RMA 控制操作模式中的上斜坡模式，将频率范围进行较大频率间隔离散化，频率间隔 ΔF 取值可在几赫兹至几十赫兹之间，RAM 的存储空间最大为 1 024 个 32 b 频率控制字，

$$\Delta F = 1024 \Delta f,$$

扫频范围可达几百赫兹；将这些离散频率按顺序写

入到 AD9954 的 4 个内存段中。然后启动 RAM 工作方式，同时 DSP 对振动幅度信号进行检测并做同步记录。这样，当 4 个内存段存储的频率字从首地址到尾地址被扫描完毕后，一条大致的谐振响应曲线就显现出来，接着需要对响应数据进行分析处理，判断最高峰值频率点所在的局部频率区。根据经验曲线知道，有的谐振器存在加工缺陷，可能含有若干个不等峰点，需要划分为若干个局部区间再作进一步处理，该阶段的操作流程见图 2a。

2) 精搜索阶段

在粗扫描阶段找出峰值点所在的局部频率区后，需要将 DDS 的工作模式由 RAM 上斜坡模式切

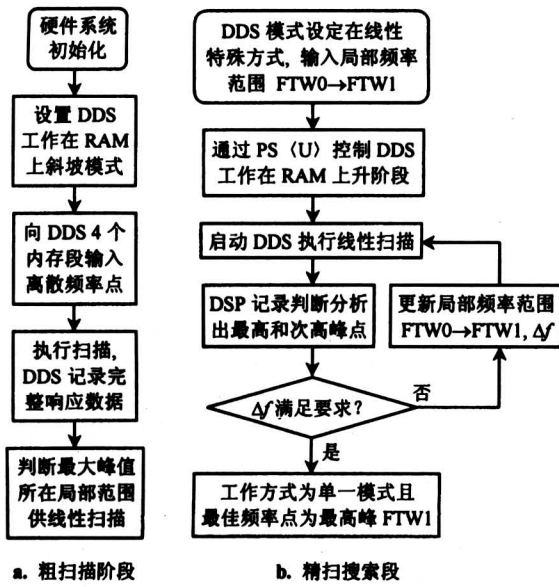


图 2 DDS 扫描工作流程

Fig.2 Sweeping working flow of DDS

换至线性特殊方式，同时需要向地址为 0x04, 0x06 的寄存器单元分别写入初始频率字 FTW0 和末尾频率字 FTW1，再在地址为 0x07, 0x08 寄存器单元分别写入下降频率间隔 Δf_{fall} 、下降定时时钟数 ΔT_{fall} 和上升频率间隔 Δf_{rise} 、上升定时时钟数 ΔT_{rise} 。取 $\Delta f_{fall} = \Delta f_{rise} = \Delta f$ ，则 $\Delta T_{fall} = \Delta T_{rise}$ ；实际操作中主要控制 DDS 工作在上升阶段，通过控制 AD9850 的 PS <0> 引脚的输入电平来确定频率扫描的斜率极性。

在执行 DDS 扫频过程同时，DSP 需要记录谐振器响应幅度，判断初始频率字 FTW0 和末尾频率字 FTW1 之间的最高频率和次高频点。然后判断 Δf 是否满足要求。如果 Δf 间隔较大，可以进一步缩小 Δf ，再将上面获得的最高频率和次高频点分别作为新的初始频率字 FTW0 和末尾频率字 FTW1 再进行新一轮的线性扫描。如此往复操作，直至 Δf 达到要求的精度为止。该系统最终的 Δf 取 0.1 Hz。通过粗扫描阶段和精搜索阶段的操作， Δf 分别取 50 Hz→2 Hz→0.1 Hz，通过 3 个阶段的处理最终获得系统最佳谐振点。该方法能优化智能搜索且扫描速度快，充分发挥基于 DSP 和 DDS 技术相结合的优点，该阶段的操作流程见图 2b。

4 AD9954 与 DSP 的硬件接口

在 TMS320C5416 与 AD9954 的串行接口中^[4]，选择 DSP 的片内 McBsp0 作为连接方式，AD9954 作

为从器件，DSP 作为主器件。AD9954 的串行操作分为指令阶段和通信阶段，指令阶段用来指定对某个寄存器进行读或写的操作。其规定的指令字格式如表 2 所示。

表 2 AD9954 规定的指令格式表

Table 2 Command format table of AD9954

MSB	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	LSB
R/W	X	X	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀
读或写	无关		被操作的寄存器地址				

在通信阶段，DSP 需要根据被操作的寄存器或 RAM 的实际大小，连续读或写若干个 8 b 字节的数据。而且每个字节中的每个位都是在 SCLK 的上升沿有效，MSB 和 LSB 的先行顺序由 DDS 的控制位 CFR1 <8> 决定。连接图和工作时序如图 3 所示。

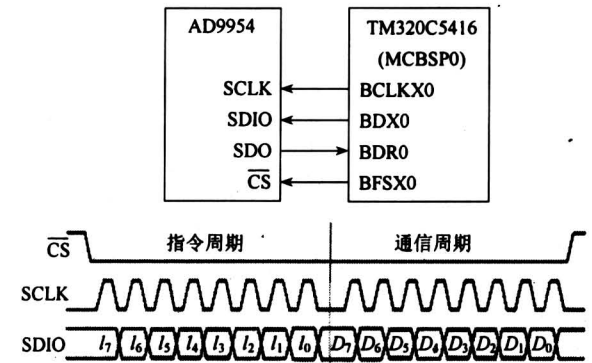


图 3 DDS 串口连接图及操作时序

Fig.3 DDS serial bus interface and timing graph

5 实验结果及结论

在不同真空度下基于 DDS 器件 AD9954 的硅微谐振系统的扫频曲线如图 4 所示，最终高精度地收敛到最大谐振点。

图 4a 和图 4b 分别是该系统对 45 号硅微谐振器在不同真空度下扫频的结果。可以发现，在空气状态下，DSP 扫描处理后的曲线反映谐振器的 Q 值较低，约为 100，而且出现若干拐点和不等峰点；在真空度为 100 Pa 的情况下，系统扫描记录拟合后的曲线表明谐振器的 Q 值非常高，约为 3 000，且峰点单一。综上所述，在扫描的粗阶段时，需要对空气中进行多个局部扫描，防止遗漏真实的峰点。

基于新型高性能 DDS 器件 AD9954 的硅微驱动器智能驱动源，可以方便地实现对微惯性器件中的谐振传感器部件的驱动和测试，与传统的人工干预

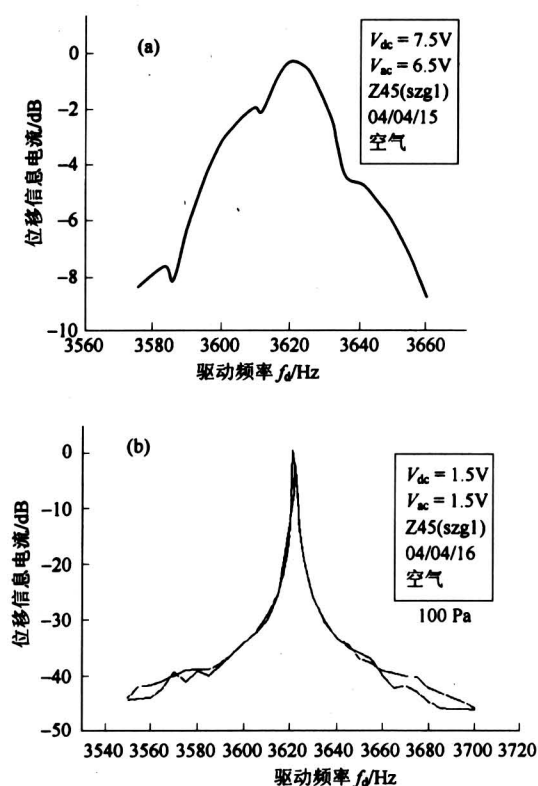


图 4 谐振器在不同真空度环境下的扫频曲线

Fig.4 The sweeping curve of resonator in different vacuum circumstance

方法相比具有明显的优势。

6 结论

通过实验可得出：

1) 采用高性能 DSP 芯片作为控制核心器件，使扫频过程快捷，能充分发挥其可编程易实现算法的重要特点。

2) 充分利用集成化的 DDS 芯片 AD9954，采用多种智能优化的分阶段扫频方式，有利于驱动信号频率的数字化和高精度可调，而且与 DSP 的接口容易实现，大大提高了搜索的智能程度。

3) 在进行搜频算法的研究过程中，针对不同真空度环境提出使用相应的方法，使搜索过程准确有效，在一定程度上保证了系统的精度和缩短了搜索时间。

参考文献

- [1] 王寿荣. 硅微型惯性器件理论及应用 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2000
- [2] Analog Devices Inc. 400 MSPS 14-Bit, 1.8 V CMOS Direct Digital Synthesizer, Data Sheets [M]. Analog Devices Inc, Norwood, Mass, American, 2003
- [3] 李万玉, 阮爱武, 罗晋生, 等. 硅微机械陀螺接口检测技术的研究 [J]. 微电子学, 1999, 29 (5): 344 ~ 346
- [4] 张玉梅. 基于 DSP 和 DDS 的高精度频率信号源实现 [J]. 电子工程师, 2004, 30 (1): 43 ~ 45

An Effective Method for Improving Silicon Micro-resonator System Performance

Xia Dunzhu, Wang Shourong, Zhou Bailing

(Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] The working principle of silicon micro-resonator system was firstly introduced. An intelligence silicon micro-resonator system design and realization was presented in focus. Its two step working flows for roughness and fineness searching and digital interface technology were analyzed in detail. Combined with experimental data and sweeping curve, two different searching results came out under different vacuum circumstance and its working performance was well evaluated.

[Key words] direct digital synthesis (DDS); silicon micro-resonator; AD9954; digital signal processing