

文章编号: 1671-7449(2003)02-0165-05

嵌入式石英晶体网络分析仪的设计和实现

杨 军, 张其善, 吴今培

(北京航空航天大学 电子工程系, 北京 100083)

摘 要: 石英晶体元件参数测量的原理以及一种测量频率可达 200 MHz 的嵌入式石英晶体网络分析仪的原理和设计, 并利用 GPS(全球定位系统) 高精度的授时信号作为频率校准信号。

关键词: 测量; 石英晶体; PI 网络; 全球定位系统

中图分类号: TN384 文献标识码: A

Design and Completion of Quartz Resonator Network Analyser

YANG Jun, ZHANG Qi-shan, WU Jin-pei

(Dept. of Electronic Engineering, BeiHang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The principle of parameter measurement of quartz resonator and the design of quartz resonator network analyzer up to 200 MHz by the use of a PI network is introduced. Two measurement methods for quartz resonator, impedance meter and PI network, are introduced. Taking the precise global positioning system (GPS) as frequency calibration, frequency is calibrated.

Key words: measurement; quartz resonator; global positioning system

石英晶体元件是现代电子技术领域中一种应用最广泛的基础元件之一。石英晶体具有压电效应, 加在它上面的电能与机械能可相互转换而形成周期性的振荡现象^[1]。对于某一块具有一定尺寸和切割方法的石英晶体片, 上述的电-机械能转换现象仅在某一频率上表现得最为强烈, 此时, 转换过程中的能耗最小, 晶体在该频率下作周期性的振荡。与其他电子元件相比, 压电石英晶体还有着很高的频率稳定性和极高的品质因素。频率高度稳定的石英晶体已被广泛应用于通信技术、测量技术、计算机技术和石英钟表制作技术等领域, 它可为各种应用提供精确定时或时钟基准信号。在通信技术领域, 对工作频率高、频率稳定性高的石英晶体元件的需求正不断增长。生产高精度的高频石英晶体元件需要相应的测量仪器, 目前国内所用的测量晶体的仪器只能测量频率较低的石英晶体元件, 而国外产品价格昂贵, 因此急需研制自己的石英晶体网络分析仪。

1 石英晶体元件的参数及测量方法

1.1 石英晶体元件参数定义

石英晶体元件的等效电路如图 1 所示。它是一个在谐振频率附近具有与石英晶体元件相同阻抗特性的电路, 通常用一个电感、电容和电阻作串联臂, 再与石英晶体元件两端电容并联表示^[2]。串联电路参数电感、电容和电阻分别以 L_1 , C_1 , R_1 表示, 并电容(静电容)以 C_0 表示。与石英晶体特性有关的参数有

* 收稿日期: 2002-10-21
作者简介: 杨 军(1970—), 男, 硕士, 主要从事通讯与信息系统的研究。

以下几点.

1) 谐振频率(f_r)

在规定条件下, 石英晶体元件电气阻抗为电阻性的两个频率中较低的一个频率.

2) 串联谐振频率(f_s). 石英晶体元件等效电路中串联臂电抗最小时的频率

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad (1)$$

3) 反谐振频率(f_a)

在规定条件下, 石英晶体元件电气阻抗为电阻性的两个频率中较高的一个频率. 反谐振频率也称并联谐振频率

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_1 C_0}} \quad (2)$$

4) 负载谐振频率(f_L)

在规定条件下, 晶体元件与一负载电容相串联或并联, 其组合阻抗呈现为电阻性时两个频率中的一个频率. 在串联负载电容时, 负载谐振频率是两个频率中较低的那个频率; 在并联负载电容时, 负载谐振频率则是其中较高的那个频率. 对于某一给定的负载电容(C_L), 实际这两个频率是相等的, 即

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_0 + C_L}{L_1 C_1 (C_0 + C_L)}} \quad (3)$$

5) 并电容(C_0)

等效电路中与串联臂并接的电容, 也称静电容.

6) 动态电容(C_1)

等效电路中串联臂里的电容.

7) 动态电感(L_1)

等效电路中串联臂里的电感.

8) 动态电阻(R_1)

串联谐振频率下的等效电阻.

9) 谐振电阻(R_r)

石英晶体元件在谐振频率 f_r 时呈现的等效电阻.

10) 负载谐振电阻(R_L)

石英晶体元件在负载谐振频率 f_L 时呈现的等效电阻

$$R_L = R_1 \left(1 + \frac{C_0}{C_L} \right)^2 \quad (4)$$

1.2 基本参数测量原理

PI 网络法测量频率范围宽、精度高. 它是采用频率扫描的方法测量石英晶体元件的固有谐振频率, 该方法的频率测量可达 200 MHz, 串联谐振频率的测量不确定度在 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 以内, 串联谐振电阻的测量不确定度为 $\pm 2\% \sim \pm 5\%$. 所以 π 网络法成为 IEC(国际电工委员会)推荐的石英晶体元件电参数测量的标准方法. 因此我们采用 PI 网络法测量石英晶体元件. 国家标准 SJ/Z 9154.1-87 与 IEC-444 兼容, 本文以 SJ/Z 9154.1-87 提供的测量方法为例阐述石英晶体元件参数的测量原理, 测量原理如图 2 所示.

根据谐振频率的定义, 当石英晶体元件的电气阻抗为电阻性时的频率为谐振频率. 将石英晶体元件插入 PI 型网络的夹具中, 信号发生器产生的测量信号经功率衰减器, 由功率分配器分成两个通道, 插入石英晶体元件的 PI 型网络串接在其中的一个通道, 施加于晶体的激励功率由功率衰减器控制. 跨接于 PI 型网络的相位计指示晶体传输导纳的相位, 当两个通道的相位差为零时, 频率计所指示的频率就是石英晶体元

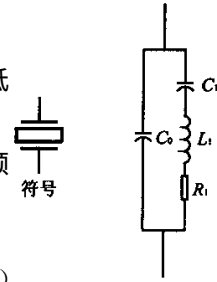


图 1 石英晶体元件等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of quartz resonator

件的谐振频率. 零相位是通过在 PI 型网络中插入一个基准电阻器而校准的, 由功率分配器分出的两个通道的电压读数可以计算谐振电阻. 由谐振频率和谐振电阻可计算出石英晶体元件的其他参数^[3].

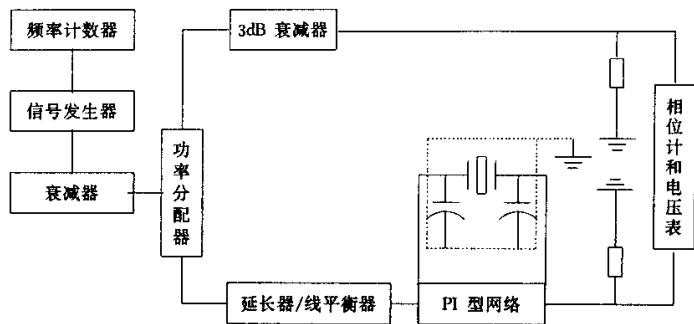


图 2 PI 型网络测量电路组成
Fig. 2 Block diagram of PI network measurement system

2 几种常用石英晶体元件参数测试仪器比较

2.1 晶体阻抗计

晶体阻抗计是确定石英晶体谐振器主模的谐振频率和等效电阻的最方便的仪器, 但它并不适用于确定非谐波及其他弱激励振动模的频率或等效电阻. 晶体阻抗计的测量适用于频率低于 60 MHz 的晶体测量^[1,4].

- 1) 晶体阻抗计的缺点: ① 不能测量 F_s (串联谐振频率); ② 不能直接测得 F_r (零相位时的谐振频率), 实际上在频率低于 60 MHz 的晶体, F_s 和 F_r 非常接近. F_L (负载谐振频率)的计算与 F_r 类似.
- 2) 晶体阻抗计的优点: 电路简单、成本低.

2.2 锁相环类型的 PI 网络测量系统

图 3 为锁相环类型的 PI 网络测量系统. 锁相环路相位为零时的频率, 即为 F_r .

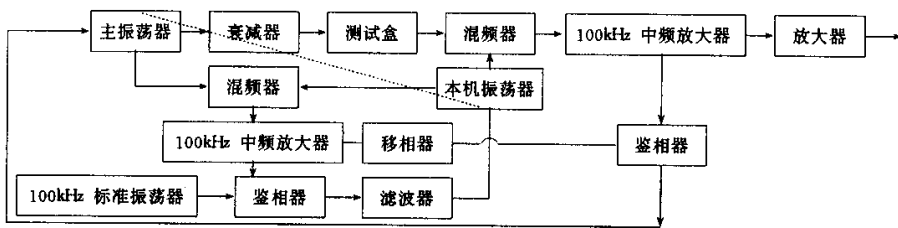


图 3 锁相环类型的 PI 网络测量系统
Fig. 3 The PI network measurement system with phase locked circuit

- 1) 优点: ① 该方法测量的 F_r 精度较高; ② 成本低, 测量频率可达到 200 MHz.
- 2) 缺点: ① 由于存在相位偏移, 计算负载谐振的频率的精度就会降低, 只能获得 CI 表的测量精度; ② 不能测量 F_s (串联谐振频率).

2.3 内置频率合成器和矢量电压表的 PI 网络测量系统

内置频率合成器和矢量电压表的 PI 网络测量系统如图 2 所示, 测量原理见 1.2.

- 1) 优点: ① 能全面的测量石英晶体元件的参数; ② 测量的频率范围最高可达 500 MHz; ③ 测量精度高、速度快.
- 2) 缺点: ① 电路复杂; ② 需要高精度的元件, 测量系统昂贵.

3 嵌入式石英晶体网络分析仪的原理和特点

3.1 嵌入式石英晶体网络分析仪的原理

嵌入式石英晶体网络分析仪采用石英晶体元件参数测量的电子行业标准(与 IEC-444 兼容)推荐的测量方法,即内置频率合成器和矢量电压表的 PI 网络测量系统(如图 2,图 4 所示)。嵌入式石英晶体网络分析仪的电路框图如图 4 所示。可编程的直接数字频率合成器 AD9852 生成测量所需频率的正弦信号,AD9852 的片内可编程的控制字由软件设置。生成的正弦信号经倍频器、衰减器分成两路,一路经测量石英晶体元件的 PI 网络测试头送入混频器的输入端,另一路直接送入另一混频器的输入端,这两路混频的本振信号由另一片 AD9852 和倍频器产生。两路信号混频后经中频滤波、中频放大、限幅输出,然后由相位检测电路,检测两路信号的相位差,同时两路中频放大的输出信号,通过一个 12 bit 的 A/D 转换,由软件读取两路信号的电平。当两路信号的相差为零时,由 AD9852 生成的正弦测量信号的频率即为晶体的谐振频率。这样,由测量的电平、频率可计算出被测石英晶体元件的各个参数。

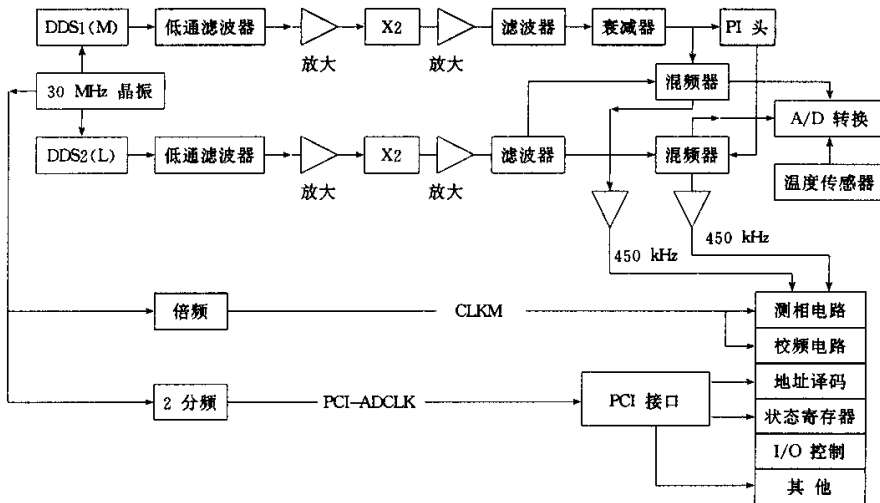


图 4 嵌入式石英晶体网络分析仪
Fig. 4 Quartz resonator network analyzer

3.2 嵌入式石英晶体网络分析仪的特点

嵌入式石英晶体网络分析仪是由计算机控制的石英晶体网络分析仪,能测量石英晶体元件的各种参数,分析石英晶体元件的特性曲线。测试过程由软件控制,可以实现单次测量、连续测量、查找频率和网络分析的功能,测量频率可达 200 MHz。嵌入式石英晶体网络分析仪能够测量十几种不同的晶体参数。

1) 嵌入式石英晶体网络分析仪采用 PCI 总线接口技术,PCI 总线是一种高性能 32 bit 或 64 bit 地址数据线复用的,总线时钟可高达 33 MHz 或 66 MHz 的总线,PCI 总线是目前最先进的接口总线,它是外围设备接口局部总线(Peripheral Component Interface)的简称^[5]。它的用途是在高度集成的外设控制器件,扩展板和处理器/存储器系统之间提供一种内部高速连接机制。由于 PCI 总线是一种高性能、数据吞吐量高的接口总线,从而实现了高速测量。

2) 为了加速计算石英晶体元件的参数和提高石英晶体参数的测量精度,本系统采用叠代法计算,叠代的次数取决于测量要求的精度,要求的精度越高,叠代的次数越多^[6,7]。

3) 由高精度的恒温晶体振荡器提供为 AD9852 的参考频率,提高了频率源的精度。

4) 由于恒温晶体的振荡器的频率随着时间和温度的变化而有微小的变化,为了校准频率,采用高精度的 GPS 授时模块获得精确的时钟以校准恒温晶体振荡器的频率偏差。

5) 为了获得高精度的测量结果必须对系统进行初始校准,作为以后测量和计算的依据。在计算晶体的参数时,充分考虑夹具杂散电容的影响,并将夹具的杂散电容作为一个计算参数参与计算石英晶体元件的参数。

4 精度分析

以美国 S&A 公司的 250 B 网络分析仪测试的数据为标准, 比较 GT-2010 型晶体阻抗计和本系统的测量结果. 250 B 的频率测量精度为 $\pm 2 \times 10^{-6}$. 测量结果如表 1 和表 2 所示, 表中的数据为 10 次测量结果的平均值. 从表 1 和表 2 可以看出本系统的测量精度要由于 GT-2010 型晶体阻抗计, 但在测量频率低于 60 MHz 的情况下, 由于阻抗计的成本低, 阻抗计更为实用; 当频率大于 60 MHz 时, 晶体阻抗计就无法胜任了. 从测量数据分析, 本系统相对于 250 B, 频率测量精度为 $\pm 0.3 \times 10^{-6}$.

表 1 串联谐振频率的测量结果

Tab. 1 The measurement results of series resonance frequency

晶体 序号	250 B 测量的 串联谐振频率 F_r/Hz	GT-2010 的测量结果			本系统测量结果		
			$\Delta F_r/\text{Hz}$	$(\Delta F_r/F_r)/1 \times 10^{-6}$		$\Delta F_r/\text{Hz}$	$(\Delta F_r/F_r)/1 \times 10^{-6}$
1	4 433 650	4 433 647	-3	-0.7	4 433 652	1	0.2
2	16 934 367	16 934 347	-20	-1.2	16 934 369	2	0.1
3	48 998 645	48 998 610	-35	-0.7	48 998 649	4	0.08
4	59 997 589	59 997 538	-51	-0.9	59 997 592	3	0.05
5	131 108 044				131 108 089	45	0.3
6	167 752 871				167 752 882	11	0.07

表 2 串联谐振电阻的测量结果

Tab. 2 The measurement results of series resonance resistance

晶体 序号	250 B 测量的 串联谐振电阻 R_r/Ω	GT-2010 的测量结果			本系统测量结果		
			$\Delta R_r/\Omega$	$(\Delta R_r/R_r)/\%$		$\Delta R_r/\Omega$	$(\Delta R_r/R_r)/\%$
1	16.8	17.2	0.4	2.3	17.0	0.2	1.2
2	26	26.5	0.5	2.0	26.3	0.3	1.2
3	24.9	24.6	-0.3	-1.2	24.6	-0.3	-1.2
4	46.0	47.5	1.5	3.2	46.2	0.2	0.4
5	48.1				48.4	0.3	0.6
6	101.0				101.8	0.8	0.8

5 结 论

现代通信技术需要高频、高精度的石英晶体元件作为时钟, 而国内生产石英晶体的厂家的测试设备只能测量低频晶体, 从而无法生产高频高精度的晶体, 嵌入式石英晶体网络分析仪可解决不能测量高频晶体的困难. 嵌入式石英晶体网络分析仪的频率校准采用能提供高精度时际的 GPS, 不需要外部晶体频标和外部频标, 为频率校准提供了方便, 可以随时校准频率.

参考文献:

[1] 潘景程译, 吴展校. 石英晶体元件设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1987. 245.
 [2] SJ/T 10639-1995 石英晶体元件术语[S].
 [3] SJ/Z 9154.1-87 用 PI 型网络零相位法测量石英晶体元件参数[S].
 [4] Kolinker Industrial equipment Limited. HK1200 PI network crystal measurement system[M]. USA: Kolinker Industrial equipment Limited, 2000. 52-58.
 [5] 陈利学. 微机总线与接口技术[M]. 北京: 电子科技大学出版社, 1998. 174-200.
 [6] SJ/T 11211-1999 石英晶体元件参数的测量[S].
 [7] Neubbig B W, Zimmermann R. Recent Advances on the Measurement of Quartz Crystal Units Up to 500 MHz and Above by the Use of a PI Network with Error correction[J]. IEEE Frequency Control Symposium, 1989, 11-17.

微波射频测试仪器使用操作培训

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;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,推出多套微波射频以及天线设计培训课程,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>



微波射频测量仪器操作培训课程合集

搞硬件、做射频,不会仪器操作怎么行!对于射频工程师和硬件工程师来说,日常电路设计调试工作中,经常需要使用各种测试仪器测量各种电信号来发现问题、解决问题。因此,熟悉各种测量仪器原理,正确地使用这些测试仪器,是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能,该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟练掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器;该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装,包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材,能够帮助微波、射频工程师快速地熟练掌握矢量网络分析仪使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器,因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解,也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解,能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>