

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.03.024

分布电感对石英晶体测试精度的影响及补偿

李 东^{1,2} 王艳林¹

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院 北京 100192; 2. 北京市机电系统测控重点实验室 北京 100192)

摘 要:IEC 推荐的石英晶体电参数的(网络零相位测试方法依赖于对测试环境的严格限制来保证其测试精度。在实际应用中,生产现场的测试环境将引入杂散电抗并严重影响其测试精度。为提高测量精度,根据石英晶体的电参模型和理想网络与实际网络模型的差异,理论和实验分析了分布电感对石英晶体谐振频率测试精度的影响,采用电容补偿的方法可以显著减小这一影响。实验结果表明,经过补偿后的石英晶体串联谐振频率的测量精度可达到 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 。

关键词: 石英晶体;测试;IEC 标准;误差补偿

中图分类号: TM935.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Effect and compensation of distributed inductance on the test accuracy of quartz crystal

Li Dong^{1,2} Wang Yanlin¹

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory for Measurement and Control of Electromechanical Systems, Beijing 100192, China)

Abstract: The quartz crystal untesting method of zero phase technique in a π -network recommended by IEC relies on strict limits on test environment to ensure the test accuracy. In practical application, the test environment of production site will bring in stray reactance, which seriously affects the test accuracy. To improve test accuracy, according to the model of electrical parameter of quartz crystal as well as the difference between ideal π -network and actual π -network model, the effect of distributed inductance on the test accuracy of resonance frequency of quartz crystal were explored based on theoretical analysis and experiments. The method of capacitance compensation could significantly reduce the effect. The experimental results show that the testing accuracy of series resonance frequency of quartz crystal could be up to $\pm 2 \times 10^{-6}$ after compensation.

Keywords: quartz crystal; tests; IEC standard; error compensation

1 引 言

石英晶体谐振器(以下简称石英晶体)是电子技术领域中应用最广泛的基础元器件。与其他频率元件相比,石英晶体因其具有很高的频率稳定度和品质因数以及低廉的成本,广泛应用于数字电子技术的各个领域,通常用于为时序逻辑电路提供标准脉冲或时间频率基准。

石英晶体的谐振频率等电参数有多种测试方法,其

国际电工委员会(IEC)在 IEC444 中规定了石英晶体的标准测试方法即 π 网络零相位法,我国也等同采用 IEC 标准作为石英晶体测试的电子行业标准^[1]。 π 网络零相位石英晶体测试方法的核心是以石英晶体的相频特性为标准测试石英晶体的电参数^[2-3]。由于石英晶体测试环境的复杂性以及 IEC 标准制定时技术水平的限制,标准本身在应用中存在一些问题。其中的关键问题是由于 π 网络本身不是理想的纯电阻网络及其测试环境(测试夹具,测头引线等)会引入杂散电抗并产生附加相移,

使得包含被测石英晶体的 π 网络的相位差为 0 时,石英晶体本身的相位差并不为 0,从而引入测试误差。为解决这一问题,在 IEC60444-1 至 IEC60444-9 中推荐了不同测试环境和要求下的若干种补偿方法,但是这些方法在实用中均存在局限性^[4-7]。例如 IEC60444-1 规定了频率在 1 ~ 125 MHz 谐振频率和谐振电阻的测试方法,通过严格规定 π 网络制作工艺来尽可能减小分布参数,忽略静电容及 π 网络分布参数对测试精度的影响,而随着石英晶体谐振频率的不断提高,静电容的影响已不能忽略。IEC60444-2 推荐通过并联补偿电感对静电容进行补偿,将谐振频率测试范围提高到 200 MHz,但是补偿电感上又引入了新的杂散。IEC60444-5 规定了采用自动网络分析技术和误差校正确定等效电参数的方法来补偿网络分布参数的影响,在应用方面也有局限性。

由于以上问题的存在,国内研发的基于 π 网络零相位法的石英晶体测试系统一般在使用中需要在具体使用的频点上与美国 S&A 公司生产的 250B 石英晶体测试系统进行校准,而在测试不同频点的石英晶体时需要再重新校准,并且一般只用于测试精度要求较低的石英晶体半成品,而被用作标准仪器的 250B 石英晶体测试系统的测试一致性也存在问题。特别是随着石英晶体加工技术的进步和对石英晶体品质要求的提高, π 网络零相位测试方法已经广泛应用于石英晶体频率微调加工中的测试和成品自动分选测试中,而测试环境的变化严重影响了石英晶体的测试精度。因此根据相关技术的发展和对象石英晶体测试的新的要求,IEC 推荐的测试方法(主要是 π 网络附加相移的补偿方法)存在改进的可能与需要,研究由于测试环境对石英晶体测试精度的影响及其补偿方法,对于将 IEC 推荐的石英晶体测试方法广泛应用于生产实际具有重要意义。

2 网络零相位法测试原理

图 1 为 IEC 规定的由纯电阻组成的理想 π 网络电路图, Y_1 为被测石英晶体。测试时,将被测石英晶体置于 π 网络中,采用扫频信号源激励网络,同时用矢量电压表监测 π 网络两端的相位差,当其为零时信号源的频率即为石英晶体的谐振频率^[8-9]。石英晶体的谐振电阻等其它电参数可以根据石英晶体的电参模型和谐振状态下 π 网络两端的电压计算得出^[10-11]。

尽管提出了严格的制作工艺要求, π 网络也不可能是理想的纯电阻网络,并且在实际应用环境中, π 网络不可避免地会引入杂散电抗。简化后的实际 π 网络等效电路如图 2 所示。 L_{x1} 和 L_{x2} 为引线电感(也包括网络本身的分布电感), C_A 和 C_B 为测头引线对公共端的分布电容, C_x 为石英晶体插座电容。

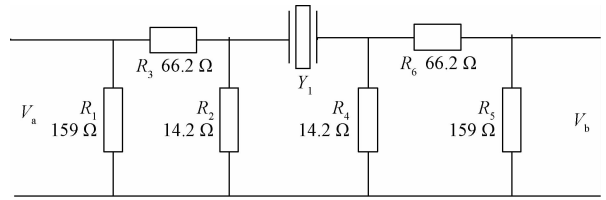


图 1 理想 π 网络

Fig. 1 An ideal π network

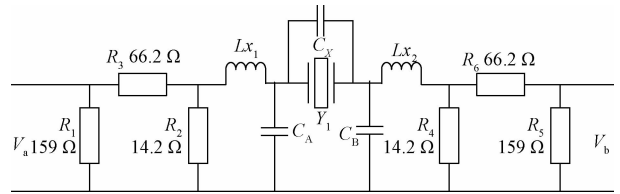


图 2 考虑分布参数的实际 π 网络

Fig. 2 The actual π -network considering distribution parameter

显然,由于存在杂散电抗并使得 π 网络产生附加相移,使得在包含被测石英晶体的 π 网络两端的相位差为 0 时,石英晶体本身的相位差并不为 0,从而引入测试误差^[12]。

根据石英晶体的电参数模型,可以推导出石英晶体串联谐振频率 f_r 与网络附加相移 φ 的关系:

$$\frac{\Delta f}{f_r} = \frac{\tan \varphi}{2Q_{\text{eff}}} \quad (1)$$

式中: Q_{eff} 为石英晶体等效品质因数:

$$Q_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi f_r (R_r + Z_s) C_1} \quad (2)$$

式中: R_r 为石英晶体谐振电阻, C_1 为石英晶体动态电容, Z_s 为网络等效阻抗。对式(2)的分析表明,如果要求石英晶体串联谐振频率的测试误差 $< \pm 2 \times 10^{-6}$,则 π 网络附加相移应 $< \pm 1^\circ$ ^[13]。

3 引线电感对测试精度的影响分析

详细的分析表明, C_A 、 C_B 和 C_x 对石英晶体测试精度的影响可以近似等效为石英晶体静态电容 C_0 增大的影响^[14]。本文主要研究分布电感对石英晶体测试精度的影响。

IEC60444-1 规定测试参考平面比石英晶体的底座平面低 2 mm 以及石英晶体的接触引脚应在接触片顶部的机械要求,然而当测试系统在应用于石英晶体频率微调 and 成品自动分选时,这一测试条件是难以满足的。石英晶体的引脚与测试夹具之间的引线会引入分布电感并严重影响石英晶体的测试精度。石英晶体测试夹具的引线电感一般为 0.5 ~ 1.5 nH/mm,其大小取决于石英晶体引

线的形状和材料。在实际的测试环境下,引线长度约 10 mm。假设其他影响因素不存在,单独分析研究引线电感 L_{x1} 、 L_{x2} 的影响,根据石英晶体的电参数模型和实际网络电路,包含被测石英晶体的 π 网络电抗表达式为:

$$Z'_c + Z_s = j\omega L_s + Z_c + Z_s = R_r + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) + j\omega L_s + Z_s \quad (3)$$

式中: Z_c 为石英晶体电抗, Z'_c 为石英晶体和引线电感电抗之和。在谐振状态下:

$$\tan\varphi_L = \frac{\omega_r L_s}{R_r + Z_s} > 0 \quad (4)$$

从式(4)可以看出, π 网络附加相移 φ_L 不仅与引线电感量有关,并且与石英晶体的自身特性(谐振频率、谐振电阻等)有关^[15]。

为验证引线电感对石英晶体谐振频率测试精度的影响,使用 Multisim 的电路仿真软件对存在引线电感的网络电路模型进行仿真实验。对标称频率分别为 51.3、88.2、125 MHz 的 3 个石英晶体的仿真测试结果如图 3 所示。

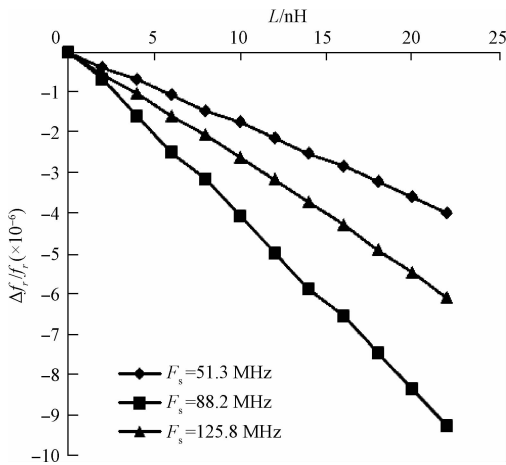


图3 引线电感对石英晶体谐振频率测试精度的影响
Fig. 3 The effect of lead inductance on the test accuracy of resonance frequency of quartz crystal

仿真结果表明,在引线电达到 6~8 nH 以上时,测试误差将可能超过 $\pm 2 \times 10^{-6}$ (具体误差与石英晶体本身的特性有关)。使用 250B 石英晶体测试系统,改变测头引线的长度(既在 π 网络中引入不同的分布电感),对仿真实验中的 3 个不同标称频率的石英晶体进行实际测试。实际实验结果与仿真试验结果相符。

4 硬件补偿方法研究

由式(3)可知,在石英晶体串联谐振频率处,实际的网络具有正的附加相位差。根据式(1),它将造成石英

晶体负的谐振频率偏差,即实测频率低于实际频率,因此可以采用在 π 网络的适当位置中并联电容的方法进行相位补偿。

在测头引线和 π 网络公共端之间接入补偿电容 C_p , 设源端补偿电容为 C_{p1} , 载端补偿电容为 C_{p2} , 根据图 1, 在谐振状态下,包含被测石英晶体的 π 网络电抗表达式为:

$$Z'_c + Z_s = R_r + j\omega_r L_s + \frac{R_2 R_3 (R_2 + R_3) - j\omega_r C_{p1} R_2^2 R_3^2}{(R_2 + R_3)^2 + \omega_r^2 C_{p1}^2 R_2^2 R_3^2} + \frac{R_4 (R_5 + R_6) (R_4 + R_5 + R_6) - j\omega_r C_{p2} R_4^2 (R_5 + R_6)^2}{(R_4 + R_5 + R_6)^2 + \omega_r^2 C_{p2}^2 R_4^2 (R_5 + R_6)^2} \quad (5)$$

根据式(5)可以计算补偿电容 C_{p1} 、 C_{p2} 值,使 π 网络的附加相移减小,从而减小石英晶体串联谐振频率的测试误差。

使用 Multisim 电路仿真软件,通过不断改变补偿电容的值,仿真计算石英晶体串联谐振频率值并与没有杂散电感影响时的计算值比较,二值相同时即得到所需的补偿电容值。仿真结果如表 1 所示。

表 1 补偿电容值仿真结果

Table 1 Simulation results of compensation capacitance

f_r /MHz	L_x /nH	f'_r /MHz	$\Delta f_r/f_r (\times 10^{-6})$	C_p /pF
51.308 245	10	51.308 155	-1.75	70
64.334 533	10	64.334 337	-3.05	70
77.659 590	10	77.659 315	-3.54	70
80.715 311	10	80.714 911	-4.96	70
88.283 128	10	88.282 768	-4.08	74
116.697 81	10	116.697 41	-3.43	80
125.822 70	10	125.822 38	-2.58	80
				73.4

表 1 中, f_r 是不存在引线电感时石英晶体串联谐振频率的仿真计算值, f'_r 是存在引线电感时的仿真计算值。实验中使用的测试引线长度 10 mm, 引线电感值约为 10 nH。仿真结果表明,引线电感造成 $2 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ 的石英晶体串联谐振频率的测试误差,不同频点要求的补偿电容值在 70~80 pF。

利用求出的补偿电容平均值,根据有补偿电容的实际测试电路模型,仿真分析补偿后测试的石英晶体串联谐振频率,并与未补偿时测试的串联谐振频率进行比较。结果表明,串联谐振频率的测试误差显著减小到 2×10^{-6} 以下,验证了补偿方法的有效性。

将前述补偿方法应用于本课题研制的基于 π 网络零相位测试方法的石英晶体测试系统(该测试系统采用了 π 网络附加相移的主动补偿技术)^[13],并与 250B 测试系统进行了比对测试,补偿前后的测试误差数据对比如表 2 所示。

表 2 补偿前后的测试误差比较

Table 2 Comparison of test errors before and after compensation

标称频率/ MHz	补偿前		补偿后	
	f_r /MHz	$\Delta f_r/f_r$ ($\times 10^{-6}$)	f_r /MHz	$\Delta f_r/f_r$ ($\times 10^{-6}$)
51.308 245	51.308 155	-1.75	51.308 255	0.20
64.334 533	64.334 337	-3.05	64.334 553	0.31
77.659 590	77.659 315	-3.54	77.659 565	-0.32
80.715 311	80.714 911	-5.0	80.715 321	0.12
88.283 128	88.282 768	-4.1	88.283 078	-0.57
116.697 81	116.697 41	-3.4	116.697 76	-0.43
125.822 70	125.822 38	-2.6	125.822 68	-0.20

从表 2 可以看出,在并联 73.4 pF 补偿电容后,石英晶体串联谐振频率的测试误差减小到 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 以内。图 4 所示为补偿前后的测试误差曲线。

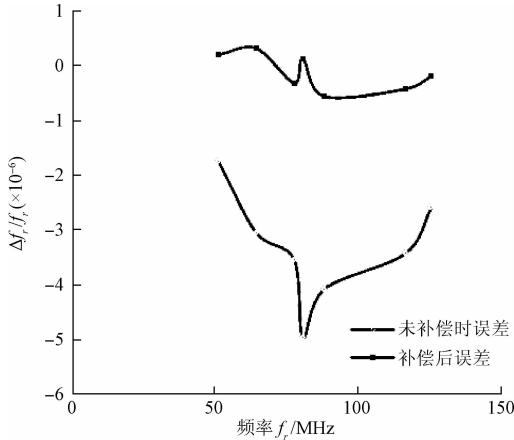


图 4 补偿前后测试值的相对误差曲线

Fig. 4 Relative error curve of the tested values before and after compensation

比对实验的结果表明,在 200 MHz 的测试范围内,经过电感补偿后的测试系统石英晶体串联谐振频率的测试误差小于 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 。

5 结论

由于工作环境引起的附加相移是造成(网络零相位石英晶体测试方法的测试误差的最主要的因素。为了保证测试精度,IEC 对石英晶体的测试条件做了严格的限制,从而也限制了在工业现场的应用。通过对包含分布参数的网络模型的理论 and 实验分析,得出石英晶体谐振频率测试误差与分布电感量以及被测石英晶体电参数的数量关系。在网络加入补偿电容,通过电路仿真确定补偿电容的容量,可以显著减小分布电感对测试精度的影

响。仿真实验和与 250B 测试系统的比对实验表明,经过电容补偿后,在 1 ~ 200 MHz 的测量范围内,可以将由于引线电感造成的测试误差减小到 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 。

参考文献

[1] IEC. Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a π -network part 1: Basic method for the measurement of resonance frequency and resonance resistance of quartz crystal units by zero phase technique in a π -network[S]. IEC 60444-1, 1986.

[2] 刘解华,张其善. 石英晶体元件串联谐振频率快速测量技术的研究[J]. 中国测试, 2006, 32(2) : 58-61. LIU X H, ZHANG Q SH. Research on fast measurement of quartz crystal unit resonant frequency [J]. China Measurement Technology, 2006, 32(2) : 58-61.

[3] 伯恩纽比格. 现代石英晶体振荡器测量方法[J]. 宇航计测技术, 2007(z1) : 83-88. NEUBID N. Modern measurement for quartz crystal units[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007(z1) : 83-88.

[4] IEC. Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a π -network part 2: Phase offset method for measurement of motional capacitance of quartz crystal units[S]. IEC 60444-2, 1986.

[5] IEC. Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a π -network part 5: Method for the determination of equivalent electrical techniques and error correction[S]. IEC60444-5, 1995.

[6] IEC. Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a π -network part 8: Test fixture for surface mounted quartz crystal units[S]. IEC60444-8, 2003.

[7] IEC. Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a π -network part 9: Measurement of spurious resonances of piezoelectric crystal units[S]. IEC 60444-9, 2007.

[8] 陈斌仁,刘桂礼. 基于两点迭代法的石英晶体串联谐振频率测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10) : 257-260. CHEN B R, LIU G L. Series resonant frequency measurement technology of quartz crystal based on two-point iterative method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10) : 257-260.

[9] 李璟,李东. 石英晶体负载谐振电阻测量技术研究[J]. 电子测量技术, 2009, 32(2) : 15-17. LI J, LI D. Load resonant resistance measurement technique research of quartz crystal [J]. Electronic Measurement Techonlogy, 2009, 32(2) : 15-17.

[10] 王艳林,王中宇. 石英晶体动态电容的测试方法研

- 究[J]. 计算机测量与控制[J], 2011, 19(1): 39-43.
WANG Y L, WANG ZH Y. Investigation on measurement of motional capacitance[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(1): 39-43.
- [11] 管世波, 李东. 高频石英晶体测试系统信号源设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(6): 104-108.
GUAN SH B, LI D. Design of the signal source used in high frequency crystal measurement system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2007, 21(6): 104-108.
- [12] 张世超, 尚建国. 石英晶体振荡器的仿真分析[J]. 西安航空学院学报, 2011, 29(3): 52-54.
ZHANG SH CH, SHANG J G. Simulation analysis of quartz crystal units [J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2011, 29(3): 52-54.
- [13] LI D, WANG Y L. Research on compensation method with additional phase for quartz crystal test network[C]. Proceedings of 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2013: 690-692.
- [14] 董政洁, 刘桂礼. 基于 S 参数传输法的石英晶体静电容测量[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 892-897.
- DONG ZH J, LIU G L. Static capacitance measurement of quartz crystal based on S-parameter transmission method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 892-897.
- [15] 孙超越, 王艳林. 测量夹具电容对石英晶体频率测量的影响[J]. 现代电子技术, 2015, 38(8): 132-135.
SUN CH Y, WANG Y L. Effects of capacitance between measuring fixture on quartz crystal frequency measurement [J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(8): 132-135.

作者简介



李东, 1982 年于上海机械学院获得学士学位, 1988 年于陕西机械学院获得硕士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为电子测量技术。

E-mail: li_d@bistu.edu.cn

Li Dong received B. Sc. from Shanghai Institute of Mechanical Engineering in 1982 and M. Sc. from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988, respectively. Now he is professor in Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes electronic measurement technology.