月尘测量振荡电路理论分析

陈光锋,崔 阳,陆登柏,柴高洁,宗 朝
(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室,兰州 730000)

摘要:月球探测中,相关科学及工程载荷,是必不可少的有效探测手段。应用于月球尘埃测量的系统,有涉及真空环境下工作的用于月球尘埃精密测量的涂膜晶体振荡电路。针对振荡电路进行的理论分析,包括了电路等效模型、电路分析、讨论、计算等部分。理论分析的结果应用于振荡电路调试,取得了预期的结果。理论模型的分析方法和结果,对于空间尘埃测量系统的设计和性能改进具有一定的借鉴意义。

关键词:月尘;振荡电路;空间环境;空间尘埃;测量
中图分类号:V443 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7086(2015)06-0351-04
DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2015.06.010

THE ANALYSIS OF OSCILLATION CIRCUIT FOR MOON DUST MEASUREMENT SET

CHEN Guang-feng, CUI Yang, LU Deng-bai, CHAI Gao-jie, ZONG Chao
(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: As for the moon exploration, the different science and engneering instruments are effective means. The applied moon tiny dust measuring system relates to accurate measuring part made up of vacuum grease film coated crystal oscillation circuits working under the vacuum environment. The relative oscillation circuits analysis, include several sections such as the circuit equivalent model, analysis, discussion, calculation, etc. A good agreement about the theories and experiment results have been reached, that indicates the validity of the theory model, which will benefit the designing and performance improving to space dust measuring systems.

Key words: moon dust; oscillation circuit; space environment; space dust; measurement

0 引言

空间飞行器环境微小尘埃的精密测量是航天活动关心的问题之一,这对于航天器的敏感器件寿命评价、飞行器环境污染检测等具有相当重要的价值和意义。针对于不同尺寸的空间尘埃的危害,美国于1999年到2001年,通过搭载在空军高级研究和全球观测飞行器(ARBOS)上的仪器Space Dust(SPADUS)进行了空间微尘埃的测量及研究[1-2],日本和德国联合进行了4π空间微尘埃探测系统的地面研究[3]。

另外美国还研究了微尘埃对Ulysses飞行器上高能望远镜的危害[4],俄罗斯学者也进行了类似的研究[5]。

随着月球探测活动的开展,对月尘探测有着积极的意义,国外开展了相关的研究[6]。针对月尘为代表的空间颗粒测量问题,分析了一种可对空间直径数十微米尘埃进行测量的电路系统。测量原理是利用石英晶体,表面涂覆一层真空脂类物质,在空间环境中将微颗粒黏附在上面,改变晶体的电学等效参数,从而改变晶体的谐振频率,达到测量空间微尘埃的目的[7]。通过对该测量电路的理论分析,获得的理论结果很好揭示了相关的试验结果,表明电路理论模型的正确性,这对类似空间环境尘埃探测电路系统的设计和性能改进具有一定的借鉴意义。

1 振荡电路等效模型

当石英晶体表面涂覆相关真空脂后,在真空状

收稿日期:2015-05-28
作者简介:陈光锋(1966-),男,甘肃省兰州市人,高级工程师,从事空间电子技术及空间微重力测量技术研究。
Email:chen510@sina.com。

态下，落于其上的数十微米的颗粒将黏附在真空脂涂层上。由于真空环境中，缺少气体的阻隔，尘埃颗粒可以和真空脂形成紧密的接触，当测量颗粒均匀分布在真空脂上后，成近似的刚性膜。这就符合Sauerbrey测量公式，即质量增加和频率增加成线性关系[7]。此时，测量晶体就可等效为谐振频率随质量变化的晶体。晶体的谐振频率决定于其等效电容和等效电感，晶体的质量用等效电容表示，晶体的刚度用等效电感表示，当黏附膜黏附力很大时，则最接近刚度，谐振频率是最稳定的。振荡电路可等效为如图1的电路模型，Z_p是用于测量的石英晶体。

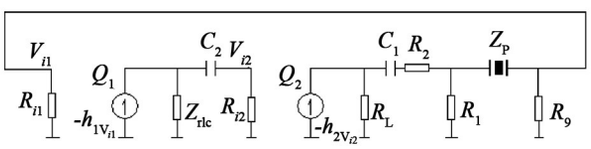

图1 起振部分等效电路

其中：h_i（i=1，2）是三极管Q_1和Q_2的跨导；β_0是直流情况下的电流放大倍数，f_c基本等于管子的特征频率f_T。

$$h_i=\frac{\beta_0}{R_i\left[1+j\cdot\frac{f}{f_c}\right]} \tag{1}$$

Z_{rlc}是Q_1集电极的R、L、C并联的等效阻抗；

$$Z_{rlc}=\frac{(\omega L)^2R-j\omega LR^2(1-\omega^2L_C)}{\left[R(1-\omega^2L_C)\right]^2+(\omega L)^2} \tag{2}$$

R_{i1}是Q_1的输入阻抗；R_{i2}是Q_2的输入阻抗；R_L是Q_2的等效负载，$R_L\approx1.3$ kΩ；Z_P是石英晶体的等效阻抗，可表示为：

$$Z_p=R_P+jX_p \tag{3}$$

2 电路分析

针对图1所示的电路，将围绕探测石英晶体的有关单元电路进行等效，如图2所示。

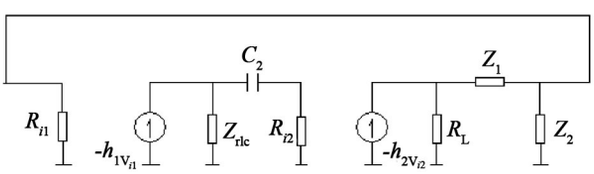

图2 化简的等效模型

经过计算，其中：

$$Z_1=\frac{1}{j\omega c_1}+R_2 \tag{4}$$

$$Z_2=\frac{R_1(R_9+Z_P)}{R_1+R_9+Z_P} \tag{5}$$

根据起振条件，得式（6）：

$$-h_1\frac{Z_{rlc}R_{i2}}{Z_{rlc}+R_{i2}+\frac{1}{j\omega c_2}}\cdot\left[-h_2\frac{R_LZ_2}{R_L+Z_1+Z_2}\cdot\frac{R_9}{Z_P+R_9}\right]=1 \tag{6}$$

由于电路中C_2=1nF，$\left|\frac{1}{j\omega c_2}\right|=16\ \Omega\ll R_{i2}$，因此得式（7）：

$$h_1\frac{Z_{rlc}R_{i2}}{Z_{rlc}+R_{i2}}\cdot h_2\frac{R_LZ_2}{R_L+Z_1+Z_2}\cdot\frac{R_9}{Z_P+R_9}=1 \tag{7}$$

进一步得式（8）：

$$h_1h_2Z_{rlc}R_{i2}R_LR_9R_1=(Z_{rlc}+R_{i2})\cdot\left[(R_1+Z_1)(R_1+R_9+Z_P)+R_1(R_9+Z_P)\right] \tag{8}$$

电路中由于R_{i2}远大于Z_{lrc}的模，R_L远大于Z_1的模，因此得式（9）：

$$h_1h_2Z_{rlc}R_{i2}R_LR_9R_1=R_{i2}\left[R_LR_1+R_L(R_9+Z_P)\right] \tag{9}$$

将Z_{rlc}表示为式（10）：

$$Z_{rlc}=R_{rlc}+jX_{rlc} \tag{10}$$

得：

$$h_1h_2(R_{rlc}+jX_{rlc})R_LR_9R_1=\left[R_LR_1+R_L(R_9+R_P+jX_p)\right] \tag{11}$$

整理得：

$$h_1h_2R_{rlc}R_9R_1-R_1-R_9-R_P+j(h_1h_2X_{rlc}R_9R_1-X_p)=0 \tag{12}$$

3 讨论

根据上面的电路分析，获得了振荡电路的振荡方程。据此进行电路增益和谐振频率的讨论。

3.1 管子的放大倍数

由于选用相同型号的管子，认为Q_1和Q_2具有相同的跨导，即h_1=h_2，则：

$$h=\sqrt{\frac{R_1+R_9+R_P}{R_1R_9R_{rlc}}} \tag{13}$$

管子的放大倍数β可表示为$\beta=R_ih$，R_i是管子的输入阻抗。

3.2 谐振频率问题

由式（12）可知，谐振时有：

$$h_1h_2X_{rlc}R_9R_1-X_p=0 \tag{14}$$

即：

$$h_1h_2\frac{\omega LR^2(1-\omega^2Lc)}{\left[R(1-\omega^2L_C)\right]^2+(\omega L)^2}R_1R_9-(\omega L_q-\frac{1}{\omega C_q})=0 \tag{15}$$

式（15）可以看出，R、L、C参数的变化引起频率f

的变化,这是调试模式。在电路中,将X_{rlc}调整在对测量频率9.97~10 MHz不敏感的区域,即该部分电路的品质因数Q很低。用k表示(15)式的前半部分,则式(15)可表示为:

$$-(\omega L_q - \frac{1}{\omega C_q}) + k = 0 \tag{16}$$

得:

$$\omega = \frac{\sqrt{(\frac{k}{L_q})^2 + \frac{4}{L_q C_q}} + \frac{k}{L_q}}{2} \tag{17}$$

由于$\frac{k}{L_q} < (\frac{k}{L_q})^2 << \frac{4}{L_q c_q}$,因此有:

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{L_q C_q}} \tag{18}$$

式(18)表明,测量频率基本由测量晶体的等效电参数L_q、C_q的变化确定,这是合理的测量模式。由于参数L_q、C_q等受环境温度的影响,为了获得可靠的测量数据,进行探头的温控或者在测量晶体适宜工作的确定温度下进行测量是合适的,例如一般晶体在温度25°C时,晶体的频率温度系数基本为零,该温度下测量的是适合的,该温度下测量的数据真正反映了晶体上的尘埃量的多少。

4 增益和基础频率计算分析

根据讨论3获得的结果,进行增益和基础频率变化因素的分析。实际工作中,通过调试模式确定出电路的工作点,然后在该工作点,进行测量模式运行。

4.1 增益要求

由式(13),代入相关参数,获得图3所示的结果,增益有最小值要求为50。

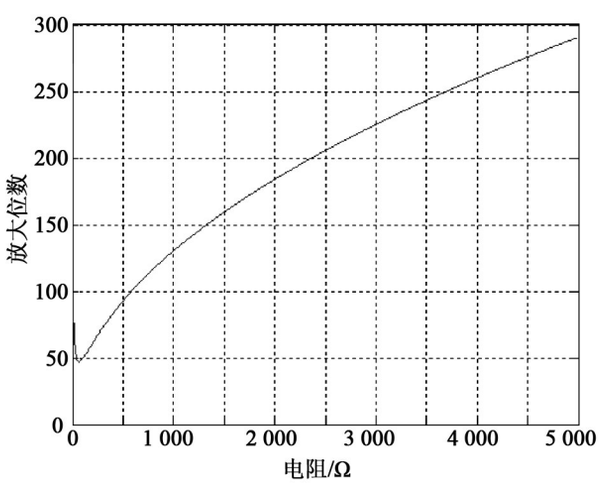

图3 管子增益要求分析

4.2 参数变化对基础频率的影响分析

定义由于电路参数变化而引起的频率变化为基础频率变化,基础频率由电路的工作点确定。利用(17)式进行相关的分析计算。晶体基本参数为C_q=0.45 pF,L_q=0.563 mH,r_p=35 Ω。

(1)R的变化对频率的影响

电阻R是调整振荡电路工作点的主要电阻,其稳定性的变化对基础频率的影响如图4所示。

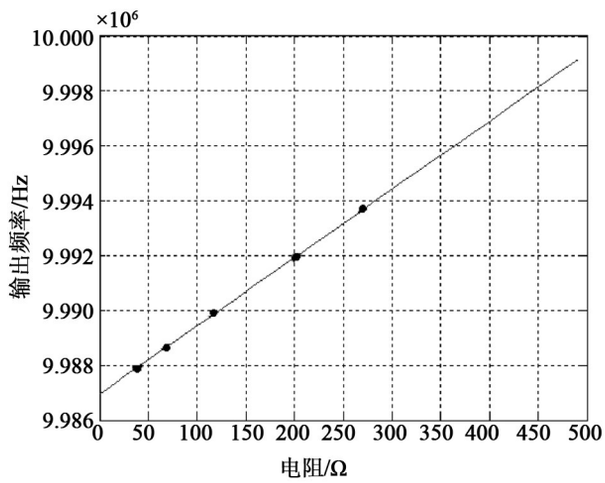

图4 R的变化对基础频率的影响

可见在电感L和电容C一定的情况下,减小电阻R,基础频率将下降。分离点为改变调试电阻时频率实测值,和理论计算变化趋势一致。

(2)改变电容C对频率的影响

并联电容C变换对基础频率的影响如图5所示。

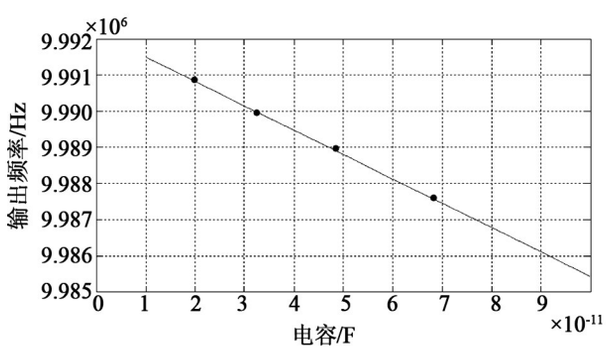

图5 并联电容C对基础频率的影响

可见增大电容C,基础频率将会下降。分离点是改变并联电容频率实测值和理论计算变化趋势一致。

(3)电阻R取230 Ω,然后改变电感L和电容C,看频率的变化情况。电阻一定,并联电感和电容改变,引起频率的相应变化。电感和电容增大,都将

使基础频率下降，如图6所示。

（4）晶体电阻的变化情况

晶体的等效电阻变化，对晶体的基础频率影响如图7所示。晶体的等效电阻变大，将引起基础频率向上漂移。这主要是晶体发热引起的现象。

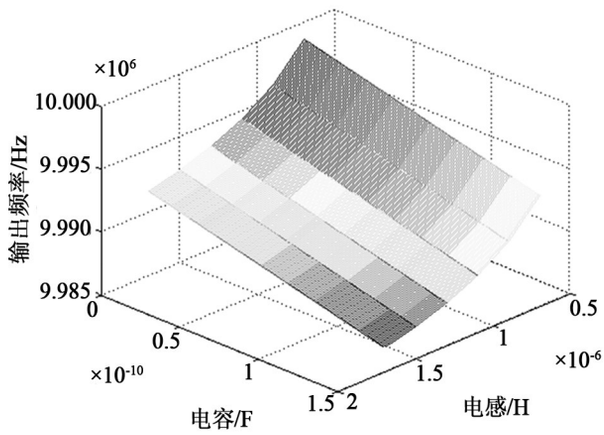

图6 L、C变化对基础频率的影响

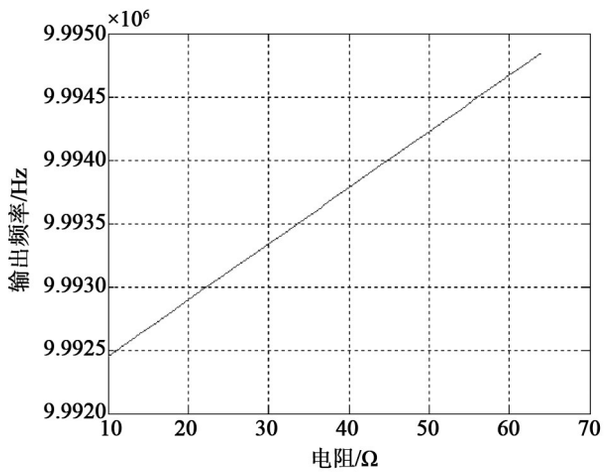

图7 晶体等效电阻变化对基础频率的影响

通过电路调试模式，获得合适的电路工作点，在该工作点上，电路的参数是确定的，因此电路只确定一个基础频率。在此基础频率上，电路将工作在测量模式。随着尘埃在晶体真空脂涂覆膜上的积累，则电路输出频率将产生相应的变化，从而达到了测量的目的。

5 结论

空间环境是以真空为主的复杂物质世界[8]，对于该环境的了解，有助于更好的利用空间资源。空间环境微尘埃的测量技术，将是空间环境测量的一个重要方面。随着航天技术的发展，对航天器安全性的更好考虑及空间环境探测的需要，这方面的研究将引起更大的关注。作为该类研究的一个测量装置，对相关振荡电路系统进行了分析，获得的理论结果符合振荡电路地面实验中参数变化对应的各试验现象的情况。应用理论分析的结果，对实际电路最后的性能实验进行了预期的理论指导。该理论分析获得的结论，可进一步用于类似电路的设计分析及性能的改进，进而在空间环境微尘埃的探测和地面真空设备的相关检测[9]中开拓出更多应用。

参考文献：

[1] Tuzzolino A J, McKibben R B, Simpson J A, et al. The Space Dust (SPADUS) instrument aboard the Earth-orbiting ARGOS spacecraft: I-instrument description[J]. Planetary and Space Science, 2001, 49(7): 689-703.

[2] Tuzzolino A J, Economou T E, McKibben R B, et al. Final results from the space dust (SPADUS) instrument flown aboard the earth-orbiting ARGOS spacecraft[J]. Planetary and Space Science, 2005, 53(9): 903-923.

[3] Miyachi T, Fujii M, Hasebe N, et al. Response of a pentagonal PZT element as a component of a 4π-real-time detector[J]. Advances in Space Research, 2008, 41(7): 1147-1151.

[4] Connel J J. Effects of an apparent space dust impact on a position sensing solid state detector aboard the Ulysses spacecraft [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1996, 378(3): 526-528.

[5] Khristoforov B D. Experimental modeling of impact of space dust and debris on flying vehicles and their components[J]. Cosmic Research, 2011, 49(3): 263-268.

[6] 姚日剑，王先荣，王鹚. 月球粉尘的研究现状[J]. 航天器环境工程，2008，25(6)：512-515.

[7] 冯杰，王鹚，王先荣，等. 空间微小尘埃质量累积测量方法[J]. 宇航材料工艺，2010，40(6)：78-80.

[8] 达道安. 空间真空技术[M]. 北京：宇航出版社，1995.

[9] 薛大同，魏向荣，任晓虹，等. SF-3A型石英晶体膜厚监控仪[J]. 真空与低温，1987，6(3)：18-24.