



JINGMI HENGWENCAO YUANLI

精密恒温槽原理

● 赵声衡 著

● 湖南科学技术出版社



精密恒温槽原理

● 赵声衡 著

● 湖南科学技术出版社

精密恒温槽原理

赵声衡 著

责任编辑：张 珍

*

湖南科学技术出版社出版发行

(长沙市展览馆路8号)

湖南省新华书店经销 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1991年8月第1版第1次印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：5.625 字数：122,000

印数：1—1,000

ISBN 7—5357—0012—5

IB·8 定价：2.45元

前 言

本人从事石英稳频及频率控制技术的教学和研究工作凡二十年，现在感到有必要将这些年来积累的材料整理出来，以便抛砖引玉，与同行们互相交流，互相促进。

自1880年居里兄弟发现压电效应至今，压电元器件的生产已形成一个独立的产业。从航天技术到家用电器，压电产品几乎是无所不在。但奇怪的是，压电技术这个课题，从未列入高等工业学校的教学内容，致使现在的大专院校毕业生，在工作中一旦闯入这一领域时，对它都感到十分陌生，大大地延缓了他们成为这一领域专门家的时间。

现在的情况开始有些变化。某些大专院校和研究机构正在或打算开设这方面的课程。但苦于没有教材，教师和学生多感不便。一些进入时间频率控制或精密温度控制和测量领域的年轻同志，也苦于没有一本适合于他们阅读的书籍而难于提高。如果本书的出版对这些问题的解决有所帮助的话，本人将感到莫大的欣慰。

本书是作者为大学本科和研究生授课的教材。几经修改和补充，成为现在这个样子。为了突出重点和控制篇幅，内容上着重阐述基本概念和原理，而对工艺和现有产品性能的介绍等，除非很有必要，一般都不过多涉及了。

限于作者水平，书中难免不妥之处，诚恳地欢迎大家批评指正。对于在本书编写和出版过程中给予了宝贵支持的同志们，

谨致以衷心的感谢。

赵声衡

1991年2月于岳麓山

序

在许多现代电子系统和设备以及精密时频计量等频率控制领域中，用石英谐振器稳频的各种普通晶振、特殊晶振和精密恒温高稳晶振，均已获得日益广泛的应用，并具有素称心脏的显要地位。

为了确保晶振具有长短期频率稳定度高稳指标，精密恒温是其相辅相成的不可分割的部分。

精密恒温，主要包括恒温槽热学结构和控温电子线路两部分的综合设计和分析，实质上，它是利用电能转换为热能、并通过热电闭环负反馈构成的一种自动调节恒温系统。关于这种系统的静态特性和动态特性的正确而系统的分析，时至今日，仍是需要深入解决的关键性理论问题。

湖南大学物理系赵声衡副教授，积科研实践和理论钻研二十余年之宝贵经验，并综合国内外既得成果，撰写出《精密恒温槽原理》，其中三分之二以上的新颖内容是他多年的辛勤创作，卓有成效地解决了若干理论和实践上的疑难问题。

本书论述简炼，深度和广度兼重，理论和实践结合，自成体系，确有实在的应用价值。目前，尚不曾见到国内外有这样的书籍问世，可谓该专业中唯一的一本科技专著。

湖南科学技术出版社适时出版这本新著，奉献读者，必将

得到国内外专业科技工作者的热诚欢迎。

杨易旻

1991年3月8日

杨易旻：中国计量测试学会石英频率控制委员会第一副主任委员、中国计量测试学会时间频率专业委员会委员、航空航天部无线电计量测试研究所研究员。

内 容 简 介

本书系统地阐述了精密恒温槽（如振荡式、直放式、积分式、全真空式和PTC式恒温槽）的工作原理，揭示了恒温槽中的热运动规律以及传热学与温度控制电路之间相互依存又相互制约的关系，为进一步提高恒温槽的质量指出了努力的方向。

书中对低精度恒温槽的工作原理也作了适当的叙述；以适应不同读者的要求。书中还特别介绍了小型化低功耗恒温槽研究的最新进展，为恒温槽产品的更新作了理论上的准备，并给出了一些实际的结果。

本书可供从事时间频率控制及温度精密控制与测量的工程技术人员、大专院校有关专业的教师、本科生、研究生阅读。

目 录

第一章 概 论

第一节	现代科技对恒温环境的要求·····	(1)
第二节	石英晶体振荡器对恒温环境的要求·····	(3)
第三节	常用恒温槽的种类·····	(7)
参考文献	·····	(8)

第二章 振荡控温式恒温槽

第一节	振荡式控温电路的工作原理·····	(10)
第二节	振荡式控温电路失控的原因及消灭失控的方法·····	(18)
第三节	振荡控温式恒温槽的静态特性·····	(22)
第四节	振荡控温式恒温槽的动态特性——热振荡及其消除·····	(33)
第五节	振荡式控温电路的参数补偿·····	(38)
参考文献	·····	(43)

第三章 直流控温式恒温槽

第一节	概述·····	(44)
-----	---------	--------

第二节	直放控温式恒温槽的静态特性和动态特性	(47)
第三节	零点漂移及其补偿	(50)
第四节	直放式控温电路中的超温现象	(56)
第五节	放大器增益的非线性对控温精度的影响	(61)
第六节	环境温度对放大器的影响	(76)
第七节	放大器增益和功率的分配	(79)
参考文献		(81)

第四章 交流控温式恒温槽

第一节	交流放大连续控温式恒温槽	(83)
第二节	交流断续控温式恒温槽	(88)
第三节	可控硅控温电路	(89)
参考文献		(92)

第五章 其它形式的恒温槽

第一节	热源自控式恒温槽	(93)
第二节	低电压恒温槽	(97)
第三节	用二极管作温度传感器的恒温槽	(100)
第四节	快速加热式恒温槽	(102)
第五节	有源负载恒温槽	(107)
第六节	双层恒温槽	(114)
第七节	控温电路的桥路补偿法	(117)
第八节	积分控制恒温槽	(125)

第九节 全温度范围恒温槽.....	(143)
参考文献.....	(145)

第六章 恒温槽的热学性能

第一节 恒温槽内的温度场.....	(147)
第二节 控温热敏电阻在恒温槽内的最佳位置	(153)
第三节 控温电路放大器增益对槽内温度场的影响	(155)
第四节 恒温槽热学结构的改善.....	(157)
第五节 槽温的测量.....	(164)
参考文献.....	(168)

第一章 概 论

第一节 现代科技对恒温环境的要求

人类赖以生存的地球，因其不停地自转和绕太阳公转，故太阳对地球的照射角度时刻变化，致使其辐射到地球表面的能量，在不同时刻和不同地点就多少不一，因而地球表面的温度也就因地因时而异。例如，地球南北两极和赤道的温差，最多可达 80°C 以上；由地球公转而在同一地区引起的季节性温度变化，最多的可达 60°C 左右；由地球自转而产生的昼夜温差，就我国广大地区而论，平均也在 10°C 左右。

温度的周期性变化，加强了生命体运动的节奏性，并有助于创造出一种一张一弛的环境气氛，使生命体能在永恒的运动中得以休养生息，这无疑是有利的。但是，在许多情况中，人们又希望环境温度尽可能稳定，特别是现代科技对环境温度的稳定性，提出了十分苛刻的要求。

要获得稳定的恒温环境，最简单的办法就是深入到地表以下。因为在地下，日照和大气的影晌被有效地排除；地层的热容量大大增加了。实测表明^[1]，在地表以下 $0.6\sim 1$ 米处，温度的日波动即基本消失； $8\sim 15$ 米处，温度的年波动也基本消失。温度的稳定性随着距地面深度的增加而提高。

利用地下恒温环境的方法最经济也最可靠。当需要恒温的设备较大时，往往采用这种方法。例如，精密光栅的刻制一般都

在地下进行,观察地面倾斜度变动情况的地震预报装置,因体积过大,也只能设置在地下。

深入地下以获得恒温环境的方法毕竟是比较被动的,并非在所有情况下都能采用。用得最多的方法是人为地将某一区域内的温度控制在某一恒定温度上。室温空调机和我们所要研究的恒温槽,用的就是这种方法。大致而言,受控的区域愈小,该区域内温度的稳定性愈高。例如,室温空调机可使室内温度的波动不超过 2°C 。几十升的恒温箱,如日本 MC-71 型和美国 2100 型恒温箱,箱内温度的波动约为 10^{-2}°C 。而槽腔体积只有几个立方厘米的精密恒温槽,要使槽内温度的波动小到千分之几度,并不困难。精心的设计,甚至可使槽内温度的波动小到万分之几度。

恒温槽在现代科技中应用十分广泛。例如,用在计量与测试中,可以有效地克服温度波动对计量标准和测试仪器的影响,提高计量等级;用在缓变微弱信号的检测中,可以使被测信号从环境温度变化引起的漂移信号中暴露出来。恒温槽在生物学、化学、医学等领域中也有重要的应用。现举例如下。

汞-镉标准电池的电动势与温度的关系可用下式表示

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{20} - 4.075 \times 10^{-5}(t^{\circ} - 20^{\circ}) - 9.444 \times 10^{-7}(t^{\circ} - 20^{\circ})^2 + 9.8 \times 10^{-9}(t^{\circ} - 20^{\circ})^3$$

20°C 时电池的电动势 $\varepsilon_{20} = 1.0183$ 伏,可以算出温度 t 从 -10°C 到 $+40^{\circ}\text{C}$ 时,电动势的变化

$$\varepsilon_{-10} - \varepsilon_{40} = 1.22\text{mV}$$

如果将电池放在恒温槽内,令恒温槽工作于 50°C ,当环境温度从 -10°C 变到 $+40^{\circ}\text{C}$ 时,槽内温度的变化不会超过 0.2°C ,此时电池电动势仅变化

$$\varepsilon_{50} - \varepsilon_{50.2} = 0.019\text{mV}$$

大多数半导体稳压二极管的电压温度系数约为 $8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ，若环境温度从 -10°C 变到 $+40^\circ\text{C}$ ，稳压管的电压将变化 40mV 。如果把稳压管放在上述恒温槽内，则同样的环境温度变化只会使稳压管的电压变化 0.16mV 。在研制某型号的标准数字电压表时，曾因电压表内稳压管电压随环境温度变化而使电压表的温度特性达不到设计指标，将稳压管置于恒温槽内之后，问题得到了满意的解决。

图1—1为一高精度恒流源电路，输出电流的温度系数为 10^{-4} 数量级。检查发现电流温度系数主要是由输出电流粗调电阻 $R_1 \sim R_5$ 随温度变化而产生的。将这些电阻放入一个简单的恒温槽之后，输出电流的温度系数轻易地降到 10^{-5} 数量级。

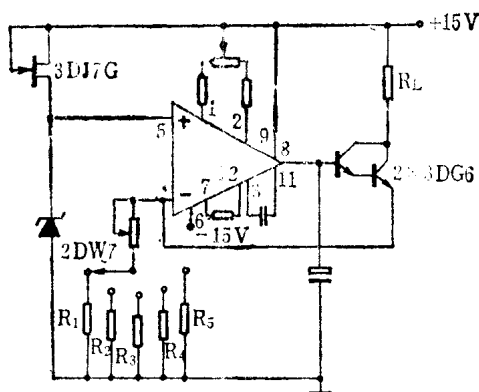


图1—1 精密恒流源电路

第二节 石英晶体振荡器对 恒温环境的要求

石英稳频及频率控制技术，特别需要精密度很高的恒温槽。

因为石英频率源能给出很高的频率稳定度，相对说来，石英的性能对温度就显得十分敏感。要获得高稳定度的频率源或精密时间和时间间隔，首要的问题就是要使石英谐振器置于温度非常稳定的环境中。

在一般情况下，石英谐振器相对频偏与温度的关系可以表为^[2]：

$$\frac{\Delta f}{f_0} = a_0(T - T_0) + b_0(T - T_0)^2 + c_0(T - T_0)^3 \quad (1-1)$$

式中， T 为谐振器的温度， T_0 为参考温度， f_0 为在参考温度时谐振器的频率， $\Delta f = f - f_0$ ， a_0 、 b_0 和 c_0 是由石英晶体的物理性质及谐振器的切型所决定的常数。如果选择适当的切角使 $a_0 \approx 0$ ， $b_0 = 0$ ，则上式变为

$$\frac{\Delta f}{f_0} = c_0(T - T_0)^3 \quad (1-2)$$

图1—2即为式(1—2)所描述的高精密AT切石英谐振器的频率温度特性曲线。在这条曲线上有两个极值点，它们所对应的温度为 T_m 和 T_n 。工艺上常将 T_m 控制在 $(60 \pm 10)^\circ\text{C}$ 范围内。在振荡器中，就令谐振器工作于温度 T_n 。如果选用 T_n 作参考温度，则(1—2)式变为

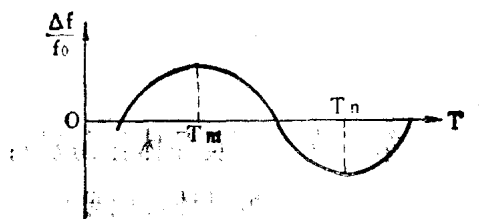


图1—2 石英谐振器的频率温度特性

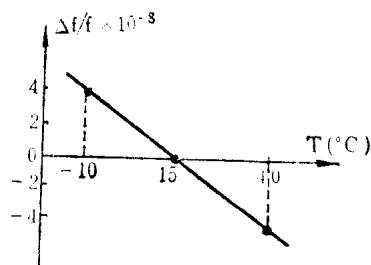
$$\frac{\Delta f}{f_0} = a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2 \quad (1-3)$$

谐振器的频率温度特性除了可用频率温度曲线来描述之外, 还可由频率温度系数来描述。以 T_0 为参考温度, 任一温度下谐振器的频率温度系数定义为

$$\alpha_{T_0} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) \quad (1-4)$$

在图1—2中的极值点, $\alpha_{T_0} = 0$, 故极值点又称零温度系数点。在 T_0 附近 $\pm 2^\circ\text{C}$ 范围内, 高质量 AT 切谐振器的频率温度系数约为 $5 \times 10^{-8}/^\circ\text{C}$ 。此时, 若要求温度变化所引起的谐振器相对频率的变化不超过 $5 \times 10^{-11}/^\circ\text{C}$, 则谐振器温度的变化应低于 0.001°C 。这就要求恒温槽内温度的变化应长时间控制在 0.001°C 的范围内。显然, 这不是一件轻而易举的事情。

将谐振器置于晶体振荡器中, 并令谐振器工作于零温度系数点之后, 振荡器输出频率随温度的变化又很不同于谐振器频率随温度的变化。当温度变化的范围不很宽时, 用 AT



切谐振器作成的单层恒温槽晶振, 其频率与温度的关系, 绝大多数如图1—3所示。

图1—3 振荡器频率温度特性

由图可知, 振荡器频率温度特性不存在零温度系数点, 而是近似地保持一种直线的关系。该直线的斜率称为振荡器的频率温度系数, 用 α_{os} 表示, 其范围在 $-6 \times 10^{-10}/^\circ\text{C}$ 到 $-6 \times 10^{-11}/^\circ\text{C}$ 之间。造成图1—2和图1—3差别的主要原因在于, 当环境温度变化时, 振荡器的频率不仅取决于谐振器的温度特性,

而且还与恒温槽热学结构及振荡和控温电路的温度特性有关。

上面关于谐振器和振荡器频率温度特性的描述只适用于温度变化很慢的情况，亦即上面引出的温度系数是一种静态频率温度系数。当温度的变化较快时，频率的变化变陡，这种现象称为热冲击。A. Ballato 和 Y. Noguchi 等人将热冲击时振荡器的频率温度特性表为^{[3][4]}

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \alpha \Delta T + \beta \frac{d(\Delta T)}{dt} \quad (1-5)$$

$$\Delta T = T(t) - T_0$$

式中， α 为静态频率温度系数， β 为动态频率温度系数。图1—4示出热冲击引起的AT切5MHz五次泛音谐振器频率变化特性^[5]。由图可知，温度快速变化对谐振器频率的影响，比温度缓慢变化时大得多。

静态频率温度系数主要对振荡器的长期频率稳定度产生影响。当频率随时间的定向漂移被温度造成的

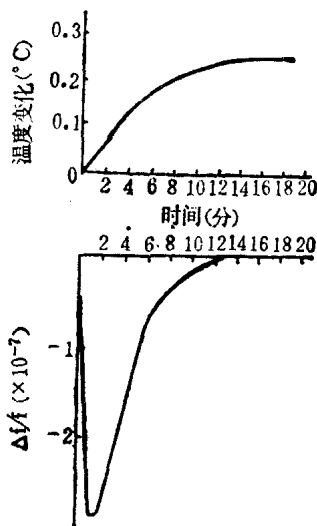


图1—4

热冲击引起的频率变化
出振荡器的老化率，也就无法对其频率进行预报。动态频率温度系数主要对振荡器的短期频率稳定度产生影响。A. Ballato 和 G. Theobald 等人指出^{[3][6]}，当温度快速变化时，谐振器内将产生较大的温度梯度，并在谐振器中产生新的应变和应力，通过非线性耦合，谐振器将产生比温度缓慢变化时大得多的频偏。对AT切谐振器， β 值接近 $10^{-6}^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，故为了获得 10^{-13} 的短期稳定度，恒温槽内温度的起伏应在 $10^{-8}^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以内。