

晶体振荡器电路 设计手册

《无线电技术》增刊

上海市260信箱24分箱
技术资料室

晶体振荡器电路

设计手册

说 明

本《手册》译自《Quartz Crystal Oscillator Circuits Design Handbook—AD460377》和《A New Approach to High-Stability Temperature-Compensated Crystal Oscillator—AD715955》两编 AD 报告。前一编 AD 报告系统地叙述了晶体振荡器电路设计问题，介绍了用于 1KC 至 200MC 各频段振荡器中的晶体性能及中等稳定度 (100°C 长期稳定度达 3×10^{-6}) 的振荡器性能要求和设计步骤，导出了 1KC 至 200MC 各频段振荡器设计式，列出了一些设计用曲线和图表，举出了各频段振荡器设计例子，最后还给出了各振荡器设计计算数据。后一编 AD 报告介绍了一种获得高稳定度温度补偿的新方法：在温度控制晶体振荡器调谐槽路中增添一只变容二极管和偏压源，便能获得在 5°C 至 80°C 温度范围高达 $\pm 5 \times 10^{-8}$ 的稳定度。这两编 AD 报告併成这本《手册》，对从事晶体管振荡器电路设计人员及有关同志，是有一定参考价值的。

我们在翻译过程中作了一些删节，主要是删去前一编 AD 报告的第 六、九章，第三章的 2~3 节的电子管振荡器电路设计方面章节，还删去了后一编 AD 报告中的计算机计算程序表和程序计算结果表。其次，已发现原著的一些错误并作了更正。

由于我们水平低，这工作中的缺点错误有所难免，请指正。

目 录

导言	8
第一章 晶体特性	13
§ 1-1 概述	13
§ 1-2 在 f_s 与 f_p 之间频率范围内的晶体特性	19
§ 1-3 R_1 与 R_F 的关系	26
§ 1-4 并联一个电容的晶体工作方式	26
§ 1-5 串联一个加载电容的晶体工作方式	28
§ 1-6 晶体型号	30
§ 1-7 晶体参数测量	43
§ 1-8 晶体终端负载对其谐振特性的影响	45
§ 1-9 串联谐振晶体的功耗	47
§ 1-10 晶体 π 型网络	50
§ 1-11 晶体 π 型网络的分析	51
§ 1-12 晶体负载 R 的影响	53
§ 1-13 输出负载 Z_i 的影响	54
§ 1-14 C_i 的影响	54
§ 1-15 R_i 的影响	54
§ 1-16 晶体功耗	56
第二章 晶体在振荡器设计中的应用	61
§ 2-1 概述	61
§ 2-2 普通振荡器的方块图	61
§ 2-3 振荡器增益关系式	62
第三章 放大器特性	66

§3-1	概述	66
§3-2	晶体管放大器	67
§3-3	频率低于 100Kc 的晶体管放大器	68
§3-4	功率增益, 输入电阻与输出电阻	69
§3-5	从共基极“ h ”参数变换成共发射极“ h ”参数	69
§3-6	典型的晶体管放大器工作特性	70
§3-7	G_p , R_{in} , R_o 公式的简化	70
§3-8	高频晶体管特性	71
§3-9	晶体管等效电路	74
§3-10	晶体管放大器性能的实验数据	79
§3-11	电压增益测量	80
§3-12	频率低于 f_v 的电压增益特性	83
§3-13	电压增益截止频率 f_v	89
§3-14	频率高于 f_v 的电压增益	93
§3-15	共发射极放大器输入阻抗	94
§3-16	并联输入电阻	94
§3-17	并联输入电容	99
§3-18	放大器相移	100
§3-19	共基极放大器阻抗	102
§3-20	具有非旁路电阻的共发射极晶体管放大器的等效电路	106
§3-21	从混合 π 型变换成 π 型(导纳)等效晶体管电路	111
§3-22	由晶体管偏置网络形成的共发射极放大器的输入电阻	114
第四章	阻抗变换网络	119
§4-1	概述	119
§4-2	π 型网络	120
§4-3	π 型网络设计	123

§4-4	电容分压器网络	126
§4-5	电感变换器	128
§4-6	自耦变换器	133
§4-7	立氏电桥网络	136
第五章	普通振荡器总论	138
§5-1	振荡器频率公差	138
§5-2	振荡器电路图及元件频率响应特性	142
§5-3	初步设计知识	144
§5-4	振荡器设计步骤	145
第六章	串联谐振振荡器设计	147
§6-1	概述	147
§6-2	800 ^{KC} 到 30 ^{MC} 串联谐振晶体特性	148
§6-3	800 ^{KC} 到 30 ^{MC} 晶体管串联谐振振荡器	150
§6-4	环路电压增益的确定	151
§6-5	晶体负载	152
§6-6	环路增益与 R_L 的关系	152
§6-7	晶体功耗	155
§6-8	晶体功耗与振荡器输出功率的关系	158
§6-9	800 ^{KC} 到 30 ^{MC} 串联谐振振荡器的设计步骤	160
§6-10	设计举例	164
§6-11	[例一]: 1 ^{MC} 串联谐振振荡器	164
§6-12	[例二]: 5 ^{MC} 串联谐振振荡器	168
§6-13	[例三]: 20 ^{MC} 串联谐振振荡器	172
§6-14	频率高于 30 ^{MC} 的串联谐振振荡器	174
§6-15	晶体特性	175

§6-16	放大器特性	178
§6-17	在晶体输入端与放大器输入端之间反馈信号的衰减	179
§6-18	环路电压增益关系式	180
§6-19	晶体功耗	181
§6-20	晶体端接电阻	182
§6-21	振荡器相位关系式	183
§6-22	放大器稳定性	184
§6-23	30 ^{MC} 到 200 ^{MC} 串联谐振振荡器设计步骤	184
§6-24	设计举例	190
§6-25	(例一) 193 ^{MC} 振荡器	190
§6-26	(例二) 150 ^{MC} 振荡器	192
§6-27	(例三) 120 ^{MC} 振荡器	195
§6-28	(例四) 75 ^{MC} 振荡器	197
§6-29	90 ^{KC} 到 500 ^{KC} 串联谐振振荡器	203
§6-30	晶体特性	203
§6-31	放大器特性	205
§6-32	环路电压增益方程	205
§6-33	晶体功耗	208
§6-34	晶体功耗和振荡器输出功率的关系	208
§6-35	90 ^{KC} 到 500 ^{KC} 串联谐振振荡器的设计步骤	210
§6-36	值得注意的问题	210
§6-37	1 ^{KC} 到 100 ^{KC} 串联谐振振荡器设计	212
§6-38	晶体特性	213
§6-39	晶体功耗	214
§6-40	放大器特性	214
§6-41	振荡器环路增益关系式	215

§6-42 设计举例	217
§6-43 (例一) 3KC 晶体管振荡器	218
§6-44 (例二) 20KC 晶体管振荡器	222
§6-45 (例三) 1KC 两级晶体管振荡器	227
§6-46 (例四) 3KC 两级晶体管振荡器	230
第七章 并联谐振振荡器设计	233
§7-1 并联谐振振荡器电路	233
§7-2 $0.8\sim 20\text{MC}$ 并联谐振晶体	235
§7-3 C_L 与 f_a 的关系	238
§7-4 X_e 与 $R_{e\max}$ 的关系	240
§7-5 $0.8\sim 20\text{MC}$ 频率范围的基本皮尔斯振荡器	241
§7-6 设计方法	242
§7-7 将晶体管反馈元件 R_r 和 C_r 并入晶体 π 型网络	244
§7-8 C_r 的影响	245
§7-9 R_r 的影响	247
§7-10 环路电压增益的计算	249
§7-11 R_π 和 R_T 是 $R_e/R_{e\max}$ 和 $X_{Leff}/R_{e\max}$ 的函数	252
§7-12 输出电压极限	255
§7-13 基本皮尔斯振荡器电路的晶体管集电极电流要求	257
§7-14 基本皮尔斯振荡器的功耗输出限制	259
§7-15 基本皮尔斯振荡器的设计步骤	261
§7-16 设计举例	268
§7-17 (例一) 0.8MC 基本皮尔斯振荡器	269
§7-18 (例二) 5MC 基本皮尔斯振荡器	272
§7-19 (例三) 20MC 基本皮尔斯振荡器	275

§ 7-20	0.8 至 20 ^{MC} 的隔离电阻皮尔斯振荡器	287
§ 7-21	环路增益	278
§ 7-22	隔离电阻皮尔斯振荡器设计步骤	280
§ 7-23	设计举例	288
§ 7-24	(例一) 0.8 ^{MC} 隔离电阻皮尔斯振荡器	288
§ 7-25	(例二) 5 ^{MC} 隔离电阻皮尔斯振荡器	291
§ 7-26	(例三) 20 ^{MC} 隔离电阻皮尔斯振荡器	293
§ 7-27	(例四) 5 ^{MC} 隔离电阻皮尔斯振荡器 (2N 706A)	296
§ 7-28	(例五) 20 ^{MC} 隔离电阻皮尔斯振荡器 (2N 706A)	299
§ 7-29	1 ^{KC} 至 500 ^{KC} 并联谐振振荡器设计要点	301
	参考文献 (I)	304

第八章 高稳定度晶体振荡器设计——一种温度补偿的新方法 310

§ 8-1	引言	310
§ 8-2	经典的温度补偿晶体振荡器的调谐法	310
§ 8-3	非线性温度补偿晶体振荡器调谐法	313
§ 8-4	三点热敏电阻网络	316
§ 8-5	两移网络补偿	320
§ 8-6	窄温度范围补偿	323
§ 8-7	结论	324
	附录 A: 形状参数的计算机选择	324
	附录 B: 网络电阻值的计算	326
	参考文献 (II)	329

本手册参数符号说明

- A — 网络电压衰耗比；
- A_V — 晶体 π 型网络输出信号电压与输入信号电压比；
- A'_V — 晶体并联有小容量电容后的输出信号电压与输入信号电压之比（即修正后的 A_V ）；
- A_{Vc} — 串联谐振晶体两端的电压衰耗；
- A_{Vt} — 放大器输出端与晶体之间的阻抗变换网络的电压比；
- BV_{CED} — 晶体管基极开路时集—射极额定击穿电压；
- C_E — 发射极去耦电容；
- C_L — 接于晶体的负载电容；
- C_S — 由图 1-17 所定义的晶体 π 型网络电容；
- C_T — 由图 1-17 所定义的晶体 π 型网络电容；
- C_{be} — 定义见 §3-13；
- $C_{b'E}$ — 当采用发射极负反馈时 C_{be} 的等效电容；
- $C_{cb'}$ — 定义见 §3-13；
- $C_{in(p)}$ — 放大器的并联输入电容；
- C_ℓ — 由图 1-17 所定义的晶体 π 型网络电容；
- C_o — 晶体并联电容；
- C_{ob} — 定义见 §3-13；
- $C_{o(p)}$ — 放大器并联输出电容；
- $\hat{C}_{(p)}$ — 定义见 §3-25；
- C_r — 晶体管等效电路中的基极—集电极电容；
- C_1 — 晶体动态支路等效电容，也是用于阻抗变换器中容性分压器的电容；
- C_2 — 容性分压器用的电容；
- $\frac{d\phi}{df}$ — 晶体相角对频率的变化率；

$\frac{d\phi}{dX_e}$ — 在晶体 π 型网络分析中用来表示 $\frac{d\phi}{df}$;
 Δb — 定义见方程 (3-26);
 Δf — 频率变化增量;
 E — 网络的功率转换效率;
 f_a — 晶体并联谐振频率;
 f'_a — 晶体串有或并有负载电容时的谐振频率;
 f_m — 晶体最小阻抗频率;
 f_n — 晶体最大阻抗频率;
 f_f — 晶体动态支路电抗等于 C_0 的电抗时 ($X_{C_1} = X_{C_0}$) 的频率;
 f_r — 晶体谐振频率;
 f_s — 晶体动态支路谐振频率;
 f_T — 晶体管电流增益 — 带宽之积;
 f_v — 晶体管放大器电压增益截止频率;
 f'_v — 非本征互导截止频率;
 f_α — α_0 下降 3db 时 h_{fe} 处的频率;
 f_β — h_{FE} 下降 3db 时的 h_{fe} 处的频率;
 G_M — 定义见 §3-13;
 G_p — 放大器功率增益;
 G'_p — 振荡器环路净功率增益;
 G_v — 放大器电压增益;
 G'_v — 放大器刚产生限幅时的实际电压增益;
 G_{vL} — 振荡器环路电压增益;
 G_{v0} — 晶体管放大器低频电压增益;
 G_{vR} — 放大器和晶体净电压增益;
 g_m — 定义见 §3-13;
 g'_m — 非本征晶体管 g_m , (定义见 §3-25)

$\left. \begin{matrix} h_i \\ h_r \\ h_f \\ h_o \end{matrix} \right\}$ 低频晶体混合参数。如果在第二个字母后面再缀有字母，就表示其什么电极，例如， h_{oe} 就表共发射极时的 h_o 。

h_{FE} —— 晶体管低频时共发射极电流增益；

h_{FEmin} —— h_{FE} 的最小值；

h_{fe} —— 共发射极晶体管的电流增益；

h_{fb} —— 共基极的晶体管电流增益；

I_C —— 晶体管集极直流电流；

I_E —— 晶体管发射极直流电流；

K —— 即“千”。

KC —— 即“千赫芝”，或“千周/秒”；

K_A —— 晶体 π 型网络因子。 $K_A = \left(1 + \frac{R}{X_{CT}} \cdot \frac{R_{emax}}{X_{Leff}}\right)$ ，其值为 4~5。

k —— 电感耦合系数；

$L(s)$ —— 共基极晶体管串联输入电感；

L_1 —— 晶体动态支路等效电感；

M —— 互感。晶体 Merit 图中， $M = X_{co}/R_1$ ；

MC —— “兆赫芝”，或“兆周/秒”。

MW —— 毫瓦特；

PF —— 微微法拉弟；

PPM —— 百万分的缩写（即 $1 \text{ PPM} = 1 \times 10^{-6}$ ）

P_c —— 晶体功耗；

P_{cmax} —— 在规定工作条件下晶体额定耗散功率；

P_{cmax} —— 晶体额定耗散功率；

P_D —— 晶体管功率耗散；

P_{Dmax} —— 晶体管在最高工作温度时 P_D 的最大允许值；

P_{FB} —— 振荡器反馈功率；

P_L —— 振荡器输出功率；

P_T —— 放大器总的输出功率；

Q —— 电路放大系数；

Q_s —— 由方程 (1-26) 定义；

R —— 晶体 π 型网络电阻，一般作“电阻”用；

R_D —— 定义见 §3-13；

R_E —— 发射极去耦电阻；

R_{FB} —— 反射到放大器输出电路的反馈网络电阻；

R_L —— 反射到集电极电路的振荡器外负载电阻；

R_T —— 放大器总的负载电阻；

R_{Tmin} —— 基本皮尔斯电路中 R_T 的最小值；

R_a —— 晶体并联谐振时等效电阻；

$\left. \begin{matrix} R_{b1} \\ R_{b2} \end{matrix} \right\}$ —— 基极偏置电阻；

$R_{b(p)}$ —— R_{b1} 和 R_{b2} 的并联电阻；

$R_{b'e}$ —— 定义见 §3-13；

$R_{b'E}$ —— 用发射极负反馈时的 $R_{b'e}$ 等效值；

R_e —— 晶体等效串联电阻；

$R_{e max}$ —— 当串联电阻满足于负载电容时晶体串联电阻的最大值；

R'_e —— 晶体并联一个小容量电容后的等效串联电阻；

R_i —— 晶体终接在放大器输入端的电阻；

$R_{in(p)}$ —— 放大器并联输入电阻；

R''_{in} —— $R_{b(p)}$ 与 $R_{in(p)}$ 并联时的输入电阻；

$R_{in(s)}$ —— 共基晶体管放大器的串联输入电阻；

$R_{o(p)}$ —— 放大器的并联输出电阻；

R_r —— 晶体管 π 型等效电路基极-集电极之间电阻；
 R_r' —— R_r 部分；
 R_r'' —— R_r 部分或 $R_{b'E}$ 部分；
 $R_{r\max}$ —— 晶体谐振电阻最大值；
 R_π —— 从 C_T 两端看到晶体 π 型网络并联输入电阻；
 $R_{\pi\min}$ —— R_π 的最小值；
 $R_{\pi\max}$ —— R_π 的最大值；
 R_i —— 晶体动态支路等效电阻；
 $R_{i\max}$ —— R_i 的最大值；
 γ —— 晶体 C_0/C_1 之比值；
 γ' —— 发射极欧姆电阻；
 $\gamma_{bb'}$ —— 定义见 § 3-13；
 γ_E —— 非旁路的发射极负反馈电阻；
 γ_e —— 定义见 § 3-13；
 γ_i —— 当 R_i 变换成串联 π 型网络元件时的有效值；
 γ_s —— 阻抗变换网络的负载电阻；
 γ_f —— 定义见 § 3-13；
 $\left. \begin{matrix} T_V \\ T_{V_0} \\ T_{V_i} \end{matrix} \right\}$ —— 阻抗变换网络的电压变换比；
 T_r —— 网络阻抗变换比；
 $V_{\max}$ —— 晶体过激励前串联振荡器输入端允许的最大信号电压；
 V_{BG} —— 基极至地直流电压；
 V_{CC} —— 晶体管电路电源电压；
 V_{CE} —— 晶体管集电极-发射极之间直流电压；
 $V_{o\max}$ —— 晶体 π 型网络输入端可允许的最大信号电压；

- V_{π} —— 在晶体 π 型网络中 C_T 两端的信号电压；
- $V_{\pi A}$ —— 受晶体耗散限制的最大 V_{π} 值；
- X_1 —— 晶体动态支路电抗；
- X' —— 晶体并联有小容量电容时的等效电抗；
- X_{C_0} —— 晶体并联电容的电抗；
- X_{C_1} —— 晶体动态支路电容的电抗；
- X_{C_E} —— C_E 的电抗；
- X_{C_L} —— C_L 的电抗；
- X_{C_M} —— C_M 的电抗；
- X_{C_S} —— C_S 的电抗；
- X_{C_T} —— C_T 的电抗；
- $X_{C_{b'E}}$ —— $C_{b'E}$ 的电抗；
- $X_{C_{b'e}}$ —— $C_{b'e}$ 的电抗；
- $X_{C_{cb'}}$ —— $C_{cb'}$ 的电抗；
- $X_{C_{\ell}}$ —— C_{ℓ} 的电抗；
- $X_{C_{(p)}}$ —— $C_{(p)}$ 的电抗；
- X_{C_r} —— C_r 的电抗；
- X_e —— 频率为 f_a 时晶体等效电抗；
- X_{L_1} —— 晶体动态支路电感的电抗；
- X_{Leff} —— 方程 (1-81)，定义于 §4-2 的 LC π 型网络；
- $X_{L(s)}$ —— 共基晶体管串联输入电感的电抗；
- Y, y —— 导纳；
- Y_f —— 定义见 §3-25；
- Y_{in} —— 定义见 §3-25；
- Z_{Tmin} —— 从基本皮尔斯电路放大器看到总的负载阻抗；
- α —— 共基晶体管电流增益；

α_0 — α 低频时的值；

ω — 角频率，单位为 弧度/秒；

ω_T — 等于 $2\pi f_T$ 。

导 言

在正弦或半正弦振荡器中，调整工作的准则是：

(a) 环路功率增益必等于1；

(b) 环路相移必须等于 $0, 2\pi, 4\pi, \dots$ 弧度。

亦即是：反馈到放大器输入端的既维持振荡又能提供一定环路功率增益的功率，应使放大器输出功率正好满足振荡器输出功率、电路损耗和放大器输入功率的要求。如果这种关系不满足，或者反馈功率太大而引起振荡幅度增大，或者反馈功率太小而引起振荡幅度下降。所以，维持振荡的条件是要满足环路增益等于1。

这种性能也限定了将来电路的要求。当振荡时，其幅度是从0开始增加，等增加到一定值才稳定下来，故电路首先必须提供一个大于1的环路增益，才使振荡幅度增大。然后，环路增益在需要的振荡器功率输出电平上减小到1，使振荡幅度稳定下来。这种作用通常是根据过激励放大的非线性特性而获得。放大器功率增益随信号电平的增加而趋向减小。所以，在振荡幅度增大的同时，能使必须的环路增益下降，这样，条件(a)可以更确切地叙述为：

(a') 在小信号条件下，环路增益必须大于1，这可用图1来定义。

所有的正弦电子振荡器，均可认为是由一个功率放大器和选出部份放大器输出功率反馈到放大器输入端的网络组成。

图1(a)所示的就是这种类型的普通振荡器电路。图1(b)所示的断开反馈接线A点的(a)电路。在(b)图电路中加的负载 Z_F' ，等于用放大器输入阻抗作终端的反馈网络输入阻抗 Z_F ，并且接在放大器输出端。(为避免今后讨论时混淆起见，特标 Z_F')。所以，在图1(a)、(b)电路中的终端阻抗实质上相等。

加到图1(b)电路中反馈网络输入端的信号将在 Z_F' 产生信号功率。所以，环路功率增益定义为： Z_F' 上的功率与加到反馈网络输入的功率之比。