



无线电接收设备 习题集

[苏]B. M. 西福罗夫 主编 赵连强译 谢嘉奎 校

高等教育出版社

57-03

无线电接收设备 习 题 集

[苏] В. И. 西福罗夫 主编

赵连强 译

谢嘉奎 校

高等教育出版社

本书的作者 В. И. 西福罗夫院士是苏联无线电接收领域的权威。这本习题集是他长期从事科研、教学的经验结晶。

本习题集的内容完整、精练，反映当代接收技术发展水平。书中各章都简要地叙述了基本理论知识，给出主要计算公式，列举了典型例题，附有全部习题答案和必要的提示。该习题集既注重物理概念，又注重工程实际应用，还介绍了采用计算机解题方法。

本书可供高等院校电子、通信类专业的师生使用，也可供工程技术人员参考。

* * * * *

Сборник задач и упражнений по курсу

«Радио-приёмные устройства»

Под ред В. И. Сифорова

«Радио и связь» 1984

* * * * *

责任编辑 李永和

无线电接收设备习题集

[苏] В. И. 西福罗夫 主编

赵连强 译 谢嘉奎 校

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 字数 210 000

19 89 年10月第1版 19 89 年10月第1次印刷

印数 0001—1 190

ISBN7-04-000631-6/TN·43

定价 4.70 元

译 者 的 话

本书的作者 В. И. 西福罗夫院士是苏联无线电接收领域的权威。他对接收理论的形成和发展作出巨大的贡献。由他编著的《无线电接收设备》曾是我国 50 年代广泛采用的教材，对我国无线电接收设备的教学起了推动作用。

这本习题集是他长期从事科研、教学的经验结晶。本书的内容完整、精练，包含有数字信号处理在接收机方面的应用以及声表面波滤波器的设计等，反映当代接收技术发展的水平。本书的习题既注重物理概念，又注重工程实际应用。此外，本书还介绍了采用计算机的解题方法。书中各章都简要地叙述了基本理论知识，给出主要的计算公式，列举有典型意义的例题，附有全部习题的答案和必要的提示。因此，它不仅是一本优秀的习题集，也是一本可供复习、查阅的参考书。

翻译本书的目的在于，希望它能有助于学生进一步开拓思路、扩大知识面，能更牢固地掌握所学的理论知识与正确地运用工程计算方法；希望它能有助于从事电子线路和无线电接收设备方面的工程技术人员进行知识更新；同时还希望，能以这本习题集和其它的苏联优秀教材为借鉴，增加“电子线路”这门学科在系统、设备方面的概念，推动该课程的改革。

本书由南京工学院无线电工程系系主任谢嘉奎教授审校。

在翻译过程中，得到孙文治、陈子敏和王太君等同志的帮助，在此一并表示衷心的感谢。

在翻译过程中,译者对原文错印之处做了修改和加了译注,但由于水平有限,不当之处在所难免,欢迎有关学者和广大读者批评指正。

译 者

1987. 10

前 言

本习题集是按照无线电接收设备课程标准教学大纲的规定,根据作者多年来在莫斯科动力学院从事这门课程教学的经验编写而成的。作者极其重视本课程中新出现的章节和复杂的内容,其中对诸如数字信号处理设备、晶体管的超高频放大器、具有集中选频滤波器(声表面波滤波器)的中频放大器、自动增益控制系统以及抗干扰性问题等,做了相当详尽的分析。

在本习题集中,试图尽量搜集为培养现代无线电接收技术专门人才所必须掌握的、内容广泛的各类问题,诸如:单级电路的电路技术、接收设备主要部件的设计和有关接收机整机的一些特殊问题、几种典型接收机对各种干扰的抗干扰性估计、信号最佳处理和准最佳处理的算法等。

在每一章中,都有解题时所需的系统的内容提要、计算公式以及曲线图表。附录中还附有参考资料和电子计算机程序。在每章末,按照确定的主题分组列出习题。每组习题均按由浅入深的顺序编排。至于一些难度大的习题,既可作为典型计算的主要部分,也可作为课程设计的一部分。习题集中所给出的习题都很典型,如果将其原始数据做些变更,就可使教师增加许多变形的题目。

本习题集引导读者积极运用计算技术工具。根据算题的复杂程度,所使用计算技术的特点有以下几种:

- 1) 使用微型计算器,包括可编程序的微型计算器,按公式进行计算;

- 2) 使用“FORTRAN”、“PL/1”、“BASIC”这些高级语言,独

立编写电子计算机的简单程序；

3) 使用在本习题集附录中列出的专用程序。

书末给出所有习题的答案。对于复杂的习题，还附有解法提示。为了避免所给出的数据(例如，信号的频谱、匹配滤波器的响应、滤波器的幅频特性等数据)过于繁琐，在答案中只给出用来判别解题是否正确的几个点。

在编写本习题集的过程中，承蒙莫斯科动力学院的同事 B. B. 什特科夫副教授和科学技术副博士 B. B. 捷克舍夫对其中某些章节提出了许多有益的建议，作者谨此向他们表示谢意。

目 录

前言	1
第一章 输入电路	1
§ 1.1 等效天线	1
§ 1.2 输入电路的一般电路	2
§ 1.3 带有调谐天线的输入电路	4
§ 1.4 可变调谐的输入电路	5
§ 1.5 匹配电路	6
习题	13
第二章 射频放大器	18
§ 2.1 高频晶体管放大器	18
§ 2.2 超高频晶体管放大器	27
§ 2.3 超高频参量放大器	36
习题	42
第三章 变频器	49
§ 3.1 基本参数及特性, 内部和外部参数的计算	49
§ 3.2 噪声系数、组合干扰哨叫	55
习题	55
第四章 中频放大器	60
§ 4.1 主要质量指标及组成方框图	60
§ 4.2 分散选择性中频放大器中幅频特性的形成	61
§ 4.3 分散选择性中频放大器的工作状态	64
§ 4.4 具有 LC 链路集中选频滤波器的中频放大器	72
§ 4.5 声表面波滤波器的中频放大器	73
习题	80
第五章 检波器	85

§ 5.1 振幅检波器	85
§ 5.2 鉴频器和鉴相器	89
习题	91
第六章 自动增益控制系统	95
§ 6.1 分类、基本参数和特性	95
§ 6.2 放大器的控制特性	97
§ 6.3 静态特性的计算	100
§ 6.4 动态特性的计算	105
习题	106
第七章 自动频率微调系统	111
§ 7.1 自动频率微调系统的方框图	111
§ 7.2 频率自动微调系统	111
§ 7.3 相位自动微调系统	114
习题	115
第八章 无线电接收设备噪声性能的基本特性	120
§ 8.1 噪声干扰的类型及其能量特性	120
§ 8.2 噪声系数和接收机灵敏度	122
习题	125
第九章 信号和噪声通过接收机典型部件	129
§ 9.1 噪声通过接收机高频部件	129
§ 9.2 噪声和未调制信号通过接收机高频部件	130
§ 9.3 噪声通过线性振幅检波器	132
§ 9.4 噪声通过平方律检波器	13
§ 9.5 噪声和简谐信号通过线性振幅检波器	135
§ 9.6 未调制信号和噪声通过鉴频器	137
§ 9.7 接收机噪声系数的测量	138
习题	140
第十章 无线电接收设备对噪声干扰的抗干扰性	145
§ 10.1 调幅信号的接收	145
§ 10.2 调频信号的接收	148
§ 10.3 脉冲信号的接收	152

习题	158
第十一章 无线电接收设备对宽频谱脉冲干扰的抗干扰性	163
§ 11.1 脉冲干扰的特性	163
§ 11.2 无线电接收设备抗脉冲干扰的方法	166
习题	168
第十二章 数字信号处理设备的基本特性	171
§ 12.1 典型的离散信号, z 变换	171
§ 12.2 数字滤波器的特性	174
§ 12.3 数字滤波器的结构框图, 数字滤波器中的过渡过程	179
§ 12.4 离散傅里叶变换	186
习题	188
第十三章 数字滤波器的计算, 信号和干扰对数字信号处理设备作用的分析	192
§ 13.1 递归型数字滤波器的计算	192
§ 13.2 非递归型数字滤波器的计算	196
§ 13.3 信号和干扰对数字信号处理设备的作用	200
习题	202
附录 1 模拟低通原型频率特性的逼近	206
附录 2 集成微电路	209
附录 3 模拟带通滤波器的计算程序	214
附录 4 递归型和非递归型数字滤波器的计算程序	220
答案与提示	230
文献索引	262
符号说明	263
缩略语	275

第一章 输入电路

§ 1.1 等效天线

在这一节中,列举三种最常用天线的等效电路。

外接非调谐鞭状天线。天线的感应电动势为 $\dot{E}_A = \dot{E}h_A$, 其中, $\dot{E}$ 为接收点上的电场强度, h_A 为天线的有效高度。鞭状天线或单根垂直天线的有效高度为

$$h_A = (\lambda/2\pi) \operatorname{tg}(\pi h/\lambda) \quad (1.1)$$

式中, h 是天线的几何高度, λ 是信号的波长。当 $h \ll \lambda$ 时, 式(1.1)简化为 $h_A \approx h/2$ 。

这种天线的等效电路如图 1.1 a 所示。在测试接收机时,等效天线的输出阻抗应对应某个“平均”天线的输出阻抗。对于广播接收机来说,可将高 $h = 5 \text{ m}$ 的天线作为“平均”天线,其等效电路的各个参数值为 $R_{A1} = 80 \Omega$, $R_{A2} = 320 \Omega$, $C_{A1} = 125 \text{ pF}$, $C_{A2} = 400 \text{ pF}$, $L_A = 20 \mu\text{H}$ 。

在不同波段中,可将图 1.1 a 的等效电路加以简化,即在长波和中波波段,可简化为图 1.1 b;在短波波段,可简化为图 1.1 c。

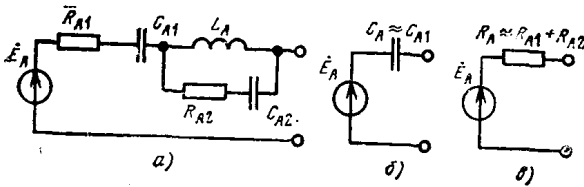


图 1.1

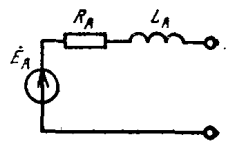


图 1.2

环形天线和磁性天线。图 1.2 示出了它们的等效电路,图中, R_A 是天线的电阻, L_A 是天线线圈(或环状线框)的电感。这种天线在对准方向图的最大值时的有效高度为

$$h_A = 2\pi S w \mu / \lambda \quad (1.2)$$

式中, S 是线圈匝的面积, w 是匝数, μ 是内芯的相对导磁率(空气的 $\mu=1$, 铁氧体的 $\mu=100\sim200$)。

调谐天线。这种天线工作在很窄的频率范围内, 并且在谐振频率上, 其输出阻抗为一纯电阻 R_A (见图 1.1b)。例如半波偶极子天线就属于调谐天线, 其参数为 $R_A=73\Omega$, $h_A=\lambda/\pi$ 。

§ 1.2 输入电路的一般电路

可按输入电路与天线耦合的性质以及按选择性系统的结构来分类输入电路。最简单的单回路输入电路可以归结为回路与天线之间、回路与接收机第一级之间均系自耦变压器耦合的一般输入电路, 其等效电路如图 1.3a 所示, 图中, $Z_1=Z_A+Z_{cb}$, 即天线的复数输出阻抗 Z_A 和输入电路中天线与谐振回路之间耦合元件的阻抗 Z_{cb} 之和; g_K 是回路固有谐振电导; g_2 是接收机第一级输入导纳的电导分量(输入导纳的虚部已折合到回路电抗元件 L_K 和 C_K 中)。

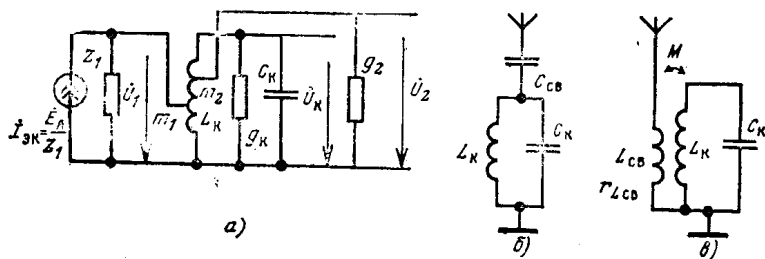


图 1.3

对于图 1.3a 所示的输入电路, 其电压传输系数的一般表达式

为^[13,14]

$$K = \frac{\dot{U}_2}{\dot{E}_A} = \frac{m_1 m_2}{Z_1(j\omega) g_{K\text{BK}}(1 + j\xi)} \quad (1.3)$$

$$\text{式中} \quad g_{K\text{BK}} = g_1 m_1^2 + g_K + g_2 m_2^2 \quad (1.4)$$

为回路的等效电导;

$$\xi = Q_{K\text{BK}} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (1.5)$$

为一般失谐量, 当 $|\Delta\omega| \ll \omega_0$ 时, $\xi \approx 2\Delta\omega / (d_{K\text{BK}}\omega_0)$, 其中, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$; ω_0 为输入回路的谐振角频率; $d_{K\text{BK}} = \rho g_{K\text{BK}}$ 为回路的等效衰减量; $\rho = \omega_0 L_K = 1/(\omega_0 C_K)$ 为回路的特性阻抗; $m_1 = U_1/U_K$ 和 $m_2 = U_2/U_K$ 分别为回路对前后两方的接入系数; $Q_{K\text{BK}} = 1/d_{K\text{BK}}$ 为回路的品质因数。

由式(1.3)可得, 输入电路在谐振频率上的电压传输系数为

$$K_0 = m_1 m_2 / (|Z_1(\omega_0)| g_{K\text{BK}}) \quad (1.6)$$

以 dB 计的输入电路单信号选择性为

$$\sigma = 20 \lg (U_{\text{BX}}/U_{\text{BX0}}) \big|_{U_{\text{BLY}} = \text{常数}} \quad (1.7)$$

式中, U_{BX} 是在给定频率上的输入电压, U_{BX0} 是在谐振频率上的输入电压, U_{BLY} 是输出电压。

对于由 n 个相同的、互不耦合而且各自均调谐在同一频率上的单振荡回路组成的预选器来说, 以 dB 计的选择性为

$$\sigma = 10n \lg (1 + \xi^2) \quad (1.8)$$

式中 ξ 是已为式(1.5)所定义的一般失谐。

这种预选器的 3dB 通频带 为

$$\Pi = f_0 d_{K\text{BK}} \sqrt{\frac{n}{2} - 1} \quad (1.9)$$

其他几种形式的输入电路也可归结为图 1.3a 所示的一般电路。例如对于图 1.3b 所示外电容耦合的输入电路应令 $m_1 = 1$, $r_{cB} = 0$, $X_{cB} = 1/(\omega C_{cB})$; 又如对于图 1.3c 所示变压器耦合的输

入电路, 则应令 $m_1 \approx M/L_K$, $r_{CB} = r_{LCB}$, $X_{CB} = \omega L_{CB0}$

§ 1.3 带有调谐天线的输入电路

调谐天线通常都具有相当宽的通频带, 而且它们的输出阻抗 $Z_A(j\omega) \approx R_A$ [若在天线与输入回路之间接有馈线, 则式(1.3)和式(1.6)中, 应令 R_A 等于馈线特性阻抗 W]。因此, 对调谐天线而言 $Z_1 \approx R_A - Z_{CB0}$

自耦变压器耦合的一般输入电路(如图 1.3a所示)。在满足条件

$$g_1 m_1^2 = g_K + g_2 m_2^2 \quad (1.10)$$

时, 输入电路与调谐天线相匹配, 因此电压传输系数为

$$K_0 = m_2 / (2g_1 |Z_1(\omega_0)| m_1) \quad (1.11)$$

在 $Z_{CB} = 0$, $Z_A = R_A$ 的情况下, 式(1.11)简化为

$$K_0 = m_2 / 2m_1 \quad (1.12)$$

在输入电路的通频带未作限定的匹配情况下, 其最大电压传输系数为

$$K_{0M} = \begin{cases} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g_1}{g_2 - g_K}}, & g_1 > g_2 \\ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g_1 - g_K}{g_2}}, & g_2 > g_1 > g_K \end{cases} \quad (1.13)$$

而接入系数为

$$\begin{aligned} m_1 &= \sqrt{\frac{g_K + g_2}{g_1}}, m_2 = 1, & g_1 > g_2 \\ m_1 &= 1, m_2 &= \sqrt{\frac{g_1 - g_K}{g_2}}, & g_2 > g_1 > g_K \end{aligned} \quad (1.14)$$

在输入电路的通频带给定时的匹配情况下, 其最大电压传输系数为

$$K_{0\kappa} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g_1}{g_2} \frac{\gamma - 2}{\gamma}} \quad (1.15)$$

式中, $\gamma = \Pi / \Pi_{\kappa}$ 是通频带展宽系数, Π 是给定的 3dB 通频带, Π_{κ} 是回路固有的 3dB 通频带。而接入系数应分别为

$$m_1 = \sqrt{\frac{g_{\kappa}}{g_1} \frac{\gamma}{2}}, m_2 = \sqrt{\frac{g_{\kappa} \gamma - 2}{g_2 \cdot 2}} \quad (1.16)$$

仅当 $g_1 \geq g_2$ 时式(1.15)和(1.16)才成立。

如果按式(1.16)进行计算时, 出现了 $m_2 > 1$ 的情况, 则应令 $m_2 = 1$, 而且在回路上并接一分流电阻, 其电导值为

$$g_{\text{ш}} = g_{\kappa}(\gamma - 2) - g_2 \quad (1.17)$$

并且按下式选取接入系数 m_1 :

$$m_1 = \sqrt{g_{\kappa}(\gamma - 1)/g_1} \quad (1.18)$$

变压器耦合的输入电路 (如图 1.3b 所示)。它与调谐天线之间的匹配条件是耦合系数 $k_{\text{CB}} = M / \sqrt{L_{\text{CB}} L_{\kappa}}$ 等于

$$k_{\text{CB}} = \sqrt{d'_{\kappa} \sqrt{d_A + 1/d_A}} \quad (1.19)$$

式中, $d'_{\kappa} = \omega_0 L_{\kappa} (g_{\kappa} + m_2^2 g_2)$ 是计入电导 g_2 分流作用时的回路衰减量, $d_A = \omega_0 L_{\text{CB}} / R_A$ 。这种输入电路的谐振电压传输系数仍按式(1.11)、式(1.13)和式(1.15)进行计算, 但此时应取 $m_1 = M / (L_{\kappa} \sqrt{1 + d_A^2})$ 。由于从结构上考虑, 能够实现的 k_{CB} 不大于 0.5~0.6, 因此, 对 L_{CB} 的取值应使在最小可能的 k_{CB} 情况下达到匹配。当 $d_A = 1$, 即 $L_{\text{CB}} = R_A / \omega_0$ 时, k_{CB} 值为最小, 即

$$k_{\text{CB min}} = \sqrt{2d'_{\kappa}} \quad (1.20)$$

§ 1.4 可变调谐的输入电路

若接收机具有可变调谐的输入电路, 就可以采用非调谐天线。一般说来, 非调谐天线的输出阻抗常呈容性 (见图 1.16)。现在来讨论与天线作弱耦合的这类输入电路。

外电容耦合的输入电路(如图 1.3 6所示),当耦合电容 $C_{CB} \ll C_A$ 时,谐振电压传输系数为

$$K_0 = C_{CB} L_K m_2 \omega_0^2 / d_{K\Theta K} \quad (1.21)$$

具有可变电容的单谐振回路的波段覆盖系数为

$$k_A = \frac{f_{0\max}}{f_{0\min}} = \sqrt{\frac{C_{K\max} + C_M}{C_{K\min} + C_M}} \quad (1.22)$$

式中, C_M 是安装电容和接入谐振回路的其他外接电路电容。

变压器耦合的输入电路(如图 1.3 6所示),其谐振电压传输系数为

$$K_0 = \frac{M m_2}{d_{K\Theta K} L_{CB} |1 - \omega_A^2 / \omega_0^2|} \quad (1.23)$$

式中, $\omega_0 = 1/\sqrt{L_K C_K}$, $\omega_A \approx 1/\sqrt{L_{CB} C_A}$, M 是耦合线圈 L_{CB} 与回路电感线圈 L_K 之间的互感量。若用电容器进行调谐,可按下式选取耦合线圈的电感量。

$$L_{CB} = L_K \frac{C_{K\Theta K\min} \delta A^2 - 1}{C_{K\Theta K\max} \delta - 1} \approx \frac{\delta}{\delta - 1} \frac{1}{\omega_{0\min}^2 C_{A\min}} \quad (1.24)$$

式中, $A = k_A \sqrt{C_{A\min} / C_{A\max}}$, $\delta = K_{0\max} / K_{0\min}$ 是在调谐波段内给定的传输系数的不均匀系数。

§ 1.5 匹配电路

一般地说,从获取较大的功率传输系数和较小的驻波系数的观点出发(后者在超高频频段内特别重要),将具有复数阻抗 Z_n 的负载与具有复数阻抗 Z_r 的信号源直接相连接并非最佳方式。因此,在信号源与负载之间,往往需要接入一个匹配电路,如图 1.4 所示。上面讨论的几种输入电路,是具体实现匹配电路的实例之一。通常,把天线或传输线看作信号源,而把下一级的有源元件看作负载(类似的匹配电路也可用来实现接收机其他级间的匹配)。匹配电路的主要任务是用来保证输入端和(或)输出端实现匹配,

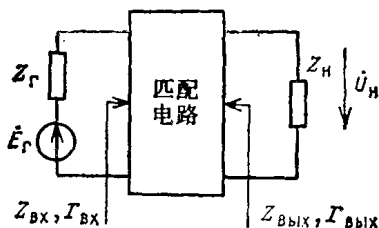


图 1.4

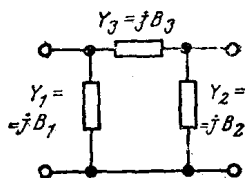


图 1.5

此外，还要起到在干扰背景中预选信号的作用。信号源与负载之间的匹配有两种不同情况：其一是窄带匹配，即固定频率上的匹配；其二是宽带匹配，即在某一频段内的匹配。下面就来分别讨论这两种匹配情况。

窄带匹配。现讨论信号源与负载在频率 $\omega = \omega_0$ 上匹配的情况。应当指出，将最大的功率传输给负载的条件是在输入端实现共轭匹配，即满足条件

$$Z_{BX}(\omega_0) = Z_r^*(\omega_0) \quad (1.25)$$

现假定匹配电路是由理想电抗元件构成的无源电路，其 Y 参数都是纯虚数，即

$$Y_{11} = jb_{11}, Y_{12} = Y_{21} = jb_{12}, Y_{22} = jb_{22} \quad (1.26)$$

由式(1.25) 可得到两个标量方程为(参见表 2.2 中四端网络输入电导的表达式)

$$g_r = \frac{b_{12}^2 g_H}{g_1^2 + (b_H + b_{22})^2}$$

$$b_r = -b_{11} + \frac{b_{12}^2 (b_H + b_{22})}{g_1^2 + (b_H + b_{22})^2} \quad (1.27)$$

式中已令 $Y_H = Z_H^{-1} = g_H + jb_H$, $Y_r = Z_r^{-1} = g_r + jb_r$ 。为了唯一地求出 b_{11}, b_{12}, b_{22} 的数值，式(1.27)中还需补充一个条件，即

$$b_{22} = -b_H \quad (1.28)$$

这时匹配电路的传输系数将在频率 ω_0 上为最大(因而提高了匹配