

Electronic Noise and Low Noise Design

# 电子噪声 与低噪声设计

高晋占 编著

Gao Jinzhan

清华大学出版社



Electronic Noise and Low Noise Design

# 电子噪声 与低噪声设计

高晋占 编著

Gao Jinzhan

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

电子噪声包括内部固有噪声和外部干扰噪声。电子噪声是影响检测系统性能的主要因素之一。在通信系统中,噪声可能导致信息传输错误。

本书致力于利用随机噪声理论分析和解释电子系统中噪声的产生和传播问题,介绍各种噪声源相关的机制和模型,说明不同噪声的特性和传播方式,以及线性电路中的噪声分析方法和噪声特性测量方法,并详细介绍各种不同噪声的抑制方法,给出大量实例,总结出低噪声设计的规则和要点。

本书可用作电子工程、自动化、测试技术与仪器等专业的本科生或研究生教材,也可供涉及电子噪声和电磁兼容性的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

电子噪声与低噪声设计/高晋占编著. —北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-43559-4

I. ①电… II. ①高… III. ①电子系统—噪声 ②电子系统—低噪声—设计 IV. ①TN911.4  
②TN722.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 081960 号

责任编辑:王一玲

封面设计:常雪影

责任校对:梁毅

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:21 字 数:522千字

版 次:2016年6月第1版 印 次:2016年6月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:59.00元

产品编号:062694-01

# 前 言

在电子电路和系统中,噪声是个重要问题。噪声污染有用信号,并使信号包含的信息增加了不确定性。电子噪声是影响检测系统性能的主要因素之一。在通信系统中,噪声可能导致信息传输错误。即使在噪声阈值较高的数字电路和计算机系统中,严重的噪声可能造成存储位的变化和程序运行混乱。

噪声包括内部固有噪声和外部干扰噪声。内部固有噪声是由载流子的随机运动引起的,有些固有噪声源可以通过在制造过程中提高加工质量加以控制,但其中大多数是基础噪声,不取决于技术。而外部干扰噪声是由外部噪声源发出,经过某种耦合渠道对电路污染的结果。这两种噪声具有不同原因,它们需要不同的处理方法,在多数书籍和文献中,这两种噪声都是分别对待的,外部干扰噪声通常是电磁兼容性(EMC)相关书籍的主题。但是,这两种噪声引起的问题是类似的,应该综合在一起考虑。在处理其中的一种噪声时,有理由必须把另一种噪声也考虑在内。

例如,当处理弱信号的电路无法正常工作时,污染了有用信号的噪声是源自于该电路本身还是从外部拾取的,从用户的角度来看都是无关紧要的。在这两种情况下噪声都会掩盖信号,在最坏的情况下则不能恢复信息内容。因此,只努力抑制电路的固有噪声,但缺乏抵御干扰噪声的保护手段,电路的噪声特性就会大打折扣。另外,在设计屏蔽措施时,努力把干扰噪声降低到固有噪声幅度之下,往往没有多大意义。

本书涵盖上述两种噪声,致力于分析和解释电子系统中各种噪声的来源和性质,介绍各种噪声源的机制和模型,说明不同噪声的特性和耦合方式,以及线性电路中的噪声分析方法和噪声特性测量方法,介绍各种噪声的抑制措施,给出低噪声设计的规则和方法。

许多种噪声具有随机性,其描述方式和分析方法不同于确定性信号,不太容易理解,本书第1章首先介绍随机噪声的基本原理和特性,这是后续各章及延续阅读的理论基础。

第2~5章致力于固有噪声,这种噪声取决于电子器件和电路设计。第2章介绍各种固有噪声源的特性和描述方法;第3章介绍各种噪声参数和噪声分析方法;第4章介绍电子系统中常见的电子器件的噪声源、噪声模型和噪声特性;第5章介绍常用的噪声性能测量方法。

第6~8章致力于外部干扰噪声,这种噪声受设备的物理结构和电路布局的影响很大。第6章介绍各种干扰噪声源和干扰耦合途径,除电磁噪声外,还特别介绍机械原因或温度扰动引起的噪声;第7章介绍干扰噪声抑制方法,重点是屏蔽和接地;第8章介绍常见干扰噪声源的噪声产生机制和预防措施。

第9章介绍低噪声电路设计的方法和技术,包括选择低噪声有源器件,确定电路组态和工作点,噪声匹配的实现等,特别分析了反馈对噪声性能的影响。

本书可用作电子、通信、自动化、测试技术与仪器等专业的高年级本科生或研究生教材,也可供涉及电子噪声和电磁兼容性的工程技术人员参考。

由于作者水平所限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

高晋占

2015年10月于清华园

# 符号说明

## 1. 基本符号

$f$	频率通用符号,单位为 Hz
$f_0$	中心频率,单位为 Hz
$f_c$	截止频率,单位为 Hz
$i$	电流通用符号,单位为 A
$l$	距离或长度,单位为 m
$u, v$	电压通用符号,单位为 V
$r$	器件内部的等效电阻,单位为 $\Omega$
$B$	系统频带宽度,单位为 Hz
$B$	电纳的通用符号,单位为 S
$C$	电容的通用符号,单位为 F
$E$	数学期望运算符
$G$	电导的通用符号,单位为 S
$I$	电流的有效值,单位为 A
$I_{DC}$	平均直流电流,单位为 A
$L$	电感的通用符号,单位为 H
$M$	互感的通用符号,单位为 H
$P$	功率的通用符号,单位为 W
$R$	电阻或等效电阻,单位为 $\Omega$
$R_i$	电路的输入电阻,单位为 $\Omega$
$R_o$	电路的输出电阻,单位为 $\Omega$
$R_L$	负载电阻,单位为 $\Omega$
$R_s$	信号源内阻,单位为 $\Omega$
$U, V$	电压的有效值,单位为 V
$T$	热力学温度(旧称绝对温度),单位为 K

$X$	电抗的通用符号,单位为 $\Omega$
$Y$	导纳的通用符号,单位为 S
$Z$	阻抗的通用符号,单位为 $\Omega$
$\omega$	角频率通用符号,单位为 rad/s

## 2. 线性系统符号

$A(t)$	幅度函数
$\varphi(t)$	相位函数
$G(\omega)$	幅频特性函数
$\varphi(\omega)$	相频特性函数
$h(t)$	冲激响应函数
$H(j\omega)$	频率响应函数
$H(s)$	传递函数
$H(z^{-1})$	离散传递函数

## 3. 随机噪声符号

$e_n$	噪声电压
$i_n$	噪声电流
$\overline{e_n^2}$	噪声电压的均方值
$\overline{i_n^2}$	噪声电流的均方值
$E_n$	噪声电压的有效值, $E_n = \sqrt{\overline{e_n^2}}$
$I_n$	噪声电流的有效值, $I_n = \sqrt{\overline{i_n^2}}$
$e_N$	噪声电压的平方根谱密度,单位为 $V/\sqrt{\text{Hz}}$
$i_N$	噪声电流的平方根谱密度,单位为 $A/\sqrt{\text{Hz}}$
$e_1$	热噪声电压

$i_t$	热噪声电流	$r_{cc}$	共射接法下集电极之间的微变电阻
$e_{sh}$	散弹噪声电压	$r_{ds}$	场效应管漏源之间的等效电阻
$i_{sh}$	散弹噪声电流	$r_{on}$	导通电阻
$e_f$	1/f 噪声电压	D	二极管, 场效应管的漏极
$i_f$	1/f 噪声电流	G	场效应管的栅极
F	噪声系数(noise factor)	S	场效应管的源极
$F_{dB}$	噪声因数(noise figure), 单位为 dB	$I_D$	二极管电流, 漏极电流
S/N	信噪比	$I_B$	共射接法下的基极电流
$B_e$	等效噪声带宽	$I_C$	共射接法下的集电极电流
$\Delta f$	窄带宽度	$I_E$	共射接法下的发射极电流
$p(x)$	$x$ 的概率密度函数	$\alpha$	共基接法下的电流放大倍数, $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$
$\mu_x$	$x$ 的均值	$\beta$	共射接法下的电流放大倍数, $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
$\sigma_x^2$	$x$ 的方差	$\beta_0$	共射接法下的直流电流放大倍数, $\beta_0 = I_C / I_B$
$\sigma_x$	$x$ 的标准差		
$\overline{x^2}$	$x$ 的均方值		
$C_x(\tau)$	$x$ 的自协方差函数		
$c_x(\tau)$	$x$ 的归一化自协方差函数		
$C_{xy}(\tau)$	$x$ 和 $y$ 的互协方差函数		
$c_{xy}(\tau)$	$x$ 和 $y$ 的归一化互协方差函数		
$R_x(\tau)$	$x$ 的自相关函数		
$R_{xy}(\tau)$	$x$ 和 $y$ 的互相关函数		
$S(f)$	噪声的功率谱密度函数		
$S_e(f)$	噪声电压的功率谱密度函数		
$S_i(f)$	噪声电流的功率谱密度函数		
$S_x(f)$	$x$ 的功率谱密度函数		
$S_{xy}(f)$	$x$ 和 $y$ 的互功率谱密度函数		
$\rho_x(\tau)$	$x$ 的归一化自相关函数		
$\rho_{xy}(\tau)$	$x$ 和 $y$ 的归一化互相关函数		
$ J $	雅可比(Jacobi)行列式		
<b>4. 半导体器件参数符号</b>			
b	基极		
c	集电极		
e	发射极		
$f_T$	晶体管的特征频率, 即共射接法下电流放大倍数为 1 的频率, 单位为 Hz		
$g_m$	跨导		
$r_{bb'}$	基区体电阻		
$r_{b'e}$	发射结的微变等效电阻		
			<b>5. 其他符号</b>
		$c$	电磁辐射速度, $c = 2.998 \times 10^8$ m/s
		$h$	普朗克(Planck)常数, $h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js
		$k$	玻耳兹曼(Boltzmann)常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K
		$q$	电子电荷, $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C
		$\lambda$	波长, m
		$\epsilon$	介质的介电常数
		$\epsilon_0$	自由空间的介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m
		$\epsilon_r$	对自由空间的相对介电常数, $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$
		$\mu$	介质的磁导率
		$\mu_0$	自由空间的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m = $4\pi \times 10^{-4}$ $\mu$ H/mm
		$\mu_r$	对自由空间的相对磁导率, $\mu_r = \mu / \mu_0$
		$\sigma$	介质的电导
		$\sigma_c$	铜的电导, $\sigma_c = 5.82 \times 10^7$ S/m
		$\sigma_r$	对铜的相对电导, $\sigma_r = \sigma / \sigma_c$
		CMRR	共模抑制比

# 目 录

第 1 章 随机噪声基础	1
1.1 随机噪声概述	1
1.1.1 噪声定义与分类	1
1.1.2 内部固有噪声和外部干扰噪声比较	3
1.1.3 噪声的影响	4
1.2 随机噪声的概率分析方法	7
1.3 随机噪声的统计特征	10
1.3.1 均值、方差与均方值	10
1.3.2 相关函数与协方差函数	11
1.3.3 功率谱密度函数	15
1.4 常见随机噪声	17
1.4.1 白噪声与有色噪声	17
1.4.2 窄带噪声	19
1.5 随机噪声通过电路系统的响应	21
1.5.1 随机噪声通过线性系统的响应	21
1.5.2 随机噪声通过非线性系统的响应	24
第 2 章 电子系统中的固有噪声源	29
2.1 热噪声	30
2.1.1 热噪声的起源	30
2.1.2 热噪声的特性	30
2.2 扩散噪声	35
2.3 散弹噪声	36
2.4 量子噪声	39



2.5	产生-复合噪声(G-R 噪声)	40
2.6	1/f 噪声	42
2.7	爆裂噪声	45
2.8	雪崩噪声	46
<b>第3章</b>	<b>噪声参数与噪声分析</b>	<b>50</b>
3.1	功率和增益	51
3.1.1	功率的各种常用定义	51
3.1.2	资用功率和资用功率增益	53
3.1.3	可交换功率和可交换功率增益	55
3.2	等效噪声带宽	56
3.3	线性一端口的噪声参数	60
3.3.1	等效噪声电阻	61
3.3.2	等效噪声温度	62
3.3.3	其他噪声参数	63
3.4	线性二端口的噪声模型与噪声参数	65
3.4.1	$E_n$ - $I_n$ 噪声模型及等效输入噪声电阻	65
3.4.2	等效输入噪声温度	69
3.4.3	工作噪声温度	72
3.4.4	噪声系数	73
3.4.5	噪声测度	81
3.5	二端口噪声分析	83
3.5.1	二端口的噪声模型变换	83
3.5.2	等效噪声源相关时二端口的噪声分析	84
<b>第4章</b>	<b>电子器件噪声</b>	<b>88</b>
4.1	电阻噪声	88
4.1.1	电阻的噪声机制与噪声指标	89
4.1.2	低噪声电阻的选择	91
4.2	电容、电感和电池噪声	93
4.3	半导体二极管的噪声特性	95
4.4	双极型晶体管(BJT)的噪声特性	99
4.4.1	BJT 的结构、等效电路和噪声源	99
4.4.2	BJT 的噪声参数	102
4.4.3	BJT 噪声的频率分布	104
4.5	场效应管(FET)的噪声特性	107
4.5.1	FET 的结构与噪声源	107
4.5.2	FET 的噪声等效电路与噪声参数	110
4.6	运算放大器的噪声特性	113

4.6.1	运算放大器的等效输入噪声模型	113
4.6.2	运算放大器噪声性能计算	116
4.7	传感器电路噪声分析	122
<b>第5章</b>	<b>噪声性能测量</b>	<b>133</b>
5.1	噪声测量常用方法	133
5.2	噪声测量中的检波器和平均器	136
5.3	噪声功率和有效值的测量误差	140
5.4	噪声功率谱密度测量	142
5.5	二端口等效输入噪声测量	146
5.6	噪声系数测量	147
5.7	噪声温度测量	154
5.8	其他噪声性能的测量和计算	157
5.9	噪声发生器	160
<b>第6章</b>	<b>干扰噪声</b>	<b>166</b>
6.1	外部噪声源	167
6.1.1	自然噪声源	168
6.1.2	电磁噪声源	170
6.1.3	静电噪声源	173
6.1.4	非电起源的干扰噪声源	174
6.1.5	干扰噪声的频谱分布	176
6.2	干扰噪声耦合途径	177
6.2.1	传导耦合	179
6.2.2	电场耦合	183
6.2.3	磁场耦合	186
6.2.4	电磁辐射耦合	191
6.2.5	耦合模式	193
<b>第7章</b>	<b>干扰噪声抑制方法</b>	<b>196</b>
7.1	电磁屏蔽	196
7.1.1	场传播与波阻抗	197
7.1.2	屏蔽层的吸收损耗	200
7.1.3	屏蔽层的反射损耗	202
7.1.4	屏蔽层中的多次反射	206
7.1.5	屏蔽效能分析与综合	208
7.1.6	影响屏蔽效能的其他因素	211
7.1.7	屏蔽总结	214
7.2	电缆屏蔽层接地	216

7.2.1	电缆介绍	216
7.2.2	电缆屏蔽层和芯线之间的耦合	217
7.2.3	电缆屏蔽层接地抑制电场耦合噪声	219
7.2.4	电缆屏蔽层接地抑制磁场耦合噪声	221
7.2.5	电缆屏蔽层接地的实现	224
7.3	电路接地	225
7.3.1	接地概述	225
7.3.2	电路的接地方式	227
7.3.3	放大器输入信号回路接地	230
7.3.4	防护屏蔽	232
7.4	其他噪声抑制技术	237
7.4.1	隔离	237
7.4.2	共模扼流圈	240
7.4.3	滤波	242
7.4.4	铁氧体磁珠	245
7.4.5	信号线和电源线的抗干扰措施	246
<b>第8章</b>	<b>减少干扰噪声发射的方法</b>	<b>251</b>
8.1	与交流供电有关的干扰噪声	252
8.2	直流电源产生的噪声	254
8.2.1	传统直流电源	255
8.2.2	开关式电源	258
8.3	机械触点开关产生的噪声	260
8.3.1	辉光放电	260
8.3.2	电弧放电	261
8.3.3	触点保护基础	262
8.3.4	触点保护网络	266
8.4	数字电路发射的噪声	269
8.4.1	感应噪声	270
8.4.2	与时钟辐射相关的噪声	272
8.4.3	电缆不匹配引起的反射	273
8.4.4	直流电源的电流需求突变	273
8.5	变压器噪声	276
8.6	静电放电噪声	279
8.6.1	静电积累	279
8.6.2	静电放电	281
8.6.3	ESD事件的预防和控制	285

<b>第9章 低噪声电路设计</b> .....	287
9.1 低噪声设计技术概述 .....	287
9.2 有源器件的选择 .....	290
9.3 直流工作点设置 .....	293
9.4 偏置电路低噪声设计 .....	295
9.5 噪声匹配 .....	297
9.5.1 附加电阻或电抗对噪声系数的影响 .....	298
9.5.2 调整工作点进行噪声匹配的局限性 .....	300
9.5.3 利用变压器实现噪声匹配 .....	301
9.5.4 有源器件并联法 .....	302
9.6 反馈 .....	304
9.6.1 反馈对噪声特性的影响 .....	304
9.6.2 不同组态反馈放大器噪声分析 .....	306
9.7 高频低噪声放大器设计考虑 .....	309
9.8 低噪声电路设计举例 .....	311
9.9 抑制干扰噪声的实用建议 .....	314
<b>附录 常用常数</b> .....	319
<b>参考文献</b> .....	321

# 第 1 章

## 随机噪声基础

### 1.1 随机噪声概述

#### 1.1.1 噪声定义与分类

对于电子噪声,通常有两种定义:一种是由于电荷载体的随机运动所导致的电压或电流的随机波动;另一种是污染或干扰有用信号的不期望的信号。第二种噪声定义的范围更广,它既包括电路内部产生的噪声,也包括来自电路外部的干扰。本书将采用广义的噪声概念。

IEEE 的电气和电子术语标准词典(IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms)将噪声定义为叠加在有用信号上的不必要的扰动,这种扰动会使其信息含量变得模糊不清。这个定义涵盖很广,因为它同时适用于内部固有噪声和外部噪声。固有噪声是系统内部产生的噪声,而外部噪声指的是源自其他地方的噪声。

现代电子词典(Modern Dictionary of Electronics)中述及,噪声是指任何不期望的电子干扰和杂散信号,它会修改有用数据的传输、显示或记录。可以看出,这个定义接近于 IEEE 的定义,规定了内部和外部的噪声,并通过明确的方式表明噪声会在处理过程中损坏信息内容。然而,这也限制了这个词的一般性,因为事实上,即使处理的数据没有观察到损坏,噪声也可能存在。

噪声可能是随机的,也可能是确定性的。多数固有噪声都是随机性的,而外部干扰噪声可能是随机性的,也可能是确定性的。例如,50Hz 的电力线噪声通过电磁辐射或传导方式干扰到电子系统中,这是一种确定性噪声。另一个例子是检测系统中的敏感信号线扮演天线角色接收到的无线广播或电视信号,这些传播有用信号的电磁波对检测系统却形成了干扰噪声。

为了避免与“声波噪声”或其他形式的噪声混淆,不少文献中采用术语“电噪声”或“电子

噪声”。的确,检索“噪声”或“噪声控制”,许多文献所述的“噪声”是指建筑行业中的音频噪声。在本书中,噪声专指“电噪声”或“电子噪声”。

根据噪声源的不同,电子噪声可分为内部固有噪声和外部干扰噪声两大类。内部固有噪声是由电路内部元件产生的,源自载流子的随机运动。外部干扰噪声源位于所考虑的电路系统之外。

### 1. 内部固有噪声

固有噪声又称本征噪声(intrinsic noise),指的是器件或电路内产生的噪声。线性系统中,噪声的物理起源是载流子的离散性和随机运动。在电子器件某个特定的平面上,载流子的数目随时间波动。这种波动是普遍的和不可避免的。

固有噪声的一个典型例子是热噪声,源自导电材料内自由电子的随机运动,这导致电子在一端或另一端临时聚集,由此在两端之间出现波动的电压。因为电荷不可能在一端永久累积,波动的平均值必须为零。然而,它的均方根(rms)值不为零。

其他类型的固有噪声还有:散弹噪声,这是由于载流子跨越半导体势垒的随机性引起的;闪烁噪声或 $1/f$ 噪声,其起源还不甚明白,但它显然与晶格缺陷、导体接触不良等因素有关;扩散噪声,与碰撞导致载流子速度波动有关等。

固有噪声的最重要的特点之一是其随机性,这意味着无法预测电压或电流波动的幅值,因此不得不采用统计方法进行描述。

固有噪声的另一个特点是振幅非常低,很少超过零点几毫伏,通常是远低于 $1\mu\text{V}$ 。许多固有噪声的机制产生白噪声频谱,即噪声功率均等地分布在所有的工程频率上。一种例外是闪烁噪声,它具有 $1/f$ 频谱,其功率随频率降低而增大,有时也被称为粉红色噪声。固有噪声的幅度往往受某种元件值支配,例如,电阻值、材料构成、流经元件的电流等。

### 2. 外部干扰噪声

外部干扰噪声源自所研究的电路之外,通过某种路径耦合到电路内部,因此这种噪声也被称为外来信号或寄生信号,或称扰动。根据其可能的来源,这类噪声分为两大类:

#### (1) 环境扰动

环境扰动噪声包括:

天空噪声:包括太阳和银河系强大的宽带噪声源。

大气噪声:主要是雷暴引起的雷击放电。

人为噪声:源于电动马达、电弧焊、电源线、霓虹灯、静电放电、电力设备、无线电和电视的广播、开关、火花塞、家用电器、移动电话等。

所有工业扰动的特征是幅度相对较高,频谱很宽,其高频分量可达可见光频率。许多工业扰动是定期发生和周期性的。

(2) 其他电路的有用信号,通过寄生参数耦合到附近的电路中,成为不需要的扰动。通常这种现象称为系统之间的串扰,或称为串音噪声。

外部噪声受电路布局和结构的影响很大。有时,通过改变机架中的各种电缆或设备的相对位置,串扰的耦合程度可以被降低,甚至导线的长度和位置也很关键。

多数外部干扰噪声问题与电磁场耦合或传导耦合有关,这类噪声的研究和降噪技术又

称电磁兼容性(EMC)。

## 1.1.2 内部固有噪声和外部干扰噪声比较

### 1. 常规属性

固有噪声在本质上是随机的,需要用统计方法来描述;外部噪声可能是随机的,但通常是确定性的,因此不太适合进行统计处理。在许多实际情况中,干扰信号的频率是预先已知的,例如,50Hz工频干扰及其高次谐波。通常,污染电路的干扰是几个确定性信号叠加的结果。

### 2. 带宽

固有噪声占据所有工程频率,由于固有的闪烁噪声,频谱的低端上升。固有噪声的频谱延伸到非常高的频率,超出了任何有用信号的频率。

相比之下,干扰噪声的频谱很有限,因此可通过插入适当的滤波器将其滤除,或者将有用信号的频带迁移到干扰噪声的频谱之外。

### 3. 幅度

一般情况下,固有噪声幅度相当低。例如,在环境温度  $T=290\text{K}$  时,  $100\text{k}\Omega$  的电阻在  $1\text{Hz}$  带宽中产生的热噪声有效值约为  $40\text{nV}$ 。

与此相反,工业设备噪声对附近的敏感电路造成的干扰往往幅度比较大,有时甚至会超过有用信号的幅度。一般情况下,随着频率升高,人为干扰噪声的幅度减少,但随位置而变化。

### 4. 噪声计算

计算固有噪声的幅度比计算外部干扰噪声的幅度要容易得多。

对于固有噪声,可用两种方法计算噪声参数,或手工计算,或使用现有的软件包。外部电磁场干扰噪声由麦克斯韦方程描述,这是以时间和三维空间为变量的微分方程,准确的答案需要复杂的边界条件。时域边界条件容易表示,但在空间域,边界条件取决于各种系统的相对位置,几乎不可能规定。因此,在现实情况下求解麦克斯韦方程是不实际的。要确定给定场合的人为噪声参数,常用的手段是噪声测量。

### 5. 低噪声设计

在设计过程的早期阶段,必须考虑固有噪声。除了指定的电性能,高的信噪比也是设计的基本目标之一。考虑到这一点,设计师就要适当地选择电路拓扑结构、输入级、有源器件类型(双极型晶体管或场效应晶体管)、偏置、反馈等。一旦这个过程完成后,几乎没有什么办法可以再减少固有噪声。因此,把固有噪声问题留到最后解决,会导致昂贵的重新设计过程。

外部干扰噪声可在电路布局和原型设计阶段进行处理。多种技术可用于抗干扰,例如

印刷电路板迹线的适当定位,采用适当的接地、滤波、均衡、隔离技术,对最敏感的部位加屏蔽,采用屏蔽电缆等。一般情况下,限制干扰者的发射比保护敏感电路更为经济。

## 6. 噪声抗扰度

通常,噪声会破坏有用信号的信息内容。然而,“损害”的程度是与受影响电路所实现的功能密切相关的。

例如,许多模拟电路的目的是放大弱信号,因此对固有噪声更加敏感。数字电路中逻辑波形的振幅较高,对固有噪声就不那么敏感。在许多模拟电路应用中,有用的微弱信号或由天线提供,或由传感器产生,其幅度可能低至毫伏级甚至微伏级,对噪声很敏感。所以,处理弱信号的电子设备需要高增益、低噪声前置放大器。

相反,逻辑信号幅度相当高,变化快速,在处理之前不需要放大。TTL电路的最小噪声容限为0.4V,典型的CMOS系列噪声容限更高,因此,逻辑电路对固有噪声或小幅度干扰不大敏感。

### 1.1.3 噪声的影响

噪声会影响电子电路或系统的正常工作。对于放大和处理微弱信号的电路,噪声显得更为重要。其实,只要信号幅度与噪声幅度相似,噪声问题就是很重要的。

显然,如果只考虑固有噪声,只有在信号非常弱情况下,才存在因噪声失去其信息内容的风险,高幅度信号携带的信息不至于被破坏。而外部干扰噪声的幅度往往比固有噪声大得多,即使是强信号也不能幸免。因此,真正重要的不是信号幅度,而是信噪比。

关于噪声如何影响电子系统的工作,有以下各种说法:

(1) 在模拟电路应用中,最小可用信号受限于外部和内部产生的噪声。噪声电平给可以放大的信号幅度设置了一个下限。

(2) 噪声幅度决定了放大器增益的上限,如果增益超过此上限,放大器将会饱和。

(3) 检测器和接收机的最小可测信号取决于噪声情况。

(4) 测量微弱模拟信号幅度的误差取决于噪声。因此,噪声情况决定了测量灵敏度的最终极限。

(5) 噪声可能导致被测信号的相位误差。使用脉冲回波技术的系统中(如雷达、声纳、医用成像系统等),这可能会影响距离估计的准确度,这种情况下的相位误差转换为位置误差。

(6) 噪声可能破坏二进制存储数据,“0”被意外转变成“1”,反之亦然。

(7) 虽然逻辑电路的抗噪能力强,在亚微米工艺中,随着工作频率提高,下列趋势使得噪声成为设计过程中的一个关键问题:

- 作为流行的低功耗策略,电源电压越来越低,因此噪声容限也越来越低;
- 器件尺寸持续缩小;
- 互连密度的增加使得耦合电容较大。将来,随着电路尺寸缩小,预期耦合电容的作用将更加重要。串扰噪声分析将成为电路设计中的关键因素。
- 更快的时钟速率导致更多的电源噪声。



噪声就像疾病一样,不可能将其消除,只能对其预防、治疗或忍耐,这取决于其性质和严重程度,以及处理的难度和成本。

噪声的影响当然取决于被影响电路的功能。为了说明噪声的有害影响,下面介绍几种实际应用。

### 1. 工业检测系统中的噪声

在工业检测、控制和信息处理系统中,常常需要检测某种非电量(例如温度、湿度、压力、流量、位移、距离、速度、加速度、pH 值、浓度、成分等),一般都是首先利用传感器将其转换为电信号,再对其进行放大和显示。任何传感器产生的电信号都不是理想的,导致检测误差(或失真)。有两类误差:

(1) 系统误差:与传感器的线性度、传递函数、动态特性等有关。由于这些因素来自传感器的设计、制造、校准等,可以预知,随时间的漂移慢,可在规格说明书中标明。检测系统设计者可以提供对其进行补偿或校正的解决方案。

(2) 随机误差:这种误差很不规则,随时间突然变化,并且是不可预测的,只能用其统计特性来描述,其原因是传感器和放大器的噪声。

为了改善检测精度,许多设计者倾向于采用高分辨率的 ADC,以降低其最低位(LSB)相应的电压值。例如,对于 5V 量程的 16 位 ADC,其 LSB 相应的电压值可低至  $76\mu\text{V}$ 。但是如果叠加在有用信号上的噪声高于  $76\mu\text{V}$ ,则其 LSB 反映的是噪声而不是信号。不提高信噪比,盲目提高 ADC 的分辨率是毫无意义的。在检测微弱信号电子系统中,噪声是检测分辨率的限制因素。

如果被测量的幅值较小,则传感器输出信号也会比较微弱,噪声不但会导致检测示值偏离被测真值,甚至淹没被测信号。

图 1-1 所示是一个温度检测系统的方框图及其检测记录结果,传感器将温度信号  $T$  转换为电压,匹配网络使传感器阻抗与放大器的输入相匹配,放大器将电压信号放大到 A/D 转换器或显示记录合适的幅度。因为噪声叠加到有用信号上,图 1-1(b)中的温度检测记录偏离温度真值。系统的信噪比主要取决于传感器噪声、耦合网络的噪声以及放大器第一级的噪声。

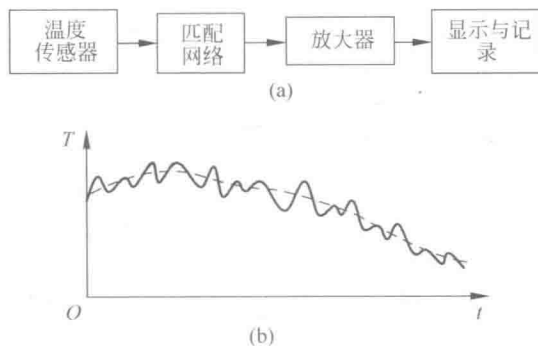


图 1-1 温度检测

(a) 检测系统框图; (b) 温度检测记录(虚线为真)