



〔日〕山崎弘郎 主编

电子电路的抗干扰技术

科学出版社

电子电路的抗干扰技术

(日) 山崎弘郎 主编

姜德华 赵秀芬 译

科学出版社

1989

内 容 简 介

本书以解决实际问题为宗旨，系统地阐述了电子电路和系统的抗干扰技术。全书共八章。前三章讲述噪声基础知识，包括噪声物理、电子设备和系统中的噪声及噪声抑制技术基础；第四章介绍噪声抑制技术的评价与测定方法；第五至第七章汇集了近年来噪声抑制技术的精华，从直流低电平信号到高速数字电路，从屏蔽和接地方式到程序软件方式，介绍了多种行之有效的抗干扰措施在各种场合下的应用；第八章为结束语，既是对本书内容的总结，也是对噪声抑制技术发展趋势的展望。

本书内容丰富、实用性强、物理概念清晰、叙述通俗易懂，对于从事电子电路、设备和系统的研究、设计、制造、调试、安装、操作和维修工作的科技人员及大专院校电子、电工、机械、自控等专业的教师及学生均有参考价值。

山崎弘郎 编

山崎弘郎 足立昭二 山崎修快 若狭 裕 著

電子回路のノイズ技術

オーム社，1981

电子电路的抗干扰技术

〔日〕山崎弘郎 主编

姜德华 赵秀芬 译

责任编辑 魏 玲

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1989年9月第一次印刷 印张：11 1/2

印数：0001—4 030 字数：254 000

ISBN 7-03-001088-4/TN·63

定价：5.70元

序 言

对于研究电子电路和系统的科技人员来说,电磁干扰是他们普遍感到烦恼的问题之一。近来,随着数字电路和系统的增加,电磁干扰现象也有所变化,例如,噪声对模拟电路的影响是暂时性的,但对数字电路,由于它有存储功能,能把噪声所造成的影响“记住”,往往导致电路产生料想不到的误动作。因此,抑制噪声和提高电路抗电磁干扰能力的技术引起了人们的广泛重视。

噪声问题的研究有两种情况,一种具有开发作用,另一种则具有后继作用。

所谓开发作用,是指随着技术进步所开拓的新领域是通过噪声的研究而发现的,因此噪声问题的研究具有先驱开发的性质。如通讯和检测等技术的进步是通过克服和战胜噪声而取得的,同样,电子器件集成度的提高,在很多情况下也因受噪声的制约而有一定的极限。

所谓噪声问题的研究具有后继作用,是指设计电子电路和系统设备的科技人员由于知识和经验不足而造成的电磁干扰问题,于是,很多技术人员便要费尽心思来探索解决电磁干扰的各种办法。从我们周围的实际事例来看,绝大多数属于这种情况。

本书以解决实际问题为目的,系统地阐述了上述两种情况下的噪声研究技术。为供实际应用,当然应该提供直接解决问题的各种方法,但同时也要在元器件日新月异的发展和系统不断被开发的情况下保持永不丧失价值的通用性。实

际上，一书中既照顾实用性又兼具通用性是不容易的。我们选择的写法是，先讲解少量一般原理，然后有组织地介绍这些原理在各种场合下的应用方法，力求以这样的论述方法在本书中实现我们的预期目标。

书中各章的开头都有摘要，用以说明该章的性质和内容。希望读者首先阅读这一部分。本书的第一、二、三章和第八章具有综述性质，所讲事项均为基础知识。第四章介绍噪声抑制技术的评价方法。第五章至第七章的内容比较丰富，论题从直流低电平信号讲到高速数字电路；噪声抑制方法从屏蔽和接地讲到用程序实现的软件方式。读者可以针对实际需要，从任一章开始选读有关部分，而不需要专门的预备知识。

执笔前，四位著者经过充分磋商，分别撰写各自最擅长的领域，把自己的丰富知识和经验总结于书中。本书如果对读者有所裨益，很大程度上有赖于五、六、七章的三位撰写者提供的知识和见解。

电子电路的高集成化、宽带域化和高速度化使信号在空间和时间上的密度越来越大，相互间带来危害的电磁干扰也随之增多，这是噪声问题明显激化的根本原因。因此，我们也必须象对待大城市和大型化工联合企业等高度密集的社会公害问题一样，把噪声问题作为环境问题来认识。

构成环境问题的一个重要条件是施害者本身也是受害者，电子设备也是如此。电流高速变化的电路向外辐射电磁噪声，频率越高，波及范围越广，所以电子设备易受脉冲噪声的影响。为了不做受害者，电子设备首先应使其自身结构不散发公害。

假若没有噪声传递途径，即使有噪声源也不致于造成危害。通常，电路图里并不指明噪声传递途径，因为电路图不描

述电路元件间的各种耦合，它只注明电路中的信号按规定的目标传输，所以电路图是一种把电路抽象化的模型图，而对在抽象化阶段舍弃的现象和通过耦合等形成的噪声传递途径的实际状态易予忽略。所以，深入掌握电路图未描述的、不需要而又有害的耦合才是解决噪声问题的实质。

这里要强调两个特别重要的问题，一个是要把噪声问题作为环境问题来认识，另一个是须深入掌握无用的耦合，这也是本书的作者们以各种形式反复论述的两个重点。如果本书对读者掌握噪声抑制技术和解决实际问题有所帮助，作为编者兼著者中的一员，我将感到非常高兴。

另外，在本书完成之际，谨向给予多方协助的欧姆公司的诸位致以深切谢意。

山崎弘郎

1981年11月

译 者 序

随着用电设备的大量增加和电子电路的高密度化、宽带域化和高速度化,出现了电磁环境逐日恶化的局面。应该说,研究、设计、制造和使用电气、电子设备的人必须掌握电磁兼容性技术才能使电子设备在其使用环境中能保证地长期稳定运行。但是,目前我国尚有些科技人员对电磁兼容性技术认识不够充分,或者由于知识和经验欠缺,往往到电子设备和系统进入调试,甚至投入生产运行时出现了电磁干扰“麻烦”后才不得不探寻解决办法。因此,我们向读者推荐这本书。

本书中汇集了电子电路、设备和系统电磁兼容性设计方面的多种经验,讲述了各种场合下利用一般原理解决电磁干扰的途径和方法,因此不仅能启发和促进有关各界共同关心与电子设备的电磁兼容性有关的问题,而且书中提供的很多具体措施也可以借鉴,甚至可以直接用于处理生产实践中出现的电磁干扰问题。

本书的前言和第一、二、三、七章由赵秀芬翻译,第四、五、六、八章由姜德华翻译,同时,姜德华负责全书译文,包括目录和索引等的整理工作。在翻译过程中,曾先后得到天津电气传动设计研究所很多同志的热情支持和帮助,在此,致以衷心的感谢。

由于译者水平所限,译文中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

译者

1987年8月

目 录

第一章 噪声物理.....山崎弘郎	1
1.1 噪声和噪声源	1
1.1.1 什么是噪声	1
1.1.2 人为噪声源和自然噪声源	2
1.1.3 外部噪声和内部噪声	3
1.1.4 波动和耦合	3
1.1.5 噪声研究的途径	5
1.2 噪声的描述	6
1.2.1 时域描述法	6
1.2.2 频域描述法	6
1.2.3 概率密度函数	7
1.2.4 自相关函数	8
1.2.5 噪声源的等效电路	9
1.2.6 常模噪声(正相噪声)	11
1.2.7 共模噪声(同相噪声)	11
1.3 噪声发生机理	12
1.3.1 热噪声	12
1.3.2 散粒噪声	13
1.3.3 $1/f$ 噪声	13
1.3.4 爆裂噪声	14
1.3.5 晶体管噪声	15
1.4 噪声和电子电路特性	16
1.4.1 S/N	16
1.4.2 噪声系数和噪声因数	17
1.4.3 噪声电阻和噪声温度	18

1.5	噪声传输机理	18
1.5.1	电路和电路图	18
1.5.2	电路图未加标注的参数	19
1.5.3	电路图未加标注的耦合	20
第二章	电子设备和系统的噪声	
	···山崎弘郎 足立昭二 山崎修快 若狭·裕	23
2.1	电磁环境和人为噪声源	23
2.1.1	汽车	24
2.1.2	晶闸管	24
2.1.3	无线电收发装置	25
2.1.4	摩擦生电	25
2.1.5	交流继电器的簇射电弧	26
2.1.6	舌簧继电器的机械振动	27
2.2	影响较大的噪声源	27
2.2.1	布局过密的不当装配(实例之一)	27
2.2.2	提高电子式高速缓冲寄存器的噪声容限 (实例之二)	29
2.2.3	提高带有微型计算机的测量仪表的噪声容限 (实例之三)	31
2.2.4	电动机起动-停车时的过大电流和电压脉冲(实例之四)	32
2.2.5	滤波器输入输出线的互相感应	34
2.2.6	运算放大器备用电源线的欠电压	34
2.2.7	地电流	35
2.2.8	混入电源的脉冲噪声	36
2.2.9	预防 CMOS 闩锁的方法 (包括防雷元件的浪涌响应特性)	37
2.3	意外噪声源	39
2.3.1	噪声抑制措施反成为噪声源	39
2.3.2	数字系统成为无线电收发装置的噪声源	40
2.3.3	出租汽车测量仪表的误动作	40

2.3.4	高性能变压器传输噪声信号	41
2.3.5	油中的气泡是噪声源	43
2.3.6	剩余电荷形成噪声	43
2.4	高度密集的电磁环境和噪声	44
第三章	噪声抑制技术的基本知识.....山崎弘郎	46
3.1	频域及时域中的信号和噪声	46
3.2	频域中的信号选择	48
3.3	时域中的信号选择	49
3.3.1	信号的相关函数	49
3.3.2	相关函数和功率频谱	50
3.3.3	相敏检波	52
3.3.4	同步加法	54
3.3.5	匹配滤波器	55
3.4	屏蔽	56
3.4.1	屏蔽	56
3.4.2	静电感应	56
3.4.3	静电屏蔽	57
3.4.4	电磁感应	59
3.4.5	电磁屏蔽	60
3.4.6	双绞线	61
3.4.7	电磁场和屏蔽	62
3.5	接地	63
3.5.1	接地的目的	63
3.5.2	接地和噪声	65
3.5.3	接地方式	66
3.6	去耦	68
3.6.1	公共阻抗耦合	68
3.6.2	去耦滤波器	69
3.7	隔离	70
3.7.1	地电位	70
3.7.2	接地环路和共模噪声	70

3.7.3	隔离器法	72
3.7.4	提高抵抗共模噪声能力的方法	73
3.8	噪声补偿	75
3.8.1	反馈补偿	76
3.8.2	前馈补偿	78
3.9	用触点的闭合、断开抑制噪声	78
3.9.1	触点的闭合、断开与放电现象	78
3.9.2	触点间的放电和噪声	80
3.9.3	消除触点噪声的方法	81
第四章	噪声抑制技术的评价——电子设备电磁兼容性的评价方法	足立昭二 84
4.1	电磁兼容性的定义	84
4.1.1	国际电工技术委员会 (IEC) 的定义	84
4.1.2	美国电气和电子工程师学会电磁兼容技术组 (IEEE G-EMC) 和日本电子通信学会对 EMC 的定义	85
4.1.3	德·伍海特对 EMC 的定义	85
4.2	形成评价方法前提的状态或条件	86
4.2.1	交流继电器等发生的浪涌电压	86
4.2.2	雷电浪涌	89
4.2.3	欠电压(瞬时停电及瞬时电压降)	91
4.2.4	传导干扰的极限值	93
4.2.5	系统的辐射电磁场强度的极限值	95
4.2.6	系统对辐射电磁场的抗扰度	96
4.2.7	静电放电	97
4.2.8	机壳地、信号地线路的电位波动	98
4.2.9	输入输出线路的感应噪声干扰	101
4.3	对电源线瞬态噪声抗干扰度的评价	103
4.3.1	对脉冲噪声的评价方法	103
4.3.2	对欠电压(瞬时停电及瞬时欠电压) 的评价方法	114

4.3.3	耐雷电浪涌的能力	115
4.4	对电磁干扰的评价方法	117
4.4.1	传导干扰的测量方法	118
4.4.2	辐射电磁场强度的测量方法	120
4.4.3	抗电磁场辐射干扰的评价方法	122
4.5	抗静电放电干扰的评价方法	125
4.6	关于机壳地 (FG), 信号地 (SG) 电位波动的评价方法	126
4.7	输入输出线对感应噪声干扰敏感度的评价方法	127
第五章	直流低频电路的噪声抑制技术.....山崎修快	129
5.1	无源器件产生的噪声及其影响	129
5.1.1	热噪声	129
5.1.2	过量噪声	130
5.1.3	热电动势	130
5.1.4	电容器漏电流	130
5.1.5	变压器和变流器的漏磁场	132
5.2	有源器件产生的噪声及其影响	132
5.3	开关电路产生的噪声及其影响	133
5.3.1	开关电路噪声的特点	133
5.3.2	开关电路噪声的影响	136
5.4	外来干扰引起的噪声及其影响	138
5.4.1	来自空中的噪声及其影响	138
5.4.2	来自电源线的噪声及其影响	139
5.4.3	来自信号源的噪声及其影响	140
5.4.4	其他干扰噪声	141
5.5	低电平信号电路的噪声抑制措施	141
5.5.1	信号源和信号线	141
5.5.2	输入电路	143
5.5.3	共模噪声	143
5.5.4	其他	143
5.6	屏蔽和接地的有关问题	144

5.6.1	噪声侵入路径	144
5.6.2	静电屏蔽和电磁屏蔽	145
5.6.3	接零、接地和隔离	145
5.7	滤波器、光耦合器及相关问题	147
5.7.1	浪涌吸收器	148
5.7.2	滤波器	149
5.7.3	用变压器或光耦合器切断噪声	150
5.8	电源混入噪声时的抑制技术	151
5.8.1	隔离变压器及其效果	151
5.8.2	电源滤波器及其安装方法	153
5.8.3	电源混入噪声的抑制措施示例	156
5.9	抑制噪声及其影响的电路结构	158
5.9.1	预防噪声的配线方法及有关问题	159
5.9.2	高密度安装和加外壳	160
5.9.3	设备内部的温度分布	161
5.9.4	抑制噪声影响的电路举例	162
5.10	噪声对直流低频电子设备的影响举例	168
第六章	高频电路的噪声抑制技术..... 足立昭二	171
6.1	静电感应	171
6.2	电磁感应	177
6.3	公共阻抗耦合	180
6.4	辐射引起的耦合(包括屏蔽理论)	183
6.5	抵抗脉冲噪声的能力	188
6.5.1	抑制继电器浪涌的方法	188
6.5.2	电源线路的传导频率特性	189
6.5.3	电源滤波器的设计方法	193
6.5.4	抑制噪声用的电容器	196
6.5.5	FG、SG 线的电位波动	197
6.5.6	配线方面的问题	200
6.5.7	母线	201
6.6	提高抵抗电压突变能力的方法	201

6.7	提高系统抵抗雷电浪涌能力的方法	203
6.8	使传导干扰电压低于极限值的方法	206
6.9	使系统的辐射电磁场强度低于极限值的方法	207
6.10	提高系统耐辐射电磁场干扰能力的方法	208
6.11	提高系统耐静电放电干扰能力的方法	209
6.12	降低 FG、SG 的线路阻抗	212
6.13	共模扼流圈的效果 (尤其与输入输出的感应干扰有关)	212
第七章	数字系统和噪声抑制技术若狭 裕	215
7.1	数字系统的结构	215
7.2	数字系统中的噪声源和传输机理	219
7.2.1	噪声的发生和传输	220
7.2.2	串扰噪声	221
7.2.3	反射	224
7.2.4	公共阻抗噪声——配线阻抗引起的噪声	230
7.3	逻辑元件的噪声特性	231
7.3.1	传递特性	232
7.3.2	直流电压噪声容限	233
7.3.3	交流噪声容限	234
7.3.4	能量噪声容限	237
7.3.5	不同逻辑系列的连接	240
7.4	基本电路和噪声抑制技术	241
7.4.1	TTL 的开关特性	242
7.4.2	触发器	246
7.4.3	单稳态多谐振荡器	249
7.4.4	动态 RAM	251
7.4.5	α 射线造成的 DRAM 软误差	252
7.4.6	电容器消除须状噪声	253
7.4.7	IC 的没使用的输入端子的处理	256
7.4.8	总线的终端	257
7.4.9	提高三状态总线的电位	259

7.4.10	波形的前沿控制	260
7.4.11	隔离接地环路	264
7.4.12	脉冲变压器	265
7.4.13	平衡-不平衡变换器(共模扼流圈)	266
7.4.14	光耦合器	270
7.4.15	纵与横	272
7.5	组装技术	273
7.5.1	印制线路板	273
7.5.2	小型母线	280
7.5.3	扁形电缆	283
7.5.4	连接器	288
7.6	工业生产检测仪表控制系统	289
7.6.1	生产过程控制装置的输入输出信号	290
7.6.2	生产现场中的噪声源	292
7.6.3	模拟输入装置	294
7.6.4	共模噪声向常模噪声的转换	295
7.6.5	多路转换器	297
7.6.6	模-数变换器	301
7.6.7	信号隔离	303
7.6.8	机壳和接地	306
7.7	电源线和电源单元	307
7.7.1	工频电源线的噪声及其抑制措施	308
7.7.2	工频交流电源线浪涌噪声的抑制措施	310
7.7.3	线路滤波器	311
7.7.4	电源单元的噪声	316
7.7.5	开关晶体管的集电极屏蔽	321
7.7.6	二极管的恢复噪声	322
7.7.7	开关电源的输入电流	323
7.8	抑制系统噪声的措施	324
7.8.1	数字系统的特性	324
7.8.2	系统初始化	327

7.8.3	监控计时器	327
7.8.4	冗余化和重复执行	329
7.8.5	微程序设计方面的配置	331
7.8.6	存储器件的选择	332
第八章	结束语.....山崎弘郎	335
8.1	噪声抑制技术的汇总	335
8.2	本书范围	337
8.3	新噪声源	338
8.4	今后的噪声抑制技术	339
参考文献	341
索引	344

第一章 噪声物理

本章的任务是对本书所讲的各种噪声做一综述。首先指明要处理的噪声和噪声源的范围，接着讲解定量地处理噪声和描述噪声特点时所用的知识，如频谱、相关函数等概念，并介绍有关噪声等效电路和噪声模式等电路理论方面的基本知识，在谈到电子电路和元件的特性时，还将对信噪比和噪声系数等加以说明。

由于噪声的性质随其发生机理而异，所以本章中还将给出热噪声、散粒噪声、 $1/f$ 噪声等的发生机理以及半导体器件的噪声性质。

最后，在噪声传输方面，主要阐述在传统描述法，即电路图中未予描述的元件参数，元件和电路间的耦合等噪声传输径路的情况。

1.1 噪声和噪声源

1.1.1 什么是噪声

电子电路中的噪声的定义是：“对信号进行干扰，对信息传输进行阻碍的扰乱”。

噪声一词虽含有声音概念，但未必是声音。它有时是画面，如电视的叠影、雪花等；有时也用数字表示出来，如检测值偏移、计算机的错误答数等；很多场合还要依靠价值判断来区别噪声和信号。

下面一段叙述对信号和噪声的性质及二者间的关系表达得比较恰当。