

研究生教学用书

专业 课 系 列

光电信号处理

Photo-electricity Signal Processing

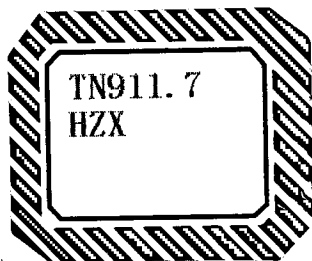
何兆湘 编

华中科技大学出版社

研究生用书

光电信号处理

何兆湘 编



华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

光电信号处理/何兆湘 编. —武汉:华中科技大学出版社,2008年8月
ISBN 978-7-5609-4622-1

I. 光… II. 何… III. 光电检测-研究生-教材 IV. TN206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086512 号

光电信号处理

何兆湘 编

责任编辑:谢佩玲

封面设计:潘 群

责任校对:刘 竣

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉市星明图文制作有限公司

印 刷:湖北省通山县九宫印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:13

字数:248 000

版次:2008年8月第1版

印次:2008年8月第1次印刷

定价:21.80 元

ISBN 978-7-5609-4622-1/TN·118

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书是一本研究生教材,是根据编者自 1995 年至 2005 年在华中科技大学光电子工程系讲授硕士研究生学位课程“光电信号处理”的讲义编写而成的。

全书共 5 章。第 1 章噪声的基础知识,第 2 章放大器的噪声分析与低噪声前置放大器,第 3 章微弱信号检测的基本原理与方法,第 4 章锁定放大器,第 5 章光子计数技术。

本书可作为光电子相关专业的硕士生学位课程教材,也可供有关专业技术人员参考。

写在“研究生教学用书”出版 15 周年前岁

“接天莲叶无穷碧，映日荷花别样红。”今天，我国的教育正处在一个大发展的崭新时期，而高等教育即将跨入“大众化”的阶段，蓬蓬勃勃，生机无限。在高等教育中，研究生教育的发展尤为迅速。在盛夏已临，面对池塘中亭亭玉立的荷花，风来舞举的莲叶，我深深感到，我国研究生教育就似夏季映日的红莲，别样多姿。

党的十六大报告以空前的力度强调了“科教兴国”的发展战略，强调了教育的重大作用，强调了教育的基础性全局性先导性，强调了在社会主义建设中教育的优先发展的战略地位。从报告中，我们可以清楚看到，对高等教育而言，不仅赋予了重大的历史任务，而且更明确提出了要培养一大批拔尖创新人才。不言而喻，培养一大批拔尖创新人才的历史任务主要落在研究生教育肩上。“百年大计，教育为本；国家兴亡，人才为基。”国家之间的激烈竞争，在今天，归根结底，最关键的就是高级专门人才，特别是拔尖创新人才的竞争。由此观之，研究生教育的任务可谓重矣！重如泰山！

前事不忘，后事之师。历史经验已一而再、再而三地证明：一个国家的富强，一个民族的繁荣，最根本的是要依靠自己，要以“自力更生”为主。《国际歌》讲得十分深刻，世界上从来就没有什么救世主，只有靠自己救自己。寄希望于别人，期美好于外力，只能是一种幼稚的幻想。内因是发展的决定性的因素。当然，我们决不应该也决不可能采取“闭关锁国”，自我封闭，固步自封的方式来谋求发展，重犯历史错误。外因始终是发展的必要条件。正因为如此，我们清醒看到了，“自助者人助”，只有“自信、自尊、自主、自强”，只有独立自主，自强不息，走以“自力更生”为主的发展道路，才有可能在向世界开放中，争取到更多的朋友，争取到更多的支持，充分利用好外部的各种有利条件，来扎扎实实地而又尽可能快地发展自己。这一切的关键就在于，我们要有数量与质量足够的高级专门人才，特别是拔尖创新人才。何况，在科技高速发展与高度发达，而知识经济已初见端倪的今天，更加如此。人才，高级专门人才，

拔尖创新人才,是我们一切事业发展的基础。基础不牢,地动山摇;基础坚牢,大厦凌霄;基础不固,木凋树枯;基础深固,硕茂葱绿!

“工欲善其事,必先利其器。”自古凡事皆然,教育也不例外。教学用书是“传道授业解惑”培育人才的基本条件之一。“巧妇难为无米之炊”。特别是在今天,学科的交叉及其发展越来越多及越快,人才的知识基础及其要求越来越广及越高,因此,我一贯赞成与支持出版“研究生教学用书”,供研究生自己主动地选用。早在1990年,本套用书中的第一本即《机械工程测试·信息·信号分析》出版时,我就为此书写了个“代序”,其中提出:一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在某一特定方面,他也可选择一本有关这一特定方面的书作为了解与学习这方面知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣与工作在这一特定方面,他更应选择一本有关的书作为主要的学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书。这就是我赞成要为研究生编写系列的“研究生教学用书”的原因。今天,我仍然如此来看。

还应提及一点,在教育界有人讲,要教学生“做中学”,这有道理;但须补充一句,“学中做”。既要在实践中学习,又要在学习中实践,学习与实践紧密结合,方为全面;重要的是,结合的关键在于引导学生思考,学生积极主动思考。当然,学生的层次不同,结合的方式与程度就应不同,思考的深度也应不同。对研究生特别是对博士研究生,就必须是而且也应该是“研中学,学中研”,在研究这一实践中,开动脑筋,努力学习,在学习这一过程中,开动脑筋,努力研究;甚至可以讲,研与学通过思考就是一回事情了。正因为如此,“研究生教学用书”就大有英雄用武之地,供学习之用,供研究之用,供思考之用。

在此,还应进一步讲明一点。作为一个研究生,来读“研究生教学用书”中的某书或其他有关的书,有的书要精读,有的书可泛读。记住了书上的知识,明白了书上的知识,当然重要;如果能照着用,当然更重要。因为知识是基础。有知识不一定有力量,没有知识就一定没有力量,千万千万不要轻视知识。对研究生特别是博士研究生而言,最为重要的还不是知识本身这个形而下,而是以知识作为基础,努力通过某种实践,同时深入独立思考而体悟到的形而上,即《老子》所讲的不可道的“常道”,即思维能力的提高,即精神境界的升华。《周易·系辞》讲了:“形而上谓

之道,形而下谓之器。”我们的研究生要有器,要有具体的知识,要读书,这是基础;但更要有“道”;更要一般,要体悟出的形而上。《庄子·天道》讲得多么好:“书不过语。语之所贵者意也,意有所随。意之所随者,不可以言传也。”这个“意”,就是孔子所讲的“一以贯之”的“一”,就是“道”,就是形而上。它比语、比书,重要多了。要能体悟出形而上,一定要有足够数量的知识作为必不可缺的基础,一定要在读书去获得知识时,整体地读,重点地读,反复地读;整体地想,重点地想,反复地想。如同韩愈在《进学解》中所讲的那样,能“提其要”,“钩其玄”,以达到南宋张孝祥所讲的“悠然心会,妙处难与君说”的体悟,化知识为己之素质,为“活水源头”。这样,就可驾驭知识,发展知识,创新知识,而不是为知识所驾驭,为知识所奴役,成为计算机的存储装置。

这套“研究生教学用书”从第一本于 1990 年问世以来,到明年,就经历了不平凡的 15 个春秋。从研究生教育开始以来,我校历届领导都十分关心研究生教育,高度重视研究生教学用书建设,亲自抓研究生教学用书建设;饮水思源,实难忘怀!“逝者如斯夫,不舍昼夜。”截至今天,“研究生教学用书”的出版已成了规模,蓬勃发展。目前已出版了用书 69 种,有的书发行了数万册,有 22 种分别获得了国家级、省部级教材奖、图书奖,有数种已为教育部列入向全国推荐的研究生教材,有 20 种一印再印,久销不衰。采用此书的一些兄弟院校教师纷纷来信,称赞此书为研究生培养与学科建设做出了贡献。我们深深感激这些鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”没有读者与专家的关爱,就没有我们“研究生教学用书”的发展。

唐代大文豪李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,物无足纯,人无完人,文无完文,书无完书。“完”全了,就没有发展了,也就“完”蛋了。江泽民同志在党的十六大报告中讲得多么深刻:“实践没有止境,创新也没有止境。”他又指出,坚持“三个代表”重要思想的关键是与时俱进。这套“研究生教学用书”更不会例外。这套书如何?某本书如何?这样的或那样的错误、不妥、疏忽或不足,必然会有。但是,我们又必须积极、及时、认真而不断地加以改进,与时俱进,奋发前进。我们衷心希望与真挚感谢读者与专家不吝指教,及时批评。当局者迷,兼听则明;“嚶其鸣矣,求其友声。”这就是我们肺腑之言。当然,在这里,还应该深深感谢“研究生教学用书”的作者、审阅者、组织者(华

中科技大学研究生院的有关领导和工作人员)与出版者(华中科技大学出版社的编辑、校对及其全体同志);深深感谢对“研究生教学用书”的一切关心者与支持者,没有他们,就决不会有今天的“研究生教学用书”。

我们真挚祝愿,在我们举国上下,万众一心,在“三个代表”重要思想的指引下,努力全面建设小康社会,加速推进社会主义现代化,为实现中华民族伟大复兴,“芙蓉国里尽朝晖”这一壮丽事业中,让我们共同努力,为培养数以千万计高级专门人才、特别是一大批拔尖创新人才,完成历史赋予研究生教育的重大任务而做出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士

华中科技大学学术委员会主任

杨叔子

2003年7月于喻园

前 言

人类在探索自然奥秘的过程中,从来没有停止过前进的步伐。随着科学技术的发展,人类研究自然奥秘的仪器和方法愈来愈先进。“光电信号处理”就是介绍如何利用光电探测器获取信号并进行适当的处理,从而获得有价值的信息,以及由此而涉及的若干专门的技术和相关的理论的学科。

本书是根据编者自 1995 年至 2005 年在华中科技大学光电子工程系讲授硕士研究生学位课程“光电信号处理”的讲义编写而成的,而讲义则是根据编者自 1979 年以来从事科研、教学积累的知识、经验和查阅相关著作、文献,经过不断地修改、补充后形成的。

本书共 5 章。第 1 章噪声的基础知识,是全书各章的基础。本章在对噪声和干扰的基本定义进行介绍之后,对噪声进行了较全面的分析和描述,包括电路中常见的基本噪声、噪声的关联与相加、含多个噪声源的电路及其计算法则、等效噪声带宽、噪声的基本属性以及噪声对数字系统的影响等。这些内容散见于有关涉及噪声的各种书刊中,经过编者收集、归纳、改写、组合,形成比较系统的体系。第 2 章放大器的噪声分析与低噪声前置放大器,全面地论述了放大器的噪声分析方法,并介绍了低噪声前置放大器的设计原则和步骤。低噪声电子设计和微弱信号检测中一个非常重要和值得注意的问题,即屏蔽接地技术放在本章的最后。第 3 章对微弱信号检测的基本原理与方法进行了较全面的介绍,以便开拓视野和启迪思维。第 4 章和第 5 章分别介绍了目前科研中用得较多的两种微弱信号检测仪器,即锁定放大器和光子计数器。

学习或阅读本书的先修课程是:电路理论、信号与系统、电子技术基础、高频电子线路、概率论、随机过程、光电探测器与光电系统等。

在教学过程中,深有体会的是,答疑以及和研究生的交流讨论是非常有益的,他们所提的问题以及发表的看法,有时甚至指出不妥或错误之处,都对修改和完善讲稿起到了极大的促进作用。借此机会,向这些才华横溢的莘莘学子表示衷心的感谢。还要感谢光电子工程系的各届领导,没有他们对教学工作的重视和支持,也不会有今天本书的出版。

最后,要感谢出版社的同志们所付出的艰辛劳动,他们对书稿提出了很多宝贵的修改意见,才使得本书和原讲义相比有了较大的提高。

本书获得华中科技大学研究生院教材基金的资助,在此表示衷心的感谢!

由于编者学识水平和科研能力均有限,讲义虽经多年试用,反复斟酌修改,本次出版时可能仍有疏漏和错误之处,敬请读者不吝指正,深表感谢。

编 者

2007 年 5 月

目 录

第 1 章 噪声的基础知识	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 噪声与干扰、基本噪声	(3)
1.3 噪声的关联与相加	(9)
1.4 含多个噪声源的电路及其计算法则	(10)
1.5 等效噪声带宽	(11)
1.6 噪声的基本属性	(15)
1.7 噪声对数字系统的影响	(19)
习题与思考题	(22)
第 2 章 放大器的噪声分析与低噪声前置放大器	(24)
2.1 放大器的噪声电压-噪声电流(E_n - I_n)模型	(24)
2.2 等效输入噪声及简化计算法则	(25)
2.3 噪声系数	(26)
2.4 最佳源电阻 R_{opt} 与最小噪声系数 NF_{min}	(28)
2.5 噪声温度	(29)
2.6 多级放大器的噪声系数 $NF_{1,2,3,\dots,n}$	(30)
2.7 耦合网络的低噪声设计原则	(32)
2.8 低噪声前置放大器的选用	(34)
2.9 噪声参数的测量	(37)
2.10 元器件噪声分析	(42)
2.11 低噪声放大器的设计原则与方法	(56)
2.12 屏蔽接地技术	(75)
习题与思考题	(93)
第 3 章 微弱信号检测的基本原理与方法	(95)
3.1 微弱信号检测的引出	(95)
3.2 窄带滤波法	(97)
3.3 双路消噪法	(99)
3.4 同步累积法	(100)

3.5	锁定接收法	(103)
3.6	取样积分法	(104)
3.7	相关检测法	(108)
3.8	光子计数技术	(114)
3.9	计算机处理方法	(115)
3.10	常用微弱信号检测仪器	(115)
	习题与思考题	(116)
第4章	锁定放大器	(117)
4.1	引言	(117)
4.2	典型锁定放大器的原理框图	(118)
4.3	相关器及其性能分析	(119)
4.4	锁定放大器中的同步积分器	(132)
4.5	旋转电容滤波器	(143)
4.6	锁定放大器的发展及其类型	(148)
4.7	锁定放大器的灵敏度与动态范围	(155)
4.8	锁定放大器的应用	(164)
	习题与思考题	(171)
第5章	光子计数技术	(174)
5.1	光电倍增管	(174)
5.2	光电倍增管的偏置电路与接地方式	(177)
5.3	光子计数器中的放大器	(180)
5.4	光子计数器测量弱光的上限	(180)
5.5	光子计数器中的鉴别器	(182)
5.6	光电倍增管的单光子响应峰	(184)
5.7	光电倍增管的计数坪区——最佳偏压的选择	(185)
5.8	光子计数器的测量误差分析	(186)
5.9	光子计数器的测量方法与应用	(187)
5.10	模拟光子计数器	(189)
	习题与思考题	(192)
	参考文献	(193)

第1章 噪声的基础知识

1.1 引言

大多数光电系统是由光电探测器接收目标的光辐射并将其转换为电信号,再进行必要的处理从而提取有用信息的,这和无线电接收系统由天线接收电磁波并将其转变为电信号,再将电信号进行必要的处理还原成声音和图像类似。光电探测器输出的电信号一般是十分微弱的,其电平值可能只有 μV , nV 数量级,甚至更低。例如,波音 707 的尾焰辐射强度在某一距离时为 $E = 7.6 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,若探测器的电压响应率 $R_V = 70 \text{ V/W}$,探测器光敏面积 $S = 0.1 \text{ cm}^2$,则可求得探测器的响应电压 $V_s = E \cdot S \cdot R_V = 7.6 \times 10^{-10} \times 0.1 \times 70 \text{ V} = 5.3 \times 10^{-9} \text{ V} = 5.3 \text{ nV}$ 。一个光电系统性能的好坏,在很大程度上是由系统对噪声和干扰的抑制能力所决定的。又如在上例中,设探测器的内阻为 $R = 117 \Omega$,测量带宽 $\Delta f = 1000 \text{ Hz}$,温度 $T = 300 \text{ K}$,则可求得探测器的热噪声电压 $V_n = \sqrt{4kTR\Delta f} = 4.4 \times 10^{-8} \text{ V} = 44 \text{ nV}$ 。此时热噪声电压 V_n 远远大于信号电压 V_s ,若不采取有效的方法抑制噪声,显然不可能进行有效的探测。将探测器致冷和减小测量系统的带宽是两个有效的方法。

为了使探测器的输出信号尽可能大、信噪比尽可能高,必须根据探测器的性能设置合理的偏置电路。关于各类光电、热电探测器的偏置电路的设计方法,已在本科相关课程中讲述,本书不再重复。

如上例所述,当探测器输出的信号十分微弱时,噪声和干扰的影响就不能忽视了。探测器的偏置电路和前置放大器都要进行特殊的设计,这就是所谓的“低噪声电子线路设计”。当探测器输出的信号十分微弱,微弱到甚至会被噪声所淹没时,要从噪声中分离出有用信号,就要采用特殊的方法,即要采取所谓“微弱信号检测”的方法。

“低噪声电子线路设计”和“微弱信号检测”是本书所要介绍的主要内容。

单元探测器输出的信号是时间的函数,对这类信号的分析,既可以在时域内进行,也可以在频域或复频域内进行。噪声和干扰都可以表述为时间的函数,对噪声和干扰的分析,同样既可以在时域内进行,也可以在频域或复频域内进行,以下经常采用频域的分析方法。

从多元探测器(线列或阵列)输出的信号是时间和空间的函数,这种信号可以表示为

$$V_s = V_s(t, x, y) \quad (1.1.1)$$

这种信号,在处理和传输前往往要先进行转化,一般是通过扫描的方式进行空间-时间变换,将 V_s 按一定的空间顺序转化为单一的时间函数,即

$$V_o = V_o(t) \quad (1.1.2)$$

将 $V_o(t)$ 进行处理、传输之后,再还原成时间和空间的函数,这类过程一般用于光电图像处理。

综上所述,学习光电信号处理之前,必须先学习信号和系统分析的基本理论和方法,还必须掌握探测器的有关理论和知识等。

为了对光电信号处理有一个初步认识,下面列举两个典型的光电探测系统的例子。

1. 多光谱遥感图像快视系统

这是编者在 1982—1986 年参加并完成的一项科研项目。

多光谱 CCD 摄像机等航天遥感器和航空传感器多采用低速慢扫描制式工作,慢场周期长达 10 s 左右。用极长余辉显像管实时显示慢扫描图像时,有图像不完整感和闪烁感,且需在暗室观看,看不清图像细节,因而不能进行实时判决。

多光谱遥感图像快视系统是卫星地面接收站的重要设备,它能在正常室内光线下无闪烁地快速显示完整的多光谱遥感图像,并对遥感图像进行实时判读处理。

该系统还可以用于多光谱摄像机的调试、地面检测,以及用于遥感图像磁带的回收与快速检索。

美国的陆地卫星、热容量绘图卫星和法国的 SPOT(地球资源观测) 卫星的地面站中都配有快视系统。但有关文献均未对快视系统进行详细介绍。

本快视系统采用国产单枪硅靶存储管作为存储元器件,把慢扫描图像信号先存储在存储管的靶上,然后利用扫描转换技术,以电视制式显示所存储的遥感图像。

本系统可以在四个光谱段遥感图像信号中任选三个分别作为 R、G、B 三个通道的慢扫描输出图像信号。每个通道使用两只存储管,故本系统共用六只存储管(T_{R1} 、 T_{R2} 、 T_{G1} 、 T_{G2} 、 T_{B1} 、 T_{B2})。图 1.1.1 所示的是 R 通道存储管扫描转换器的方框图。在这里,对该设备不进行详细介绍和分析,只强调其中预置放大器要求是低噪声前置放大器,而且要想图像质量好,信号就必须均匀,故对慢行扫描与慢场扫描中的噪声和串扰电平要求极为严格,其信噪比须不低于 66 dB。

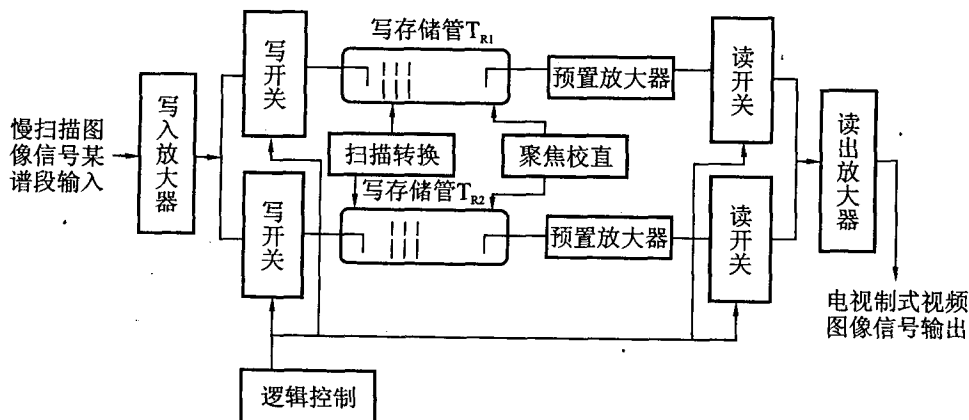


图 1.1.1 R 通道存储管扫描转换器方框图

2. 红外焊缝检测仪

这是编者在 1988—1991 年参加并完成的一项轻工部的科研项目。该项目完成后,成功地转化成实用的检测仪产品,并且在 1992 年被评为国家级新产品,该项目成果在 1993 年获国家教委科技进步三等奖。

电阻焊是食品罐筒制造业中最常用的高速焊接生产方法。生产中的焊接质量,通常是通过定时随机抽样观察和做剪拉等破坏性试验来检查的。在这样的测试中,样本被周期地、间断地从生产线上取下来进行检查。一般来说,在焊接工艺比较稳定的情况下,这些测试样本的结果也能代表未测试部分的质量,这种方法是可以接受的。但当焊接工艺发生偶然变化时,这种方法便不能保证反映产品的焊接质量了。

我国在 20 世纪 80 年代引进了较多的食品罐筒高速焊机,常因罐筒焊缝质量差,造成爆听事故,导致整个集装箱返回退货,给我国企业造成重大损失,迫切需要一种实时在线的焊缝检测仪,对每一个罐筒的焊缝进行实时在线检测并进行判决。

经过三年的研究和现场试验,研制出红外焊缝检测仪,基本上达到了要求,其原理框图如图 1.1.2 所示。

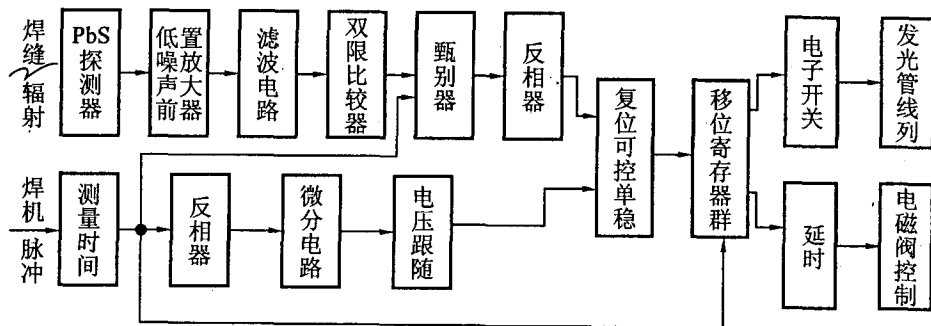


图 1.1.2 红外焊缝检测仪原理框图

这里不对红外焊缝检测仪的工作原理作详尽的叙述,但从原理框图中可以看到,该仪器的前端是 PbS 探测器和低噪声前置放大器,只有对 PbS 探测器进行合理的偏置,并采用高质量的、适宜的低噪声前置放大器,红外焊缝检测仪才能有效地工作。在红外焊缝检测仪工作的现场,存在大量的电磁干扰,只有排除或屏蔽了这些干扰,仪器才能正常工作。

从上述两例可以看出,低噪声前置放大器的设计和电磁干扰的排除、屏蔽是现代科学仪器设计中不可缺少的两项重要技术,这也正是本书所要叙述的内容之一。

1.2 噪声与干扰、基本噪声

1.2.1 噪声与干扰

噪声本是一个日常生活用语,一切影响和妨碍人们正常工作、学习和休息的声音都

被视为噪声。

但是在光电系统或电子系统中,噪声也是指某些电信号,它是会对有用信号产生干扰或是些不期望的、突然的乱七八糟的信号。简单地说,噪声就是有害信号。如果有害信号来自组成电子系统的各种电子元器件内部微观粒子的无规则运动,则这种有害信号称为狭义噪声,简称噪声或随机噪声。如果有害信号来自系统外部,如雷电、天体变化产生的辐射或外部电磁场等,则称为干扰。但必须说明的是,干扰也可以来自系统内部。电子系统内部,地线设置不合理或分布电容的存在使得各级之间的信号违背了电子系统设计者所设计的传送规律就会产生干扰,这种干扰称为内部串扰。有时把噪声和干扰笼统地称为噪声,这就是广义噪声(编者的观点是,噪声是由于元器件内微观粒子随机地无规则地运动而产生的有害信号,其他有害信号则称为干扰)。

在“数字信号处理”中,将量化误差称为量化噪声,可见,噪声的公认的确切含义是有害信号。

光电信号处理的一个重要任务,就是要设计一个好的低噪声前置放大器。如果没有噪声和干扰,在理论上任何微弱的信号都可以探测和接收到。实际上,各种探测仪器和接收机的性能都要受到噪声及干扰的影响和限制。为了设计出性能优越的低噪声前置放大器及对探测器进行合理的偏置(低噪声偏置)必须对光电系统中的各种噪声和干扰进行分析和研究。

对于光电系统,影响其工作的噪声与干扰可以用图 1.2.1 所示的方框图来表示。

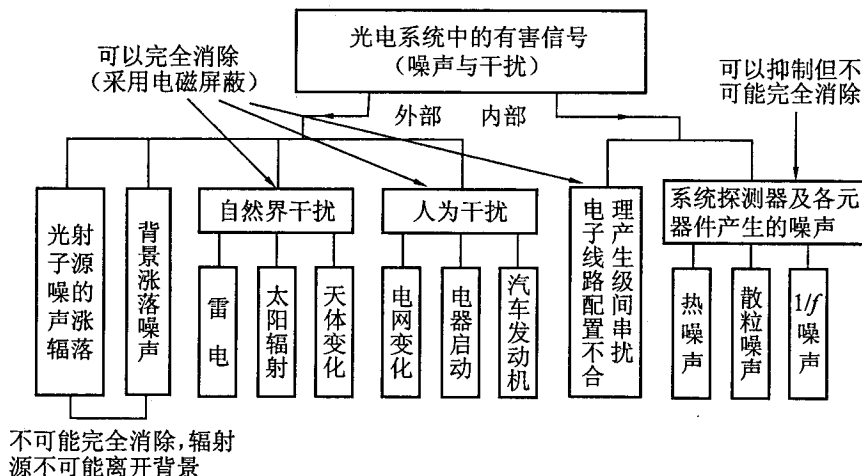


图 1.2.1 光电系统的噪声与干扰方框图

1.2.2 电子线路中常见的噪声源

电子线路中的基本元器件是晶体管、集成电路、电阻、电容、电感,这些元器件中的

电子的微观运动除了在宏观上遵从电路定律和元器件的约束规律外,在微观上还有起伏和涨落现象,因此,每个元器件都是一个甚至是多个噪声源。下面研究这些噪声的产生机理。

噪声是一种随机信号,也是一种随机过程,因而它服从概率统计规律,通常用均值、方差以及功率谱来描述噪声的性质。

电子线路中常见的噪声类型有好几种,但主要的为热噪声、低频噪声($1/f$ 噪声)和散粒噪声等三种。这三种常见的噪声又称为基本噪声,下面分别给予介绍。

1. 热噪声及其表示

热噪声是由导体中的自由电子的随机热运动引起的,由于电子携带 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 的电荷,因而电子的随机运动表现为电流大小有波动。虽然从长时间来看,这些波动产生的电流平均值为零,但是在每一瞬时它们并不为零,而是在平均值上下波动。所以,在每一瞬时这种波动电流便在导体两端形成了电位差,这就是热噪声电压,可以证明一个电阻为 R 的导体两端的热噪声电压的均方值为

$$\overline{V_n^2} = 4kTR\Delta f \quad (1.2.1)$$

式中: R 为电阻或阻抗的实部(Ω); k 为玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为导体的绝对温度(K); Δf 为测量系统的带宽(Hz)。

显然,这个公式两边的量纲是一致的,都可化成 V^2 。若取室温 $T = 290 \text{ K}$,则可求出 $\sqrt{\overline{V_n^2}} \approx \left(4\sqrt{\frac{R}{10^3}\Delta f}\right) \text{ nV}$,若电阻值为 $1 \text{ k}\Omega$,则在 1 Hz 带宽内的均方根热噪声电压就是 4 nV 。

式(1.2.1)对绝缘介质是不适用的,因为绝缘介质中没有自由电子,不符合推导公式的条件。

为了简化符号,常记 $E_n^2 = \overline{V_n^2}$ 或 $E_n = \sqrt{\overline{V_n^2}}$ 。

从式(1.2.1)可以看出,噪声电压的均方值与带宽成正比,而与频率并没有什么关系,或者说,它是平行于频率轴的一条直线。

通常在频率域(简称频域)中研究信号,对噪声的研究也是如此。

在式(1.2.1)两边除以 Δf ,就得到

$$\frac{E_n^2}{\Delta f} = 4kTR = S(f) \quad (1.2.2)$$

式中: $S(f)$ 为单位带宽内的噪声电压的均方值(V^2/Hz),也就是单位带宽内的噪声,通常称为功率谱密度。

式(1.2.2)记为 $S(f)$,意味着单位带宽内的噪声应是频率的函数,但从式(1.2.2)看出, $S(f)$ 中并没有含 f ,也就是说在整个频带内,热噪声是均匀分布的。在整个频带内均匀分布的噪声称为白噪声,这是一种借喻,白光是由各种颜色的光组成的,而热噪

声则是由各种频率噪声组成的,因此也叫白噪声。

由式(1.2.1)可知,要想减小热噪声,就必须使 R 尽可能地小,使温度尽可能地低,同时还应尽量减小电子系统的带宽。

在对电路进行噪声分析计算时,一个实际电阻 R 产生的热噪声电压,可以用一个噪声电压源 E_n 和一个无噪声电阻 R 相串联的二端网络来表示,或者用一个噪声电流源 I_n 与一个无噪声电阻 R 相并联的二端网络来表示,如图 1.2.2 所示。

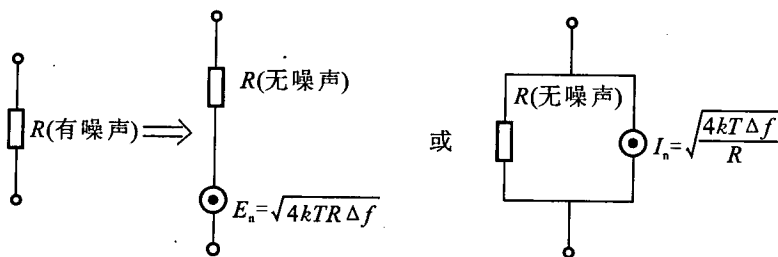


图 1.2.2 电阻器的热噪声等效模型

由于噪声电压和电流的相位是随机的,通常都只研究它们的均方值,因此,噪声电压源和噪声电流源都不标明正方向,也不知道它们的实际正方向。

热噪声电压均方根值为

$$\sqrt{V_n^2} = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

有几种证明方法可以从理论上证明这个公式。更重要的,它是一个实验定律,为实验所证明。

采用不同阻值 R 的导体,在不同温度下观察其有效噪声功率 P_i 时,首先观察到的是 P_i 和 T 成正比,还可观察到和测量系统的带宽 Δf 成正比。

因此,可以写成

$$P_i \propto T\Delta f \quad (\text{符号“}\propto\text{”读做“正比于”})$$

大量的实验数据,确定了这个比例系数就是 k ,即玻耳兹曼常数,因此,可以写成

$$P_i = kT\Delta f \quad (1.2.3)$$

这个结论首先由贝尔实验室的约翰逊(J. B. Johnson)博士在它的博士论文中阐述到。

根据约翰逊的有效功率 P_i 的定义,有

$$P_i = \frac{E_n^2}{4R}$$

这里 E_n 为热噪声电压的均方根值,或有效值,由图 1.2.3

即得

$$P_i = \left(\frac{E_n}{2R}\right)^2 \cdot R = \frac{E_n^2}{4R}$$

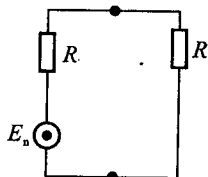


图 1.2.3 求有效功率的原理图