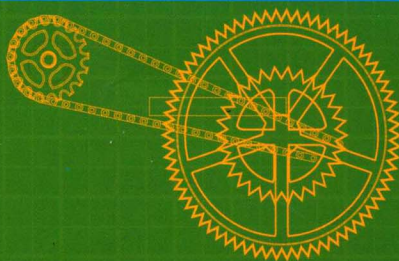


# 机械工程中检测技术基础 与实践教程



主 编 © 慕 丽

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 机械工程中检测技术 基础与实践教程

主编 慕 丽

常州大学图书馆  
藏书章

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

笔者在总结多年教学、实践、科研成果的基础上,依据机电专业逐级递进的实践教学思路,编写了本教程。《机械工程测试技术实验指导书》讲义于2003年编写完成,在学校内部使用,并作多次修正。《机械工程测试技术实训指导书》讲义于2011年编写完成,在学校内部使用。作者在以上两部讲义基础上,增加了典型量测量、虚拟仪器与数据采集、嵌入式系统、智能机器人系统设计等先进技术的训练。本书是机械电子工程本科生的教材,可用于课程实验、实训、课程设计及毕业设计。全书共8章,第1章为检测技术基础知识;第2章介绍了检测系统的典型测控电路;第3章介绍了虚拟仪器技术及LabVIEW应用;第4章介绍了嵌入式系统,重点介绍了ARM;第5章以CYS2000测控实验台为主,用于“机械工程测试基础”课内实验;第6章介绍了机械工程中常见的工程项目,如轴对中误差检测、零件表面探伤及轴承故障诊断等内容,用于“机械工程测试基础”课程实训;第7、8章分别基于泛华公司的Nextboard和Nextmech设计综合实践项目,用于课程设计及综合实践,也可作为机械专业本科生毕业设计的入门及参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

机械工程中检测技术基础与实践教程/慕丽主编. —北京:北京理工大学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-5682-5300-0

I. ①机… II. ①慕… III. ①机械工程-检测-高等学校-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第027050号

---

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市天利华印刷装订有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/16

字 数/383千字

版 次/2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

定 价/60.00元

责任编辑/杜春英

文案编辑/杜春英

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 前言

Qianyan

应用型创新人才及多学科交叉融合的工程人才培养，是 21 世纪我国高等教育发展的重要事件，也是高等教育适应社会发展的一个必然、理性的选择。目前，在本科教育阶段，国内高校都更加注重学生应用能力、动手能力和创新能力的培养。

高等工程教育目标是培养中高级工程技术人才，无论是侧重工程科学，还是侧重工程技术，都必须以工程实践为基础。要提高应用型人才培养质量，就要真正深入到教学过程中去，要很好地处理知识传授与能力培养、统一教育与个性发展之间的关系。工程教育必须密切地回归到工程实践的根本上来，树立工程实践教育理念。为此，沈阳理工大学机械类专业采用基于项目的应用型人才培养模式，旨在增强学生工程实践思维的培养、应用及创新能力的提高，提升工科人才的应用能力和创新创业能力。应用型人才培养体系中，设计了逐级递进的实践教学体系，为学生提供了理解理论知识、学习前沿技术的实践平台。建设逐级递进的实践教学体系，需要设立多种类型、多个层次的实践项目。从简单的课内实验到课程综合实训，直至融合多门课程的毕业设计，形成逐级递接式的教学进程。

笔者在总结多年教学、实践、科研成果的基础上，依据机电专业逐级递进的实践教学思路，编写了本教程。《机械工程测试技术实验指导书》讲义于 2003 年编写完成，在学校内部使用，并作多次修正。《机械工程测试技术实训指导书》讲义于 2011 年编写完成，在学校内部使用。作者在以上两部讲义基础上，增加了典型量测量、虚拟仪器与数据采集、嵌入式系统、智能机器人系统设计等先进技术的训练。本书是机械电子工程本科生的教材，可用于课程实验、实训、课程设计及毕业设计。全书共 8 章，第 1 章介绍了检测技术基础知识；第 2 章介绍了检测系统的典型测控电路；第 3 章介绍了虚拟仪器技术及 LabVIEW 应用；第 4 章介绍了嵌入式系统，重点介绍了 ARM；第 5 章以 CYS2000 测控实验台为主，用于“机械工程测试基础”课内实验；第 6 章介绍了机械工程中常见的工程项目，如轴对中误差检测、零件表面探伤及轴承故障诊断等内容，用于“机械工程测试基础”课程实训；第 7、8 章分别基于泛华公司的 Nextboard 和 Nextmech 设计综合实践项目，用于课程设计等综合实践，也可作为机械专业本科生毕业设计的入门及参考。

全书在对相关理论内容概括和总结的基础上，设计的实验内容从简单的验证性实验开始，逐级递进为综合性实验、实训、课程设计，直至毕业设计。既包括机械工程测试技术课程的实践内容，又将电工电子、控制理论、机电传动、机械设计课程的知识应用到综合项目中，将各门课程的相关知识点衔接紧密，有利于学生对知识的融会贯通，实现了理论与实践、原理与工程、基础性与先进性的有机结合。

本书主编为慕丽，副主编为王欣威、付晓云。其中第 5 章、第 7 章由慕丽编写，第 2 章、第 3 章、第 8 章由王欣威编写，第 1 章、第 4 章、第 6 章由付晓云编写。全书由慕丽、王欣威统稿。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

<b>第1章 检测技术基础知识</b> .....	001
1.1 检测技术概述 .....	001
1.2 信号分析与数据处理 .....	003
1.3 检测系统的基本特性 .....	012
1.4 测量误差及实验数据处理 .....	019
<b>第2章 检测系统的典型测控电路</b> .....	023
2.1 运算放大器 .....	023
2.2 信号放大电路 .....	027
2.3 有源滤波电路 .....	031
<b>第3章 虚拟仪器技术及 LabVIEW 应用</b> .....	033
3.1 图形化编程语言 LabVIEW .....	033
3.2 LabVIEW 前面板与程序框图 .....	035
3.3 LabVIEW 常见数据类型和运算 .....	036
3.4 LabVIEW 常用的程序结构及应用 .....	039
3.5 软件程序开发子 VI .....	046
3.6 数据采集系统 DAQ 简介 .....	046
<b>第4章 嵌入式系统与 ARM</b> .....	052
4.1 嵌入式系统概述 .....	052
4.2 嵌入式微处理器 .....	053
4.3 嵌入式操作系统 .....	055
4.4 应用软件及 LabVIEW for ARM .....	058
4.5 嵌入式技术的发展现状及趋势 .....	058
<b>第5章 检测技术基础实验</b> .....	060
5.1 典型测控电路实验 .....	060
5.2 金属箔式应变片实验 .....	066
5.3 差动变压器性能实验 .....	072

# 目 录

# Contents

5.4	电涡流传感器实验 .....	079
5.5	PSD 传感器实验 .....	086
5.6	超声波测距实验 .....	088
5.7	光栅传感器实验 .....	090
5.8	状态滤波器动态特性实验 .....	093
5.9	电机动平衡综合测试实验 .....	097
<b>第 6 章</b>	<b>综合实验及实训 .....</b>	<b>105</b>
6.1	机械装备安装中的轴对中检测与调试技术 .....	105
6.2	机械零件超声波无损检测与探伤技术 .....	112
6.3	轴承故障检测实训 .....	117
<b>第 7 章</b>	<b>基于 LabVIEW 的实验设计与开发 .....</b>	<b>122</b>
7.1	实验用硬件简介 .....	122
7.2	基于 Nextboard 的数据采集及基础实验 .....	127
7.3	典型虚拟实验系统设计——油门控制系统的仿真设计 .....	152
7.4	典型虚拟实验系统设计——洗衣机状态仿真系统设计 .....	165
<b>第 8 章</b>	<b>基于 ARM 的机电一体化课程设计 .....</b>	<b>178</b>
8.1	机器人基础知识概述 .....	178
8.2	Nextmech 机电一体化套件简介 .....	182
8.3	机电一体化套件的基础应用开发 .....	192
8.4	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运机械手设计 .....	207
8.5	典型案例设计——四足机器人设计 .....	233
8.6	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	245
8.7	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	255
8.8	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	265
8.9	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	275
8.10	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	285
8.11	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	295
8.12	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	305
8.13	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	315
8.14	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	325
8.15	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	335
8.16	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	345
8.17	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	355
8.18	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	365
8.19	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	375
8.20	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	385
8.21	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	395
8.22	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	405
8.23	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	415
8.24	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	425
8.25	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	435
8.26	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	445
8.27	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	455
8.28	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	465
8.29	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	475
8.30	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	485
8.31	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	495
8.32	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	505
8.33	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	515
8.34	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	525
8.35	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	535
8.36	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	545
8.37	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	555
8.38	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	565
8.39	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	575
8.40	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	585
8.41	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	595
8.42	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	605
8.43	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	615
8.44	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	625
8.45	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	635
8.46	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	645
8.47	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	655
8.48	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	665
8.49	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	675
8.50	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	685
8.51	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	695
8.52	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	705
8.53	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	715
8.54	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	725
8.55	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	735
8.56	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	745
8.57	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	755
8.58	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	765
8.59	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	775
8.60	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	785
8.61	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	795
8.62	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	805
8.63	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	815
8.64	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	825
8.65	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	835
8.66	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	845
8.67	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	855
8.68	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	865
8.69	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	875
8.70	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	885
8.71	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	895
8.72	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	905
8.73	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	915
8.74	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	925
8.75	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	935
8.76	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	945
8.77	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	955
8.78	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	965
8.79	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	975
8.80	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	985
8.81	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	995
8.82	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	1005
8.83	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	1015
8.84	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	1025
8.85	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	1035
8.86	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	1045
8.87	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	1055
8.88	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	1065
8.89	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	1075
8.90	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	1085
8.91	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	1095
8.92	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	1105
8.93	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	1115
8.94	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	1125
8.95	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	1135
8.96	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	1145
8.97	典型案例设计——基于 ARM 的自动搬运系统设计 .....	1155
8.98	典型案例设计——基于 ARM 的自动分拣系统设计 .....	1165
8.99	典型案例设计——基于 ARM 的自动装配系统设计 .....	1175
8.100	典型案例设计——基于 ARM 的自动检测系统设计 .....	1185

# 第1章 检测技术基础知识

## 1.1 检测技术概述

检测是指在生产、科研、实验等各个领域为及时获得被测对象的有关信息，实时或非实时地对一些参量进行定性检查和定量测量。检测的过程是借助专门的设备、仪器，通过适当的实验方法与必需的信号分析及数据处理，由测得的信号求取与研究对象有关的信息量值的过程，最后将其结果进行显示和输出。

检测技术几乎涉及任何一项工程领域，无论是生物、海洋、气象、地质、通信还是机械、电子等工程，都离不开测试与信息处理。在日常生活中，随处可见测试技术应用的例子。

### 1.1.1 检测技术的作用和任务

“检测”通常是指在生产、实验等现场，利用某种合适的检测仪器或综合测试系统对被测对象进行在线、连续的测量。检测技术是进行各种科学研究和生产过程参数检测等必不可少的手段，它起着类似人的感觉器官的作用。通过测试可以揭示事物的内在联系和发展规律，从而去利用它和改造它，推动科学技术的发展。科学技术的发展历史表明，科学上很多新的发现和突破都是以检测为基础的。同时，其他领域科学技术的发展和进步又为检测提供了新的方法和装备，促进了检测技术的发展。

在工程技术领域中，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能实验等，都离不开检测技术。检测系统基本构成如图 1.1 所示。在工程技术中广泛应用的自动控制技术也和检测技术有着密切的关系，检测装置是自动控制系统中的感觉器官和信息来源，对确保自动化系统的正常运行起着重要作用。

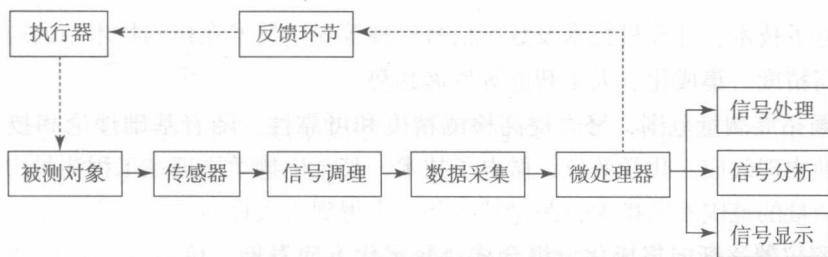


图 1.1 检测系统基本构成

检测技术在机械工业中的应用最为普遍，主要任务有以下三个方面。

### 1. 产品研制的性能检测——提供一种评价手段

一个成功的产品，经过产品设计、样机制造后，必须通过测试手段进行性能检测，如果性能指标达到了预定要求，进入批量生产；否则，要进一步进行测试、分析，找出问题所在和薄弱环节，进行重新设计或修改设计，重新进行上述过程，直至成功。产品研发流程如图 1.2 所示。测试技术不仅提供了产品性能评价的手段，而且为优化和改进产品提供了依据。例如，一架新式飞机的样机制造完成后，在地面要进行近百项检测项目，如推力/自重、耗油、温升、噪声及各部件的应力测试等。如果某一项不合格，则需要进一步的测试，分析原因，进行改造。

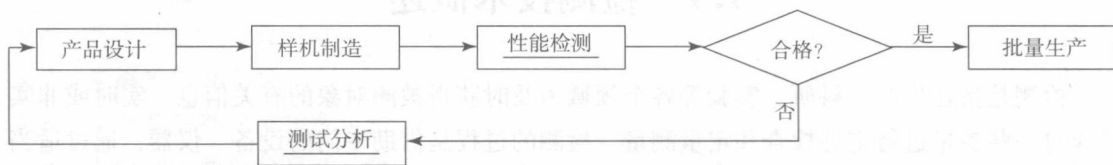


图 1.2 产品研发流程

### 2. 自动化加工过程的检测技术

自动化加工过程的主要特点是：排除人的干预，整个加工过程由设备自己完成。这就要求设备有大量的检测装置，检测加工过程的全部状态信息，包括设备自身的状态、工件的状态、刀具的状态等。例如，金属切削刀具在加工的过程中会发生刀刃磨损，发生刀刃磨损后，设备应该自动换刀或报警。进行刀具磨损检测的依据是：刀具磨损——切削力大——扭矩变大。实际的设备中，通过监测刀杆的扭矩来判断刀具的磨损。

### 3. 自动控制系统中的检测技术

在自动控制系统中，总希望用一个电量精确地控制一个机械量（位移、速度等），如果直接用控制电信号  $U$  驱动执行器，实现被控制量  $X$ ， $U - X$  有非线性、负载特性的问题，导致出现控制误差  $\Delta X$ 。因此，自动控制装置常采用加入精密测试环节的闭环系统，来提高精确性、稳定性，消除非线性误差。机械加工的设备中，需要大量的自动控制装置。机械工业的现代化产品中也有大量的自动控制装置。因此，检测技术已经成为自动控制中的一个重要组成部分。

## 1.1.2 检测技术的发展趋势

随着微电子技术、计算机技术及数字信号处理等先进技术在检测技术中的应用，现代检测技术具有高精度、集成化、人工智能等发展趋势。

(1) 不断拓展测量范围，努力提高检测精度和可靠性。随着基础理论和技术科学的研究发展，各种物理效应、化学效应、微电子技术，甚至生物学原理在工程测量中得到广泛应用，使得可测量的范围不断扩大，测量精度和效率得到很大提高。

(2) 检测仪器逐渐向集成化、组合式、数字化方向发展。仪器与计算机技术的深层次结合产生了全新的仪器结构概念。一般来说，将数据采集卡插入计算机空槽中，利用软件在



屏幕上生成虚拟面板,在软件引导下进行信号采集、运算分析和处理,实现仪器功能并完成测试的全过程,就是所谓的虚拟仪器,即由数据采集卡、计算机、输出(D/A)及显示器一起组成通用硬件平台。在此平台基础上,调用测试软件完成某种功能的测试任务,成为具有虚拟面板的虚拟仪器。在同一平台上,调用不同的测试软件就可以构成不同功能的虚拟仪器,可方便地将多种测试功能集于一体,实现多功能集成仪器。

(3) 检测系统智能化。智能传感器系统采用微机械加工技术和大规模集成电路技术,利用硅作为基本材料制作敏感元件、信号处理电路、微处理器单元,并把它们集成在一块芯片上,故又称为集成智能传感器。智能传感器系统具有自检测、自补偿、自校正、自诊断、远程设定、信息存储和记忆等功能。

## 1.2 信号分析与数据处理

### 1.2.1 信号的基本概念及分类

信号是信息的载体,信息是对信号经过分析处理后的有用部分,它表征被测对象运动与状态的某种特征与属性。在数学上,信号表示为一个或多个自变量的函数。一般连续信号表示为时间 $t$ 的函数 $f(t)$ ,离散信号表示为序号 $k$ 的函数 $f(k)$ ,函数的图形则称为信号的波形。

为了深入了解信号的物理实质,将其进行分类研究是非常必要的。以不同的角度来看待信号,可以将信号分为:

- (1) 确定性信号与非确定性信号。
- (2) 能量信号与功率信号。
- (3) 时限信号与频限信号。
- (4) 连续时间信号与离散时间信号。

### 1.2.2 信号的时域采样和时域采样定理

数字信号处理技术,首先把一个连续变化的模拟信号转化为数字信号,然后由计算机处理,从中提取有关的信息。信号数字化过程包含一系列步骤,每一步都可能引起信号和其蕴含信息的失真。

#### 一、信号的时域采样

采样是把连续时间信号变成离散时间序列的过程,这一过程相当于在连续时间信号上“摘取”许多离散时刻上的信号瞬时值。

现以一个模拟信号 $X(t)$ 的采样为例来说明有关的问题。模拟信号 $x(t)$ 的傅里叶变换为 $X(f)$ ,如图1.3所示。采样就是用一个等时距的周期脉冲序列 $p(t)$ (即 $\text{comb}(t, T_s)$ ),也称采样函数去乘 $x(t)$ ,使 $x(t)$ 变换成有限长的离散时间序列,各采样点上的瞬时值就变成

脉冲序列的强度，这些强度值将被量化而成为相应的数值。

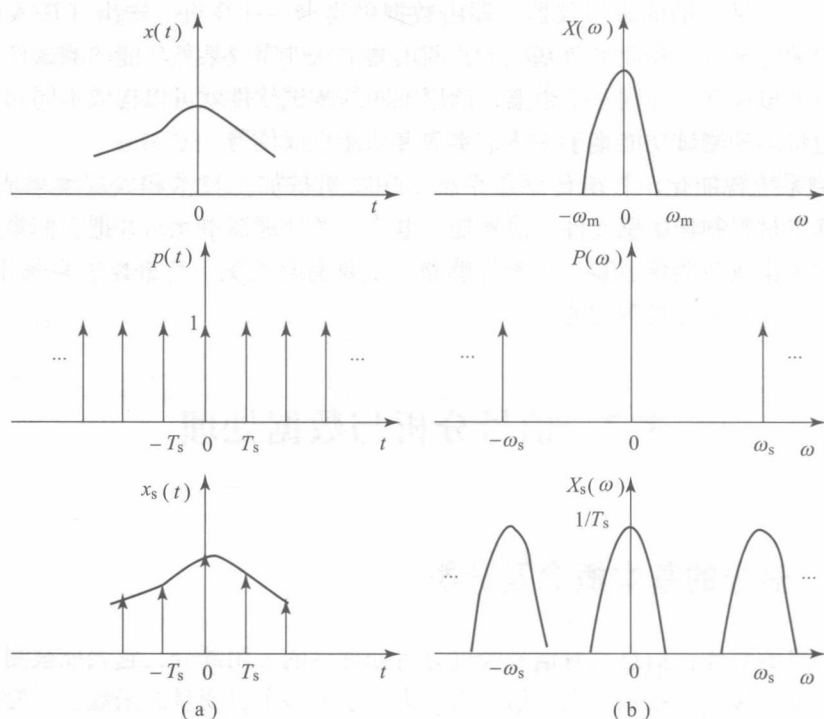


图 1.3 信号的时域采样

采样脉冲序列：

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (1.1)$$

采样信号：

$$x_s(t) = x(t)p(t) \quad (1.2)$$

时距  $T_s$  称为采样间隔， $1/T_s = f_s$  称为采样频率。周期脉冲序列  $p(t)$  的傅里叶变换  $P(f)$  也是周期脉冲序列，如图 1.3 (a) 所示，其频率间距为  $f_s = 1/T_s$ 。那么，根据频域卷积定理，有

$$X_s(f) = X(f) * P(f) \quad (1.3)$$

采样后信号的频谱是  $X(f)$  和  $P(f)$  的卷积，相当于将  $X(f)$  乘以  $1/T_s$ ，然后将其平移，使其中心落在  $P(f)$  脉冲序列的频率点上，如图 1.3 (b) 所示。

## 二、采样定理

长度为  $T$  的连续时间信号  $x(t)$ ，从点  $t = 0$  开始采样，采样得到的离散时间序列为  $x(n)$ ：

$$x(n) = x(nT_s) = x(n/f_s) \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.4)$$

式中， $x(nT_s) = x(t)|_{t=nT_s}$ ； $T_s$  为采样间隔； $N$  为序列长度， $N = T/T_s$ ； $f_s$  为采样频率， $f_s = 1/T_s$ 。

采样间隔的选择是一个重要问题。若采样间隔太小（采样频率高），则对定长的时间记录来说其数字序列就很长，计算工作量迅速增大；如果数字序列长度一定，则只能处理很短的时间历程，可能产生较大的误差。若采样间隔过大（采样频率低），则可能丢掉有用的

信息。

### 1. 频混现象

频混现象又称为频谱混叠效应，它是由于采样信号频谱发生变化，而出现高、低频成分发生混淆的一种现象，如图 1.4 所示。信号  $x(t)$  的傅里叶变换为  $X(\omega)$ ，其频带范围为  $-\omega_m \sim \omega_m$ ；采样信号  $p(t)$  的傅里叶变换是一个周期谱图，其周期为  $\omega_s$ ，并且

$$\omega_s = 2\pi/T_s \quad (1.5)$$

式中， $T_s$  为时域采样周期。当采样周期  $T_s$  较小时， $\omega_s > 2\omega_m$ ，周期谱图相互分离，如图 1.4 (b) 所示；当  $T_s$  较大时， $\omega_s < 2\omega_m$ ，周期谱图相互重叠，即谱图之间高频与低频部分发生重叠，如图 1.4 (c) 所示，此即频混现象，这将使信号复原时丢失原始信号中的高频信息。

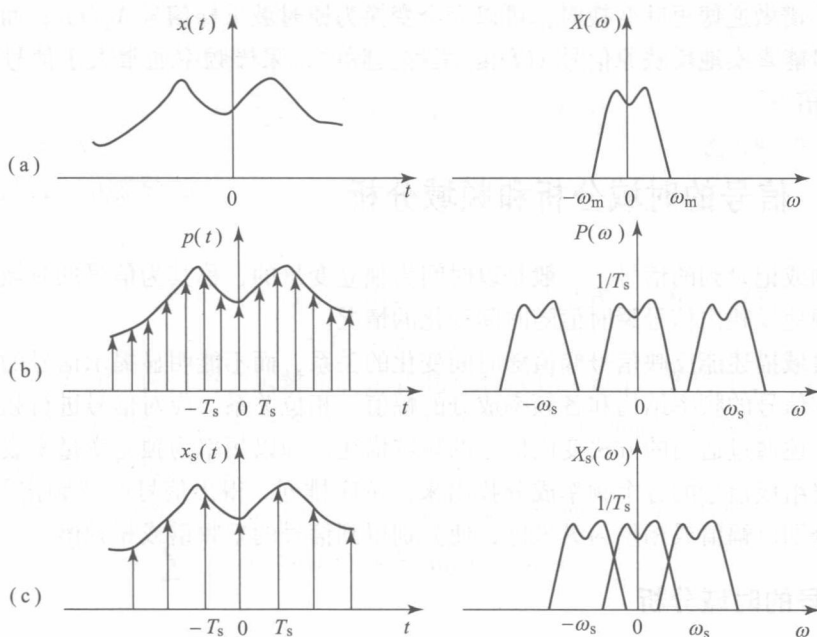


图 1.4 频谱混叠效应

下面从时域信号波形来看这种情况。图 1.5 (a) 所示为频率正确的情况，以及其复原信号；图 1.5 (b) 所示为采样频率过低的情况，复原的是一个虚假的低频信号。

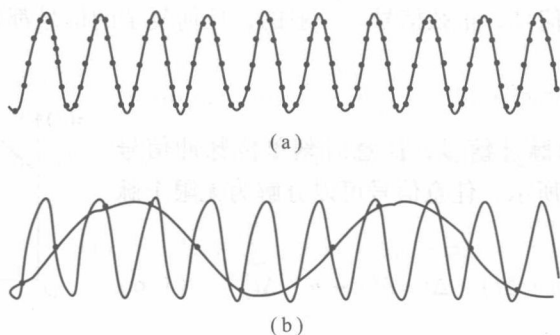


图 1.5 采样频率选择

(a) 采样频率正确；(b) 采样频率过低



当采样信号的频率低于被采样信号的最高频率时，采样所得的信号中混入了虚假的低频分量，这种现象叫做频率混叠。

### 2. 采样定理

上述情况表明，如果  $\omega_s > 2\omega_m$ ，就不发生频混现象，因此对采样脉冲序列的间隔  $T_s$  需加以限制，即采样频率  $\omega_s (2\pi/T_s)$  或  $f_s (1/T_s)$  必须大于或等于信号  $x(t)$  中的最高频率  $\omega_m$  的 2 倍，即  $\omega_s > 2\omega_m$ ，或  $f_s > 2f_m$ 。

为了保证采样后的信号能真实地保留原始模拟信号的信息，采样信号的频率必须至少为原信号中最高频率成分的 2 倍。这是采样的基本法则，称为采样定理。

需要注意的是，在对信号进行采样时，满足了采样定理，只能保证不发生频率混叠，保证对信号的频谱做逆傅里叶变换时，可以完全变换为原时域采样信号  $X_s(t)$ ；而不能保证此时的采样信号能真实地反映原信号  $x(t)$ 。工程实际中，采样频率通常大于信号中最高频率成分的 3~5 倍。

## 1.2.3 信号的时域分析和频域分析

直接观测或记录到的信号，一般是以时间为独立变量的，称其为信号的时域描述。信号时域描述直观地反映出信号瞬时值随时间变化的情况。

信号的时域描述能反映信号幅值随时间变化的关系，而不能明显揭示信号的频率组成关系。为了研究信号的频率结构和各频率成分的幅值、相位关系，应对信号进行频谱分析，把信号的时域描述通过适当的方法变成信号的频域描述，即以频率为独立变量来表示信号。信号分析中，将组成信号的各个频率成分找出来，按序排列，得出信号的“频谱”。若以频率为横坐标，分别以幅值或相位为纵坐标，便分别得到信号的幅频谱或相频谱。

### 一、信号的时域分析

在数学上，一般连续信号表示为时间  $t$  的函数  $x(t)$ ，函数的图形则称为信号的波形。经过信号处理可求得信号的时域特征值——均方值、均值、方差、概率密度函数，以获得有用信息。

认识复杂信号的最好办法是将其表示为简单信号的组合，下面介绍三种常用的连续时间信号：脉冲信号、阶跃信号、正弦信号。一般的，任何复杂的信号都是由这几种信号叠加而成的。

#### 1. 脉冲信号 $\delta(t)$

$\delta(t)$  为零时刻单位脉冲信号，任意时刻单位脉冲信号为  $\delta(t - t_0)$ 。如图 1.6 所示，任意信号可以分解为无限个脉冲的组合。

$$x(t) = \sum x(n \cdot \Delta t) \cdot \Delta t \cdot \delta(t - n \cdot \Delta t) \quad (1.6)$$

#### 2. 阶跃信号

零时刻产生的幅度为 1 的阶跃信号表示为  $u(t)$ ，如图

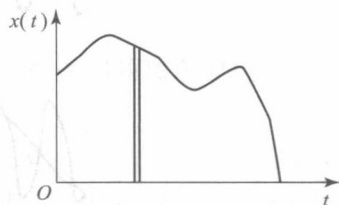


图 1.6 任意信号的分解

1.7 所示；任何台阶信号可以表示为单位阶跃信号的组合，如图 1.8 所示。

$$x(t) = A_1 u(t) - (A_1 - A_2) u(t - t_1) - A_2 u(t - t_2) \quad (1.7)$$

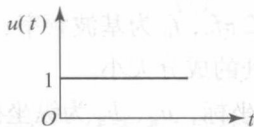


图 1.7 阶跃信号

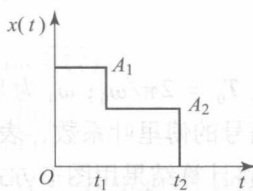


图 1.8 台阶信号

### 3. 正弦信号

正弦信号,如图 1.9 所示。任何周期信号都可以表示为有限个或无限个不同幅值、相位和频率的正弦信号的组合。

$$x(t) = \sum_i x_i(t) = \sum_i A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1.8)$$



图 1.9 正弦信号

## 二、信号的频域分析

### 1. 周期信号的频谱

周期信号是经过一定时间后可以重复出现的信号,满足式 (1.9) 条件。

$$x(t) = x(t + nT_0) \quad (1.9)$$

从数学分析可知,任何周期函数在满足狄利克利 (Dirichlet) 条件下,可以展开成正交函数线性组合的无穷级数,如正交函数集是三角函数集  $(\sin(n\omega_0 t), \cos(n\omega_0 t))$ ,则可展开成傅里叶级数,有实数形式表达式:

$$\begin{aligned} x(t) &= a_0 + a_1 \cos(\omega_0 t) + b_1 \sin(\omega_0 t) + a_2 \cos(2\omega_0 t) + b_2 \sin(2\omega_0 t) + \dots \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \end{aligned} \quad (1.10)$$

直流分量幅值为

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (1.11)$$

各余弦分量幅值为

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(n\omega_0 t) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt \quad (1.12)$$

各正弦分量幅值为

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(n\omega_0 t) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt \quad (1.13)$$

利用三角函数的和差化积公式,周期信号的三角函数展开式还可以写为式 (1.14) 的形式:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n) \quad (1.14)$$

直流分量幅值为

$$A_0 = a_0 \quad (1.15)$$

各频率分量幅值为

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (1.16)$$

各频率分量的相位为

$$\varphi_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n} \quad (1.17)$$

式中,  $T_0$  为周期,  $T_0 = 2\pi/\omega_0$ ;  $\omega_0$  为基波圆频率,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  为基波频率;  $n = 0, \pm 1, \dots$ ;  $a_n, b_n, A_n, \varphi_n$  为信号的傅里叶系数, 表示信号在频率  $f_n$  处的成分大小。

工程上习惯将计算结果用图形方式表示, 以  $f_n$  为横坐标,  $a_n, b_n$  为纵坐标画图, 绘出的曲线图称为实频 - 虚频谱图; 以  $f_n$  为横坐标,  $A_n, \varphi_n$  为纵坐标画图, 绘出的曲线图称为幅值 - 相位谱; 以  $f_n$  为横坐标,  $A_n^2$  为纵坐标画图, 绘出的曲线图称为功率谱。周期信号的频谱如图 1.10 所示。

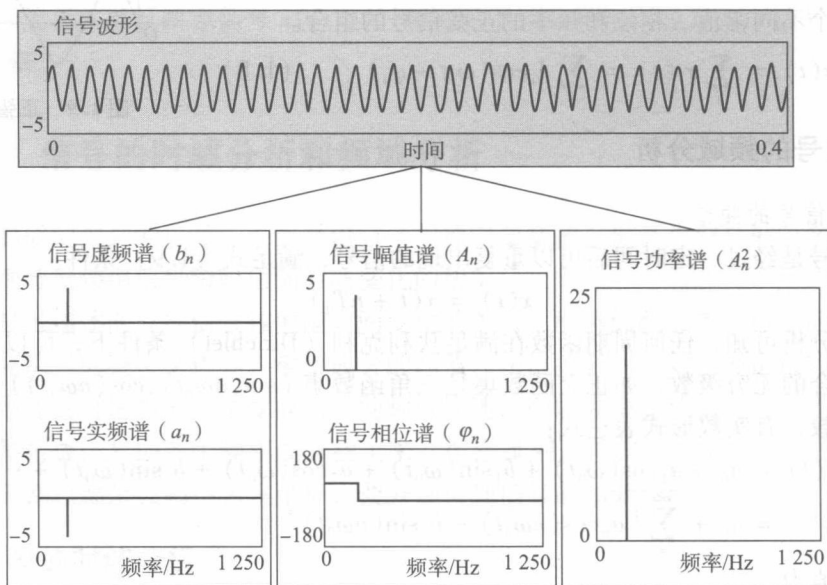


图 1.10 周期信号的频谱

对周期信号来说, 信号的谱线只会出现在  $0, f_1, f_2, \dots, f_n$  等离散频率点上, 这种频谱称为离散谱。

## 2. 非周期信号的频谱

非周期信号是在时间上不会重复出现的信号, 一般为时域有限信号, 具有收敛可积条件, 其能量为有限值。这种信号的频域分析是利用傅里叶变换进行的, 其表达式为

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega & x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \\ X(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt & X(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \end{aligned} \quad (1.18)$$

与周期信号相似, 非周期信号也可以分解为许多不同频率分量的谐波之和。所不同的是, 由于非周期信号的周期  $T \rightarrow \infty$ , 基频  $\omega_0 \rightarrow d\omega$ , 它包含了从零到无穷大的所有频率分量; 各频率分量的幅值为  $X(\omega) d\omega / (2\pi)$ , 这是无穷小量, 所以频谱不能再用幅值表示, 而必须用幅值密度函数描述。

非周期信号  $x(t)$  的傅里叶变换  $X(f)$  是复数, 所以有

$$X(f) = |X(f)| e^{j\varphi(f)}$$

$$|X(f)| = \sqrt{\operatorname{Re}^2[X(f)] + \operatorname{Im}^2[X(f)]} \quad (1.19)$$

$$\varphi(f) = \arctan \frac{\operatorname{Im}[X(f)]}{\operatorname{Re}[X(f)]}$$

式中,  $|X(f)|$  为信号在频率  $f$  处的幅值谱密度;  $\varphi(f)$  为信号在频率  $f$  处的相位差。

工程上习惯将计算结果用图形方式表示, 以  $f$  为横坐标,  $\operatorname{Re}[X(f)]$ 、 $\operatorname{Im}[X(f)]$  为纵坐标画图, 绘出的曲线图称为时频 - 虚频密度谱; 以  $f$  为横坐标,  $|X(f)|$ 、 $\varphi(f)$  为纵坐标画图, 绘出的曲线图称为幅值 - 相位密度谱; 以  $f$  为横坐标,  $|X(f)|^2$  为纵坐标画图, 绘出的曲线图称为功率密度谱。非周期信号的频谱如图 1.11 所示。

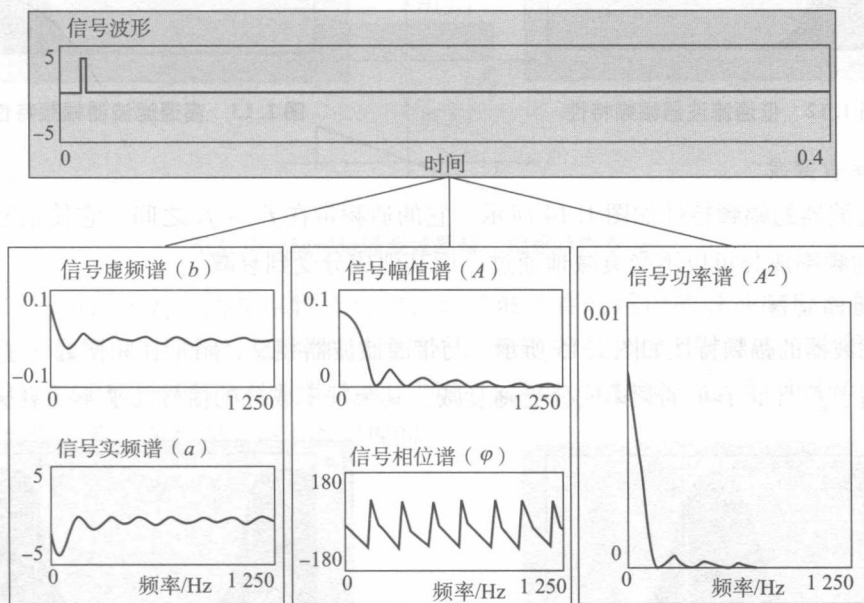


图 1.11 非周期信号的频谱

与周期信号不同的是, 非周期信号的谱线出现在  $0$  到  $f_{\max}$  区间各连续频率值上, 这种频谱称为连续谱。

## 1.2.4 信号的滤波技术

滤波器是一种选频装置, 可以使信号中特定的频率成分通过, 而极大地衰减其他频率成分。在测试装置中, 利用滤波器的选频作用, 可以滤除干扰噪声或进行频谱分析。

### 一、滤波器分类

根据滤波器的选频作用, 滤波器可分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器。

### 1. 低通滤波器

低通滤波器的幅频特性如图 1.12 所示。 $0 \sim f_2$  频率之间，幅频特性平直，它可以使信号中低于  $f_2$  的频率成分几乎不受衰减地通过，而高于  $f_2$  的频率成分受到极大的衰减。

### 2. 高通滤波器

高通滤波器的幅频特性如图 1.13 所示。与低通滤波器相反，从频率  $f_1 \sim \infty$ ，其幅频特性平直。它使信号中高于  $f_1$  的频率成分几乎不受衰减地通过，而低于  $f_1$  的频率成分将受到极大的衰减。

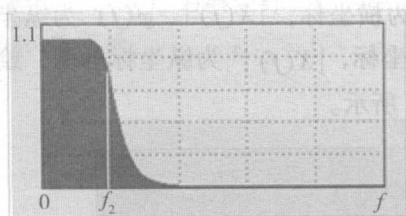


图 1.12 低通滤波器幅频特性

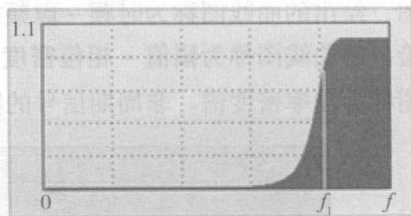


图 1.13 高通滤波器幅频特性

### 3. 带通滤波器

带通滤波器的幅频特性如图 1.14 所示。它的通频带在  $f_1 \sim f_2$  之间。它使信号中高于  $f_1$  而低于  $f_2$  的频率成分可以不受衰减地通过，而其他成分受到衰减。

### 4. 带阻滤波器

带阻滤波器的幅频特性如图 1.15 所示。与带通滤波器相反，阻带在频率  $f_1 \sim f_2$  之间。它使信号中高于  $f_1$  且低于  $f_2$  的频率成分受到衰减，其余频率成分的信号几乎不受衰减地通过。

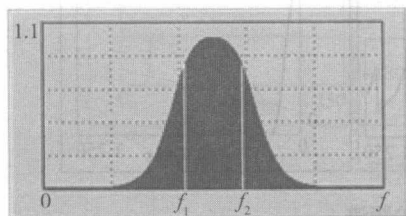


图 1.14 带通滤波器幅频特性

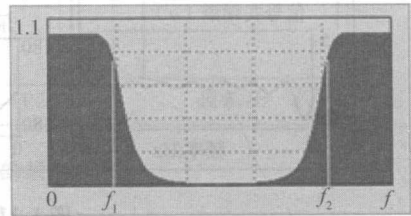


图 1.15 带阻滤波器幅频特性

低通滤波器和高通滤波器是滤波器的两种最基本形式，其他的滤波器都可以分解为这两种类型的滤波器。例如，低通滤波器与高通滤波器的串联为带通滤波器，如图 1.16 所示；低通滤波器与高通滤波器的并联为带阻滤波器，如图 1.17 所示。

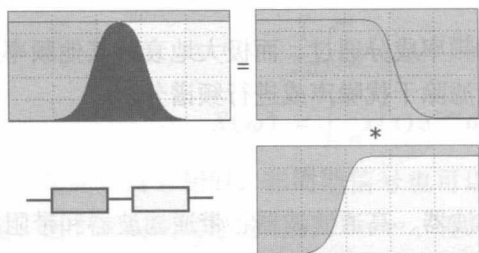


图 1.16 低通滤波器与高通滤波器串联

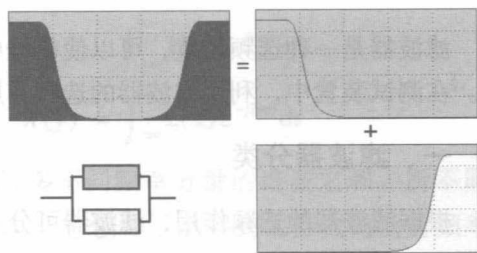


图 1.17 低通滤波器与高通滤波器并联



## 二、理想滤波器

理想滤波器是指能使通带内信号的幅值和相位都不失真，阻带内的频率成分都衰减为零的滤波器，其通带和阻带之间有明显的分界线。也就是说，理想滤波器在通带内的幅频特性应为常数，相频特性的斜率为常数；在通带外的幅频特性应为零。

理想低通滤波器的幅频及相频特性曲线如图 1.18 所示。理想低通滤波器的频率响应函数为

$$|H(f)| = \begin{cases} A_0, & -f_c < f < f_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.20)$$

$$\varphi(f) = -2\pi f t_0$$

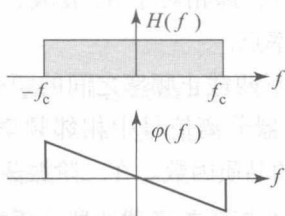


图 1.18 理想低通滤波器幅、相频特性曲线

分析式 (1.20) 所表示的频率特性可知，该滤波器在时域内的脉冲响应函数  $h(t)$  为 sinc 函数，图形如图 1.19 所示。脉冲响应的波形沿横坐标左、右无限延伸，从图中可以看出，在  $t = 0$  时刻单位脉冲输入滤波器之前，即在  $t < 0$  时，滤波器就已经有响应了。显然，这是一种非因果关系，在物理上是不能实现的。

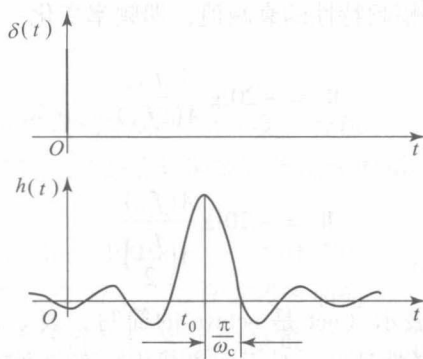


图 1.19 理想低通滤波器的脉冲响应

## 三、实际滤波器

理想滤波器是不存在的，在实际滤波器的幅频特性图中，通带和阻带之间应没有严格的界限。在通带和阻带之间存在一个过渡带，在过渡带内的频率成分不会被完全抑制，只会受到不同程度的衰减。当然，希望过渡带越窄越好，也就是希望对通带外的频率成分衰减得越快、越多越好。因此，在设计实际滤波器时，总是通过各种方法使其尽量逼近理想滤波器。