

高等学校教学用书

机械工程测试与 数据处理技术

平 鹏 编 著

GAODENG
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程测试与数据处理技术/平鹏编著. - 北京:
冶金工业出版社, 2001. 4
高等学校教学用书
ISBN 7-5024-2717-1

I. 机… II. 平… III. ①机械-技术测量-高等学校-教学参考资料②数据处理-高等学校-教学参考资料 IV. TG8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 09024 号

出版人 卿启云 (北京沙滩高祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
责任编辑 王秋芬 美术编辑 王耀忠 责任校对 刘倩
北京昌平百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2001 年 4 月第 1 版, 2001 年 4 月第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32; 9.75 印张; 261 千字; 304 页; 1-2500 册
20.00 元
冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893
冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081
(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书是参照机械类各专业的测试技术课程大纲和教材编写的。编写时本着少而精、重点突出的原则,在同样篇幅下,使内容有了较大的增加;同时考虑到理论结合实际的原则,不但编入了测试技术的基础知识,如静态、动态特性及误差,测试系统的基本环节(传感器介绍、放大及记录仪器),而且还编入了机械工程主要参数中应力、力及压力,位移、速度及流量和振动的常用测量方法及技术,并将传感器的转换原理编入到相应的参数测量中去,使原理与具体实践结合,避免重复叙述。为了能从测试信号或测试数据中提取所需要的定量信息,在最后两章编写了信号处理和动态测试数据处理。另外为便于加深对各章内容的理解,每一章都有例题及习题。

本书定稿前,曾作为内部教材经多届教学使用。因此,获得了有关教师和学生许多反馈信息。特别是于晓光、冷惠文两位教师提供了宝贵的意见。本书在编写过程中得到了刘巧珍、平欣、郭忠振的大力帮助。在此一并表示衷心感谢。同时,对编写时参考的有关教材和资料的作者也表示衷心感谢。本书第二章由于晓光编写。

本书由东北大学虞和济教授、寇惠教授,鞍山钢铁学院刘培锬教授、王律躬教授审阅。

本书可作为机械类各专业的教材或教学参考书,也可供从事机械工程测试技术及相关技术的工程技术人员参考。由于编者水平有限,书中存在的缺点或不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2000 年 8 月

目 录

第一章 绪言	(1)
第一节 测试技术在机械工程中的作用.....	(1)
第二节 机械量测试系统.....	(2)
第三节 测试技术的发展概况.....	(3)
第四节 测试技术课的内容和要求.....	(4)
第二章 信号及频谱	(5)
第一节 信号分类.....	(5)
第二节 周期信号和离散频谱.....	(6)
第三节 非周期信号和连续频谱	(11)
第四节 拉氏变换简介	(19)
习题	(20)
第三章 测试仪器静特性及误差	(21)
第一节 误差概述	(21)
第二节 随机误差	(24)
第三节 系统误差	(31)
第四节 测量误差总和	(33)
第五节 间接测量误差	(40)
第六节 测试仪器的静特性	(43)
习题	(45)
第四章 测试仪器动特性及误差	(48)
第一节 线性系统及其特性	(48)
第二节 一阶系统特性及响应	(51)
第三节 二阶系统特性及响应	(57)
第四节 测试仪器不失真条件	(63)
第五节 测试装置动特性参数测试方法	(64)
习题	(71)

第五章 机械量测试系统的基本环节	(73)
第一节 传感器	(73)
第二节 电桥电路	(76)
第三节 放大器	(81)
第四节 光线示波器	(86)
第五节 笔式记录仪	(93)
第六节 自动平衡电桥和 X-Y 记录仪	(94)
第七节 磁带记录仪	(95)
第八节 数据采集器	(99)
习题	(102)
第六章 应变片测试技术基础	(104)
第一节 电阻应变计	(104)
第二节 应变片转换原理	(107)
第三节 应变片灵敏系数测定	(110)
第四节 应变片的温度补偿及性能	(112)
第五节 应变片组桥及其输出电压	(116)
第六节 电阻应变仪	(120)
习题	(127)
第七章 应力与外力测量	(130)
第一节 平面应力测量	(130)
第二节 轴、梁应力及外力测量	(133)
第三节 传动轴扭矩测量	(136)
第四节 应变式测力传感器	(142)
第五节 三向力及张力测量	(151)
第六节 应变梯度测量	(155)
第七节 流体压力测量	(157)
习题	(164)
第八章 位移、速度与流量测量	(168)
第一节 概述	(168)
第二节 电阻式位移传感器	(168)

第三节	电感式位移传感器	(172)
第四节	电容式位移传感器	(175)
第五节	感应同步器测位移	(181)
第六节	光栅位移测量装置	(184)
第七节	旋转变压器和光学编码器	(187)
第八节	磁栅及激光干涉测位移	(191)
第九节	磁电式测速传感器	(192)
第十节	脉冲频率式测速仪器	(194)
第十一节	液体流量测量	(196)
	习题	(206)
第九章	振动测量	(208)
第一节	振动测量概述	(208)
第二节	压电加速度计	(209)
第三节	应变式及伺服式加速度计	(220)
第四节	磁电式速度计	(224)
第五节	电涡流式位移传感器	(225)
第六节	积分与微分器	(228)
第七节	滤波器	(234)
第八节	振动激励与激振器	(238)
第九节	测振传感器的校验	(245)
	习题	(249)
第十章	信号处理	(251)
第一节	信号数字化转换	(251)
第二节	信号时域分析	(256)
第三节	信号频域分析	(269)
第四节	离散富氏变换	(273)
第五节	快速富氏变换 FFT	(276)
	习题	(278)
第十一章	测试数据的数学建模	(280)
第一节	测试数据的一元线性回归	(280)

第二节	多元线性回归·····	(283)
第三节	非线性回归·····	(286)
第四节	滑动平均法·····	(291)
第五节	变量差分法·····	(295)
第六节	自回归模型拟合及自回归谱分析·····	(298)
习题	·····	(302)
参考文献	·····	(304)

第一章 绪 言

第一节 测试技术在机械工程中的作用

测试技术包含了测量和试验两方面的含义,即包含对机械产品或机械加工过程的参数直接进行定量测量和通过试验及测量来测试某些参数及性能。

随着经济建设和科学技术的飞速发展,机械工业和与机械工业相关的科学技术也在高速发展。它不但对测试技术提出了更高的要求,而且也为测试技术的高速发展创造了条件。在工业生产中,为了增加产量、提高质量、减少消耗、降低成本,需要对生产全过程进行检测。在自动化机械生产中也需要对生产过程有关参数进行检测。同时,为了延长设备使用寿命,使设备运行于最佳运转状态,也需要对机械设备运行状态进行监测。对机械设备开展现代化维修管理,开展点检定修、预知维修和设备故障诊断,也必须掌握测试技术。对原有机机械设备进行挖潜改造或设计新机械设备时,也需要通过现场测试,以取得必须的数据资料。对新制造的机械设备或新安装调整的机械设备,也需要通过测试来检验其性能指标。实践是检验真理的惟一标准。对于机械学科的各项理论或各项假设,必须通过实验进行检验。同时,通过实践和测试可以积累数据资料,为创立新理论、新公式提供了必要的条件。总之,测试技术已经成为从事机械工程的科技人员所必须掌握的一门技术,机械工程测试技术课程也已经成为机械专业的一门主要技术基础课。

测试技术是研究对象的状态、运动、特征等信息的一门技术,具体地说,是将有关信息转换成易于传输的信号(如电信号、光信号、声信号等),通过传输、放大、显示或记录,或再经过分析处理,提取更有效或更有用的特征信息。有时还需要通过试验,如激振,

施加力,以获取直接测量无法得到的有用信息。

工程技术中所涉及到的参数大致可以分成物理量和化学量两大类。其中物理量又可以分成电量(电磁量及无线电量)和非电量。后者按工程应用可以再分为机械量(力、位移、速度、质量、变形、振动等),热工量,光学量,时频量,放射线量等。机械工程测试技术主要叙述机械量的测试与分析技术。

第二节 机械量测试系统

机械工程测试技术主要研究机械参数的动态测试技术及测试信号或数据的处理和分析技术,它包含信息检测与转换、传输、放大、记录、显示、信号分析和数据处理及试验设备等。因此,通常需要使用多种测试仪器或分析仪器组成的测试系统。测试系统的框图如图 1-1 所示。

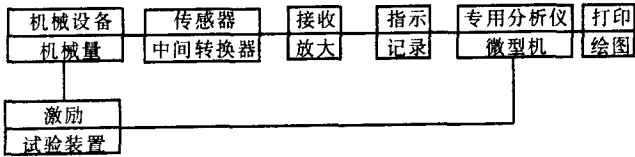


图 1-1 测试系统框图

1. 传感器与中间转换器

在机械量测试中,将机械量转换成电量或其他量的装置称为机械量传感器。例如,将力参数转换成电量的装置称为测力传感器,将位移或速度转换成电量的装置称为位移或速度传感器。机械量通过传感器转换的电量不一定是电压或电流,而可能是电阻、电感、电容或电荷等量,因此需要通过中间转换器,再一次转换成电压或电流量。大多数传感器转换后的电压或电流量是很微弱的,还需要放大。这些二次转换及放大器称为中间转换器。常用的中间转换器有电桥电路、运算放大器电路、调制-解调放大器等。

2. 指示及记录仪器

指示仪表有指针式电表和数字式电表两大类。对于某些信号,如周期信号,还可以采用峰值表、绝对均值表、有效值表等。对于动态信号,需要用记录仪器记录下来。常用的记录仪器有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪和数据采集记录仪等。

3. 试验激励装置

根据机械设备的需要,激励装置可以采用多种不同的试验装置。常用的有电激振装置(正弦、阶跃、脉冲激励),液压激励装置,气压激励装置,加力装置等。

4. 信号分析及动态数据处理

信号分析仪器有模拟式和数字式两类。目前大多采用微机进行信号分析和数据处理,它不但可以进行常规的信号分析(如F.F.T相关,功率谱密度等),还可以进行统计、回归等分析。较先进的还可以进行动态数据处理、系统辨识、参数估计、时序建模等计算。

5. 自动测试系统

利用微机一方面对信号作分析处理,另一方面对转换放大器 and 激励装置进行控制,组成闭环测量系统,即自动化测试系统。

第三节 测试技术的发展概况

机械工程测试技术从狭义上说是实验技术(工程)的一个主要部分。从广义上说,一般认为就是指实验技术。实验技术除机械参数测试技术外,还包含实验设计(规划),如正交设计,误差理论,模型及仿真实验技术,信号分析,数据处理,系统辨识和参数估计,预测预报等。这些内容中的每一部分,都在发展和完善。就机械参数测试技术本身的发展来说,在性能上向着高精度、大量程,高可靠性,自动化、智能化方向发展。如非接触式测量、遥测、小型一体化以及多功能、自选量程、自标定,线性化,多点多参数,编程测试等。对于传感器本身除上述发展方向外,还向新型传感器,新型半导体材料应用方向发展,如嗅觉、味觉传感器,视觉传感器等。

计算机的应用使测试技术产生革命性的变化,它和测试技术相结合产生了计算机辅助测试,即 CAT 和虚拟仪器,使测试技术和信号分析、动态数据处理向着智能化方向发展。

第四节 测试技术课的内容和要求

对高等院校机械工程各专业来说,机械工程测试技术是一门技术基础课。通过学习,培养学生能基本掌握机械量动态测试所需要的基本知识和技能,能够正确选用测试仪器和装置,较正确地测量主要的机械量。具体地说,应具备以下几方面的基本知识:

(1)掌握信号的时域及频域描述方法(富氏变换),建立信号的频谱概念。掌握测试装置静、动态特性的评价方法和不失真测试条件,掌握一、二阶系统动特性和测定方法,以便正确地选用测试仪器。

(2)通过测力、测位移了解常用传感器、中间转换器和记录仪器的工作原理和选用原则。

(3)通过测振,对动态测试的基本问题有一个完整的概念,为进一步学习和研究相关的机械工程技术问题打下基础。

对于信号处理及数据处理方面,应了解相关、功率谱概念及其应用。初步了解数字信号分析的步骤和基本方法。掌握数据的回归分析,初步了解动态时序数据的建模和基本分析的基本方法。

第二章 信号及频谱

第一节 信号分类

测试工作的第一项任务是将需要的信息(状态、运动、特征等信息)转变成易于传输、记录、分析的信号,通常是电信号。也就是说,信号是信息的载体,它包含了有用的信息。

信号可以分为静态及动态两类。前者的量值基本上不随时间变化或仅随时间作很缓慢的变化;后者则随时间而变动。

动态信号按变化规律可以分为确定性信号和随机性(不确定性)信号两类。前者如偏心旋转运动引起的振动,可以用数学关系式描述;后者如地震或环境噪声引起的震动,则无法用数学关系式描述,只能用统计方法分析。

确定性信号可以用时间历程关系式、图形等以时间作为坐标的方法来描述。但是,这种描述方法无法明确揭示信号的频率组成和大小,以及物理系统的传输特性。还需要进行频域分析,即以频率为坐标,显示其与频率对应的幅值大小,频率结构以及传输特性。因此,确定性信号常分成周期信号和非周期信号两类。前者信号按一定周期不断重复出现;后者信号呈显瞬变性。另一类信号是由多个周期信号组成,各周期信号频率间比值不是有理数(若是有理数便是周期信号),称为准周期信号。

随机信号是无法用数学关系式描述的,但可以用统计方法来分析。对随机信号按时间历程作一次长时间记录,称为样本函数。所有样本函数的集合(总体)称为随机过程。随机过程的各种平均值(均值、方差、均方差等)都是按集合平均计算的,即按某时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 做各样本函数的平均,然后再求平均。对单个样本的时间历程进行平均的称为时间平均。

随机过程可以分为平稳随机和非平稳随机。各统计特征参数

不随时间而变化的随机过程称为平稳随机过程。也就是说,其特征参数与坐标原点无关。反之,称为非平稳随机过程。在平稳随机过程中,若任一单个样本函数的时间平均统计特征等于其集合平均统计特征的称为各态遍历过程。机械工程中遇到的很多随机信号,当时间不长时,大多是平稳随机过程,其中有很多可以作为各态遍历随机过程分析。

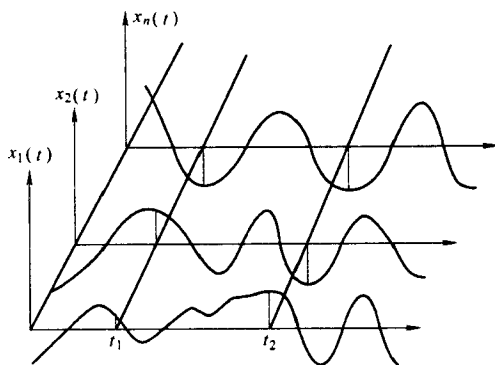


图 2-1 随机过程样本函数

确定性信号经常进行频域分析,以了解其频率结构或传输特征等。周期信号还可以通过峰值、绝对均值、有效值来了解其强度。随机信号的主要特征参数有:均值、方差、均方值;概率密度函数;自相关函数;频域的功率谱密度函数。

第二节 周期信号和离散频谱

一、周期信号频谱

周期信号是按周期 T 不断重复的信号,满足关系式

$$x(t) = x(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2-1)$$

任何周期函数 $x(t)$ 只要满足狄里赫利条件,就可以展成富氏级数,即

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)]$$

$$= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega_0 t) + \phi_n] \quad (2-2)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(n\omega_0 t) dt \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

$$\left. \begin{aligned} A_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \phi_n &= \arctan(b_n/a_n) \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

式中 a_0, a_n, b_n —— 常值分量、余弦分量、正弦分量；

A_n, ϕ_n —— 幅值、相角；

T —— 周期；

ω_0 —— 角频率, $\omega_0 = 2\pi f_0$ ；

n —— 正整数, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

由式(2-2)可以看到, 一个周期函数由基波 $A_1 \cos(\omega_0 t + \phi_1)$ 及各次谐波 $A_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n), \dots$, 常值分量 a_0 组成。以 f' 或 ω 作为横坐标, 以 A_n 或 ϕ_n 作为纵坐标所作的图形称为幅频图或相频图, 并统称为频谱图。由于 n 等于正整数, 因此, 周期函数的频谱图是离散的, 其线条出现在 $n\omega_0$ 或 nf_0 处。各次谐波的幅值随 n 增大而减少, 呈衰减趋势, 因此, 次数过高的谐波分量可以略去。

例1 三角波如图2-2所示, 求其幅频谱。

解 $x(t)$ 在一个周期中方程为

$$x(t) = \begin{cases} x_0(1 - \frac{4}{T}t) & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ x_0(1 + \frac{4}{T}t) & -\frac{T}{2} \leq t \leq 0 \end{cases}$$

由于图形上下面积相同, 因此 $a_0 = 0$, 又是偶函数, $b_n = 0$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt = \frac{4x_0}{T} \int_0^{T/2} (1 - \frac{4}{T}t) \cos n\omega_0 t dt$$

$$= \frac{8x_0}{(n\pi)^2} \sin^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

因此

$$x(t) = \frac{8x_0}{\pi^2} (\sin\omega_0 t - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega_0 t) + \dots$$

及

$$\omega_0 = 2\pi/T$$

$$A_n = \frac{8x_0}{(n\pi)^2} \sin^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

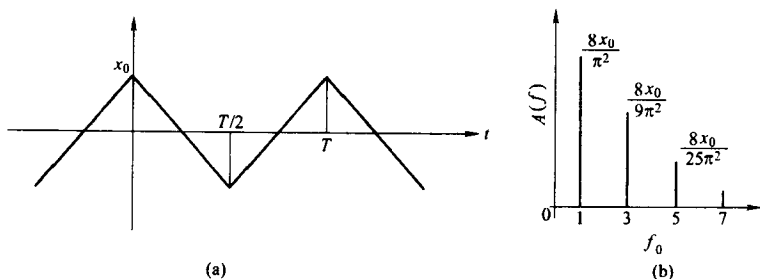


图 2-2 三角波及频谱

该三角波幅频图见图 2-2 (b)。由幅频图 $A(f)$ 可知, 是离散谱。

富氏级数还可以用复指数表示为

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2-5)$$

和

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (2-6)$$

上式与三角式的关系为

$$\left. \begin{aligned} e^{\pm j\omega t} &= \cos\omega t \pm j\sin\omega t \\ \cos\omega t &= \frac{1}{2}(e^{-j\omega t} + e^{j\omega t}) \\ \sin\omega t &= \frac{j}{2}(e^{-j\omega t} - e^{j\omega t}) \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

因此(2-2)式可改写为

$$x(t) = a_0 + \sum [C_{-n} e^{-jn\omega_0 t} + C_n e^{jn\omega_0 t}]$$

和 $C_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n); C_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n)$

又 $a_0 = C_0$, 可以得到式(2-5) 及式(2-6)。其中 C_n 与 C_{-n} 共轭, 即

$$C_{-n} = C_n^*, \phi_n = -\phi_{-n}, C_n \text{ 幅值}$$

$$\left. \begin{aligned} |C_n| &= A_n/2 = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \phi_n &= \arctan \frac{b_n}{a_n} \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

由式(2-8)可知, C_n 是 a_n 及 b_n 的复数表示式, 必然出现实数和虚数两部分, 并且出现 $-\omega$ 。见图 2-3, 它的实部是两个旋转方向相反的向量在实轴上投影之和, 而虚部则为在虚轴上投影之差, 也就是说负角频率是复数表示的结果。 A_n 为单边(侧)谱, 且 $A_n = 2|C_n|$ 。

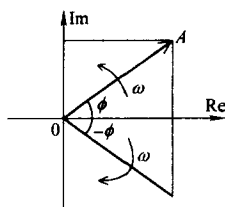


图 2-3 富氏级数
复数表示式

例 2 求图 2-4 矩形脉冲的频谱。

$$\begin{aligned} \text{解 } C_n &= \frac{1}{T} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} x_0 e^{-jn\omega_0 t} dt = \frac{x_0}{-jn\omega_0 T} (e^{-jn\omega_0 \tau/2} - e^{jn\omega_0 \tau/2}) \\ &= x_0 \frac{\tau}{T} \left(\frac{\sin n\omega_0 \tau/2}{n\omega_0 \tau/2} \right) = x_0 \frac{\tau}{T} \left(\frac{\sin n\pi \tau/T}{n\pi \tau/T} \right) \\ &= x_0 \frac{\tau}{T} S_a(n\pi \frac{\tau}{T}) \end{aligned}$$

$A_n = 2|C_n|$, 频谱图见图 2-4(b)。幅频谱的零处频率依次为 $\frac{1}{\tau}, \frac{2}{\tau} \dots$ 第一个零点的 $n\tau/T = 1$ 或 $n = T/\tau$, 表明第一个零点内有 n 个谱线。对方波来说, $\tau = \frac{T}{2}$, 这时 $C_n = \frac{x_0}{2} \left(\frac{\sin n\pi/2}{n\pi/2} \right)$ 。

$|C_n|$ 见图 2-4(c)。

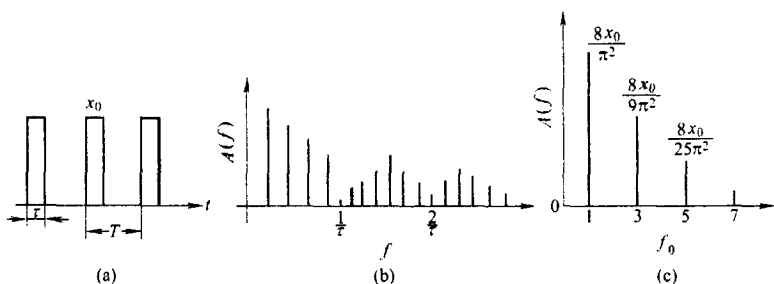


图 2-4 矩形脉冲及其频谱

二、周期信号功率谱

周期信号 $x(t)$ 在一个周期 T 内的平均功率为

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

以 $x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t}$ 代入, 得到

$$P = C_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} 2 |C_n|^2 = a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 = a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) \quad (2-9)$$

上述 P 式表明周期信号的时域平均功率等于频域各谐波分量(包含直流分量和基频分量)平均功率之和。并称为 Parseval 定理。

例 3 对于例 2 的矩形脉冲, 若 $\tau/T = \frac{1}{2}$ 时, 时域总功率(一周期内)为 $P_T = 0.5x_0^2$ 。对频域, 若取 $n = 5$, 由式(2-9)得 $P = 0.483$, 表明取 5 次谐波, 其功率已占总功率的 96.6%。因此一般取 $n = 5$ 已够了。

对于 $\tau/T = 0.2$, 时域总功率(一周期内) $P_T = 0.2x_0^2$ 。若取 $n = 5$, 由式(2-9)求得 $n = 5$ 的各谐波总功率为 $0.18x_0^2$, 因此取 $n = 5$ 时, 占总平均功率的 90%, 表明带宽内($\frac{1}{\tau}$) 包含了绝大部分功率。