

7 自动控制系统 实验技术

周 斌 倪荣庆 刘长吉 编

机械工业出版社



自动控制系统实验技术

周 斌 倪荣庆 刘长吉 编



机械工业出版社

8710110

本书介绍自动控制动态实验中的测试仪器及其分析方法。首先介绍信号发生器、示波器、信号记录仪、频率特性测试仪、相关仪、FFT分析仪,并扼要介绍模拟计算机、数字计算机及混合计算机在仿真技术中的应用。然后详细分析控制系统动态特性的时域、频域及统计测试法。书中列举了许多工程实例。

本书可供工厂、设计院、研究所中从事自动控制的工程技术人员阅读,也可作为高等工业学校的教学参考书。

自动控制系统实验技术

周 斌 倪荣庆 刘长吉 编

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 $17\frac{3}{4}$ ·字数434千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 0,001—4,800·定价4.25元

统一书号: 15033·6415

前 言

自动控制技术是当代最活跃、发展最快的学科之一。它是由控制理论、自动化技术工具和控制系统实验三部分组成。控制系统实验在自动化实践中占有十分重要的地位。由于现代工程对高速度、高精度和高度可靠性提出了十分严格的要求,这就使人们必需对工程的整个系统不仅在静态上而在动态上也有足够的了解。所以,自动控制系统实验的重点就是用现代科学的方法和仪器研究系统的动态特性和对系统进行仿真。本书在一、二、三、五、六、七章中讨论了控制系统动态特性的测试方法和原理。首先介绍了控制系统中信号的分析 and 最新的测试仪器,然后分析系统动态特性测试中常用的时域测试法、频域测试法及最新发展的统计测试法。在第四章中扼要地介绍了模拟计算机、数字计算机及混合计算机仿真技术。在介绍各种实验方法时也列举了国内外各种名牌仪器的特性和应用实例,使读者能具体了解实验系统的组成。

本书由法国科梅夫科学仪器公司倪荣庆博士、机械工业部周斌高级工程师与航天工业部刘长吉工程师编写,北京轻工业学院夏德铃教授审阅。在审阅中夏教授提出了许多宝贵意见,作者对此表示衷心感谢。同时也感谢对编写本书提供资料的单位及个人。

本书是供已有自动控制理论一定基础的工程技术人员阅读。使读者能了解控制系统的实验方法和国内外各种有关实验仪器的进展,从而知道如何装备一个实验室和采用什么仪器。本书也可作为高等及中等工业学校的教学参考书。

由于作者水平有限,错误之处在所难免,欢迎读者指正。

周 斌 倪荣庆 刘长吉
一九八五年二月

目 录

第一章 自动控制系统及其实验技术	1
§ 1-1 概 述	1
§ 1-2 控制系统实验技术的进展	2
§ 1-3 控制系统测试仪器的进展	11
第二章 信号分析及信号发生器	16
§ 2-1 信号的描述与分类	16
§ 2-2 周期信号	18
§ 2-3 非周期信号	27
§ 2-4 随机信号	35
§ 2-5 信号的FFT分析	42
§ 2-6 超低频信号发生器	50
§ 2-7 白噪声信号发生器	55
§ 2-8 伪随机信号发生器	58
第三章 示波器及信号记录仪	63
§ 3-1 概 述	66
§ 3-2 电子式示波器	66
§ 3-3 磁电式光线示波器	76
§ 3-4 磁带记录仪	83
§ 3-5 笔式记录仪	39
第四章 控制系统计算机仿真	94
§ 4-1 概 述	94
§ 4-2 模拟计算机仿真技术	97
§ 4-3 数字计算机仿真技术	110
§ 4-4 混合计算机仿真技术	158
第五章 系统动态特性的时域测试	182
§ 5-1 概 述	182
§ 5-2 阶跃响应曲线法	183
§ 5-3 脉冲响应曲线法	184
§ 5-4 系统动态特性参数的计算	186
第六章 系统动态特性的频域测试	198
§ 6-1 概 述	198
§ 6-2 控制系统频率特性测定法	198
§ 6-3 数字式超低频频率特性测试仪	206
§ 6-4 频率特性测试法应用举例	213
第七章 系统动态特性的统计测试	224
§ 7-1 概 述	224
§ 7-2 伪随机信号辨识系统	225
§ 7-3 相关仪	240
§ 7-4 FFT分析仪	247
§ 7-5 IN-110实时信号分析仪	259
§ 7-6 统计测试法应用举例	268
参考文献	278

第一章 自动控制系统及其实验技术

§1-1 概 述

一、控制系统

自动控制系统是能够对被控对象（装置或过程）的工作状态进行自动控制的系统，简称控制系统，或称系统。

无论什么样的自动控制系统都是由控制器与被控对象（或称被控系统）所组成。

被控对象系指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程，例如飞机、舰艇、汽车、机床、金属冶炼与化工生产过程等等。控制器系指对被控对象起控制作用的设备总体。一般它由传感器、放大器、调节器、计算机与执行机构等组成。

控制系统的配置、复杂程度以及结构均随其用途与职能而变化。如开环控制系统、闭环控制系统；恒值控制系统、随动系统、程序控制系统；模拟控制系统、数字控制系统；连续控制系统、采样控制系统、数字控制系统；集中参数系统、分布参数系统等。可见，控制系统的种类繁多，并与许多学科有关。

二、控制系统的设计

近代技术发展的一个基础是人类能设计和制造各种大型、复杂和精密的设备。这些设备均有一套控制系统，能自动地控制或调节各种机器和各种过程。

一般说来，设计一个自动控制系统，要经过如下的几个步骤：

- ① 确定任务与收集所有可能的资料；
- ② 建立数学模型；
- ③ 进行性能的数学分析，诸如 稳定性、能控性、能观测性、可辨识性、被动性、敏感性等；
- ④ 选定控制规律（或称策略），这一步亦称综合问题；
- ⑤ 进行仿真（或称模拟）实验，通常说来须借助于计算机（模拟机、数字机或混合机）；
- ⑥ 修改与调整设计，建立实际系统；
- ⑦ 调整与试运行。

按上述步骤其流程图如图1-1所示。

当然，上述的这七个步骤不是截然分开、一成不变的，而是相互交叉组成统一整体。一个控制系统的设计，不仅依靠控制系统工程师，而且还需要数学家与各方面专业人员的密切合作，方能奏效。为了设计，我们需要分析与综合；为了分析与综合，我们需要数学模型。然而，如何才能建立起数学模型呢？这是设计中的一个关键问题。目前，建立数学模型有三条途径：

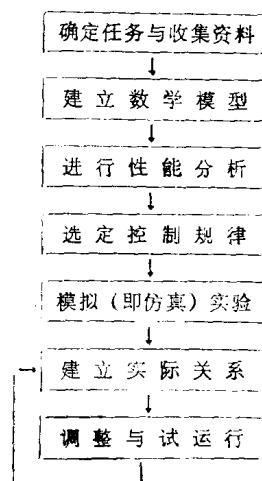


图1-1 控制系统设计的流程图

8710110

1. 理论推演方法

在控制系统中,有些对象的数学模型(传递函数或状态方程等)可依据某些物理定律较为准确地推导计算出来,例如根据力学定律可以建立各类飞机、导弹、卫星与宇宙飞船等的数学模型。但这种方法只限于极少数系统,即使有些系统的数学模型能推导,但参数也不能确定。

2. 实验方法

有些控制对象的数学模型是难以推导计算出来的,例如化工控制过程,只有靠人为的试验与记录,或者大量的观察与记录,取得数据,然后进行统计处理方能得到系统的数学模型。这种过程称之为辨识。

系统辨识需了解信号特性、合理安排实验、取得测量结果及进行数据处理等。这就是用实验方法获得可靠的数学模型。

3. 半理论、半实验的方法

这种方法就是能进行推导的部分就推导,推导不了的部分就采用实验的办法,这也是建立系统数学模型的一种切实可行的办法。

在这里我们需要强调两点。第一,数学模型的建立绝不是一挥而就的事情,是一个不断修改、不断完善的过程;第二,在建立系统数学模型的过程中,计算机是强有力的工具。

一般说来,要设计一个控制系统需要涉及三个方面的问题,即

- 1) 控制理论;
- 2) 自动化技术工具;
- 3) 控制系统实验。

控制理论是构造控制系统的理论基础,自动化技术工具是构造控制系统的物资保证,控制系统实验则是开发和研究控制系统性能必不可少的手段。

在设计系统的七个步骤中,除了第一步确定任务与收集资料外,其余六步全都与实验有关。总之,控制系统的设计离不开实验。从设计的这个角度上说,控制系统这门学科是既强调理论基础、又重视实验技术的。

由此可见,控制理论、自动化技术工具、控制系统实验,这三者构成了自动控制这门学科的基本内容。它们之间紧密联系,相互促进,推动着这门学科的飞速发展,保证它在各学科中起着领先的地位。

§1-2 控制系统实验技术的进展

一、控制系统实验的分类

控制系统实验在自动化的实践中占据十分特殊的地位,具有极其重要的意义。那么,控制系统实验究竟包含一些什么内容呢?控制系统实验包括静态实验与动态实验。

所谓静态实验,是指控制系统在静态情况下的各种性能参数的测试与调整。系统在静态情况下,输入与输出的各阶导数均等于零。通过静态实验,可得到系统的死区(失灵区)、零位、线性段、饱和段、滞后量的数值,并经过简单的计算可以得出系统的灵敏度。

所谓动态实验,是指控制系统对输入信号的响应特性以及动态参数的测试与调整。例如,过渡过程品质的测试,频率特性测试,时间常数的测试,数学仿真、半实物仿真与实物仿真

实验等等。

实验需要手段, 各种各样、不同类型的仪器仪表与设备就是实验的工具, 在设计控制系统时, 为了迅速而又正确地选择方案与参数, 使其工作稳定, 进而达到最佳, 必须对其动态特性进行实验研究。本书的内容就是介绍控制系统的动态实验。

二、控制系统实验的方法

对控制系统的动态特性进行实验研究, 若依所施加的输入信号, 主要有下述三种方法:

时域法, 频域法, 统计法。

这三种方法, 通常都是采用对系统施加一定的实验信号, 然后测量系统的输出响应。实验信号常用的有周期信号、非周期信号与随机信号等三类, 系统的响应一般用频率特性、阶跃特性与脉冲特性等三种方法描述。动态特性测量仪器就是用来产生实验信号与测量系统响应的专用仪器。

下面就来扼要地介绍一下控制系统动态特性的实验方法。

(一) 时域法

对控制系统施加时间信号, 观察系统的输出响应的实验研究方法, 为时域法。主要有两种: 阶跃响应法与脉冲响应法。

1. 阶跃响应法

当单位阶跃函数施加到系统输入端时, 引起系统的过渡过程, 称之为单位阶跃响应 (简称为阶跃响应), 见图1-2a。图1-2b所示为一工业控制过程的阶跃法测试框图。

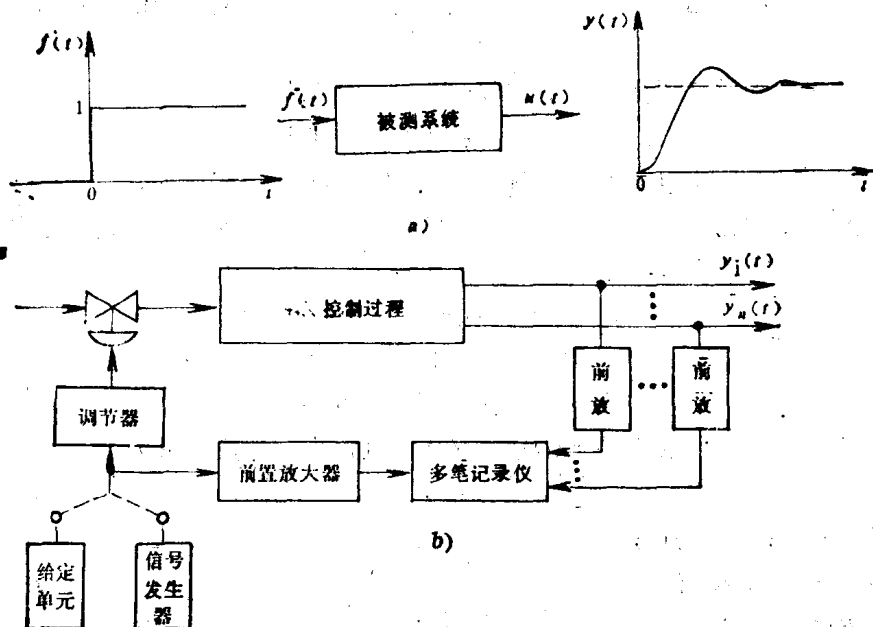


图1-2 阶跃响应及测试方法

a) 阶跃响应 b) 工业控制过程阶跃响应测试方框图

为了减小被测过程非线性的影响, 在测试时输入量与输出量一般均较小。为了提高测试精度, 往往把输入量与输出量放大, 并只记录参数偏差值的变化 (即, 将稳态值作为零点)。为此, 通常被记录的量进入多笔记录仪前加前置放大器, 有时亦可通过缩小仪表的量程以及

调整多笔记录仪表的零点来实现。

2. 脉冲响应法

所谓脉冲响应是指系统在外作用为单位脉冲函数（即 δ 函数）的作用下，引起的过渡过程。如图1-3中之宽度极窄的三角脉冲与矩形脉冲就为近似的 δ 函数。由图可见，输出参数偏离原来稳态值的程度较小，故对生产过程的影响也较小，同时产生矩形脉冲也不需附加特殊设备，因此也是现场常用的方法，但数据处理较阶跃响应复杂。

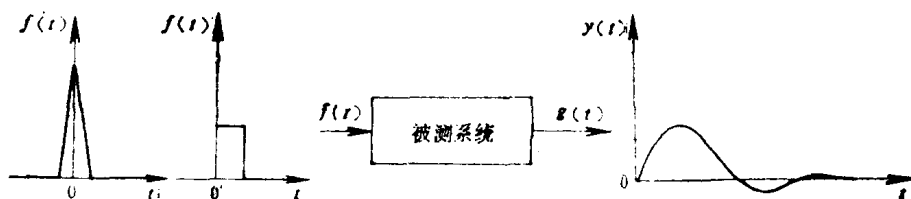


图1-3 脉冲响应及响应曲线

(二) 频域法

若令传递函数 $G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$ 之自变量 $s = j\omega$ ，则得到

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$$

$G(j\omega)$ 就是频率响应函数。

对于线性系统，当输入量是一个角频率为 ω 、幅值为 R_1 、相位为 θ_1 的正弦信号

$$x(t) = R_1 \sin(\omega t + \theta_1)$$

时，其输出量则为频率不变而幅值相位改变的正弦信号

$$y(t) = R_2 \sin(\omega t + \theta_2),$$

此时则称幅值比 $R = R_2/R_1$ 为模、相位之差值 $\theta = \theta_2 - \theta_1$ 为相位差。

若线性系统的输入为若干个不同频率的信号，其响应等于各个信号之总和，即服从于叠加原理。

$$G(j\omega) = R(\omega)e^{j\theta(\omega)} \quad \text{幅相特性；}$$

$$R(\omega) = |G(j\omega)| \quad \text{幅频特性；}$$

$$\theta(\omega) = \angle G(j\omega) \quad \text{相频特性。}$$

将极坐标形式的幅相特性 $R(\omega)e^{j\theta(\omega)}$ 转换直角坐标形式，就为

$$G(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega)$$

式中 $A(\omega)$ ——实频特性；

$B(\omega)$ ——虚频特性。

很明显， $R(\omega)$ 、 $\theta(\omega)$ 、 $A(\omega)$ 、 $B(\omega)$ 之间具有如下的关系：

$$A(\omega) = R(\omega) \cos \theta(\omega)$$

$$B(\omega) = R(\omega) \sin \theta(\omega)$$

$$R(\omega) = \sqrt{[A(\omega)]^2 + [B(\omega)]^2}$$

$$\theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{B(\omega)}{A(\omega)}$$

一般采用频率特性测试仪来测取系统的频率特性。它是以正弦信号激励（即输入）被测系统，然后测试 $R(\omega)$ 、 $\theta(\omega)$ 或 $A(\omega)$ 、 $B(\omega)$ 各值。它主要由超低频信号发生器与计算显示装置组成。超低频信号发生器产生频率与幅值可变且稳定的正弦与余弦信号，计算显示装置则用以计算并显示 $R(\omega)$ 、 $\theta(\omega)$ 或 $A(\omega)$ 、 $B(\omega)$ 。

频率特性测试仪，按其采用的计算显示装置的种类，对系统频率特性的测试方法可分为三种：

1. 直接法

以超低频信号发生器激励被测系统，由峰值电压表、相位频率计分别测取峰值电压与相角，其测试框图如图1-4所示。

2. 补偿法

超低频信号发生器输出信号激励被测系统，该信号同时由移相器移相、调幅器调幅，以输出一个与被测系统输出信号幅度相同、相位相同（或相反）的信号，用示波器或其它示零仪器作指示。由移相器与调幅器的刻度就可以确定输出信号的幅值与相位了，其测试框图如图1-5所示。

直接法与补偿法测取系统频率特性所使用的仪器结构简单，但测量精度低，使用不方便，谐波与噪声抑制能力差，因此目前应用很少。

3. 相关滤波法

采用该方法测取频率特性，系使用一种由振荡器与相关器组成的一体化、综合性测试仪器来完成。这种频率特性测试仪，利用相关技术检取出被测信号基波成分的同相分量 A 与正交分量 B ，然后转换成 $R(\omega)$ 、 $\theta(\omega)$ 或者 $\lg R(\omega)$ 、 $\lg \theta(\omega)$ 。这种方法能有效地抑制由于系统非线性产生的高次谐波、噪声与直流分量，测量精度高，使用方便；不仅可以测量线性系统，而且可以测量非线性系统的描述函数，因此目前被国内外控制界所广泛采用。

相关滤波式频率特性测试仪，主要由双相振荡器、乘法器、积分器与坐标转换器等所组成。双相振荡器产生 $\sin \omega t$ 与 $\cos \omega t$ 两种信号，以 $A_0 \sin \omega t$ 激励被测系统。被测系统的输出在乘法器中分别与 $\sin \omega t$ 及 $\cos \omega t$ 相乘，然后积分求平均，得到实部与虚部，再通过坐标转换器得到基波的幅值与相角。

相关滤波式频率特性测试仪可以通过采用模拟技术或者数字技术实现，但由于模拟电路不能达到满意的精度，故目前主要靠数字技术实现相关滤波，其框图如图1-6所示。

以数字式频率特性测试仪为基础，由小型数字机或微型机控制的一套频率特性自动测试系统示意图如图1-7所示。该测试系统可用于被测对象频率特性的多通道、自动、在线测试。图中的中央测试仪系指数字式频率特性测试仪及其附件。

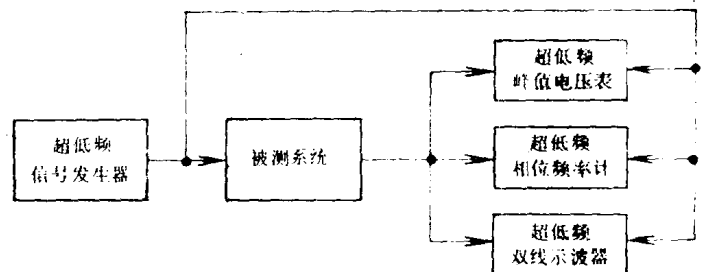


图1-4 直接法测取系统频率特性框图

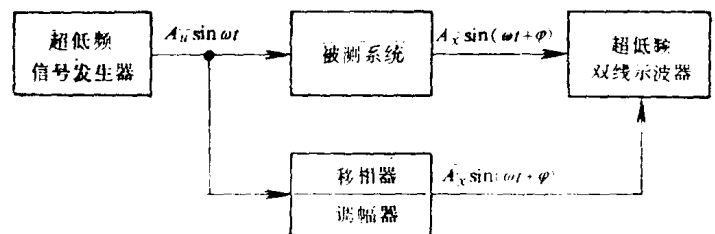


图1-5 补偿法测取系统频率特性框图

(三) 统计法

采用统计法测试控制系统动态特性的依据是随机过程的相关理论。

利用相关函数的概念可以对系统的脉冲响应函数进行测试，这是时域方法；利用谱密度的概念可以对系统的频率响应函数进行测试，这是频域方法。

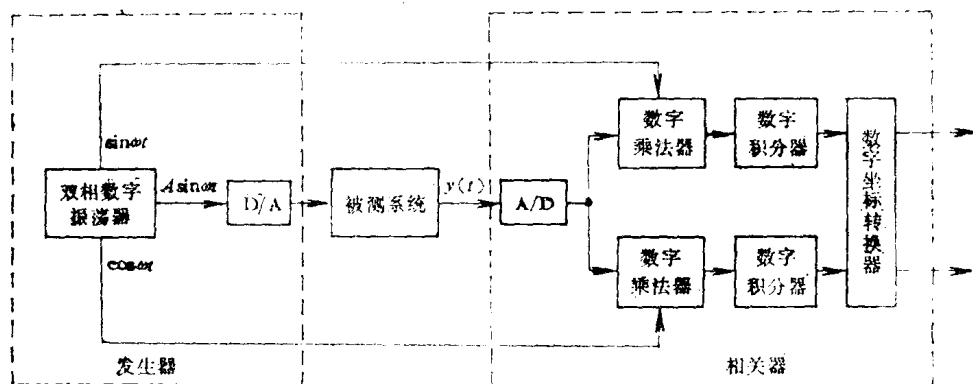


图1-6 相关滤波法测试系统频率特性的框图

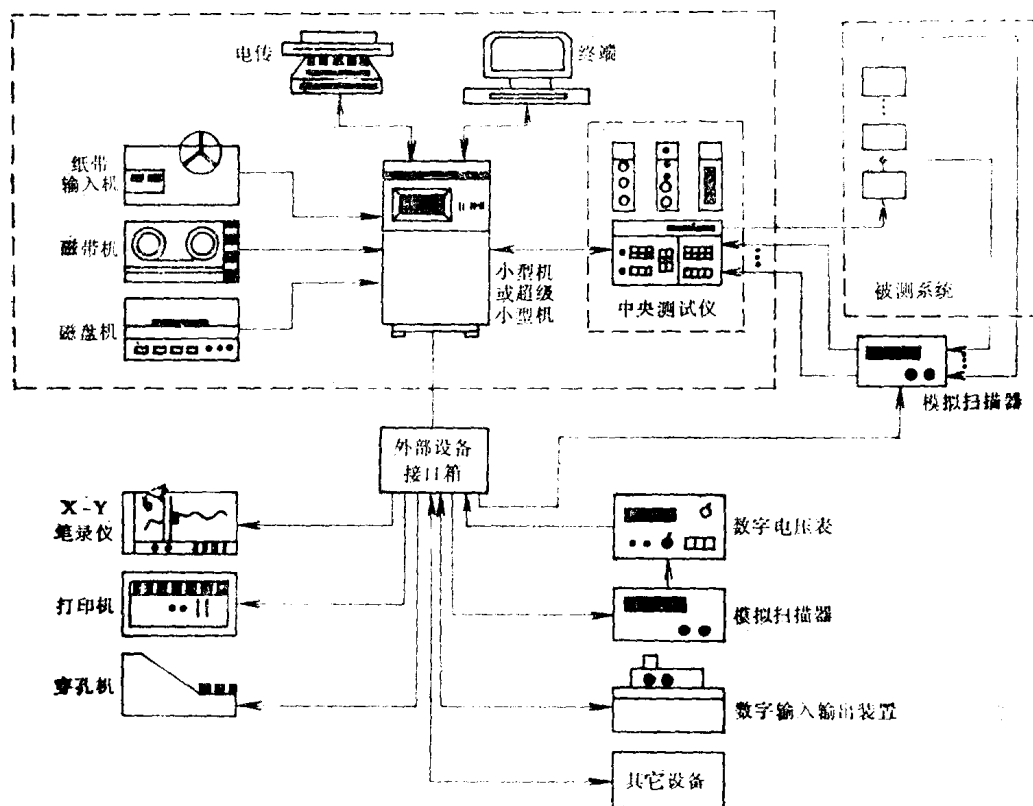


图1-7 计算机控制的频率特性自动测试系统示意图

而相关函数与谱密度为傅里叶变换对，系统的脉冲响应函数与频率响应函数亦为傅里叶变换对。

下面就系统的脉冲响应函数 $g(t)$ 与频率响应函数 $G(j\omega)$ 的实验测试方法作简要介绍。

1. 脉冲响应函数 $g(t)$

对线性系统, 若其输入 $f(t)$ 与噪声 $n(t)$ 为平稳遍历随机过程, 且两者之间在统计上不相关, $f(t)$ 加到具有脉冲响应为 $g(t)$ 的系统上, 输出 $y(t)$ 仍是随机信号, 则 $f(t)$ 与 $Y(t)$ 的互相关函数 $R_{fy}(\tau)$ 与 $g(t)$ 、自相关函数 $R_{ff}(\tau)$ 之间有如下的关系:

$$\begin{aligned} R_{fy}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(t) R_{ff}(\tau-t) dt \\ &= \int_0^{T_s} g(t) R_{ff}(\tau-t) dt \end{aligned}$$

式中 T_s 为系统的衰减时间或稳定时间。该关系式告诉我们, 把时间间隔 τ 的函数 $R_{ff}(\tau)$ 看作信号, 而 $R_{fy}(\tau)$ 就相当于输入信号 $R_{ff}(\tau)$ 通过脉冲响应滤波器所产生的输出信号。上面所说的含义可以用图1-8表示。

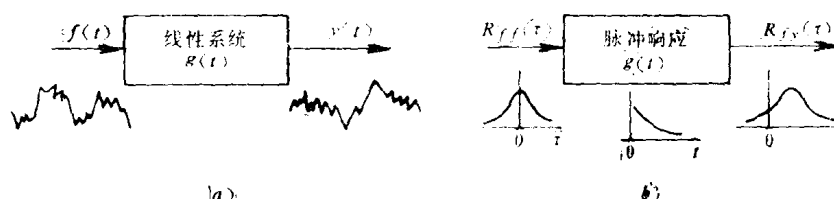


图1-8 脉冲响应函数

若能测出相关函数 $R_{fy}(\tau)$ 与 $R_{ff}(\tau)$ 来, 则通过解上述方程 (称维纳—霍普方程) 就可以得到脉冲响应函数的估计值 $g(t)$ 。这在理论上是完全可以做到的; 但在实际上, 为使实验工作简单些, 通常采用在系统输入端叠加一个特性已知的特殊实验信号 $x(t)$; 该信号系低电平、与 $f(t)$ 在统计上不相关。实用上这个 $x(t)$ 为白噪声或伪随机二进制序列。下面分别介绍白噪声及伪随机二进制序列动态实验。

(1) 利用白噪声作实验信号

白噪声是一种与其它任何信号都互不相关的噪声信号。从统计学原理可知, 白噪声的自谱密度是一常值。在测试系统的脉冲响应函数时, 采用白噪声作实验信号, 可使动态特性测试来得简单与方便。

若把白噪声 $x(t)$ 作为实验信号输入到系统, 则输入与系统输出的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 直接与脉冲响应 $g(t)$ 成正比。这样, 当白噪声为实验信号输入时, 只要测出白噪声与系统输出之间的互相关函数, 就可以知道系统脉冲响应函数 $g(t)$ 了。因此, 问题就归结为互相关函数的测试。

实验时, 白噪声信号可由白噪声发生器所产生; 或者由数字机产生, 经过有源滤波器形成模拟白噪声输入到系统中。乘法器与积分器可由模拟机的乘法器与积分器实现; 或者由相关仪完成测试; 或者由FFT分析仪来完成测试。至于时延, 或者由噪声发生器来实现, 或者由相关仪实现。可能的实验方案示于图1-9中。

这种方法较之前面所介绍的阶跃响应、频率响应实验法等有三条优点:

- ① 实验可在系统正常运转状态下进行;
- ② 在测试过程中, 可以避免不希望的噪声影响;
- ③ 若出现能量的存贮问题也不影响脉冲响应函数的测量。

但是,白噪声作为实验信号测试系统动态特性也存在着很大的困难,这主要表现在如下两个方面:

① 准确测量系统输出 $y(t)$ 与实验信号 $x(t)$ 的互相关函数,需要很长很长的积分时间,从理论上讲,需要无限长的积分时间。这会导致出现漂移与非平稳现象,影响测试精度。

② 白噪声发生器本身,由于受时间、温度、湿度或其它环境的影响,也会产生漂移或偏离所要求的特性,因此限制了它的应用。

正因为如此,人们经过努力探索,终于找到一种性能接近白噪声、但又可控制可利用的新型信号——伪随机信号。

(2) 利用伪随机信号作实验信号

利用伪随机信号作实验信号,在工程实践中采用下面一些仪器就可以实现对系统脉冲响应函数的实时在线测试:

1) 伪随机信号发生器与实时相关仪配合使用

如图1-10所示,伪随机信号发生器产生伪随机信号与延迟伪随机信号,实时相关仪就可以测出系统的脉冲响应函数来。

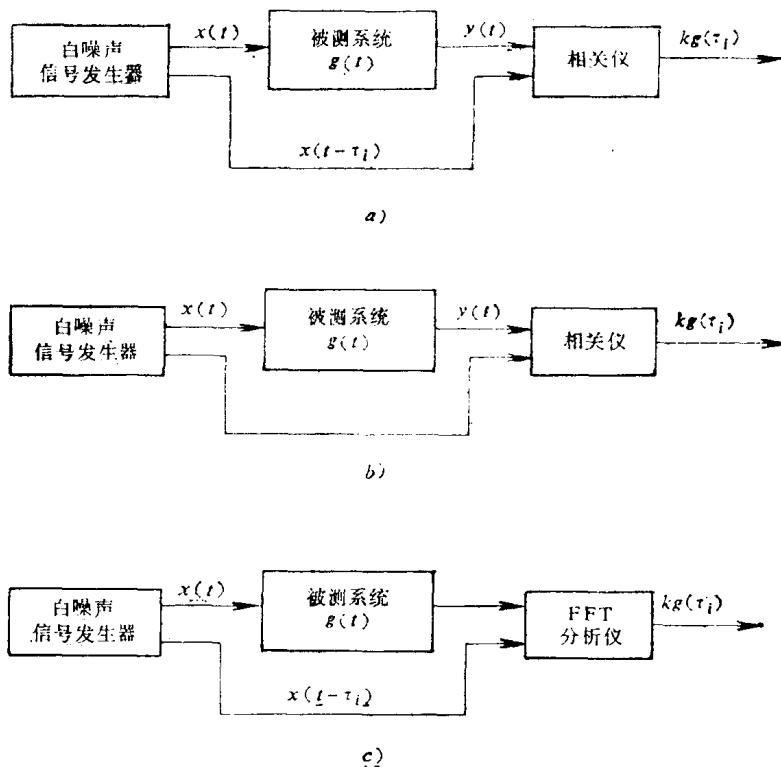


图1-9 脉冲响应函数的测试方案

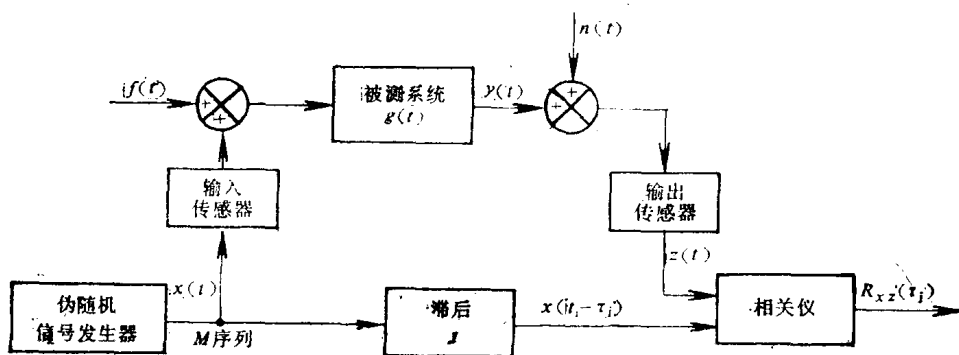


图1-10 测取系统脉冲响应的实验结构图

2) 伪随机信号相关仪

其实质系1)中两种仪器的有机结合与一体化。

3) 伪随机信号发生器与带有脉冲响应功能的FFT分析仪配合使用。

4) 自身带有伪随机信号发生器的FFT分析仪。

5) 微处理机

靠其软件与硬件配合可以实现。

2. 频率响应函数 $G(j\omega)$

根据信号分析理论,有

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)}$$

式中 $S_{yy}(\omega)$ ——输出信号的谱密度;

$S_{xx}(\omega)$ ——输入信号的谱密度;

$G(j\omega)$ ——系统的频率响应函数。

根据上面这个公式就可以测取系统的频率响应函数了,其好处是:只要正常出现的输入信号有足够宽的频谱,那么就可以只利用包含在正常运行数据的信息来估计频率响应函数了。然而,这种方法的价值却随着系统所产生噪声的增加而迅速降低。

根据信号分析理论,还有

$$G(j\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)}$$

说明利用互谱与自谱是可以得到频率响应函数的。

与脉冲响应函数 $g(t)$ 实验方法相类似,实用上实验信号可以为白噪声或伪随机二进制序列。也和上面所述理由一样,经常采用伪随机二进制序列作为实验信号。

利用统计法,采用伪随机二进制序列作实验信号,测取系统的频率响应函数则可由伪随机信号发生器、相关仪、功率谱分析仪或FFT分析仪等来实现。例如可以采取如下两种方案:

① 伪随机信号发生器、相关仪与谱分析仪配合使用测试系统的频率响应函数 $G(j\omega)$,该框图如图1-11a所示;

② 伪随机信号发生器与FFT分析仪配合使用测试系统的频率响应函数 $G(j\omega)$,该框图如图1-11b所示。

国外某些厂家新近生产的谱分析仪与FFT分析仪,本身就带(伪)随机噪声发生器,给测试带来很大方便。例如,日本小野测器推出的CF-900系列FFT分析仪(目前包括CF-920与CF-910两种仪器),就属于自身带(伪)随机噪声实验信号的仪器。用这类仪器测试系统频率响应函数的示意图如图1-12所示。

当然,谱分析仪与FFT分析仪要具有测试传递函数功能才成。

在应用统计法测试系统动态特性时,若受现场环境条件限制,或者为了要长期保存由现场所获取到的信号以供各种方式反复分析研究,使用模拟磁带机则可圆满地解决这个问题。

解决这个问题分为两步。第一步,现场记录。只需伪随机信号发生器与模拟磁带机,就能完成记录实验输入信号 $x(t)$ 与被测系统输出信号 $y(t)$ 的任务。第二步,实验室分析。将模拟磁带机在现场所录取的信号进行回放,可供小型机(或超级小型机)、微型机处理,或者供相关仪、谱分析仪、FFT分析仪等专用仪器进行分析处理,可得到系统的脉冲响应函数 $g(t)$ 与频率响应函数 $G(j\omega)$ 。

解决这个问题的过程如图1-13所示。

上面已经把控制系统的主要实验方法——时域法、频域法与统计法简要地介绍过了,在

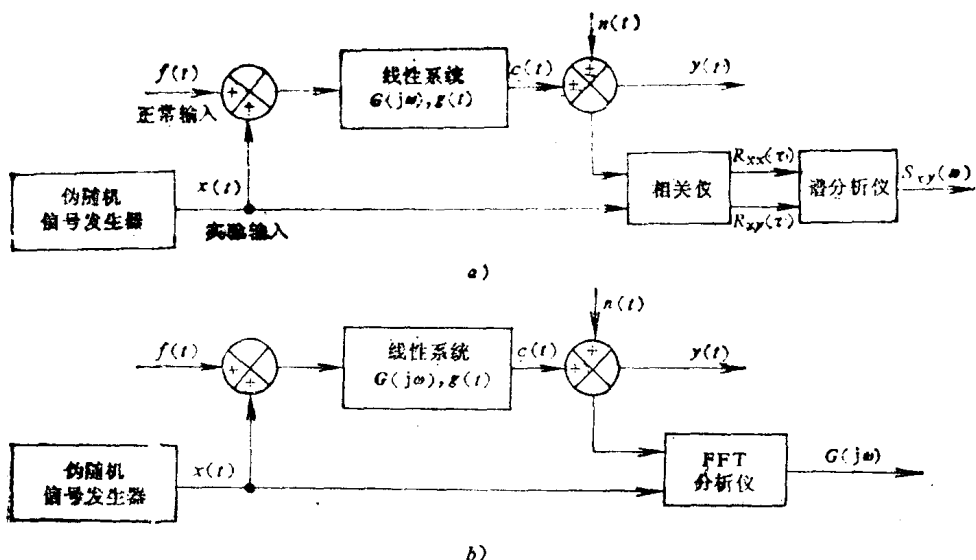


图1-11 测试系统传递函数的方法

a) 用伪随机信号发生器、相关仪与谱分析仪相配合 b) 用伪随机信号发生器与FFT分析仪相配合

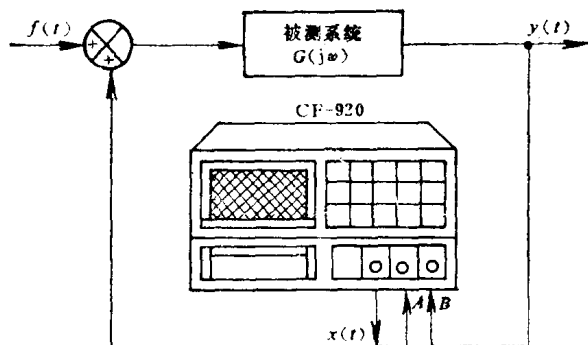
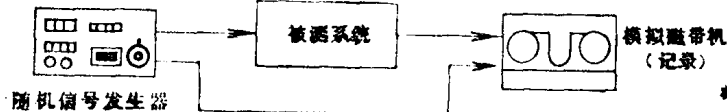
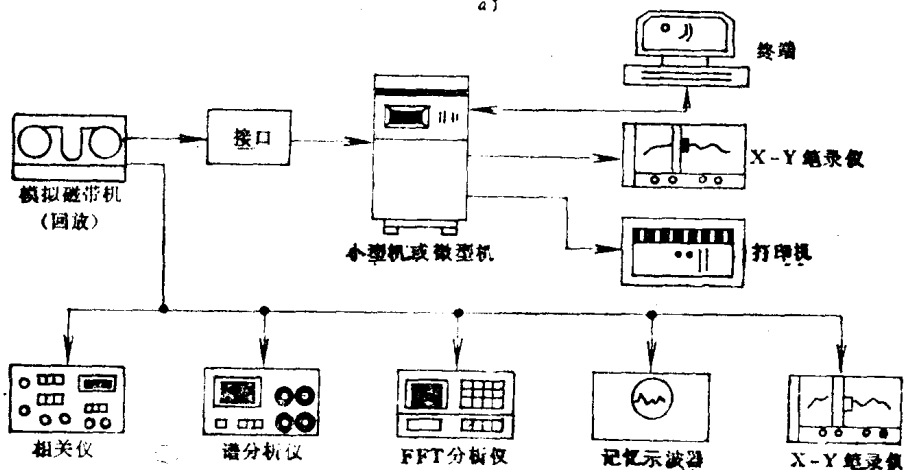


图1-12 用FFT分析仪(带伪随机噪声发生器)测试系统示意图



a)



b)

图1-13 采用模拟磁带机进行系统动态特性统计法测试示意图

a) 现场记录 b) 实验室分析

这里需要指明的是, 无论频率特性测试仪、还是相关仪、谱分析仪与FFT分析仪等这些动态分析仪器所测取到的系统阶跃响应函数 $u(t)$ 、脉冲响应函数 $g(t)$ 、频率响应函数 $G(j\omega)$, 均不过是些点(数据)或是曲线, 为系统的非参数模型。

若由系统的非参数模型得到系统的参数模型, 需要采用按估计准则形成的方法, 例如最小二乘法等, 经过计算机处理才行。

§1-3 控制系统测试仪器的进展

实验需要手段。各式各样、不同类型的仪器、仪表与设备就是实验工具。控制系统的实验, 无论静态实验, 还是动态实验, 均依控制系统类型的不同、具体实验内容的不同而采取相应不同类型的仪器、仪表与设备。在控制系统实验中所使用的仪器、仪表与设备, 我们称之为控制系统的测试仪器。

由于控制系统静态实验相对说来较为简单, 加之在动态实验时亦可得到所需之静态结果, 因此本书主要介绍控制系统动态实验时所需之测试仪器。

鉴于控制系统工作频率一般属于超低频频段, 因此超低频仪器在控制系统的实验中占有极重要地位。

现主要依测试方法简述各种动态测试仪器的进展。

一、时域法仪器的进展

控制系统时域法测试, 一般说来毋须什么专用仪器, 只要能产生一个阶跃信号加至系统输入端, 在系统的输出端有示波器、笔式记录仪等通用设备进行显示与记录就可以了。

超低频信号发生器、频率特性测试仪、电子模拟计算机、机械开关、突停台等等仪器设备均可产生阶跃信号。

二、频域法仪器的进展

目前, 控制系统频域法测试的理论、方法、手段与数据处理等各个方面都是最成熟、最完善的, 因此应用也最为广泛。

1. 直接法仪器

国际上第一套超低频成套仪器由苏联分析计算机工厂于1949年试制成功, 频率范围为 $0.01\sim 100\text{Hz}$ 。

我国于六十年代初试制成功第一套电子管超低频系列仪器, 它是由XFD-5A周期波发生器、PJD-15A相位频率计、DYD-5A双峰值电压表与WY-10A电子稳压器、WY-11补偿稳压器、WY-12交流稳压器等六件组成。频率范围为 $0.001\sim 100\text{Hz}$, 幅值测量精度为 2% , 相位测量精度为 2° 。

七十年代我国又研制成功晶体管化的全套测试仪器, 共由三台仪器组成: XD5型超低频信号发生器, 频率范围为 $0.001\sim 1000\text{Hz}$, 频率精度为 1.5% ; DS23型超低频峰值电压表, 频率范围为 $0\sim 100\text{Hz}$, 电压精度为 $0.5\sim 1\%$; PS34型超低频相位频率计, 相位精度为 $0.5^\circ\sim 1^\circ$, 周期精度为 0.02% 。这套仪器需要逐点测量与换算, 使用较麻烦, 测量精度也较低, 高次谐波与噪声抑制能力差, 因此目前很少应用。

2. 补偿法仪器

我国于六十年代研制的电子管补偿法超低频仪器, 系由XFD-8型超低频信号发生器(频

率范围为0.0005~500Hz,频率精度为2%),XYD-1型超低频移相器(频率范围为0.0005~500Hz,移相范围为0°~360°,相位精度为2°)与SBD-6型超低频双端示波器所组成。

这套仪器结构简单,但测量精度低、使用不方便、高次谐波与噪声抑制能力差,目前已很少应用。

3. 相关滤波法仪器

它是由信号发生器与分析器(相关器)所构成的一体化综合性测量系统频率特性的专用仪器。由于这种仪器对高次谐波与噪声的抑制能力较强,测量准确度较高,使用较为方便,不仅可以测试线性系统,还可以测试非线性系统的描述函数,因此目前已被广泛采用。

目前国内的典型产品为BT6型超低频频率特性测试仪(频率范围0.00001~159.9Hz,频率精度0.05%,幅值测量精度0.5%,相位测量精度0.2°)、BT-6A(较BT6之频率上限提高至479.7Hz,其余指标与BT6相同)、BT13型超低频频率特性测试仪(频率范围0.01Hz~30kHz,精度2%,幅值测量精度3%,相位测量精度3°)。

BT-6A与国产BT6M1型外信号同步器配合使用,可进行非电控制系统的测试;BT-6A与国产BB3型调制解调器配合使用,可进行交流载波系统的测试。

当前,国际上已有三十多个厂家从事超低频频率特性测试仪的研制与生产,其中以英国Solartron公司最为著名。该公司研制这类仪器已有近三十年的历史。例如:

1973年制成1170系列频率特性分析仪,该系列有三个品种,它们是1172(0.0001Hz~9.999kHz)、1177(频率范围与1172同,但无扫频与偏置功能)与1174(0.0001~999.9kHz,功能与1172同)。

1170系列可配下列插件:1180型绘迹器接口(可外接X-Y记录仪),1181型二-十进制编码器输出接口(对每个显示结果提供一个二-十进制编码输出,以实现多至50通道输入与扫描,并与电传打字机或纸带穿孔机联用),1182型发生器启动停止单元(使函数发生器在一个周期的任意点停止与启动振荡),1183A型串行非同步接口,1183B型PDP-11小型机接口,1183C型通用接口母线接口,1184型调制解调器,1185型同步器与谐波单元(自动同步外部信号的频率与相位),1187型谐波选择单元(可分析多至10次谐波),1189型缓冲器接口(使用1170可编程程序)。

以1170系列为基础、由PDP-11系列小型机控制的1191自动频率响应分析系统,可用于动态特性的多通道(多至5000个双通道)、自动、在线测试。

进入八十年代以来,Solartron公司又研制出带微处理器的1250型频率响应分析仪(频率范围为10μHz~65.5kHz),配有12501信号发生器、12502调制解调器、12503绘图仪等。

此外,英国SE公司研制出带微处理器的SE2450型频率特性测试仪(0.0001Hz~10kHz);日本NF公司研制出带微处理器的S-5720型频率响应分析仪(0.0001Hz~100kHz)。

三、统计法仪器的进展

这类仪器日趋成熟、逐步完善,尤其随着数字技术与集成电路的飞速发展,解决了原来存在的精度不高等方面的问题,它的优越性会被越来越多的人所认识,一定会在控制系统动态特性测试中发挥越来越大的作用。

1. 白噪声发生器

白噪声发生器可以产生白噪声信号,用于动态测试中的实验信号源。它问世已有三十年的历史,但由于低频白噪声产生延迟较为困难,欲获得互相关函数需很长测试时间、测试的一致