

化工自动化丛书

非线性控制系统

厉玉鸣 翁维勤 编

化学工业出版社

化工自动化丛书

非线性控制系统

厉玉鸣 翁维勤 编

化学工业出版社

内 容 提 要

《非线性控制系统》一书是《化工自动化丛书》的一个分册。全书分两篇。第一篇是非线性控制系统理论基础，主要介绍非线性系统的相平面分析方法、描述函数分析方法及其它分析方法。第二篇是非线性控制工程，主要介绍位式控制、非线性过程的非线性控制及线性过程的非线性控制。

本书第一篇由厉玉鸣同志编写，第二篇由翁维勤同志编写。全书由北京化工学院沈承林副教授审阅。

本书可供从事化工自动化和有关自动化专业工程技术人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

化工自动化丛书
非线性控制系统
厉玉鸣 翁维勤 编

责任编辑：李诵雪
封面设计：任 辉

化学工业出版社出版
(北京和平里七区) (65号)
化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₁₆ 印张9³/₁₆ 字数11.5万字 印数1—4,970

1985年10月北京第1次印刷

统一书号15005·3719 定价1.85元

编写说明

近年来，随着化学工业和自动化科学技术的迅速发展，化工自动化技术有了新的进展。以现代控制理论为基础的各种新型控制方法和调节系统相继成功地应用于化工生产；新型的自动控制技术工具以及电子计算机也日益广泛用于化工自动化领域。

为了总结交流我国化工生产应用自动化技术的经验，介绍新的调节理论和控制方法，提高从事化工自动化工作的工人和技术人员的理论和技术水平，促进化工自动化工作的发展，一九七五年，在炼油、化工自动控制设计业务建设会议上，决定由化工部炼油、化工自动控制设计技术中心站负责，组织有关院校、科研设计单位和工厂，编写一套《化工自动化丛书》。

《化工自动化丛书》是在普及的基础上侧重提高的一套读物，主要包括经典和现代控制理论，各类调节系统和化工单元操作控制等方面的题材。“丛书”内容力求密切反映化工应用的特点，做到理论联系实际，既阐明基本概念，作出理论分析，又叙述工程应用方法和应用实例，说明具体实施方案和现场运行经验。

《化工自动化丛书》编委会成员

- 主任委员 周春晖 (浙江大学)
- 副主任委员 蒋慰孙 (华东化工学院)
- 万学达 (化工部化工设计公司)
- 王骥程 (浙江大学)
- 沈承林 (北京化工学院)
- 委 员 韩建勋 (天津大学)
- 庄兴稼 (抚顺石油学院)
- 李乾光 (化工部第一设计院)
- 林秋鸿 (北京燕山石油化学总公司设计院)
- 王 翼 (南开大学)
- 徐炳华 (化工部第三设计院)
- 钱积新 (化工部自动控制设计技术中心站)
- 俞金寿 (华东化工学院)
- 孙优贤 (浙江大学)
- 罗秀来 (上海炼油厂)
- 蔡鸿雄 (兰州化学工业公司石油化工厂)

前 言

在生产过程中，大量的控制系统我们都是以线性系统来处理的。线性控制理论已经成为一个完整的科学体系。但是，随着生产和科学技术的飞速发展，新的控制问题日益增多，对控制系统的质量和精度的要求也越来越高，仅使用线性控制理论已不能满足这些要求，于是人们开始注意对非线性系统进行研究。严格地说，实际的自动控制系统都是非线性的。

在实际的自动控制系统中，存在非线性的原因，除了控制系统内各组成环节不可避免的非线性特性外，还由于人们为了改善系统的动态特性，人为地引入非线性环节，因而形成了非线性控制系统。尽管目前对非线性控制系统的研究还不够深入、全面，非线性控制系统的应用也还不够广泛，但是，它却是自动控制发展的一个十分重要的侧面。随着科学技术的发展、计算机的普遍应用，非线性控制理论将会日趋成熟，非线性控制系统的应用将会越来越普遍。

本书共分两篇，第一篇是非线性控制系统理论基础。本篇着重介绍工程上分析非线性控制系统的两种主要方法：相平面分析方法与描述函数分析方法。并对非线性系统的其它分析方法，例如李雅普诺夫稳定性分析方法、波波夫稳定性分析方法及非线性系统的统计分析方法作一简单的介绍。

描述函数分析方法可以看成是线性控制理论中的频率特性法在研究非线性系统时的推广，线性理论中的很多结果，

在描述函数法中可以得到继承和运用。相平面分析方法是一种图解的方法，它可以通过图解绘制相轨迹，以研究非线性系统的运动规律。以上两种方法都比较简便，容易为一般工程技术人员所掌握，在非线性系统的分析与综合上得到了比较普遍的应用。

随着数字计算机的采用和推广，非线性控制系统的分析和综合完全可以用数字计算机去进行，在精度、速度和容量等方面实际上没有什么限制。应用计算机已经解决了大量的用一般理论分析方法所不能解决的问题，对解决非线性控制系统的设计提供了有效的工具。然而，这并不排除工程上所使用的近似方法的重要性。因为在进行系统的分析与初步设计中，所依赖的系统模型数据及有关资料往往本身就是近似的，因此通过工程上的一般方法进行分析，就可以得到比较满意的结果。而且，通过工程上的分析，可以初步了解系统的主要特征及参数的大致范围，为计算机作进一步计算与分析提供依据，使所设计的系统具有更高的精度与更好的动态性能。

本书第二篇是非线性控制工程。重点是讨论在工程上已经使用的，或具有应用价值的一些非线性控制系统。其次，对一些在试验装置或计算机上曾进行过研究的非线性控制系统，也作一些简单的介绍。通过本篇内容的介绍，以使读者对非线性控制系统的应用有一个比较全面的了解，在实际工作中起到一定指导作用。

本篇除了介绍结构简单、成本低廉且应用十分广泛的位式控制系统外，对非线性控制系统按两种情况来介绍，一种是非线性过程的非线性控制，另一种是线性过程的非线性控制。这两类非线性控制系统都是采用了非线性的控制手段。

前者多数用以补偿被控对象（过程）的非线性特性；后者多数用以提高系统的调节质量或满足对调节规律的某种特殊要求。

在当今，要使非线性控制工程得到更快地发展，除了在理论上要继续探索、寻求解决非线性系统更为简便、有效的分析方法外，更重要的是进一步解决非线性控制技术工具，使非线性控制系统在工程上付诸实现，并不断总结改进，以提高控制质量与增加经济效益。目前，微处理机的大量推广使用，为非线性控制提供了有力的技术工具。因此，可以设想，非线性控制系统，包括本书介绍的自适应控制、可变化结构控制等，将会得到越来越广泛的应用。如果本书在这方面能给读者以一点启发，我们就将十分欣慰了。

本书在编写过程中，得到了《化工自动化丛书》编委会及北京化工学院自动化教研室很多同志的大力帮助，作者在此谨向这些同志表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，从事这方面的工作不多，书中可能存在不少缺点和错误，诚恳地欢迎读者批评指正。

编者

1984年2月

目 录

第一篇 非线性控制系统理论基础

| | |
|------------------------------|----|
| 第一章 非线性控制系统概述 | 1 |
| 一、引言 | 1 |
| 二、常见非线性环节的特性 | 3 |
| 三、非线性系统的特点 | 5 |
| 四、研究非线性控制系统的方法 | 6 |
| 第二章 相平面分析方法 | 9 |
| 一、概述 | 9 |
| 二、线性二阶系统的相图 | 11 |
| 三、非线性二阶系统的相图 | 16 |
| 四、相轨迹的绘制法 | 20 |
| 1. 解析法 | 21 |
| 2. 图解法 | 24 |
| 五、由相轨迹图求取时间特性的方法 | 32 |
| 六、相平面法在系统分析、校正中的应用 | 37 |
| 1. 继电型控制系统的分析 | 37 |
| 2. 具有变增益控制系统的相平面分析 | 42 |
| 3. 二阶时间最优控制系统的相平面分析 | 45 |
| 第三章 描述函数及其分析方法 | 52 |
| 一、概述 | 52 |
| 二、典型非线性的描述函数计算 | 55 |
| 1. 继电型非线性的描述函数 | 55 |
| 2. 具有死区及饱和单值非线性环节的描述函数 | 56 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 3. 具有滞环的继电器型非线性的描述函数 | 64 |
| 4. 具有滞环、饱和与死区的非线性的描述函数 | 67 |
| 三、描述函数的实验测试 | 75 |
| 四、非线性系统的简化 | 76 |
| 五、非线性系统的描述函数分析 | 80 |
| 1. 幅相稳定判据 (奈魁斯特判据) | 81 |
| 2. 对数频率特性判据 | 90 |
| 六、双输入描述函数 | 103 |
| 七、离散非线性控制系统的近似分析 | 107 |
| 第四章 非线性系统的其它分析方法 | 118 |
| 一、李雅普诺夫稳定性分析 | 119 |
| 1. 李雅普诺夫第一方法 | 119 |
| 2. 李雅普诺夫第二方法 | 122 |
| 二、波波夫稳定性分析方法 | 132 |
| 三、非线性系统的统计分析方法 | 138 |

第二篇 非线性控制工程

| | |
|--------------------------------|------------|
| 第一章 位式控制 | 145 |
| 一、位式控制 | 145 |
| 1. 位式控制的应用及类型 | 145 |
| 2. 位式控制的调节过程分析 | 149 |
| 3. 位式控制的局限性 | 152 |
| 二、位式控制系统的质量改进途径 | 153 |
| 1. 一般的改善控制质量的方法 | 153 |
| 2. 控制作用的改进 | 157 |
| 3. 带模型反馈的位式控制 | 164 |
| 三、时间最优的Bang-Bang控制 | 170 |
| 1. Bang-Bang控制原理及开关时间的计算 | 170 |
| 2. Bang-Bang控制的多种形式 | 192 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 第二章 非线性过程的非线性控制 | 209 |
| 一、过程非线性的一般补偿途径 | 209 |
| 1. 控制过程非线性的补偿 | 210 |
| 2. 测量变送中非线性的处置 | 216 |
| 3. 调节阀非线性问题的讨论 | 220 |
| 二、变增益过程的非线性控制 | 227 |
| 1. 间歇反应器的线性控制 | 227 |
| 2. 间歇反应器的非线性控制 | 232 |
| 三、pH控制过程的非线性控制 | 236 |
| 1. 带不灵敏区的非线性控制 | 236 |
| 2. 自适应pH控制 | 241 |
| 3. 微处理机的应用 | 247 |
| 四、自适应控制 | 248 |
| 1. 流量适应控制 | 249 |
| 2. 增益自整定控制 | 250 |
| 第三章 线性过程的非线性控制 | 253 |
| 一、液位的非线性控制 | 253 |
| 1. 液位控制系统的动态描述 | 253 |
| 2. 带不灵敏区的非线性控制 | 257 |
| 3. 变增益的非线性控制 | 268 |
| 4. 以选择性控制实现液位的非线性控制 | 270 |
| 二、线性过程的其他非线性控制 | 276 |
| 1. 可变化结构控制的一般形式 | 276 |
| 2. 一种实际可变化结构控制器的控制效果 | 278 |
| 3. 其它形式的非线性控制 | 282 |

第一篇 非线性控制系统理论基础

第一章 非线性控制系统概述

一、引言

在构成自动控制系统的许多环节中，根据它们的静态特性不同，可以分为线性环节与非线性环节两大类。

当环节的输入输出静态特性呈现线性关系时，称为线性环节。此时环节的输出 y 与输入 x 有如下关系：

$$y = kx$$

k 为环节的放大系数，在这里， $k =$ 常数。

线性环节的输入输出特性曲线是一条直线，直线的斜率为 k ，如图 1-1 所示。

当环节的输入输出静态特性呈现非线性关系时，称为非线性环节。此时环节的输出 y 与输入 x 有如

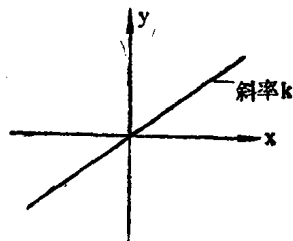


图 1-1 线性环节特性曲线

下关系：

$$y=f(x)$$

这里 $f(x)$ 表示 x 的某种非线性函数。

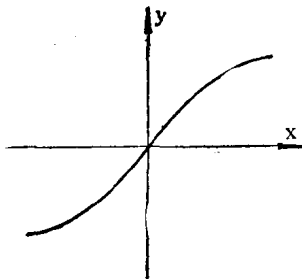


图 1-2 非线性环节特性曲线

非线性环节的输入输出特性曲线如图 1-2 所示。曲线上各点的斜率是不相同的。亦即非线性环节的静态放大系数是一个变数，或者说它的放大系数是环节输入作用的函数。

在构成自动控制系统的环节中，有一个或一个以上的环节具有非线性特性时，这样的系统便是非线性控制系统。

因为组成自动调节系统的对象、测量变送装置、调节器、调节阀等都不可避免地、或多或少地具有一定的非线性特性，所以严格地说，几乎所有实际的自动控制系统都是非线性控制系统。当控制系统中的非线性环节特性在系统工作区段内近似于线性特性时，为了研究的方便，一般可将系统近似地看成线性系统，用线性控制理论来对系统进行研究与分析。但是，当控制系统中非线性环节特性不可忽视时，若再用线性控制理论来研究与分析，往往会得出不恰当的或者完全相反的结论。这时，为了提高控制品质，研究非线性控制理论将是十分重要的。

在实际的控制系统中，除了实际存在的不可避免的非线性特性影响外，有时，为了提高系统的控制质量，人为地在系统中引进一些非线性环节。例如，在时间最优控制系统中，尽管被控过程本身可能是线性的，但是，所采用的控制

器却具有非线性特性。又譬如，变增益的控制器，在某些控制系统中，可以大大地改善系统性能，以满足生产上的某些特殊要求。

由于非线性控制系统的大量存在，更由于非线性控制系统具有线性系统所没有的许多特点，所以有必要对非线性系统加以深入的研究，以便在设计自动控制系统中，有效地克服非线性的有害影响，并充分地利用非线性改善控制系统的性能。

二、常见非线性环节的特性

图1-3列举了一些常见的典型非线性特性。

几乎所有的放大器、传热对象等都具有饱和截止特性。一般来说，这种特性对于系统的稳定性不会产生有害的影响，但对于系统在输入作用下过渡过程的形状是会有影响的。

死区又可称为不灵敏区，一般的测量变送装置、调节器、调节阀等都具有一定的死区，当死区非常小时，死区特性可近似地按线性特性处理。

间隙和滞环特性也是系统中常见的非线性特性。由于这种特性，使环节的输入与输出之间具有多值关系。输出的取值不仅取决于输入的大小，而且与输入的变化方向有关。

双位继电特性是一种典型的非线性特性。这种特性在 $x=0$ 处是不连续的，因此用简单的泰勒级数展开的方法无法进行线性化。

具有幂函数关系的非线性可用下式表示：

$$y=kx^n \quad (n \text{ 为等于 } 3 \text{ 或大于 } 3 \text{ 的奇数时})$$

$$y=kx^n \text{sig}^n \quad (n \text{ 为等于 } 2 \text{ 或大于 } 2 \text{ 的偶数时})$$

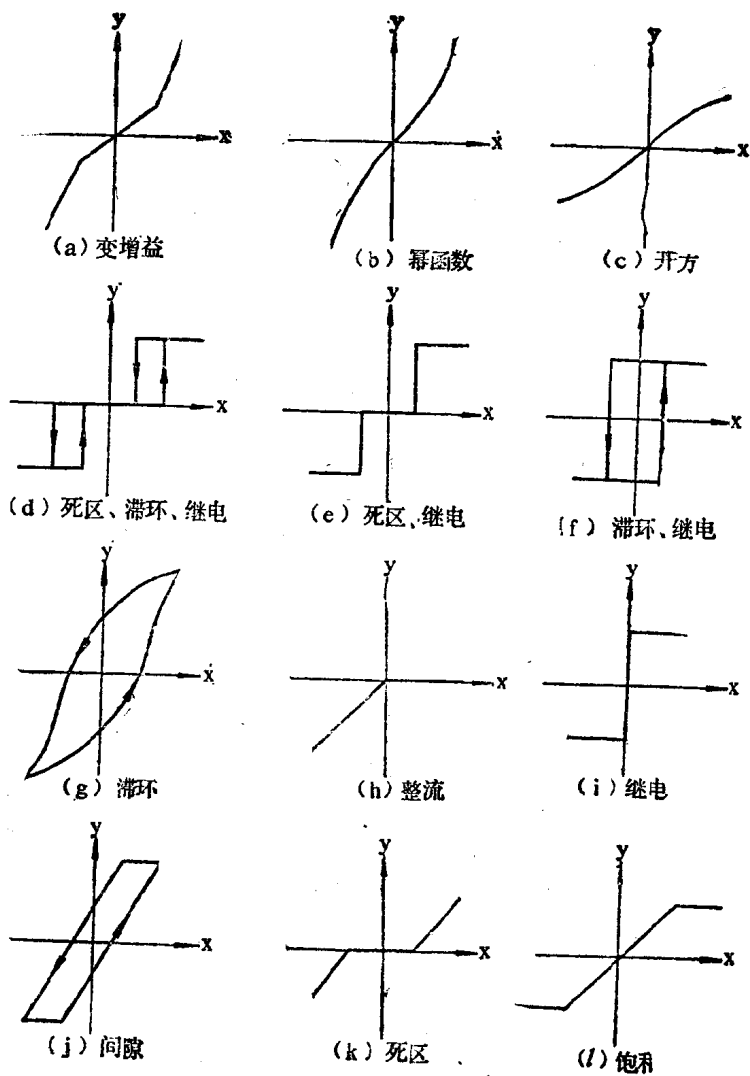


图 1-3 常见的非线性特性

仪表中的一些运算器，例如开方器，乘法器等也都是具有非线性特点的。

三、非线性系统的特点

由于非线性系统包含一个或一个以上的非线性环节，使得非线性系统有一系列区别于线性系统的特点，我们仅举一些主要的加以说明。

(1) 非线性系统的静态放大系数是变化的，而且一般来说，是输入作用幅值的函数。这是非线性系统具有的主要特点。由于这一特点，才决定了非线性系统在工作时出现的一系列区别于线性系统的情况。

(2) 非线性系统的工作状况以及稳定性，不仅取决于系统的参数，而且与输入量和初始条件有关。例如，一个非线性系统对不同幅值的阶跃输入可能具有完全不同的响应。又譬如一个非线性系统自由振荡时，其振荡的频率往往取决于振荡的幅值。图1-4(a)表示振荡幅值越大时，频率也越高。图1-4(b)表示振荡幅值越大时，频率就越低。这两种情况在非线性和控制系统中都可能遇到。另外，由于非线性系统的稳定性不仅取决于系统的参数，而且与初始条件、输入量幅值有关。因此，研究非线性系统的稳定性，比研究线性系统的稳定性要复杂得多。

(3) 非线性系统的输入作用不是周期函数时，其输出却可能是周期函数。这时输出的等幅振荡一般称为非线性系统的自持振荡或极限环振荡。非线性系统中的自持振荡与线性系统中的临界振荡有着根本的区别。线性系统中的临界振荡的幅值一般取决于初始条件，它是一种不希望的工作状况；非线性系统中的自持振荡却可能是非线性系统工作的一

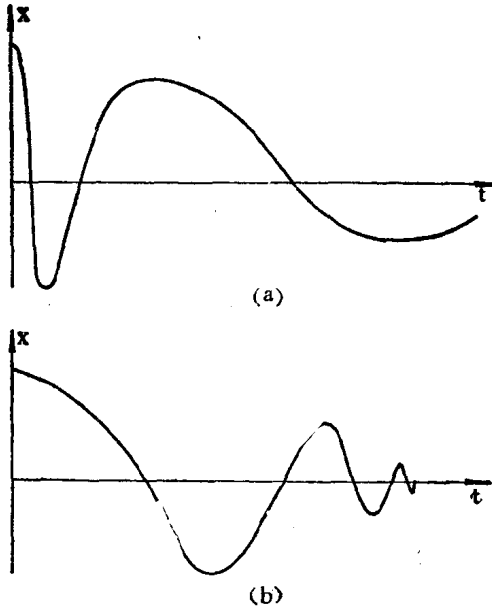


图 1-4 非线性系统自由振荡情形

种常见状态，它的幅值与系统的结构与参数有关，而一般来说，与初始条件无关。在非线性系统中，只要自持振荡的振幅与频率不超过允许的范围，那么这种自持振荡就是允许的，而且有时是不可避免的。

(4) 线性系统中经常应用的线性叠加原理，在非线性系统中不适用。这是由于非线性系统对不同幅值的输入有不同的放大系数。

(5) 当非线性系统输入正弦函数时，其输出不再是正弦函数，但却是与输入同频的周期信号。

四、研究非线性控制系统的方法

由于非线性特性的存在，给系统分析和研究带来较大的