



王丰尧 编著

滑模变 结构控制

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

滑模变结构控制

王丰尧 编著

机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

滑模变结构控制作为一种特殊的非线性控制策略, 已经开始被应用于各种控制系统中。由于它无需系统在线辨识而具有很好的鲁棒性, 并且系统的实现简单, 很适合计算机(包括微处理器)控制实践, 使系统获得优良的动态品质。全书共有八章, 以理论密切结合实际的方式编写; 深入浅出地详细介绍滑模变结构控制的基本概念及原理, 各种线性、非线性及离散系统的滑模变结构控制分析与设计; 并且对一些实际的控制应用问题, 如输出反馈系统的构成、状态检测、滑模变结构控制系统的“抖振”等问题作了概要的讨论。书中各章节均配有相应的例子, 便于理解与掌握。

本书的读者以从事电气传动自动化技术的工程技术人员为主, 但也可供高等院校有关专业的师生参考。

滑模变结构控制

王丰尧 编著

*
责任编辑: 孙流芳 版式设计: 李松山
封面设计: 姚毅 责任校对: 丁丽丽

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

三河水永和印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 11.375 字数 304 千字
1995 年 7 月北京第 1 版·1995 年 7 月北京第 1 次印刷
印数 00001—3800·定价: 16.00 元

*
ISBN 7-111-04609-9/TM·571 (G)

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

本丛书选题将随新技术发展不断扩充，凡属电气自动化领域

新技术均可作为专题撰写新书。我们也面向社会公开征稿，欢迎自列选题投稿。来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号天津电气传动设计研究所转《电气自动化新技术丛书》编辑委员会。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东

委 员：(以姓氏笔划为序)

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝瑚	许宏纲
朱稚清	夏德铃	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 浩	张敬明	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

前 言

自从由前苏联学者欧曼尔扬诺夫 (S. V. Emelyanov)、犹特金 (V. I. Utkin), 以及依特克斯 (U. Itkis) 等人于 60 年代初开始全面研究变结构控制系统 (VSS) 以来, 经历了约 30 余年的时间, 至今 VSS 已经形成了控制理论的一个分支。VSS 与常规控制系统的不同之处在于系统的“结构”可以在瞬变过程中, 根据系统当时的状态 (偏差及其各阶导数等), 以跃变方式, 有目的地变化, 迫使系统沿预定的“滑动模态”的状态轨迹运动。许多研究工作及控制实践已经证明, 由于该“滑动模态”可以设计且与控制对象的参数及扰动无关, 这就使得 VSS 具有快速响应、对参数及外扰变化不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等许多本质上的优点。因此, 近来 VSS 已受到了广泛的重视。许多成功应用的论文常可见于各种学术期刊及学术会议论文集上。

编写此书的目的是为从事控制工程的工程师和技术人员及自动控制专业人员介绍滑模变结构控制的基本原理、设计基础及在控制系统中的应用; 此书也可作为学习 VSS 的教学参考书。编写时, 作者力图避免过多的复杂的数学抽象, 简化或免除了一些定理的叙述及证明, 着重于对 VSS 概念的理解及在应用中控制策略的设计方法, 希望由此能在理论与应用之间架起桥梁。

本书共分 8 章, 内容安排如下: 第 1、2 两章主要介绍 VSS 的基本原理、概念及特点等; 第 3、4 两章分析与设计单输入线性对象的滑模变结构控制; 第 5 章着重分析一般多输入线性对象的滑模变结构控制, 并提供一些实际的设计思路; 第 6 章介绍非线性系统滑模变结构控制的分析及设计方法; 第 7 章专门介绍时间离散系统的滑模变结构控制; 第 8 章讨论滑模变结构控制的一些应用问题, 其中包括输出量反馈滑模变结构控制系统的构成、状态

检测、滑模变结构控制的“抖振”等问题，并提供几个简单而具有特色的实际应用例子，作为具体设计滑模变结构控制时的一种参考。

作者对陈伯时教授和胡慎敏教授给予本书编写的支持与推荐表示衷心的感谢。

作者

1994年8月



● 封面设计：姚毅

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前 言

第 1 章 绪论

- 1.1 控制系统的数学描述..... 1
- 1.2 状态轨迹及相轨迹..... 8
- 1.3 结构的定义..... 16
- 1.4 非连续性控制..... 18

第 2 章 滑模变结构控制的基本原理

- 2.1 开关控制与滑模变结构控制..... 21
- 2.2 滑动模态及其数学表达..... 29
- 2.3 菲力普夫理论..... 31
- 2.4 等效控制及滑模运动..... 37
- 2.5 滑模变结构控制的基本问题..... 40
- 2.6 滑模变结构控制系统的动态品质..... 45
- 2.7 滑模变结构控制的基本方法..... 51

第 3 章 单输入线性二阶对象滑模变结构控制

- 3.1 常系数二阶系统..... 56
- 3.2 变系数二阶系统..... 68
- 3.3 单输入二阶滑模变结构控制系统的设计及应用例..... 73
- 3.4 相空间中滑模存在区的讨论..... 78

第 4 章 一般单输入线性对象滑模变结构控制

- 4.1 相空间描述的对象..... 83
- 4.2 一般状态空间描述的对象..... 104
- 4.3 克服扰动的副反馈切换..... 117
- 4.4 具有纯滞后对象的滑模变结构控制..... 129

第 5 章 线性多输入对象滑模变结构控制

- 5.1 基本分析..... 143

5.2	线性多输入滑模变结构控制系统的设计基础	158
5.3	线性多输入系统的相空间耦合形式	168
第6章	非线性系统的滑模变结构控制	
6.1	单输入非线性系统滑模变结构控制的一般分析	188
6.2	多输入非线性系统滑模变结构控制	211
第7章	离散系统的滑模变结构控制	
7.1	连续系统的精确离散化	244
7.2	离散系统的滑模变结构控制的基本原理	258
7.3	离散系统滑模变结构控制的设计	270
第8章	关于滑模变结构控制应用问题的讨论	
8.1	滑模变结构控制系统的构成	277
8.2	状态观测	301
8.3	滑模变结构控制系统的“抖振”问题	313
8.4	滑模变结构控制的应用实例	335
参考文献		350

第 1 章 绪 论

滑模变结构控制是变结构控制系统 (VSS) 的一种控制策略。这种控制策略与常规控制的根本区别在于控制的不连续性, 即一种使系统“结构”随时变化的开关特性。该控制特性可以迫使系统在一定条件下沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的上下运动, 即滑动模态或“滑模”运动。这种滑动模态是可以设计的, 且与系统的参数及扰动无关。这样, 处于滑模运动的系统就具有很好的鲁棒性。滑模变结构控制可以用于多种线性及非线性系统, 构成滑模变结构控制系统。

作为本书的开端, 先提出一些分析 VSS 常用的控制对象的数学描述及状态轨迹, 然后引入“结构”的定义及控制不连续性的概念, 以作为以后各章讨论的准备。所探讨的内容仅限于确定型的集中参数系统。

1.1 控制系统的数学描述

自动控制系统通常都是反馈动态系统, 包括控制器、反馈及控制对象等, 有时把包含执行器在内的控制对象统称为广义对象。反馈量是送到控制器去的对象输出或状态的测量值, 故可以是状态反馈, 也可以是输出反馈, 或者两者兼有 (图 1-1)。控制器实际上是按控制策略, 根据反馈及系统参考输入的一种运算器, 它生成控制对象的输入, 结果使整个系统按要求的时间规律或动态、静态指标运动。图 1-1 表示控制系统的框图, v 、 u 、 y 、及 F_x 、 F_y 分别为参考输入、广义对象输入、系统输出、及状态反馈、输出反馈。

1.1.1 线性系统

对于单输入-单输出的线性定常对象可用一个高阶微分方程

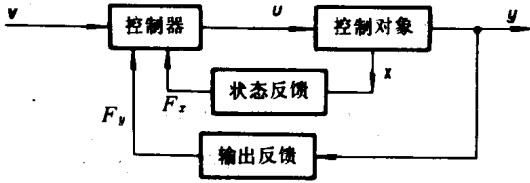


图 1-1 控制系统框图

来描述其输入输出关系：

$$y^{(n)} = - \sum_{i=1}^n a_i y^{(i-1)} + \sum_{i=1}^m b_i u^{(i-1)} \quad (1-1)$$

该式也可用传递函数表示 (图 1-2)：

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_{i=1}^m b_i s^{i-1}}{s^n + \sum_{i=1}^n a_i s^{i-1}} \quad (1-2)$$

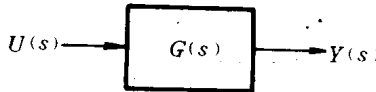


图 1-2 用传递函数表达的单输入-单输出对象结构图

如果令 $x_1 = y$, $x_2 = y^{(1)}$, \dots , $x_n = y^{(n-1)}$, 则又可写为状态空间表达式 (输出 $y = x_1$):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} x_i = x_{i+1} & (i=1, 2, \dots, n-1) \\ \frac{d}{dt} x_n = - \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^m b_i u^{(i-1)} \end{cases} \quad (1-3)$$

此时, 状态 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 也称为“相”或“相变量”。

对于一般的单输入-单输出线性对象 (图 1-3) 可写为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x = Ax + bu & x \in R^n & u \in R \\ y = cx & y \in R \end{cases} \quad (1-4)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

$$c = [c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_n]$$

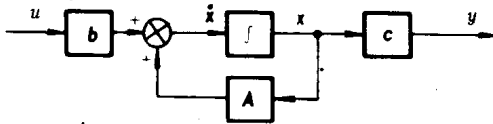


图 1-3 用状态空间表达的单输入-单输出对象结构图

对于一般的多输入-多输出对象(图 1-4), 状态空间表达式为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x = Ax + Bu, & x \in R^n & u \in R^m \\ y = Cx & y \in R^L & n \geq m \geq L \end{cases} \quad (1-5)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{L1} & c_{L2} & \cdots & c_{Ln} \end{bmatrix}$$

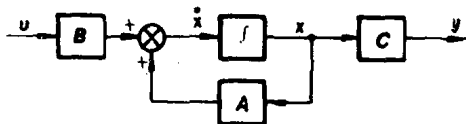


图 1-4 用状态空间表达的多输入-多输出对象结构图

当然也可写出它的传递函数矩阵

$$G(s) = C [sI - A]^{-1} B = Y(s) / U(s) \quad (1-6)$$

或

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \cdots & G_{1m}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \cdots & G_{2m}(s) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ G_{L1}(s) & G_{L2}(s) & \cdots & G_{Lm}(s) \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

式中, $G_{ij}(s)$ ($i=1, 2, \dots, L; j=1, 2, \dots, m$) 代表第 j 个输入对第 i 个输出通道的传递函数 (图 1-5)。

如果把上述表达式的系数改写为时间 t 及某些物理因素 ω 的函数, 即

$$a_i = a_i(\omega, t), \quad b_i = b_i(\omega, t), \quad a_{ij} = a_{ij}(\omega, t), \\ b_{ij} = b_{ij}(\omega, t), \quad c_i = c_i(\omega, t), \quad \dots$$

则上述各式将代表线性可变参数对象。

1.1.2 非线性系统

用高阶微分方程表达的单输入-单输出对象如下:

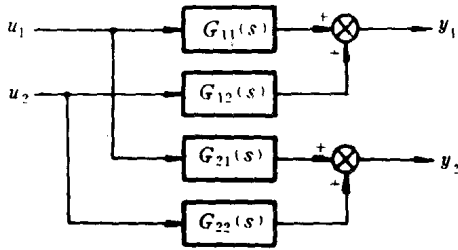


图 1-5 用传递函数表达的二输入-多输出对象结构图

$$F(y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y; u^{(m)}, u^{(m-1)}, \dots, u) = 0 \quad (1-8)$$

通常, 这种对象用状态空间描述时, 有

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) & \mathbf{x} \in R^n & \mathbf{u} \in R \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) & \mathbf{y} \in R \end{cases} \quad (1-9)$$

对于许多实际对象, 常用所谓一类仿射非线性系统 (即, 对控制量而言是线性的) 的表达式, 例如对于单输入对象 (图 1-6) 有

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) u & \mathbf{x} \in R^n & u \in R \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) & \mathbf{y} \in R \end{cases} \quad (1-10)$$

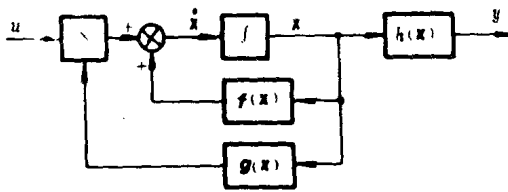


图 1-6 单输入-单输出一类仿射非线性系统结构图

对于多输入-多输出非线性对象, 相应的有

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) & \mathbf{x} \in R^n & \mathbf{u} \in R^m \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) & \mathbf{y} \in R^L & n \geq m \geq L \end{cases} \quad (1-11)$$

见图 1-7。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x) u_i & x \in R^n \\ y_j = h_j(x) & (j=1, 2, \dots, L, \quad n \geq m \geq L) \end{cases} \quad (1-12)$$

式中

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \quad h(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \\ \vdots \\ h_L(x) \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_{11}(x) & g_{12}(x) & \cdots & g_{1m}(x) \\ g_{21}(x) & g_{22}(x) & \cdots & g_{2m}(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1}(x) & g_{n2}(x) & \cdots & g_{nm}(x) \end{bmatrix}$$

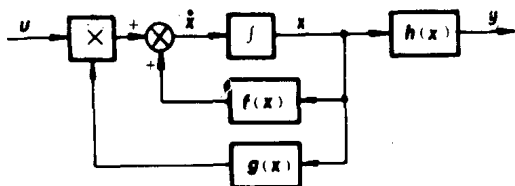


图 1-7 多输入-多输出一类仿射非线性系统结构图

许多控制问题的常规求解，是决定一种控制函数，使系统按要求的输出或性能指标运动。在采用反馈控制策略时，对于线性系统取状态反馈 $u = Kx$ ， K 为状态反馈矩阵；或者取输出反馈 $u = Qy$ ， Q 为输出反馈矩阵。对于非线性系统，通常采用非线性反馈，例如对于一类仿射非线性系统，控制 u 是状态 x 及参考输入 v 的函数，即 $u(x) = \alpha(x) + \beta(x)v$ 。

1.1.3 自治系统，平衡点及偏差方程

控制对象一般都是动态系统，输入变量又称为控制变量。当不加输入变量时， $u=0$ ，系统处于自由运动的状态；若 $u \neq 0$ 则系