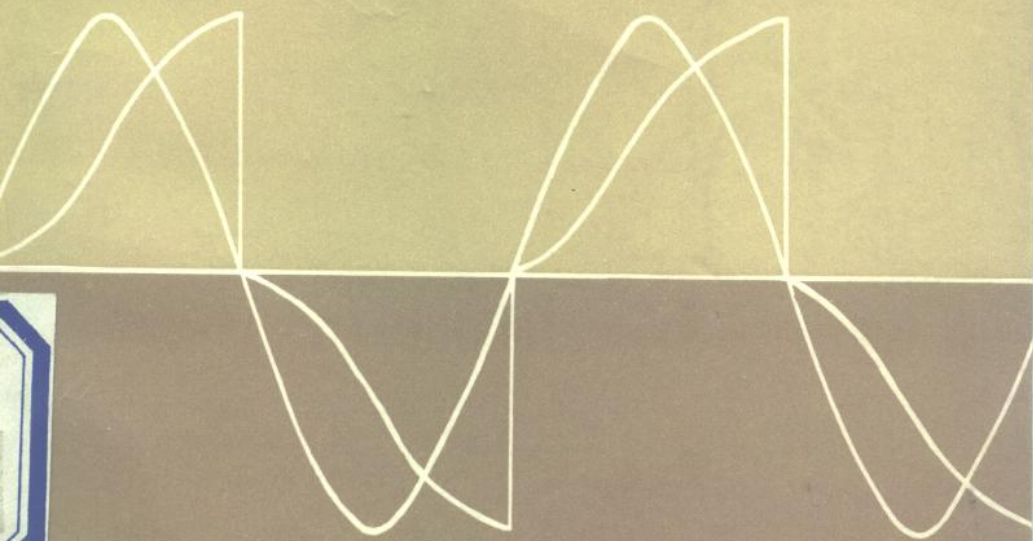


自动控制系统 非线性校正

牛景汉 颜玉崇 编著



机械工业出版社

TP 273
93

自动控制系统非线性校正

牛景汉 颜玉崇 编著



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书在扼要介绍非线性控制系统常用分析方法的基础上,着重研究了三种非线性电子调节器的构成原理和特性;讲述了线性系统非线性校正的概念和方法;接着介绍了本质上属于控制系统非线性综合范畴的变结构控制系统的基础知识;最后给出了适合于研究非线性系统的、具有模块式结构的数字仿真方法和程序。

本书主要供从事非线性控制理论应用研究和工程实践的科技人员阅读,也可供大专院校有关专业的教师、高年级学生及研究生参考。

JS45/34

自动控制系统非线性校正

牛景汉 颜玉崇 编著

*

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 冉晓华

封面设计: 肖 晴 责任校对: 熊天荣

责任印制: 路 琳

*

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)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/2}$ / 32 · 印张 $7^{1/2}$ · 字数 197 千字

1992年9月北京第1版·1992年9月北京第1次印刷

印数 0,001—1,700 · 定价 9.30元

*

ISBN 7-111-03382-5/TP·166

前 言

早在本世纪 50 年代末期,一些卓有远见的控制理论学者就注意到了非线性校正对改善控制系统性能的特殊作用。J. C. Clegg 提出的相位滞后为 38.1° 的非线性积分器工作原理,就是这一时期中取得的代表性成果之一。进入 80 年代以来,对它的研究愈来愈受到控制理论界的重视。蜚声国内外的工程控制论权威钱学森和宋健在他们的经典著作《工程控制论》(修订版)中,专门在第七章加入了有关“非线性元件的有益应用”(在控制系统中)的内容,强调了非线性元件在大幅度改善控制系统品质方面的有效性,从而有力地推动了我国的控制理论工作者在这一学术领域中的研究工作的开展。

考虑到迄今国内还未见较系统地完整地论述控制系统非线性校正的专著,我们结合对 30 多年来这一学术分支发展的历史和现状的了解和在完成福建省自然科学基金赞助项目“自动控制系统非线性调节器”时所进行的研究工作,写成了这本书,以期本书能为我国在这一学术领域中进行的研究工作,起到添砖加瓦和推波助澜的作用。

本书的第一章至第五章的编著工作由牛景汉完成,第六章由颜玉崇完成。

在本书的写作过程中,我们自始至终得到了东南大学自动控制系史维教授的鼓励和支持。他还仔细审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的意见。在此我们对他表示由衷的感谢。

本书的出版得到了福建省自然科学基金会、福州大学科研处和电气系的领导的大力支持,对此我们深表谢意。

由于编著者水平有限,书中难免存在疏漏和错误之处,恳望广大读者不吝赐教,谢谢。

编著者 1992 年 1 月
于福州大学怡园

目 录

前言	
绪论	1
第一章 描述函数法	4
一、引言	4
二、常见非线性特性及其电子模拟电路	6
三、描述函数的定义和求法	12
四、用描述函数法分析非线性系统的稳定性	21
五、用描述函数法分析一类非线性系统的静态性能	31
六、关于描述函数法的近似性	32
第二章 相平面分析法	36
一、引言	36
二、绘制相平面图的解析方法	43
三、绘制相平面图的图解方法——等倾线法	46
四、奇点	51
五、非线性控制系统分析实例	61
六、由相轨线求时域解的问题	69
第三章 非线性电子调节器	70
一、引言	70
二、Clegg 非线性积分器 (CNI)	70
三、Karybakas 非线性积分器 (KNI)	77
四、Span Filter 超前校正网络	82
五、利用间隙非线性构成相位超前校正装置	90
六、非线性比例双积分控制器 (nPI)	95
七、非线性比例积分调节器 (nPI)	98
八、相位滞后为 27.6° 的一类非线性积分器 (IND)	100
九、对相位滞后为 27.6° 的非线性积分器的改进	107
十、一类非线性输入控制器 (NIC)	113

十一、Clegg积分器的单片微机实现	117
第四章 线性控制系统的非线性校正	130
一、引言	130
二、线性系统的非线性积分 (nI) 校正	132
三、非线性典型Ⅱ型系统的构成	135
四、线性系统的非线性比例积分 (nPI) 校正	138
五、线性系统的变阻尼控制——一种非线性反馈校正的实例	142
六、线性系统的Posicast控制	146
第五章 变结构控制的基础知识	152
一、引言	152
二、切换函数和切换线(面)	159
三、滑动模态与滑动模态上的“抖动”现象	162
四、滑动模态区和到达滑动模态区的条件	166
五、一类变结构控制器的硬件实现	169
六、变结构控制系统的品质	172
七、变结构控制的趋近律	175
八、线性定常多变量变结构控制系统的一般问题	181
九、一类变结构控制律的确定	189
十、切换超面的设计	192
十一、二次型最优变结构控制器的设计步骤	195
十二、设计实例	196
第六章 非线性控制系统的计算机仿真	200
一、引言	200
二、一阶微分方程的数值解法	201
三、线性连续系统状态方程的离散化	203
四、非线性控制系统的仿真图及计算程序	206
五、线性典型环节的仿真模型	207
六、非线性特性的仿真模型及子程序框图	210
七、非线性控制系统仿真程序	215
参考文献	231

绪 论

(一) 关于本书的名称——自动控制系统的非线性校正

众所周知,通常可把自动控制系统分为线性系统 and 非线性系统两大类。对于一个线性控制系统,为了使其满足一定品质指标的要求,可以采用线性校正方法,也可以采用非线性校正方法。当采用非线性校正方法对线性控制系统进行校正时,系统就变成非线性系统。当然,对于一个非线性控制系统,为使其满足一定品质指标的要求,也可以采用线性校正方法或非线性校正方法。

本书将局限于研究与线性控制系统的非线性校正有关的理论和方法。

(二) 关于非线性控制系统的定义

上面已经提到,当对控制系统进行非线性校正时,一般来说系统就变成了非线性系统,下面我们有必要就有关非线性系统的几种定义来简要地加以说明。

若从描述系统动态行为的数学模型来定义,可以这么说:用非线性微分方程描述的系统就称之为非线性系统。例如用下列微分方程描述的系统,就是非线性系统。

$$m\ddot{x} + f\dot{x} + kx + k'x^3 = 0 \quad (0-1)$$

$$m\ddot{x} - f(1-x^2)\dot{x} + kx = 0 \quad (0-2)$$

$$\ddot{x} + x\dot{x} + x = 0 \quad (0-3)$$

式(0-1)就是通常所说的杜芬方程,非线性项为 $(k + k'x^2)x$;式(0-2)为有名的万达波尔方程,非线性项为 $f(1 - x^2)\dot{x}$;而式(0-3)描述的非线性微分方程的非线性项则为 $x\dot{x}$ 。

另有一类描述非线性系统的微分方程,实际上是分段线性的微分方程。例如变增益系统的数学描述为

$$\begin{cases} T\ddot{e} + \dot{e} + ke = 0 & |e| > e_0 \\ T\ddot{e} + \dot{e} + kKe = 0 & |e| < e_0 \end{cases}$$

就是分段线性的微分方程。而用分段线性微分方程描述的系统，也是一类非线性系统。

若从系统的组成来定义非线性系统，也可这么说：在组成系统的各个环节中，只要其中有一个或一个以上的环节为非线性环节，那么这个系统就是非线性系统。

需要指出：从系统的组成来定义非线性系统，上述定义在一般情况下是正确的，但却未必严格。

卡吉尔 (Cargile) 在美国加州大学伯克利分校学习时，曾举

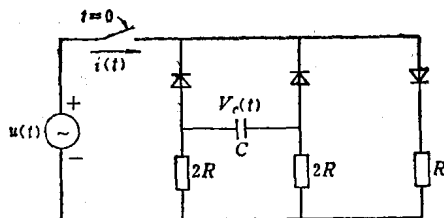


图0-1 说明非线性系统定义的电路

出图 0-1 所示的电路——可将之看成为一个系统，输入量为 $u(t)$ ，输出量为 $i(t)$ ，说明电路中虽然包含了三个非线性元件——二极管（可认为是理想的），但当电容器 C 上的初始条件 $V_c(0) = 0$ ，即为“零状态”时，在 $t > 0$ 之后，电路的输出量和输入量之间的关系

$$i(t) = \frac{1}{R} u(t)$$

为线性关系，具有线性系统的特征，因而可认为它属于线性电路（系统），而不是非线性电路（系统）。

（三）非线性的两点论

严格来说，一切自动控制系统中都含有非线性因素，如饱和、不灵敏区（死区）、继电、间隙和滞环等。这些非线性因素的存在，一方面常会恶化系统的静、动态品质，如不灵敏区非线性会增大系统的静态误差，而间隙和滞环非线性又会使系统产生不希望的自振荡等；另一方面，实际上会使采用精确方法建立起来

的控制系统的数学模型，变成非线性模型。于是，人们在对它进行分析和综合时，将不能再采用建立在叠加原理基础上的、许多有效的处理线性系统的方法。从上述两种意义上观察问题，势必会得出“非线性有害”这一片面的结论。

然而，任何事物都有它的两面性，实际上非线性因素也存在着它对控制系统会产生有利影响的一面。在“非线性有益”论的思想指导下，一些控制理论学者早就注意到，在某些场合，人为地在系统中引入非线性特性对系统进行非线性校正，不仅不会使系统的品质恶化，反而比采用常规的线性校正，能更好地改善系统的品质。

综上所述，对系统中存在的非线性因素的全 面 性 看 法 应当是：它对控制系统既存在有害影响的一面，又存在有益影响的一面。控制理论学者的工作，则是既要设法制约或缩小它对系统不利影响的一面，又要设法利用或扩大它对系统有益影响的一面。本书实际上就是一本专门研究非线性在单输入—单输出控制系统中有益应用的书。

第一章 描述函数法

一、引言

1. 非线性系统的分析方法 非线性系统的分析方法, 常用的有以下几种:

(1) 相平面法 它是一种适用于一阶和二阶非线性系统的精确的时域分析方法。求出相平面图之后, 便可知道系统在任意初始条件下的运动规律, 具有物理概念清晰的特点。

(2) 描述函数法 它适用于分析高阶非线性系统。由于它在本质上是线性系统频率响应法的有条件的推广, 因此它是一种频域分析法, 而且从原理上讲属于近似的方法。有些控制理论学者, 又将之称为谐波线性化法。

(3) 李亚普诺夫第二方法 它是在时域中分析任何非线性系统稳定性的一种有效方法, 然而由于构造复杂非线性系统的李亚普诺夫函数存在一定困难, 因此它在工程上的应用受到了限制。

本章只扼要介绍后续章节将要用到的描述函数法 (Describing Function Method) 和相平面分析法 (Phase Plane Analysis)。

2. 非线性控制系统的典型结构图 非线性控制系统的典型结构图通常都画成图 1-1 所示的型式。

这个结构图有如下几个特点:

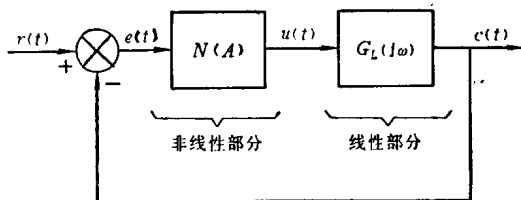


图1-1 非线性控制系统的典型结构图

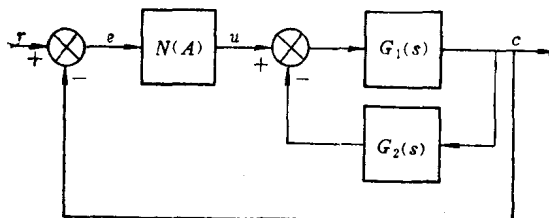
① 前向通道分成“非线性部分”和“线性部分”，且“非线性部分”在前（低功率侧）。

② 反馈通道为单位反馈。

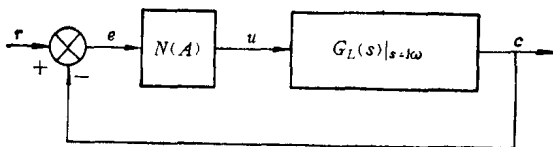
③ 线性部分的数学模型采用频率特性或传递函数表示；非线性部分的数学模型则要用下面将要定义的描述函数来表示。

当实际的非线性系统的结构图不具有图 1-1 所示的型式时，那么在采用描述函数法对其进行理论分析之前，应先利用等值变换和结构图简化的法则，将它转化为典型的结构图。例如，图 1-2 a 所示的非线性系统，可转化为图 1-2 b 所示的系统。在图 1-2 b 中，线性部分的频率特性为

$$G_L(j\omega) = \frac{G_1(j\omega)}{1 + G_1(j\omega)G_2(j\omega)}$$



a)



b)

图1-2 将非线性系统转化为典型结构图的示例（一）

a) 非典型结构图 b) 典型结构图

又例如，图 1-3 a 所示的非线性系统，可转化为图 1-3 b 所示的等值系统。在图 1-3 b 中，线性部分的频率特性为

$$G_L(j\omega) = G(j\omega)[1 + H(j\omega)]$$

但需要指出：转化后的等值系统的输出 c_1 与原系统的输出 c 是

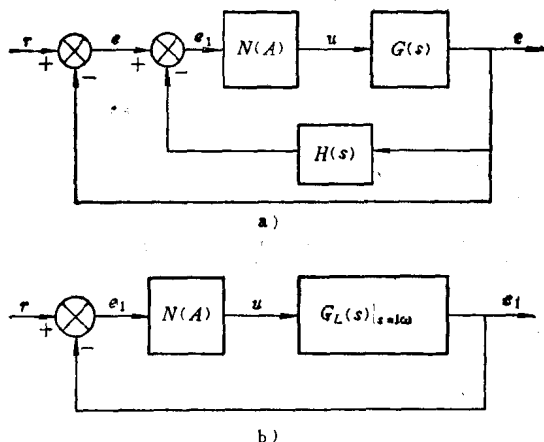


图1-3 将非线性系统转化为典型结构图的示例 (二)

a) 非典型结构图 b) 典型结构图

不一样的。

二、常见非线性特性及其电子模拟电路

为了给采用电子模拟方法研究非线性控制系统提供便利，本节在讲述常见非线性特性的同时，给出了它们的电子模拟电路。

设非线性环节（元件）的输出量为 $y(t)$ ，输入量为 $x(t)$ ，通常都采用其输入—输出特性来表征它的特性。非线性环节的输入—输出特性，写成解析表达式时，一般都用分段函数表示。而且由于常见的非线性元件内部不存在能量的积累、释放和转换过程，因此表示非线性特性的分段解析表达式都是代数方程，而不是微分方程。

1. 饱和非线性（图1-4 a） 它的电子模拟电路如图1-4 b 所示。相应的输出量为运算放大器的输出电压 u_y ，输入量为运算放大器的反相输入电压 u_x ，而饱和非线性特性的线性段的斜率为

$$K = -\frac{R_f}{R_0}$$

固定 R_0 ，改变 R_f ，可以方便地调整斜率 K 的大小。饱和非线性

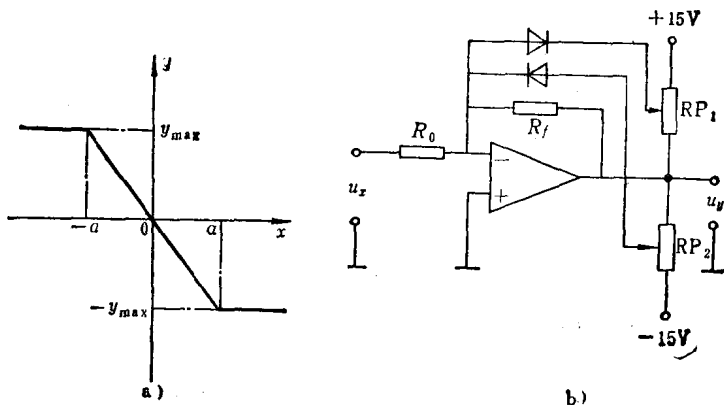


图1-4 饱和非线性特性和它的电子模拟电路

a) 饱和非线性特性 b) 电子模拟电路

特性的饱和值（限幅值），可以通过调整 RP_1 和 RP_2 的动触头进行整定。

饱和非线性的输入—输出特性（图1-4 a），可用分段函数表示为

$$y = \begin{cases} Kx & |x| \leq a \\ -y_{max} = Ka & x > a \\ y_{max} = -Ka & x < -a \end{cases}$$

2. 继电非线性（图1-5 a） 继电非线性特性，可用分段函数表示为

$$y = \begin{cases} M & x < 0 \\ -M & x > 0 \end{cases}$$

它的电子模拟电路如图 1-5 b 所示。相应的输出量为运算放大器的输出电压 u_y ，输入量为运算放大器的反相输入电压为 u_x 。继电特性的正、负限幅值 $+M$ 或 $-M$ ，可通过分别调整电位器 RP_1 和 RP_2 的动触头进行整定。

3. 死区非线性特性（图1-6 a） 死区又称为不灵敏区，即

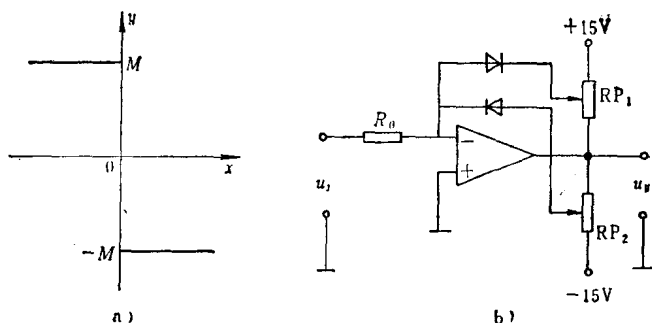


图1-5 继电非线性特性和它的电子模拟电路

a) 继电非线性特性 b) 电子模拟电路

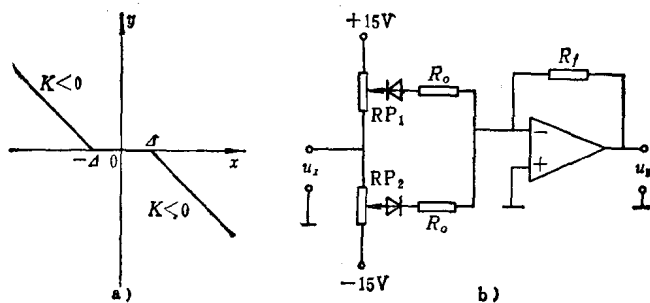


图1-6 死区非线性特性和它的电子模拟电路

a) 死区非线性特性 b) 电子模拟电路

$|x| \leq \Delta$ 的区间, 在这个区间中, 虽输入量不为零, 但输出量却始终为零。死区非线性特性, 可用分段函数表示为

$$y = \begin{cases} K(x - \Delta) & x \geq \Delta \\ 0 & |x| \leq \Delta \\ K(x + \Delta) & x \leq -\Delta \end{cases}$$

它的电子模拟电路见图 1-6 b, 输出量为 u_y , 输入量为 u_x , 死区的边界值 $+A$ 和 $-A$, 可分别通过调整电位器 RP_1 和 RP_2 的动触头加以整定。

4. 间隙非线性特性 图 1-7 a 所示间隙非线性特性, 可用分段解析表达式表示为

$$y = \begin{cases} K\left(x - \frac{h}{2}\right) & \dot{x} < 0, \left(\frac{M}{K} + \frac{h}{2}\right) \leq x \leq \left(-\frac{M}{K} + \frac{h}{2}\right) \\ M & \dot{x} < 0, \left(\frac{M}{K} - \frac{h}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{M}{K} + \frac{h}{2}\right) \\ K\left(x + \frac{h}{2}\right) & \dot{x} > 0, \left(\frac{M}{K} - \frac{h}{2}\right) \leq x \leq \left(-\frac{M}{K} - \frac{h}{2}\right) \\ -M & \dot{x} > 0, \left(-\frac{M}{K} - \frac{h}{2}\right) \leq x \leq \left(-\frac{M}{K} + \frac{h}{2}\right) \end{cases}$$

需要指出, 间隙特性倾斜段的斜率 $K < 0$ 。它的电子模拟电路则如图 1-7 b 所示。在参数 $R_2 \ll R_1$ 的情况下, 间隙特性的环宽 h 为

$$h \approx \frac{2ER_2}{R_1}$$

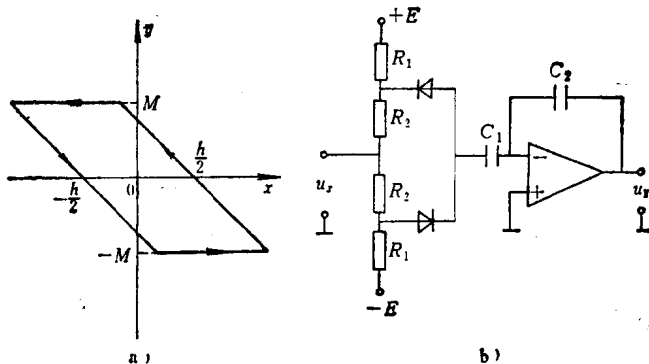


图 1-7 间隙非线性特性和它的电子模拟电路

a) 间隙非线性特性 b) 电子模拟电路

它的另一种电子模拟实现电路则见图1-8。

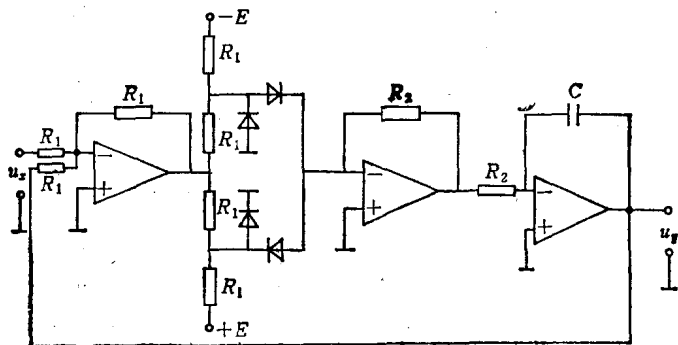


图1-8 间隙非线性特性的另一种电子模拟电路

5. 滞环—继电非线性特性 (图1-9 a) 它的电子模拟实现电路如图1-9 b 所示。调整外限幅电路的正、负电压限幅值, 可以调整环的“高度”; 调整 R_1 值 (正反馈电阻值), 则可以调整滞环的宽度。

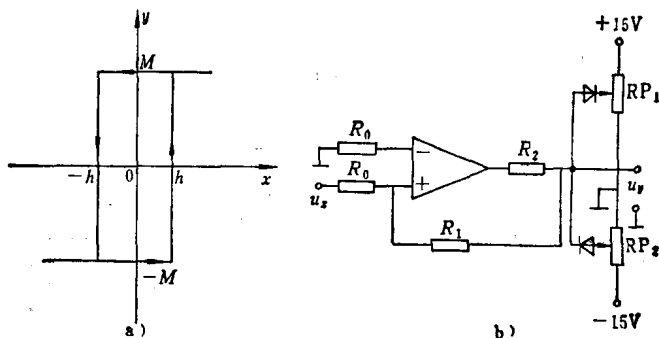


图1-9 滞环—继电非线性特性和它的电子模拟电路

a) 滞环—继电非线性特性 b) 电子模拟电路

它的分段解析表达式可以写成

$$y = \begin{cases} -M & \dot{x} > 0, \text{ 且 } x < h \\ M & x > h \\ M & \dot{x} < 0, \text{ 且 } x > -h \\ -M & x < -h \end{cases}$$

或者写为

$$y = \begin{cases} M & x > h \\ -M & x < -h \\ -M \operatorname{sgn} \dot{x} & -h < x < h \end{cases}$$

6. 死区—饱和非线性 (图1-10 a) 它的电子模拟实现电路如图1-10 b 所示, 可看成为死区非线性与饱和非线性的串联组合。

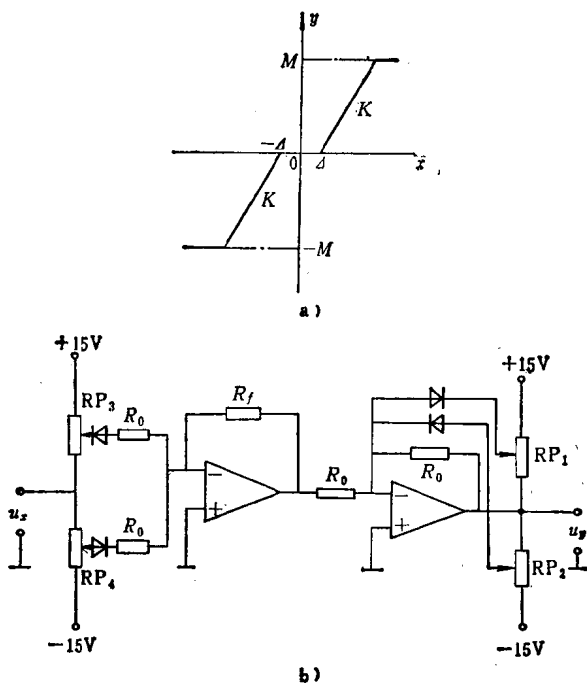


图1-10 死区—饱和非线性特性和它的电子模拟电路

a) 死区—滞环非线性特性 b) 电子模拟电路

它的分段解析表达式可以写为