自抗扰控制技术

◆韩京清

(北京前沿科学研究所,北京 100029)

摘 要:本文提出了解决控制问题的新思路:"解决控制问题是在系统运行过程中施加控制力来达到控制目的的过程的控制"的思想;介绍了如何从"发扬经典 PID 技术的精髓, 吸取现代控制理论成果, 开发利用非线性特性, 通过计算机平台上的仿真研究"中产生自抗抗控制技术的全过程; 并介绍组成自抗抗控制技术主要干技术; 跟踪微分器、扩张状态观测器、非线性反馈效应和几个有用的非线性函数。

关键词:自抗扰控制,跟踪微分器,扩张状态观测器,非线性控制,鲁棒性

Auto Disturbances Rejection Control Technique

Abstract: It is imperative to understand that a control problem is solved, or a design objective is met, by imposing control action on a dynamic process, while it operates. In this sense, the problem is about the control of a process. To this end, the paper puts forward a new paradigm: Active Disturbance Rejection Control (ADRC). Discovered and developed on a computer simulation platform, ADRC is the embodiment of the quintessence of the dominating PID technology, the fruits of decades of progress in modern control, and the deliberate cultivation of nonlinear control mechanisms. Technology wise, ADRC consists of the Tracking Differentiator, the Extended State Observer, the Nonlinear Feedback Mechanisms and some nonlinear functions, all of which have been extensively used in engineering applications.

本文简单介绍了自抗扰控制技术和它是如何从经典PID 控制技术演变出新型实用控制技术的基本想法和关键技术。自抗扰控制器 (Auto/Active Disturbances Rejection Controller, ADRC)技术,是发扬PID 控制技术的精髓并吸取现代控制理论成就,运用计算机仿真试验结果的归纳和综合中探索出来的,是不依赖于被控对象精确模型的、能够替代PID 控制技术的、新型实用数字控制技术。

一、控制理论与控制工程的脱节现象

在经典控制理论时期,发展了把对象在运行点附近的 局部动态特性——开环传递特性改造成期望的闭环传递特 性(当然也是运行点附近的局部动态特性)来实现控制目 的的理论和设计方法。

以状态变量描述为基础的现代控制系统理论是把上述局部传递特性的改造过程转化为用状态反馈实现极点配置等来改善全空间(或全局)动态特性的问题。这样,便形成了以全局动态特性的改造来实现控制目的的理论框架。既然立足于全局动态特性的改造,就得借用整个经典的和现代的动力学系统理论工具,于是,矩阵理论、微分几何理论都涌入了控制理论界,发展构筑了丰富多彩的"现代控制理论大厦"。

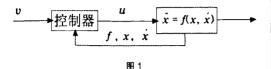
在这里,采用的主要手段是"状态反馈",要解决的 关键问题是被改造了的闭环动态特性的稳定性问题,闭 环动态稳定了才能实现控制目的,我们把这种利用全局 动态特性的改造来实现控制目的的方法称之为"全局控

作者简介:

韩京清,莫斯科大学数学力学系研究生,曾任中科院数学与系统科学研究院研究员,现为北京前沿科学研究所研究员。研究领域为控制理论及其应用,是自抗扰控制技术的创始人,正在从事自抗扰控制技术及其应用方面的研究。

制"方法。

实现控制目的的这种全局控制方法的框图表示如下 (以二阶被控对象为例):



这里的控制器需要利用决定开环动态特性的函数 f(x,x) 和状态变量 x,x 及控制目标 v(t)。

但是,这种全局控制方法需要知道关于开环动态特性 f(x,x)的先念知识和状态变量 x,x 的信息,这在许多工程 实际中是很不现实的,因为工程实际提供不了有关开环动态特性的多少先念知识,因此这种全局控制方法是很难在 实际中得到应用。

实际上,实现控制目的不一定需要事先知道开环动态 特性。例如,对于二阶对象

$$\begin{array}{l}
\ddot{x} = f(x, \dot{x}) + u \\
y = x
\end{array} \tag{1}$$

来说,要实现控制目的不一定需要知道函数 f(x,x)和状态变量 x,x。

实现控制目的主要是在控制过程中施加控制力把目标 v(t)与对象输出 y(t)之间的误差 e=v-y 衰减下去。为此,只需知道开环动态在控制过程中的具体表现量

$$a(t) = f(x(t), x(t)) \tag{2}$$

就够了,但是,根据式(1),这个表现量可以表示为

$$a(t)=x(t)-u(t) \tag{3}$$

这说明,表现量 a(t)是根据对象的输入 u(t)和输出 y(t)=x(t)可以提炼出来的。

于是对控制量 u(t)补偿过程中的表现量 a(t),取成 $u(t)=-a(t)+u_0$ (4)

那么这个控制过程的微分方程就变成完全线性的对象

$$y(t) = u_0(t) \tag{5}$$

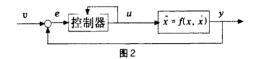
然后把控制量 u_0 再取成误差 e 及其微分的反馈,比如(也可以采用效率更高的其他反馈形式)

$$u_0(t) = -a_1e - a_2e + v(t), a_1 > 0, a_2 > 0$$
 (6) 那么闭环过程方程最后变成

$$e(t) = -a_1 e - a_2 e, a_1 > 0, a_2 > 0$$
 (7)

显然这个微分方程是稳定的,从而有 $e(t) \Rightarrow 0$,于是达到了控制的目的 $v(t) \Rightarrow v(t)$ 。

这个过程并不着眼于全局动态特性的改造, 而着眼于过程中的输入 - 输出量和控制目标的信号处理和控制目标与对象输出之间误差的"误差反馈", 因此我们把这样的控制过程称作"过程的控制"。实现这种过程控制的框图如下:



这种控制器需要的只是对象的输入 u、输出 y 和控制目标值 v,不需要开环动态的任何先念知识,因此这种控制方案是在工程实际中容易得到实现,是研发实用控制器的可行思路。

用控制形式 (4) 来把原对象方程化成系统 (5) 的 过程称作 "动态补偿线性化" 过程。这是与目前非线性控制理论中盛行的 "状态反馈线性化" 过程完全不同的线性 化过程。

实际上,如果我们把实现控制过程看做是一个过程的控制,而不把它当作全局动态特性改造的全局的控制问题,那么关键的问题是能否用输入 – 输出信号提炼出过程中的表现量 a(t),并如何提炼出 a(t)的问题。

用过程控制的观点来看,被控对象的线性非线性、时变时不变、确定性不确定性特性已不应该成为区分对象复杂度和控制易难的尺度和分类被控对象特点的分类方式。

二、PID 控制的优缺点

不用被控对象的精确模型,只用控制目标与对象实际 行为之间误差来产生消除此误差的控制策略的过程控制 思想,是 PID 留给人类的宝贵思想遗产,是 PID 控制技术的精髓。由于 PID 控制技术是立足于误差来减少误差 的过程控制原理,它才能在控制工程实践得到广泛有效 地应用。

但是,由于 PID 控制技术产生的时期,受当时科技水平的局限,它不可能采用先进数字信号处理技术来提高控制器性能,因此 PID 控制技术就带着许多"不尽人意的缺陷"步入控制工程界,出色地完成了大部分控制任务,从而占据了控制工程界的神圣统治地位。

随着科技讲步和控制品质要求的提高,经典 PID 控制

Frontier Science

技术"不尽人意的缺陷"也慢慢显露出来,这就需要开发出性能比 PID 控制器更优良的控制器来为新的高、精、尖科技领域服务。

经典 PID 控制技术究竟有什么缺陷? 概括起来就是信号处理太简单,未能充分发挥其优点。

PID 的基本结构如下:

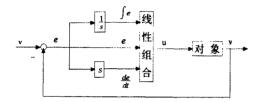


图3

从这个框图可以概括出 PID 控制技术的如下四个 方面的缺陷。

- (1)直接以 e=v-y 的方式产生原始误差不太合理。这里控制目标 v是在过程中可以"跳变",但是对象输出 y 的变化都有惯性,不可能跳变,要求让缓变的变量 y 来跟踪能够跳变的变量 v,本身就不合理。
- (2)产生误差信号 e 的微分信号 $\frac{de}{dt}$ 没有太好的办法。控制界有一个紧箍咒——微分器物理不可实现,只能近似实现:常用的近似微分器的传递函数为 $y=\frac{S}{\tau \, S+1} v_o$ 这个传递函数可展成 $y=\frac{1}{\tau} (1-\frac{1}{\tau \, S+1})v$,是近似微分公式 $y=\frac{v(t)-v(t-\tau)}{\tau}$ 的实现。但是当输入信号 v(t)被噪声 n(t)污染时,输出 y 中的近似微分 $\frac{v(t)-v(t-\tau)}{\tau}$ 信号就被放大的噪声分量 $\frac{n(t)}{\tau}$ 所掩没,无法利用。因此 PID 控制器除特殊情形之外,实际上都是 PI 控制器。
- (3)线性组合不一定是最好的组合方式。PID 控制器给出的控制量 u 是误差的现在——e(t)、误差的过去—— $\int_{o}^{t} e(\tau) d\tau$ 、误差的将来—— $\frac{de(t)}{dt}$ 三者的加权和,是这三者的线性组合。大量工程实践表明,三者的线性组合不一定是最好的组合方式,为了避免线性组合方式的缺陷就产生了花样繁多的"变增益 PID 控制器"。能否在非线性领域找到更合适的组合方式是值得探索的。
 - (4) 误差信号 e 的积分—— $\int_{0}^{\infty} e(\tau)d\tau$ 反馈的引入

有很多负作用。大量工程实践表明,误差积分反馈的引入,使闭环变得迟钝,容易产生振荡,积分饱和引起的控制量饱和等。有没有办法抛开积分反馈的负作用?

显然,上述四个方面的缺陷都是和信号处理问题相关。发扬 PID 控制技术的精髓——误差来减少误差的过程控制思想吸收现代数字信号处理技术并开发特殊非线性效应来探讨克服上述 PID 控制技术的四个方面缺陷的过程催生了新型实用数字控制技术——自抗扰控制技术。

三、克服改善 PID 控制技术缺陷办法

对上述 PID 控制技术的缺陷,我们提出如下相应的解决办法:

(1)安排过渡过程。根据控制目标和对象承受能力先安排合适的过渡过程。安排过渡过程的手法在控制工程实践中已常被采用。如,升温过程中的"升温曲线",热处理过程中的"温度曲线"等。但是,大多情形并不利用这些温度曲线的微分信号。

我们提倡的"安排过渡过程",是同时要给出过渡过程 微分信号的,用框图表示如下:

$$\begin{array}{c|c}
v(t) & & \\
\hline
v_2(t) & \\
\end{array}$$

这里 v(t)是控制目标, $v_t(t)$ 是对 v(t)安排的过渡过程, $v_t(t)$ 是过渡过程 $v_t(t)$ 的微分信号。在这个框图中的 Σ 可以是一个动态过程,也可以是一个函数发生器,是根据控制目标 v(t)和对象的能力安排的。

(2) 微分信号的提取。利用微分近似公式 $y = \frac{v(t) - v(t - \tau)}{\tau}$ 来实现微分,噪声放大效应很严重,以 至于无法利用。但是如果用微分近似公式 $y = \frac{v(t - \tau_0) - v(t - \tau_0)}{\tau_0 - \tau_0}$,就可用传递函数

$$y = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \left(\frac{1}{\tau_1 s + 1} - \frac{1}{\tau_2 s + 1} \right) v \tag{8}$$

来实现近似微分,是两个惯性环节输出之差来实现微分功能,这样能够降低噪声放大效应,是二阶动态环节来实现微分功能的。

这些微分功能的实现都是靠"尽可能快"的跟踪输入信号方式实现的,能否把"尽可能快"改变成"最快"跟踪输入

信号的方法来提炼微分信号呢?这就产生了如下"非线性跟踪微分器"。

实际上,二阶积分器串联型系统的最速反馈闭环系统为

$$\begin{cases} x_{1} = x_{2} \\ x_{2} = -r \ sign(x_{1} + \frac{x_{2}|x_{2}|}{2r}) \end{cases}$$
 (9)

对此系统按如下方式送入输入信号 v(t):

$$\begin{array}{c}
\cdot \\
x_1 = x_2 \\
\cdot \\
x_2 = -r \ sign(x_1 - v(t) + \frac{x_2|x_2|}{2r})
\end{array}$$
(10)

那么,变量 $x_1(t)$ 将在加速度 r 的限制下"最快地"跟踪输入信号 v(t), $x_2(t)$ 是 $x_1(t)$ 的微分可以当作 v(t)的微分。由于函数 -r $sign(x_1-v(t)+\frac{x_2|x_2|}{2r})$ 的 Bang-Bang 特性,当系统进入稳态时有颤振现象,为了避免这种颤振现象,适应数值计算的需求,我们对离散系统

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(K+1) = x_2(k) - ru(k), \quad |u(k)| \le r \end{cases}$$
 (11)

推导出最速综合函数 $fhan(x_1, x_2, r, h)$, 其具体表达式如下:

$$d=rh^{2}, a_{0}=hx_{2}$$

$$y=x_{1}+a_{0}$$

$$a_{1}=\sqrt{d(d+8|y|)}$$

$$a_{2}=a_{0}+sign(y)(a_{1}-d)/2$$

$$s_{y}=(sign(y+d)-sign(y-d)/2$$

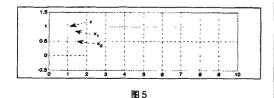
$$a=(a_{0}+y-a_{2})s_{y}+a_{2}$$

$$s_{a}=(sign(a+d)-sign(a-d))/2$$

$$fhan=-r(a/d-sign(a))s_{a}-r \ sign(a)$$

利用这个函数建立的离散最速反馈系统为

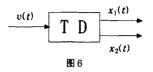
对这个系统输入常值 v=1,r=1 时的仿真结果为



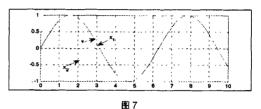
这里, x_1 快速无超调地跟上输入信号 v=1, $m \times_2$ 是跟踪过

程的微分信号。

我们把系统(13)叫做输入信号 v 的 "跟踪微分器" (Tracking Differentiator, TD), 其框图与图 4 相仿



对这个 TD 輸入时变信号 v=sin(t), 取参数 r=50 时的 仿真结果为



跟踪和微分效果都是很好的。

(3)非线性组合的应用。有了"安排过渡过程"和"跟踪微分器"手段,我们可以产生过渡过程的误差信号 (利用前面"安排过渡过程"部件生成的信号 v_1,v_2) $e_1=v_1-X_1$ 和误差微分信号 $e_2=v_2-X_2$,从而生成误差积分信号 $e_0=\int_0^1 e_1(\tau)d\tau$,并可以实现 PID 控制:

$$u=k_0e_0+k_1e_1+k_2e_2 \tag{14}$$

然而这种线性组合不一定最好。大量仿真研究表明,采用 e_0e_1,e_2 的适当非线性组合效果更好,我们通常采用的非线性组合有如下两种形式:

$$u=k_0fal(e_0,a_0,\delta)+k_1fal(e_1,a_1,\delta)+k_2fal(e_2,a_2,\delta)$$
(15)

$$u=k_0e_0+fhan(e_1,c*e_2,r,h_0)$$
 (16)

其中.

$$fal(x,a,\delta) = \begin{cases} \frac{X}{\delta^{(1-a)}}, & |x| \leq \delta\\ sign(x)|x|^a, & |x| > \delta \end{cases}$$
 (17)

而函数 $fhan(x_1, x_2, r, h_0)$ 的表达式已在式(12)给出,不过用在误差反馈时多了两个参数 c——"阻尼因子"和不同于步长 h 的"精度因子"(TD 用于信号滤波时称" h_0 为滤波因子")。

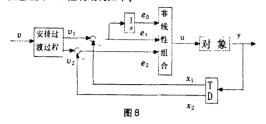
应用"非线性组合"式(15)时,一般取参数 a, 为如下范围为好:

$$a_0 < 0 < a_1 < 1 < a_2$$
 (18)

安排了过渡过程并运用 TD 来提取微分信号。就可以

Frontier Science

改造经典 PID 控制结构如下。



实际上,如果被控对象的变化不是很激烈,"安排过渡过程"和 TD 是可以合并在一起用的,这样可以简化控制器结构。

这种被改造了的新型 PID 控制器,根据各个部件的不同取法,如"安排过渡过程"的不同方式、提取微分的 TD 不同形式、各误差分量的不同"组合方式"等,可以搭配出几十种不同结构的新型 PID 控制器。

只要有"安排过渡过程"的手法和提取微分的功能,即使取了式(14)形式的线性组合,也大为改善经典 PID 控制器的性能。

特别像式(15)、(16)形式的非线性组合包含许多智能性功能,如"小误差大增益,大误差小增益"等工程实践中总结出来的经验功能,这些用非线性组合是很容易实现的。可以说非线性包含智能不为过分。因此,不是被动地对待非线性,而是主动的去开发利用特殊非线性是很有实际意义的事情。

(4) 扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO)与扰动估计补偿。前面已经提到了过程进程中的表现 $\mathbf{a}(t) = f(x_i(t), x_i(t), t)$ 的估计问题,如果对二阶被控对象

$$\begin{array}{c}
(x_1 = x_2) \\
(x_2 = f(x_1, x_2, \omega(t), t) + bu)
\end{array}$$
(19)

其中, $\omega(t)$ 是外扰作用,过程进程中的表现量

$$a(t)=f(x_1(t),x_2(t),\omega(t),t)$$
 (20)

当作未知的被扩张的状态变量

$$x_3(t) = a(t) \tag{21}$$

那么上述系统(19)变成线性系统

$$\begin{cases}
x_{1}=x_{2} \\
x_{2}=x_{3}+bu \\
x_{3}=\omega_{0}(t)
\end{cases}$$

$$(22)$$

当然,在此我们也不知道 $\omega_o(t)$ 是什么,但是这个系统已经 变成线性系统了,对此系统我们建立状态观测器

$$\begin{cases}
e=z_1-y \\
\vdots \\
z_1=z_2-\beta_{0}e \\
\vdots \\
z_2=z_3-\beta_{02}e+bu \\
\vdots \\
z_3=-\beta_{02}e
\end{cases}$$
(23)

如果函数 $f(x_1, x_2, \omega(t), t)$ 在系统输入 u(t)的作用之下,过程进程中其变化不甚激烈,那么适当选取参数 β_0 , β_∞ β_∞ , 这个状态观测器的各状态变量 $Z_i(t)$ 一般很好的跟踪原系统(22)的各状态变量 $X_i(t)$ 。尽管我们在观测器方程(23)中没有用到未知函数 $\omega_0(t)$,但是在系统运行过程中它是实实在在地起作用的,为了消除其影响,采用非线性效应,把观测器方程(23)改造成

$$e=z_{1}-y$$

$$z_{1}=z_{2}-\beta_{0}e$$

$$z_{2}=z_{3}-\beta_{0}fal(e,\frac{1}{2},h)+bu$$

$$z_{3}=-\beta_{0}fal(e,\frac{1}{4},h)$$
(24)

大量计算机仿真实验表明,这样改造以后的扩张观测器的状态变量 z(t)对系统(22)的状态变量 x(t)的跟踪效果一般很好,适应范围也很大。我们把状态观测器(23)、(24)称作系统(19)的"扩张状态观测器"。

在这里,有意思的是被扩张的状态变量

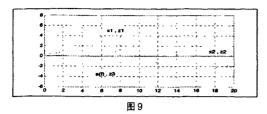
 $x_s(t) = a(t) = f(x_s(t), x_a, \omega(t), t)$ 的观测。这就是前面所述的过程中的表现量 $a(t) = f(x_s(t), x_s(t), \omega(t), t)$ 。它是作用于积分器串联型系统的各种扰动作用(包括建模、未建模动态和外扰)的总和作用,称它为"总和扰动"。有了这个总和扰动的估计,整个控制问题,就像前面过程的控制问题的论述那样,变成了简单的误差反馈问题了,如果 a(t) = const,那么对它的估计和补偿完全可以替代误差积分反馈 $-k_c e_c$ 的作用,因此可以避免误差积分反馈的副作用。

例,设有系统

$$\begin{vmatrix} a(t) = -(1+0.5\cos(t))x_1 - (1-0.5\sin(t))x_2 + sign(\sin(0.5t)) \\ \vdots \\ x_1 = x_2 \\ \vdots \\ x_2 = a(t) \\ y = x_1 \end{vmatrix}$$

这是有方波扰动的稳定对象。运用扩张状态观测器(24)用

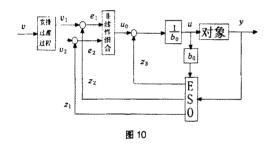
对象输出 y 来跟踪对象状态和总扰动 a(t)的仿真效果如下:



状态变量 x_1, x_2 的估计 z_1, z_2 差异几乎看不到,尽管总 扰动 a(t)含有方波分量,观测器变量 z_3 对总扰动 a(t)的估 计,只在 a(t)跳变的时刻有明显的误差,其他时刻几乎完全 跟上。

四、自抗扰控制器基本结构

用安排过渡过程、扩张状态观测器、非线性组合部件就可以装配出具有奇特功能的新型控制器——自抗扰控制器 (Auto/Active Disturbances Rejection Controller, ADRC),其框图如下:



自抗扰控制器主要由安排过渡过程、扩张状态观测器、非线性组合、扰动补偿等四个部件组合而成。在这里,扰动估计与补偿能力是很关键的一步,自抗扰的意义也就在于这个功能上。因此,凡是具有这种自动估计补偿扰动能力的控制器都可以称作"自抗扰控制器"。

除了固定的扰动补偿方式之外,其他三个部件的选取方法可以有很多不同形式,因此在这个统一结构框架之下,根据不同对象的需求,可以构造出上百种不同的自抗扰控制器。

以二阶不确定被控对象

为例,其中, $f(x_1,x_2,\omega(t),t)$ 完全未知,典型的二阶自抗扰控制

器算法如下:

安排过渡过程
$$\begin{cases} \dot{v}_{1} = v_{2} \\ v_{2} = fhan(v_{1} - v_{1}v_{2}r_{0},h) \end{cases}$$
 $e = Z_{1} - y$ $f_{e} = fal(e,0.5,h)$ $f_{e} = fal(e,0.25,h)$ 扩张状态观测器 $z_{1} = (Z_{2} - \beta_{0}e)$ $z_{2} = (Z_{3} - \beta_{\infty}fe_{1} + b_{0}u)$ $z_{3} = (-\beta_{\infty}fe_{2})$ 非线性组合 $e_{1} = v_{1} - Z_{1}$, $e_{2} = v_{2} - Z_{2}$ $e_{0} = fhan(e_{1},ce_{2},r,h_{1})$ 扰动补偿形成控制量 $e_{1} = \frac{(u_{0} - Z_{3})}{b_{0}}$

这里 r_0 , β_{01} , β_{02} , β_{03} , r_1 , c_2 , h_1 , h_2 是控制器的参数, 其中 ro是根据过渡过程快慢的需要和系统的承受能力来决定 的;参数 β_{cr} , β_{cc} , β_{cr} 是由系统所用采样步长来决 定的(不管什么样的对象,采样步长一样,都可以用 相同的 β_{cr} , β_{cc} , β_{cc})。这样, 系统中真正需要调整 的参数为控制量增益r、阻尼系数c、精度因子h和补 偿因子 b。四个了。在一般情况下,控制量增益 r 是大 到一定程度就可以,再大也几乎没有影响。因此只需 三个参数 c.h.b。需要进行调整, 这与 PID 的三个增益 差不多: l/h_i 相当于 PID 的比例增益; 阻尼因子 c 相当 于 PID 的微分增益:补偿因子 ba有点像 PID 的积分增 益,但也不很像。这里的三个参数与 PID 的三个参数有 很多相似之处,但也有很大的差别。所谓的"盆地效 应": 把保证闭环性能的 PID 参数的依赖关系比作"漏 斗效应"的话。闭环性能对自抗扰控制器参数的依赖关 系可以比作盆地效应,即保证闭环性能的自抗扰控制器 参数的适应范围很大,同时在很大范围内的参数变化对自

抗能此器参需尽地置参影能找影调参数要可",数响急制不扰比容意调中控动的闭锅大扰比容意调中控动环的。是"间制不的闭路的。控口。是"间制不的性因制口但应盆位器会性

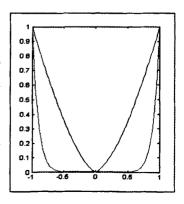


图 11

Frontier Science

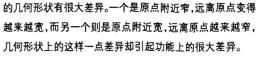
五、函数 fhan(x1,x2,r,h)

上世纪 50 年代,对二阶对象

$$\begin{cases} \cdot \\ X_1 = X_2 \\ \cdot \\ X_2 = U, \qquad |u| \le r \end{cases}$$

确定出最速开关综合函数 u=-r $sign(x_1+|x_2|x_2/2r)$ 之后,由 于它所具有的优良特性,控制工程界曾希望把它用于反馈系 统设计中(上世纪60年代末Apollo登月飞船控制中用过三 阶开关曲面),但没能找到克服 Bang-Bang 特性带来的高频 颤振现象的合适办法,一直没能在控制工程中得到推广应用。

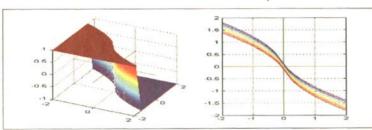
为了适应数字控制器的需要,我们在 1999 年对离散 系统(11)找出了到达原点的最速控制综合函数 fhan(e.e. r,h),其具体表达式已在式(12)给出,在这个函数中取参数 r=1,h=0.3 时的函数图像与等高线如下。



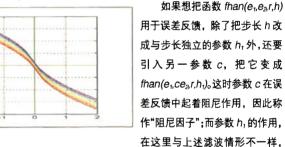
我们把函数 $fhan(e_1,e_2,r,h)$ 中的步长 h 改成与步长独 立的参数 ha,那么把它用于信号处理上,将有很多特殊的 功能。这时把参数 r 称作"快速因子", 而把参数 / 。称作"滤 波因子",用 $fhan(v_1,v_2,r,h)$ 做成跟踪微分器

$$\begin{cases} fh = fhan(\upsilon_1 - \upsilon_1\upsilon_2, r, h_0) \\ \upsilon_1 = \upsilon_1 + h\upsilon_2 \\ \upsilon_2 = \upsilon_2 + hfh \end{cases}$$

那么,对它输入信号 v(t)时(见仿真图 7), $v_i(t)$ 跟踪输入信 号 v(t), $v_2(t)$ 是 $v_1(t)$ 的微分信号, 当作输入信号 $v_2(t)$ 的微分 近似。这时参数 r 越大, $v_r(t)$ 跟踪输入信号 v(t)越快, 因此称 它为"快速因子";当输入信号被噪声污染,适当扩大参数 ha.取得很好的滤波效果,因此称它为"滤波因子"。



能否对连续系统的最速综合函数 $u=-r sign(x_1+\frac{|x_2|}{2}x_2)$ 加入取 $\pm r$ 之间值的线性段 δ ,使线性饱和函数 u=-r sat $(x_1=\frac{|x_2|}{2},\delta)$ 成为离散系统最速控制综合函数 的近似呢?大量数字仿真研究表明,这种线性饱和函数也不 能避免高频颤振的出现。线性饱和函数的图像和等高线为: 比较这两个图可知,函数 $fhan(e_1,e_2,r,h)$ 和线性饱和函



起着完全不同的作用:决定跟踪设定值的跟踪精度,因此在 此称它为"精度因子"。根据函数 $fhan(e_1,e_2,r,h)$ 的不同用途。 参数 ho和 ho的工程意义和名称也各不相同。

这个函数在控制领域中的应用是很广泛且有效的,因 此此公式的确立不能不说是对控制工程界的一大贡献。

六、打破和超越了许多传统观念

- (1)"微分器噪声放大效应严 重,不利实用"的观念已过时了,跟 踪微分器的应用效果很好:
- (2)统一处理"调节问题"和 "随动问题";
- (3)打破线性,非线性、确定
- 性,不确定性的界限,统一处理这 些对象的控制问题:

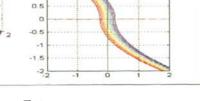


图 13

(4) 抑制扰动用不着直接

数的曲面图形形状差不多,但是取线性段的(等高线)区域

测量扰动(绝对不变性原理)或预先知道扰动模型(内

0.5

-0.5

模原理);

- (5)实现解耦控制用不着考虑动态耦合部分,只需要有静态耦合的粗略估计;
- (6)时滞系统控制不受时滞大小限制,不管时滞多大, 都变成 ADRC 结构下的参数调整问题;
 - (7)计算机仿真实验可以代替实物实验;
- (8)控制系统的分类已不是按"线性、非线性"、"时变、时不变"、"确定性、不确定性"、"单、多变量"来分类,而是按系统的"时间尺度"来分类,即具有相同的时间尺度的被控对象,是可以用同样的控制器进行控制的。时间尺度是时间常数概念对一般系统的推广。在数字控制系统中,时间尺度决定着所用采样步长,采样步长的确定了,自抗扰控制器的参数,除补偿因子 b。之外,都可以用采样步长的的函数形式表示出来。因此当对象的时间尺度确定之后,自抗扰控制器中需要调整的就是一个参数 b。了。

七、国内外已得到大量实际应用

- a.美国:NASA 空间飞行器太阳能发电稳压控制;飞机 喷气发动机控制(设计参数从 100 多个减至 5、6 个);emulater、Web-tension、ABS、计算机硬盘等的控制;
- b.日本:为 Ampere 公司解决了商用 Micro-Slide 的 纳米级别精度的位移控制问题,该公司产品化了 Peltier 温控装置(温控精度为 0.05 度,2006 年 4 月已上市);
- c.国内:在电力系统、电厂控制系统、化工系统、电机调速系统、飞行器姿态控制、精密机械加工、磁悬浮系统、运动控制、信号

处理、天文机械、军工系统等方面正在开展大量应用研究。

我们相信不久的将来在控制工程中 PID 控制技术的统治地位将被自抗扰控制技术所替代,控制工程将迎来自抗扰控制器的新时代。■

●参考文献

- [1] 韩京清,控制理论——模型论还是控制论,《系统科学与数字》, 1989.9(4)。
- [2] 韩京清, 王伟, 非线性跟踪——微分器, 《系统科学与数学》, 1994.14(2):177-183。
- [3] 韩京清,非线性 PID 控制器,《自动化学报》,1994,20(4):487-490。
- [4] 韩京清,一类不确定对象的"扩张状态观测器",《控制与决策》, 1995.10(1):85-88.
- [5] 韩京清,利用非线性特性改进PID控制律、《信息与控制》, 1995,24(6):356-363。
- [6] 韩京清,自抗扰控制器及其应用、《控制与决策》、1998、13(1):19-23。
- [7] 韩京清,控制系统的鲁棒性与 Gödel 不完备性定理,《控制理论与应用》,1999,16(增):150-155。
- [8] 韩京清.从 PID 技术到"自抗扰控制"技术、《控制工程》、2002.9(3)。
- [9] 韩京清,"最速反馈控制的不变性",《系统科学与数学》, 2005.25(4):498-506。

推荐人:毕大川

毕大川,教授,高级研究员,曾在中科院从事控制理 论研究,现任北京前沿科学研究所所长、北京金科创新 仅器有限公司董事长。1978年曾获全国科学大会重大 科技成果奖。本刊编委。

(上接第91页)

- 4. 经络生物电学说是中医哲学理论向物质理论发展的革命性突破。在经络生物电学说的基础上,本研究大胆提出了中医理论与生物电的关系,提出了统一医学观点。
- 5. 如果中医理论能够发展到统一的物质理论,中医和 西医就能够发展统一为一个医学体系。
- 6. 中医将发展成为生物电医学,同时,生物电医学也 将推动分子医学、细胞医学和器官医学的发展,因此,中医 再次成为世界主流医学是有可能的。

致 谢

非常感谢兰州大学公共卫生学院牛静平教授对资料查 询与数据统计分析的协助。■

●参考文献

- [1] 赵继军,疼痛研究的发展史与未来趋势,《上海医科大学学报》, 2000,(1)5-7。
- [2] 主編: 李忠仁,《实验针灸学》, 中国中医药出版社,2003, pp.256-260。
- [3] 宋玉华等,平衡针灸快速镇痛效果的临床观察,《针灸临床杂志》,2005,(21)11。
- [4] 魏训科,1091 例慢性疼痛治疗体会,《实用医枝杂志》,2006, (6)1916-1918。

推荐人:毕大川

毕大川、教授,高级研究员,曾在中科院从事控制理 论研究,现任北京前沿科学研究所所长、北京金科创新 仪器有限公司董事长。1978年曾获全国科学大会重大 科技成果奖。本刊编委。

自抗扰控制技术



作者: 韩京清

作者单位: 北京前沿科学研究所,北京,10029

刊名: 前沿科学

英文刊名: FRONTIER SCIENCE

年,卷(期): 2007, (1) 引用次数: 0次

参考文献(9条)

1. 韩京清. 控制理论一模型论还是控制论,《系统科学与数字》,1989,9(4).

- 2. 韩京清. 王伟, 非线性跟踪--微分器, 《系统科学与数学》, 1994, 14(2):177-183.
- 3. 韩京清. 非线性PID控制器, 《自动化学报》, 1994, 20(4): 487-490.
- 4. 韩京清, 一类不确定对象的"扩张状态观测器", 《控制与决策》, 1995, 10(1):85-88.
- 5. 韩京清, 利用非线性特性改进PID控制律, 《信息与控制》, 1995, 24(6):356-363.
- 6. 韩京清. 自抗扰控制器及其应用, 《控制与决策》, 1998, 13(1):19-23.
- 7. 韩京清, 控制系统的鲁棒性与Gode1不完备性定理, 《控制理论与应用》, 1999, 16(增):150-155.
- 8. 韩京清, 从PID技术到"自抗扰控制"技术, 《控制工程》, 2002, 9(3).
- 9. 韩京清, "最速反馈控制的不变性", 《系统科学与数学》, 2005, 25(4):498-506.

相似文献(10条)

1. 期刊论文 杨依楠. 徐进学. 王向东. YANG Yi-nan. XV Jin-xue. WANG Xiang-dong 基于扩张状态观测器的PMSLM自抗 扰控制 -机电工程2008, 25(4)

目前,在许多工业领域内,对直线交流伺服系统进给的快速性和精密性要求很高,如何准确快速地控制好直线永磁同步电动机是工作现场的重中之重.利用包含跟踪微分器、扩张状态观测器和非线性状态误差反馈(NLSEF)3部分的自抗扰技术,把直线永磁同步电动机的外扰和内扰看成是一个整体,然后对总扰动进行了动态补偿。该方法算法比较简单,跟踪速度快,辨识精度高,无超调.最后,通过Matlab仿真软件对一个特定的直线电机进行了仿真,仿真结果证明它具有强抗干扰性和强鲁棒性。

2. 期刊论文 夏卫星. 杨晓东 基于鲁棒滤波理论的最速跟踪微分器滤波特性研究 -电光与控制2010, 17(2)

为保证获得数据的实时性以及滤除数据在获取过程中存在的一系列野值干扰,对标准最速跟踪微分器进行了仿真设计,然后利用鲁棒滤波理论对最速 跟踪微分器的跟踪和抗野值功能进行了改进,并与标准最速跟踪微分器仿真结果进行了比较,表明经改进的最速跟踪微分器有更好的跟踪、抗野值干扰效 果,并将之应用于实测电罗经数据的处理过程.

3. 期刊论文 武利强. 韩京清 直线型倒立摆的自抗扰控制设计方案 -控制理论与应用2004, 21(5)

对直线型倒立摆系统,采用自抗,找控制技术来设计控制方案.对于这样的单输入双输出、强非线性、强耦合的不稳定系统,在原自抗,找控制算法的基础上,通过增加一个跟踪微分器和控制律由两个被控量的误差组合构成的方法,突破了原有的自抗,找控制算法只适用于单输入单输出系统的限制,实现了摆的偏角和小台车位移的良好控制效果,数字仿真结果证实了这种方法的有效性.

4. 学位论文 何凌云 磁悬浮系统的自抗扰控制 2006

磁浮列车的悬浮系统存在强非线性和模型不确定性,传统的控制算法大都依赖于精确的对象模型,它们在抑制磁悬浮系统某些参数摄动和某些外部 干扰方面表现出的能力有限。尤其当常导高速磁浮列车的某一悬浮点出现故障时,机械耦合作用会导致其相邻点承受很大的突变负载,这就要求控制器 具有很强的抗干扰能力。因此,研究既能克服大扰动又不依赖于系统模型的悬浮控制方法是十分有意义的。

自抗扰控制(ADRC)是一种基于扰动的控制方法,不依赖于被控对象模型,在未知强非线性和不确定强扰动作用下都能保证控制精度。目前ADRC技术主要包括跟踪、微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性反馈(NLSEF)等环节。本文基于这一控制技术,以单点悬浮系统为对象,设计了非线性PID和双环自抗扰控制方法,并给出了参数整定的一些规律。仿真结果表明,两种控制方法都具有快速性好、无超调的优点,但后者对系统外部的大扰动和内部结构参数的大摄动表现出更强的鲁棒性和适应性。另外,引入模型补偿后,双环自抗扰控制方法的抗扰动能力也有所增强。

ADRC的非线性配置和ESO的扩张状态估计与补偿都给系统闭环稳定性分析带来很大困难,理论上也并未成熟。于是本文在简化ADRC结构的基础上,以电流环为例,对其一阶ADRC进行了闭环稳定性分析。ADRC广泛采用非线性配置,是因为非线性结构比线性结构具有更强的抗扰动能力和更好的收敛性,从而以TD和ESO为基础,并引入一种新型TD,展开了滤波与微分功能的仿真对比研究,为通过间隙微分获取阻尼提供了参考。

本文最后介绍了所研制的悬浮控制硬件平台,编写了相关程序,并进行了自抗扰控制技术的有关实验。实验结果表明,TD在安排过渡过程、对间隙 和加速度进行滤波、提取间隙微分等方面都有良好的效果,同时自抗扰控制器可以实现列车单点的稳定悬浮。

5. 期刊论文 何广胜. 夏超英. He Guangsheng. Xia Chaoying 旋转吊车模型的自抗扰控制设计 -电气传动2007, 37(8) 旋转吊车模型是一个单输入、双输出、非线性、强耦合的系统,采用改进的自抗扰控制方法对其进行控制,在保证整直摆杆稳定的前提下,通过增加跟 踪微分器,可以使水平摆杆平稳地运行到指定的位置. 在仿真的基础上,通过实验验证了这种方法的有效性,结果表明这种方法不仅有着较好的鲁棒性,而且 有着优良的拉干地性能

6. 期刊论文 乔国林. 童朝南. 孙一康. QIAO Guo-lin. TONG Chao-nan. SUN Yi-kang 结晶器多变量耦合系统的自抗扰

控制 -控制理论与应用2007, 24(3)

主要研究新颖实用非线性自抗扰控制算法,在结晶器多变量耦合系统中的应用。自抗扰控制主要特性是实时估计对象模型摄动和外扰的总和作用量,并在控制信号中补偿掉,实现不确定性强非线性对象的实时动态反馈线性化。结合控制对象,建立了结晶器多变量耦合自抗扰控制系统。数值仿真试验表明自

7. 学位论文 周艳 基于神经网络的水轮发电机组自抗扰控制研究 2004

自抗扰控制理论通过对系统未知扰动和不确定量的估计,并将估计量反馈回控制系统中,从而实现系统的动态线性化,该理论思想独特,方法简单,特别适合于具有非线性和时变特性的水轮发电机组这样的系统。本文研究自抗扰控制理论在水轮发电机组中的应用,为设计对强非线性和不确定强扰动都能保证很高的控制精度的可靠的水轮发电机组控制策略作理论上的支持。在分析非线性跟踪—微分器 (TD) 输入输出特性的基础上,提出了跟踪时间不随输入信号幅值改变的TD。针对水轮发电机组的非最小相位特性,基于设置过渡过程的思想,在传统的PID控制器的基础上应用改进的TD设置合理的过渡过程,有效的减小了非最小相位中的反调。使之用于功率设定值变化的水轮发电机组和功功率控制中,仿真结果表明了该方法的有效性。分析了自抗、按控制器和其中扩张状态观测器 (ESO) 的特性,用神经网络补偿控制对象的部分变化,从而减轻扩张状态观测器的负担,获得了"鲁棒性"更强的基于神经网络的自抗抗控制理论相结合,并依据对象转性对控制器做了结构调整。

8. 期刊论文 黄焕袍. 武利强. 韩京清. 高峰. 林永君 火电单元机组协调系统的自抗扰控制方案研究 -中国电机工程学报2004, 24(10)

主要研究新型实用非线性自抗扰控制技术(ADRC) 在火电单元机组协调控制系统中的应用. ADRC的主要特性是对扩张状态一系统未建模动态摄动和未知 外扰的总和作用量的实时估计, 并在控制信号中补偿掉, 这也是实现对不确性强非线性对象的实时动态反馈线性化的关键. 对所提出的单元机组协调系统的 自抗扰控制方案在克服机炉对象强非线性、不确定性、时滞、强耦合以及闭环系统的稳定性方面进行了原理性分析. 在电厂热工过程控制实时仿真平台 STAR-90上的仿真结果表明ADRC协调控制策略的有效性和先进性.

9. 学位论文 宋金来 自抗扰控制技术及其在高速、高精度武器系统中的应用 2002

自抗扰控制技术是由韩京清研究员开创的一种实用的控制系统非线性综合方法. 它主要包括: 非线性跟踪微分器 (TD)、扩张状态观测器 (ESO)、非线性PID (NLPID)、最优非线性PID (ONLPID)、自抗扰控制器 (ADRC)、最优自抗扰控制器 (OADRC)等. 该文为了完善自抗扰控制技术理论,作了以下工作: 利用自稳定域综合方法研究三阶ESO的收敛性,给出三阶ESO收敛的充分条件,为了拓广自抗扰控制技术的应用领域,该文对自抗扰控制技术滤波特性进行了研究. 针对两类武器系统要求速度快、精度高、抗干扰能力强、可靠性强的特点. 针对动调陀螺四轴平台在不同方位闭合时容易失稳的问题,该文在分析其原因的基础上,提出了平台稳定回路的自抗扰控制方法,并设计了实时计算的递推实现ADRC算法. 作者对惯导系统初始对准技术作出较深入的研究,针对如始对准过程速度快且精度高的要求,给出了一种全新的设计方法-ADRC对准方法. 在机动目标动态模型可辨识性的研究过程中,针对量测输出含有强噪声、而要求模型辨识既准确义快速的特点,作者将ESO滤波器和TD滤波器同时用于模型辨识的滤波与估计中,取得了理想的结果. 该文还研究了ADRC在数字炮控系统的多功能综合中的应用问题.

10. 期刊论文 徐春梅. 杨平. 蒋式勤. 彭道刚. XU Chun-mei. YANG Ping. JIANG Shi-qin. PENG Dao-gang 火电厂主汽温控制系统的自抗扰控制仿真研究 -华北电力大学学报2006, 33(3)

针对主汽温控制系统的特点,应用先进的自抗扰控制技术(ADRC),提出了主汽温控制系统的ADRC-PI与ADRC-ADRC两种控制方案,内回路采用PI或ADRC控制,外回路采用ADRC控制.仿真试验结果表明,相对于常规的PI-PI控制方案,ADRC-PI与ADRC-ADRC两种控制方案具有更好的控制品质和强鲁棒性,不仅可以有效地克服干扰,而且在对象特性参数变化较大时仍能获得稳定的控制品质.其中,ADRC-ADRC的控制品质要比ADRC-PI更好些.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_qykex200701004.aspx

下载时间: 2010年5月21日