DOI：10.13195/j.cd.1994.06.401.hanjq.001


# 一种新型控制器——NLPID*

韩京清
（中国科学院系统科学研究所·北京，100080）

**摘 要** 本文综述了作者利用非线性特性改进经典PID调节器方面所得的结果，其中有非线性"跟踪—微分器"、"非线性PID控制器"等新结构和系统的"时间尺度"，控制器的"适应性"、"鲁棒性"等新概念；有这些新结构和概念的各种应用方法。

**关键词** 非线性系统，跟踪—微分器；非线性PID

## 1 前 言

能否保留经典PID的简单、易于实现、鲁棒性强等优点而加以改造设计出性能更好的新型控制器呢？为此，1)需要解决合理提取"微分信号"的问题；2)需要摆脱"经典PID"中的"线性"限制。我们的研究表明，若把"微分"理解为"广义微分"，那么能构造出提取"广义微分"的动态环节——"跟踪—微分器"。利用这种"跟踪—微分器"和一些非线性特性就能构造出误差衰减能力和抗扰动能力都很强的新型控制器——"非线性PID控制器"(NLPID)。

本文首先介绍非线性"跟踪—微分器"(TD)；接着用"TD"来改造经典PID调节器，提出新型控制器——"NLPID"；然后将"快慢属性"定量化而提出系统的"时间尺度"概念和其对控制器参数的影响；最后介绍了"NLPID"的各种不同应用。

## 2 非线性"跟踪—微分器"

所谓"跟踪—微分器"是这样一个动态系统，对其输入一个信号 $v(t)$，它将给出两个输出 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$，其中 $x_1(t)$ 跟踪输入信号 $v(t)$，而 $x_2(t)$ 是 $x_1(t)$ 的微分。

对此，有如下定理：

**定理1**[5] 设动态系统

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2\\ \dot{x}_2 = -g(x_1, x_2)\end{cases}$$

在原点渐近稳定，则以有界可测信号 $v(t)$ 为输入的动态系统

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2\\ \dot{x}_2 = -Rg(x_1 - v(t), x_2/\sqrt{R})\end{cases} \tag{1}$$

的解，满足

1) $\lim\limits_{R\to\infty}\int_0^T |x_1(t) - v(t)|\mathrm{d}t = 0$，对任意 $T > 0$，

2) $R\to\infty$ 时，$x_2(t)$ 弱收敛于 $v(t)$ 的广义导数。

还有一个对偶形式的结论：

---

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期：1994-05-06

**定理 2**[6] 设动态系统

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2 - g_1(x_1)\\ \dot{x}_2 = -g_2(x_1)\end{cases}$$

在原点渐近稳定，则以有界可测信号 $v(t)$ 为输入的动态系统

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2 - \sqrt{R}g_1(x_1 - v(t))\\ \dot{x}_2 = -Rg_2(x_1 - v(t))\end{cases} \tag{2}$$

的解，满足

1) $\lim\limits_{R\to\infty}\int_0^T |x_1(t) - v(t)|\mathrm{d}t = 0$，对任意 $T > 0$，

2) $R \to \infty$ 时，$x_2(t)$ 弱收敛于 $v(t)$ 的广义导数。

把系统(1)和(2)称作“跟踪—微分器”(TD)，一般取函数 $g, g_1, g_2$ 为适当非线性函数。可采用如下形式

$$\begin{cases}g(x_1, x_2) = -R\mathrm{sign}(x_1 + |x_2|x_2/2R)\\ g(x_1, x_2) = -\beta_1|x_1|^a\mathrm{sign}(x_1) - \beta_2|x_2|^a\mathrm{sign}(x_2)\end{cases} \tag{3}$$

当然，为了避免颤振，符号函数 sign 改成带线性区间 $\delta$ 的饱和函数 sat，效果会好些。

由于 $x_2(t)$ 是由系统(1)或(2)经积分得到的，它们对 $v(t)$ 中的“噪声”不是放大，而是抑制，因此其“微分”效果相当不错。

## 3 非线性 PID 控制器[7]

利用“TD”把经典 PID 调节器改造成如图 1 形式。这里，$x_{11}(t)$，$x_{21}(t)$ 分别跟踪输入 $v(t)$ 和输出 $y(t)$，跟踪误差 $e(t)$ 取为 $x_{11}(t) - x_{21}(t)$。“TD”(Ⅰ)的作用是对系统安排“理想”的过渡过程，并给出此过程的微分信号，其中 $R_1$ 根据过渡过程速度要求来确定。“TD”(Ⅱ)的作用却是尽可能复原 $y(t)$ 及其微分信号，其中 $R_2$ 通常取得比 $R_1$ 大。

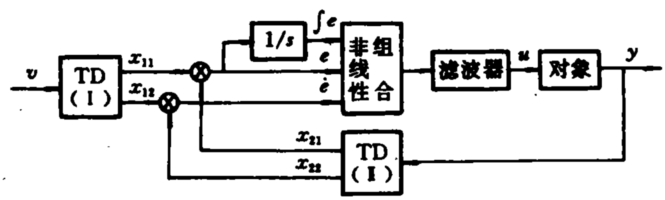


图 1

作“误差”、“误差积分”和“误差微分”的“非线性组合”，就可得到一种新型的“NLPID 控制器”，其动态方程为

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2,\quad \dot{x}_2 = -R_1\mathrm{sat}(x_1 - v(t) + |x_2|x_2/2R_1, \delta_1)\\ \dot{x}_3 = x_4,\quad \dot{x}_4 = -R_2\mathrm{sat}(x_3 - y(t) + |x_4|x_4/2R_2, \delta_2)\\ \dot{x}_5 = x_1 - x_3\\ e_0 = x_5,\quad e_1 = x_1 - x_3,\quad e_2 = x_2 - x_4\\ u = K(|e_0/T_i|^a\mathrm{sign}(e_0) + |e_1|^a\mathrm{sign}(e_1) + |e_2T_d|^a\mathrm{sign}(e_2))\\ \dot{x}_6 = -p_0(x_6 - u)\end{cases} \tag{4}$$

其中，$K, T_i, T_d$ 分别为 PID 控制律的“放大系数”、“积分时间”和“微分时间”。施加于对象的控制量将是 $u$ 经过滤波以后的量 $x_6$，$p_0$ 是由滤波和跟踪的需要而定。$a$ 通常取小于 1 的数，这能加

强误差的衰减能力和抗扰动能力。整个控制器可用其参数表示为

$$u = u(a, K, T_i, T_d, R_1, R_2, p_0) \tag{5}$$

适当选择"非线性组合"和"TD"的参数，上述"NLPID"对形如

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + u \\ y = x_1 \end{cases} \tag{6}$$

的对象有很强的"适应性"和"鲁棒性"。

"对象模型补偿"方法：

当(6)中的 $f(x_1, x_2)$ 不确定或未知时，不必去辨识函数 $f(x_1, x_2)$。利用适当的 $g_1(x)$，$g_2(x)$，$g_3(x)$ 来构造"非线性状态观测器"

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - g_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = a + u(t) - g_2(y - z_1) \\ \dot{a} = -g_3(y - z_1) \end{cases} \tag{7}$$

就能很好地估计出过程的"实时值" $a(t) = f(x_1(t), x_2(t))$，从而可按图 2 方式实现"模型补偿"。

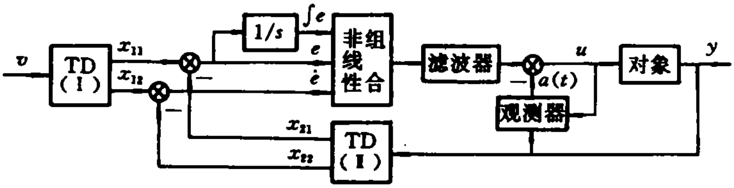


图 2

## 4　系统的"时间尺度"与控制器[20]

不同对象的响应有快慢之别，用什么尺度来衡量这种快慢特性？把经典调节理论中的"时间常数"概念和"时间标准化"方法推广到一般对象上给出关于系统"时间尺度"的如下定义：

**定义 1**　记

$$M = \max_{\substack{|x_1| < r_0 \\ |x_2| < r_1}} |f(x_1, x_2)| \tag{8}$$

其中，$r_0$，$r_1$ 为确定工作范围的常数。今定义系统 $\ddot{x} = f(x, \dot{x})$ 的"时间尺度"为

$$p = 1/\sqrt{M} \tag{9}$$

实际上，当系统 $\ddot{x} = f(x, \dot{x})$ 的最大加速度为 $M$，而 $x$ 限定在 $\pm r_0$ 范围内变化，则轨线速度就不能超过 $2\sqrt{Mr_0}$，于是(8)式可表示成

$$M = \max_{\substack{|x_1| < r_0 \\ |x_2| < 2\sqrt{Mr_0}}} |f(x_1, x_2)| \tag{10}$$

类似地，对系统 $x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \cdots, x^{(n-1)})$ 可定义其"时间尺度"为

$$p = 1/M^{1/n}$$

其中 $M = \max\limits_{\substack{|x_1| < r_1 \\ \vdots \\ |x_n| < r_n}} |f(x_1, x_2, \cdots, x_n)|$。

实际上，可用状态观测器(7)所给出的 $a(t)$ 来进行"时间尺度"估计，即

$$p = 1/\sqrt{M}, \quad M = \max_t |a(t)| \tag{11}$$

这种"时间尺度"对控制器设计究竟有何好处？为了叙述方便，引入

**定义 2**　给定参考输入类 $V$ 和函数类 $F$，若"NLPID"控制器

$$u = u(a, K, T_i, T_d, R_1, R_2, p_0)$$

对任意参考输入 $v(t) \in V$ 和 $\forall f(x_1, x_2) \in F$，都能控制好形如(6)的对象使 $y(t)$ 跟踪 $v(t)$，则说"控制器(5)对 $V$ 和 $F$ 适应"。

**定义 3**　在控制器参数空间中，若存在以 $(a, K, T_i, T_d, R_1, R_2, p_0)$ 为内点的邻域 $P$，使得当控制器(5)对 $V$ 和 $F$ 适应时，对 $P$ 中的任意一点

$$(a', K', T_i', T_d', R_1', R_2', p_0')$$

控制器

$$u' = u(a', K', T_i', T_d', R_1', R_2', p_0')$$

也对 $V$ 和 $F$ 适应，则说"控制器(5)对 $V$ 和 $F$ 具有鲁棒性"。

根据这些定义，可以给出关于"时间尺度"与"NLPID"参数之间关系的如下结论：

**定理 3**　假定控制器(5)对

$$V = \{\text{取值为} \pm r_0 \text{的方波}\}$$

$$F = \{\max_{\substack{|x_1| < r_0 \\ |x_2| < 2r_0}} |f(x_1, x_2)| = 1\}$$

适应，且具有鲁棒性，则控制器

$$u = u(a, K/p^2, pT_i, pT_d, R_1/p^2, R_2/p^2, p_0/p) \tag{12}$$

将对

$$V = \{\text{取值为} \pm r_0 \text{的方波}\}$$

$$F = \{f \mid \text{方程} \max_{\substack{|x_1| < r_0 \\ |x_2| < 2r_0/p}} |f(x_1, x_2)| = 1/p^2 \text{对} p \text{有解}\}$$

适应，且具有鲁棒性。控制器(12)就是对应于"时间尺度"$p$ 的控制器。

这个定理是说，只要对"时间尺度"为 1 的对象调好了具有鲁棒性的参数

$$a, K, T_i, T_d, R_1, R_2, p_0$$

则控制"时间尺度"为 $p$ 的对象所需要的，具有鲁棒性的参数将为

$$a, K/p^2, pT_i, pT_d, R_1/p^2, R_2/p^2, p_0/p$$

因此，控制不同对象所需的控制器参数，只依赖于系统的"时间尺度"$p$。

对应于"时间尺度"$p$ 的控制器(12)能够控制好"时间尺度"比 $p$ 大的对象，但不能控制"时间尺度"比 $p$ 小的对象。

## 5　NLPID 的各种应用

1）对形如

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + b(t)u \\ y = x_1 \end{cases} \tag{13}$$

的对象，只要函数 $f_1$ 能保证系统(13)的能控能观性，其变化幅度不甚大，则控制器(5)能适应定理中的 $V,F$，且具有鲁棒性。

2）多变量系统的解耦控制[10]

对形如

$$\ddot{X} = F(X,\dot{X},t) + B(X,\dot{X},t)U \tag{14}$$

其中 $X,U \in R^m$。只要 $B(X,\dot{X},t)$ 可逆且已知，则可按图 3 方式实现解耦控制。图 3 中 $\mathrm{CTR}_i$ 是第 $i$ 个"NLPID"，$y_1,y_2,\cdots,y_m$ 分别跟踪输入信号 $v_1,v_2,\cdots,v_m$。

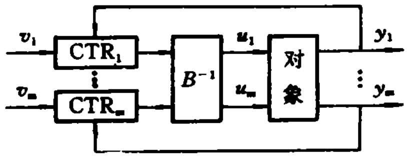


图 3

3）串联系统的控制

今有串联对象

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(x_1,x_2,t) + b_1(t)x_3 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(x_3,x_4,t) + b_2(t)u \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_3 \end{cases} \tag{15}$$

其结构图如图 4 所示

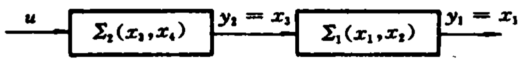


图 4

对此，按图 5 方式联结两个"NLPID"，其中，$u(t)$ 是此对象的控制量。$\mathrm{CTR}_2$ 和 $\Sigma_2$ 组成整个闭环系统的"内环"，而 $\mathrm{CTR}_1$ 和 $\Sigma_1$ 组成"外环"。先把"内环"的传递函数"当作"1，而把 $u_0(t)$ 当作对 $\Sigma_1$ 直接控制量来设计 $\mathrm{CTR}_1$；然后，把 $u_0(t)$ 作为系统 $\Sigma_2$ 的参考输入，让 $x_3(t)$ 跟踪 $u_0(t)$ 的要求来设计控制器 $\mathrm{CTR}_2$。只要"内环"的"时间尺度"$p_2$ 比"外环"的 $p_1$ 小一个数量级，则用控制器

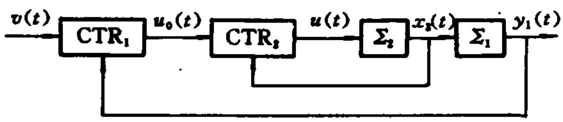


图 5

$$\mathrm{CTR}_1 = u(a,K/p_1^2,p_1T_i,p_1T_d,R_1/p_1^2,R_2/p_1^2,p_0/p_1)$$
$$\mathrm{CTR}_2 = u(a,K/p_2^2,p_2T_i,p_2T_d,R_1/p_2^2,R_2/p_2^2,p_0/p_2)$$

能有效地控制由不确定系统 $\Sigma_1$ 和 $\Sigma_2$ 串联而成的对象。

4）"时间尺度"与"学习算法"[21]

利用"时间尺度"可设计出"学习算法"：i）先用一种控制器(5)来控制对象；ii）在此过程中用"状态观测器"(7)估计出 $|a(t)|$；iii）按(11)式计算"时间尺度"$p$；iv）按(12)式修正控制器参数；v）返回 i)，直到控制精度满意为止。

数值仿真表明，这个"学习算法"其效率很高，一般二、三次循环就能达到目的。

5）不确定系统的滤波[8]

今有两个系统 $\Sigma_A$ 和 $\Sigma_B$，按图 6 方式联结：在此，$n(t)$ 为量测噪声，系统 $\Sigma_A$ 和 $w(t)$ 均未知，$\Sigma_B$ 取为 $\dot{x} = u$，那么"NLPID"同 $\Sigma_B$ 一起成为对形如

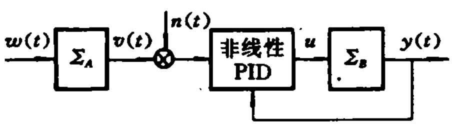


图 6

$$\begin{cases}\dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = f(v_1, v_2) + w(t)\end{cases}$$

的不确定系统 $\Sigma_A$ 的滤波器。

这种滤波器用于机动目标雷达数据处理仿真计算中，得到相当满意的效果[11]。

## 6 结束语

我们的研究结果简单概括如下：

1）控制器可“独立”于“对象模型”去设计；2）为了进行控制，不用去辨识对象模型中的 $f(x_1, x_2)$，只要估计出“时间尺度”$p$ 就能进行控制。估计“时间尺度”比进行“辨识”容易的多；3）估计“实时值”$a(t) = f(x_1(t), x_2(t))$ 来进行模型补偿，能提高控制精度；4）利用“时间尺度”$p$ 进行“学习”，是简单而高效的办法；5）解耦控制只用“输入—输出转换关系”$B(X, \dot{X}, t)$ 就能实现；6）“NLPID”可以起“控制器”的作用，也能起“滤波器”的作用。

对上述结果所进行的许多数值仿真实验表明，效果都很好。计算机仿真实验所显示的性能，会不会在实际系统中有所变形或完全不能用？由于这些控制器的结构和参数几乎是与对象的数学模型无关，因此数值仿真实验结果几乎同样会在实际系统中得到复显，这点已在某些实物实验中得到证实。

本文所述结果，对控制理论也提出了新问题。1）“经典微分”概念换成“广义微分”就引出“微分器物理可实现”的结论，这将对控制理论基础会有什么影响？2）从控制的目的来看，表达式 $f(x_1, x_2)$ 并不重要，不一定要去辨识它，那么传统的“自适应控制器”，“鲁棒控制器”的思考方式是否合理？由于控制器可以“独立”于“对象模型（Kalman 体系的数学模型）”，是否考虑控制器本身的“适应范围”和“鲁棒性”更为合理？3）从控制的角度看，“时间尺度”是描述对象的有用的一个“特征量”，对控制来说是否还有其它重要的“特征量”？

从 K. Gödel 的“不完备性定理”看，要彻底解决“适应性”、“鲁棒性”等问题，就得去设计“独立”于“Kalman 模型”的控制器（从微分对策的角度看，这种控制律是存在的）。可以说，经典 PID 理论提供了设计这种控制器的原始思想，而现代控制理论又提供了“系统分析”方法（但其设计方法不好用）。要发扬经典 PID 的“设计思想”并结合现代控制理论的“系统分析”方法来发展新的控制系统“设计理论”，为此，开发利用“非线性特性”是不可少的手段。

## 参考文献

[1] 须田信英，“PID 制御”，システム制御情报ライブラリー6，朝仓书店，1992

[2] K. J. Åström, C. C. Hang, P. Persson, W. K. Ho, Towards Intelligent PID Control, Automatica, 28(1), 1992, 1—9

[3] 韩京清，控制理论——模型论还是控制论，系统科学与数学，第 4 期，1989 年

[4] 韩京清，处理非线性控制系统的直接方法，控制理论及其应用 92′年会（南京）论文集

[5] 韩京清，王伟，非线性跟踪—微分器，系统科学与数学，第 2 期，1994 年

[6] 韩京清，王伟，非线性跟踪—微分器的另一种形式，1993 年全球华人智能控制大会

[7] 韩京清，非线性 PID 控制器，自动化学报，第 4 期，1994 年

[8] 韩京清，一类不确定系统的控制与滤波，系统仿真学报，第 1 期，1993 年

[9] 韩京清，王学军，非线性 PID 用于机械手控制，控制与决策 93′年会（黄山）论文集

[10] 石井千春，韩京清，田村捷利，申铁龙，2 自由度 D. D. マニピエレータの非线性 PID 制御，Proc. of the 32nd SICE

Annual Conf., Aug. 1993, 4—6, Kanazawa

[11] 陈昶，王朝珠，韩京清，估计机动目标运动轨迹的一种新方法，1993 年投宇航学报

[12] 王学军，经典 PID 的改造与非线性 PID 控制器，控制理论与应用 93′年会（武汉）论文集

[13] 王伟，韩京清，非线性系统的时变参数估计，控制理论与应用 93′年会（武汉）论文集

[14] 郭国饶，高龙，带电压输出调节的电力系统直接非线性控制器，控制理论与应用 93′年会（武汉）论文集

[15] 高龙，范玉顺，陈霖，电力系统新型非线性控制器，清华大学学报，第 29 卷，第 1 期，1989 年

[16] 高龙，非线性系统的直接反馈线性化方法，控制理论及其应用 91′年会（杭州）论文集

[17] 李华，张宝霖，周荣光，发电机励磁系统的新型非线性控制器，清华大学学报，第 32 卷，第 4 期，1992 年

[18] 马幼捷，陈寿孙，张宝霖，直接反馈线性化方法在 SVC 非线性控制器设计中的应用研究，第 4 届全国电工数学年会，1993 年

[19] 钟延炯，杨遇术，廖福成，非线性系统的一种直接控制方法，1993 年投自动化学报

[20] 韩京清，王学军，系统的时间尺度与非线性 PID 控制器，控制理论及其应用 94′年会（太原）论文集

[21] 韩京清，王学军，系统的“时间尺度”与“学习算法”，（待发表）

[22] 韩京清，利用非线性特性改进经典 PID 控制律，1994 年投信息与控制

# A New Type of Controller: NLPID

*Han Jingqing*

(Institute of Systems Science, Academia Sinica)

**Abstract**: This paper concludes the results obtained by the author in the research of improvement of classical PID controllers using nonlinear characteristics. These results include such new structures as the nonlinear tracking-differentiator and the nonlinear PID controller, and some new concepts like the time scale of a system, the adaptability and robustness of the controller. Various applications of these new structures and concepts will be introduced in this paper.

**Keywords**: nonlinear system, tracking-differentiator, nonlinear PID,

## 作者简介

见本刊第 8 卷第 3 期。

# 更　正

本刊 1994 年第 9 卷第 5 期封二倒数第 2 行页码“333”应为“338”，倒数第 1 行页码“355”应为“359”。谨此更正，并向作者和读者致歉。