

# 非完整链式系统的非正则反馈全局K指数镇定

王婷婷<sup>1</sup>, 赵万春<sup>2</sup>, 邵克勇<sup>1</sup>

1. 东北石油大学电气信息工程学院, 大庆 163318
2. 东北石油大学石油工程学院, 大庆 163318

**摘要** 利用非正则反馈线性化, 对非完整链式系统进行反馈镇定。构造一种不连续非线性变换, 将非完整链式系统转换成线性系统, 以便使用线性系统理论进行控制律设计。针对高维非完整链式系统, 显式构造出一个方便易用的不变集和切换规则。所获得的不连续控制律保证了闭环系统的指数收敛速度和控制输入的有界性。仿真结果验证了控制方案的有效性。

**关键词** 非完整链式系统; 镇定; 非正则反馈线性化; 不连续控制

**中图分类号** O231.1

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.09.001

## Global K-exponential stabilization of nonholonomic chained systems based on nonregular feedback

WANG Tingting<sup>1</sup>, ZHAO Wanchun<sup>2</sup>, SHAO Keyong<sup>1</sup>

1. School of Electrical Engineering and Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
2. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

**Abstract** This paper uses irregular feedback linearization to stabilize nonholonomic chained systems. A discontinuous nonlinear transformation is constructed to change nonholonomic chained systems into linear systems, so that it possible to design feedback control laws using theory of linear systems. Then, a convenient invariant set and a switching rule are explicitly constructed for the high-dimension nonholonomic chained systems. The obtained discontinuous control laws can guarantee convergence of the close-loop system with an exponential rate and bounded inputs. Finally, simulation is provided to justify the effectiveness of the approach.

**Keywords** nonholonomic chained systems; stabilization; irregular feedback linearization; discontinuous control

非完整系统的研究具有很好的实用价值, 可表征一大类真实的物理系统, 如单轮自行车、四轮小车、移动机器人、拖车系统等。尽管非完整系统是开环可控的, 但不存在连续时不变状态反馈可对其进行镇定<sup>[1]</sup>和线性化<sup>[2]</sup>, 因此非完整系统的研究具有很好的理论研究价值。为了解决无连续时不变镇定的问题, 先后设计出连续时变反馈控制律<sup>[3,4]</sup>、非正则反馈控制律<sup>[5]</sup>、不连续时不变反馈控制律<sup>[6]</sup>和混杂控制律<sup>[7]</sup>等。另外, 文献[8]~[12]对非正则反馈线性化进行了研究, 得出了

非线性系统非正则反馈线性化的一些初步结果。

本研究利用非正则反馈线性化, 为非完整链式系统提出一种新的不连续时不变反馈控制律, 以获得渐近稳定性和指数收敛速度。

### 1 非正则静态反馈线性化

仿射非线性系统的非正则静态反馈线性化问题, 即寻找状态变换

收稿日期: 2014-04-06; 修回日期: 2014-11-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51404073); 中国博士后科学基金项目(2014M550180); 东北石油大学青年基金项目(2013NQ105); 黑龙江省博士后英才计划项目(BH-T20503); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541090); 中国石油科技创新基金项目(2013D-5006-0209); 黑龙江省青年科学基金项目(1253G011)

作者简介: 王婷婷, 副教授, 研究方向为复杂系统控制、混沌理论、模式识别、井下控制工程及非线性动力学, 电子信箱: wttlovework@163.com; 赵万春(通信作者), 教授, 研究方向为油气井工程, 电子信箱: zhaowanchun520@163.com

引用格式: 王婷婷, 赵万春, 邵克勇. 非完整链式系统的非正则反馈全局K指数镇定[J]. 科技导报, 2015, 33(9): 13-17.

$$y = \alpha(x) \quad \alpha(0) = 0, x \in R^n, y \in R^n \quad (1)$$

和状态反馈

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v \quad \alpha(0) = 0, \beta(x) \in R^{m \times m'}, m' \leq m \quad (2)$$

将系统

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i = f(x) + G(x)u \quad (3)$$

$$x \in R^n, u \in R^m, m \leq n, f(0) = 0, \text{rank} G(0) = m$$

转化为能控的线性系统

$$\dot{y} = Ay + Bv \quad y \in R^n, u \in R^m, m' \leq m, n' \geq n \quad (4)$$

式中,  $x$  为状态,  $y$  为输出,  $\alpha(\cdot)$  为某一类 K 函数;  $u$  为控制律;  $v$  为输入,  $\beta(\cdot)$  为某一类 K 函数。

引理 1<sup>[5]</sup> 给定双输入无漂移系统

$$\dot{x} = g_1(x)u_1 + g_2(x)u_2 \quad x \in R^n \quad (5)$$

若  $\Delta_0 = \text{span}\{g_1\}$ ,  $\Delta_i = \Delta_{i-1} + \text{ad}_{g_1} \Delta_{i-1}$ ,  $\Delta_{n-1} = \Delta_{n-2} + \text{span}\{g_1\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n-2$ ), 满足:  $\text{rank} \Delta_i$  是常数,  $\text{rank} \Delta_{n-1} = n$ ,  $\Delta_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ) 是对合的, 则系统(式(5))可通过非正则静态反馈进行线性化。

## 2 链式系统的全局 K 指数镇定

### 2.1 状态变换和控制变换

非完整系统的常见标准模型是链式系统(式(6)), 可表征大多数无漂移非完整系统<sup>[14,15]</sup>。

$$\dot{x}_1 = u_1, \dot{x}_2 = u_2, \dot{x}_i = x_{i-1}u_1 \quad i = 3, 4, \dots, n \quad (6)$$

其中,  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  为系统状态,  $(u_1, u_2)$  为控制输入。其向量形式为

$$\dot{X} = g_1(X)u_1 + g_2(X)u_2 \quad (7)$$

其中,  $g_1 = [1, 0, x_2, \dots, x_{n-1}]^T$ ,  $g_2 = [0, 1, 0, \dots, 0]^T$ 。

由引理 1 可知, 系统(式(7))可通过非正则静态反馈进行线性化。令  $h(X) = x_n$ ,  $\phi(X) = -k_1 x_1$  ( $k_1 > 0$ ), 记  $f(X) = \phi g_1$ , 则在状态变换

$$y_i = L_j^{n-i} h \quad i \in \mathbb{N}_2^n \quad (8)$$

和控制变换

$$u_1 = \phi(X), u_2 = (L_{g_2} L_f^{n-2} h(X))^{-1} (v - L_f^{n-1} h(X)) \quad (9)$$

的作用下, 系统(式(7))转换成可控单输入线性系统

$$\dot{x}_1 = -k_1 x_1 \quad \dot{y} = Ay + Bv \quad (10)$$

其中,

$$y = [y_2, y_3, \dots, y_n]^T, A = \begin{bmatrix} 0_{1 \times (n-2)} & 0 \\ I_{n-2} & 0_{(n-2) \times 1} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0_{(n-2) \times 1} \end{bmatrix}$$

显然,  $(A, B)$  为可控矩阵对。因为  $u_1$  是纯状态反馈(即不含有新控制输入  $v$ ), 所以反馈控制式(9)是非正则静态反馈控制。从式(9)可看出, 存在不连续流形  $S_D = \{X | L_{g_2} L_f^{n-2} h(X) = 0\}$ 。在  $S_D$  中, 式(10)没有定义。经计算可知  $L_{g_2} L_f^{n-2} h(X) = \phi^{n-2}$ , 故  $S_D$  可重写为  $S_D = \{X | \phi(X) = 0\}$ 。

通过递推, 状态变换式(8)可以重写为

$$\begin{cases} y_n = x_n, y_{n-1} = x_{n-1} \phi, y_{n-2} = x_{n-2} \phi^2 - k_1 y_{n-1} \\ y_{n-i} = x_{n-i} \phi^i + p_{n-i}(y_{n-1}, y_{n-2}, \dots, y_{n-i+1}), i = 2, 3, \dots, n-2 \end{cases}$$

$$(11)$$

式中  $p_{n-i} = \sum_{j=1}^{i-1} p_{n-i,j} y_{n-j}$  是  $y_{n-1}, y_{n-2}, \dots, y_{n-i+1}$  的实常数单多项式。因此, 式(8)的逆变换为

$$\begin{cases} x_n = y_n, x_{n-1} = y_{n-1} / \phi, x_{n-2} = (y_{n-2} + k_1 y_{n-1}) / \phi^2 \\ x_{n-i} = (y_{n-i} - p_{n-i}(y_{n-1}, y_{n-2}, \dots, y_{n-i+1})) / \phi^i, i = 2, 3, \dots, n-2 \end{cases} \quad (12)$$

文献[9]表明非正则静态反馈线性化不能被正则静态反馈线性化和正则动态反馈线性化所蕴含, 因此非正则反馈技术具有独立的研究价值。

因存在不连续流形  $S_D$ , 故若想获得式(7)的全局 K 指数稳定性, 应设计切换规则和不变集  $\Omega$  ( $S_D \not\subset \Omega$ ), 使得系统轨迹在有限时刻进入  $\Omega$ 。针对式(7)的低维情形 ( $n=3$ ), 文献[5]根据转换后的线性系统的特征值构造非线性不等式组(不等式个数随  $n$  线性增加), 据此设计不变集和四步切换规则, 获得了全局指数收敛速度, 但无法(或很难)获得渐近稳定性, 也难以推广到高维情形。本研究借鉴文献[15]的方法, 通过类 Lyapunov 函数设计出一步切换规则和不变集, 适用于任何  $n$  维情形。

### 2.2 控制律设计

系统(式(10))在控制律

$$u_1 = \phi(X), u_2 = (L_{g_2} L_f^{n-2} h(X))^{-1} (v - L_f^{n-1} h(X)) \quad (13)$$

其中  $v = -Ky$  的作用下, 有闭环系统

$$\dot{x}_1 = -k_1 x_1, \dot{y} = (A - BK)y \quad (14)$$

定义集合  $\Omega = \{X | x_1^{2(n-1)} > V\}$ , 其中  $V = y^T P y$ ,  $P$  是

$$(A - BK + \lambda_1 I)^T P + P(A - BK + \lambda_1 I) = -I \quad (15)$$

的唯一正定对称解, 其中  $\lambda_1 > (n-1)k_1$ 。显然, 在集合  $\Omega$  中,  $\phi \neq 0$ , 式(8)、式(10)、式(13)和式(14)有定义。

定理 1 对于系统(式(6)), 设  $X \in \Omega$ , 选择  $K$  使  $A - BK$  的所有特征值都是相异的负实数且均小于  $-\lambda_1 < -(n-1)k_1$ , 则在控制律式(13)的作用下:

- 1) 集合  $\Omega$  是不变集。
- 2) 系统(式(6))的状态轨迹是 K 指数稳定的。

证明 1) 设  $X(0) \in \Omega$ , 利用式(14), 可知  $V$  及其导数  $\dot{V}$  满足

$$\begin{cases} \mu_1 y(t)^2 \leq V(t) \leq \mu_2 y(t)^2 \\ \dot{V}(t) = y^T ((A - BK)^T P + P(A - BK)) y = y^T (-I - 2\lambda_1 P) y \leq -2\lambda_1 V \end{cases} \quad (16)$$

$$\Rightarrow V(t) \leq V(0)e^{-2\lambda_1 t} \Rightarrow |y_i(t)| \leq \sqrt{\mu_1^{-1} V(0)} e^{-\lambda_1 t} \leq \sqrt{\mu_1^{-1} x_1^{2(n-1)k_1}(0)} e^{-\lambda_1 t} \quad (17)$$

其中  $(\mu_1, \mu_2)$  分别是  $P$  的最小、最大特征值。系统(式(14))的部分解为

$$x_i(t) = x_i(0)e^{-k_1 t} \Rightarrow \phi(X) = -k_1 x_1(0)e^{-k_1 t} \quad (18)$$

因  $\lambda_1 > (n-1)k_1$ , 故  $x_1^{2(n-1)k_1}(0) > V(0)$ , 从而  $x_1^{2(n-1)k_1}(t) > V(t)$  ( $t \geq 0$ ), 因此  $\Omega$  是不变集。

2) 由逆变换式(12)、式(17)和式(18)可知:

$$\begin{aligned}
 |x_{n-i}(t)| &\leq \frac{|y_{n-i}(t)| + \sum_{j=1}^{i-1} p_{n-ij} \|y_{n-j}(t)\|}{|\phi(X)|^i} \\
 &\leq \frac{\left(1 + \sum_{j=1}^{i-1} p_{n-ij}\right) \sqrt{\mu_1^{-1} x_1^{2(n-1)}(0)} e^{-\lambda_1 t}}{k_1^i |x_1(0)|^i e^{-i k_1 t}} \\
 &\leq \left(1 + \sum_{j=1}^{i-1} p_{n-ij}\right) k_1^{-i} \sqrt{\mu_1^{-1}} |x_1(0)|^{n-i-1} e^{-(\lambda_1 - i k_1) t} \leq \kappa_0(X(0)) e^{-(\lambda_1 - (n-2)k_1) t}
 \end{aligned} \tag{19}$$

其中  $i=2,3,\dots,n-2$ 。

$$\begin{aligned}
 \kappa_0(X(0)) &= \min^{-1}(k_1^{n-2}, 1) \left(1 + \sum_{j=1}^{i-1} p_{n-ij}\right) \sqrt{\mu_1^{-1}} \max(X(0)^{n-3}, X(0))
 \end{aligned} \tag{20}$$

显然,  $\kappa_1(\cdot)$  是K类函数。结合式(18)和式(19),可得:

$$\begin{aligned}
 X(t) &\leq \sum_{i=1}^n |x_i(t)| \\
 &\leq x_1(0) e^{-\lambda_1 t} + (n-1) \kappa_0(X(0)) e^{-(\lambda_1 - (n-2)k_1) t} \leq \kappa_1(X(0)) e^{-\lambda_2 t}
 \end{aligned} \tag{21}$$

其中  $\kappa_1(s) = s + (n-1)\kappa_0(s)$  是K类函数,  $\lambda_2 = \min(\lambda_1, \lambda_1 - (n-2)k_1)$ 。

定理1的结果不是全局的,为了将它推广到全局,对于  $X \notin \Omega$  的情形,有必要设计一个控制律,在有限时间内,将系统状态驱动到不变集  $\Omega$  中。

**定理2** 如果  $X \notin \Omega$ , 选择  $K_2$  和  $K$  使  $A-BK_2$  和  $A-BK$  的特征值都为相异负数且均小于  $-\lambda_1 < -(n-1)k_1 < 0$ , 则在控制律

$$\text{if } X(t) \notin \Omega, \text{ then } u_1 = \bar{u} \operatorname{sgn}(x_1(t)), u_2 = -K_2 x \tag{22}$$

$$\text{else } u_1 = \phi(X), u_2 = (L_{g_2} L_f^{n-2} h(X))^{-1} (v - L_f^{n-1} h(X)), \text{ where } v = -Ky \tag{23}$$

的作用下,系统(式(6))的状态是全局K指数稳定的,其中  $x = [x_2, x_3, \dots, x_n]^T$ ,  $\bar{u}$  为一个正常数,  $K_2$  为反馈向量。

**证明** 1) 如果  $X(0) \in \Omega$ , 则由定理1可知,系统状态轨迹是K指数稳定的。

2) 如果  $X(0) \notin \Omega$ , 先证明存在某个有限时刻  $t_s$  使  $X(t_s) \in \Omega$ 。

由式(22)可得闭环系统  $\dot{x}_1 = \bar{u} \operatorname{sgn}(x_1(0))$  和  $\dot{x} = (A - BK_2)x$ 。对于  $x_1$  子系统,有  $|x_1| = \bar{u}t + |x_1(0)|$ , 故存在时刻  $t_2 = \bar{u}^{-1}|x_1(0)| \leq \kappa_2(X(0)) = \bar{u}^{-1} X(0)$ , 使得当  $t \geq t_2 \geq 0$  时, 有  $|x_1(0)| \leq \bar{u}t$ , 从而有式(24)成立。

$$|x_1(t)| \leq 2\bar{u}t, t \geq t_2 \geq 0 \Rightarrow |\phi(X)| = |-k_1 x_1| \leq 2k_1 \bar{u}t, t \geq t_2 \geq 0 \tag{24}$$

对于  $x$  子系统,由文献[1]的引理2.13可知,存在常数  $c_1$  使得  $x \leq c_1 x(0) e^{-\lambda_1 t}$ 。利用坐标变换式(11)和式(24),可得

$$\begin{aligned}
 |y_n(t)| &= |x_n(t)| \leq c_1 x(0) e^{-\lambda_1 t} \\
 |y_{n-1}(t)| &\leq |x_{n-1}(t)| |\phi(X(t))| \leq 2c_1 k_1 \bar{u} x(0) t e^{-\lambda_1 t} \\
 |y_{n-2}(t)| &\leq |x_{n-2}(t)| |\phi(X(t))|^2 + k_1 |y_{n-1}(t)|
 \end{aligned}$$

$$\leq (2k_1 \bar{u})^2 c_1 x(0) t^2 e^{-\lambda_1 t} + 2c_1 k_1^2 \bar{u} x(0) t e^{-\lambda_1 t}$$

$$|y_{n-i}(t)| \leq |x_{n-i}(t)| |\phi(X(t))|^i + \sum_{j=1}^{i-1} p_{n-ij} \|y_{n-j}(t)\|$$

$$\leq (q_{n-1,0} + q_{n-1,1}t + \dots + q_{n-1,i}t^i) x(0) e^{-\lambda_1 t}$$

其中  $t \geq 0, i=0,1,2,\dots,n-2, q_{n-ij} (j=1,2,\dots,i)$  是正常数。因此,

$$\begin{aligned}
 V(t) &\leq \mu_2 y(t)^2 \leq \mu_2 \sum_{i=2}^n |y_i(t)|^2 \\
 &\leq (q_0 + q_1 t^2 + \dots + q_{n-2} t^{2(n-2)}) x(0)^2 e^{-2\lambda_1 t}, t \geq 0
 \end{aligned}$$

其中  $q_i (i=0,1,2,\dots,n-2)$  是由  $q_{n-ij} (j=1,2,\dots,i)$  决定的正常数。根据文献[1]的引理可知,存在正常数  $(c_2, \lambda_3)$  ( $\lambda_2 \in [(n-1)k_1, \lambda_1]$ ) 使  $V(t) \leq c_2 x(0)^2 e^{-2\lambda_3 t} (t \geq 0)$ 。

当  $t \geq t_2 \geq 0$  时,利用  $|x_1| = \bar{u}t + |x_1(0)|$ , 可知

$$x_1^{2(n-1)}(t) > V(t) \Leftrightarrow x_1^{2(n-1)}(t) > c_2 x(0)^2 e^{-2\lambda_3 t}$$

$$\Leftrightarrow |x_1(t)| > \left(c_2 x(0)^2\right)^{\frac{1}{2(n-1)}} e^{-\frac{\lambda_3 t}{(n-1)}} \Leftrightarrow \bar{u}t + |x_1(0)| > \left(c_2 x(0)^2\right)^{\frac{1}{2(n-1)}}$$

$$\Leftrightarrow t \geq \max\left(t_3 = \bar{u}^{-1} \left(\left(c_2 x(0)^2\right)^{\frac{1}{2(n-1)}} - |x_1(0)|\right), t_2\right) \tag{25}$$

因此,利用  $t_2$  的表达式和式(25),可知存在K类函数  $\kappa_s(\cdot)$  和有限时刻:

$$t_s \leq \kappa_s(X(0)) = \max\left(\bar{u}^{-1} \left(\left(c_2 X(0)^2\right)^{\frac{1}{2(n-1)}} + X(0)\right), \kappa_2(X(0))\right)$$

使得  $x_1^{2(n-1)}(t_s) > V(t_s)$ , 即  $X(t_s) \in \Omega$ 。

3) 证明当  $X(0) \notin \Omega$  时系统轨迹仍然是K指数稳定的。

当  $t \in [0, t_s]$  时, 由  $|x_1| = \bar{u}t + |x_1(0)|$  和  $x \leq c_1 x(0) e^{-\lambda_1 t}$  可知

$$\begin{cases} |x_1(t)| = \bar{u}t + |x_1(0)| \leq (\bar{u}t_s + |x_1(0)|) e^{\lambda_1 t} e^{-\lambda_1 t} \\ \leq (\bar{u} \kappa_s(X(0)) + X(0)) e^{\lambda_1 \kappa_s(X(0))} e^{-\lambda_1 t} \\ |x(t)| \leq c_1 X(0) e^{-\lambda_1 t} \end{cases} \Rightarrow X(t) \leq |x_1(t)| + |x(t)| \leq \kappa_3(X(0)) e^{-\lambda_1 t} \tag{26}$$

其中  $\kappa_3(s) = (\bar{u} \kappa_s(s) + s) e^{\lambda_1 \kappa_s(s)} + c_1 s$  是K类函数。

当  $t \geq t_s$  时,由式(26)可知  $X(t_s) \leq \kappa_3(X(0))$ , 根据式(21)可知

$$X(t) \leq \kappa_1(X(t_s)) e^{-\lambda_2(t-t_s)} \leq \kappa_1(\kappa_3(X(0))) e^{\lambda_2 \kappa_3(X(0))} e^{-\lambda_2 t} \leq \kappa_4(X(0)) e^{-\lambda_4 t} \tag{27}$$

其中  $\kappa_4(s) = \kappa_1(\kappa_3(s)) e^{\lambda_2 \kappa_3(s)}$  是K类函数。因此,利用式(26)和式(27)可知  $X(t) \leq \kappa_5 e^{-\lambda_4 t}$ , 其中  $\kappa_5(\cdot) = \max(\kappa_3(\cdot), \kappa_4(\cdot))$  是K类函数,  $\lambda_4 = \min(\lambda_1, \lambda_2)$ 。

综上所述,可知  $X(t)$  是全局K指数稳定的。

### 3 仿真实验

文献[18]研究了一种三关节非完整机械手,其运动学方程如式(28)所示。

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & a_2 \sin \theta_1 \\ 0 & a_3 \sin \theta_2 \cos \theta_1 \\ 0 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

其中  $(a_2, a_3)$  是非零结构常数,  $\theta_4$  是齿轮的输出部分的方向角,  $(v_1, v_2)$  是第一、第二关节的角速度。引入状态变换和输入变换:

$$x_1 = \theta_4, x_2 = a_2 a_3 \tan \theta_1 / \cos^3 \theta_2, x_3 = a_3 \tan \theta_2, x_4 = \theta_3 \quad (29)$$

$$\begin{cases} u_1 = v_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ u_2 = a_2 a_3 \left( \frac{v_1}{\cos^3 \theta_2 \cos^2 \theta_1} + \frac{3a_2 v_2 \sin^2 \theta_1 \sin \theta_2}{\cos \theta_1 \cos^4 \theta_2} \right) \end{cases} \quad (30)$$

则可得到四维链式系统(式(6))。易知,上述变换在  $\theta_1 = \pi/2 + k\pi$  和  $\theta_2 = \pi/2 + k\pi$  ( $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) 处没有定义,因

此是局部坐标变换。

假设机械手的初始状态分别为  $q_1 = [-0.35, \pi/4, 2, 3]^T$  和  $q_2 = [-0.35, \pi/4, 2, 1]^T$ , 参数  $(a_2, a_3, a_3)$  取 1。利用本研究控制律,得到仿真结果如图 1、图 2 所示。

图 1 为初始状态  $q_1$  所对应的状态轨迹和控制轨迹。可见,初始状态落入不变集中,控制律式(23)发生作用,整个过程中没有发生控制律切换,状态轨迹和控制轨迹都以指数速度平滑地收敛到 0。

图 2 为初始状态  $q_2$  所对应的状态轨迹和控制轨迹。可见,初始状态没有进入不变集中,驱动控制律式(22)受到激发。大约在  $t_s = 5$  s 时刻,系统轨迹进入不变集,控制律切换到式(23)。从整个过程看,状态轨迹和控制轨迹仍然以指数速度收敛到 0,但是它们不光滑。

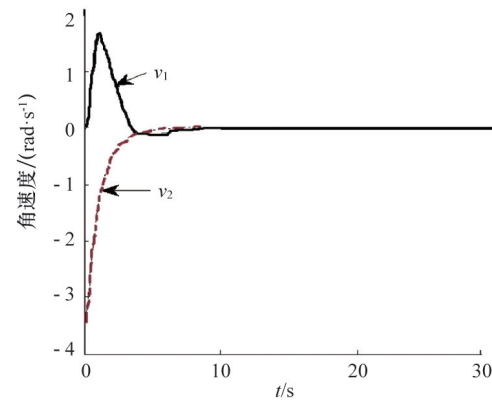
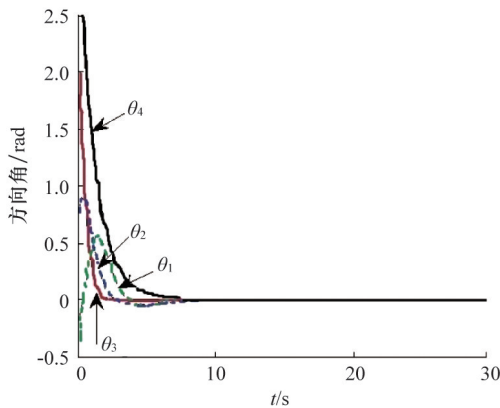


图 1 初始状态为  $q_1$  时的状态轨迹

Fig. 1 Initial state for the state trajectory of  $q_1$

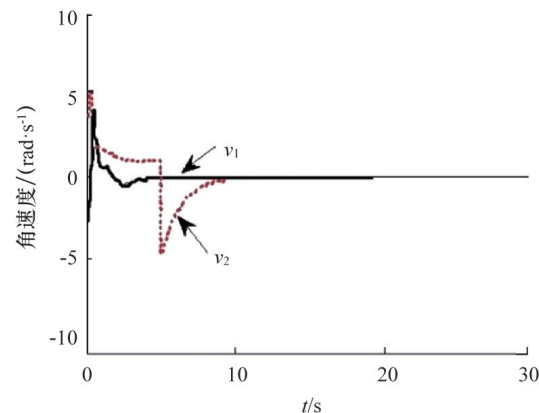
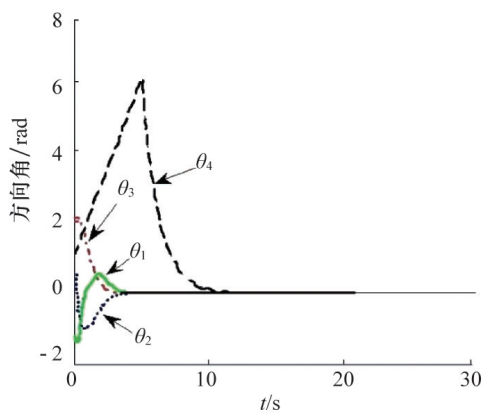


图 2 初始状态为  $q_2$  时的控制轨迹

Fig. 2 Initial state for the state trajectory of  $q_2$

#### 4 结论

利用非正则反馈线性化技术,为非完整链式系统设计了不连续时不变控制律,获得了渐近稳定性和指数收敛速度。与文献[12]相比,本研究控制律切换方式避免了与状态变量个数的相关性,可以适用于高维系统。

#### 参考文献 (References)

- [1] Brockett R W. Asymptotic stability and feedback stabilization[C]//Brockett R W, Millman R S, Sussmann H J. Differential geometry control theory. Boston: Birkhauser, 1983: 181-208
- [2] Isidori A. Nonlinear control theory[M]. Berlin-Heidelberg: Springer, 1995.
- [3] Ma B L, Huo W. Smooth time-varying exponential stabilization of

- nonholonomic chained systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(2): 301-305.
- [4] Tian Y P, Li S H. Exponential stabilization of nonholonomic dynamic systems by smooth time-varying control[J]. Automatica, 2002, 38(7): 1139-1146.
- [5] Sun Z D, Ge S S, Huo W, et al. Stabilization of nonholonomic chained systems via nonregular feedback linearization[J]. Systems and Control Letters, 2001, 44(4): 279-289.
- [6] Marchand N, Alamir M. Discontinuous exponential stabilization of chained form systems[J]. Automatica, 2003, 39(2): 343-348.
- [7] Lizarraga D A, Aneke N, Nijmeijer H. Robust exponential stabilization for the extended chained form via hybrid control[C]//Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE, 2002: 2798-2803.
- [8] 孙振东, 夏小华, 高为炳. 关于非线性系统非正则反馈线性化的一些初步结果[C]//中国控制会议论文集. 合肥: 中国科学技术出版社, 1994: 308-313.
- Sun Zhendong, Xia Xiaohua, Gaoweibing. Some preliminary results of the non regular feedback linearization of nonlinear system[C]//The Chinese Control Conference Proceedings. Hefei: Science and Technology of China Press, 1994: 308-313.
- [9] Sun Z D, Xia X H. On nonregular feedback linearization[J]. Automatica, 1997, 33(7): 1339-1344.
- [10] Ge S S, Sun Z D, Lee T H. Nonregular feedback linearization for a class of second-order nonlinear systems[J]. Automatica, 2001, 37(11): 1819-1824.
- [11] Sun Z D, Ge S S. Nonregular feedback linearization: A nonsmooth approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(10): 1772-1776.
- [12] Li M J, Liu G L. Global Exponential Regulation of nonholonomic chained systems via nonregular feedback[C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering. New York: IEEE, 2010: 1062-1065.
- [13] Murray R M, Sastry S S. Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids[J]. IEEE Transactions on Automat Control, 1993, 38(5): 700-716.
- [14] Kolmanovsky I, McClamroch N H. Development in nonholonomic control problems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995, 15(6): 20-36.
- [15] Ma B L. Global K-exponential asymptotic stabilization of underactuated surface vessels[J]. Systems and Control Letters, 2009, 58(3): 194-201.
- [16] 李明军. 非完整系统的指数镇定[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
- Li Mingjun. Exponential stabilization of nonholonomic system[D]. Beijing: Beihang University, 2011.
- [17] Nakamura Y, Chung W, Sordalen O J. Design and control of the nonholonomic manipulator[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(1): 48-59.

(编辑 陈华姣)

## ·学术动态·



## 科技评价导向、科技资源分配是科技工作者关注的焦点

2013年下半年,中国科协组织开展了第三次全国科技工作者状况调查,依托分布在全国的654个科技工作者状况调查站点进行,覆盖科研院所、高等院校、企业、医疗卫生机构和县域基层单位的各类科技工作者群体,共发放问卷36000份,回收合格问卷34196份。

调查表明,59.4%的科技工作者认为现行科技评价导向不合理,其中科研人员认为评价导向不合理的比例高达68.2%。以发表论文、承担科研项目数量为例,81.8%的科研人员表示发表论文对于完成考核要求非常重要或比较重要,近3年承担过项目的科研人员中,91.7%认为承担项目对完成业绩考核作用非常大或比较大。52.0%的科技工作者认为现行评价制度驱使造成学术不端行为频频出现。对现有科技奖励的社会影响,26.2%的科技工作者认为示范效应非常明显,同时11.6%认为负面效应非常明显。

对科技资源配置和科研管理问题反映较多。对于政府的科技资源,28.4%的科技工作者认为分配结果不公平,26.6%认为分配过程不公平,25.4%认为资源使用效率不高。63.4%的科技工作者认为科技项目及经费管理存在不合理之处,其中科研人员持这种看法的比例达71.1%。科研人员反映在申报和承担财政项目时曾经遇到的突出问题包括:项目限定的人员费比例太低(59.7%)、申报周期过长(56.1%)、审批程序不透明(50.7%)、申报手续复杂(48.8%)、评审时拉关系走后门(45.4%)、资金到位不及时(36.1%)、结项验收走形式走过场(33.0%)、招标信息不公开(28.0%)、项目经费的违规使用或挪用(16.7%)。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/16322411.html>。