

基于低通滤波函数实现陀螺系统的反馈控制^{*}

都琳[†] 徐伟 贾飞蕾 李爽

(西北工业大学理学院应用数学系, 西安 710072)

(2006 年 10 月 1 日收到, 2006 年 11 月 4 日收到修改稿)

研究了采用有界阻尼反馈实现陀螺系统的控制问题. 首先利用 LaSalle 不变原理对受控系统进行了稳定性分析, 然后在反馈中引入二阶 Butterworth 低通滤波函数, 设计出依赖于可测信号的反馈控制策略. 数值模拟结果表明采用该方法能够有效的将混沌陀螺系统稳定到周期轨或者平衡点. 此外还讨论了控制参数及噪声对控制效果的影响. 结果表明该控制方法不仅操作简单, 易于实现, 而且在弱噪声干扰下具有较强的鲁棒性.

关键词: 反馈控制, 陀螺系统, Butterworth, 低通滤波器

PACC: 0545, 0710Y

1. 引言

陀螺仪(gyro)是一种惯性器件, 自问世以来被广泛运用于航空、航天、航海以及制导技术、工程测量等领域. 1981 年, Leipnik^[1]发现陀螺系统在某些参数及工作条件下会产生混沌现象. 由于混沌将严重影响陀螺元件运行的稳定性, 因此如何抑制或消除陀螺系统中的混沌成为保持其稳定性的关键问题.

近 20 年来, 随着非线性科学的蓬勃发展, 混沌控制在工程中的应用日益受到重视, 并成为国内外科学工作者的一个研究热点. 目前, 混沌控制的理论与方法已经得到充分研究, 针对不同的任务目标, 提出了不同的控制方法^[2-5]. 其中一大类属于变量反馈控制法^[3,4], 该类方法不必预先知道所控制系统的具体动力学模型, 不仅十分有效, 而且物理上易于实现, 但是它要耗费较大的能量, 代价较高. 基于此, Valery 等人^[6]提出了有界非线性阻尼反馈控制方法, 通过减少系统能量函数实现混沌控制. 同时 Alvarez^[7]使用该策略对典型的自治、非自治系统进行了混沌控制研究. 该方法理论上虽然有效, 但由于陀螺系统状态变量对测量误差高度敏感, 因而在实际系统中难以实现, 控制稳定性不够完善.

利用二阶巴特沃斯低通滤波器作为状态变量的估计, 结合有界阻尼反馈控制方法, 本文研究了对称

陀螺系统的控制及优化设计问题. 该控制方法融合了阻尼反馈控制、有界函数限制微扰和低通滤波器三者的优点, 通过调整系统反馈增益和滤波器截止频率, 能够对陀螺系统的混沌实施有效的控制. 仿真结果不仅证实了该方法的有效性, 还表明有较强的抗干扰能力, 可大大提高陀螺系统的控制性能.

2. 对称陀螺系统的复杂动力学行为

Chen 等人较早研究了对称陀螺系统的混沌现象^[8,9], 他们根据该系统的结构特点得到了其简化的力学模型, 并利用拉格朗日方程建立了该陀螺系统的微分动力学方程

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= g(x) - c_1 y - c_2 y^3 \\ &\quad + \beta \sin x + f \sin \Omega t \sin x, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $g(x) = -\alpha^2(1 - \cos x)^2 / \sin^3 x$, x 和 y 为状态变量, 分别表示陀螺系统的欧拉角位移和角速度, 满足 $|x| < \pi$. f 和 Ω 分别外界周期激励的振幅和频率, $c_1 y$ 和 $c_2 y^3$ 为线性和非线性阻尼, $-g(x) - \beta \sin x$ 为非线性恢复力. $\alpha, \beta, c_1, c_2, f, \Omega$ 均为正的系统参数. 考虑到非线性恢复力 $g(x)$ 在零点没有意义, 为了便于分析, 将其在零点泰勒展开为

$$\frac{(1 - \cos x)^2}{\sin^3 x} = \frac{x}{4} + \frac{x^3}{12} + O(x)^5,$$

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10332030, 10502042)和西北工业大学研究生创业种子基金(批准号: Z200655)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: lindu@nwpu.edu.cn, weixu@nwpu.edu.cn

$$\sin x = x - \frac{x^3}{6} + O(x)^5, \quad (2)$$

由于 $|x| < \pi$, 因此 (2) 式的高阶项可以省略, 于是原系统等价于

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -Px - Qx^3 - c_1y - c_2y^3 + f\sin\Omega t \sin x \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $P = \frac{\alpha^2}{4} - \beta$, $Q = \frac{\alpha^2}{12} + \frac{\beta}{6}$, $f(t) = f\sin\Omega t \sin x$, 其定义域为 $D = \{(x, \dot{x}) \in R \mid |x| < \pi\}$. 在包含原点的定义域内, 系统 (3) 只有一个不动点 $(x, y) = (0, 0)$.

当取参数为 $\alpha^2 = 100$, $\beta = 1$, $c_1 = 0.5$, $c_2 = 0.05$, $\Omega = 2$, 初值 $(x_0, y_0) = (0.25, 1.03)$ 时, 数值研究表明, 随着外激振幅 f 在 [32, 36] 范围内变化, 陀螺系统会产生复杂的动力学行为^[10]. 采用 Poincare 截面法做出关于 x 的分岔图, 其中频闪截面的时间间隔

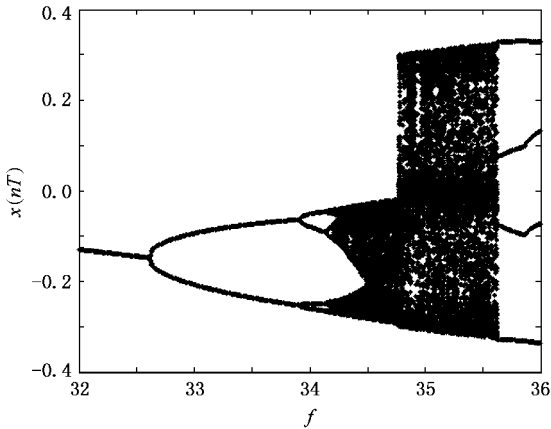


图 1 对称陀螺系统 (1) 随外激振幅 f 变化的分岔图

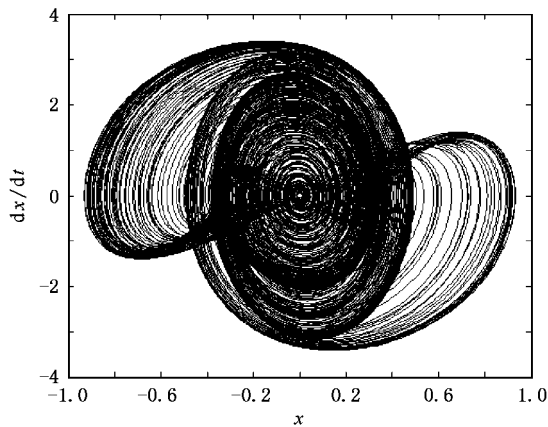


图 2 对称陀螺系统 (1) 在分岔参数 $f = 35$ 的相轨图

为 $T = 2\pi/\Omega$. 图 1 发现倍周期分岔是陀螺系统通向混沌的主要途径. 随着分岔参数 f 的增加, 系统由稳

定的 $1P$ 轨道不断倍周期分岔, 而后变为对称的混沌吸引子状态, 最后形成对称的 $4P$ 吸引子. 当分岔参数取为 $f = 35$, 图 2 表明陀螺系统为关于原点对称的奇怪吸引子.

3. 控制方法

3.1. 陀螺系统的控制器设计与稳定性分析

由于任何一个物理系统在最低能量下具有稳定状态, 因此可以通过减少混沌系统总能量的方法来达到控制混沌系统的目的. 同时为了克服多重稳态解, 在许多情形下通过限制微扰的方法, 即开窗口的办法, 在反馈线路中引入一些有界非线性元件来达到微扰限制. 基于上述原理, Valery 等人^[6]提出了有界非线性阻尼反馈控制策略:

$$u(t) = u_{\max} \cdot \tanh(-K\dot{x}(t)), \quad (4)$$

其中 $K > 0$ 为反馈控制增益, u_{\max} 为控制扰动的最大振幅. 将 (4) 式作为控制项引入陀螺系统 (3) 中, 则可得如下控后系统:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -Px - Qx^3 - c_1y - c_2y^3 \\ &\quad + f\sin\Omega t \sin x - u_{\max} \cdot \tanh(Ky). \end{aligned} \quad (5)$$

由于受控系统在不动点处有 $\dot{x} = 0$, 所以控后系统 (5) 与原系统 (3) 有相同的不动点 $(0, 0)$. 显然该微分方程是列娜方程^[11], 则控后系统的势能可以表示为

$$U(x) = \int_0^x (Pu + Qu^3) du = Px^2/2 + Qx^4/4 \quad (6)$$

同时机械系统的动能可以表示为 $K(x) = \frac{1}{2}\dot{x}^2$. 为了研究平衡点 $(0, 0)$ 的稳定性, 我们选取连续可微的总能量函数作为备选的 Lyapunov 函数

$$\begin{aligned} E(x) &= K(x) + U(x) \\ &= \frac{1}{2}\dot{x}^2 + Px^2/2 + Qx^4/4, \end{aligned} \quad (7)$$

其导数为

$$\begin{aligned} \dot{E}(t, x) &= \dot{x}(\ddot{x} + \dot{U}(x)) \\ &= \dot{x}(-c_1\dot{x} - c_2\dot{x}^3 \\ &\quad - u_{\max} \cdot \tanh(K\dot{x}) + f(t)) \\ &\leq -c_1\dot{x}^2 - c_2\dot{x}^4 - u_{\max} \cdot \tanh(K\dot{x}) \cdot \dot{x} \\ &\quad + \left| \dot{x} |f(t)| \right|. \end{aligned} \quad (8)$$

因为 $|f(t)| = |f\sin\Omega t \sin\theta| \leq f$, $-c_1\dot{x}^2 - c_2\dot{x}^4 \leq 0$,

且有 $u_{\max} \cdot \tanh(K\dot{x}) \cdot \dot{x} = |\dot{x}| \cdot u_{\max} \cdot \tanh(K|\dot{x}|)$, 则总能量 $E: D \rightarrow R$ 沿系统轨线的导数满足

$$\dot{E}(x) \leq -|\dot{x}|(u_{\max} \cdot \tanh(K|\dot{x}|) - f). \quad (9)$$

令 $T = \max\{f/u_{\max}, 1\}$, 则当 $|\dot{x}| \geq H$ ($H \geq \text{Arth}(T)K$) 时, $\dot{E}(x) \leq 0$. 因此 \dot{x} 满足有界 $|\dot{x}| \leq H$. 设 $\Omega = \{x \in D \mid |\dot{x}| \geq \text{Arth}(T)K\} \subset D$ 为方程(5)的正不变紧集, 则能量函数在 Ω 内满足 $\dot{E}(x) \leq 0$. 根据 Lasalle 不变原理^[12], 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 始于 Ω 内的每个解都趋于最大不变集 $M = \{x \in \Omega \mid |\dot{x}| = \text{Arth}(T)K\}$. 显然, 最大不变集的范围由控制参数 K, u_{\max} 和外激强度 f 决定, 若固定参数 f 和 K , 当最大振幅 $u_{\max} \rightarrow \infty$, 系统轨道收敛的不变集变为 $M = \{x \in \Omega \mid |\dot{x}| = 0\}$, 此时系统的平衡点渐近稳定. 因此, 若控制强度 $u_{\max} > u_{\max}^*$ (u_{\max}^* 为临界振幅), 有界阻尼反馈(4)可以增加混沌系统的耗散程度, 从而使受控系统稳定到平衡态.

3.2. 基于二阶低通滤波器实现陀螺系统的反馈控制

一种控制方法是否能应用于工程实践, 取决于两条原则: 一是实际中要易于实现和操作, 另一方面控制量要物理上可精确测量. 由于陀螺测速仪对噪声干扰的高度敏感性, 使测得的角速度信号不精确. 这种情况下, 阻尼反馈信号(4)就不能保证其控制的稳定性与有效性. 根据数字信号采样原理, 一般采用低通滤波器对采样信号进行数字滤波^[13]. 实际上, 信号的损失意味着能量的损失, 即系统总能量降低, 这也促进了系统的稳定化. 采用的控制过程可以表述为: 令 $s = d/dt$ 为时间微分算子, 于是(4)中的微分反馈量 \dot{x} 可被近似为

$$\dot{x}^e(t) = H_{LP}(s)\dot{x}(t) = H_{LP}(s)sx(t), \quad (10)$$

式中 $H_{LP}(s) = w_c^2 / (s^2 + w_c \cdot s / Q_p + w_c^2)$ 为二阶低通转移函数, w_c 为通带截止角频率, 当 $Q_p = 1/\sqrt{2}$ 时为二阶 Butterworth 低通滤波器^[14]. 该滤波器仅允许角频率低于 w_c 的通过, 抑制或衰减高频的干扰分量, 即当 $s \rightarrow +\infty, w \rightarrow +\infty$ 时, $H_{LP}(s) \rightarrow 0$. 通过变换, (10)式等价于如下微分方程:

$$\frac{d^2 \dot{x}^e}{dt^2} + \frac{w_c}{Q_p} \cdot \frac{d\dot{x}^e}{dt} + w_c^2 \dot{x}^e = w_c^2 \frac{dx}{dt}. \quad (11)$$

引入中间变量 $z^{\text{def}} = w_c \dot{x}^e / Q_p - w_c^2 x$, 则 $\dot{x}^e = Q_p \cdot (z/w_c + w_c x)$, 将其代入(11)式中. 于是角速度的估计值

\dot{x}^e 可以转化为如下确定系统:

$$\dot{x}^e = Q_p \cdot (z/w_c + w_c x), \quad (12)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{dz}{dt} \cdot \frac{w_c}{Q_p} + w_c^2 z + w_c^4 x + w_c^2 \ddot{x} = 0. \quad (13)$$

综合上述二阶 Butterworth 低通滤波器设计思想, 我们提出如下反馈控制函数:

$$u = u_{\max} \cdot \tanh(-K\dot{x}^e) = -u_{\max} \cdot \tanh(K \cdot Q_p \cdot (z/w_c + w_c x)) \quad (14)$$

其中 w_c 为滤波器截止角频率, w_c 越大, 角速度的估计越光滑; K 为控制增益, 当 K 很小, 控制微扰为 S 型函数, 控制行为相当于振子阻尼的线性调节; 当 $K \rightarrow \infty$, 微扰变成定值反馈, 即 $u_{\max} \tanh(-K\dot{x}^e) \rightarrow -u_{\max} \text{sig}(\dot{x}^e)$; 最大振幅 u_{\max} 由控制器的控制能力决定. 根据 3.1 部分的稳定性分析, 随着 u_{\max} 的增加, 受控系统稳定性增加. 如果确定参数 K 和 w_c , 通过调节参数 u_{\max} 的值, 就可以抑制陀螺系统的混沌状态. 最终的受控陀螺系统可以表示为如下一阶四维微分方程组:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= g(x) - c_1 y - c_2 y^3 + \beta \sin x + f \sin \Omega t \sin x \\ &\quad - u_{\max} \tanh[K \cdot Q_p \cdot (z + w_c x)], \\ \dot{z} &= v, \\ \dot{v} &= -w_c v / Q_p - w_c^2 z - w_c^4 x - w_c^2 \ddot{x}. \end{aligned} \quad (15)$$

4. 数值仿真研究

为验证上述反馈控制方法的有效性, 我们采用六阶龙格库塔算法, 对受控陀螺系统(15)进行了数值模拟. 给定初始条件 $(x_0, y_0, z_0, v_0) = (0.21, 1.03, 0, 0)$, 控制起始时间为 $t_0 = 0$, 系统参数仍选定为 $\alpha^2 = 100, \beta = 1, c_1 = 0.5, c_2 = 0.05, \Omega = 2, f = 35$.

4.1. 控制结果

取控制参数为 $K = 5.0, w_c = 10.0$, 我们得到受控系统(15)除去 5000 步瞬态后的相轨图(图 3). 通过选择不同控制振幅, 可以得到不同的控制效果: 当 $u_{\max} = 0.05$ 时, 原对称的混沌系统(图 2)变为非对称系统; 当 $u_{\max} = 0.29$ 时, 反馈控制信号使状态变量由混沌变为有序的 $2P$ 轨道; 随着 u_{\max} 微增到 0.32, 系统由 $2P$ 变为 $1P$; 最后取 $u_{\max} = 0.60$, 受控系统稳定到平衡点 $(0, 0)$. 当 $u_{\max} = 1.0$ 时, 图 4 反映了控制输入量 u 与状态变量 x, y 随时间变化的历程图. 假定

系统被控制到 $\{ (x, y) \mid |x| < 10^{-3}, |y| < 10^{-3} \}$, 我们就认为系统被控制到平衡点. 数值结果表明, 当 t

$= 7.15$ 时混沌系统完全被控制到不动点 $(0, 0)$, 此时相应的控制项 u 消失, 系统稳定在平衡态不再变化.

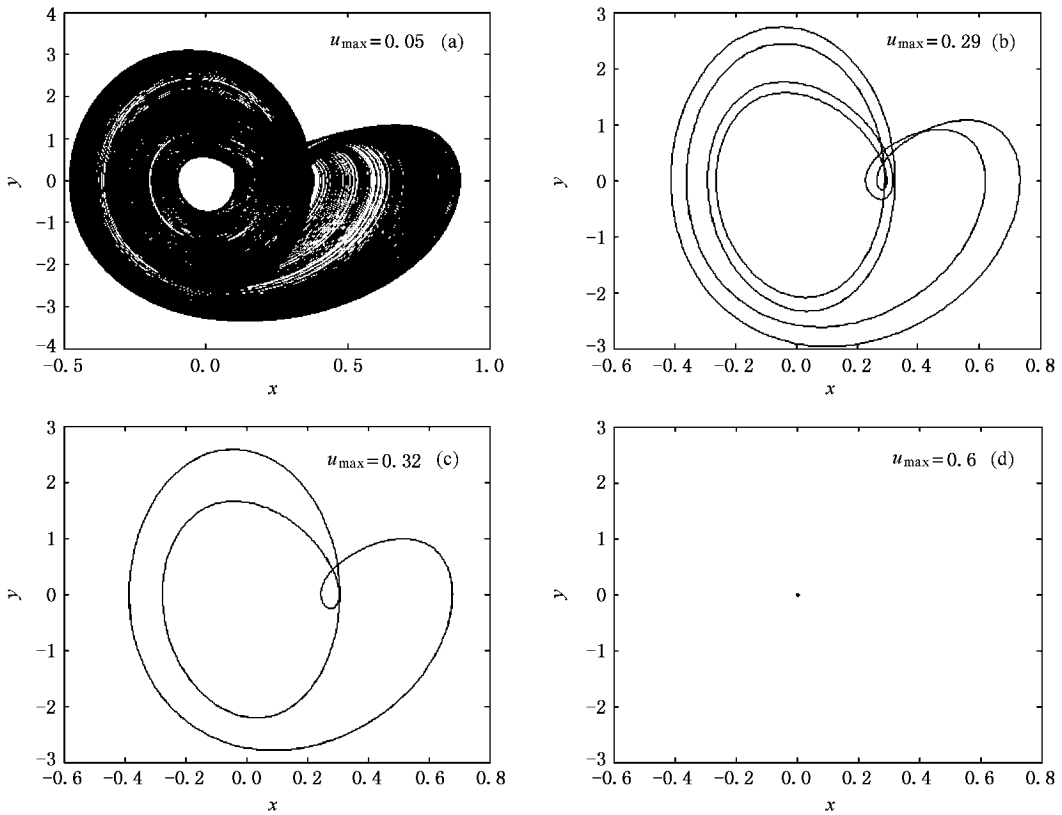


图3 受控陀螺系统(15)在控制参数 $K = 5.0, w_c = 10.0$ 下的相轨图 (a) $u_{\max} = 0.05$ (b) $u_{\max} = 0.33$ (c) $u_{\max} = 0.35$ (d) $u_{\max} = 0.6$

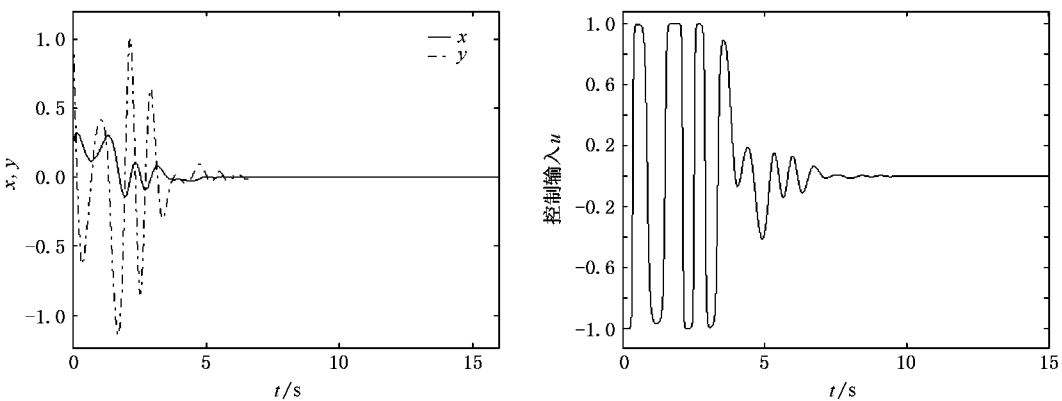


图4 控制输入 u 与状态变量 (x, y) 的时间历程图(控制参数为 $w_c = 10.0, K = 5.0, u_{\max} = 1.0$)

4.2. 控制参数的影响

为了分析控制参数 u_{\max} 对控制效果的影响, 我们取 u_{\max} 为分岔参数, 并选定截止角频率 $w_c = 10.0$. 对于不同的控制增益 $K = 1.0$ 和 $K = 5.0$, 图5得到了类似变化趋势的分岔图和最大 Lyapunov 指数图.

由图5发现, 控后系统发生一系列逆分岔, 即系统由混沌态依次被控制到 $4P, 2P, 1P$ 以及平衡点. 当 $K = 1.0$, 系统分岔点对应的临界振幅 u_{\max}^* 分别为 $0.21, 0.27, 0.50$ 和 0.94 ; 当 $K = 5.0$, 系统分岔点对应的 u_{\max}^* 分别为 $0.12, 0.16, 0.31$ 和 0.56 . 我们发现, 随着控制增益增大, 系统控制到稳定态所需要的临

界控制强度 u_{max}^* 减小.

进一步固定 $w_c = 10.0$, 令 K 和 u_{max} 在 $[0, 10]$,

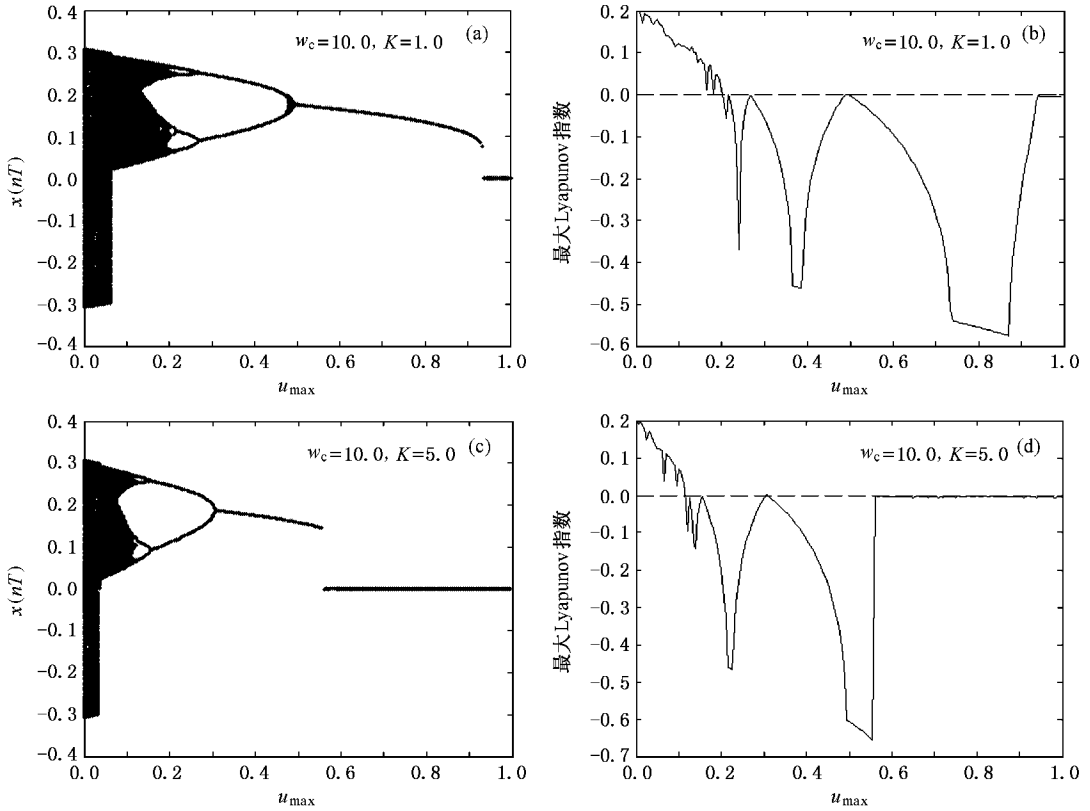


图 5 受控陀螺系统的分岔图和最大 Lyapunov 指数图 (a, b) $w_c = 10.0, K = 1.0$ (c, d) $w_c = 10.0, K = 5.0$

$[0, 1]$ 内变化, 图 6 表示了系统在参数域 (K, u_{max}) 内的控制结果. 黑色区域表明控后系统仍为混沌态, 白色区域表明系统最终控制到 $1P$ 轨道或者平衡点, 中间两层中深灰色和浅灰色分别表示 $4P$ 态和 $2P$ 态, 图中区域交界处为 $3P$ 态, 表示系统发生倍周期分岔. 数值仿真给出了控制时间随控制增益 K 变化的散点图 (图 7). 结果表明若 K 较小, 控制时间迅速减小, 随着 K 增大, 控制时间出现波动, 然后缓

慢递减.

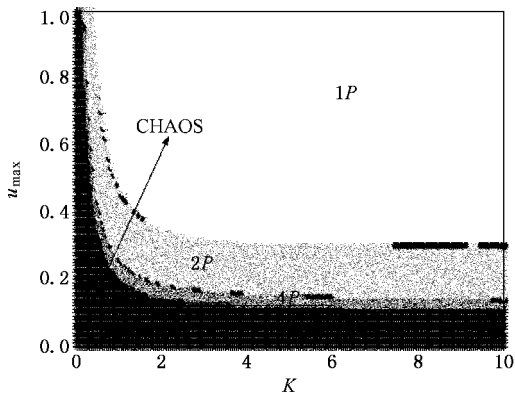


图 6 受控系统 (15) 在参数域内的变化

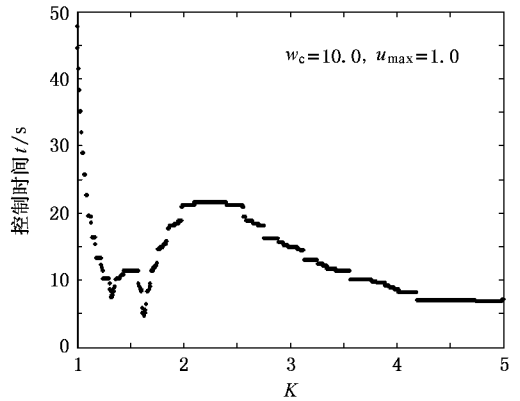


图 7 控制时间随控制参数 K 的演化

4.3. 噪声的影响

实际工程中, 陀螺系统可能受到各种外界噪声的干扰, 假设对受控系统 (15) 的施加幅度为 σ 的高斯白噪声, 即 $\dot{X} \rightarrow f(t, X) + \sigma \xi(t)$, 其中 $\xi(t)$ 为标准高斯白噪声, 其统计性质满足 $\xi(t) = 0, \xi(t), \xi(t + \tau) = \delta(\tau)$. 用随机数产生方法^[15]产生的白

噪声作用于受控系统,图 8 显示了受控系统在噪声强度为 $\sigma = 0.01$ 和 $\sigma = 0.1$ 的控制结果,控制时间分别为 8.71 和 25.86.将图 8 与图 4 比较可知,当系统仅受小噪声强度作用时,仿真结果基本一致,噪声对

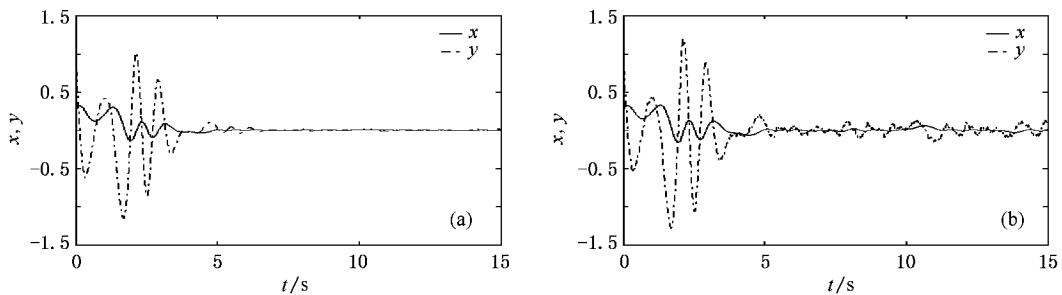


图 8 控后系统(15)在噪声干扰下的控制结果 (a) $\sigma = 0.01$ (b) $\sigma = 0.1$

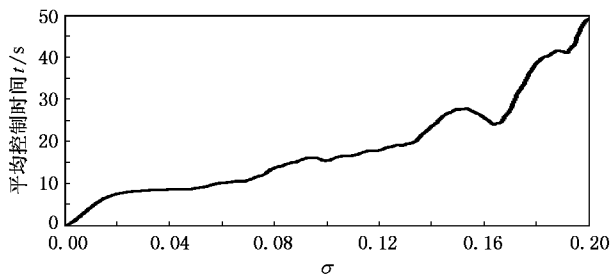


图 9 平均控制时间随噪声强度 σ 的变化

了拟合的平均控制时间随噪声强度变化的曲线图,表明随着噪声干扰强度 σ 的增大,系统越来越难以控制.

5. 结 论

本文将有限阻尼反馈控制器引入到陀螺系统的控制中,设计出基于二阶 Butterworth 滤波器的反馈控制策略,实现了对陀螺系统的有效控制.通过仿真

其性态影响不大.当噪声强度变大,系统在控制到稳态的过程中会出现小扰动,但在一定的噪声范围内,仍可控制到平衡点附近.说明该控制方法能够抑制外部小噪声的干扰,具有较强的鲁棒性.图 9 给出

模拟,讨论了采用该访法时控制参数 u_{\max} , K , w_c 的取值规律和相应的控制效果.研究表明,该反馈控制器不仅能对非自治陀螺系统实施有效的控制,具有较强的抗干扰能力,还有如下特点:

1. 设计的控制器是系统状态变量的有界非线性函数,在实际中只需测量陀螺系统的角速度输出量,因此该控制策略具有很好的可操作性,易于实现,简单实用.

2. 实施控制时,可以根据控制代价和控制速度的要求,通过匹配控制参数,把受控系统稳定在不同的周期轨道或者不动点上.

3. 该控制方法不需预先计算系统的参数和目标轨道信息,是一种“自控制反馈”方法^[3].同时,控制扰动不会破坏系统原有的内在结构,不需要外加的反馈补偿,这些特点对于实际系统的应用是十分重要的.本文的研究结果对陀螺系统的控制应用将起到一定的促进作用.

[1] Leipnik R B, Newton T A 1981 *Phys. Lett. A* **63** 86
 [2] Zheng Y A 2006 *Chin. Phys.* **15** 2549
 [3] Jiang S M, Tian L X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3322 (in Chinese)
 [蒋书敏、田立新 2006 物理学报 **55** 3322]
 [4] Li R H, Xu W, Li S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 598 (in Chinese)
 [李瑞红、徐伟、李爽 2006 物理学报 **55** 598]
 [5] Gong L H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3502 (in Chinese) [龚礼华 2005 物理学报 **54** 3502]
 [6] Valery T, Ricardo C, Victor P 2004 *Phys. Lett. A* **320** 408
 [7] Alvarez R J, Espinosa P G, Puig 2003 *Phys. Lett. A* **316** 196
 [8] Chen H K 2002 *Journal of Sound and Vibration* **255** 719

[9] Wu H B, Mei F X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2474 (in Chinese) [吴惠彬、梅凤翔 2005 物理学报 **54** 2474]
 [10] Dooren R V 2003 *Journal of Sound and Vibration* **268** 632
 [11] Liu B Z, Peng J H 2004 *Nonlinear Dynamics* (Beijing: Higher Education Press) p46 (in Chinese) [刘秉正、彭建华 2004 非线性动力学(北京:高等教育出版社)第 46 页]
 [12] Khalil H K 1995 *Nonlinear System* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p78 (in Chinese) [Khalil H. K 著、朱义胜、董辉、李作洲译 2005 非线性系统(北京:电子工业出版社)第 78 页]
 [13] Liu H W, Sun X W, Li Z F, Qian R, Zhou M 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3082 (in Chinese) [刘海文、孙晓玮、李征帆、钱蓉、周

- 2003 物理学报 52 3082]
- [14] Wang Y G 2003 *Digital filters and signal processing*(Beijing Science Press) p23 (in Chinese)[王友功译 2003 数字滤波器与信号处理(北京 科学出版社)第 23 页]
- [15] Mao S S ,Wang J L ,Pu X L 2003 *Advanced Mathematical Statistics* (Beijing : Higher Education Press , Springer-Verlag) p407 (in Chinese)[茆诗松、王静龙、濮晓龙 2003 高等数理统计(北京 :高等教育出版社 ,施普林格出版社)第 407 页]

Control of gyro system based on lowpass filter function feedback^{*}

Du Lin[†] Xu Wei Jia Fei-Lei Li Shuang

(Department of Applied Mathematics ,Northwestern Polytechnical University ,Xi 'an 710072 ,China)

(Received 1 October 2006 ; revised manuscript received 4 November 2006)

Abstract

This paper presents a method of controlling gyro system based on bounded damping feedback. Firstly ,using LaSalle invariable theorem ,a stability analysis is given theoretically. Then by introducing a two order Butterworth lowpass filter ,a feedback controller is proposed on the basis of measured signals. The chaotic gyro system can be stabilized to different periodic orbits or fixed points in the numerical simulation. Furthermore ,the effects of control parameter and noise are investigated. The results show that the implementation of this control method is simple and easy. In addition ,the controller has strong robustness against weak external noise.

Keywords : feedback control , gyro system , Butterworth , lowpass filter

PACC : 0545 , 0710Y

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10332030 ,10502042),and the Graduate Starting Seed Fund of Northwestern Polytechnical University (Grant No. Z200655).

[†] Corresponding author. E-mail : lindu@nwpu.edu.cn ,weixu@nwpu.edu.cn