

分数阶同步磁阻电机的混沌与控制

刘辉昭, 陈晓霞

(河北工业大学 理学院, 天津 300401)

摘要:利用分数阶 Caputo 微分及其理论, 讨论了分数阶同步磁阻电机的混沌及其控制问题. 首先利用分岔图、最大 Lyapunov 指数以及相图和时序图, 分析了分数阶同步磁阻电机的混沌特性, 研究了阶次对混沌行为的影响, 得出同量分数阶系统出现混沌运动的最低阶次约为 2.94. 其次基于分数阶系统的稳定性理论, 构造 Lyapunov 函数, 设计合理的控制器, 使其达到全局渐进稳定. 最后通过数值仿真验证了该方法的有效性.

关键词:分数阶同步磁阻电机; 混沌; 控制

中图分类号: O231.2

文献标志码: A

由于同步磁阻电机(Synchronous Reluctance Motor, SynRM)的转子不需要励磁, 而是利用转子直轴和交轴气隙磁阻不等产生同步磁阻转矩. 同其他交流电机相比, SynRM 具有结构简单、运行可靠等诸多优点, 但是 SynRM 在某些工作条件下会出现霍夫分叉. 通过霍夫分叉失去稳定时, 电机的轴组件的三相电压失去控制, 表现出极其复杂的混沌行为. 这些混沌行为严重影响着系统的动态性能和稳定运行^[1]. 因此研究 SynRM 的混沌动力学行为和控制具有重要的意义.

迄今为止, 采用三维整数阶微分方程作为 SynRM 的系统模型, 对其产生的混沌动力学行为有了充分的研究, 并提出控制整数阶 SynRM 系统的混沌运动方法^[2]. 分数阶微积分是整数阶微积分的推广, 整数阶微积分是分数阶微积分的特例, 研究分数阶系统更具有普遍意义^[3-6]. 在各个领域, 越来越多的分数阶混沌动力学分析^[7-9]和控制方法^[10-13]不断涌现. 例如, 古远凤等^[14]研究了整数阶 Willis 环脑动脉瘤系统的混沌分析及随机相位控制. 之后高飞等^[15]提出采用分数阶微积分刻画血液的运动是相对合理的. 进而提出了分数阶 Willis 环脑动脉瘤系统, 并分析其混沌行为和混沌控制. 文献^[16-17]中研究了整数阶永磁同步电动机的混沌控制. 文献^[18]中提出永磁同步电动机系统内在阻尼带来的动力效应, 用分数阶微积分描述更为合理, 进而提出了分数阶永磁同步电动机系统, 并分析其混沌特性以及混沌控制. 现有的相关文献对整数阶 SynRM 的混沌与控制研究比较充分, 而关于分数阶 SynRM 混沌和控制的问题尚不多见.

本文基于文献^[2]中的整数阶 SynRM 系统, 结合分数阶微积分的基本理论, 运用分数阶 Caputo 微分将整数阶 SynRM 系统拓展到分数阶 SynRM. 采用经典的动力学分析方法(包括分岔图、最大 Lyapunov 指数和相图)对分数阶 SynRM 的混沌行为进行详细的分析. 此外, 文中提出的控制方法可以使系统达到全局渐进稳定.

1 分数阶微积分的定义

分数阶微积分有两种常用的定义, 即 Riemann-Liouville(R-L)定义和 Caputo 定义. 在纯数学领域中多用 R-L 定义. Caputo 定义有传统的易于物理上实现和解释的初始条件, 并且对常数的微分为零, 所以多用于实际应用. 本文采用 Caputo 定义^[3].

收稿日期:2017-03-02;修回日期:2017-04-20.

基金项目:国家自然科学基金(11371110)

作者简介:刘辉昭(1963-),男,天津人,河北工业大学教授,博士,研究方向为微分方程.

通信作者:陈晓霞, E-mail:201521101003@stu.hebut.edu.cn.

定义 1 函数 $f(t)$ 的 α 阶积分定义为

$${}_a D_t^{-\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t (t-x)^{\alpha-1} f(x) dx, (t > a, \alpha > 0).$$

其中, a, t 分别为积分的下限和上限, $f(t)$ 为被积函数, α 为积分次数, $\Gamma(\alpha)$ 为欧拉函数.

分数阶微分是利用分数阶积分来定义的, 其定义如下:

定义 2 函数 $f(t)$ 的 α 阶微分定义为

$${}_a D_t^\alpha f(t) = {}_a D_t^{-(m-\alpha)} {}_a D_t^m f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(x)}{(t-x)^{\alpha+1-n}} dx, (n-1 < \alpha < n).$$

2 分数阶 SynRM 系统及其性质

2.1 分数阶 SynRM 模型的建立

基于 SynRM 混沌系统的模型可写作^[2]

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + \omega_e L_q i_q + u_d, \\ L_q \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - \omega_e L_d i_d - \Phi \omega_g + u_q, \\ J_{eq} \frac{d\omega_g}{dt} = \frac{3}{4} n_p (L_d - L_q) i_d i_q - B \omega_g - T_L. \end{cases} \quad (1)$$

上式中, i_d, i_q 与 u_d, u_q 分别为定子电流与电压的直轴与交轴的分量; R_s 为定子电阻; ω_e, ω_g 分别为电角频率与发电机转速; L_d, L_q 分别为直轴与交轴的电感; J_{eq} 为机组等效转动惯量; Φ 为永磁磁铁的磁通; T_e 为转磁转矩; B 为发电机的转动黏滞系数.

假设发电机气隙非均匀, d 轴与 q 轴电感量不相同, 经过仿射变换与时间尺度变换得到了的无量纲的状态模型如下

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -bx + yz + \hat{u}_d, \\ \frac{dy}{dt} = -y - xz + \gamma z + \hat{u}_q, \\ \frac{dz}{dt} = -az + xy - \hat{T}_L. \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x = i_d, y = i_q, z = \omega_g$. 当 $\hat{u}_d = 0, \hat{u}_q = 0, \hat{T}_L = 0$ 可以看 SynRM 空载运行的情况, 现取某电机的参数如下^[19]: $a = 1.6, b = 0.2, \gamma = 10$.

考虑系统内在的阻尼带来的动力效果可以应用分数阶微积分进行描述, 结合(2)建立(3)所示的分数阶 SynRM 系统模型.

$$\begin{cases} D^{q_1} x = -bx + yz + \hat{u}_d, \\ D^{q_2} y = -y - xz + \gamma z + \hat{u}_q, \\ D^{q_3} z = -az + xy - \hat{T}_L. \end{cases} \quad (3)$$

其中, $q_i \in (0, 1] (i = 1, 2, 3)$ 是分数阶次. 当 $q_1 = q_2 = q_3 = q$ 时, 式(3) 对应同量分数阶系统; 当 $q_i (i = 1, 2, 3)$ 不尽相同时, 则式(3) 对应非同量分数阶系统.

2.2 平衡点及其稳定性

令方程(2)的右边等于 0, 可以求出其平衡点 $E_0 = (x_0, y_0, z_0)$. 在上述参数的条件下可求出系统的 3 个平衡点分别为

$$E_{01} = (0, 0, 0); E_{02} = (0.162\ 6, 2.828\ 4, 0.057\ 5); E_{03} = (9.837\ 3, 2.828\ 4, 3.478\ 0).$$

在平衡点处线性化系统, 得其 Jacobian 矩阵

$$J(x_0, y_0, z_0) = \begin{bmatrix} -b & z_0 & y_0 \\ -z_0 & -1 & -x_0 + \gamma \\ y_0 & x_0 & -a \end{bmatrix},$$

Jacobian 矩阵在平衡点处的特征方程为

$$f(\lambda) = \lambda^3 + A_2\lambda^2 + A_1\lambda + A_0,$$

其中,

$$A_2 = a,$$

$$A_1 = x_0^2 - y_0^2 + z_0^2 - \gamma x_0 + 2b + 1,$$

$$A_0 = 2x_0 y_0 z_0 - \gamma y_0 z_0 + a z_0^2 + b x_0^2 - b \gamma x_0 + a + 2ab.$$

根据 Routh-Hurwitz 判据,要使平衡点稳定,所有的特征值都必须都具有负实部.此时应满足 $A_2 > 0, A_1 > 0, A_0 > 0, A_2 A_1 - A_0 > 0$. 当 $a = 1.6, b = 0.2, \gamma = 10$ 时,系统(2)在 3 个平衡点处的特征值都不具有负实部, E_{01}, E_{02}, E_{03} 都是不稳定的平衡点.

2.3 同量分数阶 SynRM 系统

对于 $q_1 = \dots = q_n = q$ 的同量分数阶 SynRM 系统(3),可先利用分岔图和最大 Lyapunov 指数估算混沌运动的阶次的范围,再利用相图和时序图验证.用 MATLAB 对其进行数值计算,取 $a = 1.6, b = 0.2, \gamma = 10$.

图 1 给出了 x 随着阶次 q 的变化的分岔图.当 $q \in (0.9, 0.96)$ 时系统是稳定状态,当 $q \geq 0.98$ 时系统出现较强的混沌行为.当 $q \in (0.96, 0.98)$ 时,出现特别稀疏的点,吸引域也较小,很难判断是否会出现混沌现象.进而又计算了同量分数阶 SynRM 系统(3)的最大 Lyapunov 指数.由于系统(3)是分数阶系统,该系统比较复杂.综合考虑求解的精确度和复杂度,选用 Wolf 方法计算最大 Lyapunov 指数.图 2 是用 Wolf 方法计算的最大 Lyapunov 指数在 $q \geq 0.98$ 时,其最大 Lyapunov 指数大于零.

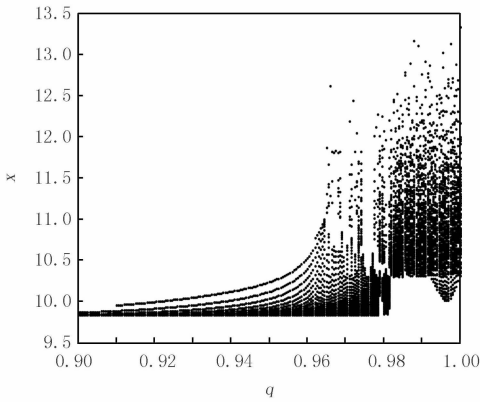


图1 系统(3)随阶次q变化的分岔图

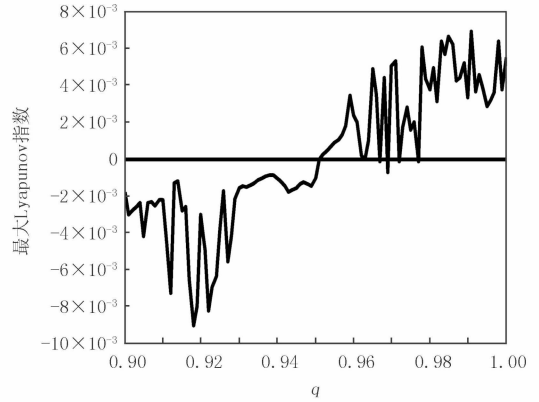


图2 系统(3)随阶次q变化的最大Lyapunov指数

为进一步研究阶次 q 对混沌的影响,通过利用分数阶 SynRM 的相图和时序图.图 3 和图 4 分别为 $q = 0.97$ 时分数阶 SynRM 的相图和时序图.当 $q = 0.97$ 时系统是拟周期状态.图 5 为 $q = 0.98$ 时的相图.这时出现混沌运动状态,所以对于同量分数阶 SynRM 而言,当时出现混沌,即同量分数阶系统出现混沌的最低阶次约为 2.94.

2.4 非同量分数阶 SynRM 系统

考虑 $q_1 \in (0, 1), q_2 = q_3 = 1$ 的非同量分数阶 SynRM 系统.

图 6 是 x 随阶次 q_1 变化的分岔图,再结合图 7 给出的 Lyapunov 指数图,可知当 $q_1 = 0.95$ 时出现混沌现象.同时图 8 和图 9 又给出 $q_1 = 0.94$ 和 $q_1 = 0.95$ 的相图做对比,可知当 $q_1 \geq 0.95$ 时,非同量分数阶系统出现混沌现象.由此可知同量分数阶系统与非同量分数阶系统出现混沌的阶次的临界值不同.

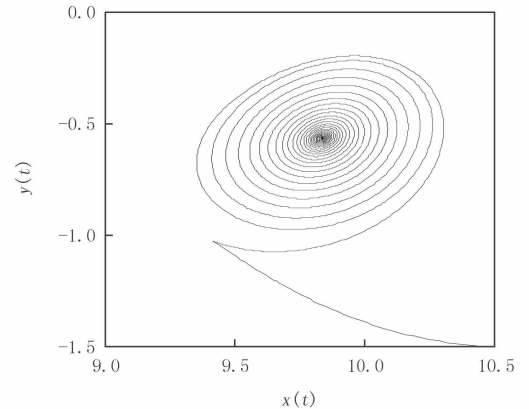


图3 阶次q=0.97的x-y平面相图

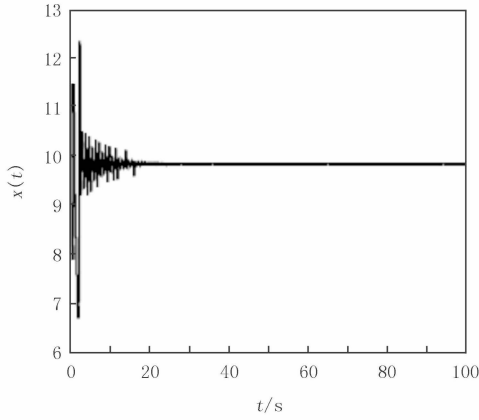


图4 阶次 $q=0.97$ 的 x 的时序图

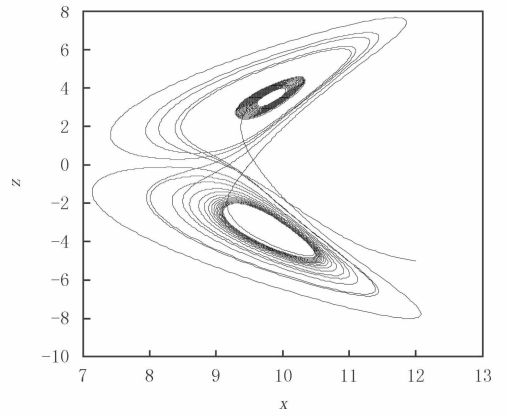


图5 同量分数阶SynRM系统阶次 $q=0.98$ 的 $x-z$ 平面相图

3 分数阶 SynRM 的混沌控制

分数阶 SynRM 在工作时,出现的混沌行为影响电机的正常工作,所以要控制这种混沌行为.本节通过构造分数阶 Lyapunov 函数,来控制系统最后达到全局渐近稳定状态.

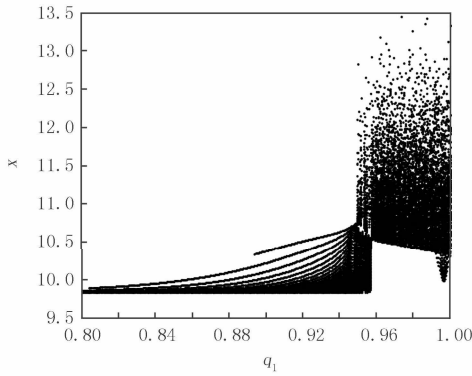


图6 系统(3)随阶次 q_1 变化的分岔图

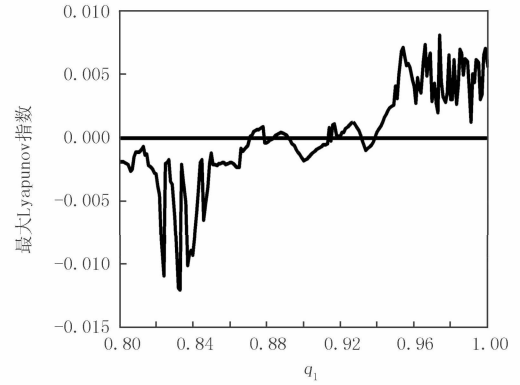


图7 系统(3)随阶次 q_1 变化的最大Lyapunov指数

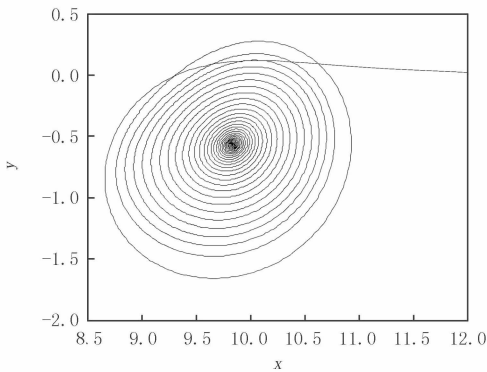


图8 非同量阶次 $q_1=0.94$ 的 $x-y$ 相图

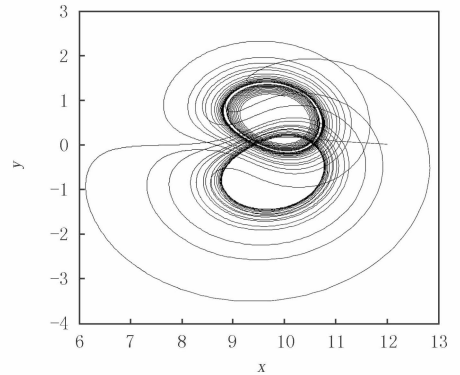


图9 非同量阶次 $q_1=0.95$ 的 $x-y$ 相图

定理 1 考虑系统(3)空载的情况,设计控制器 $u = [u_x, u_y, u_z]^T$,受控系统(3)可以写成如下形式:

$$\begin{cases} D^{q_1} x = -bx + yz + u_x, \\ D^{q_2} y = -y - xz + \gamma z + u_y, \\ D^{q_3} z = -az + xy + u_z, \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -xz - \gamma z \\ 0 \end{pmatrix}$. 则受控系统(4)是全局渐近稳定的.

证明 取正定函数

$$V(x(t), y(t), z(t)) = \frac{1}{2}x(t)^2 + \frac{1}{2}y(t)^2 + \frac{1}{2}z(t)^2,$$

则

$${}_0D_t^\eta V(x(t), y(t), z(t)) = \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_1} x(t)^2 + \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_2} y(t)^2 + \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_3} z(t)^2.$$

由 Caputo 导数的定义可知

$${}_0D_t^{\eta_1} x(t) = \frac{1}{\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{\dot{x}(\tau)}{(t - \tau)^{\eta_1}} d\tau,$$

则有

$$x(t) {}_0D_t^{\eta_1} x(t) = \frac{1}{\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{x(t)\dot{x}(\tau)}{(t - \tau)^{\eta_1}} d\tau, \tag{5}$$

$$\frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_1} x^2(t) = \frac{1}{\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{x(\tau)\dot{x}(\tau)}{(t - \tau)^{\eta_1}} d\tau. \tag{6}$$

式(5) - 式(6)得
$$x(t) {}_0D_t^{\eta_1} x(t) - \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_1} x^2(t) = \frac{1}{\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{[x(t) - x(\tau)]\dot{x}(\tau)}{(t - \tau)^{\eta_1}} d\tau. \tag{7}$$

令 $y(s) = x(t) - x(s)$, 有 $\dot{y}(s) = \frac{dy(s)}{ds} = -\frac{dx(s)}{ds}$.

将上式带入式(7)有

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{[x(t) - x(\tau)]\dot{x}(\tau)}{(t - \tau)^{\eta_1}} d\tau &= -\frac{1}{\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{y(s)\dot{y}(s)}{(t - s)^{\eta_1}} ds = -\frac{1}{\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{y(s)}{(t - s)^{\eta_1}} dy(s) = \\ &= -\frac{1}{2\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{1}{(t - s)^{\eta_1}} dy^2(s) = -\frac{1}{2\Gamma(1 - \eta_1)} \left[\frac{y^2(s)}{(t - s)^{\eta_1}} \Big|_0^t - \int_0^t y^2(s) d(t - s)^{-\eta_1} \right] = \\ &= -\left[\frac{y^2(s)}{2\Gamma(1 - \eta_1)(t - s)^{\eta_1}} \right] \Big|_{s=t} + \frac{y_0^2}{2\Gamma(1 - \eta_1)t^{\eta_1}} + \frac{q_1}{2\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{y^2(s)}{(t - s)^{\eta_1+1}} ds. \end{aligned} \tag{8}$$

对于上式中的第一项 $\left[\frac{y^2(s)}{2\Gamma(1 - \eta_1)(t - s)^{\eta_1}} \right] \Big|_{s=t}$, 可以写成如下形式

$$\lim_{s \rightarrow t} \frac{y^2(s)}{2\Gamma(1 - \eta_1)(t - s)^{\eta_1}} = \lim_{\tau \rightarrow t} \frac{[x(t) - x(\tau)]^2}{2\Gamma(1 - \eta_1)(t - \tau)^{\eta_1}} = \frac{1}{2\Gamma(1 - \eta_1)} \lim_{\tau \rightarrow t} \frac{[x^2(t) - 2x(t)x(\tau) + x^2(\tau)]}{(t - \tau)^{\eta_1}}.$$

用洛必达法则有

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\Gamma(1 - \eta_1)} \lim_{\tau \rightarrow t} \frac{[x^2(t) - 2x(t)x(\tau) + x^2(\tau)]}{(t - \tau)^{\eta_1}} &= \frac{1}{2\Gamma(1 - \eta_1)} \lim_{\tau \rightarrow t} \frac{[-2x(t)\dot{x}(\tau) + 2x(\tau)\dot{x}(\tau)]}{-q_1(t - \tau)^{\eta_1-1}} = \\ &= \frac{1}{2\Gamma(1 - \eta_1)} \lim_{\tau \rightarrow t} \frac{[2x(t)\dot{x}(\tau) - 2x(\tau)\dot{x}(\tau)](t - \tau)^{1-\eta_1}}{q_1} = 0. \end{aligned}$$

式(8)后两项 $\frac{y_0^2}{2\Gamma(1 - \eta_1)t^{\eta_1}} + \frac{q_1}{2\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{y^2(s)}{(t - s)^{\eta_1+1}} ds \geq 0$, 综上得证(7)式 $x(t) {}_0D_t^{\eta_1} x(t) - \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_1} x^2(t) = \frac{1}{\Gamma(1 - \eta_1)} \int_0^t \frac{[x(t) - x(\tau)]\dot{x}(\tau)}{(t - \tau)^{\eta_1}} d\tau \geq 0$, 即有 $x(t) {}_0D_t^{\eta_1} x(t) \geq \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_1} x^2(t)$ 成立.

同理可证 $y(t) {}_0D_t^{\eta_2} y(t) \geq \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_2} y^2(t)$, $z(t) {}_0D_t^{\eta_3} z(t) \geq \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_3} z^2(t)$. 所以

$$\begin{aligned} {}_0D_t^\eta V(x, y, z) &= \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_1} x^2 + \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_2} y^2 + \frac{1}{2} {}_0D_t^{\eta_3} z^2 \leq x(t) {}_0D_t^{\eta_1} x(t) + y(t) {}_0D_t^{\eta_2} y(t) + z(t) {}_0D_t^{\eta_3} z(t) = \\ &= x(t)[-bx(t) + y(t)z(t)] + y(t)[-y(t) - 2x(t)z(t)] + z(t)[-az(t) + x(t)y(t)] = \\ &= -bx^2(t) + x(t)y(t)z(t) - y^2(t) - 2x(t)y(t)z(t) - az^2(t) + x(t)y(t)z(t) = -bx^2(t) - y^2(t) - az^2(t), \end{aligned}$$

其中 $a = 1.6, b = 0.2$, 即 ${}_0D_t^\eta V(x, y, z)$ 为负定的, 所以可得证加入控制器后系统(4)为全局渐近稳定. 定理 1

证毕.

4 仿真结果

为验证本文给出控制方法的有效性,用上述方案对分数阶 SynRM 混沌系统进行控制仿真,当取电机的参数为 $a = 1.6, b = 0.2, \gamma = 10$ 时,分数阶 SynRM 呈现混沌运动状态. 加入控制器之后,用 MATLAB 进行仿真,取系统的初始条件为 $(x(0), y(0), z(0)) = (12, 0.02, -5)$,步长为 0.01 s ,进行数值计算,结果如图 9 所示,由图可知在加入控制之后,系统迅速稳定到 $(0, 0, 0)$. 该控制方法只是在第 2 项加入控制,控制方法简单、代价小. 若在工程中实现本文控制器,需采用数字处理器 DSP 完成,而对于 3 个基本的状态量的信息,可通过 DSP 的 AD 进行采集得到,然后将其按照上述控制器的设计方法进行控制.

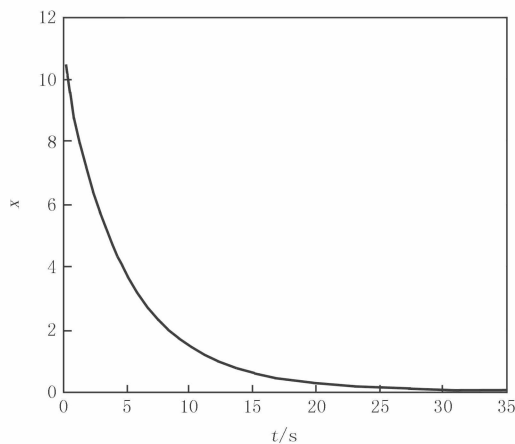


图10 加入控制项之后的分数阶SynRM的 $x-t$ 曲线

5 总结

本文在整数阶 SynRM 的基础上,提出分数阶 SynRM,通过分岔图、最大 Lyapunov 指数图以及相图和时序图,分析了分数阶 SynRM 的混沌特性. 研究表明:分数微分的阶次对 SynRM 的混沌动力学行为有影响,随着阶次的增加, SynRM 系统将由不动点和拟周期态向混沌运动状态变化,其中同量分数阶 SynRM 系统出现混沌的最低阶次约为 2.94. 并通过构造分数阶 Lyapunov 函数,找到合理的控制器,使分数阶 SynRM 系统达到全局渐进稳定的效果,最后通过数值仿真验证了控制器的有效性和可行性.

参 考 文 献

- [1] Gao Y, Chau K T. Hopf bifurcation and chaos in synchronous reluctance motor drives[J]. Energy Conversion IEEE Transactions on, 2004, 19(2): 296-302.
- [2] 余红英, 赵少雄, 杨臻. 同步磁阻电机自适应混沌同步控制仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(11): 67-70.
- [3] Podlubny I. Fractional Differential Equations[M]. New York: Academic Press, 1999.
- [4] 宁娣, 陆君安. 一个临界系统与 Lorenz 系统和 Chen 系统的异结构同步[J]. 物理学报, 2005, 54(10): 4590-4595.
- [5] 张化光, 赵琰, 余文, 等. A unified approach to fuzzy modelling and robust synchronization of different hyperchaotic systems[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(11): 4056.
- [6] 陈恒, 雷腾飞, 王震, 等. 分数阶 Lorenz 超混沌系统的动力学分析与电路设计[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 59-63.
- [7] Tavazoei M S, Haeri M. Chaotic attractors in incommensurate fractional order systems[J]. Physica D Nonlinear Phenomena, 2008, 237(20): 2628-2637.
- [8] Tavazoei M S, Haeri M. A necessary condition for double scroll attractor existence in fractional-order systems[J]. Physics Letters A, 2007, 367(1/2): 102-113.
- [9] 赵品栋, 张晓丹. 一类分数阶混沌系统的研究[J]. 物理学报, 2008, 57(5): 2791-2798.
- [10] Deng W, Li C, Lü J. Stability analysis of linear fractional differential system with multiple time delays[J]. Nonlinear Dynamics, 2006, 48(4): 409-416.
- [11] 胡建兵, 韩焱, 赵灵冬. 基于 Lyapunov 方程的分数阶混沌系统同步[J]. 物理学报, 2008, 57(12): 7522-7526.
- [12] Gallegos J A, Duarte-Mermoud M A. On the Lyapunov theory for fractional order systems[J]. Applied Mathematics & Computation, 2016, 287: 161-170.

Research on 3D Coordinate Localization based on ML Model with Geometric Constraint Relation

Zhang Lei

(College of Mathematics and Statistics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to improve the performance and accuracy of the 3D spatial location algorithm, this paper proposes a ML model based on the geometric constraint relationship based on the positioning principle of three base stations. Through the design of base station location, TOA, handheld terminal numerical geometric relationship between locations, estimated by the handheld terminal all possible position, through the maximum likelihood algorithm to estimate the maximum possible value to determine the positioning results. The simulation results show that the algorithm can effectively suppress the NLOS error and the measurement error, and can get the best estimation value. The simulation results show the effectiveness of the proposed method, and it has strong practicability in various indoor positioning systems.

Keywords: 3D positioning; ML model; geometric constraint

[责任编辑 陈留院]

(上接第 52 页)

- [13] Aguila-Camacho N, Duarte-Mermoud M A, Gallegos J A. Lyapunov functions for fractional order systems[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2014, 19(9): 2951-2957.
- [14] 古元凤, 肖剑. Willis 环脑动脉瘤系统的混沌分析及随机相位控制[J]. 物理学报, 2014, 63(16): 51-58.
- [15] 高飞, 李腾, 董恒庆, 等. 分数阶 Willis 环脑动脉瘤系统的混沌动力学分析与控制[J]. 物理学报, 2016, 65(23): 52-62.
- [16] 韦笃取, 张波, 丘东元, 等. 基于 LaSalle 不变集定理自适应控制永磁同步电动机的混沌运动[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6026-6029.
- [17] 李春来, 禹思敏. 永磁同步电动机的自适应混沌控制[J]. 物理学报, 2011, 60(12): 85-91.
- [18] Li C L, Yu S M, Luo X S. Fractional-order permanent magnet synchronous motor and its adaptive chaotic control[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(10): 168-173.
- [19] 雷腾飞, 陈恒, 孟敬, 等. 同步磁阻电机混沌系统的自适应滑模控制[J]. 黑龙江电力, 2015, 37(2): 130-132.

Chaos in the Fractional Order Synchronous Reluctance Motor and its Control

Liu Huizhao, Chen Xiaoxia

(School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In this paper we propose a fractional Synchronous Reluctance Motor(SynRM) by using the Caputo fractional differential and its theory. We also investigate the chaotic behaviors of the fractional SynRM. Firstly, we discuss chaotic characteristic of the fractional SynRM by analyzing the bifurcation diagram, Lyapunov exponent, phase portraits and time responses. Then we study the influence of system's order to the chaos. In the case of commensurate fractional order SynRM system, the lowest order at which chaos exists is turned out to be about 2.94. Based on the stability theory of fractional order system, Lyapunov function is constructed, a reasonable controller is designed to achieve global asymptotic stability. Finally, numerical investigations demonstrate the validity and feasibility of the presented control method.

Keywords: fractional Synchronous Reluctance Motor; chaos; control

[责任编辑 杨浦]