

基于直流电机系统的广义同步混沌化^{*}

张敬^{1†} 汤涛¹ 方文华¹ 李春来² 丁超义¹ 安锦运³

(1.湖南理工学院 机械工程学院,岳阳 414006)

(2.湖南理工学院 物理与电子科学学院,岳阳 414006)

(3.湖南理工学院南湖学院 机械与电子工程系,岳阳 414006)

摘要 本文对非同构系统的混沌状态同步问题进行了讨论,并对单变量单向及双向耦合和多变量耦合对各自系统动力学行为产生的影响进行了对比分析.基于广义同步混沌化的驱动控制原理,利用经典的 Lorenz 系统产生混沌信号去驱动永磁直流电机,使电机转速工作在混沌状态,并得到了同步控制器的解析表达式.最后,进行系统数值仿真,验证了同步控制的有效性.

关键词 非同构系统, 广义同步混沌化, Lorenz 系统, 永磁直流电机, 同步控制器

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-017

引言

混沌科学被誉为二十世纪物理学的第三次革命,是上世纪九十年代以来科学界最引人注目的研究热点之一.如今,混沌的概念和应用已经渗透到了科学研究的诸多领域.在混沌研究的初期,人们主要关注寻找各种新型混沌系统以及如何识别混沌系统的动力学特征^[1,2].之后,人们开始研究如何控制混沌,因为此时发现的混沌特性通常会影响系统的正常工作,甚至会造成系统崩溃、危及人身安全.后来,随着对混沌特性研究的进一步深入,越来越多的学者意识到混沌行为在很多工程应用方面具有利用价值.使非混沌系统产生混沌,或者使系统保持混沌状态称为混沌反控制,或混沌化.如今,混沌反控制技术已被广泛应用于各个领域^[3-12],包括生命科学、保密技术与通信、流体及超细粉末混合、工业搅拌、振动压实、机械隔振等.

海军工程大学朱石坚等^[13-16]提出利用混沌化技术来改变系统振动噪声的线谱结构,从而提高水下航行器的隐声性能.湖南大学徐道临等^[8,9,14-16]在此基础上提出混沌品质的概念,即在实现隔振系统混沌化的同时,通过采用准零刚度隔振和优化控

制参数来进一步降低线谱特征峰值,改善混沌线谱品质.日本学者^[17]发现当研磨电机工作在潮湿和恒压工况时,混沌转速下的磨削量和磨削效率都要优于恒速、正弦和随机转速等工况,混沌转速下的磨削效率甚至达到了恒转速工况下的两倍.香港大学 Chau 等人^[18]发现在低雷诺数的搅拌中,搅拌转速达到混沌转速时,要比普通的匀速搅拌取得更好的搅拌效果.同时,他们^[19]利用混沌 PWM 波形来取代传统的恒频 PWM 以减小电机驱动的电磁干扰.中国农业大学龙运佳等^[11,12]将混沌激振器用于重型混沌振动压路机,对其进行了振动与压实试验,该型混沌压路机与同吨位常规重型压路机相比可提高工效 10% 以上,现已被用于我国西北高速公路建设. Chau 等^[20,21]利用混沌化电机来驱动振动压实机,结果表明混沌振动压实机比传统的匀速和周期振动压实机具有更好的压实效果.

混沌电机驱动在工业应用中的拓展,为混沌应用开辟了一条新的途径.目前,电机的混沌反控制,一般采用基于设计方法的电机驱动混沌化^[22]和基于延时反馈控制方法的电机驱动混沌化^[18,20,21,23].本文提出采用广义同步混沌化的驱动控制原理^[24,25],利用经典的 Lorenz 系统^[26,27]产生混沌信

2019-04-17 收到第 1 稿,2019-11-21 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(11602084)、湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3096,2016JJ4036)、湖南省教育厅重点科研项目(17A088)、国家级大学生创新创业训练计划平台创新训练项目(201912658003)

[†] 通讯作者 E-mail: zhangjing819@hnu.edu.cn

号去驱动永磁直流电机,使电机转速工作处于混沌状态.一方面,Lorenz 系统的响应输出很容易通过电路设计实现;另一方面,本方法只需要控制直流电机的驱动电流同步跟踪于 Lorenz 系统的单变量响应输出,省去了测速装置.这样即能保证电机转速工作处于混沌状态,又能减小同步控制和驱动控制的成本,有利于推广应用.

1 同步控制器设计

基于 Lorenz 系统驱动的直流电机混沌化控制系统结构框图如图 1 所示,直流电机系统和 Lorenz 系统是两个非同构的动力系统,第一个系统的状态变量 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$,第二个系统的状态变量 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^q$,系统的动力学方程可以表述为

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_n(t) &= f_{11}(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_s, t) \\ \dot{\mathbf{x}}_s(t) &= f_{12}(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_s, t) \\ \dot{\mathbf{y}}_s(t) &= f_{21}(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}_s, t) \\ \dot{\mathbf{y}}_n(t) &= f_{22}(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}_s, t)\end{aligned}\quad (1)$$

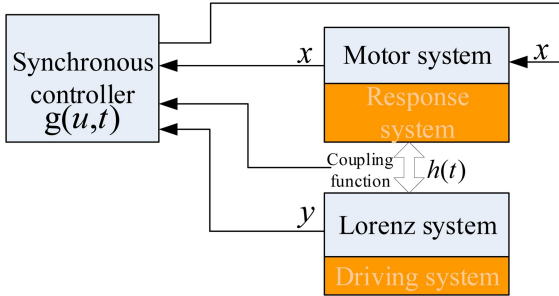


图 1 同步控制系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of synchronous control system

其中, $\mathbf{x}_n = \{x_i \in \mathbf{x}; x_i \notin \mathbf{x}_s\}$, $\mathbf{y}_n = \{y_i \in \mathbf{y}; y_i \notin \mathbf{y}_s\}$, x_i 和 y_i 表示 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 的第 i 个元素.如果当 $t \rightarrow \infty$ 时 $\mathbf{x}_s \rightarrow \mathbf{y}_s$,我们就说系统是广义同步的.为了实现广义同步化,我们在上述系统的基础上增加控制部分,这样式(1)可以表示为

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_n(t) &= f_{11}(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_s, t) \\ \dot{\mathbf{x}}_s(t) &= f_{12}(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_s, t) + \mathbf{g}(\mathbf{u}, t) \\ \dot{\mathbf{y}}_s(t) &= f_{21}(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}_s, t) + \mathbf{h}(t) \\ \dot{\mathbf{y}}_n(t) &= f_{22}(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}_s, t)\end{aligned}\quad (2)$$

其中, \mathbf{u} 是控制信号, $\mathbf{g}(\mathbf{u}, t)$ 表示同步控制器, \mathbf{y} 和 \mathbf{x} 系统分别属于驱动和响应系统.我们希望在控制器的作用下, f_{12} 能够跟随 f_{21} 的动力学变化.同时,我们在 f_{21} 部分增加了一个耦合函数 $\mathbf{h}(t)$, 用

来表征 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 系统的耦合关系.如果 $\mathbf{h} = 0$,表示两个系统之间的耦合属于单向耦合,即 \mathbf{y} 系统作为主系统用来驱动 \mathbf{x} 系统, \mathbf{x} 系统作为从系统,属于对应的响应系统;如果 $\mathbf{h} \neq 0$,则此耦合属于双向耦合,表示除了 \mathbf{y} 系统会对 \mathbf{x} 系统产生作用, \mathbf{x} 系统同样也会对 \mathbf{y} 系统的动力学行为产生影响.为了设计系统的同步控制器 $\mathbf{g}(\mathbf{u}, t)$,我们对式(2)中的耦合部分单独讨论

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_s(t) &= f_{12}(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_s, t) + \mathbf{g}(\mathbf{u}, t) \\ \dot{\mathbf{y}}_s(t) &= f_{21}(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}_s, t) + \mathbf{h}(t)\end{aligned}\quad (3)$$

根据上述方程,同步误差函数关于时间的导数可以表示为

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}}(t) &= \dot{\mathbf{y}}_s(t) - \dot{\mathbf{x}}_s(t) \\ &= \Delta \mathbf{f}(t) + \mathbf{h}(t) - \mathbf{g}(\mathbf{u}, t) \\ &= -\lambda \mathbf{e} + \mathbf{L}(t) - \mathbf{g}(\mathbf{u}, t)\end{aligned}\quad (4)$$

在这里,误差 $\mathbf{e} = \mathbf{y}_s - \mathbf{x}_s$, $\Delta \mathbf{f}(t) = f_{21} - f_{12}$, 反馈函数 $\mathbf{L} = \Delta \mathbf{f} + \lambda \mathbf{e} + \mathbf{h}$.从上式可以看出,当 $t \rightarrow \infty$ 时,若 $\mathbf{L}(t) - \mathbf{g}(\mathbf{u}, t) \rightarrow 0$,且 $\lambda > 0$,则误差函数在平衡点处是渐进稳定的.为了方便后续讨论,我们把反馈函数 $\mathbf{L}(t)$ 和同步控制器 $\mathbf{g}(\mathbf{u}, t)$ 的表达式另写为 $\mathbf{L}(t) = \mathbf{k}^* \boldsymbol{\xi}$, $\mathbf{g}(\mathbf{u}, t) = \mathbf{k}(t) \boldsymbol{\xi}$.其中, \mathbf{k}^* 表示对应系统参数的一组常量, $\mathbf{k}(t)$ 表示同步控制器的控制增益函数, $\boldsymbol{\xi}$ 表示由一组耦合变量构成的向量.函数 $\boldsymbol{\varphi}(t) = \mathbf{k}^* - \mathbf{k}(t)$ 代表参数误差,我们可以去寻找合适的控制增益函数 $\mathbf{k}(t)$,使得 $t \rightarrow \infty$ 时 $\boldsymbol{\varphi}(t) \rightarrow 0$,系统在平衡点处趋于稳定.对于含有 N 个误差方程的系统来说,第 i 个误差方程可以写为

$$\dot{e}_i(t) = -\lambda_i e_i + \boldsymbol{\varphi}_i(t) \boldsymbol{\xi}(t) \quad (5)$$

其中, $\boldsymbol{\varphi}_i(t)$ 是 $1 \times m$ 的向量, $\boldsymbol{\xi}(t)$ 是 $m \times 1$ 的向量.为了证明系统的稳定性,我们构造一个下述形式的李雅普诺夫函数

$$V(t) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i^2}{2} + \frac{\boldsymbol{\varphi}_i \boldsymbol{\varphi}_i^T}{2\gamma_i} \right) \quad (6)$$

其中, γ_i 是参数误差函数的控制增益.然后,我们就可以得到 $V(t)$ 关于时间的导数

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^N (e_i(-\lambda_i e_i + \boldsymbol{\varphi}_i(t) \boldsymbol{\xi}(t))) + \frac{1}{\gamma_i} \boldsymbol{\varphi}_i \dot{\boldsymbol{\varphi}}_i^T \quad (7)$$

在这里,我们如果选择 $\dot{\boldsymbol{\varphi}}_i^T = -\dot{\mathbf{k}}^T = -\gamma_i e_i \boldsymbol{\xi}$,就可以得到

$$\dot{V}(t) = -\sum_{i=1}^N \lambda_i e_i^2 \quad (8)$$

也就是说,当 $\lambda_i > 0$ 时误差函数在平衡点 $e=0$ 处是渐进稳定的。

2 直流电机和 Lorenz 系统的耦合同步控制

Lorenz 系统在特定参数区间是一个典型的混沌系统。所以,如能实现电机参数与 Lorenz 系统参数的稳定同步,就可以保证电机工作在混沌区间。永磁直流电机的数学模型可以表示为

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= -\frac{B}{J}\omega + \frac{K_T}{J}i - \frac{T_l}{J} \\ \dot{i} &= -\frac{K_E}{L_a}\omega - \frac{R_a}{L_a}i + \frac{V_{in}}{L_a}\end{aligned}\quad (9)$$

在这里, ω 、 i 分别为电机转速和电机电流; B 为粘性摩擦系数; J 为转子转动惯量; K_T 、 K_E 分别为转矩系数和感应电势系数; L_a 、 R_a 分别为电枢回路电感 and 电阻; T_l 、 V_{in} 分别为负载转矩和电机的输入电压。

2.1 单变量耦合方式

如果驱动和响应系统之间采用单变量耦合的方式,即采用 Lorenz 系统的输出 y_1 作为驱动信号,施加反馈控制于电流环节,以实现电机转速的混沌反控制。用于同步混沌化的闭环控制系统方程如下:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\frac{B}{J}x_1 + \frac{K_T}{J}x_2 - \frac{T_l}{J} \\ \dot{x}_2 &= -\frac{K_E}{L_a}x_1 - \frac{R_a}{L_a}x_2 + g(u, t)\end{aligned}\quad (10)$$

$$\dot{y}_1 = \sigma(y_2 - y_1) + h(t)$$

$$\dot{y}_2 = cy_1 - y_2 - y_1y_3$$

$$\dot{y}_3 = y_1y_2 - by_3$$

其中, x_1 代表电机转速 ω , x_2 代表电机电流 i 。根据本论文第二部分同步控制器设计的相关内容,我们可以得到

$$\begin{aligned}\Delta f = f_{21} - f_{12} &= \sigma(y_2 - y_1) + h(t) + \frac{K_E}{L_a}x_1 + \\ &\frac{R_a}{L_a}x_2 - g(u, t) = -\sigma e + \sigma(y_2 - x_2) + \\ &h(t) + \frac{K_E}{L_a}x_1 + \frac{R_a}{L_a}x_2 - g(u, t)\end{aligned}\quad (11)$$

其中, $e = y_1 - x_1$,我们发现当 $\lambda = \sigma$ 时上式(11)等于式(4)的右边部分,所以我们可以选择同步控制器

形式为,

$$g(u, t) = L(t) = \sigma(y_2 - x_2) + h(t) + \frac{K_E}{L_a}x_1 + \frac{R_a}{L_a}x_2 \quad (12)$$

在这里,耦合向量 $\xi = \{(y_2 - x_2), h(t), x_1, x_2\}^T$,参数向量 $k^* = \{\sigma, 1, \frac{K_E}{L_a}, \frac{R_a}{L_a}\}$,控制增益 $k(t) = \{k_1, k_2, k_3, k_4\}^T$ 。当 $k_1 \rightarrow \sigma, k_2 \rightarrow 1, k_3 \rightarrow \frac{K_E}{L_a}, k_4 \rightarrow \frac{R_a}{L_a}$ 时,永磁直流电机和 Lorenz 系统将实现广义稳定同步。

2.2 多变量耦合方式

如果驱动和响应系统之间采用多变量耦合的方式,即采用 Lorenz 系统的输出 y_1 作为驱动信号去控制转速环节,输出 y_2 作为驱动信号去控制电流环节。同时,为了简化讨论过程,我们在此仅考虑单向耦合即 $h=0$ 。用于广义同步混沌化的闭环控制系统方程如下:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\frac{B}{J}x_1 + \frac{K_T}{J}x_2 - \frac{T_l}{J} + g_1(u_1, t) \\ \dot{x}_2 &= -\frac{K_E}{L_a}x_1 - \frac{R_a}{L_a}x_2 + g_2(u_2, t)\end{aligned}\quad (13)$$

$$\dot{y}_1 = \sigma(y_2 - y_1)$$

$$\dot{y}_2 = cy_1 - y_2 - y_1y_3$$

$$\dot{y}_3 = y_1y_2 - by_3$$

根据本论文第二部分同步控制器设计的相关内容,我们可以得到

$$\begin{aligned}\Delta f = f_{21} - f_{12} &= \\ &\left(\begin{aligned} &\sigma(y_2 - y_1) + \frac{B}{J}x_1 - \frac{K_T}{J}x_2 + \frac{T_l}{J} - g_1(u_1, t) \\ &cy_1 - y_2 - y_1y_3 + \frac{K_E}{L_a}x_1 + \frac{R_a}{L_a}x_2 - g_2(u_2, t) \end{aligned} \right) = \\ &\left(\begin{aligned} &-\sigma e_1 + \sigma(y_2 - x_1) + \frac{B}{J}x_1 - \frac{K_T}{J}x_2 + \frac{T_l}{J} - g_1(u_1, t) \\ &-e_2 + cy_1 - x_2 - y_1y_3 + \frac{K_E}{L_a}x_1 + \frac{R_a}{L_a}x_2 - g_2(u_2, t) \end{aligned} \right)\end{aligned}\quad (14)$$

其中, $e_1 = y_1 - x_1, e_2 = y_2 - x_2$,我们可选择同步控制器形式为:

$$g_1(u_1,t)=L_1(t)=\sigma(y_2-x_1)+\frac{B}{J}x_1-\frac{K_r}{J}x_2+\frac{T_l}{J}$$
$$g_2(u_2,t)=L_2(t)=cy_1-x_2-y_1y_3+\frac{K_E}{L_a}x_1+\frac{R_a}{L_a}x_2$$

(15)

2.3 数值仿真

在以上理论推导的基础上,编写仿真程序,对永磁直流电机和 Lorenz 系统耦合的动态响应过程进行仿真,以验证混沌同步控制的有效性.选取永磁直流电机的实际参数为: $L_a=0.4\text{H}$, $R_a=1.1\Omega$, $K_r=0.04998(\text{N}\cdot\text{m})/\text{A}$, $B=0.0022\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$, $J=1.0388\times10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $K_E=0.04975\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$. Lorenz 系统的参数为 $\sigma=10$, $c=28$, $b=8/3$. 系统的初始值选择为 $x_1(0)=0$, $x_2(0)=0$, $y_1(0)=1$, $y_2(0)=1$ 和 $y_3(0)=1$. 其实,系统参数和初始值的选取可以是任意的,同步控制对于任意参数都是适用的.在仿真过程中,计算步长为 1ms ,计算时间为 20s ,观察电机参数在此运行周期内的动态响应过程.

采用上述式(12)的控制器形式之后,我们进行系统数值仿真以验证单变量耦合控制器的广义同步混沌化控制效果.其中,单向耦合系统的数值仿真结果如图 3(a)所示,永磁直流电机的电流响应 x_2 用实线(红色)表示,Lorenz 系统的响应 y_1 用虚线(黑色)表示.同步控制器在 $t=0$ 时是关闭的,所以两个系统的响应刚开始是不同步的.在 $t=5\text{s}$ 时控制器启动,从图 3(a)内的小窗口可以看出大约只经过了 0.5s 左右,电机电流 x_2 就快速同步于 Lorenz 系统的 y_1 响应变化了,说明同步控制器的效果是显著的.根据算法^[28],计算此时系统的最大李雅普诺夫指数为 1.5105 ,其值大于零,也验证了此时系统响应对应混沌运动状态.

我们知道,反馈增益 p 与系统混沌化所需的输入能量息息相关.反馈增益越大,所需的输入能量越大,考虑反馈增益后的同步控制器形式为:

$$g_p(u,t)=pL(t)=p\left(\sigma(y_2-x_2)+\frac{K_E}{L_a}x_1+\frac{R_a}{L_a}x_2\right)$$

(16)

下面我们通过分析电机转速关于反馈增益 p 的分岔图来评估混沌同步化控制的能量水平.

从分岔图可以看出, $p=0$ 即未施加同步控制时,直流电机的转速为周期响应.施加同步控制后,

系统混沌化的临界反馈增益 p_c 很小.当 $|p|>p_c$ 时,在整个参数域内可以得到不间断的混沌运动.

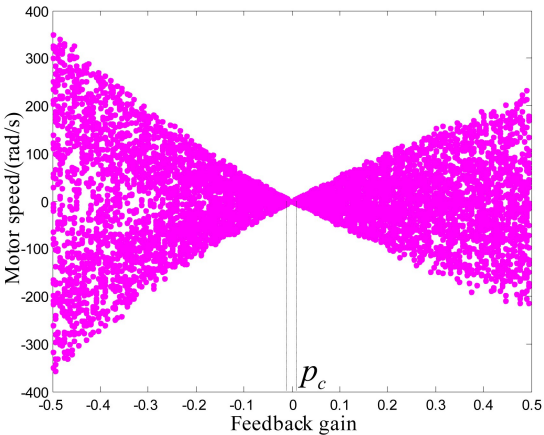
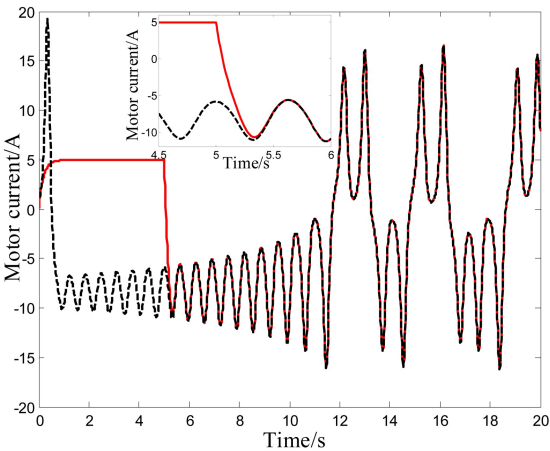


图 2 电机转速关于反馈增益 p 的分岔图

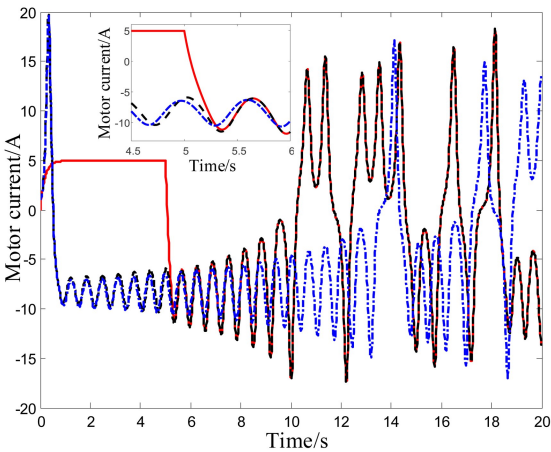
Fig.2 Global bifurcation diagram versus feedback gain p

另外,取 $h(t)=x_2$ 时,双向耦合系统的数值仿真结果如图 3(b)所示.永磁直流电机的电流响应 x_2 用实线(红色)表示,施加耦合 $h(t)$ 之后 Lorenz 系统的响应 y_1 用虚线(黑色)表示,未施加耦合 $h(t)$ 作用的 Lorenz 系统的响应 y_1 用点划线(蓝色)表示.同步控制器在 $t=0$ 时是关闭的,所以两个系统的响应刚开始是不同步的.在 $t=5\text{s}$ 时控制器启动,大约只经过了 0.5s 左右,电机电流 x_2 就快速同步于 Lorenz 系统的 y_1 响应.但需要注意的是,电机电流 x_2 的动力学行为不是同步于原始 Lorenz 系统的 y_1 响应,而是同步于耦合 $h(t)$ 之后 Lorenz 系统的 y_1 响应.所以,双向耦合在两个系统之间产生了相互的作用,同步混沌化结果不同于前面图 3(a)所示的单向耦合系统.



(a) 单向耦合系统电流 x_2 的动态响应

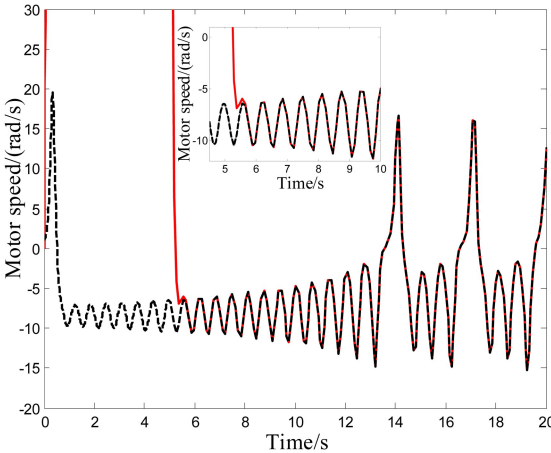
(a) response x_2 of unidirectional coupling system



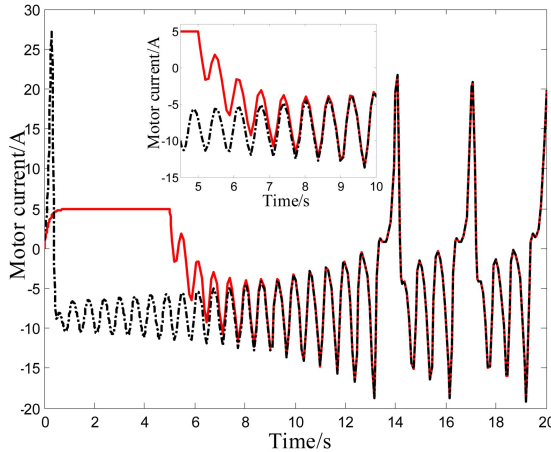
(b)双向耦合系统电流 x_2 的动态响应
(b) response x_2 of bidirectional coupling system

图 3 单变量耦合系统的输出响应

Fig.3 Response of single variable coupling system



(a)电机转速 x_1 的动态响应
(a) response x_1 of motor speed



(b)电机电流 x_2 的动态响应
(b) response x_2 of motor current

图 4 多变量耦合系统的输出响应

Fig.4 Response of multi-variable coupling system

采用式 (15) 的控制器形式之后,多变量单向耦合系统的输出响应如图 4(a) 和 (b) 所示.其中,实线(红色)表示电机参数 x_1 和 x_2 ,虚线(黑色)表示 Lorenz 系统的输出 y_1 和 y_2 .图 4(a) 表示电机转速 x_1 跟踪 Lorenz 系统输出 y_1 响应的动态过程,图 4(b) 表示电机电流 x_2 跟踪 Lorenz 系统输出 y_2 响应的动态过程.在 $t = 0$ 时,由于控制器均没有开启,所以两个响应过程都是不同步的.在 $t = 5\text{s}$ 时,两个控制器均开始工作,电机转速大约经过了 0.5s ,很快就同步于 Lorenz 系统输出 y_1 响应的变化了.但是,电机电流大约经过了 4.5s 才同步于输出 y_2 响应的变化.这是因为,对于 x_1 和 y_1 的广义同步混沌化来说,参数 $\lambda_1 = \sigma = 10$.而对于 x_2 和 y_2 的同步混沌化,参数 $\lambda_2 = 1$.也就是说,考虑系统误差的收敛速度时, $e_1 = \exp(-10t)$, $e_2 = \exp(-t)$, e_1 要比 e_2 的收敛速度快得多.所以,对应电机转速的同步混沌化速度要比电机电流的同步混沌化速度更快.

从单变量和多变量耦合对永磁直流电机和 Lorenz 系统的动力学同步行为影响来看,在施加了同步控制之后,直流电机的系统参数均可以同步于 Lorenz 系统的输出响应.单变量耦合中,单向耦合直接采用 Lorenz 系统输出响应 y_1 驱动电机电流 x_2 ;而双向耦合除了用 y_1 驱动 x_2 之外,耦合作用在两个系统中产生了相互的作用和影响.多变量耦合中,电机转速 x_1 和电流 x_2 均可以同步于 Lorenz 系统的输出响应 y_1 和 y_2 ,但两个误差函数的收敛速度由于控制参数的选取不同会有较大差异.

3 结论

针对混沌电机驱动的工业应用,本文探讨了在单变量和多变量耦合情况下两类非同构系统的广义同步混沌化问题,并通过设计相应的同步控制器,实现驱动和响应系统的稳定同步.同时,以 Lorenz 系统驱动永磁直流电机为例,推导出了同步控制器的解析表达式,使永磁直流电机同步于 Lorenz 系统的输出响应变化,其电机转速工作在混沌状态.该方法可以使电机始终工作在混沌区间,为电机的混沌化驱动控制提供了新的思路.

在永磁直流电机的混沌反控制过程当中,我们利用了 Lorenz 系统的相关特性.一方面,该系统很容易通过简单的电路设计来实现;另一方面,我们可以充分利用该系统在特定参数区间的混沌特性.

经过对比分析,我们认为更适合实际应用的是单变量单向耦合的驱动响应系统结构,利用 Lorenz 系统的单变量输出响应,直接驱动永磁直流电机的电流环节,使电机转速工作在混沌状态.这样,可以减小整个系统同步控制和驱动控制的成本,而不影响直流电机系统的混沌反控制效果.

参 考 文 献

- 1 盛平兴. 超导材料的混沌现象. 物理学报, 2001, 50(8): 1596~1599 (Sheng P X. Chaotic phenomena of superconductivity. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(8): 1596~1599 (in Chinese))
- 2 周宇飞, 陈军宁. 电流模式控制 Boost 变换器中的切分叉及阵发混沌现象. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 23~26 (Zhou Y F, Chen J N. Tangent bifurcation and intermitten chaos in current-mode controlled Boost converter. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(1): 23~26 (in Chinese))
- 3 Brandt M E, Chen G R. Bifurcation control of two nonlinear models of cardiac activity. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1997, 44(10): 1031~1034
- 4 Apostolos A, Dimitris S, Laurent L, et al. Chaos based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links. *Nature*, 2005, 438: 343~346
- 5 Lou J J, Zhu S J, He L, et al. Application of chaos method to line spectra reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 286(3): 645~652
- 6 Yu X, Zhu S J, Liu S Y. A new method for line spectra reduction similar to generalized synchronization of chaos. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 306(3-5): 835~848
- 7 Wen G L, Lu Y Z, Zhang Z Y, et al. Line spectra reduction and vibration isolation via modified projective synchronization for acoustic stealth of submarines. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 324(3-5): 954~961
- 8 Li Y L, Xu D L, Fu Y M, et al. Stability and chaotification of vibration isolation floating raft systems with timedelayed feedback control. *Chaos*, 2011, 21033115
- 9 Zhou J X, Xu D L, Zhang J, et al. Spectrum optimization based chaotification using time-delay feedback control. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2012, 45(6): 815~824
- 10 Zhu H J, Zeng C B. A novel chaotification scheme for fractional system and its application. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2018, 339: 275~284
- 11 王聪玲, 龙运佳. CVE-2 型混沌激振器运动的数值仿真和混沌识别. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 26~29 (Wang C L, Long Y J. Numerical simulation and chaotic identification of the motion of CVE-2 type chaotic vibration exciter. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(4): 26~29 (in Chinese))
- 12 龙运佳, 杨勇, 王书茂, 等. 重型混沌振动压路机. 工程机械, 2000, 31(8): 6~8 (Long Y J, Yang Y, Wang S M, et al. Heavy chaotic vibratory roller. *Construction Machinery and Equipment*, 2000, 31(8): 6~8 (in Chinese))
- 13 Liu S Y, Yu X, Zhu S J. Study on the chaos anticontrol technology in nonlinear vibration isolation system. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 310(4-5): 855~864
- 14 Zhang J, Xu D L, Zhou J X, et al. Chaotification of vibration isolation floating raft system via nonlinear timedelay feedback control. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2012, 45(9): 1255~1265
- 15 张敬, 徐道临, 李盈利, 等. 多源激励下双层隔振浮筏系统的线谱混沌化. 物理学报, 2014, 63(18): 116~126 (Zhang J, Xu D L, Li Y L, et al. Line spectrum chaotification of a double layer vibration isolation floating raft system under multisource excitation. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 116~126 (in Chinese))
- 16 Li Y L, Xu D L. Force transmissibility of floating raft systems with quasi-zero-stiffness isolators. *Journal of Vibration and Control*, 2017, 24(16): 3608~3616
- 17 Ito S, Nariaki T. Abrasive machining under wet condition and constant pressure using chaotic rotation. *Reports-Industrial Research Institute*, 1998, 64(5): 748~752
- 18 Ye S, Chau K T. Chaotization of DC motors for industrial mixing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(4): 2024~2032
- 19 Wang Z, Chau K T, Liu C H. Improvement of electromagnetic compatibility of motor drives using chaotic PWM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(6): 2612~2614
- 20 Wang Z, Chau K T. Anti-control of chaos of a permanent magnet DC motor system for vibratory compactors. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2008, 36(3): 694~708
- 21 Wang Z, Chau K T. Design, analysis, and experimentation of chaotic permanent magnet DC motor drives for electric compaction. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2009, 56(3): 245~249
- 22 Cheng M, Chau K T, Chan C C. Design and analysis of a

new doubly salient permanent magnet motor. *IEEE Transactions on Magnetics*,2001,37(4):3012~3020

23 Wang X F, Chen G R, Yu X H. Anticontrol of chaos in continuous-time systems via time-delay feedback. *Chaos*, 2000,10(4):771~779

24 Xu D L. Control of projective synchronization in chaotic systems. *Physical Review E*,2001,63(2):027201

25 Wagg D J. Partial synchronization of non-identical chaotic systems via adaptive control,with applications to modeling coupled nonlinear systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*,2002,12(03):561~570

26 陈玉明,陈春涛. 一类 Lorenz 型超混沌系统的 Zero-Zero-Hopf 分岔及共存吸引子研究. *动力学与控制学报*, 2018,16(3):227~232 (Chen Y M, Chen C T. Research on Zero-Zero-Hopf bifurcation and coexisting attractors of a Lorenz-type hyperchaotic system. *Journal of Dynamics and Control*,2018,16(3):227~232(in Chinese))

27 谢成荣,张仁愉,王仁明,等. 参数未知的永磁同步电机混沌系统模糊自适应同步控制. *动力学与控制学报*,2017,15(6):537~543(Xie C R, Zhang R Y, Wang R M, et al. Fuzzy adaptive synchronization of permanent magnet synchronous motor chaotic system with unknown parameters. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15 (6):537~543(in Chinese))

28 Banerjee S, Verghese G C. Nonlinear phenomena in power electronics: attractors, bifurcations, chaos, and nonlinear control. New York:IEEE Press,2001

GENERALIZED SYNCHRONOUS CHAOTIFICATION
BASED ON DC MOTOR SYSTEMS *

Zhang Jing^{1†} Tang Tao¹ Fang Wenhua¹ Li Chunlai² Ding ChaoYi¹ An Jinyun³

(1.School of Mechanical Engineering,Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

(2.School of Physics and Electronics,Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

(3.Department of Mechanical and Electronic Engineering,Nanhu College of Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

Abstract Synchronous chaotification of two non-identical dynamical systems by using different kinds of coupling methods was studied.The unidirectional and bidirectional coupling, single-variable coupling and multi-variable coupling were taken into account,and the differences between them were also discussed.Based on the drive control principle of generalized synchronous chaotification,the analytical expression for synchronization control was deduced,and the permanent magnet DC motor was driven by chaotic signals of Lorenz system to make the speed maintain in chaotic state.Finally,numerical simulations were carried out to verify the effectiveness of the synchronization control.

Key words non-identical systems, generalized synchronous chaotification, Lorenz system, permanent magnet DC motor, synchronization controller

Received 17 April 2019, revised 21 November 2019.
* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11602084), the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (2017JJ3096,2016JJ4036), the Scientific Research Foundation of the Education Department of Hunan Province, China (17A088), the National Students' Platform for Innovation and Entrepreneurship Training Program (201912658003)
† Corresponding author E-mail: zhangjing819@hnu.edu.cn