

基于GWO的永磁同步电动机Hamilton模型的混沌控制

张小青^{1,2}, 明正峰¹

(1.西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071; 2.咸阳师范学院 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要:针对永磁同步电动机中存在的不利于系统运行的混沌现象,利用Hamilton理论首先把永磁同步电动机模型转化为带扰动非线性项的严格耗散广义Hamilton系统模型,依据其模型特点进行了扰动补偿器及跟踪控制器的设计。针对广义Hamilton系统模型中非线性扰动项,设计了带有可调增益矩阵的扰动补偿器,并利用Lyapunov稳定定理证明了加入扰动补偿器后的系统是渐近稳定的。通过任意选取期望平衡点来修正Hamilton能量函数,并结合修正互联和阻尼控制的设计方法,设计了含待定系数矩阵的跟踪控制器,其中的待定系数矩阵为期望结构的修正矩阵。为了更好地增强系统的自适应能力,采用苍狼优化算法(GWO)寻求扰动补偿器中的最佳可调增益及跟踪控制器中的期望结构的修正矩阵的最佳系数,苍狼位置矢量由可调增益参数及修正矩阵的待定系数组成,苍狼捕猎的迭代过程实为有目的的待定参数寻优过程。为了验证以上控制方法的有效性,从系统期望输出、负载扰动输入及交直轴电压输入等3个方面出发,合理设计了相应的仿真比较实验。实验结果表明,被控后的系统混沌现象得到了抑制,系统能较好跟随期望输出,且具有一定的抗负载扰动及电压扰动的能力。同时也验证了苍狼优化算法协助设计控制器参数的有效性,克服了传统的依据经验设定参数的缺点,使参数依目标得到了较优的选择,一定程度上提高了系统自适应能力。

关键词:永磁同步电动机;混沌;Hamilton系统;苍狼优化算法;跟踪控制;扰动补偿

中图分类号:TM341; TP273

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)06-0149-08

Chaos Control on the Hamilton Model of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on GWO

ZHANG Xiaoqing^{1,2}, MING Zhengfeng¹

(1.School of Mechano-elctronic Eng.,Xidian Univ.,Xi'an 710071,China; 2.Xianyang Normal Univ.,Xianyang 712000,China)

Abstract: In order to inhibit the harmful chaos of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the model of PMSM was transformed to a generalized Hamilton model with some nonlinear disturbance. Then a disturbance compensator and a tracking controller were designed from its Hamilton model. Next a disturbance compensator with adjustable gain matrix was designed for the nonlinear disturbance in the generalized Hamilton model, and the system with the disturbance compensator was proved to have the asymptotic stability by Lyapunov stability theorem. After fixing the Hamilton energy function with freely choosing the desired equilibrium, the tracking controller with undetermined coefficient matrix was designed with the method of modified interconnect and damping control, and the undetermined coefficient matrix was a modified matrix with an expected structure. To improve the adaptive ability of the system, grey wolf optimizer (GWO) was applied to find the best adjustable gains of the disturbance compensator and the optimal coefficients of expecting correction matrix for the tracking controller. The wolf position vector was composed of adjustable gain parameters and the undetermined coefficients of the correction matrix, and the iterative process of GWO was a purposeful optimization one. To verify the validity of the above-controlled method, several contrast experiments were designed from the change of desired output, the load disturbance, as well as the a-axis and d-axis voltage disturbance. The experimental results showed that the chaotic phenomena of the system are suppressed, the system could follow the expected output well and have better capacity in resisting load disturbances and voltage disturbances. The validity of grey wolf optimizer algorithm in assisting the controllers' parameters on the basis of

收稿日期:2017-03-17

基金项目:国家“863”计划资助项目(2015AA7041003);陕西省教育厅专项科研计划资助项目(15JK1784);咸阳师范学院专项科研基金资助项目(15XSYK036)

作者简介:张小青(1985—),女,博士生,讲师。研究方向:运动控制与智能控制。E-mail: kuai123-go@126.com

the optimized objective function, which improves the adaptive ability of the system, was also proved by the experimental results.

Key words: permanent magnet synchronous motor; chaos; Hamilton system; grey wolf optimizer; tracking control; disturbance compensation

已有充分证据证明永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)存在混沌现象^[1]。因混沌现象具有对初始条件敏感、内在随机性等特点^[2-3],对于大部分永磁同步电动机应用场合,尤其是对转速和转矩性能要求较高时,混沌的存在都是不利的,它将引起系统相对的不稳定,严重的话会使转速或转矩出现剧烈的振荡,不利于系统动态性能的调控^[4]。因此,为了消除永磁同步电动机不利混沌影响,研究混沌控制器具有较强的实践意义。

自永磁同步电动机混沌动力学现象被发现以来,科研人员已研制出了一系列相应的混沌控制器。目前,永磁同步电动机混沌控制设计正由基于单一理论的控制器的逐步向混合控制器的方向发展,由传统经典控制器设计逐步向现代智能控制器的方向发展。例如:文献^[5]把模糊神经网络理论与滑模控制进行了结合,设计了基于模糊神经网络理论的滑模控制与补偿控制器,混沌控制效果较好,但加入模糊神经网络理论后的滑模控制器设计变复杂了。文献^[6]提出了基于扩张状态观测器自适应滑模控制器,通过把永磁同步电动机模型转换为Brunovsky标准型,针对系统中未知状态和不确定项设计了观测器,以便进行状态估计,并设计了滑模控制器,在一定程度上抑制了混沌现象,但由于设计中部分参数需要依据经验设定,不利于全面推广。文献^[7-9]为了较好地控制电动机中的混沌现象均引入了Hamilton系统理论。其中:文献^[7]设计了一种基于Hamilton理论的镇定控制和附加控制相结合的控制,在一定程度上简化了控制器的设计计算,但在设计过程中未考虑参数扰动幅度较大时带来的输入附加扰动,参数自适应能力不强,应用具有一定局限性。文献^[8]提出了基于Hamilton函数的鲁棒控制器,结合了互联和阻尼配置方法和扰动补偿方法,起到了一定的混沌控制效果,但由于其设计的控制器的参数都需要依据经验确定,给设计者带来了诸多不便。文献^[9]在考虑了系统存在扰动的情况下,设计了基于Riccatic方程的最优输出反馈 H_∞ 控制器,利用Hamilton理论验证了设计的有效性,所设计的控制器能使系统快速脱离混沌状态,但仍有参数需要依据多次实验经验来确定。综上所述,从文献^[6-9]的分析得知,对混沌系统引入如Brunovsky标准型、Hamilton标准型等典型模型后再加以控制的策略是可行的。而相对于Brunovsky标准型,针对非线性混沌动力学系统,建立其广义Hamilton系统模型

不失为一个更好的选择^[10],而且很多工程上的动力学系统都可以约化到广义Hamilton系统模型,从而得到相对的简化控制^[11]。但从文献^[6-9]依然可知,依靠转换后的典型模型而设计的控制器大多存在部分参数需由经验来确定的缺点,从而导致所设计的控制器自适应能力较差。

为了进一步改善永磁同步电动机的混沌控制,提高控制系统的自适应能力,本文将文献^[7-9]所引入的Hamilton理论为基础,在非线性的永磁同步电动机系统模型约化为广义受控的哈密顿系统基础上,分别选取相应的Hamilton能量函数设计了扰动补偿器与跟踪控制器。用扰动补偿器去抑制系统存在的非线性环节以保证系统能稳定运行,而设计跟踪控制器的目的主要在于使系统输出能较好地跟随期望值。为了使控制器性能得到优化,针对扰动控制器设计时的可调增益及跟踪控制器设计时的待定系数矩阵的选取问题,引入了苍狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO),提出了一种基于苍狼优化算法的Hamilton模型混沌优化控制方法。在苍狼优化算法中,以扰动控制器的可调增益参数和跟踪控制器的待定系数作为苍狼位置矢量,苍狼优化过程就是模拟苍狼群体寻找猎物的过程,寻找到最佳猎物位置,即得到了扰动控制器的最佳可调增益参数及跟踪控制器的最佳待定系数,解决了控制器参数未定的问题。最后,对提出的基于GWO的Hamilton模型混沌优化控制方法以永磁同步电动机为模型进行了相应的仿真实验,并验证了算法的有效性。

1 混沌现象与Hamilton模型

1.1 永磁同步电动机的数学模型

以定子电流 i_d 、 i_q 及转子角速度 Ω 为状态变量,永磁同步电动机的动态模型可以描述为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}[-Ri_d + \Omega L_q i_q + v_d], \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}[-Ri_q - \Omega L_d i_d - \Omega \psi_r + v_q], \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}[n_p \psi_r i_q + n_p (L_d - L_q) i_q i_d - T_L - \beta \Omega] \end{cases} \quad (1)$$

式中, R 为定子绕组电阻; L_d 、 L_q 分别为定子d、q轴电感值, v_d 、 v_q 分别为定子d、q轴电压, ψ_r 为转子磁链, J 、 β 分别为转动惯量和黏滞阻尼系数; T_L 为负载转矩。对模型(1)作相应尺度及线性放射变换后,可得以下无量纲动态数学模型:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = U_d - y_1 + y_2 y_3, \\ \dot{y}_2 = U_d - y_1 y_3 - y_2 + \gamma y_3, \\ \dot{y}_3 = \sigma(y_2 - y_3) - \bar{T}_L \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_1, y_2, y_3 分别与永磁同步电动机的 i_d, i_q, Ω 存在对应关系; 另外由于受测量水平、环境变化等因素的影响, 电动机各项参数的取值常常不是定值, 而是在某个范围内有一定的变化, 且在特定参数下该系统将呈现出混沌现象。设系统(2)中的参数为: $\gamma=17.5$, $\sigma=5.46$, 且 $U_d = U_q = \bar{T}_L = 0$ 时, 得系统Lyapunov指数如图1所示。

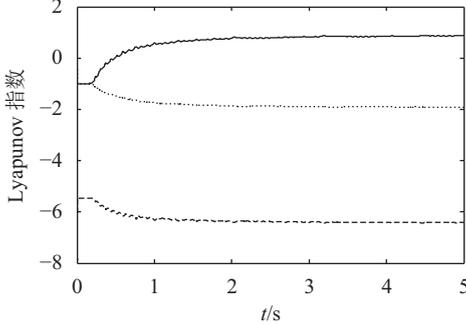


图1 永磁同步电动机Lyapunov指数

Fig.1 Manner Lyapunov exponents of PMSM

从图1能明显看出, 该系统存在大于零的Lyapunov指数值, 且依据相关理论可推知其Lyapunov维数是分数维, 从而能推知系统存在混沌现象。

1.2 永磁同步电动机的Hamilton模型

为了方便进行转速及转子角速度控制, 在此假设 y_3 的期望值为 y_3^* (同后面提到的 Ω^*), 引入误差 $\bar{y}_3 = y_3 - y_3^*$, 则永磁同步电动机的无量纲模型可以改写为:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = U_d - y_1 + y_2(\bar{y}_3 + y_3^*), \\ \dot{y}_2 = U_q - y_1(\bar{y}_3 + y_3^*) - y_2 + \gamma(\bar{y}_3 + y_3^*), \\ \dot{\bar{y}}_3 = \sigma(y_2 - \bar{y}_3 - y_3^*) - \bar{T}_L - \dot{y}_3^* \end{cases} \quad (3)$$

针对上述无量纲数学模型, 将其变换为广义的Hamilton系统模型:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{T}(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}}H + \mathbf{r} + \boldsymbol{\delta}(\mathbf{y}) + \mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u} \quad (4)$$

式中: Hamilton结构矩阵 $\mathbf{T}(\mathbf{y}) = \mathbf{J}(\mathbf{y}) - \mathbf{R}(\mathbf{y})$, 其中, $\mathbf{J}(\mathbf{y})$ 取为反对称矩阵, 即有 $-\mathbf{J}(\mathbf{y}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{y})$, 能反映系统内部互相连接的情况, $\mathbf{R}(\mathbf{y})$ 为系统阻尼矩阵, 取为对角矩阵能体现系统端口上附加阻性结构; \mathbf{r} 为系统的负载扰动项; $\boldsymbol{\delta}(\mathbf{y})$ 为系统配置完Hamilton系统后留下的非线性项; \mathbf{u} 为系统控制输入项; $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为光滑函数矩阵。各矩阵可具体描述如下:

$$\mathbf{J}(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} 0 & \bar{y}_3 + y_3^* & 0 \\ -(\bar{y}_3 + y_3^*) & 0 & -\sigma \\ 0 & \sigma & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} -1 & \bar{y}_3 + y_3^* & 0 \\ -(\bar{y}_3 + y_3^*) & -1 & -\sigma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\bar{T}_L \end{bmatrix}, \boldsymbol{\delta}(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma\bar{y}_3 + \gamma(\bar{y}_3 + y_3^*) \\ -\sigma y_3^* - \dot{y}_3^* \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} U_q \\ U_d \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

取系统Hamilton能量函数为:

$$H(\mathbf{y}) = \frac{1}{2}(y_1^2 + y_2^2 + \bar{y}_3^2) \quad (5)$$

则

$$\nabla_{\mathbf{y}}H = [y_1 \quad y_2 \quad \bar{y}_3]^T \quad (6)$$

结论1^[12] 由于该系统中的 $\mathbf{R}(\mathbf{y})$ 为正定对称, 存在 $\nabla_{\mathbf{y}}^T H \mathbf{R}(\mathbf{y}) \nabla_{\mathbf{y}} H = y_1^2 + y_2^2 + \sigma \bar{y}_3^2 > 0$ ($\sigma > 0$), 故系统(4)是严格耗散Hamilton系统。

结论2^[13] 由于海森矩阵 $\nabla_{\mathbf{y}}^2 H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为正

定矩阵, 则在给定平衡点处Hamilton函数取极小值, 且按式(5)定义的Hamilton能量函数 $H(\mathbf{y})$ 可以作Lyapunov函数。

需要注意的是: U_d 和 U_q 项的取值在此不恒等于零, 等于零的分析只是其特殊情况^[14]。

2 基于Hamilton系统控制设计

在系统(4)中, \mathbf{r} 和 $\boldsymbol{\delta}(\mathbf{y})$ 一起被认为是系统的扰动项, 由于此非线性扰动项的存在会在一定程度上使系统出现不稳定, 所以在此首先需设计一个扰动补偿器以保证系统稳定。另外, 为了实现期望的控制目标, 又需设计了一个与状态期望对应的跟踪控制器。

2.1 扰动补偿器的设计

设计扰动补偿器即为 \mathbf{u}_1 , 即取:

$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

先假设 $U_q = U_d = 0$, 则加入扰动补偿控制器后的系统(4)变为:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{T}(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}}H + \mathbf{r} + \boldsymbol{\delta}(\mathbf{y}) + \mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u}_1 \quad (8)$$

定理 若取 $u_1 = -\frac{\mathbf{M}\mathbf{g}^T(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}}H\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{y})}{\|(\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{g}(\mathbf{y})\|^2}$, 即 $u_{11} = -\frac{m_1 y_1 \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{y})}{y_1^2 + y_2^2}$, $u_{12} = -\frac{m_2 y_2 \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{y})}{y_1^2 + y_2^2}$, 则系统(8)将在其状态

平衡点(原点)处渐近稳定。其中:

① $M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$ 为可调增益,且 m_1 与 m_2 均为大于等于1的正数;

② $\varphi(\mathbf{y})$ 为 $(\nabla_{\mathbf{y}}^T H)(\mathbf{r} + \delta(\mathbf{y}))$ 的上限函数。

证明:为了证明控制器的有效性,只需证明式(8)动力学系统在原点邻域渐近一致稳定即可。取 Lyapunov 函数为式(5)Hamilton 能量函数 $H(\mathbf{y})$, 有:

$$\begin{aligned} \dot{H}(\mathbf{y}) &= \nabla_{\mathbf{y}}^T H \dot{\mathbf{y}} = \\ &(\nabla_{\mathbf{y}}^T H)(\mathbf{T}(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}} H + \mathbf{r} + \delta(\mathbf{y}) + \mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u}_1) = \\ &(\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{T}(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}} H + (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)(\mathbf{r} + \delta(\mathbf{y})) + (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u}_1. \end{aligned}$$

由于 $(\nabla_{\mathbf{y}}^T H)(\mathbf{r} + \delta(\mathbf{y})) \leq \varphi(\mathbf{y})$,

所以有:

$$\dot{H}(\mathbf{y}) \leq (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{T}(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}} H + \varphi(\mathbf{y}) + (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u}_1.$$

其中,

$$\begin{aligned} (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{T}(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}} H &= \\ \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 \end{bmatrix} &\begin{bmatrix} -1 & (\bar{y}_3 + y_3^*) & 0 \\ -(\bar{y}_3 + y_3^*) & -1 & -\sigma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \bar{y}_3 \end{bmatrix} = \\ &-(y_1^2 + y_2^2 + \sigma y_3^2) \leq 0 \end{aligned}$$

因为

$$u_1 = -\frac{M\mathbf{g}^T(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}} H\varphi(\mathbf{y})}{\|(\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{g}(\mathbf{y})\|^2},$$

即

$$u_{11} = -\frac{m_1 y_1 \varphi(\mathbf{y})}{y_1^2 + y_2^2}, u_{12} = -\frac{m_2 y_2 \varphi(\mathbf{y})}{y_1^2 + y_2^2}.$$

所以,

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{y}) + (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u}_1 &= \\ \varphi(\mathbf{y}) + \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 \end{bmatrix} &\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix} = \\ \varphi(\mathbf{y}) - \frac{m_1 y_1^2 \varphi(\mathbf{y})}{y_1^2 + y_2^2} - \frac{m_2 y_2^2 \varphi(\mathbf{y})}{y_1^2 + y_2^2} &= \\ (1 - \frac{m_1 y_1^2 + m_2 y_2^2}{y_1^2 + y_2^2})\varphi(\mathbf{y}). \end{aligned}$$

又因为 $m_1 \geq 1, m_2 \geq 1$, 所以 $\varphi(\mathbf{y}) + (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u}_1 \leq 0$ 。故可得: $\dot{H}(\mathbf{y}) \leq (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{T}(\mathbf{y})\nabla_{\mathbf{y}} H + \varphi(\mathbf{y}) + (\nabla_{\mathbf{y}}^T H)\mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u}_1 \leq 0$ 。

因此,根据 Lyapunov 稳定性定理,在 \mathbf{u}_1 控制作用下,此广义的受控 Hamilton 系统是渐近一致稳定的。证毕。

2.2 跟踪控制器的设计

扰动补偿器的设计是基于系统坐标原点渐近稳定展开的,为了得到永磁同步电动机的任意期望输出结果,在此设计跟踪控制器 \mathbf{u}_2 , 目的在于转移系统的稳定平衡点,以便达到闭环稳定控制的效果。选取系统期望平衡点为 $(y_{10}, y_{20}, \bar{y}_{30})$, 依据 Ortega 等^[13]提出的修正互联和阻尼结构的控制(interconnection and damping assignment, IDA)设计方法,设计跟踪控制器 \mathbf{u}_2 , 满足下述方程:

$$-\mathbf{T}_a \nabla_{\mathbf{y}} H + \mathbf{g}(\mathbf{y})\mathbf{u}_2 = [\mathbf{T}(\mathbf{y}) + \mathbf{T}_a(\mathbf{y})]\nabla_{\mathbf{y}} H_a \quad (9)$$

式中, $\mathbf{T}_a(\mathbf{y}) = \mathbf{J}_a(\mathbf{y}) - \mathbf{R}_a(\mathbf{y})$, $\mathbf{J}_a(\mathbf{y})$ 、 $\mathbf{R}_a(\mathbf{y})$ 为期望结构的修正矩阵,均为待定系数矩阵,即设

$$\mathbf{J}_a(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} 0 & J_{12} & J_{13} \\ -J_{12} & 0 & J_{23} \\ -J_{13} & -J_{23} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_a(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & 0 \\ 0 & z_2 & 0 \\ 0 & 0 & z_3 \end{bmatrix},$$

矩阵中的待定参数均为正实数。

修正后取期望的 Hamilton 能量函数为:

$$H_d(\mathbf{y}) = \frac{1}{2}[(y_1 - y_{10})^2 + (y_2 - y_{20})^2 + (\bar{y}_3 - \bar{y}_{30})^2] \quad (10)$$

且有 $H_d(\mathbf{y}) = H(\mathbf{y}) + H_a(\mathbf{y})$, 所以依据式(9)可推得控制器 \mathbf{u}_2 为:

$$\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} u_{21} \\ u_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + z_1)y_{10} - (\bar{y}_3 + y_3^* + J_{12})y_{20} - \\ J_{13}\bar{y}_{30} - z_1 y_1 + J_{12}y_2 + J_{13}\bar{y}_3 \\ (\bar{y}_3 + y_3^* + J_{12})y_{10} + (1 + z_2)y_{20} + \\ (\sigma - J_{23})\bar{y}_{30} - J_{12}y_1 - z_2 y_2 + J_{23}\bar{y}_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 控制系统参数设计

从原理上来看,上述所设计的控制器 \mathbf{u}_1 与 \mathbf{u}_2 将较好地解决系统的混沌问题,但由于其两控制器中均含有待定未知参数,将给控制器的具体实现带来一定的困扰,通常的做法是通过多次试凑法找到一组相对较好的参数,然而这种做法需要花费大量的精力,对以往的经验依赖性太强。为了增强控制系统的灵活性和自适应能力,选用苍狼优化算法来训练这些待定参数,不需要试凑,而且还能使系统性能在一定程度上得到优化。

3.1 参数训练目标的选择

以永磁同步电动机角速度为系统输出量,可以用四阶龙格-库塔方法对加入控制器后的永磁同步电动机模型进行数值求解,为了简化计算量,选此数值求解中迭代次数靠后的输出结果的数值平方的平均值 E 作为参数训练目标,即目标设为:

$$E = \frac{1}{(n-499)} \sum_{i=500}^n (\Omega_i - \Omega^*)^2 \quad (12)$$

式中, i 为第 i 次迭代, n 为总的迭代次数 ($n > 500$), Ω_i 为第 i 次迭代得到的输出角速度值, Ω^* 为输出角速度的期望值。苍狼优化算法应用于此的主要任务是通过搜索使目标值 E 最小,从而寻找到较佳的各控制器参数。

3.2 苍狼优化算法及应用

苍狼优化算法^[15]是随着计算智能的发展而发展起来的,采用的是随机搜索寻优策略^[16],属于群智能算法中的一种。苍狼优化算法是于2014年由 Mirja-

山等^[15]提出的,由于该算法具有结构简单、易理解等特点,使其很快就被应用于各行各业中,其中在电力系统方面相对应用较多,主要包括最大功率点跟踪问题^[17]、无功功率优化问题^[18]、大范围电力系统稳定器^[19]、电力系统机组组合^[20]等问题。

苍狼优化算法寻优的核心思想在于模拟苍狼捕猎的过程^[21],捕到猎物表示获得了算法的最优值。具体可描述如下:先把苍狼群分成4个等级, α 狼为最高等级的苍狼,它所在的位置被认为是最有可能有猎物的位置; β 狼与 δ 狼分别被认为是第二、第三等级的苍狼,它们连同 α 狼一起被认为是领导层的狼;最后一级为 ω 狼,它们负责完成搜索捕猎任务。用 ω 狼围绕前3领导层苍狼展开随机搜索得到的位置分别与此3个领导层苍狼的位置进行对比,性能更佳则用此更新后的 ω 狼去替换原 α 狼、 β 狼或 δ 狼;否则,各领导层苍狼的状态保持不变。 α 狼的位置被认为最有可能为猎物的位置,即经过多次随机搜索迭代更新后,最优的 α 狼的位置状态将作为寻优的最佳结果。式(13)是苍狼优化算法的 ω 狼核心搜索策略:

$$\begin{cases} d_\alpha = |c_1 \cdot x_\alpha - x^t|, \\ d_\beta = |c_2 \cdot x_\beta - x^t|, \\ d_\delta = |c_3 \cdot x_\delta - x^t|, \\ x_1^{t+1} = x_\alpha - a_1 \cdot d_\alpha, \\ x_2^{t+1} = x_\beta - a_2 \cdot d_\beta, \\ x_3^{t+1} = x_\delta - a_3 \cdot d_\delta, \\ x^{t+1} = \frac{x_1^{t+1} + x_2^{t+1} + x_3^{t+1}}{3} \end{cases} \quad (13)$$

式中: x 表示 ω 苍狼的位置矢量,由多个状态变量组成; x^t 表示该只 ω 苍狼当前所在位置值; x_α 、 x_β 、 x_δ 分别表示 α 、 β 、 δ 这三只领导苍狼当前所在位置值; x_1^{t+1} 、 x_2^{t+1} 、 x_3^{t+1} 分别表示该只 ω 苍狼围绕 α 、 β 、 δ 这三只领导苍狼的捕猎行为得到的更新位置; x^{t+1} 表示该只 ω 苍狼此次围绕这三只领导苍狼捕猎结束后最终更新的位置值; a 与 c 的通用计算式为 $a = 2\mu \cdot r_1 - \mu$, $c = 2 \cdot r_2$, a 相应的取值范围为 $[-1, 1]$, r_1 、 r_2 是0到1之间的随机向量, μ 中的元素值随搜索次数增加从2逐减到0。

对于实际问题,苍狼优化算法应用的关键在于建立问题与狼群之间的关联模型。设苍狼位置矢量由所设计的控制器中7个待定的参数组成,即有:

$$x = [m_1 \quad m_2 \quad z_1 \quad z_2 \quad J_{12} \quad J_{13} \quad J_{23}] \quad (14)$$

加入苍狼优化器以后系统结构如图2所示。

4 仿真实验

根据永磁同步电动机 $i_d = 0$ 的控制策略,可得到系统(3)的平衡点为 $(0, \frac{\bar{T}_L + \dot{y}_3}{\sigma} + y_3, 0)$,取

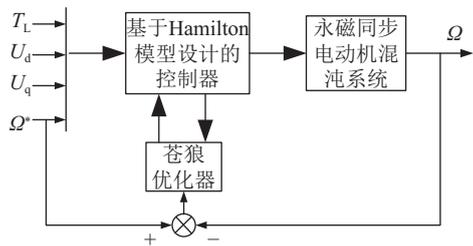


图2 永磁同步电动机混沌优化控制结构图

Fig.2 Chaotic optimal control structure of PMSM

$\varphi(y) = 22.96|y_2\tilde{y}_3| + |17.5y_2 - 5.46\tilde{y}_3|y_3^* + |\tilde{y}_3|(y_3^* + \tilde{T}_L)$, 实验过程中先让永磁同步电动机运行在混沌状态,20 s后加入扰动补偿器、跟踪控制器及苍狼优化器。

4.1 $U_d=0, U_q=0, \Omega^*=7, \tilde{T}_L=5$ 时的情况

此时,系统(3)期望的平衡点为 $(0, 7.916, 7)$,图3(a)、(b)分别是系统未加控制时与加入控制器时的相图,明显在未加控制器时系统是处于混沌状态的,加入所设计的控制器后混沌现象得到了较好的抑制。

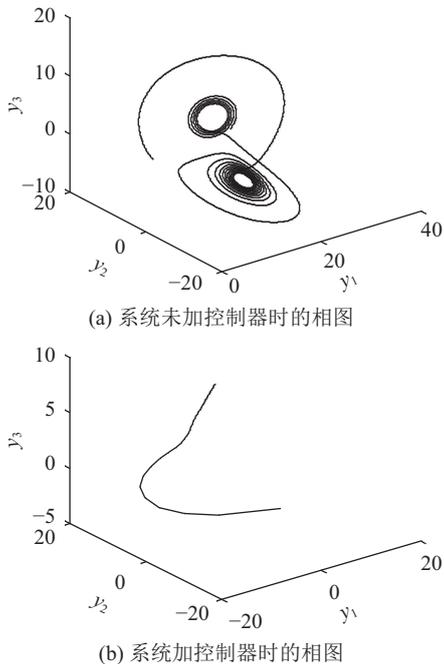


图3 系统相图

Fig.3 Phase diagram of system

图4是永磁同步电动机的 i_d 、 i_q 及 Ω 的输出结果。由图4可以看出,加入控制系统后此3个参数均很好地稳定在其期望的平衡点值上,说明系统的跟踪效果较好。此次实验优化训练得到的参数值为 $m_1 = 1.0222$, $m_2 = 1$, $z_1 = 7.0026$, $z_2 = 15.9256$, $J_{12} = 50$, $J_{13} = 40.3585$, $J_{23} = 8.3992$ 。

4.2 $U_d=0, U_q=0, \Omega^*=10, \tilde{T}_L$ 由5变到7时的情况

图5是对负载扰动研究的仿真结果图,期望的角速度输出也由7 rad/s变为了10 rad/s,在30 s时负载转矩突然由5 N·m变为7 N·m,图5(c)为电动机的角速

度的输出。由图5(c)可以看出其输出的角速度能很好地跟踪期望值,且基本不受负载扰动变化的影响。这说明系统不仅具有较好的动态跟随性能而且还具

备较强的抗负载扰动能力。此次优化训练得到的参数值: $m_1 = 1.0126$, $m_2 = 1.0169$, $z_1 = 7.0659$, $z_2 = 40$, $J_{12} = 49.8632$, $J_{13} = 50$, $J_{23} = 9.9201$ 。

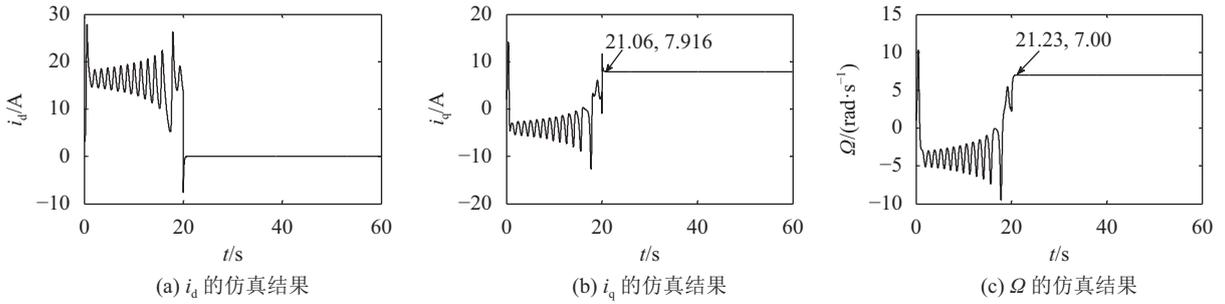


图 4 $U_d = 0, U_q = 0, \Omega^* = 7, \bar{T}_L = 5$ 时系统仿真结果

Fig.4 Simulation results of system when $U_d = 0, U_q = 0, \Omega^* = 7, \bar{T}_L = 5$

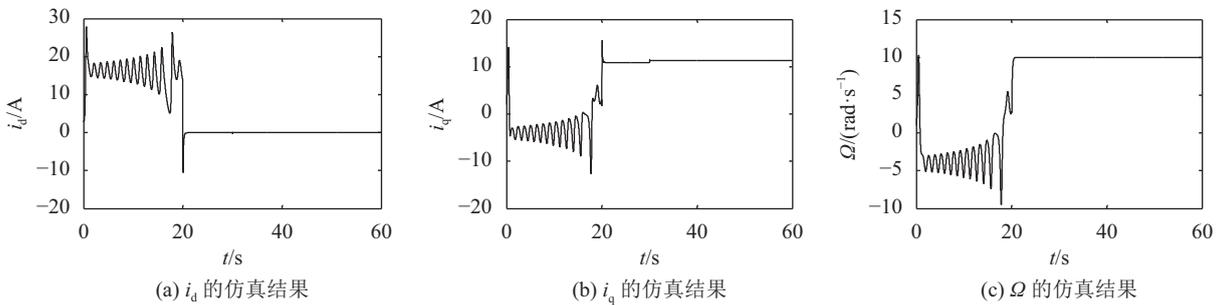


图 5 $U_d = 0, U_q = 0, \Omega^* = 10, \bar{T}_L = 5 \rightarrow 7$ 时系统仿真结果

Fig.5 Simulation results of system when $U_d = 0, U_q = 0, \Omega^* = 10, \bar{T}_L = 5 \rightarrow 7$

4.3 $U_d \neq 0, U_q \neq 0, \Omega^* = 7, \bar{T}_L$ 由 5 变到 7 时的情况

图6为加入电源电压后的仿真结果,取 $U_d = 10$ V, $U_q = 20$ V。

好地跟踪系统的期望值,说明系统具有一定的鲁棒性。此次优化训练得到的参数值 $m_1 = 1$, $m_2 = 1$, $z_1 = 12.4394$, $z_2 = 28.1919$, $J_{12} = 50$, $J_{13} = 42.2776$, $J_{23} = 4.9594$ 。

从图6的角速度输出可知,此时的系统仍然能较

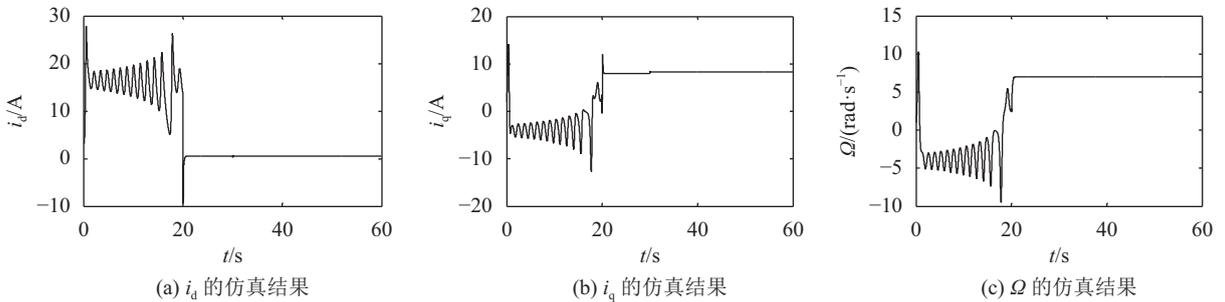


图 6 $U_d \neq 0, U_q \neq 0, \Omega^* = 7, \bar{T}_L = 5 \rightarrow 7$ 时系统仿真结果

Fig.6 Simulation results of system when $U_d \neq 0, U_q \neq 0, \Omega^* = 7, \bar{T}_L = 5 \rightarrow 7$

5 结论

首先根据永磁同步电动机的动态数学模型,通过相应的变换得到了其广义的无量纲Hamilton模型;利用Hamilton能量的概念进行扰动补偿控制器设计,并对加入扰动补偿器后的系统利用Lyapunov原理证明了系统的渐近稳定性;再依据互联与阻

尼配置法进行了跟踪控制器的设计。然后,针对上述两控制器中存在的可调增益与待定系数,采用苍狼优化搜索算法来寻找扰动补偿控制器中的可调增益及跟踪控制器中的待定系数的较佳值,不仅克服了靠经验确定的参数带来的通用性差的缺点,而且更有利于提高系统的跟踪性能,增强了系统的自适应能力。最后,通过实验验证了所设计的控制器具有良

好的控制效果,永磁同步电动机系统的混沌现象得到了较好的抑制,系统跟随性能及抗扰性能都得到了较大的提高,转速跟随的精度也较高。

这里,采用苍狼优化算法来解决实际问题关键在于如何把实际问题转化到苍狼群模型。本文是将可调增益与待定参数当作苍狼个体的位置矢量来处理,模拟苍狼捕猎行为,寻找到最佳的苍狼位置矢量即找到了可调增益与待定参数的最佳值,最终有效解决了控制器的参数问题。

虽然基于苍狼优化算法的Hamilton模型的混沌控制是基于永磁同步电动机混沌现象提出来的,但这种控制思路不局限于永磁同步电动机的混沌控制,同样可以应用于其它能转换为广义Hamilton模型的混沌系统。

另外,从实验结果来看,永磁同步电动机输出转速不论是跟随性还是超调量都表现较好,但是其交直流电流在加控制器的瞬间超调量相对较大,因此降低系统电流动态超调可作为进一步研究永磁同步电动机混沌控制的后续工作。

参考文献:

- [1] Wei Duqu,Zhang Bo,Luo Xiaoshu,et al.Effects of couplings on the collective dynamics of permanent-magnet synchronous motors[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems—II:Express briefs,2013,60(10):692–696.
- [2] Mai Xiaohui,Du Weiqu,Zhang Bo,et al.Controlling chaos in complex motor networks by environment[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems—II:Express briefs,2015,62(6):603–607.
- [3] Gao Shilong.Detection and parameters estimation of LFM signal based on chaos[J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2013,45(3):98–102.[高仕龙.基于混沌的LFM信号检测与参数估计[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(3):98–102.]
- [4] Li Jian,Ye Xiangdong.Recent development of chaos theory in topological dynamics[J].Acta Mathematica Sinica,2016,32(1):83–114.
- [5] Nguyen T B T,Liao T L,Yan J J.Adaptive sliding mode control of chaos in permanent magnet synchronous motor via fuzzy neural networks[J].Mathematical Problems in Engineering,2014,2014:868415.
- [6] Chen Qiang,Nan Yurong,Xing Kexin.Adaptive sliding-mode control of chaotic permanent magnet synchronous

motor system based on extended state observer[J].Acta Physica Sinica,2014,63(22):113–120.[陈强,南余荣,邢科新.基于扩张状态观测器的永磁同步电动机混沌系统自适应滑模控制[J].物理学报,2014,63(22):113–120.]

- [7] Zeng Yun,Zhang Lixiang,Qian Jing,et al.Control design method of Hamiltonian structure modified and its application[J].Electric Machines and Control,2014,18(3):93–100.[曾云,张立翔,钱晶,等.哈密顿结构修正的控制设计方法及其应用[J].电机与控制学报,2014,18(3):93–100.]
- [8] Wu Zhongqiang,Wu Changhan,Zhao Liru,et al.Robust control for permanent magnet synchronous motors based on Hamiltonian function[J].Acta Physica Sinica,2015,64(9):090503.[吴忠强,吴昌韩,赵立儒,等.基于哈密顿函数的永磁同步电机混沌系统鲁棒控制[J].物理学报,2015,64(9):090503.]
- [9] Yang Yifei,Luo Minzhou,Xing Shaobang,et al.Analysis of chaos in permanent magnet synchronous generator and optimal output feedback H_∞ control[J].Acta Physica Sinica,2015,64(4):040504.[杨益飞,骆敏舟,邢绍邦,等.永磁同步发电机混沌运动分析及最优输出反馈 H_∞ 控制[J].物理学报,2015,64(4):040504.]
- [10] Li Hongyu,Ju Ping,Chen Xinqi,et al.Stochastic averaging method for quasi Hamiltonian system of multi-machine power systems[J].Scientia Sinica Technologica,2015,45(7):766–772.[李洪宇,鞠平,陈新琪,等.多机电力系统的拟哈密顿系统随机平均法[J].中国科学:技术科学,2015,45(7):766–772.]
- [11] Shi Xiaoping,Yuan Guoping.Robust adaptive control of Hamilton system and its application in spacecraft[J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2013,45(5):130–137.[史小平,袁国平.Hamilton系统的鲁棒自适应控制及在航天器中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(5):130–137.]
- [12] van der Schaft A J.L2-gain and passivity techniques in nonlinear control[M].Berlin:Springer,1999.
- [13] Ortega R,van der Schaft A J,Mareels I,et al.Putting energy back in control[J].IEEE Control Systems Magazine,2001,21(2):18–33.
- [14] Chen Tianxiang,Zhang Ji,Peng Yanqing.Ant-load disturbance control method based on torque sliding mode

- observer[J].Power System Protection and Control,2013,41(8): 114–118.[陈天翔,张辑,彭彦卿.基于转矩滑模观测器的抗负载扰动控制方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(8): 114–118.]
- [15] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46–61.
- [16] Liu Zhen, Hu Yunan, Shi Jianguo. Coevolutionary immune memory clonal algorithm[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(1): 138–145. [刘振, 胡云安, 史建国. 协同进化免疫记忆克隆算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 138–145.]
- [17] Mohanty S, Subudhi B, Ray P K. A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 181–188.
- [18] Sulaiman M H, Mustaffa Z, Mohamed M R, et al. Using the gray wolf optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem[J]. Applied Soft Computing, 2015, 32(C): 286–292.
- [19] Shakarami M R, Davoudkhani I F. Wide-area power system stabilizer design based on grey wolf optimization algorithm considering the time delay[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 133: 149–159.
- [20] Sharma Y, Saikia L C. Automatic generation control of a multi-area ST-thermal power system using grey wolf optimizer algorithm based classical controllers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 853–862.
- [21] Saremi S, Mirjalili S Z, Mirjalili S M. Evolutionary population dynamics and grey wolf optimizer[J]. Neural Computing & Applications, 2015, 26(5): 1257–1263.

(编辑 赵 婧)

引用格式: Zhang Xiaoqing, Ming Zhengfeng. Chaos control on the Hamilton model of permanent magnet synchronous motor based on GWO[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(6): 149–156. [张小青, 明正峰. 基于GWO的永磁同步电动机 Hamilton模型的混沌控制[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(6): 149–156.]