

8-19-2021

Cloud Model PID Control of PMSM Based on SVM Inverse System

Li Hui

Marine Electrical Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, 116026, China;

Yun Hao

Marine Electrical Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, 116026, China;

Hongli Yue

Marine Electrical Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, 116026, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Cloud Model PID Control of PMSM Based on SVM Inverse System

Abstract

Abstract: Aiming at the problem of multivariable, nonlinearity and strong coupling of the permanent magnet synchronous motor(PMSM), *a strategy of inverse system identification which is independent of precise mathematical model and parameters based on support vector machines(SVM) is proposed. The dynamic decoupling control of PMSM is researched based on multivariable nonlinear control inverse system theory.* To deal with direct inverse control open-loop system with poor robustness and inverse modeling error of SVM, *a parameter self-tuning PID(Proportional Integral Differential) closed-loop controller based on cloud model rule inference is designed.* The simulation results confirm that the cloud model PID control based on SVM inverse system incorporates the merits of model-free learning, strong anti-interference capability. While realizing the dynamic decoupling of the excitation component of stator current and rotor speed, the system has high-precision speed tracking feature and excellent dynamic and static performance.

Keywords

permanent magnet synchronous motor(PMSM), inverse system method, SVM, decoupling control, cloud model PID control

Recommended Citation

Li Hui, Yun Hao, Yue Hongli. Cloud Model PID Control of PMSM Based on SVM Inverse System[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1846-1855.

基于 SVM 逆系统的 PMSM 云模型整定 PID 控制

李晖, 云昊, 岳红丽

(大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对多变量、强非线性、高耦合的永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM), 设计了不依赖精确数学模型的支持向量机(support vector machines, SVM)辨识逆系统, 应用多变量非线性控制逆系统理论, 对 PMSM 进行动态解耦控制研究; 针对直接逆开环控制鲁棒性差及支持向量机建模误差, 设计了基于云模型规则推理的参数自整定 PID(Proportional Integral Differential) 闭环控制器, 提高了系统的鲁棒性。仿真结果表明基于 SVM 逆系统的云模型整定 PID 控制策略不依赖被控对象数学模型, 系统抗干扰能力较强, 在实现定子电流励磁分量和转子转速动态解耦的同时转速能够精确跟踪给定响应, 系统具有良好的动、静态特性。

关键词: 永磁同步电机; 逆系统方法; 支持向量机; 解耦控制; 云模型整定 PID

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 08-1846-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0286

Cloud Model PID Control of PMSM Based on SVM Inverse System

Li Hui, Yun Hao, Yue Hongli

(Marine Electrical Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, 116026, China)

Abstract: Aiming at the problem of multivariable, nonlinearity and strong coupling of the permanent magnet synchronous motor(PMSM), a strategy of inverse system identification which is independent of precise mathematical model and parameters based on support vector machines(SVM) is proposed. The dynamic decoupling control of PMSM is researched based on multivariable nonlinear control inverse system theory. To deal with direct inverse control open-loop system with poor robustness and inverse modeling error of SVM, a parameter self-tuning PID(Proportional Integral Differential) closed-loop controller based on cloud model rule inference is designed. The simulation results confirm that the cloud model PID control based on SVM inverse system incorporates the merits of model-free learning, strong anti-interference capability. While realizing the dynamic decoupling of the excitation component of stator current and rotor speed, the system has high-precision speed tracking feature and excellent dynamic and static performance.

Keywords: permanent magnet synchronous motor(PMSM); inverse system method; SVM; decoupling control; cloud model PID control

引言

随着永磁材料性能日新月异的发展以及相关学科的飞速进步, 永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)逐步成为当今研究的

热点问题。高效率、高功率密度、调速范围广及良好的动态性能等优点, 使其广泛应用于航天航空、汽车、船舶等各个领域^[1]。PMSM 具有高阶、多变量、强非线性、强耦合等特性, 这使得 PMSM 系统的线性化和解耦成为实现高性能速度跟踪控制

收稿日期: 2020-06-01

修回日期: 2020-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(51809028); 中央高校基本科研业务费专项资金(3132019318)

第一作者: 李晖(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能控制, 船舶运动控制。E-mail: dmulihui@dlmu.edu.cn

和负载抗扰动控制的核心内容。PMSM 调速系统的解耦控制通常采用矢量控制(Field Oriented Control, FOC)、直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)和微分几何状态反馈控制等^[2]。其中 FOC 当且仅当磁链稳态时, 才可以实现转子转速和定子磁链的解耦, 为稳态近似解耦; 通过电磁转矩和定子磁链滞环实现动态解耦的 DTC 在低速条件下转矩脉动较大, 控制性能不佳。微分几何法通过抽象的微分几何知识和计算虽可得到精确线性化后的系统, 实现输入输出的渐近解耦, 具有理论意义, 但实现工程应用较难。近年来, 非线性控制理论中的逆系统方法因其物理概念清晰、无需高深的数学理论背景、应用范围广等优点得到蓬勃发展。逆系统方法的设计思想可以概括为: 通过被控对象表达式求出 α 阶积分逆系统方程, 将其作为系统控制律, 与原系统串联构成具有线性关系的伪线性系统, 最后根据线性系统设计理论完成整个系统的综合^[3]。

有关 PMSM 逆系统的相关研究不断推陈出新, 文献[4-5]采用解析逆系统方法来实现电机的解耦控制, 但是逆系统方法需要被控对象高精度的模型, 但 PMSM 作为一个高阶、强非线性对象, 运行参数随电机工况实时变化, 使得系统精确建模很难实现, 再加上解析逆表达式复杂, 所以此法在实际中很难得到应用。文献[6-7]采用自适应滤波算法获得近似被控系统的逆模型, 实现了自适应逆控制算法在 PMSM 调速系统的应用, 有效提高了系统的鲁棒性, 但系统结构复杂, 运算量较大。文献[8-9]采用神经网络算法辨识的方法获得逆系统, 实现了电机的解耦控制, 但神经网络算法容易陷入局部极值, 存在过学习、网络结构和类型设计取决于专家经验等缺陷, 阻碍了其在逆系统方法中的应用。支持向量机作为统计学最年轻、最实用的分支有效解决了神经网络在实现逆系统过程中潜在的问题, 它由统计学理论衍生而来, 在小样本条件下权衡模型复杂度与学习能力并找到最优解, 从而获得良好的泛化能力。

本文针对 PMSM 转子转速和定子电流励磁分

量之间存在的耦合, 在系统可逆的前提下, 采用支持向量机辨识得到系统精确逆模型, 并将其作为控制律对系统进行非线性反馈控制, 由此构成的伪线性系统包括二阶线性转速子系统和一阶线性 d 轴电流子系统, 实现了原系统的动态解耦。同时针对直接逆控制抗干扰能力差、鲁棒性弱以及支持向量机建模误差等问题, 引入云模型 PID(Proportional Integral Differential)控制器与上述已线性化的系统组成闭环控制策略。通过实验对转速和 d 轴电流之间的解耦性能、转速跟踪响应的性能和系统的抗干扰性能进行仿真, 验证算法的可行性。

1 PMSM 数学模型及可逆性分析

1.1 永磁同步电机数学模型

为了便于分析 PMSM 的稳态运动性能和瞬态性能, 在 $d-q$ 旋转坐标系下作如下假设: (1) 忽略磁路饱和、磁滞以简化结构; (2) 假设电机运行时电感参数不变, 磁路为线性。不计空间谐波, 永磁体内部的磁导率与空气相同; (3) 假设定子绕组间无误差, 绕组间均相差 120° 电角度; (4) 忽略温度变化对电阻的影响, 忽略阻尼作用。基于上述假设 PMSM 电磁-机械数学模型在 $d-q$ 坐标系下定子电压方程:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_e \varphi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_e \varphi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程:

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q [i_d (L_d - L_q) + \varphi_f] \quad (3)$$

机械运动方程:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (4)$$

式中: u_d , u_q , i_d , i_q , φ_d , φ_q , L_d , L_q 分别为定

子电压、电流、磁链、电感的 d, q 轴分量; R 为定子电阻; ω_m 为转子机械角速度; ω_e 为转子电气角速度, 满足 $\omega_e = p_n \omega_m$; p_n 为转子极对数; 对于表贴式 PMSM 有 $L_d = L_q$; ϕ_f 为永磁链。

式(2)求一阶微分后代入式(1), 式(3)代入式(4), 整理可得表贴式 PMSM 在 $d-q$ 下的状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & p_n \omega_m & 0 \\ -p_n \omega_m & -\frac{R}{L} & -\frac{p_n \phi_f}{L} \\ 0 & \frac{3p_n \phi_f}{2J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L} \\ \frac{u_q}{L} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2 系统可逆性分析

由式(5)可知, PMSM 模型是一个多输入多输出的非线性系统, 其中输入量:

$$\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T = [u_d, u_q]^T \quad (6)$$

状态量:

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [i_d, i_q, \omega_m]^T \quad (7)$$

输出方程:

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T = [i_d, \omega_m]^T = [x_1, x_3]^T \quad (8)$$

采用 Interactor 算法分析系统的可逆性。对输出分量分别求微分直至显含输入变量 \mathbf{u} 。对分量 y_1 求微分有:

$$\dot{y}_1 = \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}x_1 + p_n x_2 x_3 + \frac{1}{L}u_1 \quad (9)$$

由式(9)可看出 y_1 的一阶导数显含输入分量 u_1 ,

令 $Y_1 = \dot{y}_1$, 则 Y_1 对 \mathbf{u} 的 Jacobian 矩阵为:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial u_1} & \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial u_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)所示 Jacobian 矩阵的秩为 1, 矩阵满秩。

有 $\alpha_1 = \text{rank}(\partial Y_1 / \partial \mathbf{u}) = 1$ 。对分量 y_2 求微分有:

$$\begin{aligned} \dot{y}_2 &= \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3p_n \phi_f}{2J}x_2 - \frac{B}{J}x_3 - \frac{T_L}{J} \\ \ddot{y}_2 &= \frac{3p_n \phi_f}{2J} \left(\frac{u_2}{L} - \frac{R}{L}x_2 - \frac{p_n \phi_f}{L}x_3 - p_n x_1 x_3 \right) \\ &\quad - \frac{B}{J}\dot{x}_3 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可看出 y_2 的二阶导数显含输入分量

u_2 , 令 $\mathbf{Y}_2 = [y_1^{(1)}, y_2^{(2)}]^T$, 则 Y_1 对 \mathbf{u} 的 Jacobian 矩阵为:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{Y}_2}{\partial \mathbf{u}^T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial u_1} & \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial \ddot{y}_2}{\partial u_1} & \frac{\partial \ddot{y}_2}{\partial u_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{3p_n \phi_f}{2JL} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)所示 Jacobian 矩阵秩为 2, 矩阵满秩。

有: $\alpha_2 = \text{rank}[\mathbf{A}(\mathbf{x})] = 2$ 。则矢量相对阶:

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2]^T = [1, 2]^T \quad (13)$$

存在关系: $\alpha_1 + \alpha_2 = 3 = n$ 。其中 n 表示 \mathbf{x} 的维数。由此推出, 系统不存在隐动态。综上分析, PMSM 系统是可逆的。由式(5)可知:

$$x_2 = \frac{2J}{3p_n \phi_f} \left(\dot{x}_3 + \frac{B}{J}x_3 + \frac{T_L}{J} \right) \quad (14)$$

将式(14)代入式(11), 联立式(9)推出表贴式 PMSM 逆系统解析解为:

$$\begin{cases} u_1 = Ry_1 + L\dot{y}_1 - \frac{2JLy_2}{3\phi_f} \left(\dot{y}_2 + \frac{B}{J}y_2 + \frac{T_L}{J} \right) \\ u_2 = \frac{2JL}{3p_n \phi_f} \ddot{y}_2 + \frac{2(BL + JR)}{3p_n \phi_f} \dot{y}_2 + \left(\frac{2BR}{3p_n \phi_f} + p_n \phi_f \right) y_2 + p_n Ly_1 y_2 + \frac{2RT_L}{3p_n \phi_f} \end{cases} \quad (15)$$

故逆系统可表示为:

$$\mathbf{u} = f(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, \ddot{y}_2) \quad (16)$$

2 PMSM 逆系统构建

考虑到 PMSM 原系统数学模型参数精确与否直接决定解析逆系统能否实现, 且通常情况下逆系统的解析表达式难以直接求解, 本节引入逆系统的非解析实现形式—支持向量机逆系统。

2.1 支持向量机算法

Vapnik 提出的支持向量机(Support Vector Machines, SVM)是以统计学理论为基础的方法, 其对解决“维数灾难”和“过学习”等问题起到关键作用。SVM 算法逐步成为解决非线性回归问题的有效工具^[10]。

给定样本 $\{(\mathbf{x}_i, y_i)\} (i=1, 2, \dots, l)$, l 为样本容量, \mathbf{x}_i 为输入矢量, y_i 为相应的目标输出数据。SVM 实现回归是选取一个非线性映射 Φ , 将数据 \mathbf{x}_i 映射到高维特征空间 F (Hilbert 空间), 并在空间内建立如下线性回归函数:

$$f(x) = \mathbf{w}^T \varphi(x) + b \quad (17)$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 为非线性函数; \mathbf{w} 为权值; b 为阈值(偏置量)。SVM 将低维空间非线性回归变为高维空间线性回归。根据 SRM 准则, $f(x)$ 应满足风险函数最小。

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{w} + C \sum_{i=1}^l L(f(\mathbf{x}_i), y_i) \quad (18)$$

式中: C 为正则化参数, 其数值大小与拟合度成正比; $L(\cdot)$ 为损失函数, 代表 y_i 和 $f(\mathbf{x}_i)$ 之间的偏差。线性不敏感系数 ε 用来表示损失函数精度, ε 决定了回归误差的大小, 可增加回归的鲁棒性。损失函数定义为:

$$L(f(x), y) = \max(0, |f(x) - y| - \varepsilon) \quad (19)$$

引入松弛变量, ξ_i , ξ_i^* 分别表示训练误差上界和下界, 由此回归问题变为求解以下凸规划问题:

$$\begin{aligned} \min J = & \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i^* + \xi_i) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} y_i - (\mathbf{w}, \phi(\mathbf{x}_i)) - b \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ b + (\mathbf{w}, \phi(\mathbf{x}_i)) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i^*, \xi_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

根据对偶原理、Lagrange 乘子法及核函数理论对上述优化问题的目标函数进行处理, 式(20)可以等效为:

$$\begin{aligned} \max J = & \sum_{i=1}^l \alpha_i^* (y_i - \varepsilon) - \sum_{i=1}^l \alpha_i (y_i + \varepsilon) - \\ & \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (21) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^l \alpha_i = \sum_{i=1}^l \alpha_i^* \\ 0 \leq \alpha_i \leq C, 0 \leq \alpha_i^* \leq C, i=1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned}$$

式中: 核函数 $K(\cdot)$ 为 Mercer 条件下任意对称函数, 用点积表示:

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \varphi(\mathbf{x}_i) \varphi(\mathbf{x}_j) \quad (22)$$

由上述二次规划问题, 可以得到 α_i^* 和 α_i , 结合 KKT 条件可得偏值 b , $(\alpha_i^* - \alpha_i)$ 非 0 时的输入样本就是支持向量。最终得到非线性映射, 表示为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b \quad (23)$$

2.2 逆系统构建

PMSM 为复杂的多变量系统, 针对支持向量机仅限于实现多输入单输出的回归问题, 本文对系统每个输出设计相应的学习机。SVM 逆系统包括: 动态补偿积分环节和非线性映射的 SVM。结合 SVM 辨识原理和逆系统理论, 支持向量机的 α 阶逆系统实现步骤如下^[11]:

(1) 确定适当的激励信号: 为保证辨识后系统的泛化能力, 输入信号转速、电流随机量应覆盖系统所有工作区域。本文转速激励选取 100 rpm~600 rpm 随机方波, 电流激励选取 -10A~10A 随机方波。

(2) 对系统施加激励信号 u , 得到输出信号 y , 在系统响应过程中, 对输入、输出进行采样。本文采集信号包括 PMSM 系统输入 $\mathbf{u} = [u_d, u_q]^T$ 、输出 $\mathbf{y} = [i_d, \omega_m]^T$, 采样时间 0.2 ms, 运行时间 2 s, 获得充分丰富的系统动态响应。采用高阶数值微分方法求得 y 的各阶导数, 组成支持向量机输入样本集 $\{i_d, i_d', \omega_m, \omega_m', \omega_m''\}$ 记为 \mathbf{X} 、输出样本集 $\{u_d\}$, $\{u_q\}$ 记为 \mathbf{Y} 。对数据“掐头去尾”, 每隔 100 组选取一组作为样本数据, 选取 8 000 组构成训练样本集, 如式(24)所示。2 000 组作为测试集以测试逆模型精度。

$$\{\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i\} (i=1, 2, \dots, 8000) \quad (24)$$

(3) 为防止“维数灾难”, 归一化样本数据后训练模型。本文核函数采用高斯径向基核函数:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \exp(-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|^2) \quad (25)$$

式中: 系数 γ 以及 SVM 惩罚因子系数 C 由 PSO 算法参数寻优获得, 损失函数系数 ε 设为 0.01。反复进行训练, 直至满意的辨识精度。图 1 为训练完成后, 2 000 组测试数据的预测结果与实际结果对照图。

(4) 在 SVM 的训练下, 得到阈值 b 和输入向量系数 α_i^* 、 α_i , 通过输入 X , 可辨识出 α 阶逆模型的输出:

$$u(k) = g[X] = \sum_{i=1}^d (\alpha_i^* - \alpha_i) (\phi(X_i) \cdot \phi(X)) + b = \sum_{i=1}^d (\alpha_i^* - \alpha_i) K(X_i \cdot X) + b \quad (26)$$

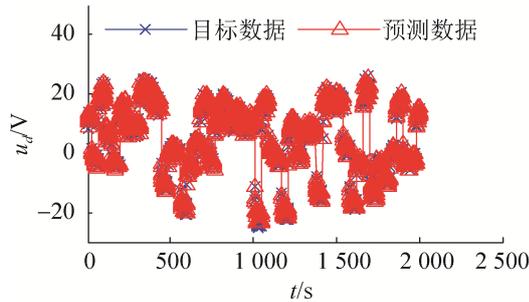


图 1 预测值与目标值
Fig. 1 Predicted value and target value

(5) 辨识得到的系统与 PMSM 系统串连构成伪线性复合系统, 其结构如图 2 所示。该系统即可实现电流与转速的解耦控制。

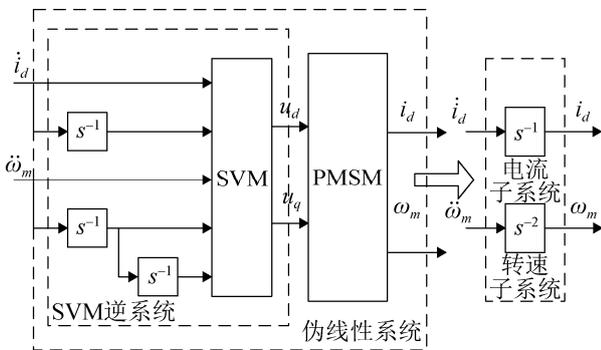


图 2 基于 SVM 的 α 阶逆系统
Fig. 2 α order inverse system based on SVM

(6) 为上述系统设计闭环控制器, 构成复合控制策略。本文针对直接逆控制抗干扰能力差、鲁棒性弱以及支持向量机建模误差等问题, 引入云模型参数自整定 PID 控制器作为系统闭环控制器。

3 控制器设计

3.1 云模型理论

对于某定量论域通常用精确数值 U 表示, U

中存在某定性概念 C , C 中某定量值 x 为 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0,1]$ 是有稳定倾向的随机数, 即:

$$\mu: U \rightarrow [0,1] \quad \forall x \in U \quad x \rightarrow \mu(x) \quad (27)$$

则 U 上 x 的组成的集合称为云(Cloud), x 称为一个云滴^[12]。

云模型使用期望(Expected Value)、熵(Entropy)和超熵(Hyper Entropy)来描述一个概念。期望 Ex 表示 U 中 x 分布的期望值, 熵用来体现定性概念 C 的不确定性, 超熵 He 则体现熵的不确定性。若 x 满足: $x \sim N(Ex, En'^2)$, 其中 $En' \sim N(En, He^2)$, 且 x 对 C 的确定度 μ 满足:

$$\mu = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En')^2}} \quad (28)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为正态云。

云模型定性规则发生器由前件云发生器(Antecedent Cloud Generator)和后件云发生器(Consequence Cloud Generator)组成, 其结构如图 3 所示。前件云发生器被某特定输入 a 激活后输出 a 对某定性概念的确定度 μ 。后件云发生器以 μ 为输入, 由特定算法计算出论域 U 中与 μ 对应的云滴 $drop(x, \mu)$ 。

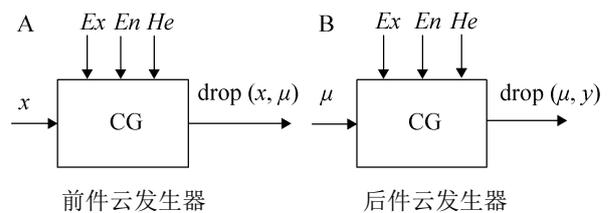


图 3 云发生器结构图
Fig. 3 Structure of cloud generator

输入的维数与定性规则的数量决定云发生器的类型。本文选择双条件规则发生器, 其结构如图 4 所示。

3.2 基于云模型的参数自整定 PID

云模型参数整定 PID 控制器设计步骤为^[13]:

(1) 确定推理机的输入、输出

本文选取误差 e 和误差变化率 ec 为推理机的输入, 经过规则推理和云决策后输出对 PID 参数的

整定值。即输入为云化处理后电机实际转速与期望转速的误差和误差变化率, 输出由逆云化处理后为 PID 参数调整量 ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 。从而由式(29)实现 PID 参数的自整定。

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p_0} + \Delta K_p \\ K_i &= K_{i_0} + \Delta K_i \\ K_d &= K_{d_0} + \Delta K_d \end{aligned} \quad (29)$$

式中: K_{p_0} , K_{i_0} , K_{d_0} 为 PID 初始参数。

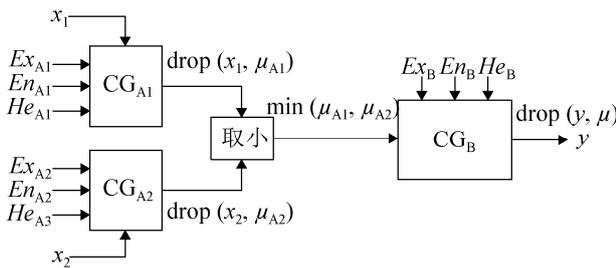


图 4 双条件规则发生器结构图
Fig. 4 Structure of double condition cloud model rule generator

(2) 建立推理机规则库

确定 e , ec 和 K_p , K_i , K_d 之间的定性关系是 PID 参数自整定的关键。根据自动控制原理, 当 $|e|$ 和 $|ec|$ 变化时, K_p , K_i , K_d 调整应遵循如下规则:

- ① 当 $|e|$ 较大时, 取较大的 K_p , 取较小的 K_i 。
- ② 当 $|e|$ 适中时, 取较小 K_p , K_d 取值大小适中。
- ③ 当 $|e|$ 较小时, 取较大的 K_p , K_i , $|ec|$ 较小时取较大 K_d , 反之取较小 K_d 。

本文云模型推理规则如表 1 所示, 其中 ΔK_i , ΔK_d 推理规则省略。

表 1 ΔK_p 的推理规则表

Tab. 1 ΔK_p Table of inference rules

e	ec				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NS	NS	NS	ZE
NS	NS	ZE	ZE	PS	PS
ZE	NS	ZE	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	ZE	PS	PS
PB	NB	NS	NS	ZE	ZE

(3) 确定前件、后件云表示类型

本文推理机的输入、输出以 NB (负向偏大)、NS (负向偏小)、ZE (零)、PS (正向偏小) 以及 PB (正向偏大) 5 个隶属云来描述“大”和“小”的定性概念。其数字特征分别为 NS (-2,1,0.05), ZE (0,1,0.05), PS (2,1,0.05), NB、PB 为组合云, 由直线与普通正态云的一半构成。推理机隶属云如图 5 所示。

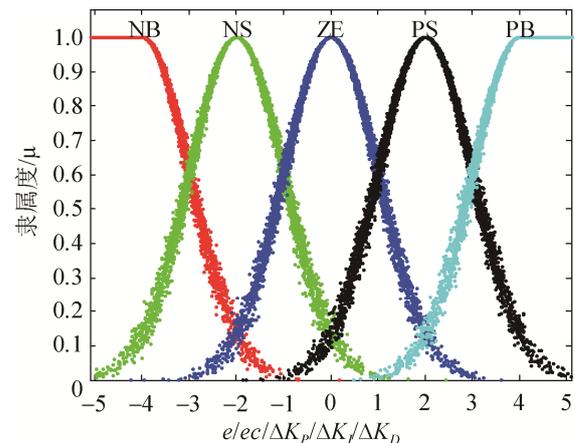


图 5 推理机隶属云
Fig. 5 Membership cloud of inference system

(4) 确定云模型推理参数

推理机的输入 e 和 ec 作为语言变量往往并不能正好适配其所取隶属云的论域, 故需要利用量化因子和比例因子对输入输出进行论域转换。

本文根据系统输入输出数量, 设定比例因子 K_e 和 K_{ec} 、量化因子 K_{u_1} , K_{u_2} 和 K_{u_3} 。它们对系统动、静态性能起着决定性作用: 增加 K_e 即减小了 e 的基本论域, 加强了误差变量的作用, 适当的增大 K_e 可以提高系统的快速性, 但过大的 K_e 会使系统超调增加、快速性下降, 甚至产生振荡。较小的 K_e 会导致调节强度不够, 降低整体的稳态精度。比例因子 K_{ec} 有助于增加控制器对多变输入的抑制作用, 可以提高系统的稳定性。但过大的 K_{ec} 会使控制器规则选择准确度下降, 使系统振荡。而较小的 K_{ec} 会导致快速性下降, 影响系统的稳定性。 K_e 和 K_{ec} 的值表示对输入变量 e 和 ec 的不同加权程度,

只有两者协调得当才能达到最好的控制效果。

推理机的输出为定性值，需由量化因子将其适配到适当大小再作用于系统。量化因子 K_u 决定系统的动态性能，适当的增大 K_u 会使系统响应时间减少。过大的 K_u 会导致超调过大，过小的 K_u 会导致系统快速性变差，甚至无法稳定。

在确定云模型推理机参数时，通常以隶属云的论域除以实际值作为量化因子的初始值，微调后使控制器的输出保持在合适的数量级上。再调整比例因子，以 e 和 ec 的实际值与隶属云论域范围的商为粗略值，在此基础上微调。本文最终选取参数为： $K_e=1\ 500$ ； $K_{ec}=1\ 500$ ； $K_{u_1}=0.01$ ； $K_{u_2}=0.01$ ； $K_{u_3}=0.01$ 。

(5) 编写云模型推理机程序

在 Matlab 中编写推理程序，实现算法。云模型参数自整定 PID 控制器如图 6 所示。

4 控制系统仿真实验

4.1 控制系统结构

PMSM 调速系统采用空间矢量脉宽调制技术 (SVPWM)，控制策略选取转速、电流双闭环控制。为克服支持向量机建模误差、增加系统鲁棒性，转速环、电流环控制器均设计为云模型 PID 控制器，

与支持向量机逆系统一起构成复合控制器，实现转速与定子电流励磁分量解耦控制的同时系统获得了优良的动、静态特性与抗干扰能力。PMSM 矢量控制双闭环系统结构如图 7 所示。

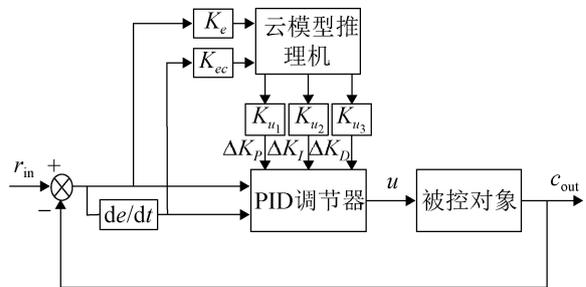


图 6 控制器结构图
Fig. 6 Structure of controller

4.2 仿真与分析

通过以上数学模型和算法分析，根据系统结构图搭建 Matlab/Simulink 仿真模型。永磁同步电机参数如下：定子电阻 $R=2.875\ \Omega$ 、交直流电感 $L_d = L_q = 8.5e-3H$ 、转子磁链幅值 $\psi_f=0.175$ 、转动惯量 $J=0.000\ 8\ kg\cdot m^2$ 、极对数 $P_n=4$ 、摩擦系数 $B_m=0.001\ Nms$ 。

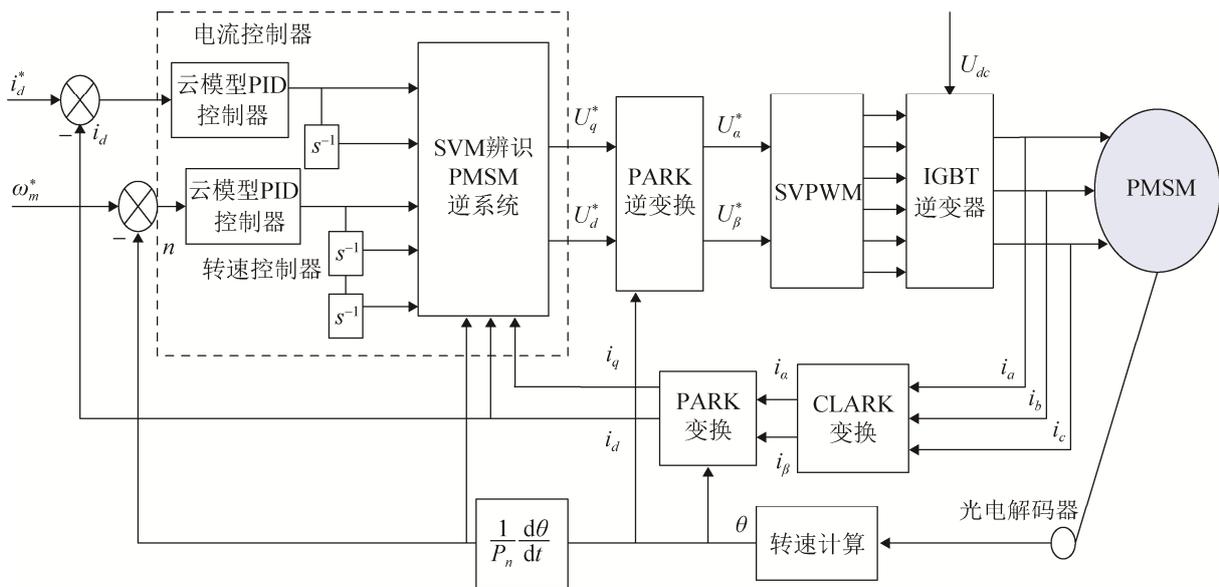


图 7 系统结构图
Fig. 7 Structure of system

图 8 为 SVM α 阶逆系统的 PMSM 云模型 PID 控制策略下转速的阶跃响应, 转速给定在 0.5 s 从 100 r/min 突变到 300 r/min, 在 1 s 再降至 100 r/min。由图 8 可见, 该控制策略可以准确、快速跟踪阶跃响应。

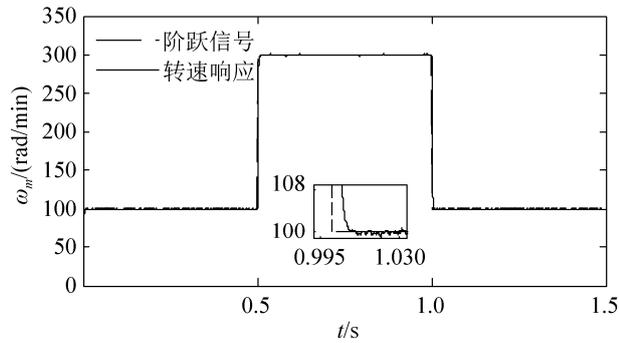


图 8 转速跟踪给定阶跃响应

Fig. 8 Speed tracking given step response

将传统 PID PMSM 转速控制与 SVM α 阶逆系统云模型 PID 转速控制进行对照试验。相同条件下, 给定初始转速 100 r/min, 在 0.5 s 转速突变至 300 r/min, 图 9~10 为两种控制策略的转速响应。对比可知, 本文控制策略下系统调节时间明显优于传统 PID 控制, 且几乎无超调。系统稳定后, 采用本文算法的系统稳态性能也较好。

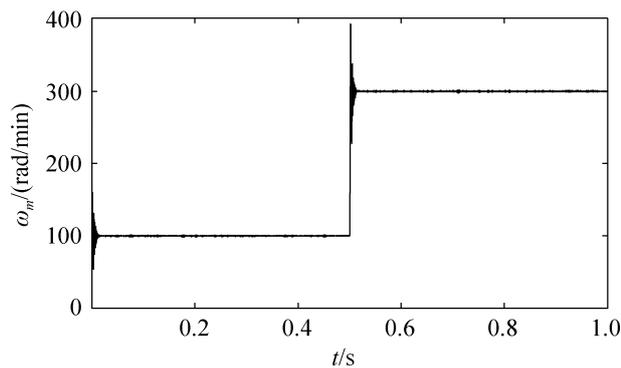


图 9 传统 PID 转速突变响应

Fig. 9 Speed sudden change response of traditional PID

图 11~12 为两种控制策略下对系统突加/减负载的转速响应, 图 13 为对应的转矩响应。在 0.3 s 系统负载由 2 N·m 突增至 6 N·m, 在 0.6 s 系统负载由 6 N·m 突减至 2 N·m。由图可见, 相比传统

PID 控制, 本文控制策略下系统的抗干扰能力较强, 对 PMSM 的非线性因素和参数变化具有更好的适应性。

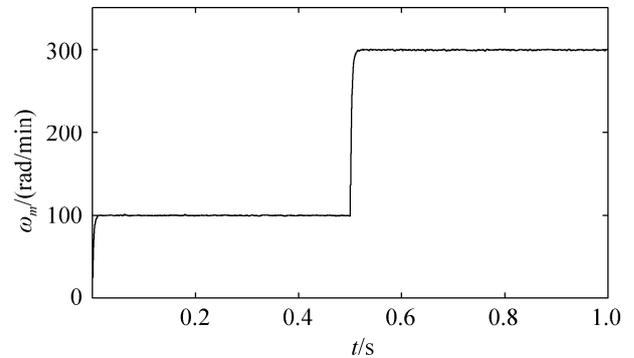


图 10 SVM 逆系统云模型 PID 转速突变响应

Fig. 10 Speed sudden change response of SVM inverse system cloud model

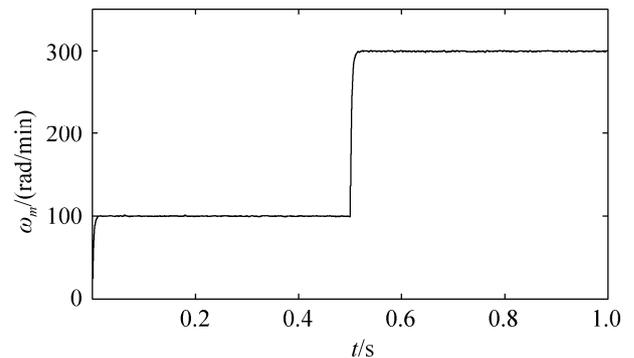


图 11 传统 PID 控制突增/减负载转速响应

Fig. 11 Traditional PID speed response of load sudden increase/decrease

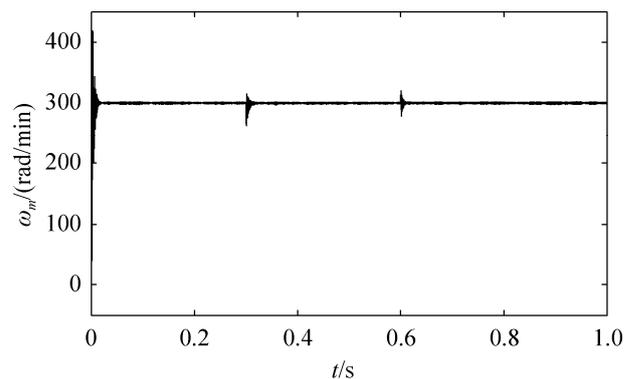


图 12 SVM 逆系统云模型 PID 控制突增/减负载转速响应

Fig. 12 SVM inverse system cloud model PID speed response of load sudden increase/decrease

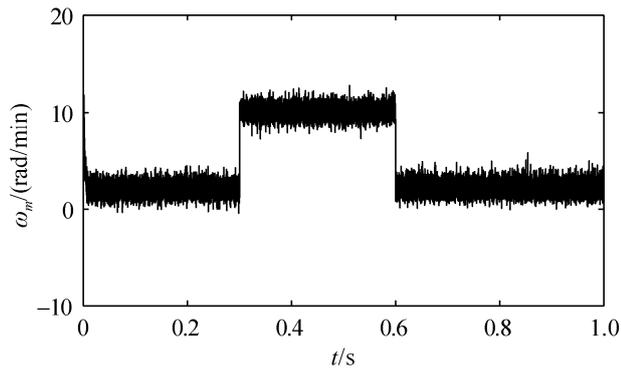
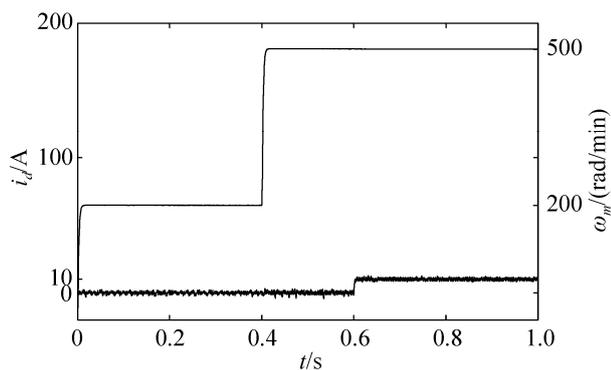


图 13 突增/减负载下的转矩响应

Fig. 13 Torque response of load sudden increase / decrease

图 14 为 d 轴电流与转速响应图。由图可见，转速初始给定 200 r/min，在 0.4 s 突变至 500 r/min 时，定子电流励磁分量波动较小；当定子电流励磁分量由初始给定 0，在 0.6 s 突变至 10 A 时，转子转速仍能保持恒定。验证了本文控制策略可以实现转速与定子电流励磁分量的动态解耦控制。

图 14 d 轴电流与转速响应Fig. 14 d -axis current and speed response

5 结论

针对永磁同步电机强非线性、强耦合的问题，本文使用支持向量回归算法辨识得到 PMSM 的逆系统，根据非线性逆系统理论对 PMSM 电机进行了解耦控制，并设计了基于云模型的参数自整定的 PID 附加控制器以减少建模误差、增加系统鲁棒性。不同工况下的实验表明，该方法转速跟踪精度高、响应速度快且超调较小，同时系统对外部负载扰动抑制能力较强。该方法对 PMSM 的高性能转速控制提供了新的解决方案。

参考文献:

- [1] 潘陶红. 不对称偏心气隙结构的电动机车用永磁同步电机研究[D]. 上海: 上海大学, 2019.
Pan Taohong. A Study of PMSM with Asymmetric Eccentric Air Gap Designed for Electric Motorcycle[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019.
- [2] 杨维山. 一种改进的逆系统永磁同步电机解耦控制技术[J]. 变频器世界, 2017(9): 64-67, 94.
Yang Weishan. An Improved Decoupling Control Technique for Permanent Magnet Synchronous Motor of Inverse System[J]. The World of Inverters, 2017(9): 64-67, 94.
- [3] 吴热冰, 李春文. 一般非线性系统的构造性逆系统方法[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(3): 345-350.
Wu Rebing, Li Chunwen. Constructive Inverse System Method for General Nonlinear Systems[J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(3): 345-350.
- [4] Sun X, Shi Z, Chen L, et al. Internal Model Control for a Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Inverse System Method[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion (S0885-8969), 2016, 31(4): 1539-1548.
- [5] Shi R, Li T, Kong L K. The Vector Control of PMSM Based on the Inverse System Theory[J]. Applied Mechanics & Materials (S1660-9336), 2014, 494/495: 1587-1590.
- [6] 陈哲, 薛钊, 方海伊, 等. 基于自适应逆控制的永磁同步电机调速系统[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(4): 824-829.
Chen Zhe, Xue Zhao, Fang Haiyi, et al. Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control System Based on Adaptive Inverse Control Method[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4): 824-829.
- [7] 宫玉琳. 永磁同步电动机自适应逆控制系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(4): 61-64.
Gong Yulin. Design and Implementation of Adaptive Inverse Control for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science ed, 2015, 38(4): 61-64.
- [8] Wang Q Q, Xu B G, You L R. BPMSM Control Using a Sliding Mode Controller with Fractional Order of Suspension Forces Based on Differential Geometry[J]. International Journal of Control & Automation

- (S2005-4297), 2015, 8(6): 187-198.
- [9] Wenshao B, Fangzhou H, Ziyuan L, et al. Neural Network Inverse System Decoupling Control Strategy of BLIM Considering Stator Current Dynamics[J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control (S0142-3312), 2018, 41(11): 014233121876299.
- [10] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. New York: Springer, 2000.
- [11] 刘国海, 董蓓蓓, 滕成龙, 等. 基于支持向量机广义逆的永磁同步电机模型参考自适应控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(增 1): 13-18.
Liu Guohai, Dong Beibei, Teng Chenglong, et al. Model Reference Adaptive Control of PMSM based on Support Vector Machines Generalized Inverse[J]. Journal of Southeast University: Natural Science ed, 2010, 40(S1): 13-18.
- [12] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
Li Deyi, Meng Haijun, Shi Xuemei. Membership Cloud and Membership Cloud Generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.
- [13] 曲志明. 船舶柴油发电机建模与转速云模型控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
Qu Zhiming. Research on Modeling and Cloud Model Speed Control of Marine Diesel-engine Generator[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.