

船舶电力系统柴油机的小波基预测函数控制

王 杰,武海博,朱晓东

(郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘要: 针对传统预测函数控制所选取的基函数都是全局函数而不能根据对参考轨迹在不同时刻的逼近精度不同进行灵活设置,损害了预测时域的整体优化目标的问题,提出了一种基于小波函数的预测函数控制(PFC)方法,并以 Morlet 函数作为小波基函数设计了船舶电力系统柴油机调速系统的预测函数控制器。利用小波函数的局部性和多尺度分析特性,对基函数的个数和位置分布可灵活设置。理论分析和仿真都表明,与常规的 PFC 相比,所设计的小波 PFC 调速器具有更好的跟踪能力和较强的鲁棒性,能很好地抑制参数变化和外部扰动对系统的影响,有利于提高柴油机调速系统的控制精度,从而保持整个船舶电力系统的安全稳定。

关键词: 船舶电力系统; 调速系统; 预测函数控制; 小波函数

中图分类号: TM 712; TP 273

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0024-04

0 引言

对于船舶电力系统而言,维持电源电压及其频率恒定是保障电力系统正常运行的关键。其中电压频率的稳定性与带动发电机运行的原动机(即柴油机)调速系统的运行特性密切相关,频率的调整依赖于柴油机调速器的调节。船舶运行工况复杂多变,使得船舶柴油机负荷和转速经常变化,所以柴油机调速系统的优劣直接关系到整个船舶电力系统的安全稳定。目前实际应用中的电子调速器,其控制方案多采用传统 PID 控制算法。模型预测控制 MPC(Model Predictive Control)是一种先进控制策略^[1-4],对模型要求低,鲁棒性好,具有良好的跟踪能力。文献[5]将 MPC 理论应用于柴油机调速系统,设计了基于广义预测控制的调速器,仿真结果表明广义预测控制比 PID 控制具有更优良的性能。

小波理论是 20 世纪 80 年代后期发展起来的应用数学分支,近年来小波变换已应用于预测控制中^[6-7]。预测函数控制 PFC(Predictive Functional Control)作为第三代 MPC,在保持传统 MPC 基本特征的同时,引入了基函数的概念。在已有的 PFC 方法研究中,基函数一般都选择阶跃、斜坡、三角、指数等函数形式,虽计算简单,却忽略了整个预测时域的优化目标,对目标函数的优化往往简化为预测时域上的若干个拟合点^[8-10]。文献[11]基于傅里叶逼近思想提出用正弦多项式函数作为基函数,得到了更好的控制性能和适用范围。PFC 的目的是通过优化某一性能指标从而使预测时域内的预测过程输出尽可能

接近参考轨迹,一般而言,随着预测时刻的增加,对参考轨迹的逼近要求越低。而无论是阶跃、斜坡、三角、指数等函数还是文献[11]中采用的正弦函数都是全局函数,不能根据对参考轨迹在不同时刻的逼近精度不同进行灵活设置。而小波函数在时域具有紧支集或近似紧支集,因而具有较好的局部性,且能进行多尺度分析,恰好弥补了传统基函数的不足。鉴于此,本文提出一种基于小波基函数的 PFC 算法,并将其用于船舶电力系统柴油机的调速系统。

1 基于小波基函数的 PFC 算法

1.1 基函数的选取

基函数的引入是 PFC 区别于其他 MPC 的本质特征,把控制输入表示为若干事先选定的基函数的线性组合,系统的输出响应可表示为各个基函数作用于对象模型响应的加权组合,而基函数的模型响应可以离线计算得到,从而提高控制的实时性。

PFC 的控制精度主要取决于基函数的选择,而基函数的选择依赖于被控对象的性质以及参考轨迹的要求。一般基函数选得越少、越简单,则在线计算量越少,但控制精度将降低。文献[12]已证明,对于任意函数 $f(x)$,存在有限个小波基函数,对其可实现任意精度的逼近。本文把小波函数作为 PFC 的基函数,即以小波为基底逼近一定的预测控制曲线。利用小波的紧支局部性和多尺度分析特性,在预测时刻较小处即对参考轨迹逼近要求高的时段,以细尺度小波逼近;在预测时刻较大处即对参考轨迹逼近要求不高的时段,以粗尺度小波逼近。这样既能保证整个预测时域的优化目标,又能兼顾对参考轨迹的整体逼近性能,系统的动态性能也得到进一步优化。

常见的小波有 Haar 小波、墨西哥帽(Marr)小波、Morlet 小波、Daubechies 小波等。除了 Haar 小波在时域不连续,不利于进行算法的推导研究外,其余小波

收稿日期:2010-03-26;修回日期:2010-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974005);国家博士点新教师基金资助项目(20094101120008);河南省教育厅自然科学基金资助项目(2010A120008)

皆可被选作基函数,但相比之下 Morlet 小波是高斯包络下的单频率正弦函数,是一种复数小波,时域和频域都具有很好的局部性,也便于多尺度分析,所以本文选取 Morlet 小波作为基函数。

1.2 PFC 算法

预测模型是 PFC 的基础,它强调的是功能而不是结构形式。假定单输入、单输出系统的预测模型是一种线性定常离散时间的状态空间模型,其形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_m(k+1) &= \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(k) + \mathbf{B}_m u(k) \\ y_m(k) &= \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m(k) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}_m \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为预测模型的状态向量; $u \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 为系统的控制输入; $y_m \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 为预测模型的输出; $\mathbf{A}_m \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 、 $\mathbf{B}_m \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 、 $\mathbf{C}_m \in \mathbf{R}^{1 \times n}$ 为预测模型状态方程的系数矩阵。

未来的控制作用可用若干已知基函数 f_n 表示:

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n f_n(i) \quad i=1,2,\dots,P \quad (2)$$

其中, μ_n 为待求基函数的加权系数; N 为基函数的个数; P 为预测时域(也称优化时域)的长度。

$g_n(i)$ 是 $f_n(i)$ 作用下的模型响应,可得:

$$g_n(i) = \sum_{j=0}^{i-1} \mathbf{C}_m \mathbf{A}_m^{i-1-j} \mathbf{B}_m f_n(j) \quad (3)$$

PFC 的目的是使系统的过程输出 y_p 沿参考轨迹 y_r 逐渐到达设定值 c 。参考轨迹相当于一个滤波器,它不仅影响系统的动态性能,而且对系统的稳定性和鲁棒性起到重要作用。 $c(k) - y_p(k)$ 是 k 时刻的跟踪位置差,所以参考轨迹通常取从现在时刻实际输出值出发的一阶指数形式:

$$c(k+i) - y_r(k+i) = \alpha^i [c(k) - y_p(k)] \quad (4)$$

其中, $i=1,2,\dots,P$; $\alpha = e^{-T_s/\tau_r}$ 为柔化因子,且 $0 < \alpha < 1$, α 的取值影响系统的动态特性和鲁棒性; T_s 为采样周期; τ_r 为参考轨迹时间常数。

PFC 的目标函数使预测时域内的预测过程输出尽可能接近参考轨迹,即 y_p 和 y_r 差值的平方和最小。

$$J = \min \sum_{i=1}^P [y_p(k+i) - y_r(k+i)]^2 \quad (5)$$

为求得基函数的线性加权系数 $\mu_1, \dots, \mu_N$, 最小化式(5),令

$$\frac{\partial J}{\partial \mu_n} = 0 \quad n=1,2,\dots,N \quad (6)$$

可得:

$$\mathbf{G}\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\phi} \quad (7)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1(1) & g_2(1) & \cdots & g_N(1) \\ g_1(2) & g_2(2) & \cdots & g_N(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_1(P) & g_2(P) & \cdots & g_N(P) \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{P \times N}$$

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_m \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(k) + \sum_{n=1}^N \mu_n g_n(1) + e(k+1) - y_r(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{C}_m \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(k) + \sum_{n=1}^N \mu_n g_n(P) + e(k+P) - y_r(k+P) \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{P \times 1}$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\mu_1, \dots, \mu_N]^T$$

其中, $\boldsymbol{\theta}$ 为待求的权系数向量。由最小二乘法得:

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\varphi} \boldsymbol{\phi} \quad (8)$$

其中, $\boldsymbol{\varphi} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$ 可离线算出,在线只需计算 $\boldsymbol{\phi}$, 从而提高算法的快速性。

基于小波基函数的 PFC 算法步骤如下:

a. 确定采样周期 T_s 、参考轨迹时间常数 τ_r 、预测时域长度 P 等参数;

b. 确定小波函数,并根据实际要求确定所需的若干小波基及其在预测时域上的分布位置;

c. 离线计算出矩阵 $\boldsymbol{\varphi} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$;

d. 分别计算矩阵 $\boldsymbol{\phi}$ 在每一时刻的值,根据式(8)求得权系数 μ_n ;

e. 代入式(2),求出当前时刻的控制量 $u(k)$ 。

2 系统的稳定性和鲁棒性分析

$k+i$ 时刻的设定值 $c(k+i)$ 的值由当前时刻的设定值和一个自补偿器组成,假定 $c(k+i) = c_0(k) + \sum_{n=1}^N c_1(k) i^n$, 其中, $c_0(k)$ 为当前设定值, $c_1(k)$ 为自补偿器的系数,则 k 时刻控制量的线性计算方程为

$$u(k) = k_0 [c_0(k) - y_p(k)] + \mathbf{U}_x^T \mathbf{x}_m(k) + k_1 c_1(k) \quad (9)$$

$$k_0 = \mathbf{U}^T \begin{bmatrix} 1 - \alpha^1 \\ \vdots \\ 1 - \alpha^P \end{bmatrix}, k_1 = \mathbf{U}^T \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ P \end{bmatrix}, \mathbf{U}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_m (\mathbf{A}_m^1 - \mathbf{I}) \\ \vdots \\ \mathbf{C}_m (\mathbf{A}_m^P - \mathbf{I}) \end{bmatrix}^T \mathbf{U}$$

$$\mathbf{U} = [(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T]^T \mathbf{F}(0), \mathbf{F}(0) = [f_1(0), \dots, f_N(0)]^T$$

假设被控对象的实际模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B} u(k) \\ y(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为实际过程的状态向量; $u \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 为系统的控制输入; $y \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 为实际的过程输出; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 、 $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 、 $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{1 \times n}$ 分别为实际过程状态方程的系数矩阵。

设 $d(k)$ 为 k 时刻的干扰,则由式(1)(10)及 $y_p(k) = y(k) + d(k)$ 可得闭环系统的输入、输出方程以及跟踪误差方程:

$$\begin{aligned} u(z) &= \frac{k_0}{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m + k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}} c(z) - \\ &\quad \frac{k_0}{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m + k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}} d(z) + \\ &\quad \frac{k_1 c_1(k)}{1 - z^{-1}} \frac{1}{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m + k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} y(z) &= \frac{k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}}{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m + k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}} c(z) + \\ &\quad \frac{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m}{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m + k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}} d(z) + \\ &\quad \frac{k_1 c_1(k)}{1 - z^{-1}} \frac{\mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}}{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m + k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} e(z) &= \frac{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m}{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m + k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}} c(z) - \\ &\quad \frac{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m}{1 - \mathbf{U}_x^T (z\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m + k_0 \mathbf{C} (z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}} d(z) - \end{aligned}$$

$$\frac{k_1 c_1(k)}{1-z^{-1}} \frac{C(zI-A)^{-1}B}{1-U_x^T(zI-A_m)^{-1}B_m+k_0C(zI-A)^{-1}B} \quad (13)$$

假设 $c(k)=c_0(k)+c_1(k)k$, 可得:

$$c(z)=\frac{c_0(k)}{1-z^{-1}}+\frac{c_1(k)z^{-1}}{(1-z^{-1})^2} \quad (14)$$

当被控对象是一阶系统时,预测模型的离散状态方程中的系数矩阵都是 1×1 维的。若跟踪恒定设定值,则控制器参数 U_x^T 为

$$U_x^T=\frac{1-A_m}{B_m} \quad (15)$$

可得:

$$\lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1})e(z)=\frac{1-A}{1-A_m} \frac{c_1(k)}{k_0CB}-\frac{k_1c_1(k)}{k_0} \quad (16)$$

又 $k_1=\frac{1}{C_mB_m}$, 则当模型匹配时,可得:

$$\lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1})e(z)=0 \quad (17)$$

当模型失配时,可得:

$$\lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1})e(z)=\frac{c_1(k)}{k_0} \left(\frac{1-A}{1-A_m} \frac{1}{CB}-k_1 \right) \quad (18)$$

所以当模型匹配时,可以实现无偏跟踪;当模型失配时,偏差是常值且可通过调节 k_1 修正。

模型匹配时闭环系统特征方程的特征根为 $z=1-k_0C_mB_m=1-k_0/k_1$, 可得 $0 < z < 1$, 故模型匹配时,不论控制对象是否稳定,闭环控制系统总是稳定的。

当被控对象是高阶系统时,其控制律计算方程、闭环系统的输入和输出方程以及跟踪误差方程都与一阶系统的形式相同,仅仅是模型参数和控制器参数不同。若跟踪恒定设定值,则控制器参数 U_x^T 为

$$U_x^T=-F^T(0)(G^TG)^{-1}G^T \begin{bmatrix} C_m(A_m^1-I) \\ \vdots \\ C_m(A_m^p-I) \end{bmatrix} = -f_1(0) \times \\ (C_mA_m^{p-1}B_m+\dots+C_mB_m)^{-1}C_m(A_m^p-I)= \\ -[C_m(I-A_m^p)(I-A_m)^{-1}B_m]^{-1}C_m(A_m^p-I) \quad (19)$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} [1-U_x^T(zI-A_m)^{-1}B_m]=0, \quad c(z)=\frac{c_0(k)}{1-z^{-1}}$$

则 $\lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1})e(z)=0$, 即控制系统可对恒定设定值实现无偏跟踪,完全抑制外部干扰,鲁棒性强。

3 仿真

基于 PFC 调速器的柴油机调速系统原理图如图 1 所示。 c 为设定转速, $y_p(k)$ 为实际输出转速, 负荷可以认为是加在输出上的扰动。设计 PFC 调速

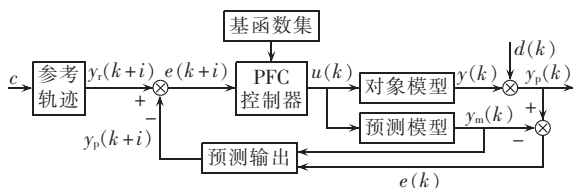


图 1 基于 PFC 调速器的柴油机调速系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of PFC-based speed regulation system for diesel engine

器,就是寻求最优控制律 $u(k)$, 使系统输出 y_p 沿参考轨迹 y_r 逐渐达到设定值 c 。

以文献[13]中船舶电站柴油机调速系统为例,分别用传统的 PFC 方法和本文方法进行仿真比较。受控对象的状态空间模型为

$$\dot{x}=\begin{bmatrix} -20 & 0 \\ -0.1104 & -0.4328 \end{bmatrix}x+\begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix}u \quad (20)$$

$$y=[0 \quad 1]x$$

根据算法需要,加零阶保持器,得系统离散状态方程系数矩阵为

$$A_m=\begin{bmatrix} -0.0000454 & 0 \\ -0.0045440 & 0.8054 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B_m=\begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.009018 \end{bmatrix}, C_m=[0 \quad 1]$$

根据 1.2 节给出的算法进行仿真,取 $T_s=0.5$ s, $\tau_r=1$ s, $P=5$ 。选取 Morlet 小波作为基函数,个数为 2,其在不同预测时刻的位置分布如图 2 所示。预测控制在通过优化确定了一系列未来的控制作用后,为了防止模型失配或环境干扰引起控制对理想状态的偏离,通常不是把这些控制作用逐一全部实施,而是只把当前时刻的控制输入作用于系统,在下一时刻继续进行滚动优化。因此在预测时刻值较小 ($i=1,2$) 时用尺度因子 $a=1$ 的 Morlet 小波,以确保逼近精度;在预测时刻较大 ($i=3,4,5$) 时调整尺度因子 $a=2$,使小波以低分辨率逼近参考轨迹,兼顾整体优化目标。这里预测时刻的大小认定及尺度匹配是根据仿真例子确定的,预测时刻长度及指标不同时需调整大和小的范围界定和尺度范围。

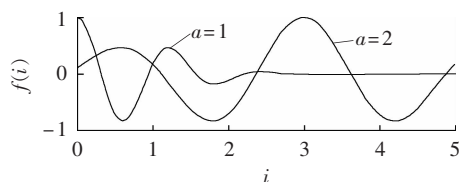


图 2 Morlet 小波基函数及其分布

Fig.2 Morlet function and its distribution

下面比较本文所用小波基函数 PFC 方法与传统的 PFC 方法作用下系统的控制品质。本文所用的传统 PFC 方法选择阶跃函数和斜坡函数作为基函数, T_s, y_r, τ_r, P 的选取和小波基函数的算法相同。

3.1 模型失配情况

假定模型 A_m 和 B_m 失配而变为

$$A'_m=\begin{bmatrix} 0.1353 & 0 \\ -0.00464 & 0.9576 \end{bmatrix}, B'_m=\begin{bmatrix} 0.1729 \\ -0.001233 \end{bmatrix}$$

在模型失配的情况下比较二者的控制效果,如图 3 所示(图中,曲线 1 为小波基函数 PFC 的控制效果,曲线 2 为传统的 PFC 控制效果,后同)。可见,本文方法无论在快速性还是跟踪精度上都优于传统的 PFC 方法,保障了船舶电力系统频率的稳定性。

3.2 负载扰动

在负载扰动下比较二者的控制效果,如图 4 所示。在 $t=20$ s 时加 20% 的负荷扰动,转速很快上升

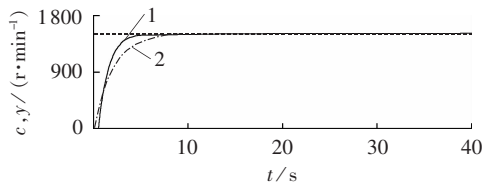


图3 模型失配下的控制效果比较

Fig.3 Comparison of control effect under model mismatch

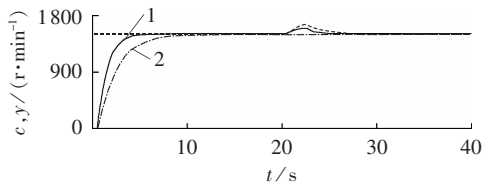


图4 负载扰动下的控制效果比较

Fig.4 Comparison of control effect under load disturbance

到最大值,然后在 PFC 调速器的作用下很快恢复到给定的转速范围。可见,小波基函数 PFC 从整体上考虑了整个预测时域的优化目标,所以其抑制干扰的能力明显优于传统 PFC,超调量仅为 5.7%,重新回到设定值的时间为 $t=3\text{ s}$;传统 PFC 控制超调量为 10.6%,重新回到设定值的时间为 $t=5\text{ s}$ 。又因为小波基函数 PFC 能根据对参考轨迹在不同时刻的逼近精度不同进行灵活设置,故其快速性也较好,达到设定值时间为 $t=6\text{ s}$,而传统 PFC 达到设定值时间为 $t=13.5\text{ s}$ 。

4 结论

针对传统 PFC 中所选取的基函数存在的不足,本文提出了一种基于小波基函数的 PFC 算法,并在此基础上设计了以 Morlet 小波作为基函数的船舶电力系统柴油机调速系统的 PFC 调速器。理论分析和仿真都表明,与传统的 PFC 相比,所设计的小波基函数 PFC 调速器具有更好的跟踪能力,并且具有较强的鲁棒性,能很好地抑制参数变化和外部扰动对系统的影响,有利于提高柴油机调速系统的控制精度,从而保证整个船舶电力系统的安全稳定。

参考文献:

- [1] FALLALLAHSOHI H, CHANGENET C, PLACE S, et al. Predictive functional control of an expansion valve for minimizing the superheat of an evaporator[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(2): 409-418.
 - [2] BIGDELI N, HAERI M. Predictive functional control for active queue management in congested TCP-IP networks[J]. ISA Transactions, 2009, 48(1): 107-121.
 - [3] KARER G, SKRJANC I, ZUPANCIC B. Self-adaptive predictive functional control of the temperature in an exothermic batch reactor[J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47(12): 2379-2385.
 - [4] 张培建, 梅杨. 非线性预测函数控制研究与应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 101-104.
- ZHANG Peijian, MEI Yang. Study and application of nonlinear

predictive functional control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 101-104.

- [5] 赵光宙, 翁学义. 基于广义预测控制的柴油机电子调速系统的研究[J]. 内燃机工程, 1998, 19(2): 1-8.
- ZHAO Guangzhou, WENG Xueyi. Research on electronic governing system of diesel engine based on generalized predictive control[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1998, 19(2): 1-8.
- [6] 李少远, 席裕庚, 王群仙. 小波变换在有约束广义预测控制中的应用[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 166-170.
- LI Shaoyuan, XI Yugeng, WANG Qunxian. Applications of wavelet to constrained generalized predictive control[J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(2): 166-170.
- [7] 丁斗章, 顾幸生. 基于小波变换的二阶线性分布参数系统预测控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 849-854.
- DING Douzhang, GU Xingsheng. Predictive control of second-order linear distributed parameter systems based on wavelets transformation[J]. Control Theory and Applications, 2005, 22(6): 849-854.
- [8] 秦旭日, 金晓明. 预测函数控制在球磨机磨矿回路中的应用[J]. 科技通报, 2009, 25(3): 337-348.
- QIN Xuri, JIN Xiaoming. Application of predictive functional control on ball mill grinding circuit[J]. Bulletin of Science and Technology, 2009, 25(3): 337-348.
- [9] 杨慧中, 高龙. 一类对偶自适应预测函数控制算法[J]. 控制工程, 2009, 16(2): 181-183.
- YANG Huizhong, GAO Long. A class of dual adaptive predictive function control algorithm[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(2): 181-183.
- [10] 王文兰, 赵永艳. 锅炉燃烧系统的自适应预测函数控制[J]. 动力工程学报, 2010, 30(1): 27-30.
- WANG Wenlan, ZHAO Yongyan. Control of boiler combustion system by self-adapting predictive function[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(1): 27-30.
- [11] 潘红华, 胡家升, 朱森, 等. 一种改进的预测函数控制法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1389-1391.
- PAN Honghua, HU Jiasheng, ZHU Sen, et al. Study on a modified predictive functional control algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(11): 1389-1391.
- [12] DAUBECHIES I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1990, 36(5): 961-1005.
- [13] 黄曼磊, 王常虹. 船舶电站柴油机 H_∞ 调速器的仿真研究[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(2): 125-129.
- HUANG Manlei, WANG Changhong. Simulation research on H_∞ speed governor for diesel engine of ship power station[J]. Electric Machines and Control, 2006, 10(2): 125-129.

(实习编辑: 李莉)

作者简介:

王杰(1959-), 男, 河南周口人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为智能计算与智能控制、信息与计算机网络安全(E-mail: wj@zzu.edu.cn);

武海博(1985-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为智能控制理论与应用(E-mail: zzuwhb@163.com);

朱晓东(1970-), 男, 河南安阳人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为智能信息采集与处理(E-mail: zhu_xd@zzu.edu.cn)。

(下转第32页 continued on page 32)

PFC based on wavelet function for diesel engine of ship power system

WANG Jie, WU Haibo, ZHU Xiaodong

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: As the basic functions of traditional PFC (Predictive Functional Control) are all global functions, they can not be flexibly set according to the approximation precision of the referential trajectory at different instants, which impairs the overall optimization of prediction domain. A predictive functional controller based on Morlet function is designed for the speed regulation system of diesel engine. The quantity and distribution of basic functions can be flexibly set by using the locality and multi-scale analysis characteristics of wavelet function. Theoretical analysis and simulative results show that, compared with the traditional PFC, the designed controller, having better tracking ability and robustness, restrains the influence of parameter variation and load disturbance, improves the dynamic precision of speed regulation system and enhances the stability and safety of ship power system.

This work is supported by the National Natural Foundation of China (60974005), the National Doctoral Foundation of New Teacher of China (20094101120008), and the Natural Science Foundation of Henan Province Education Department (2010A120008).

Key words: ship power system; speed regulation system; PFC; wavelet function