文章编号: 1000−8152(2009)12−1395−06

自适应动态径向基函数网络死区补偿控制

李 妍[1], 毛志忠[1], 王 琰[2]

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 辽阳市发展和改革委员会, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 死区非线性存在于许多实际系统中, 这将影响控制系统的性能, 甚至会造成系统不稳定. 为了补偿动态系统中的死区非线性, 提出一种基于自适应动态径向基函数网络(DRBF)的死区补偿控制方法. 先用自适应DRBF网络在线补偿未知死区产生的不良影响; 对于补偿后的动态系统, 设计一个与DRBF网络并联的线性控制器. 通过Lyapunov方法证明闭环系统的稳定性. 以液压系统为例进行仿真, 仿真结果表明本文方法能有效地消除控制系统的稳态误差, 减少计算量, 而且控制信号没有频繁振荡.

关键词: 液压系统; 死区非线性; 动态径向基函数; Lyapunov稳定性

中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Compensation control for dead-zone by adaptive dynamic radial basis function network

LI Yan[1], MAO Zhi-zhong[1], WANG Yan[2]

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;
2. Liaoyang Municipal Development & Reform Commission, Liaoyang Liaoning 111000, China)

Abstract: Dead-zone nonlinearity exists in many practical systems, which deteriorates the performance of control system and even causes the instability of the system. In order to compensate the dead-zone nonlinearity in the dynamic system, a dead-zone compensation control algorithm based on adaptive dynamic radial basis function network(DRBF) is presented for eliminating the undesirable effects caused by the unknown dead-zone. A linear controller paralleled with the DRBF network is designed for the compensated dynamic system. The closed-loop system stability is proved by Lyapunov method. The simulation research was performed in a hydraulic system. The results show that this proposed algorithm effectively eliminates the steady-state error, reduces the computation complexity, and makes the control signal less oscillatory.

Key words: hydraulic system; dead-zone nonlinear; dynamic radial basis function; Lyapunov stability

1 引言(Introduction)

许多实际系统存在死区特性, 不仅会给控制系统带来稳态误差, 还可能影响系统的调节品质[1]. 当调节器参数选择不当时, 甚至会造成系统不稳定. 对于小位移控制, 由于执行机构的死区非线性难于分析及死区宽度未知, 造成控制器设计变得更加困难. 因此, 研究被控系统死区补偿有着重要的意义.

为了补偿死区产生的影响, 文献[2]提出基于名义模型位置输出的死区补偿策略, 但只针对对称死区有较好的补偿效果. 文献[3,4]分别采用基于自适应模糊的死区补偿方法和鲁棒自适应死区补偿策略, 虽然可补偿非对称死区, 但只适用于死区斜率相等的情况. 以上提及的死区补偿方法一般对死区模型有较严格的要求, 在对断点不对称且斜率非直线的死区补偿时, 这些控制方法达不到理想的效果. 文献[5]提出使用BP网络在线补偿死区, 它适用于任意死区非线性. 但传统BP本质上是一种静态网络, 在处理动态系统时需要扩大网络输入节点数, 较多的输入节点不仅会增加在线学习计算量, 而且使BP网络收敛速度变慢, 训练时间加长, 补偿后系统还可能存在稳态误差. 同时传统BP训练时, 网络输出易产生振荡[6], 这里表现为控制器输出频繁振荡, 执行机构不断换向, 其使用寿命将缩短.

针对以上不足, 本文设计一种在线性控制器上并联DRBF网络的方法在线补偿动态系统中的死区. 其中, 线性控制器提供反馈控制信号; 反馈动态DRBF网络前馈补偿死区. 该网络输出不仅取决于当前输入, 且和网络以前内部状态有关[7,8]; 其结

收稿日期: 2008−07−02; 收修改稿日期: 2009−05−17.
基金项目: 国家高新技术研究发展计划(2007AA04Z194, 2007AA041401).

构简单, 收敛速度快; 能有效避免网络输出振荡, 即控制信号的振荡, 有利于延长执行机构使用寿命.

2 系统描述(System statement)

含“死区”的单输入单输出系统如图1所示.

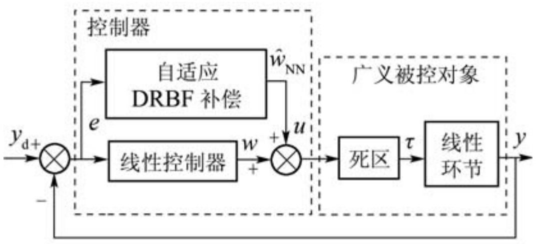

图 1 含死区的控制系统

Fig. 1 Control system with dead-zone

被控对象的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \quad\vdots \\ \dot{x}_n = f(\boldsymbol{x}) + v, \end{cases} \\ y = x_1. \tag{1}$$

其中: $\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^{\mathrm{T}}$为状态向量; y为输出位置; v为不可测的死区输出.

2.1 死区DRBF网络(Dead-zone DRBF network)

图2所示死区非线性可以用式(2)描述:

$$v = D(u) = \begin{cases} g(u) < 0, & u \leqslant d_-, \\ 0, & -d_- < u < d_+, \\ h(u) > 0, & u \geqslant d_+. \end{cases} \tag{2}$$

其中: $h(u)$和$g(u)$为未知非线性函数; d_+和d_-为未知参数.

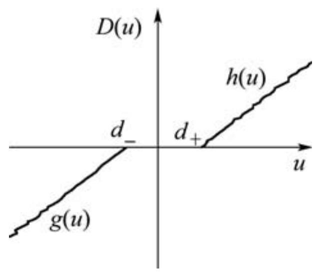

图 2 不对称的死区非线性

Fig. 2 Asymmetric dead-zone nonlinear

实际死区输出不可测, 必须先估计死区特性. 由于动态系统即使输入不变, 不同时刻的系统输出也可能不同, 故将DRBF网络的隐层输出经一定延迟后反馈到输入端, 估计死区输出v:

$$v = \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}(|p\boldsymbol{I}_1 - \boldsymbol{c}_1|) + \varepsilon(u). \tag{3}$$

式中:

$$p(t) = u(t) + \theta_{\mathrm{u}}\varphi(|p(t-\tau) - c_j|), \tag{4}$$

$$\varphi(|p - c_j|) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda}\exp(-\frac{(p-c_j)^2}{2\lambda^2}), \tag{5}$$

其中: $\boldsymbol{W} = [W_0, W_1, \cdots, W_L]^{\mathrm{T}}$为权值向量; L为隐含层神经元的个数; W_0为逼近激活函数的偏差; W_j为权值; $\boldsymbol{\varphi}(|p\boldsymbol{I}_1 - \boldsymbol{c}_1|) = [1, \varphi(|p-c_1|), \varphi(|p-c_2|), \cdots, \varphi(|p-c_L|)]^{\mathrm{T}}$为隐含层节点的输出向量; p为综合输入; $\boldsymbol{c}_1 = [c_1, \cdots, c_L]^{\mathrm{T}}$为径向基函数的中心; λ为径向基函数的方差; θ_{u}为反馈系数, θ_{u}的值越接近1, 记忆向过去延伸得越长, θ_{u}的值为0时, 网络就退化为静态RBF网络; τ为延迟时间; $\varepsilon(u)$为逼近误差.

定义权值估计误差向量为

$$\tilde{\boldsymbol{W}} = \boldsymbol{W} - \hat{\boldsymbol{W}}. \tag{6}$$

其中: $\boldsymbol{W}$为有界的理想权值向量, $\|\boldsymbol{W}\|_{\mathrm{F}} \leqslant \boldsymbol{W}_{\mathrm{M}}$.

DRBF神经网络估计的死区输出为

$$\hat{v}(u) = \hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}(|p\boldsymbol{I}_1 - \boldsymbol{c}_1|). \tag{7}$$

逼近死区的DRBF网络的结构如图3所示.

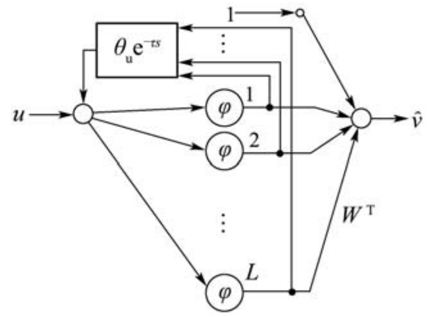

图 3 逼近死区的 DRBF 网络

Fig. 3 DRBF neural network for approximating dead-zone

2.2 死区逆DRBF网络(Dead-zone inverse DRBF network)

为了克服死区对控制性能的不良影响, 在死区前串入死区逆, 最终达到被控对象线性化的目的. 即

$$D\left(D^{-1}(w)\right) = w\,. \tag{8}$$

图4所示的死区逆非线性可以用式(9)表示:

$$D^{-1}(w) = \begin{cases} g^{-1}(w), & w < 0, \\ 0, & w = 0, \\ h^{-1}(w), & w > 0. \end{cases} \tag{9}$$

由式(9), 得

$$u = D^{-1}(w) = w + \hat{w}_{\mathrm{NN}}(w). \tag{10}$$

由于死区逆在零点处具有跳变特性, 故引入额外

节点逼近死区逆. 新增加神经元的激活函数为[5]

$$\varphi_k(x)=\begin{cases}0, & x<0,\\ (1-\mathrm{e}^{-x})^k, & x\geqslant 0.\end{cases} \tag{11}$$

其中$k=1,2,\cdots,L_{\mathrm{a}}$, L_{a}为新增的神经元个数.

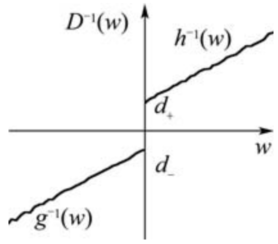

图 4 死区逆

Fig. 4 Dead-zone inverse

于是, 死区逆非线性部分w_{NN}可表示为

$$w_{\mathrm{NN}}(w)=\boldsymbol{W}_i{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{c}_2|)+\varepsilon_i(w). \tag{12}$$

其中: $\boldsymbol{I}_1\in\mathbb{R}^{L+1}$, $\boldsymbol{I}_2\in\mathbb{R}^{L_{\mathrm{a}}}$为单位列向量; q为综合输入, $q(t)=w(t)+\theta_{\mathrm{w}}\varphi(|q(t-\tau)-c_j|)+\theta_{\mathrm{w}}\varphi_k(|q(t-\tau)|)$; $\boldsymbol{W}_i=[\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}},\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$为权值向量; $\boldsymbol{\varphi}(|q\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)\in\mathbb{R}^{L+1}$为高斯函数; $\boldsymbol{\varphi}_k(q\boldsymbol{I})\in\mathbb{R}^{L_a}$为新增的跳变激活函数; $\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{c}_2|)=[\boldsymbol{\varphi}(|q\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\varphi}_k(q\boldsymbol{I})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$为激活函数向量; $\boldsymbol{c}_2=[\boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}},\boldsymbol{0}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$; θ_{w}为反馈系数; $\varepsilon_i(w)$为逼近误差.

定义权值估计误差向量为

$$\tilde{\boldsymbol{W}}_i=\boldsymbol{W}_i-\hat{\boldsymbol{W}}_i. \tag{13}$$

其中: $\boldsymbol{W}_i$为有界的理想权值向量, $\|\boldsymbol{W}_i\|_{\mathrm{F}}\leqslant\boldsymbol{W}_{i\mathrm{M}}$.

DRBF神经网络估计的死区逆输出为

$$\hat{w}_{\mathrm{NN}}(w)=\hat{\boldsymbol{W}}_i{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_i\left(|q\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{c}_2|\right). \tag{14}$$

逼近死区逆的DRBF网络结构见图5.

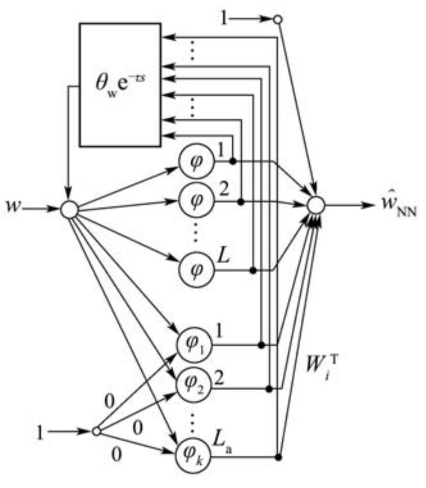

图 5 逼近死区逆的 DRBF 网络

Fig. 5 DRBF neural network for approximating dead-zone inverse

3 控制器的设计(Controller design)

对带死区的被控对象, 设计非线性并联控制器. 该控制器由基于自适DRBF网络的死区前馈补偿和线性反馈控制两部分构成, 如图1所示.

3.1 基于DRBF网络的死区补偿(Dead-zone compensation based on DRBF network)

设计可自适应更新的DRBF网络, 补偿死区影响. 由于死区输出在实际中不可测, 故先估计死区输出大小, 再通过调节DRBF网络参数, 使死区输出v尽可能逼近线性控制器输出w. 推导过程如下:

将式(10)代入式(3), 得

$$v=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}(|(w+\hat{w}_{\mathrm{NN}})\boldsymbol{I}_1+\theta_{\mathrm{u}}\boldsymbol{\varphi}(|p(t-\tau)\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)-\boldsymbol{c}_1|)+\varepsilon(w+\hat{w}_{\mathrm{NN}}). \tag{15}$$

将式(12)代入式(8)并进行泰勒级数展开:

$$w=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}(|p\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)+\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)\cdot\tilde{\boldsymbol{W}}_i{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{c}_2|)+b(t). \tag{16}$$

式中:

$$b(t)=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)\varepsilon_i(w)+\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_1(\tilde{\boldsymbol{W}}_i,w)+\varepsilon(w+w_{\mathrm{NN}}). \tag{17}$$

其中$\boldsymbol{R}_1(\tilde{\boldsymbol{W}}_i,w)$为一次泰勒展开余项.

将式(10)和式(17)代入式(3), 则死区输出为

$$v=w-\hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)\tilde{\boldsymbol{W}}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{c}_2|)+\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)\hat{w}_{\mathrm{NN}}+d(t). \tag{18}$$

其中:

$$d(t)=-\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)\boldsymbol{W}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{c}_2|)-b(t)+\varepsilon(u),$$

上界为$\|d(t)\|\leqslant a_1\|\tilde{\boldsymbol{W}}\|_{\mathrm{F}}+a_2\|\tilde{\boldsymbol{W}}_i\|_{\mathrm{F}}^2+a_3\|\tilde{\boldsymbol{W}}_i\|_{\mathrm{F}}+a_5$; 用$a_1$, a_3, a_5逼近误差; a_2调节2阶误差. 死区完全补偿时, $v=w$, 相当于无死区情况.

3.2 线性控制器的设计(Linear controller design)

对于补偿后系统, 设计一个线性反馈控制器, 保证闭环系统稳定性. 定义给定状态向量$\boldsymbol{x}_{\mathrm{d}}=[y_{\mathrm{d}},\dot{y}_{\mathrm{d}},\cdots,y_{\mathrm{d}}^{(n-1)}]^{\mathrm{T}}$, 误差向量$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_{\mathrm{d}}$, 则

$$r=[\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_{n-1},1]\boldsymbol{e}=[\boldsymbol{\Lambda}^{\mathrm{T}},1]\boldsymbol{e}. \tag{19}$$

其中$\boldsymbol{\Lambda}$人为选取, 使得当$r(t)\to 0$时, $\boldsymbol{e}(t)\to\boldsymbol{0}$.

将式(19)导数代入式(1), 并由式(18)得

$$\dot{r}=w+f(\boldsymbol{x})+Y_{\mathrm{d}}-\hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)\tilde{\boldsymbol{W}}_i{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{c}_2|)+\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{c}_1|)\hat{w}_{\mathrm{NN}}+d(t). \tag{20}$$

其中$Y_{\mathrm{d}} = -y_{\mathrm{d}}^{(n)} + [0, \boldsymbol{\Lambda}^{\mathrm{T}}]\boldsymbol{e}$.

为保证闭环系统稳定性, 即误差在一定的范围内. 需要使标量误差导数为线性表达式:

$$\dot{r} = -K_{\mathrm{v}}r - \hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\varphi'(|p\boldsymbol{I}_1 - \boldsymbol{c}_1|)\tilde{\boldsymbol{W}}_i{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2 - \boldsymbol{c}_2|) + \tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\varphi'(|p\boldsymbol{I}_1 - \boldsymbol{c}_1|)\hat{w}_{\mathrm{NN}} + d(t). \tag{21}$$

对比式(20)和式(21), 得反馈线性控制器为

$$w = -f(\boldsymbol{x}) - Y_{\mathrm{d}} - K_{\mathrm{v}}r. \tag{22}$$

其中反馈增益K_{v}为正常数.

3.3 DRBF网络的参数选择(Parameters selecting of DRBF network)

DRBF网络参数包括3部分: 高斯函数的中心、宽度和隐含层与输出层的连接权值. 分析带死区被控对象的I/O特点, 先用输入样本离线确定基函数中心与宽度, 再用自适应方法在线调整权值.

3.3.1 学习中心和宽度(Learning centers and widths)

对图6所示带死区被控对象的I/O特性, 用简化自适应学习法[9]确定基函数参数. 步骤如下:

1) 确定隐含层节点数.

Step 1 分析I/O特性, 系统正向运行时, 分段数$n_{\mathrm{s}} = 2$, 由于死区对称, 取隐层节点数$n = 2n_{\mathrm{s}}$.

Step 2 给出不同段的基函数中心. 为简单起见, 在死区内、外各取一个中心, 初步指定为该段中心.

2) 确定基函数中心.

Step 1 离线输入死区前数据 u_k, $\forall\ k = 1, \cdots, K$.

Step 2 由式(23)确定样本的归类

$$i(u_k) = \arg\min_i(u_k - c_i),\ i = 1, \cdots, n. \tag{23}$$

其中n为类别数.

Step 3 由式(24)调整中心

$$c_{i,k+1} = \begin{cases} c_{i,k} + \eta[u_k - c_{i,k}], & i = i(u_k), \\ c_{i,k}, & i \neq i(u_k). \end{cases} \tag{24}$$

其中η为学习率, $\eta \in [0, 1]$.

Step 4 判断是否学完所有输入样本且中心不再变化, 是则结束, 否则到Step 2.

3) 确定基函数方差.

对每个基函数采用相同的方差, 如式(25)所示:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \cdots = \lambda_n = d_{\max}/\sqrt{2n}, \\ d_{\max} = \max(c_i - c_j),\ i, j = 1, 2, \cdots, n. \end{cases} \tag{25}$$

其中: λ_i为基函数方差; $d_{\max}$为中心间最大距离.

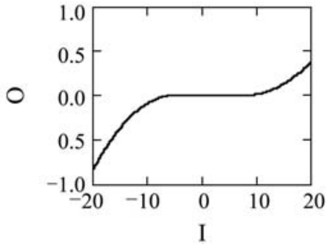

图6 带死区液压系统的I/O特性

Fig. 6 I/O characteristics of hydraulic system with dead-zone

3.3.2 自适应调节权值(Adaptive adjustment weights)

为保证跟踪误差足够小及所有的内部状态有界, 给出DRBF网络权值的自适应更新率:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{W}}} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1 - \boldsymbol{c}_1|)\hat{\boldsymbol{W}}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2 - \boldsymbol{c}_2|)r - k_1\boldsymbol{S}|r|\hat{\boldsymbol{W}}, \tag{26}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{W}}}_i = -\boldsymbol{T}\boldsymbol{\sigma}_i(|q\boldsymbol{I}_2 - \boldsymbol{c}_2|)r\hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}'(|p\boldsymbol{I}_1 - \boldsymbol{c}_1|) - k_1\boldsymbol{T}|r|\hat{\boldsymbol{W}}_i - k_2\boldsymbol{T}|r|\|\hat{\boldsymbol{W}}_i\|_{\mathrm{F}}\hat{\boldsymbol{W}}_i. \tag{27}$$

其中: $\boldsymbol{S} = \boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{T} = \boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}$为正常数矩阵; k_1, k_2为正的设计参数, 调节 k_1, k_2 的值, 可平衡 $|r|$, $\|\tilde{\boldsymbol{W}}\|$, $\|\tilde{\boldsymbol{W}}_i\|_{\mathrm{F}}$之间最终的大小关系.

4 闭环系统稳定性证明(Stability proof of closed-loop system)

采用Lyapunov方法证明闭环系统的稳定性, 选择Lyapunov函数表达式(28):

$$L = \frac{1}{2}(r^2 + \mathrm{tr}[\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}^{-1}\tilde{\boldsymbol{W}}] + \mathrm{tr}[\tilde{\boldsymbol{W}}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}^{-1}\tilde{\boldsymbol{W}}_i]). \tag{28}$$

将式(21)代入式(28)的导数, 并由式(26)(27)得

$$\dot{L} = -K_{\mathrm{v}}r^2 + k_1|r|\mathrm{tr}[\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{W} - \tilde{\boldsymbol{W}})] + |r|\mathrm{tr}[\tilde{\boldsymbol{W}}_i{}^{\mathrm{T}}k_1(\boldsymbol{W}_i - \tilde{\boldsymbol{W}}_i) + \tilde{\boldsymbol{W}}_i{}^{\mathrm{T}}k_2\|\hat{\boldsymbol{W}}_i\|_{\mathrm{F}}(\boldsymbol{W}_i - \tilde{\boldsymbol{W}}_i)] + rd(t). \tag{29}$$

利用不等式$\mathrm{tr}[\tilde{\boldsymbol{X}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X} - \tilde{\boldsymbol{X}})] \leqslant \|\tilde{\boldsymbol{X}}\|_{\mathrm{F}}\|\boldsymbol{X}\|_{\mathrm{F}} - \|\tilde{\boldsymbol{X}}\|_{\mathrm{F}}^2$, 将式(29)修正为

$$\dot{L} \leqslant -|r|(K_{\mathrm{v\,min}}|r| + k_1[\|\tilde{\boldsymbol{W}}_i\|_{\mathrm{F}} - \frac{1}{2}(W_{\mathrm{M}} + \frac{a_1}{k_1})]^2 - \frac{k_1}{4}(W_{\mathrm{M}} + \frac{a_1}{k_1})^2 + h(\|\tilde{\boldsymbol{W}}_i\|_{\mathrm{F}}) - C). \tag{30}$$

其中: 定义

$$g(x) = k_2x^3 + (k_1 - 2k_2W_{i\mathrm{M}} - a_2)x^2 - (k_1W_{i\mathrm{M}} + k_2W_{i\mathrm{M}}^2 + a_3)x,$$

$$C = \inf\{g(x), x > 0\} + a_5,$$

$$h(x) = g(x) + C.$$

可以看出$h(x) \geqslant 0, \forall\, x > 0$.

为保证闭环系统的稳定性, 只需$\dot{L}$负定, 即只要满足下面3个不等式中任意一个:

$$|r| \geqslant (\frac{k_1}{4}(W_{\rm M} + \frac{a_1}{k_1})^2 + C)/K_{\rm v\,min}, \tag{31}$$

$$\|\tilde{\boldsymbol{W}}\|_{\rm F} \geqslant \sqrt{\frac{(W_{\rm M}+\frac{a_1}{k_1})^2}{4} + \frac{C}{k_1} + \frac{W_{\rm M}+\frac{a_1}{k_1}}{2}}, \tag{32}$$

$$\|\tilde{\boldsymbol{W}}_i\|_{\rm F} \geqslant \max\{h^{-1}(\frac{k_1}{4}(W_{\rm M}+\frac{a_1}{k_1})^2 + C)\}. \tag{33}$$

实际中, r基本在式(31)右侧边界附近, 即可调节$K_{\rm v}$任意减小误差, 保证所有参数估计有界.

5 仿真实例(Simulation)

本文以液压系统为例, 其线性部分如图7所示.

由图7, 可求得系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{u_{\rm f}}{\Delta U} = \frac{1}{s^3 + 30s^2 + 200s}.$$

死区为斜率不等、断点不同的形式:

$$D(u) = \begin{cases} 1.1(u-9),\ u \geqslant 9, \\ 0, \qquad\qquad -7 < u < 9, \\ 1.5(u+7),\ u \leqslant -7. \end{cases}$$

建立带死区液压系统的simulink框图, 如图8所示.

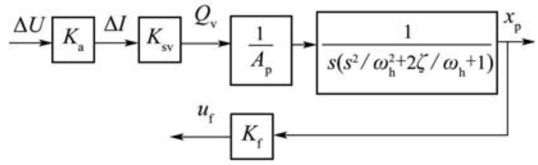

图 7　液压系统的线性部分

Fig. 7　Linear part of the hydraulic system

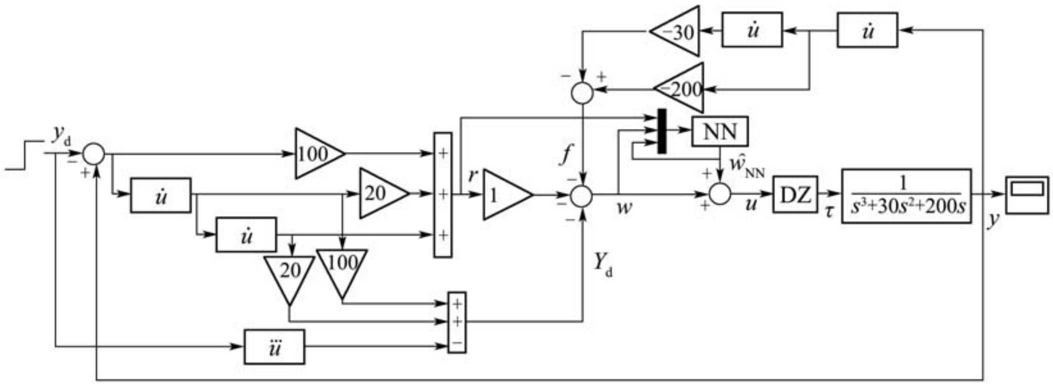

图 8　带死区补偿的液压系统

Fig. 8　Hydraulic system with dead-zone compensation

给定信号$y_{\rm d} = 0.2$, 死区DRBF网络隐层节点数$L = 4$, 中心和宽度分别由公式(23)(24)和(25) 得到. 为保证初始阶段系统不受其它输入影响, 取NN I输出初始权值为-1与1之间的随机数, NN II出初始权值为0, 输入反馈权值为$\theta_{\rm w} = 10^{-4}$. 为逼近死区逆在零点的不连续性, 死区逆DRBF网络另需增加2个基函数跳变的节点, 初始权值为0. 权值更新式中其他参数分别为

$$\boldsymbol{T} = 10^{-4}\boldsymbol{I}_7,\ \boldsymbol{S} = 10^{-4}\boldsymbol{I}_5,\ k_1 = 10^{-3},\ k_2 = 10^{-4}.$$

控制器参数取值分别为

$$\lambda_1 = 100,\ \lambda_2 = 20,\ K_{\rm v} = 1.$$

比较文献[5]给出的传统BP网络补偿方法和本文提出的DRBF网络补偿方法, 得死区补偿后的控制量如图9所示, 系统输出如图10所示.

由图9, 传统BP方法的控制信号存在大幅度振荡, 而本文DRBF网络有效避免了控制量振荡. 由图10, 采用传统BP网络能部分消除死区影响, 还存在一定稳态误差, 而DRBF方法消除了输出稳态误差, 且训练时间远小于BP网络, 收敛速度变快.

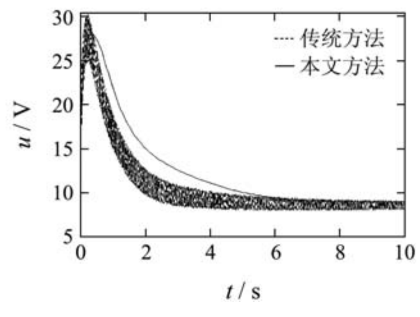

图 9　死区补偿后控制量的比较

Fig. 9　Comparison of control after dead-zone compensation

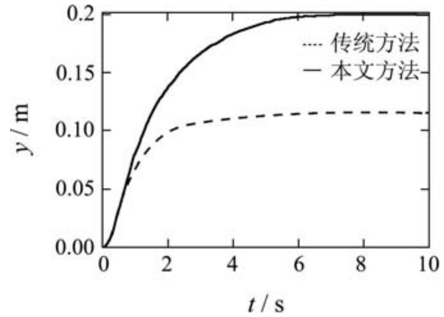

图 10 死区补偿后输出的比较

Fig. 10 Comparison of output after dead-zone compensation

6 仿真实例(Simulation)

针对被控系统中存在的死区非线性, 本文设计了DRBF网络死区补偿与线性反馈并联的控制器. 通过与静态BP补偿方法比较, DRBF网络降低了在线计算量; 消除了稳态误差; 减少了训练节点数; 且有效避免了控制量的振荡, 延长了执行机构的使用寿命. 仿真验证了方法的有效性.

参考文献(References):

[1] 朱兴龙, 周骥平. 液压伺服关节自适应模糊神经网络控制补偿方法[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5): 694 – 698.
(ZHU Xinglong, ZHOU Jiping. Control compensation methods for hydraulic servo joint with adaptive-network-based fuzzy inference system[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(5): 694 – 698.)

[2] 刘强, 冯培恩, 潘双夏. 基于干扰观测器的非对称液压缸鲁棒运动控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(4): 594 – 598.
(LIU Qiang, FENG Pei'en, PAN Shuangxia. Disturbance observer based robust motion control for single rod hydraulic actuators[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(4): 594 – 598.)

[3] CAMPOS J, LEWIS F L. Deadzone compensation in discrete time using adaptive fuzzy logic[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, 7(6): 697 – 707.

[4] WANG Z H, YANG B, CHENG L, et al. Robust adaptive deadzone compensation of DC servo system[J]. *IEE Proceedings on Control Theory and Applications*, 2006, 153(6): 709 – 713.

[5] SELMIC R R, LEWIS F L. Deadzone compensation in motion control systems using neural networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(4): 602 – 613.

[6] 潘国荣, 谷川. BP 算法改进及其在变形数据处理中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 118 – 121.
(PAN Guorong, GU Chuan. Back propagetion algorithm improvement and its application to deformation monitoring data processing[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2008, 36(1): 118 – 121.)

[7] 万亚民, 王孙安, 杜海峰. 液压并联机器人的动态神经网络控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 955 – 958.
(WAN Yamin, WANG Sun'an, DU Haifeng. Dynamic neural network control of hydraulic parallel robot[J]. *Journal of Xi'an JiaoTong University*, 2004, 38(9): 955 – 958.)

[8] 张友旺, 桂卫华, 赵泉明. 基于动态递归模糊神经网络的自适应电液位置跟踪系统[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(4): 551 – 556.
(ZHANG Youwang, GUI Weihua, ZHAO Quanming. Adaptive electro-hydraulic posittion tracking system based on dynamic recurrent fuzzy neural network[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(4): 551 – 556.)

[9] 张和生, 王立德, 杨宁, 等. 磁浮控制系统的传感器非线性校正方法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(3): 71 – 88.
(ZHANG Hesheng, WANG Lide, YANG Ning, et al. Study of sensor calibration method for the maglev control system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(3): 71 – 88.)

作者简介:

李 妍 (1983—), 女, 博士研究生, 研究方向为非线性系统建模、智能控制, E-mail: neu_ly@yahoo.cn;

毛志忠 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂系统建模、智能控制;

王 琰 (1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为非线性系统建模与控制.