

文章编号: 1001-0920(2005)09-1038-05

基于连续Hopfield网络的多变量时变系统最优控制

李明爱, 阮晓钢

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 针对多变量时变系统提出了一种基于连续Hopfield网络的最优控制系统设计方法。该方法不仅从理论上建立了移动时域上的LQ性能指标与连续Hopfield网络能量函数间的等价关系, 并在此基础上设计出可求解LQ最优控制问题的连续Hopfield网络, 而且将滚动优化控制策略引入控制系统, 形成了包括连续Hopfield网络在内的闭环控制结构, 实现了多变量时变系统无限域上的动态最优控制。仿真结果验证了该设计方法的有效性。

关键词: 连续Hopfield网络; LQ控制; 滚动优化; 多变量时变系统; 动态控制

中图分类号: TP183

文献标识码: A

Continuous Hopfield Neural Network Based Optimal Control for Multivariable Time-varying Systems

L I M i n g - a i , R U A N X i a o - g a n g

(School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China Correspondent: RUAN Xiao-gang, Email: adrxg@bjut.edu.cn)

Abstract: An optimal control method based on continuous Hopfield neural network (CHNN) is proposed for multivariable time-varying systems. The equivalence between linear quadratic (LQ) performance index in moving-time horizon and energy function of CHNN is built theoretically, and the CHNN is constructed to solve LQ optimization control problems. Moreover, the receding optimization strategy is adopted to form closed-loop control structure that includes CHNN. Therefore, the dynamic optimization control for multivariable time-varying systems is realized in infinite-time horizon. Simulation results show the effectiveness of proposed method.

Key words: Continuous Hopfield neural network; Linear quadratic control; Receding optimization; Multivariable time-varying system; Dynamic control

1 引言

1982年, Hopfield设计了一种人工神经网络, 即Hopfield网络^[1]。Hopfield网络原本是一个状态离散且时间离散的网络, 也称离散Hopfield网络(DHNN)。1984年, Hopfield又设计出状态连续且时间连续的连续Hopfield网络(CHNN)^[2]。这两种网络均为动态的或递归的神经网络。Hopfield网络具有自己的能量函数, 当其达到稳定状态时, 其能量函数达到极值, 因而它有优化计算功能。该功能使其在TSP^[3]、图像处理^[4]、作业车间生产调度^[5]及机器人路径规划^[6]等众多静态优化问题中获得了广泛的

应用

目前, 作为一种优化计算模型^[7-12], Hopfield网络应用于动态最优控制的研究具有如下特点: 1) Hopfield网络并非自动控制系统闭环中的必要组成部分, 只是一个非实时的计算工具; 2) Hopfield网络只承担离线的优化计算任务, 其优化问题本质上仍属于静态优化问题; 3) 控制对象多为线性定常系统。

本文以线性多变量时变系统为被控对象, 以连续Hopfield网络为控制器, 提出一种最优控制系统的实用化设计方法。通过建立移动时域上的LQ性

收稿日期: 2004-10-15; 修回日期: 2005-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(60375017); 国家教育部科学技术研究重点项目(203002)

作者简介: 李明爱(1966—), 女, 河南鹤壁人, 副教授, 博士生, 从事智能控制的研究; 阮晓钢(1958—), 男, 四川自贡人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制及生物信息学等研究

能指标与连续Hopfield 网络能量函数间的等价关系设计网络参数, 并将滚动优化控制策略引入控制系统, 实现了多变量时变系统无限域上的闭环动态最优控制 仿真结果验证了设计方法的有效性

2 最优控制问题描述

2.1 LQ 最优控制问题

设有多变量时变线性系统

$$\begin{cases} X(k+1) = A(k)X(k) + B(k)U(k), \\ X(0) = X_0; \\ Y(k) = C(k)X(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $X(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$ 为状态向量, $U(k) = [u_1(k), u_2(k), \dots, u_r(k)]^T$ 为控制向量, $Y(k) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_m(k)]^T$ 为输出向量

令 $Y_d(k)$ 表示系统的期望输出轨线, $e(k) = Y_d(k) - Y(k)$ 表示系统的输出跟踪误差, 系统(1)在时段 $[k, k+N)$ 上的最优跟踪控制性能指标如下:

$$J(U(k)) = e^T(k+N)He(k+N) + \sum_{i=k}^{k+N-1} \{e^T(i)Q(i)e(i) + U^T(i)R(i)U(i)\}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中: $H \in R^{m \times m}$ 和 $Q(i) \in R^{m \times m} (i < k+N)$ 为半正定矩阵, $R(i) \in R^{r \times r} (i < k+N)$ 为正定矩阵

系统(1)依LQ 性能指标(2)的优化目标, 即求最优控制向量序列 $U(k), U(k+1), \dots, U(k+N-1)$ 使性能指标 $J(U(k))$ 极小

定义最优控制向量 $\tilde{U}(k) \in R^{n \times 1}$ 及对角矩阵 $\tilde{R}(k) \in R^{n \times n}$ 分别为

$$\tilde{U}^T(k) = \{U^T(k), U^T(k+1), \dots, U^T(k+N-1)\}, \quad (3)$$

$$\tilde{R}(k) = \text{diag}(R(k), R(k+1), \dots, R(k+N-1)), \quad (4)$$

则最优性能指标式(2)可重述如下:

$$J(\tilde{U}(k)) = e^T(k+N)He(k+N) + \tilde{U}^T(k)\tilde{R}(k)\tilde{U}(k) + \sum_{i=k}^{k+N-1} e^T(i)Q(i)e(i). \quad (5)$$

2.2 控制系统的状态解

假设系统(1)是能控的, 则由式(1)和(3)知控制系统在任意离散时刻的状态可表示为

$$X(i) = \Phi(i)X(k) + \Psi(i)\tilde{U}(k), \quad k+1 \leq i \leq k+N. \quad (6)$$

这里 $\Phi(i) \in R^{n \times n}$ 为系统(1)的状态转移矩阵, 即 $\Phi(i) = A(i-1)A(i-2)\dots A(k)$, (7)

$$\Psi(i) \in R^{n \times n} \text{ 满足 } \begin{cases} \Psi(i) = \{\Psi_1(i), \Psi_2(i), \dots, \Psi_r(i)\}; \\ \Psi_j(i) = \begin{cases} A(i-1)A(i-2)\dots A(j)B(j-1), & j < i-k; \\ B(j-1), & j = i-k; \\ 0, & j > i-k. \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

3 最优跟踪控制系统结构设计

3.1 控制系统结构

以系统(1)为被控对象, 最优性能指标依式(5)定义, 以连续Hopfield 网络为最优控制器, 设计最优跟踪控制系统, 其结构如图1所示

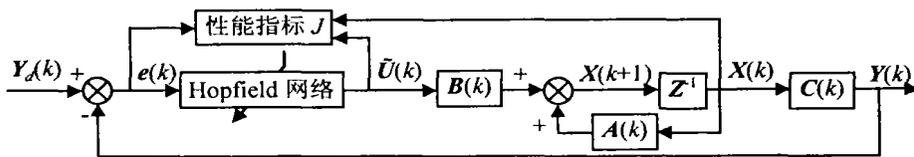


图1 控制系统结构

该最优控制系统具有如下特征:

1) 连续 Hopfield 网络为实时在线的最优控制器 连续 Hopfield 网络实际上是一个求解LQ 最优控制问题 $J(\tilde{U}(k))$ 的优化计算工具, 在任意采样时刻 k , 依据数据 $X(k), Y(k), Y_d(k), \dots, Y_d(k+N)$, 实时地求解 $J(\tilde{U}(k))$, 并输出最优控制向量 $\tilde{U}(k)$.

2) 逐点滚动的优化控制策略 由式(5)可知, 每个采样时刻 k , 都有一个对应的最优控制性能指标, 并有对应的从 $k \sim k+N-1$ 时刻的 N 步最优控制量 $U(k), U(k+1), \dots, U(k+N-1)$. 但系统并不

实施 N 个时刻的全部控制量, 而只执行其中的第 1 项, 即 $U(k)$. 当 $U(k)$ 实施后, 系统(1)的状态 $X(k)$ 和输出 $Y(k)$ 都将发生变化 因此, 当下一个时刻到来时, Hopfield 网络将依据新的数据求解新的最优控制向量, 周而复始, 从而使系统在无限域上实现了滚动的LQ 最优闭环跟踪控制

3.2 连续 Hopfield 网络

连续 Hopfield 网络的拓扑结构如图2所示 其中: 电阻 R_{i0} 和电容 C_i 并联, 模拟生物神经元的延时特性; 电阻 R_{ij} 模拟生物神经元之间的突触特性; 非线性运算放大器模拟生物神经元的非线性特性, 其

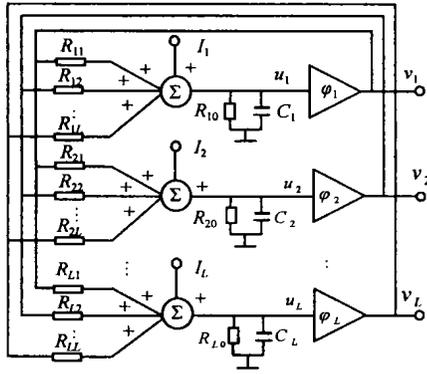


图2 连续Hopfield网络的拓扑结构
放大倍数为 \mathcal{Q} , I_i 为神经元 i 的外加偏置电流
连续Hopfield网络的动态特性可描述为

$$C_i \frac{du_i}{dt} = -\frac{u_i}{R_i} + \sum_{j=1}^L w_{ij}v_j + I_i, \quad (9)$$

$$v_i = \mathcal{Q}(u_i), \quad i = 1, 2, \dots, L. \quad (10)$$

其中: L 为神经元数; $u_i(t)$ 和 $v_i(t)$ 分别为第 i 个神经元的放大器的输入和输出; w_{ij} 为第 i 个神经元至第 j 个神经元间的跨导, 即 $w_{ij} = 1/R_{ij}$, 且满足等式 $1/R_{ii} = 1/R_{i0} + \sum_{j=1}^L w_{ij}$.

当各神经元放大器的放大倍数足够大时, Hopfield 网络的能量函数为

$$E(t) = -\frac{1}{2} \mathbf{V}^T \mathbf{W} \mathbf{V} - \mathbf{V}^T \mathbf{I} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{V}(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_L(t)]^T \quad R^L \times 1$ 为网络输出向量, $\mathbf{I} = [I_1, I_2, \dots, I_L]^T \quad R^L \times 1$ 为网络阈值向量, $\mathbf{W} = \{w_{ij}\}_{L \times L} \quad R^L \times L$ 为网络连接权矩阵

作为图 1 中的最优控制器, 连续 Hopfield 网络应满足如下设计要求:

- 1) 网络输出向量 $\mathbf{V}(t)$ 与最优控制向量 $\tilde{\mathbf{U}}(k)$ 相对应, 即 v_1, \dots, v_r 对应于 $\mathbf{U}(k)$, v_{r+1}, \dots, v_{2r} 对应于 $\mathbf{U}(k+1), \dots, v_{(N-1)r}, \dots, v_{Nr}$ 对应于 $\mathbf{U}(k+N-1)$.
- 2) 网络神经元的数量 $L = r \times N$.

4 连续 Hopfield 网络能量函数与 LQ 性能指标的等价变换

为了运用连续 Hopfield 网络求解式 (5) 描述的线性二次型最优跟踪控制问题, 需要将式 (5) 所示最优控制性能指标变换为连续 Hopfield 网络的能量函数. 不失一般性, 假设 $\tilde{\mathbf{U}}(k) \in [-1, 1]^{n \times 1}$, 并假设连续 Hopfield 网络各神经元放大器的非线性特性如下式:

$$v_i = \mathcal{Q}(u_i) = \tanh(u_i/u_{00}), \quad i = 1, 2, \dots, L. \quad (12)$$

其中 u_{00} 为一小正数. 则每一控制量 $u \in \tilde{\mathbf{U}}(k)$ 可由连续 Hopfield 网络的一个神经元的输出表示

定理 1 给定线性、多变量、时变控制系统 (1), 其线性二次型跟踪问题的性能指标为 (5), 假设控制系统完全能控且完全能观, 则对任意离散时刻 k , 都存在一个对称的连续 Hopfield 网络, 其能量函数等价于 LQ 最优控制性能指标 (5).

证明 将 $e(k) = Y_d(k) - Y(k)$ 代入式 (5), 则

$$J(\mathbf{U}(k)) = Y_d^T(k+N)H Y_d(k+N) + Y^T(k+N) \times H Y(k+N) - 2Y^T(k+N)H Y_d(k+N) + [Y_d(k) - C(k)X(k)]^T Q(k) [Y_d(k) - C(k)X(k)] + \tilde{\mathbf{U}}^T(k) \tilde{\mathbf{R}}(k) \tilde{\mathbf{U}}(k) + \sum_{i=k+1}^{k+N-1} [Y_d^T(i)Q(i)Y_d(i) + Y^T(i)Q(i)Y(i) - 2Y^T(i)Q(i)Y_d(i)]$$

显然, J 等价于

$$J_1(\mathbf{U}(k)) = Y^T(k+N)H Y(k+N) - 2Y^T(k+N) \times H Y_d(k+N) + \tilde{\mathbf{U}}^T(k) \tilde{\mathbf{R}}(k) \tilde{\mathbf{U}}(k) + \sum_{i=k+1}^{k+N-1} [Y^T(i)Q(i)Y(i) - 2Y^T(i)Q(i)Y_d(i)] \quad (13)$$

假设系统完全能控且完全能观, 有

$$Y(i) = C(i)\Phi(i)X(k) + C(i)\Psi(i)\tilde{\mathbf{U}}(k), \quad (14)$$

则 J_1 等价于

$$J_2(\mathbf{U}(k)) = 2\tilde{\mathbf{U}}^T(k)\Psi^T(k+N)C^T(k+N)HC(k+N) \times \Phi(k+N)X(k) + \tilde{\mathbf{U}}^T(k)\Psi^T(k+N) \times C^T(k+N)HC(k+N)\Psi(k+N) \times \tilde{\mathbf{U}}(k) - 2\tilde{\mathbf{U}}^T(k)\Psi^T(k+N)C^T(k+N) \times H Y_d(k+N) + \tilde{\mathbf{U}}^T(k)\tilde{\mathbf{R}}(k)\tilde{\mathbf{U}}(k) + \sum_{i=k+1}^{k+N-1} \left[2\tilde{\mathbf{U}}^T(k)\Psi^T(i)C^T(i)Q(i)C(i)\Phi(i)X(k) - 2\tilde{\mathbf{U}}^T(k)\Psi^T(i)C^T(i)Q(i)Y_d(i) + \tilde{\mathbf{U}}^T(k)\Psi^T(i)C^T(i)Q(i)C(i)\Psi(i)\tilde{\mathbf{U}}(k) \right]$$

令

$$\left\{ \begin{aligned} F(k) &= \tilde{\mathbf{R}}(k) + \Psi^T(k+N)C^T(k+N) \times HC(k+N)\Psi(k+N) + \sum_{i=k+1}^{k+N-1} [\Psi^T(i)C^T(i)Q(i)C(i)\Psi(i)], \\ G(k) &= \Psi^T(k+N)C^T(k+N)HC(k+N) \times \Phi(k+N)X(k) - \Psi^T(k+N) \times C^T(k+N)H Y_d(k+N) + \sum_{i=k+1}^{k+N-1} [\Psi^T(i)C^T(i)Q(i)C(i)\Phi(i)X(k) - \Psi^T(i)C^T(i)Q(i)Y_d(i)], \end{aligned} \right. \quad (15)$$

则有

$$J_2(U(k)) = \tilde{U}^T(k)F(k)\tilde{U}(k) + 2\tilde{U}^T(k)G(k). \quad (16)$$

对比性能指标 J_2 和Hopfield 能量函数 E 可知,当连续Hopfield 网络的连接权值矩阵和阈值向量取值为

$$\begin{cases} W(k) = -2F(k), \\ I(k) = -2G(k). \end{cases} \quad (17)$$

时,连续Hopfield 网络的能量函数 E 与控制系统的性能指标(5)等价.

定理1是一个构造性定理,为设计具有与LQ 性能指标等价的能量函数的Hopfield 提供了一种方法.下面引理将对Hopfield 网络求解LQ 最优控制问题的原理进行进一步说明.

引理1^[13] 由式(9)和(10)描述的连续Hopfield 网络,若 $\varphi^1(u_i)$ 为单调递增且连续的函数,并有 $C_i > 0, w_{ij} = w_{ji}$,则随网络状态的变化,有 $dE/dt \leq 0$,当且仅当 $dv_i/dt = 0$ 时, $dE/dt = 0, i = 1, 2, \dots, L$.

引理1表明,当网络参数选取适当时,随着时间的推移,连续对称Hopfield 网络的状态总是朝着能量减小的方向演化,网络的平衡点就是能量函数 E 的极小值点.

由式(17)和(15)可知

$$W^T(k) = -2F^T(k) = -2F(k) = W(k),$$

即 $W(k)$ 是对称的.于是,由引理1和定理1可得如下推论:

推论1 当选择 $C_i > 0, \varphi(u_i)$ 按式(12)选取时,连续Hopfield 网络按式(17)设计,则该网络是稳定的,即对于任意初始状态,网络都将收敛至某稳定状态.

推论2 当选择 $C_i > 0, \varphi(u_i)$ 按式(12)选取时,连续Hopfield 网络按式(17)设计,则该网络的稳态输出使其对应的LQ 性能指标(5)达到极小.

推论1和推论2意味着:按式(17)设计的连续Hopfield 网络,对于任意给定网络初态 v_0 ,其能量函数 E 沿非递增方向演化,最终达到某个稳定的平衡状态 v_s ,而 v_s 则代表了动态最优控制问题(5)的解 $\tilde{U}(k)$.

5 实验研究

考虑如下二阶时变系统:

$$\begin{cases} X(k+1) = \begin{bmatrix} 1 - 0.1e^{-k/20} & 0 \\ 0 & 1 - 0.2e^{-k/10} \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.8 \end{bmatrix} U(k), X_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \\ y(k) = [1 \quad 1]X(k). \end{cases} \quad (18)$$

其最优跟踪控制性能指标定义为

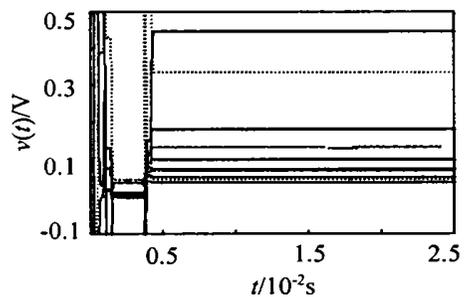
$$J(U(k)) = 0.5[y_d(k+N) - y(k+N)]^2 + \sum_{i=k}^{k+N-1} \{0.5[y_d(i) - y(i)]^2 + 0.5u^2(i)\}. \quad (19)$$

式中系统输出跟踪目标 $y_d(i) = 1$.

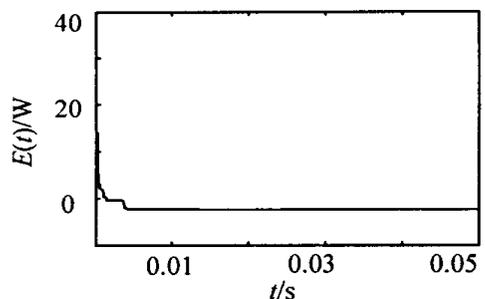
在Matlab 6.5 环境中,对该系统进行了数字仿真实验.图3为当 $k = 0, N = 5$ 时,对系统进行一次优化5步的实验结果.其中,图3(a)为Hopfield 网络的输出,即欲求的最优控制序列 $U(0), U(1), \dots, U(4)$ 随时间的演化曲线;图3(b)为Hopfield 网络的能量函数随时间的变化曲线.可见,神经元控制器的能量函数呈单调递减特性,且在0.005 s内网络便能达到稳定状态.图3(c)显示了由Hopfield 网络求得的控制量与求解Ricatti 方程获得的控制量的变化曲线.图3(d)进一步给出了对应两种情况下控制系统的输出跟踪曲线.显然,以连续Hopfield 网络为神经元控制器所获得的控制量和系统输出量与基于Ricatti 方程的理论值具有很好的一致性.

图4为滚动优化的实验结果.其中,图4(a)为 $k = 0, N = 10$ 时控制器进行一次性优化10步时系统的跟踪轨迹与 $k = 0, 1, \dots, 9, N = 5$ 时控制器一次优化5步,滚动优化10步时系统的跟踪轨迹的比较结果;图4(b)则给出了 $k = 0, 1, \dots, 19, N = 5$,即控制器一次优化5步,滚动优化20步系统的跟踪轨迹.

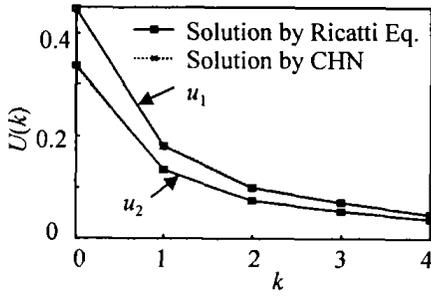
仿真结果表明,本文设计的基于连续Hopfield 网络的最优控制系统,能够实现多变量时变系统的



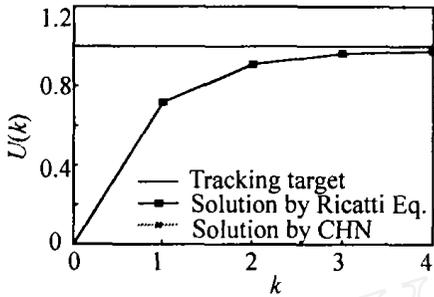
(a) 神经元控制器的输出演化曲线



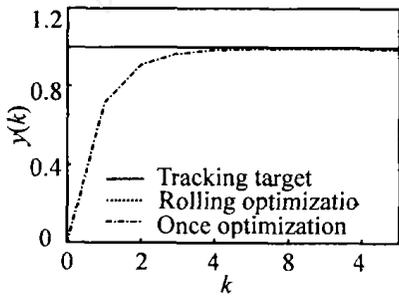
(b) 神经元控制器的能量函数变化曲线



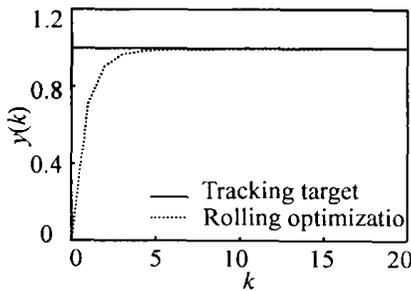
(c) 控制量变化曲线



(d) 控制系统输出变化曲线
图3 一次优化5步的仿真结果



(a) 一次性优化与滚动优化跟踪效果比较



(b) 滚动优化跟踪轨迹
图4 滚动优化的仿真结果

在线滚动优化控制,且滚动优化的跟踪效果与一次性优化的跟踪效果相当

6 结论

本文针对多变量时变系统提出了一种利用连续Hopfield网络实现LQ最优跟踪控制的设计方法,

该方法将移动时域上的LQ优化问题与滚动优化策略相结合,从而将连续Hopfield网络纳入了系统的闭环结构,实现了无限时域上的闭环最优控制.因采用连续Hopfield网络求解最优控制问题具有快速性好,并可避免矩阵求逆的复杂运算等优点,故本文为线性时变对象的实时在线优化控制提供了一种实用化的设计方法.仿真实验证明了设计方法的正确性与可行性.

参考文献 (References)

- [1] Hopfield J J. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities [J]. *Proc of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1982, 79(8): 2554-2558
- [2] Hopfield J J. Neurons with Graded Response Have Collective Computational Properties Like Those of Two-state Neurons [A]. *Proc of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1984, 81(10): 3088-3092
- [3] 王凌, 郑大钟. TSP 及其基于Hopfield 网络的研究 [J]. *控制与决策*, 1999, 14(6): 669-674
(Wang L, Zheng D Z. Study on TSP and Optimization Based on Hopfield Neural Network [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(6): 669-674)
- [4] 桑农, 张天序. 基于Hopfield 神经网络的FLIR 图像分割 [J]. *自动化学报*, 2001, 27(3): 303-309
(Sang N, Zhang T X. Segmentation of FLIR Images by Hopfield Neural Network [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 303-309)
- [5] 王万良, 吴启迪, 徐新黎. 基于Hopfield 神经网络的作业车间生产调度方法 [J]. *自动化学报*, 2002, 28(5): 838-844
(Wang W L, Wu Q D, Xu X L. Hopfield Neural Network Approach for Job-shop Scheduling Problems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 303-309)
- [6] 郭琦, 洪炳熔, 张华. 用Hopfield 网络优化空间机器人的路径 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(8): 970-973
(Guo Q, Hong B R, Zhang H. Path Planning for Space Robot by Use of Hopfield Network [J]. *J of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(8): 970-973)
- [7] Lan M S, Chand S. Solving Linear Quadratic Discrete-time Optimal Controls Using Neural Network [A]. *Proc of the 29th Conf on Decision and Control* [C]. Honolulu, 1990: 2770-2772
- [8] Chandler P, Mears M, Pachter M. On-line Optimizing Networks for Reconfigurable Control [A]. *Proc of the 32nd Conf on Decision and Control* [C]. San Antonio, 1993: 2272-2277.

(下转第1046页)

其中: x_i^* 为当前最优解, Δ_i 为搜索半径, $p = 0.1, q = 10.0$ 否则, 返回 Step 3

Step 5: 用二次载波后的混沌变量继续迭代搜索 令 $x_i(k) = x_{i,n}$, 计算相应的性能指标 $f(k)$.

if $f(k) < f^*$, then $f^* = f(k)$, $x_i^* = x_i(k)$;

else if $x_i(k) = f^*$ then 放弃 $x_i(k)$;

$k = k + 1$

Step 6: 如果满足终止判据则搜索结束, 输出最优解 x_i^*, f^* ; 否则, 返回 Step 5

4 复杂函数的优化实例

采用基于幂函数载波的混沌优化方法 (PFCOA) 和文献[1]的混沌优化方法 (COA) 分别对 Rosenbrock 函数寻优

$$F = 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2 - 2.048x_1 - 2.048$$

设定一次载波、二次载波最大迭代次数分别为 800 和 200, 将两种方法分别随机运行 10 次, 优化结果如表 1 所示

从表 1 可以看出, PFCOA 较 COA 一次载波和二次载波迭代次数分别减少了 25% 和 38%, 而获得的最优解精度却分别提高了一个数量级和两个数量级, 本文提出的幂函数载波方式十分有效

5 结论

本文提出两种混沌变量的幂函数载波方式: 幂函数载波方式 1 能够有效改善混沌变量的遍历性, 适用于混沌优化的一次载波; 幂函数载波方式 2 能

够在混沌变量的局部搜索空间具有较好的遍历性, 适用于混沌优化方法的二次载波 在此基础上提出的基于幂函数载波的混沌优化方法较原有混沌优化方法, 无论是搜索速度还是求解精度都有显著提高

参考文献 (References)

- [1] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. *控制理论与应用*, 1997, 14(4): 613-615.
(Li B, Jiang W S. Chaos Optimization Method and Its Application [J]. *Control Theory and Applications*, 1997, 14(4): 613-615.)
- [2] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. *控制与决策*, 1999, 14(3): 285-288.
(Zhang T, Wang H W, Wang Z C. Mutative Scale Chaos Optimization Algorithm and its Application [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(3): 285-288.)
- [3] 张志新, 张明廉. 基于并行混沌和单纯形法的混合全局优化算法[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(1): 35-37.
(Zhang Z X, Zhang M L. A Hybrid Global Optimization Algorithm Based on Parallel Chaos Optimization and Simplex Search [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(1): 35-37.)
- [4] 修春波, 刘向东, 张宇河. 双混沌机制优化方法及其应用[J]. *控制与决策*, 2003, 18(6): 724-726.
(Xiu C B, Liu X D, Zhang Y H. Optimization Algorithm Using Two Kinds of Chaos and Its Application [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(6): 724-726.)

(上接第 1042 页)

- [9] Steck J E, Balkrishnan S N. Use of Hopfield Neural Networks in Optimal Guidance [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 287-293
- [10] Karam M, Mohamed A Zohdy, Shehu S Farinwata. Robust Optimal Control Using Recurrent Dynamic Neural Network [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Symp of ium on Intelligent Control* [C]. Mexico, 2001: 331-336
- [11] 李树荣, 李峰. 基于 Hopfield 网络的多变量动态矩阵控制及其在精馏塔系统中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(2): 304-306.
(Li S R, Li F. The Dynamic Matrix Control Based on Hopfield Neural Network and Its Application in a Distillation Column [J]. *Control Theory and Applications*, 2001, 18(2): 304-306.)
- [12] 郭鹏, 郭俊君, 王东风, 等. 基于 Hopfield 网络单元机组负荷多变量模型算法控制[J]. *系统仿真学报*, 2003, 15(4): 584-586.
(Guo P, Guo J J, Wang D F, et al. Multivariable MAC for Thermal Power Unit Load System Based on Hopfield System [J]. *J of System Simulation*, 2003, 15(4): 584-586.)
- [13] 王永骥, 涂健. *神经网络控制* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 99-100.
(Wang Y J, Tu J. *Neural Network Control* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999: 99-100.)