

文章编号: 1001-0920(2008)01-0046-05

基于粒子群优化的并联式混合动力汽车 模糊能量管理策略研究

吴 剑, 张承慧, 崔纳新

(山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

摘 要: 针对一种并联式混合动力轿车, 以混合驱动系统需求转矩和电池组荷电状态(SOC)为输入, 以发动机转矩为输出, 构建了能量管理模糊控制器, 并以总的等效燃油消耗为优化目标, 利用粒子群算法对模糊隶属度函数参数和模糊控制规则进行优化. 基于 ADVISOR 的仿真研究表明, 与未优化的模糊能量管理策略相比, 经过优化的模糊能量管理策略能够更有效地降低混合动力汽车的燃油消耗, 更好地控制电池组 SOC 的变化.

关键词: 并联式混合动力汽车; 模糊控制; 能量管理策略; 粒子群优化

中图分类号: TP273; U469.72

文献标识码: A

Fuzzy energy management strategy of parallel hybrid electric vehicle based on particle swarm optimization

WU Jian, ZHANG Cheng-hui, CUI Na-xin

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji 'nan 250061, China. Correspondent: ZHANG Cheng-hui, E-mail: zchui@sdu.edu.cn)

Abstract: For a kind of parallel hybrid electric vehicle, a fuzzy controller of energy management is constructed by using the torque request of the hybrid system and the battery state of charge (SOC) as inputs, and the engine torque as the output. Then, membership functions and rules of fuzzy controller are optimized simultaneously by using particle swarm optimization (PSO) based on the optimization object of fuel economy. This energy management strategy is implemented on a PHEV prototype in ADVISOR, and simulation results show that this approach provides excellent fuel efficiency along with charge sustaining operation.

Key words: Parallel hybrid electric vehicle; Fuzzy control; Energy management strategy; Particle swarm optimization

1 引 言

随着全球环境和能源问题的日益突出, 开发低排放、低油耗的新型汽车已成为当今汽车工业发展的首要任务. 在这种背景下, 融合传统内燃机汽车和电动汽车优点的混合动力汽车成为当今最具应用前景的低排放、低能耗汽车^[1]. 作为一种新型的多能源交通工具, 混合动力汽车的性能与其所采用的能量管理策略密切相关. 在满足汽车动力性能的前提下, 能量管理策略应根据汽车驱动系统的特性及实时的运行工况, 实现在发动机与电机之间进行合理转矩分配, 获得整车最大的燃油经济性能, 最低的排放以及平稳的驾驶性能.

并联式混合动力汽车一般采用发动机和电机两套独立的驱动系统, 能够有效地降低汽车的自重和制造成本, 是一种具有发展前景的结构形式. 但由于并联式混合动力汽车运行模式较为复杂, 其能量管理策略还不成熟. 目前普遍采用的是基于逻辑门限的策略, 主要依靠工程经验设置参数初值, 结合“试错法”对这些参数进行调整. 该方法虽然具有一定的实用性, 但不能保证动力系统的最佳匹配, 无法使整车系统达到最大效率^[2]. 为此, 文献[3, 4]分别基于动态规划方法和古典变分法提出了全局最优的能量管理策略, 可以求得控制变量(如发动机/电机转矩)的全局最优解. 但这些方法需已知行驶工况, 难以应

收稿日期: 2006-08-29; 修回日期: 2006-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477042); 高等学校博士点基金项目(20040422052); 山东省自然科学基金重点项目(Z2004G04).

作者简介: 吴剑(1978—), 男, 山东莱芜人, 博士生, 从事电动汽车能量管理、最优控制等研究; 张承慧(1963—), 男, 山东陵县人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、电力电子技术、电机与控制等研究.

用于实车控制. Paganelli 等人基于等效燃油消耗最小方法,提出了瞬时优化控制策略^[5],将电池消耗的电能等效为燃油热能,以每个时刻总的燃油消耗作为优化目标来求解控制变量,在工况未知的情况下可以实现每个时刻的燃油消耗最小,其缺点是需要大量的浮点运算,实现较为困难.

基于模糊逻辑的模糊能量管理策略,具有鲁棒性强、实时性好的优点,而且能克服逻辑门限能量管理策略的许多不足,是一种极具推广应用前景的能量管理策略^[6-8],但其模糊控制器的建立主要依靠经验,无法获得全局最优.本文针对一种典型的并联式混合动力汽车驱动系统,构建了以混合驱动系统需求转矩和电池组荷电状态(SOC)为输入,以发动机转矩为输出的模糊控制器,并利用粒子群算法同时对模糊隶属度函数参数和模糊控制规则进行优化.仿真结果表明,与优化前相比,经过优化的模糊能量管理策略通过合理分配发动机和电机的输出转矩,可更加有效地降低混合动力汽车的燃油消耗,很好地控制电池组 SOC 的变化.

2 并联式混合动力汽车工作模式分析

图 1 为一种典型的并联式混合动力汽车动力总成构型图,采用双轴式转矩结合驱动方式,发动机通过传动系统直接驱动车辆,并可以带动电机向电池充电,电机也可以启动发动机或驱动车辆.

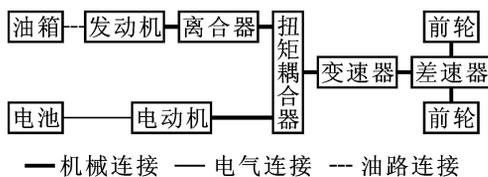


图 1 动力总成构型图

由于发动机和电机两套驱动系统分别具有不同的高效工作区,为了充分发挥并联式混合驱动系统的优势,汽车在不同的行驶工况下,应具有多种不同的工作模式.并联式混合动力汽车的工作模式可分为以下 4 种:

- 1) 当车辆启动和低速行驶时,为避免发动机处于高比油耗区工作,车辆由电机单独驱动;
- 2) 当车辆匀速运行时,由发动机单独驱动车辆,并根据电池组的 SOC 确定是否对电池充电;
- 3) 在加速或爬坡等大负荷情况下,由发动机和电机混合驱动车辆;
- 4) 当减速或制动时,发动机不工作,电机尽可能多地回收再生制动能量,剩余部分由机械制动器消耗.

在前 3 种工作模式下,有如下转矩公式:

$$T_r = T_e + T_m. \tag{1}$$

式中: T_r 为混合驱动系统的总需求转矩,由车辆加速踏板信号、当前车速和变速器档位确定; T_e 和 T_m 分别为发动机和电机转矩.电机所能提供的正/负转矩可以调整发动机的工作点,调整的依据是发动机的效率曲线图.能量管理策略可根据混合驱动系统的需求转矩及当前电池组 SOC,基于发动机效率曲线图合理地分配发动机和电机的输出转矩,以提高车辆的燃油经济性.

3 模糊能量管理策略

为了提高并联式混合动力汽车的燃油经济性,其能量管理策略不仅需要优化发动机的运行,而且需要考虑电机和电池组的优化问题.针对这类复杂非线性优化问题,基于模糊逻辑的能量管理策略不依赖于系统精确的数学模型,具有较好的鲁棒性,可以实现能量的合理分配,有效地提高车辆的燃油经济性能.

模糊能量管理策略的实现主要依靠一个两输入单输出的模糊控制器,它的两个输入变量分别为混合驱动系统需求转矩 T_r 和电池组 SOC 的估计值,输出变量为发动机转矩 T_e .模糊控制器对两路输入信号进行模糊运算,基于模糊控制规则实施模糊推理后,经清晰化运算得到发动机的输出转矩 T_e .电机的输出转矩 T_m 等于需求转矩 T_r 减去发动机输出转矩.

输入、输出的模糊子集和隶属度函数如图 2 所示.输入、输出变量的论域均为 $[1, 11]$.对于 T_r 和 T_e ,“1”表示转矩为零,“6”表示发动机最优转矩值,该最优转矩根据发动机最优效率转矩曲线和发动机转速确定,“11”表示发动机最大转矩值,其余数值采用线性插值的方法与转矩对应.电池组 SOC 的论域与电池组允许的最大最小值(由电池的工作效率区决定)对应,这里“1”代表 SOC 的最小值 0.5,

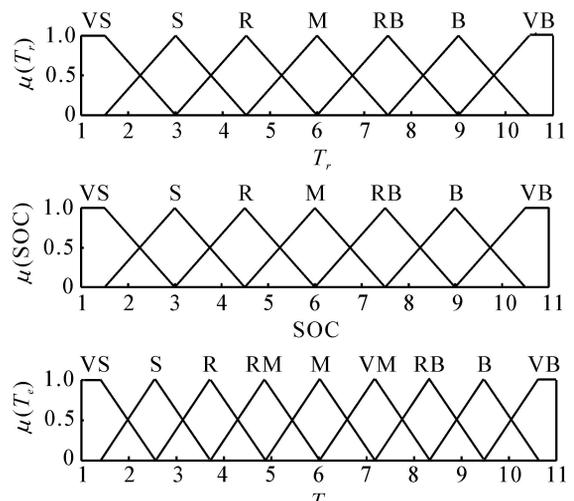


图 2 模糊输入、输出隶属度函数

“11”代表 SOC 的最大值 0.7. 各变量的隶属度函数为图 2 所示的交叠对称的三角形和梯形, 以便于参数的调整. 输入变量定义了 7 个模糊子集: $\{VS, S, RS, M, RB, B, VB\}$; 输出变量定义了 9 个模糊子集: $\{VS, S, RS, RM, M, VM, RB, B, VB\}$.

在确定各输入、输出变量模糊子集和隶属度函数后, 就可以列写出模糊控制规则. 控制规则如表 1 所示, 这里所选取的模糊控制规则的形式为

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i,$$

$$\text{Then } u \text{ is } B^i, i = 1, 2, \dots$$

其中: R^i 表示第 i 条规则, x_i 为输入变量, u 为输出变量. 清晰化运算采用重心法.

表 1 模糊控制规则表

T_i	SOC						
	VS	S	RS	M	RB	B	VB
VS	RM	RS	RS	S	S	VS	VS
S	RM	RM	RS	RS	S	S	VS
RS	M	M	RM	RS	RS	S	S
M	RM	VM	M	M	M	RM	RS
RB	RB	RB	VM	M	M	RM	RM
B	B	B	RB	RB	VM	VM	M
VB	VB	B	B	RB	RB	VM	VM

模糊控制规则的主要依据如下:

- 1) 需求转矩 T_r 近似为当前转速下发动机最优转矩时, 电机不工作, 由发动机单独驱动;
- 2) 需求转矩 T_r 小于或大于最优转矩一定值时, 发动机工作点位于效率最优转矩曲线附近, 余下的部分正/负转矩由电机提供;
- 3) 电池组 SOC 较高时, 适当增加电机转矩, 反之, 减少电机转矩.

4 基于粒子群算法优化的模糊控制器

通常模糊控制器隶属度函数和模糊控制规则的选取主要依靠专家经验, 带有较大的主观性, 一般情况下无法获得全局最优. 由于模糊控制的非线性, 很难用梯度法和动态规划进行优化, 而粒子群算法是一种基于群智能的全局优化方法, 能够在复杂空间中实施有效搜索^[9]. 因此, 本文将粒子群算法与模糊控制相结合, 利用粒子群算法优化模糊控制器的隶属度函数和模糊控制规则, 以期得到最优的能量管理策略.

4.1 粒子群算法

粒子群算法是基于群体的演化算法, 其基本思想源于对鸟群简化社会模型的研究及行为模拟. 用粒子群算法求解优化问题时, 问题的潜在解称为搜索空间中的一个粒子, 每个粒子有自己的位置和速

度, 以及由被优化问题确定的适应值. 基本粒子群算法通过群体之间的信息共享和个体自身经验总结来修正个体行为, 最终求得优化问题的解.

算法首先初始化产生一群随机粒子; 然后迭代寻找最优解. 在每一次迭代中, 粒子通过跟踪两个极值来不断更新自己: 一个是粒子本身所找到的最优解, 称为个体极值 p_{Best} ; 另一个是整个种群目前为止所找到的最优解, 称为全局极值 g_{Best} . 然后根据下列公式来更新速度和位置^[10]:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 \cdot \text{rand}_1() \cdot (p_{Best} - x_{id}^k) + c_2 \cdot \text{rand}_2() \cdot (g_{Best} - x_{id}^k). \quad (2)$$

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = v_{max}, v_{id}^{k+1} > v_{max}; \\ v_{id}^{k+1} = -v_{max}, v_{id}^{k+1} < -v_{max}. \end{cases} \quad (3)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}. \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_{id}^{k+1} = x_{max}, x_{id}^{k+1} > x_{max}; \\ x_{id}^{k+1} = x_{min}, x_{id}^{k+1} < x_{min}. \end{cases} \quad (5)$$

其中: v_{id}^{k+1} 和 x_{id}^{k+1} 分别表示粒子 i 的第 d 维分量在第 k 代的速度和位置; v_{max} 表示粒子最大速度; x_{min} 和 x_{max} 分别为粒子的最小位置和最大位置; $\text{rand}_1()$ 和 $\text{rand}_2()$ 表示 $(0, 1)$ 之间的随机数; c_1 和 c_2 为学习因子, 一般取 $c_1 = c_2 = 2$; w 表示惯性权重, w 较大时算法具有较强的全局搜索能力, w 较小则算法倾向于局部搜索. 可以将 w 随迭代次数线性减小, 即

$$w = w_{max} - k \cdot \frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}}. \quad (6)$$

其中: k_{max} 为总的迭代次数, w_{max} 为最大权重, w_{min} 为最小权重. 在每一次迭代中, 算法还将根据粒子的适应度值不断更新 p_{Best} 与 g_{Best} 的取值. 在迭代过程中, 当满足既定的终止规则, 如达到预定迭代次数或 g_{Best} 的改进步长小于指定阈值时, 停止运算, 将最后得到的 g_{Best} 作为最优解输出.

4.2 隶属度函数和模糊控制规则的编码

针对图 2 所示的需求转矩的隶属度函数 $\mu(T_r)$, 其隶属度函数集关于论域中心对称, 隶属度函数的顶点坐标如图 3 所示, 需要确定的隶属度函数参数为 $[0, 5]$ 之间的实数 x_1, x_2, x_3 . SOC 和发动机转矩的隶属度参数的确定与此类似. 因此, 实际需要确定的隶属度函数的参数为 10 个.

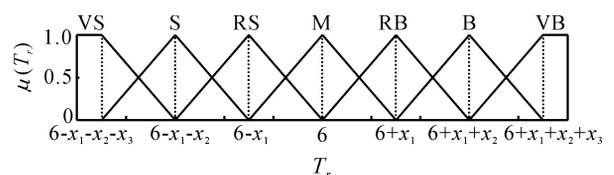


图 3 隶属度函数的优化参数

对于表 1 所示的控制规则, 可看作一组输入、输

出变量模糊子集的排列组合. 在输入变量模糊子集排列次序确定的情况下, 只需对相应的模糊规则的后件进行优化. 由于本模糊控制器完整的控制规则应为 $7 \times 7 = 49$ 条, 这里需要确定的模糊规则由 49 个 $[1, 9]$ 范围内的整数表示, $1 \sim 9$ 分别对应输出变量的 9 个模糊子集. 每个粒子位置的前 10 维是待优化的隶属度函数参数, 采用实数编码; 后面 49 维是待优化的规则, 采用整数编码. 粒子的速度和粒子的位置具有相同的维数, 不同之处在于每一维都可以取实数.

4.3 适应度函数的选择及粒子的更新

能量管理策略的主要设计原则是在保证汽车动力性能的前提下, 实现整车的燃油经济性最佳. 由于并联式混合动力汽车存在发动机和电机两种动力源, 发动机的油耗不能作为评价汽车燃油经济性的指标. 为此, 将电机消耗或充入电池组的电量转换为等效油耗, 并将其与发动机的油耗之和作为总的等效燃油消耗. 采用整个工况总的等效燃油消耗作为粒子群算法优化过程中的适应度函数, 模糊控制器的优化目标就是使该适应度函数值最小.

根据所选取的适应度函数, 并利用式(2) ~ (5) 更新粒子时, 对粒子的整数编码部分而言, 由于 w , c_1 , c_2 和 $\text{rand}()$ 的存在, 即使当前位置和速度均为整数, 下一步位置也有可能变为实数. 因此, 可通过对粒子整数编码部分出现的实数进行四舍五入取整运算, 避免出现不可行解.

4.4 算法流程

利用粒子群算法对混合动力汽车模糊能量管理策略中的模糊控制器优化的具体流程如下:

- 1) 对 T_r , SOC 和 T_e 的隶属度函数的参数和模糊控制规则编码, 作为粒子群算法的搜索空间, 并确定粒子的搜索范围和最大速度;
- 2) 初始化每个粒子的位置, 并将第 3 节建立的模糊控制器的隶属度函数和模糊控制规则作为一个经验粒子加入到初始粒子群中以加快搜索速度, 其余粒子随机生成;
- 3) 初始化每个粒子的速度;
- 4) 由式(2) 和(3) 更新粒子各维的速度, 由式(4) 和(5) 更新粒子各维的位置, 并对整数编码部分进行取整运算;
- 5) 对每一个粒子解码, 作为隶属度函数的相应参数和模糊控制规则输出到模糊控制器, 基于所建立的混合动力汽车模型进行仿真, 将一个循环工况总的等效燃油消耗作为其适应度值, 并根据适应度确定是否用该粒子更新 p_{Best} 和 g_{Best} ;
- 6) 转到步骤 4) 进行迭代, 直到达到最大迭代

次数或 g_{Best} 的改进步长小于指定阈值时, 将 g_{Best} 解码, 作为隶属度函数的相应参数和模糊控制规则输出.

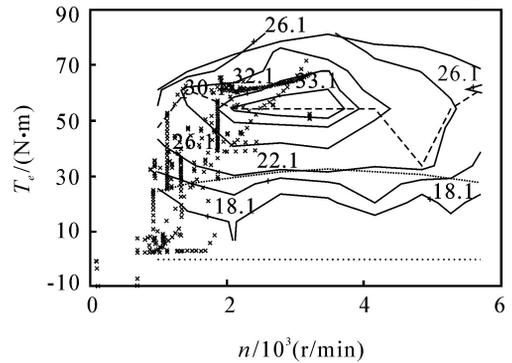
5 仿真实验及结果分析

为验证基于粒子群优化的模糊能量管理策略的有效性, 基于 ADVISOR 仿真平台构建并联式混合动力汽车仿真模型, 主要部件的仿真参数见表 2, 汽车构型如图 1 所示. 在 Matlab 环境下编写粒子群优化模糊控制器的程序, 在新欧洲行驶循环工况 (NEDC) 中结合汽车仿真模型采用离线优化的方式求解最优的模糊控制器. 将优化后的模糊控制器应用于模糊能量管理策略, 在 ADVISOR 中针对不同的行驶工况进行仿真研究, 并与未优化的模糊能量管理策略的仿真结果进行比较.

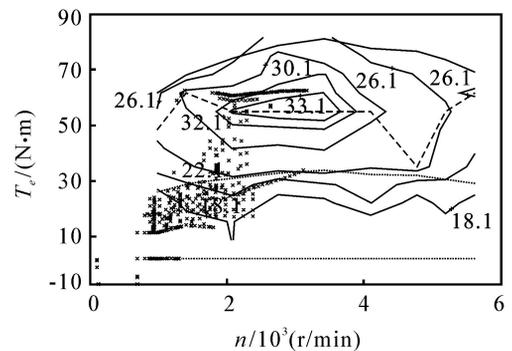
表 2 混合动力汽车主要部件参数

整车	质量	1 310 kg
	迎风面积	2.1 m ²
电机	类型	永磁同步
	最大功率	20 kW
电池组	类型	VRLA
	额定容量	18 Ah
	额定电压	336 V
发动机	排量	1.4 L
	最大功率	41 kW

图 4 为仿真车辆在 NEDC 工况中分别采用基于粒子群优化的模糊能量管理策略 (PSO_FUZZY



(a) PSO_FUZZY EMS



(b) FUZZY EMS

图 4 发动机工作点在效率曲线图上的分布

_EMS) 和未优化的模糊能量管理策略 (FUZZY_EMS) 时发动机工作点分布图. 从图 4 可以看出, PSO_FUZZY_EMS 的发动机工作点更多地集中在高效区, 说明 PSO_FUZZY_EMS 通过合理分配发动机和电机输出转矩可以更有效地改善混合动力汽车发动机的工作区域.

图 5 为 NEDC 工况中分别采用 PSO_FUZZY_EMS 和 FUZZY_EMS 时电池组 SOC 的变化曲线. 可以看出, PSO_FUZZY_EMS 相比于 FUZZY_EMS, 能够将电池组的 SOC 维持在一个更小的范围内, 从而使电池组具有较高的充放电效率, 延长电池组寿命.

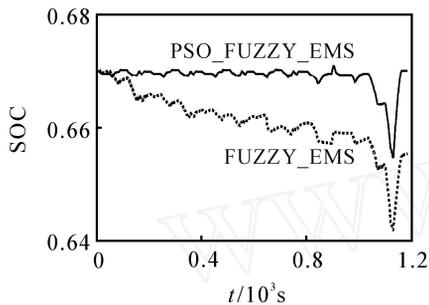


图 5 电池组 SOC 曲线

表 3 为仿真车辆分别采用 PSO_FUZZY_EMS 和 FUZZY_EMS 时在 NEDC, ECE 和 UDDS 共 3 种不同工况的百公里油耗对比, 仿真中均考虑了电机产生的等效油耗. 从表 3 可以看出, 基于粒子群优化的模糊能量管理策略不仅在 NEDC 工况将百公里油耗降低了 4.6%, 而且在其他工况也能有效地降低燃油消耗.

表 3 不同工况下的燃油经济性比较

工况	百公里油耗/(L/100 km)		
	PSO_FUZZY_EMS	FUZZY_EMS	偏差/%
NEDC	6.2	6.5	- 4.6
ECE	8.1	8.4	- 3.6
UDDS	6.1	6.2	- 1.6

6 结 语

本文研究了并联式混合动力汽车模糊能量管理策略, 建立了用于能量管理的模糊控制器, 根据混合动力系统的需求转矩和电池组 SOC 来合理控制发动机和电机的输出转矩, 并采用粒子群算法优化模糊控制器中的隶属度函数参数和模糊控制规则. 基

于 ADVISOR 软件的仿真实验结果表明, 基于粒子群优化的模糊能量管理策略与未优化的模糊能量管理策略相比, 能够更有效地降低燃油消耗, 很好地控制电池组 SOC 的变化.

本文提出的粒子群算法的优化目标仅考虑了车辆的等效燃油消耗, 未考虑尾气排放的变化. 因此, 下一步的工作需要将尾气排放和燃油消耗同时作为优化目标进行研究.

参考文献(References)

- [1] Antoni Szumanowski. Hybrid electric vehicle basis[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001.
- [2] Chan-Chiao Lin, Huei Peng, Jessy W Grizzle. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2003, 38(11): 839-849.
- [3] Rimaux S, Delhom M, Combes E. Hybrid vehicle powertrain: Modeling and control[C]. Proc of the 16th Int Electric Vehicle Symposium. Beijing: EVS, 1999.
- [4] Delprat S, Guerra T M, Rimaux J. Optimal control of a parallel power train from global optimization to real time control strategy [C]. Proc of the 18th Int Electric Vehicle Symposium. Berlin: EVS, 2001.
- [5] Paganelli G, Delprat S. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains [C]. IEEE 55th Vehicular Technology Conf. Birmingham: IEEE, 2002: 2076-2081.
- [6] Lee H-D, Sul S-K. Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45 (4): 625-632.
- [7] Schouten N J, Salman M A, Kheir N A. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 460-468.
- [8] Baumann B M, Washington G. Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles [J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2000, 5(1): 58-72.
- [9] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]. IEEE Int Conf on Neural Networks. Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [10] Visakan K, Kirusnapillai S. Stability analysis of the particle dynamics in particle swarm optimizer[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2006, 10 (3): 245-255.