



(45)授权公告日 2020.07.28

权利要求书2页 说明书4页 附图2页

1.一种基于混沌分子动理论优化算法(CKMTOA)永磁同步电机转速控制器自整定的方法,其特征在于,该方法考虑了驱动控制器的智能优化控制,控制思想是选择最优的PID控制器参数,采用改进的分子动理论优化算法自整定的部分是针对定永磁同步电机矢量控制转速环PID控制器参数,提高了永磁同步电机驱动控制系统的鲁棒性和响应速度;

该方法采用混沌分子动理论优化算法自整定永磁同步电机最优参数的方法,求解步骤如下:

Step1通过转子位置传感器采集出永磁同步电机的实际位置信号 $\theta$ ,并由此计算出电机的运行速度 $v$ ,设定参考速度 $v^*$ 和实际速度 $v$ 相比较后产生误差信号 $\Delta v$ ;

Step2将Step1中的转速误差信号作为自适应混沌分子动理论优化PID控制器的输入量,输出量作为q轴电流参考信号即 $i_q^*$ ,令d轴电流参考值为0,即 $i_d^*=0$ ;

Step3初始化CKMTOA算法参数,将转速环PID控制器的三个参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 看做一个分子个体,即每个分子个体包括三维空间维度,每个分子个体代表算法中适应度函数值得解,生成随机种群,包括种群的初始位置、初始速度 $V_i$ 和算法中的基本参数;

Step4将每个分子个体带入永磁同步电机矢量控制系统,根据适应度函数来计算各个分子个体的适应值,对比所有分子个体的适应度值选出最优个体 $X_{KBest}$ ,并对其进行保留;

Step5根据公式(1)确定每个分子个体与最优个体之间产生的合力,若产生合力为引力,则按公式(2)计算分子个体的引力加速度;若产生合力为斥力,则按公式(3)计算分子个体的斥力加速度;否则产生合力为零,则使分子个体进行不规则的热运动操作,按式(4)计算分子个体进行扰动的加速度;

$$\begin{cases} rand < p_1, & \text{分子个体受引力} \\ p_1 < rand < p_2, & \text{分子个体受斥力} \\ (p_1 + p_2) < rand < 1, & \text{分子个体不受力} \end{cases} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{F_i}{M_i} = GM_{best}(X_{Best} - X_i) \quad (2)$$

$$a_i = -\frac{F_i}{M_i} = -GM_{best}(X_{Best} - X_i) \quad (3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} A(X_{max,j} - X_{min,j})N(0,1), & rand1 < p_c \\ 0, & rand1 > p_c \end{cases} \quad (4)$$

其中: $X_i$ 为第 $i$ 个分子个体, $X_{Best}$ 为最优分子个体, $F_i$ 为分子个体 $X_i$ 受到最优分子个体 $X_{Best}$ 的作用力, $M_i$ 为分子个体 $X_i$ 的质量, $M_{Best}$ 为最优分子个体质量, $G$ 为引力常数, $a_{ij}$ 为分子个体 $X_i$ 的第 $j$ 维加速度, $p_1$ 和 $p_2$ 分别是分子个体受当前最优分子个体引力、斥力的概率; $p_c \in [0, 1)$ 为变异率, $X_{max,j}$ 、 $X_{min,j}$ 分别为解空间第 $j$ 维的上、下界; $N(0, 1)$ 为服从正态分布的随机数; $A$ 为振动幅度,随着温度的降低,振动剧烈程度降低,本发明取 $A = (1 - 0.9 * t / T)$ , $t$ 为当前迭代次数, $T$ 为总迭代次数;

Step6更新分子个体的速度和位置根据公式(5)和(6),并更新自适应惯性权值变量 $\omega$ 根据公式(7);

$$V_i = \omega V_i(t) + a_i \quad (5)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t) \quad (6)$$

其中: $\omega$ 是自适应惯性权值系数,从公式(5)中可以看出权值系数对算法的收敛性有重

要的影响,因此本发明引入自适应惯性权重法来更新权值系数,则自适应惯性权值系数 $\omega$ 的公式如下:

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max}, & f \geq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\omega_{\min}$ 、 $\omega_{\max}$ 分别为 $\omega$ 的最大值和最小值; $f$ 是分子个体当前的适应度函数值; $f_{\text{avg}}$ 和 $f_{\min}$ 分别是当前所有分子个体当前平均适应度函数值和最小适应度函数;

Step7将每个分子个体分别带入永磁同步电机矢量控制系统中,计算其对应的适应度函数值,然后根据适应度函数值对种群个体进行排序,筛选出部分最佳分子个体进行保留操作,作为每次迭代的精英种群JS;

Step8对每次迭代所选的精英种群中按公式(8)和(9)执行混沌局部搜索;

$$Z_{j,k+1} = \mu Z_{j,k} (1 - Z_{j,k}), k=0,1,2,3,4. 0 \leq Z_{j,0} \leq 1 \quad (8)$$

$$X_{j+k} = X_j^* + Z_{j,k}, k=0,1,2,3,4. j=1,2,\dots,JS \quad (9)$$

其中: $z_{j,k}$ 是扩充的混沌变量序列, $k=(1/B\%)-1$ 是根据Step7所取精英种群的数量来取值, $B\%$ 是所取精英种群数量占整个种群数量的百分比,且 $k$ 取大于等于零的整数,从而保证种群的总数量不变,不因每次迭代而减少; $\mu$ 是控制变量,当 $\mu=4$ 时, $z_0 \notin \{0,0.25,0.5,0.75\}$ ;  
 $X_j^*$ 是当前精英种群中的分子个体;

Step9对每次迭代的精英种群中最优个体进行精英保留操作:

第 $t$ 次迭代时,种群最优个体为 $X_{\text{KBest}} = X_i$ ,计算所得的适应函数值 $f(X_i) = \min(f(X_j))$ ,  $j \in \{1,2,\dots, \text{Size}\}$ ,其中Size是整个种群规模;当第 $t+1$ 次迭代时精英种群中最优个体是 $X_p$ ,并与第 $t$ 代中的种群最优个体进行对比,若 $f(X_p) > f(X_i)$ ,则认为种群最优个体丢失,此时进行精英保留操作,即令 $X_i = X_{\text{KBest}}$ ,进而确保种群中的最优个体不会退化;

Step10判断算法是否满足停止条件,若符合,跳转到Step11,否则跳转到Step4;

Step11输出转速环PID控制器最优的三个参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 和适应度函数值,并保存成一个最优解种群,算法结束。

2. 根据权利要求1所述的基于混沌分子动理论优化算法(CKMTOA)永磁同步电机转速控制器自整定的方法,其特征在于,选用的适应度函数 $J$ 来评价永磁同步电机矢量控制系统中参数是否为最优参数,适应度函数公式如下:

$$J = \int_0^\infty t |e(t)| dt + (1 - \exp(-\beta)) * (M_p + |e(t)|) \quad (10)$$

其中: $t$ 是时间, $e(t)$ 是转速的误差, $M_p$ 是系统的最大超调量, $\beta$ 是比例因子。

## 基于混沌分子动理论算法永磁同步电机转速控制器参数自整定的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及永磁同步电机驱动控制系统领域,具体是一种基于混沌分子动理论算法永磁同步电机转速控制器参数自整定的方法。

### 背景技术

[0002] 永磁同步电机具有体积小、效率高、转动惯量低、电磁转矩大、控制方便等优点,并且磁性材料、电力电子器件、控制理论等蓬勃发展,因此永磁同步电机驱动系统广泛被应用于电动和混合动力电动汽车等。永磁同步电机的控制中,由于转子转速和定子电流的非线性耦合使得系统具有很强的非线性,特别是整个驱动系统存在不确定性时,这种非线性使得系统难以达到高精度控制性能。传统的PID控制器,难以适应复杂过程的控制和实现参数的在线整定,不能达到高精度控制。电动和混合动力电动汽车在启动、爬坡和平稳行驶时,需要不同的永磁同步电机驱动器控制参数。在变速和负载扰动等因素下,PID参数需要随着外界因素和电机参数的变化而自整定到适应的参数值才能使系统更加稳定控制精度更高,然而传统的PID控制器难以找到最佳的参数和不能够自整定,且容易产生振荡和超调,难以达到最佳的控制效果。

[0003] 分子动理论优化算法是一种通过模拟分子运动机制的智能优化算法,鉴于物理规律优化算法的诸多优点,具有能较好地兼顾收敛性和较强的全局搜索能力,表现出良好的优化性能。但是应用于优化PID控制器参数时,在算法迭代过程中,如种群中的所有分子个体均满足  $|\max(x_{.j}) - \min(x_{.j})| \leq \varepsilon$  时则算法容易陷入局部早熟,缺乏局部寻优机制,影响算法全局搜索能力和收敛速度。自适应调整的惯性权重法有利于提高算法收敛速度,混沌运动具有遍历型、随机性等特点,将其应用到优化搜索过程中,当分子陷入早熟收敛时,用混沌扰动来跳出局部最优,并快速搜寻到最优解,提高解的精度和收敛速度。

### 发明内容

[0004] 本发明针对现阶段上述永磁同步电机驱动器实现高精度控制和动态响应存在的问题,公开了一种基于混沌分子动理论优化算法的自适应PID控制器应用于永磁同步电机在线参数辨识控制的方法。该发明的控制器有动态响应快的特性,有效的克服了由变速和负载扰动等因素引起的振荡和超调,提高了永磁同步电机驱动控制系统的鲁棒性和响应速度,对永磁同步电机自适应控制有较好的控制效果。

[0005] 本发明的特点首先将混沌分子动理论优化算法与PID控制器结合起来,该发明的自适应PID控制器实现永磁电机转速稳定控制和抑制外部扰动的影响。其次,采用种群自适应惯性权重法来更新权值系数以便于提高收敛速度,并选用改进的ITAE作为适应度函数。最后利用混沌运动的遍历性,随机性等特点,对最优分子个体进行混沌扰动,有利于跳出局部最优并提高收敛速度。

[0006] 本发明是通过如下方案实现,包括以下步骤:

[0007] 步骤1:通过转子位置传感器采集出永磁同步电机的实际位置信号 $\theta$ ,并由此计算出电机的参考速度 $v^*$ 和实际速度 $v$ 差值 $\Delta v$ 。

[0008] 步骤2:将步骤1中的转速误差信号作为自适应混沌分子动理论优化PID控制器的输入量,输出量作为q轴电流参考信号即 $i_q^*$ ,令d轴电流参考值为0即( $i_d^*=0$ )。

[0009] 步骤3:通过选用的适应度函数 $J$ 来评价永磁同步电机矢量控制系统中PID控制器参数是否为最优参数,选择适应度函数公式如下: $J = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt + (1 - \exp(-\beta)) * (M_p + |e(t)|)$ ,式中 $t$ 是时间, $e(t)$ 是转速的误差, $M_p$ 是系统的最大超调量, $\beta$ 是比例因子。

[0010] 步骤4:将经过自适应混沌分子动理论优化PID控制器调节后得到的参考值 $i_q^*$ 和 $i_d^*$ 与电流环反馈所得的实际电流 $i_q$ 和 $i_d$ 进行比较得到误差量 $\Delta i_d$ 和 $\Delta i_q$ ,然后根据电流调节器控制算法分别得到交轴和直轴的电压信号 $u_d$ 和 $u_q$ 。

[0011] 步骤5:通过上述得到的电压 $u_d$ 和 $u_q$ 经过Park逆变换得到两相静止坐标系下的电压控制信号 $u_\alpha$ 和 $u_\beta$ ,然后利用SVPWM空间矢量调制技术得到永磁同步电机信号来控制逆变电路的开关,使永磁同步电机按照指定信号工作。

## 附图说明

[0012] 以下结合附图对本发明进一步的说明。

[0013] 图1是基于本发明的永磁同步电机矢量控制系统原理框图

[0014] 图2是基于混沌分子动理论优化算法自适应PID控制器的结构框图

[0015] 图3是本发明的混沌分子动理论优化算法自整定永磁同步电机控制器参数流程图

## 具体实施方式

[0016] 如图1所示为基于本发明的永磁同步电机矢量控制系统的原理框图,其中包括光电编码传感器、电流检测装置、PMSM、混沌分子动理论优化算法自适应PID控制器、SVPWM脉宽调制和变换器部分,下面对本发明实施进一步详细说明如下。

[0017] 在永磁同步电机矢量控制部分采用混沌分子动理论优化算法自适应PID控制器,基于混沌分子动理论优化算法自适应PID控制器结构控制框图如图2所示。

[0018] 基于混沌分子动理论优化算法PID控制器应用于永磁同步电机在线参数辨识控制的方法,其特征在于本发明基于分子动理论优化算法引进自适应惯性权重法和混沌搜索理论。具体实施步骤包括如下:

[0019] (1)通过转子位置传感器采集出永磁同步电机的实际位置信号 $\theta$ ,并由此计算出电机的参考速度 $v^*$ 和实际速度 $v$ 差值 $\Delta v$ 。

[0020] (2)将步骤(1)中的转速误差信号作为自适应混沌分子动理论优化PID控制器的输入量,输出量作为q轴电流参考信号即 $i_q^*$ ,令d轴电流参考值为0,即 $i_d^*=0$ 。

[0021] (3)初始化CKMTOA算法参数,将转速环PID控制器的三个参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 看做一个分子个体,即每个分子个体包括三维空间维度,每个分子个体代表算法中适应度函数值得解,生成随机种群,包括种群的初始位置、初始速度 $V_i$ 和算法中的基本参数;

[0022] (4)将每个分子个体带入永磁同步电机矢量控制系统,根据适应度函数来计算各个分子个体的适应值,对比所有分子个体的适应度值选出最优个体 $X_{KBest}$ ,并对其进行保留;



[0023] (5) 根据公式 (1) 确定每个分子个体与最优个体之间产生的合力, 若产生合力为引力, 则按公式 (2) 计算分子个体的引力加速度; 若产生合力为斥力, 则按公式 (3) 计算分子个体的斥力加速度; 否则产生合力为零, 则使分子个体进行不规则的热运动操作, 按式 (4) 计算分子个体进行扰动的加速度;

$$[0024] \quad \begin{cases} rand < p_1, & \text{分子个体受引力} \\ p_1 < rand < p_2, & \text{分子个体受斥力} \\ (p_1 + p_2) < rand < 1, & \text{分子个体不受力} \end{cases} \quad (1)$$

$$[0025] \quad a_i = \frac{F_i}{M_i} = GM_{best} (X_{Best} - X_i) \quad (2)$$

$$[0026] \quad a_i = -\frac{F_i}{M_i} = -GM_{best} (X_{Best} - X_i) \quad (3)$$

$$[0027] \quad a_{ij} = \begin{cases} A(X_{\max,j} - X_{\min,j})N(0,1), & rand1 < p_c \\ 0, & rand1 > p_c \end{cases} \quad (4)$$

[0028] 其中:  $X_i$  为第  $i$  个分子个体,  $X_{Best}$  为最优分子个体,  $F_i$  为分子个体  $X_i$  受到最优分子个体  $X_{Best}$  的作用力,  $M_i$  为分子个体  $X_i$  的质量,  $M_{Best}$  为最优分子个体质量,  $G$  为引力常数,  $a_{ij}$  为分子个体  $X_i$  的第  $j$  维加速度  $p_1$  和  $p_2$  分别是分子个体受当前最优分子个体引力、斥力的概率;  $p_c \in [0, 1]$  为变异率,  $X_{\max,j}$ 、 $X_{\min,j}$  分别为解空间第  $j$  维的上、下界;  $N(0, 1)$  为服从正态分布的随机数;  $A$  为振动幅度, 随着温度的降低, 振动剧烈程度降低, 本发明取  $A = (1 - 0.9 * t / T)$ ,  $t$  为当前迭代次数,  $T$  为总迭代次数。

[0029] (6) 更新分子个体的速度和位置根据公式 (5) 和 (6), 并更新自适应惯性权值变量  $\omega$  根据公式 (7)。

$$[0030] \quad V_i = \omega V_i(t) + a_i \quad (5)$$

$$[0031] \quad X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t) \quad (6)$$

[0032] 其中:  $\omega$  是自适应惯性权值系数。从公式 (6) 中可以看出权值系数对算法的收敛性有重要的影响, 因此本发明引入自适应惯性权重法来更新权值系数, 则自适应惯性权值系数  $\omega$  的公式如下:

$$[0033] \quad \omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max}, & f \geq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

[0034] 其中:  $\omega_{\min}$ 、 $\omega_{\max}$  分别为  $\omega$  的最大值和最小值;  $f$  是分子个体当前的适应度函数值;  $f_{\text{avg}}$  和  $f_{\min}$  分别是当前所有分子个体当前平均适应度函数值和最小适应度函数值。

[0035] (7) 将每个分子个体分别带入永磁同步电机矢量控制系统中, 计算其对应的适应度函数值, 然后根据适应度函数值对种群个体进行排序, 筛选出部分最佳分子个体进行保留操作, 作为每次迭代的精英种群 JS;

[0036] (8) 对每次迭代所选的精英种群中按公式 (8) 和 (9) 执行混沌局部搜索;

$$[0037] \quad Z_{j,k+1} = \mu Z_{j,k} (1 - Z_{j,k}), k=0, 1, 2, 3, 4. 0 \leq Z_{j,k} \leq 1 \quad (8)$$

$$[0038] \quad X_{j+k} = X_j^* + Z_{j,k}, k=0, 1, 2, 3, 4. j=1, 2, \dots, JS \quad (9)$$

[0039] 其中:  $z_{j,k}$  是扩充的混沌变量序列,  $k$  的取值根据步骤 (7) 所取精英种群的数量来取

值,即 $k = (1/B\%) - 1$ , $B\%$ 是所取精英种群数量占整个种群数量的百分比,且 $k$ 取大于等于零的整数,从而保证种群的总数量不变,不因每次迭代而减少; $\mu$ 是控制变量,当 $\mu = 4$ 时, $z_0 \notin \{0, 0.25, 0.5, 0.75\}$ ;  $X_j^*$ 是当前精英种群中的分子个体。

[0040] (9) 对每次迭代的精英种群中最优个体进行精英保留操作:

[0041] 第 $t$ 次迭代时, $f(X_i) = \min(f(X_j))$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, \text{Size}\}$ , 其中 $\text{Size}$ 是整个种群规模; 且 $X_{K\text{Best}} = X_i$ ; 当第 $t+1$ 次迭代时精英种群中最优个体是 $X_p$ , 且 $f(X_p) = \min(f(X_j))$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, \text{Size}\}$ 。若 $f(X_p) > f(X_i)$ , 则表明最优个体丢失, 此时进行精英保留操作, 令 $X_i = X_{K\text{Best}}$ , 进而保证种群中的最优个体不会退化。

[0042] (10) 判断算法是否满足停止条件, 若符合, 跳转到步骤11, 否则跳转到步骤4;

[0043] (11) 输出转速环PID控制器最优的三个参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 和适应度函数值, 并保存成一个最优解种群, 算法结束。

[0044] 本发明选用适应度函数 $J$ 来评价永磁同步电机矢量控制系统中参数是否为最优参数, 适应度函数公式如下:

$$[0045] \quad J = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt + (1 - \exp(-\beta)) * (M_p + |e(t)|) \quad (10)$$

[0046] 其中: $t$ 是时间, $e(t)$ 是转速的误差, $M_p$ 是系统的最大超调量, $\beta$ 是比例因子。为了避免出现超调量过大的现象, 将超调量作为最优指标的一项, 使整个系统具有良好的稳定性和跟踪效果。

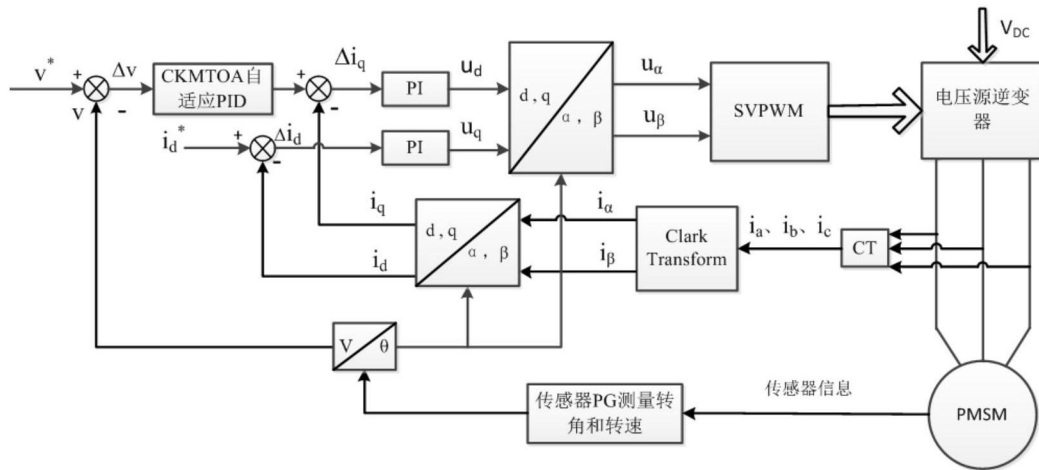


图1

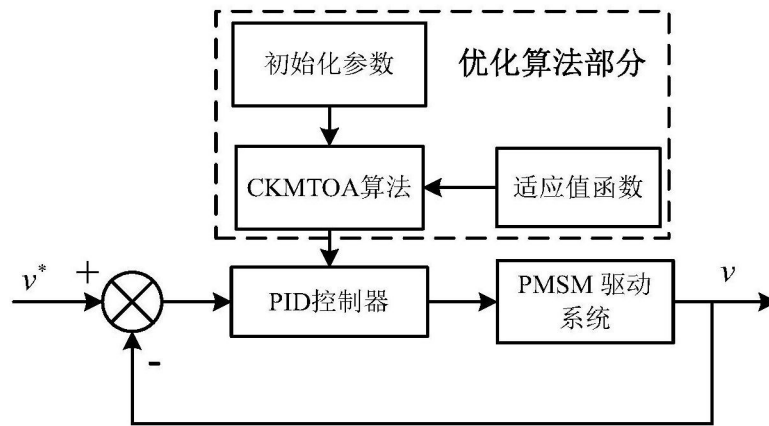


图2



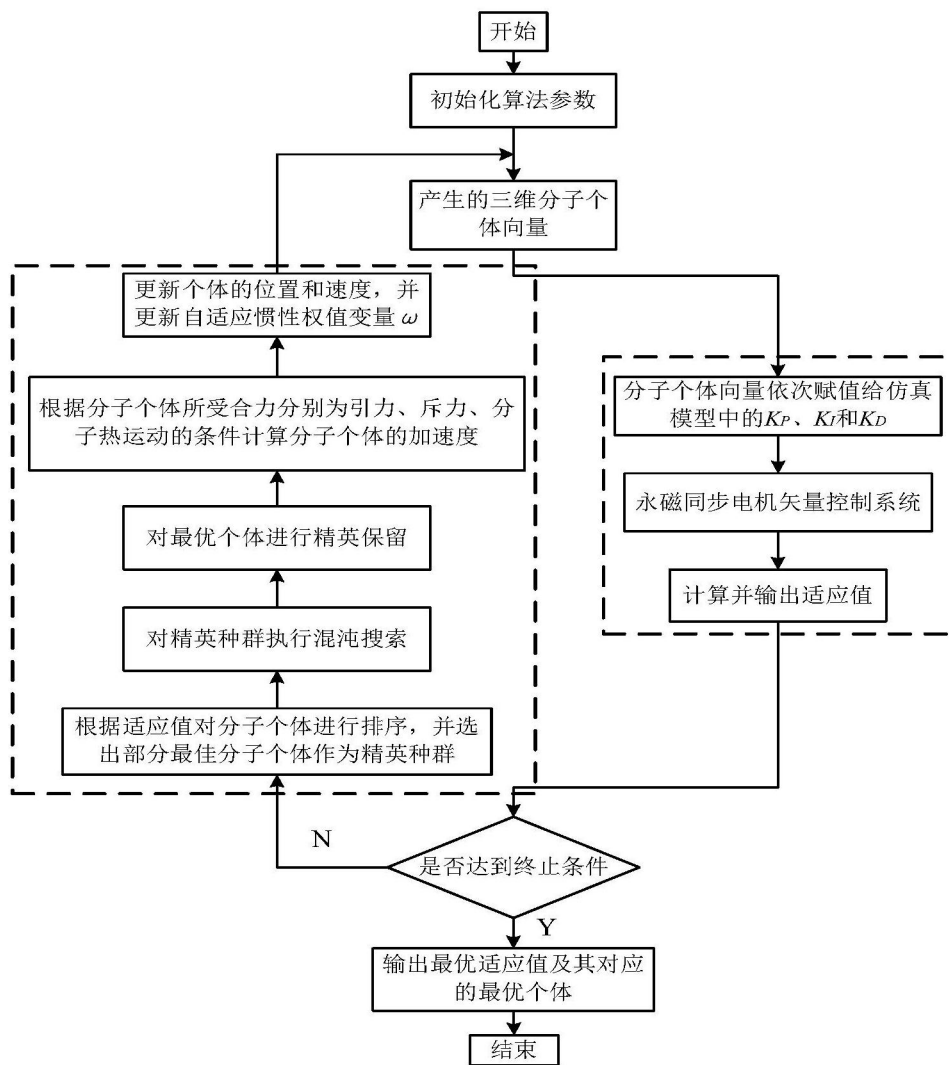


图3