



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110824921 B

(45)授权公告日 2020.08.11

(21)申请号 201911106380.6

(56)对比文件

(22)申请日 2019.11.13

CN 103713516 A, 2014.04.09

(65)同一申请的已公布的文献号

审查员 郝立林

申请公布号 CN 110824921 A

(43)申请公布日 2020.02.21

(73)专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市珞瑜路1037号

(72)发明人 宋宝 李虎 陈天航 唐小琦

周向东 杨承博 钟靖龙 邹益刚

向刘洋 潘佳明

(74)专利代理机构 北京金智普华知识产权代理

有限公司 11401

代理人 杨采良

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

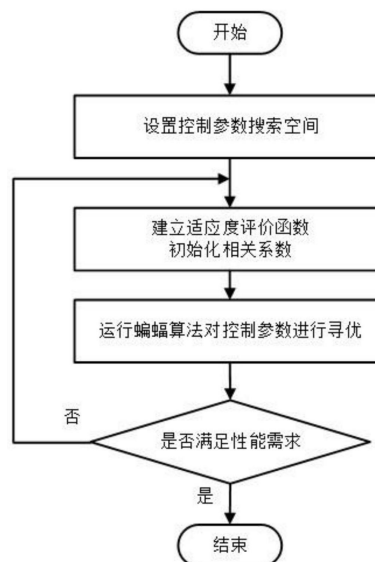
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

## (54)发明名称

基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法

## (57)摘要

本发明公开了一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,包括以下步骤:步骤一,针对不同的应用工况和性能偏好,设定相应的线性加权性能指标,设置参数搜索空间;步骤二,采集交流伺服调速系统的信号参数,用于当前系统性能指标的计算;步骤三,建立适应度评价函数,初始化相关参数;步骤四,利用蝙蝠算法,搜索能够实现系统性能最优的控制参数。本发明避免了困难且耗时的手动整定参数过程,相对于现阶段的伺服系统控制器参数整定方法,操作简单,适应性好,特别是能够保证多种性能指标下的综合性能需求。



1. 一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤一,针对不同的应用工况和性能偏好,设定相应的线性加权性能指标,设置参数搜索空间;

步骤二,采集交流伺服调速系统的信号参数,用于当前系统性能指标的计算;

步骤三,建立适应度评价函数,初始化相关参数;

步骤四,利用蝙蝠算法,搜索能够实现系统性能最优的控制参数;

步骤三中,建立的适应度评价函数如下:

$$\min_{x \in X} f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x), \dots, f_p(x))^T, i = 1, 2, 3, \dots, p,$$

其中: $x$ 为当前控制参数( $K_p, K_I, K_{FR}$ ),  $K_p, K_I$ 和 $K_{FR}$ 分别为比例增益、积分增益和前馈增益; $X$ 为所有待选择控制参数组成的搜索空间,  $f_i(x)$ 为交流伺服调速系统包括上升时间、调节时间、超调量在内的性能指标,  $p$ 为性能指标的数量;

以步骤三中的适应度评价函数作为选择当前最优个体的标准,利用蝙蝠算法在搜索空间 $X$ 内寻找系统的最优控制参数;

采用对多目标性能指标进行线性加权求和,上述步骤三中的适应度评价函数具体如下:

$$f(x) = a \cdot t_r + b \cdot M_p + c \cdot \varepsilon + d \cdot ITAE,$$

其中: $a, b, c, d$ 为权重系数,取值范围为 $[0, +\infty)$ ;  $t_r$ 为表征系统响应性能的上升时间,  $M_p$ 为表征系统相对稳定性的超调量,  $\varepsilon$ 为表征系统控制精度的稳态误差;  $ITAE$ 为时间乘绝对误差积分,  $ITAE = \int_0^{t_s} t |\omega_r(t) - \omega(t)| dt$ ,  $t_s$ 为系统的调整时间。

2. 根据权利要求1所述的一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,其特征在于:步骤一中,控制参数包括三个,分别是比例增益 $K_p$ 、积分增益 $K_I$ 和前馈增益 $K_{FR}$ ,根据所使用驱动器对三者标定的取值范围,确定相应的控制参数三维搜索空间。

3. 根据权利要求1所述的一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,其特征在于:步骤二的具体过程如下:

在交流伺服调速系统的速度指令输入端给定固定采样时长的阶跃信号,在每个采样时刻 $t$ 从系统中采集指令速度 $\omega_r(t)$ 、电流值 $I_q(t)$ 和反馈速度 $\omega(t)$ ,用于性能指标的计算。

4. 根据权利要求1所述的一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,其特征在于:对上述适应度评价函数进行优化:

$$f(x) = w_1 \cdot \frac{t_r}{t_{r\max}} + w_2 \cdot \frac{M_p}{M_{p\max}} + w_3 \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} + w_4 \cdot \frac{ITAE}{ITAE_{\max}},$$

其中,权重系数 $w_1, w_2, w_3, w_4 \in [0, 1]$ 且 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ ,  $t_{r\max}, M_{p\max}, \varepsilon_{\max}$ 和 $ITAE_{\max}$ 分别为性能指标 $t_r, M_p, \varepsilon$ 和 $ITAE$ 的最大值。

5. 根据权利要求1所述的一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,其特征在于:步骤四具体如下:

控制参数的选择范围在蝙蝠算法中被看作一群蝙蝠的飞行空间,控制参数被看作蝙蝠个体在空间中飞行的位置,适应度最高的最优参数被看作空间中猎物的位置;蝙蝠个体通

过不断改变它的超声波频率、速度和位置搜索猎物,并且当接近猎物时会增强发出超声波脉冲的频度,同时减弱响度,直到某一个蝙蝠达到猎物所在位置。

6.根据权利要求5所述的一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,其特征在于:蝙蝠算法的具体过程如下:

第i个蝙蝠个体发出的超声波频率表示为

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \beta,$$

其中: $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 分别是超声波频率的上限和下限, $\beta$ 属于[0,1]的随机向量;

同时,第i个蝙蝠个体在第k次飞行时的速度 $V_i$ 和将要达到的位置 $x_i$ 表示为

$$V_i^k = V_i^{k-1} + (x_i^k - x_*) \cdot f_i,$$

$$x_i^k = x_i^{k-1} + V_i^k,$$

其中: $x_*$ 为当前种群中适应度最好的蝙蝠个体所处位置;

为进一步提高种群的多样性,在蝙蝠个体的速度更新公式中引入随机惯量权重 $\lambda$ ,其表达式为

$$\lambda = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \cdot \text{rand}() + \sigma \cdot \text{randn}(),$$

式中, $\lambda_{\max}$ 和 $\lambda_{\min}$ 分别为随机惯量权重 $\lambda$ 的上限和下限, $\text{rand}()$ 为0到1的随机数, $\sigma$ 为随机惯量权重的均值, $\text{randn}()$ 为0到1的正态分布随机数;

改进后的速度更新公式变为

$$V_i^k = \lambda \cdot V_i^{k-1} + (x_i^k - x_*) \cdot f_i,$$

当飞到适应度更高的位置时,蝙蝠个体会通过增强脉冲频度和减弱脉冲响度来表明其正在逼近猎物;频度A和响度r的更新公式为

$$A_i^{k+1} = \alpha A_i^k,$$

$$r_i^{k+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma k)],$$

式中, $\alpha$ 和 $\gamma$ 分别是频度和响度的缩放因子, $r_i^0$ 是第i个蝙蝠个体的响度初始值。

7.根据权利要求6所述的一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,其特征在于:当蝙蝠个体逼近猎物时,最优个体 $x_*$ 在其邻域内随机飞行产生新的解 $x_{\text{new}}$ ,其表达式如下:

$$x_{\text{new}} = x_* + (2 \cdot \text{rand}() - 1) \cdot H,$$

式中,H为最优解的邻域。

8.根据权利要求1至7中任一项所述的一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,其特征在于:将经过蝙蝠算法寻优获得的最佳控制参数应用到交流伺服调速系统中,测试其时域暂态响应性能和频率响应性能;若符合当前系统的性能要求和用户的需求偏好,则完成最终的搜索;否则,重新设定适应度评价函数,进行新一轮的参数寻优。

## 基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及交流伺服系统控制参数整定领域,具体涉及一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法。

### 背景技术

[0002] 交流伺服系统具有响应快速、调速范围宽、定位准确和可靠性高等优点,作为制造自动化设备的核心部件之一,被广泛应用于数控机床、工业机器人、医疗器械、汽车工业等领域。进一步提升交流伺服系统的性能,对现代工业生产具有十分重要的现实意义。

[0003] 目前,交流伺服系统的电机调速控制通常由包含内层电流环和外层速度环的级联控制策略来实现。电流环的作用是提高系统响应,同时抑制内部干扰;速度环的作用是削弱负载扰动的影响,提高系统稳定性,保证电机转速实时快速跟踪输入速度指令。在当前工业应用中,两个环路的控制器多采用PI控制算法,部分高性能交流伺服系统中,速度环控制器采用伪微分反馈与前馈控制策略(PDFF,Pseudo Derivative Feedback with Feedforward)。

[0004] 当交流伺服调速系统的控制策略和控制结构确定后,其性能取决于各环路控制器的控制参数。控制参数选择的恰当与否直接影响交流伺服系统的整体性能。交流伺服系统的生产与应用中,电流环控制器拥有较高的响应速度,可看作比例系数为1的比例环节,其参数由生产者于出厂前设定。用户可根据当前工况和性能偏好,调整速度环控制参数,使系统发挥最佳性能。

[0005] 现有技术中存在的主要问题和缺陷包括:交流伺服系统的性能表现在响应性、精度和稳定性等不同的方面,不同的性能指标直接互相影响,有时是互相冲突,例如,表征系统响应性能的上升时间和表征系统稳定性的超调量是对冲突的性能指标。控制参数的手动整定要求调试人员具有较强的专业知识和丰富的工程经验。基于转动惯量辨识或者模型辨识的控制参数整定方法,其过程繁琐困难,且无法兼顾多种性能指标。

### 发明内容

[0006] 针对现有技术中存在的上述问题和缺陷,本发明提供了一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,获得了可使系统发挥最佳性能的最优控制参数。该方法首先针对不同的应用工况和性能偏好,设定相应的线性加权性能指标,兼顾系统的不同性能需求;然后将系统性能指标作为蝙蝠算法寻优的适应度准则;最终,利用蝙蝠算法良好的全局寻优能力对控制参数进行自动寻优,确定满足当前性能需求的最优控制参数,使得系统具有良好的响应速度、控制精度和鲁棒性。

[0007] 为此,本发明采用了以下技术方案:

[0008] 一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤一,针对不同的应用工况和性能偏好,设定相应的线性加权性能指标,设置参数搜索空间;

[0010] 步骤二,采集交流伺服调速系统的信号参数,用于当前系统性能指标的计算;

[0011] 步骤三,建立适应度评价函数,初始化相关参数;

[0012] 步骤四,利用蝙蝠算法,搜索能够实现系统性能最优的控制参数。

[0013] 优选地,步骤一中,控制参数包括三个,分别是比例增益 $K_p$ 、积分增益 $K_I$ 和前馈增益 $K_{FR}$ ,根据所使用驱动器对三者标定的取值范围,确定相应的控制参数三维搜索空间。

[0014] 优选地,步骤二的具体过程如下:

[0015] 在交流伺服调速系统的速度指令输入端给定固定采样时长的阶跃信号,在每个采样时刻 $t$ 从系统中采集指令速度 $\omega_r(t)$ 、电流值 $I_q(t)$ 和反馈速度 $\omega(t)$ ,用于性能指标的计算。

[0016] 优选地,步骤三中,建立的适应度评价函数如下:

$$[0017] \min_{x \in X} f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x), \dots, f_p(x))^T, i = 1, 2, 3, \dots, p,$$

[0018] 其中: $x$ 为当前控制参数( $K_p, K_I, K_{FR}$ ), $K_p, K_I$ 和 $K_{FR}$ 分别为比例增益、积分增益和前馈增益; $X$ 为所有待选择控制参数组成的搜索空间, $f_i(x)$ 为交流伺服调速系统包括上升时间、调节时间、超调量等在内的性能指标, $p$ 为性能指标的数量。

[0019] 进一步地,以步骤三中的适应度评价函数作为选择当前最优个体的标准,利用蝙蝠算法在搜索空间 $X$ 内寻找系统的最优控制参数;

[0020] 采用对多目标性能指标进行线性加权求和,上述步骤三中的适应度评价函数具体如下:

$$[0021] f(x) = a \cdot t_r + b \cdot M_p + c \cdot \varepsilon + d \cdot ITAE,$$

[0022] 其中: $a, b, c, d$ 为权重系数,取值范围为 $[0, +\infty)$ ;  $t_r$ 为表征系统响应性能的上升时间, $M_p$ 为表征系统相对稳定性的超调量, $\varepsilon$ 为表征系统控制精度的稳态误差; $ITAE$ 为时间乘绝对误差积分,  $ITAE = \int_0^{t_s} t |\omega_r(t) - \omega(t)| dt$ ,  $t_s$ 为系统的调整时间。

[0023] 进一步地,对上述适应度评价函数进行优化:

$$[0024] f(x) = w_1 \cdot \frac{t_r}{t_{r\max}} + w_2 \cdot \frac{M_p}{M_{p\max}} + w_3 \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} + w_4 \cdot \frac{ITAE}{ITAE_{\max}},$$

[0025] 其中,权重系数 $w_1, w_2, w_3, w_4 \in [0, 1]$ 且 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ ,  $t_{r\max}, M_{p\max}, \varepsilon_{\max}$ 和 $ITAE_{\max}$ 分别为性能指标 $t_r, M_p, \varepsilon$ 和 $ITAE$ 的最大值。

[0026] 优选地,步骤四具体如下:

[0027] 控制参数的选择范围在蝙蝠算法中被看作一群蝙蝠的飞行空间,控制参数被看作蝙蝠个体在空间中飞行的位置,适应度最高的最优参数被看作空间中猎物的位置;蝙蝠个体通过不断改变它的超声波频率、速度和位置搜索猎物,并且当接近猎物时会增强发出超声波脉冲的频度,同时减弱响度,直到某一个蝙蝠达到猎物所在位置。

[0028] 进一步地,蝙蝠算法的具体过程如下:

[0029] 第 $i$ 个蝙蝠个体发出的超声波频率表示为

$$[0030] f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \beta,$$

[0031] 其中: $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 分别是超声波频率的上限和下限, $\beta$ 属于 $[0, 1]$ 的随机向量;

[0032] 同时,第 $i$ 个蝙蝠个体在第 $k$ 次飞行时的速度 $V_i$ 和将要达到的位置 $x_i$ 表示为

$$[0033] \quad V_i^k = V_i^{k-1} + (x_i^k - x_*) \cdot f_i,$$

$$[0034] \quad x_i^k = x_i^{k-1} + V_i^k,$$

[0035] 其中： $x_*$ 为当前种群中适应度最好的蝙蝠个体所处位置；

[0036] 为进一步提高种群的多样性，在蝙蝠个体的速度更新公式中引入随机惯量权重 $\lambda$ ，其表达式为

$$[0037] \quad \lambda = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \cdot \text{rand}() + \sigma \cdot \text{randn}(),$$

[0038] 式中， $\lambda_{\max}$ 和 $\lambda_{\min}$ 分别为随机惯量权重 $\lambda$ 的上限和下限， $\text{rand}()$ 为0到1的随机数， $\sigma$ 为随机惯量权重的均值， $\text{randn}()$ 为0到1的正态分布随机数；

[0039] 改进后的速度更新公式变为

$$[0040] \quad V_i^k = \lambda \cdot V_i^{k-1} + (x_i^k - x_*) \cdot f_i,$$

[0041] 当飞到适应度更高的位置时，蝙蝠个体会通过增强脉冲频度和减弱脉冲响度来表明其正在逼近猎物；频度A和响度r的更新公式为

$$[0042] \quad A_i^{k+1} = \alpha A_i^k,$$

$$[0043] \quad r_i^{k+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma k)],$$

[0044] 式中， $\alpha$ 和 $\gamma$ 分别是频度和响度的缩放因子， $r_i^0$ 是第i个蝙蝠个体的响度初始值。

[0045] 进一步地，当蝙蝠个体逼近猎物时，最优个体 $x_*$ 在其邻域内随机飞行产生新的解 $x_{\text{new}}$ ，其表达式如下：

$$[0046] \quad x_{\text{new}} = x_* + (2 \cdot \text{rand}() - 1) \cdot H,$$

[0047] 式中，H为最优解的邻域。

[0048] 优选地，将经过蝙蝠算法寻优获得的最佳控制参数应用到交流伺服调速系统中，测试其时域暂态响应性能和频率响应性能；若符合当前系统的性能要求和用户的需求偏好，则完成最终的搜索；否则，重新设定适应度评价函数，进行新一轮的参数寻优。

[0049] 本发明中，蝙蝠算法在预先设定好的搜索空间内，随机生成一定数目的蝙蝠种群，根据超声波频率、速度、位置、频度和响度更新公式确定的飞行机制在空间内飞行，利用基于多种性能指标构成的适应度评价函数评估每个蝙蝠个体位置的适应度，引导蝙蝠飞向适应度最高的区域，从而获得满足伺服系统多目标性能最优的控制参数。

[0050] 与现有技术相比，本发明的有益效果是：

[0051] (1) 对交流伺服调速系统多目标性能指标进行线性加权求和得到的适应度评价函数，兼顾了系统的响应速度、稳态精度和鲁棒性等性能需求；通过调节权重系数，使控制参数的选择更加灵活，可满足不同工况和性能偏好下的要求。

[0052] (2) 蝙蝠算法在适应度评价函数的约束下，能够自动搜索满足特定性能需求的最优控制参数，操作简单，且算法收敛速度快，收敛精度高。

[0053] (3) 本发明是一种基于数据驱动的控制参数自整定方法，依靠对系统的阶跃响应测试数据即可完成参数整定，避免了非线性系统复杂耗时的辨识过程和未建模动态对控制参数精度的影响，对复杂非线性系统有良好的适应性。

[0054] (4) 本发明所提出的基于蝙蝠算法的控制参数多目标自整定方法不仅适应于交流伺服系统速度控制参数的整定，还可适应于位置控制器参数的整定。

## 附图说明

[0055] 图1是本发明实施例所提供的一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法的流程图。

[0056] 图2是本发明实施例中交流伺服调速系统的控制结构图。

[0057] 图3是本发明实施例中蝙蝠算法的流程图。

## 具体实施方式

[0058] 下面结合附图以及具体实施例来详细说明本发明,其中的具体实施例以及说明仅用来解释本发明,但并不作为对本发明的限定。

[0059] 实施例

[0060] 一种基于蝙蝠算法的交流伺服调速系统控制参数自整定方法,主要分为以下几个步骤,其算法流程图如图1所示。

[0061] 步骤1:设置控制参数搜索空间。

[0062] 工业应用中,交流伺服调速系统采用如图2所示的双闭环级联控制结构,内层为电流环,包括电流PI控制器、功率转换器、电机和传感器等,外层为速度环,包括速度调节器和内部电流环模块。内部电流环的作用主要是快速响应电流指令信号,通过功率转换器驱动电机运转,其参数主要受各元器件的电磁参数影响。因此,电流环控制器一般在出厂前,由厂商调整确定。速度调节器一方面将速度信号转为稳定可靠的电流指令,保证其电机的速度反馈能够快速稳定跟踪速度指令输入,另一方面要削弱外界扰动对系统的影响,提高伺服驱动系统抵抗负载扰动性能。根据交流伺服调速系统应用工况的不同,需要设定不同的控制参数,因此本发明主要是针对交流伺服调速系统的速度环控制器参数的调节。

[0063] 本实施例中采用的速度环控制器为伪微分反馈与前馈控制策略(PDFF, Pseudo Derivative Feedback with Feedforward),相对于传统的PI控制器,引入了前馈增益系数,提高控制器的响应性能和鲁棒性。PDFF控制结构如图2所示,控制算法如下:

$$[0064] \quad I_{cmd} = K_p \left( \frac{K_I}{s} (\omega_r - \omega) + K_{FR} \bullet \omega_r - \omega \right) \quad (1)$$

[0065] 式(1)中,  $I_{cmd}$  表示速度控制器的输出,即电流控制器的输入指令;  $K_p$ 、 $K_I$  和  $K_{FR}$  分别为比例增益、积分增益和前馈增益,  $\omega_r$  和  $\omega$  分别为指令速度和反馈速度。传统的PI控制参数整定策略不适用于PDFF控制参数的整定,特别是前馈增益系统缺乏系统有效的整定方法。本发明采用基于蝙蝠算法的控制参数自整定方法对PDFF控制器进行自动优化,确定寻优参数向量  $x = [K_p, K_I, K_{FR}]$ 。

[0066] 当前交流伺服调速系统需要整定的控制参数有比例增益  $K_p$ 、积分增益  $K_I$  和前馈增益  $K_{FR}$  三个参数,根据所使用驱动器对三者标定的取值范围,可确定相应的控制参数三维搜索空间。本实施例中,控制参数三维搜索空间由  $K_p$  轴(范围:[2, 1000])、 $K_I$  轴(范围:[1, 1000]) 和  $K_{FR}$  轴(范围:[0, 1]) 所确定的区域构成。

[0067] 步骤2:建立适应度评价函数,初始化相关参数。

[0068] 本实施例中的交流伺服调速系统应用于柔性摆臂系统,要求在兼顾系统响应性能的同时,增强系统的稳定性,保证速度的跟踪精度,对系统的综合性能提出了较高要求。基于线性加权和法对系统多种性能指标进行综合,从而建立相应的适应度评价函数,其函数

表达式如下所示：

$$[0069] \quad f(x) = w_1 \cdot \frac{t_r}{t_{r\max}} + w_2 \cdot \frac{M_p}{M_{p\max}} + w_3 \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} + w_4 \cdot \frac{ITAE}{ITAE_{\max}} \quad (2)$$

[0070] 根据本实施例中系统要求,可设定相应的性能指标权重 $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 和 $w_4$ 分别为0.1、0.4、0.2和0.3。各系统指标的极值可通过对当前系统进行简单的阶跃响应测试获得,也可根据用户或系统需求预先设定。在寻优过程中,若出现使得某一性能指标超出极值的控制参数,则此参数应当被舍弃,即将其适应度标记为最差值。

[0071] 在实际应用时,需要对系统进行固定采样时长的阶跃响应测试,从而获得适应度评价函数中各性能指标的值。

[0072] 步骤3:运行蝙蝠算法对控制参数进行自动寻优。

[0073] 在步骤1确定的搜索空间内,随机生成一组种群数量为N的蝙蝠。以空间中蝙蝠所处的位置作为待搜索的参数,则猎物所处的未知位置为理论上的全局最优参数。实际寻优过程,通过不断的迭代,蝙蝠飞向猎物,即不断逼近全局最优点。以步骤2确定的适应度评价函数来评估每个蝙蝠个体距离猎物的远近,其取值越低表示离猎物越近,选择距离猎物最近的蝙蝠个体所处位置作为当前的全局最优点。蝙蝠算法的流程图如图3所示,具体实现步骤如下:

[0074] 1) 初始化蝙蝠算法的相关参数。其中,最大迭代次数为M,超声波频率的上限和下限分别为 $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ ,频度和响度的缩放因子分别为 $\alpha$ 和 $\gamma$ ,第i个蝙蝠个体的响度初始值为 $r_i^0$ 和频度初始值为 $A^0$ ,随机惯量权重 $\lambda$ 的上限和下限分别为 $\lambda_{\max}$ 和 $\lambda_{\min}$ 。同时,由 $\text{rand}()$ 表示范围为[0,1]的随机数。

[0075] 2) 随机生成一组蝙蝠种群X,其数量为N,生成公式如下:

$$[0076] \quad X = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \cdot \text{rand}() \quad (3)$$

[0077] 式(3)中, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ , $x_i$ 是第i个蝙蝠个体; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 是搜索空间的上限和下限。

[0078] 3) 将每个蝙蝠个体位置代入交流伺服调速系统中进行阶跃响应测试,利用步骤2中的适应度评价函数对蝙蝠种群X进行排序,选择出当前适应度最好的蝙蝠个体作为当前全局最优参数 $x^*$ 。

[0079] 4) 计算第i个蝙蝠个体发出的超声波频率

$$[0080] \quad f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \beta \quad (4)$$

[0081] 同时计算第i蝙蝠个体的随机惯量权重

$$[0082] \quad \lambda = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \cdot \text{rand}() + \sigma \cdot \text{randn}() \quad (5)$$

[0083] 根据超声波频率和随机惯量权重,利用速度和位置更新公式,更新第i个蝙蝠个体第k次飞行时的速度 $V_i^k$ 和位置 $x_i^k$

$$[0084] \quad V_i^k = \lambda \cdot V_i^{k-1} + (x_i^k - x^*) \cdot f_i \quad (6)$$

$$[0085] \quad x_i^k = x_i^{k-1} + V_i^k \quad (7)$$

[0086] 5) 若随机数大于当前频度,表明可能存在蝙蝠个体极度接近猎物,因此选取当前蝙蝠种群的最优个体 $x^*$ 进行局部寻优。局部寻优通过蝙蝠个体小范围飞行进行,根据如下公式生成最优参数的局部新解 $x_{\text{new}}$ :

[0087] 
$$x_{\text{new}} = x_* + (2 \cdot \text{rand}() - 1) \cdot H \quad (8)$$

[0088] 式(8)中,H为局部范围,在本实施例中,其值表示为 $H = 0.01 \cdot (X_{\max} - X_{\min})$ 。

[0089] 6) 再次生成随机数,若随机数小于当前响度且局部新解 $x_{\text{new}}$ 的适应度优于当前的全局最优解 $x_*$ ,则接受当前局部新解为全局最优解,即 $x_* = x_{\text{new}}$ ,同时更新频度 $A_i^{k+1}$ 和响度 $r_i^{k+1}$ ,更新公式为

[0090] 
$$A_i^{k+1} = \alpha A_i^k \quad (9)$$

[0091] 
$$r_i^{k+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (10)$$

[0092] 7) 在5)中,若随机数小于等于当前频度,则对4)中生成的第i个蝙蝠个体进行适应度判断。若其位置 $x_i^k$ 的适应度优于当前全局最优解 $x_*$ ,则将第i个蝙蝠个体的位置设为新的全局最优解( $x_* = x_i^k$ ),更新脉冲频度和响度。

[0093] 8) 对蝙蝠种群中的N个个体进行4)到7)的操作,更新其新的位置,获取第k次飞行后整个种群中的最优个体。

[0094] 9) 判断迭代次数k是否大于预设最大迭代次数M,若 $k < M$ 则蝙蝠种群继续进行新的飞行探索,否则退出当前寻优过程,输出全局最优蝙蝠个体的位置作为寻优后的最佳控制参数。

[0095] 步骤4:将步骤3中经过蝙蝠算法寻优获得的最佳控制参数应用到交流伺服调速系统中,测试其时域暂态响应性能和频率响应性能。若符合当前柔性摆臂系统的性能要求和用户的需求偏好,则完成最终的搜索;否则,则返回到步骤2,重新设定适应度评价函数,进行新一轮的参数寻优。

[0096] 通过上述步骤最终得到满足要求的控制参数( $K_p, K_I, K_{FR}$ ),实现对交流伺服调速系统控制参数的多目标自整定。整定后的控制参数能够进一步提升速度环PDF控制器的性能,满足交流伺服调速系统对响应性能、稳定性和控制精度的综合需求。

[0097] 在交流伺服调速系统多性能指标约束的情况下,本发明提供了有效的控制参数自整定方法,整定的控制器参数能够很好提供稳定可靠的响应电流和较快的速度响应性能。

[0098] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则范围之内所作的任何修改、等同替换以及改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

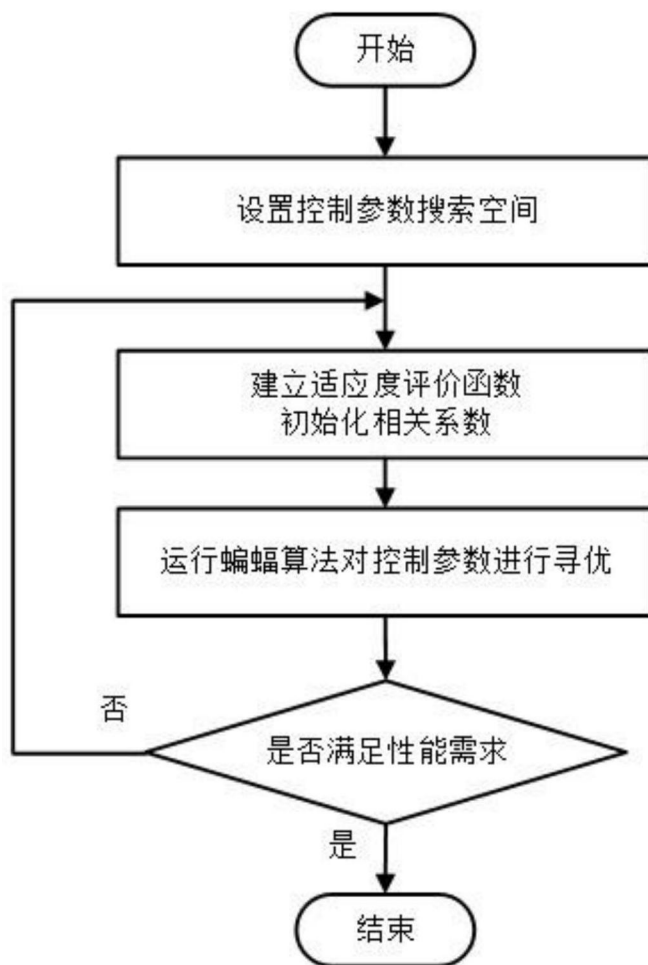


图1

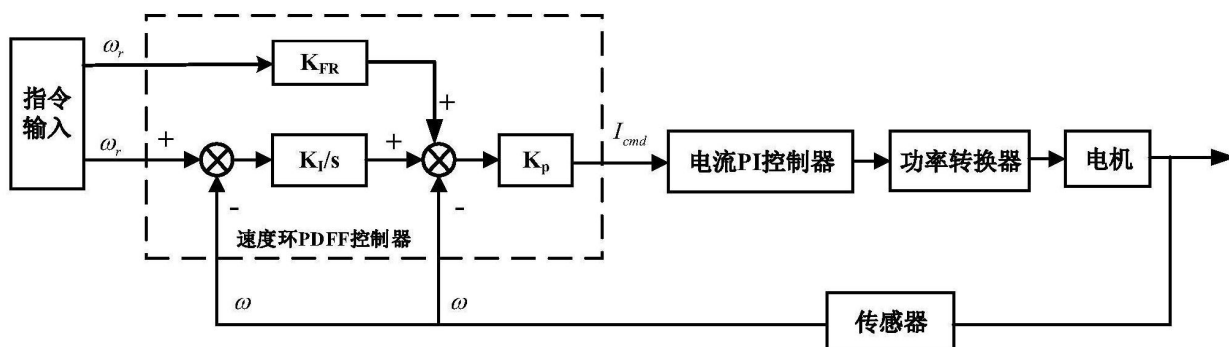


图2

