



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108919639 B

(45) 授权公告日 2021.06.29

(21) 申请号 201810876844.0

(22) 申请日 2018.08.03

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108919639 A

(43) 申请公布日 2018.11.30

(73) 专利权人 佛山科学技术学院
地址 528000 广东省佛山市南海区狮山镇
仙溪水库西路佛山科学技术学院

(72) 发明人 郑伟佳 罗映

(74) 专利代理机构 广州嘉权专利商标事务所有
限公司 44205

代理人 王国标

(51) Int. Cl.
G05B 11/42 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106338913 A, 2017.01.18

CN 105511262 A, 2016.04.20

CN 103558755 A, 2014.02.05

CN 103092069 A, 2013.05.08

CN 103105774 A, 2013.05.15

US 2013211553 A1, 2013.08.15

郑伟佳. 永磁同步电动机分数阶建模与控制研究.《中国博士学位论文全文数据库》.2017,(第2期),C042-45.

审查员 唐捷

权利要求书5页 说明书16页 附图1页

(54) 发明名称

一种PID控制器参数最优比例模型建立方法

(57) 摘要

本发明公开了一种PID控制器参数最优比例模型建立方法, PID控制器的控制模型为

$$C(s) = K_p(1 + \frac{K_I}{s^\lambda} + aK_I s^{b\lambda}), a \text{ 和 } b \text{ 为比例系数}$$

数; 本方法包括: 设置控制系统中被控对象的被控对象; 划分对象模型参数的范围; 设置并划分控制系统的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m ; 设置并划分比例系数 a 和比例系数 b 的取值范围; 计算比例系数 a 和比例系数 b 的最优值; 建立比例系数 a 的估计模型; 建立比例系数 b 的估计模型。本发明提出的利用最优比例系数估计模型设计分数阶PID控制器, 保证控制系统获得良好的鲁棒性的同时使系统达到最优的动态响应性能, 而且只要被控对象的特性参数和系统性能指标在模型指定范围内, 就可以根据模型直接计算出最优的比例系数 a 和 b, 从而使分数阶PID控制器参数整定过程大为简化。

CN 108919639 B



1. 一种PID控制器参数最优比例模型建立方法, PID控制器的控制模型如式3所示:

$$C(s) = K_P \left(1 + \frac{K_I}{s^\lambda} + aK_I s^{b\lambda} \right) \quad \text{式 3}$$

其中a和b为比例系数;

其特征在于, 本方法包括以下步骤:

步骤1, 本模型建立方法针对的永磁同步电机伺服系统的被控对象建立如式4所示的传递函数:

$$G(s) = \frac{K}{s^3 + \tau_1 s^2 + \tau_2 s} \quad \text{式 4}$$

其中 τ_1 、 τ_2 和K是对象模型参数;

步骤2, 根据被控对象的对象模型参数的范围, 在 τ_1 的取值范围内平均选取U个值, 记为 $\tau_{1.1}$ 、 $\tau_{1.2}$ …… $\tau_{1.U}$, 在 τ_2 的取值范围内平均选取L个值, 记为 $\tau_{2.1}$ 、 $\tau_{2.2}$ …… $\tau_{2.L}$, 其中 $U=L$, 将U个 τ_1 的取值以及L个 τ_2 的取值两两组合, 得到 $U*L$ 个组合 $(\tau_{1.U}, \tau_{2.L})$, 将各个组合代入到式4中, 得到 $U*L$ 个被控对象 $G_k(s)$, $k=1, 2, \dots, U*L$;

步骤3, 设置永磁同步电机伺服系统的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m , 在截止频率 ω_c 的取值范围内平均选取r个值, 记为 $\omega_{c.1}$ 、 $\omega_{c.2}$ …… $\omega_{c.r}$, 在相位裕度 φ_m 的取值范围内平均选取t个值, 记为 $\varphi_{m.1}$ 、 $\varphi_{m.2}$ …… $\varphi_{m.t}$, 将r个截止频率 ω_c 的取值以及t个相位裕度 φ_m 的取值两两组合, 得到 $r*t$ 个组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$, 其中 $i=1, 2, 3, \dots, r$, $j=1, 2, 3, \dots, t$;

步骤4, 设置比例系数a和比例系数b的取值范围, 分别记为 $[a_{\min}, a_{\max}]$ 以及 $[b_{\min}, b_{\max}]$, 在比例系数a的取值范围内平均选取P个值, 记为 a_1 、 a_2 …… a_p , 在比例系数b的取值范围内平均选取Q个值, 记为 b_1 、 b_2 …… b_q , 将P个比例系数a和Q个比例系数b两两组合, 得到 $P*Q$ 个组合 (a_p, b_q) , 其中 $p=1, 2, 3, \dots, P$, $q=1, 2, 3, \dots, Q$;

步骤5, 针对各个被控对象 $G_k(s)$, $k=1, 2, 3, \dots, U*L$, 在不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$ 条件下, 计算比例系数a和比例系数b的最优值;

所述步骤5具体包括以下步骤:

步骤5.1, 提取一个被控对象 $G_k(s)$;

步骤5.2, 针对给定的被控对象 $G_k(s)$, 选取不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$ 作为条件;

步骤5.3, 计算PID控制器参数, 得到不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$ 条件下, 根据每个比例系数组合 (a_p, b_q) 计算得到PID控制器的参数;

所述步骤5.3包括以下步骤:

步骤5.3.1, 获取比例系数a和比例系数b不同的组合 (a_p, b_q) ;

步骤5.3.2, 根据式6和式7分别计算被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c.i}$ 处的幅值信息以及相位信息, 式6和式7如下所示;

$$|G(j\omega_{c,i})| = \frac{K}{\sqrt{A(\omega_{c,i})^2 + B(\omega_{c,i})^2}} \quad \text{式 6}$$

$$\text{Arg}[G(j\omega_{c,i})] = -\arctan\left[\frac{B(\omega_{c,i})}{A(\omega_{c,i})}\right] \quad \text{式 7}$$

其中, $A(\omega) = -\tau_1 \omega^2$, $B(\omega) = \tau_2 \omega - \omega^3$;

步骤5.3.3, 根据比例系数a和比例系数b不同的组合 (a_p, b_q) , 列出关于积分增益 K_I 与积分阶次 λ 的两个方程, 分别如式8和式9所示;

$$K_I = \frac{-M}{M\omega_{c,i}^{-\lambda} \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + aM\omega_{c,i}^{b\lambda} \cos\left(\frac{b\lambda\pi}{2}\right) + aN\omega_{c,i}^{b\lambda} \sin\left(\frac{b\lambda\pi}{2}\right) - N\omega_{c,i}^{-\lambda} \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)}$$

式 8

$$Q_2 K_I^2 + Q_1 K_I + Z = 0 \quad \text{式 9}$$

其中式8中 $M = A(\omega_{c,i}) \tan(-\pi + \varphi_{m,j}) + B(\omega_{c,i})$,

$N = B(\omega_{c,i}) \tan(-\pi + \varphi_{m,j}) - A(\omega_{c,i})$, 式9中

$$Q_2 = \frac{a(1+b)\lambda}{\omega_{c,i}^{1+(1-b)\lambda}} \sin\left(\frac{(b+1)\lambda\pi}{2}\right) + 2aZ\omega_{c,i}^{(b-1)\lambda} \cos\left(\frac{(b+1)\lambda\pi}{2}\right) + a^2 Z\omega_{c,i}^{2b\lambda} + Z\omega_{c,i}^{-2\lambda},$$

$$Q_1 = ab\lambda\omega_{c,i}^{b\lambda-1} \sin\left(\frac{b\lambda\pi}{2}\right) + \lambda\omega_{c,i}^{-\lambda-1} \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + 2aZ\omega_{c,i}^{b\lambda} \cos\left(\frac{b\lambda\pi}{2}\right) + 2Z\omega_{c,i}^{-\lambda} \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right),$$

$$Z = \left. \frac{d[\text{Arg}[G(j\omega)]]}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_{c,i}};$$

步骤5.3.4, 根据式8和式9, 求解积分增益 K_I 与积分阶次 λ ;

步骤5.3.5, 根据关系 $K_D = aK_I$, $u = b\lambda$, 求解微分增益 K_D 与微分阶次 u ;

步骤5.3.6, 根据式10计算比例增益 K_P , 式10如下所示;

$$K_P = \frac{\sqrt{A(\omega_{c,i})^2 + B(\omega_{c,i})^2}}{K\sqrt{P(\omega_{c,i})^2 + Q(\omega_{c,i})^2}} \quad \text{式 10}$$

其中 $P(\omega) = 1 + K_I \omega^{-\lambda} \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + K_D \omega^u \cos\left(\frac{u\pi}{2}\right)$,

$Q(\omega) = K_D \omega^u \cos\left(\frac{u\pi}{2}\right) - K_I \omega^{-\lambda} \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)$;

步骤5.4, 以各个PID控制器作为被控对象的反馈控制器, 在MATLAB软件仿真平台上进行控制系统阶跃响应仿真, 得到每个控制系统对应的ITAE值, 计算ITAE值的公式如式5所示;

$$J_{ITAE} = \sum_{z=1}^{N_s} (n_0[z] - n[z])^2 \quad \text{式 5}$$

其中 $n_0[z]$ 表示控制系统输出参考值的第 z 个采样值, $n[z]$ 表示控制系统输出仿真值的第 z 个采样值;

步骤5.5,比较得到的多个ITAE值,选取最小的ITAE值所对应的比例系数 a 和比例系数 b 作为最优值,从而得到不同截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 下最优比例系数 a 和比例系数 b 的取值;

步骤5.6,提取下一个被控对象 $G_k(s)$,重复步骤5.2和步骤5.5,直到对于每个被控对象 $G_k(s)$,得到对应不同截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 下最优比例系数 a 和比例系数 b 的取值;

步骤6,建立比例系数 a 的估计模型;

步骤6具体包括以下步骤:

步骤6.1,设置比例系数 a 的估计模型,比例系数 a 的估计模型如式11所示;

$$a = (M\varphi_{m0} + N)\varphi_m + C\varphi_0(\omega_c) + E\omega_c + F \quad \text{式 11}$$

φ_{m0} 为被控对象 $G_k(s)$ 在给定的截止频率范围内的相位裕度平均值;

步骤6.2,计算参数 M 以及参数 N ;

步骤6.3,计算参数 C ;

步骤6.4,计算参数 E 以及参数 F ;

步骤7,建立比例系数 b 的估计模型;

步骤7具体包括以下步骤:

步骤7.1,设置比例系数 b 的估计模型,比例系数 b 的估计模型如式13所示;

$$b = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c) + R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T \quad \text{式 13}$$

$\varphi_0(\omega_c)$ 为被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 处的相位裕度;

步骤7.2,求解参数 H 、参数 K 以及参数 ϕ ;

步骤7.3,求解参数 R 以及参数 T 。

2.根据权利要求1所述的一种PID控制器参数最优比例模型建立方法,其特征在于,

步骤6.2具体包括以下步骤:

步骤6.2.1,针对各个被控对象 $G_k(s)$,分别获取在各个不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下,比例系数 a 的最优值,记为 $a_{i,j,k}$;

步骤6.2.2,以线性函数 $a = X\varphi_m + Y$ 作为模型,以步骤6.2.1所获取的多个比例系数 a 的最优值 $a_{i,j,k}$ 作为输出值,以相位裕度 φ_m 作为输入值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每个被控对象 $G_k(s)$ 每一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下参数 X 和参数 Y 的值,记为 $(X_{i,k}, Y_{i,k})$;

步骤6.2.3,针对各个被控对象 $G_k(s)$,对所有截止频率 $\omega_{c,i}$ 对应的参数 X 的值: $X_{1,k}, X_{2,k} \cdots X_{r,k}$ 求取平均值,记为 X_k ;

步骤6.2.4,对于每个截止频率 $\omega_{c,i}$,通过式12计算每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度 $\varphi_{0,k}(\omega_{c,1}), \varphi_{0,k}(\omega_{c,2}) \cdots \varphi_{0,k}(\omega_{c,r})$,式12如下所示:

$$\varphi_{0,k}(\omega_{c,i}) = \text{Arg}[(G_k(j\omega_{c,i}))] + 180^\circ \quad \text{式 12}$$

其中 $\text{Arg}[(G_k(j\omega_{c,i}))]$ 表示被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位,再由每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度求得每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 范围内相位裕度的平均值 $\varphi_{m0,k}$;

步骤6.2.5,以线性函数 $X = M\varphi_{m0} + N$ 作为模型,以被控对象 $G_k(s)$ 在不同的截止频率 $\omega_{c,i}$ 下多个参数 X 的平均值 X_k 作为输出值,以被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 范围内相位裕度的平均值 $\varphi_{m0,k}$ 作为输入值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到参数 M 和参数 N 的值;

步骤6.3具体包括以下步骤:

步骤6.3.1,以线性函数 $Y = C\varphi_0(\omega_c) + D$ 作为模型,以步骤6.2.2得到的不同截止频率参数 $\omega_{c,i}$ 下所有被控对象 $G_k(s)$ 对应的 Y 的值 $Y_{i,1}, Y_{i,2}, \dots, Y_{i,U*L}$ 作为输出值,以步骤6.2.4得到的每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度 $\varphi_{0,1}(\omega_{c,i}), \varphi_{0,2}(\omega_{c,i}), \dots, \varphi_{0,U*L}(\omega_{c,i})$ 作为输入值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下参数 C 以及参数 D 的值 $(C_i, D_i), i=1, 2, \dots, r$;

步骤6.3.2,求出各个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下参数 C 的值: C_1, C_2, \dots, C_r 平均值,以此作为参数 C 的最终值;

步骤6.4中以线性函数 $D = E\omega_c + F$ 作为模型,以各个截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入值,以步骤6.3.1中参数 D_i 作为输出值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到参数 E 以及参数 F 的值。

3.根据权利要求1所述的一种PID控制器参数最优比例模型建立方法,其特征在于,

步骤7.2具体包括以下步骤:

步骤7.2.1,针对各个被控对象 $G_k(s)$,分别获取在各个不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下,比例系数 b 的最优值,记为 $b_{i,j,k}$;

步骤7.2.2,针对同一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 以及被控对象 $G_k(s)$,对取不同相位裕度 $\varphi_{m,j}$ 所对应的比例系数 b 的最优值 $b_{i,1,k}, b_{i,2,k}, \dots, b_{i,s,k}$ 求取平均值,以其作为不同被控对象 $G_k(s)$ 对应截止频率 $\omega_{c,i}$ 下比例系数 b 的最优值 $b_{i,k}$;

步骤7.2.3,以线性函数 $b = A\varphi_0(\omega_c) + B$ 作为模型,在同一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下,以各个被控对象 $G_k(s)$ 的相位裕度 $\varphi_{0,k}(\omega_{c,i})$ 作为输入值,以步骤7.2.2中求得的不同被控对象 $G_k(s)$ 所对应的比例系数 b 的最优值 $b_{i,k}$ 作为输出值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下,参数 A 以及参数 B 的值 $(A_i, B_i), i=1, 2, \dots, r$;

步骤7.2.4,以各截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入: $[\omega_{c,1}, \omega_{c,2}, \dots, \omega_{c,r}]$,以对应不同截止频率的 A 值作为输出: $[A_1, A_2, \dots, A_r]$,以函数 $A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 作为模型,估算参数 ϕ 的取值范围 $[\phi_{\min}, \phi_{\max}]$,将参数 ϕ 的取值范围平均分成 S 份,得到一组参数 ϕ 的取值,记为 $[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_S]$;

步骤7.2.5,将 ϕ 的每个取值 $\phi_l, l=1,2,\dots,S$,将其代入模型 $A=[H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\phi_0(\omega_c)$ 中,再将每组 $(\omega_{c,i}, A_i)$ 值代入模型 $A=[H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\phi_0(\omega_c)$ 中,得到如式14所示的方程组:

$$\begin{aligned} H \log_{10}(\omega_{c,1} + \phi_l) + K &= A_1 \\ &\vdots \\ H \log_{10}(\omega_{c,r} + \phi_l) + K &= A_r \end{aligned} \quad \text{式 14}$$

利用最小二乘法求解对应的每个参数 ϕ_l 的参数H和参数K的值,记为 (H_l, K_l) ;

步骤7.2.6,将步骤7.2.5求得的对每个参数 ϕ_l 的参数 H_l 和参数 K_l 的值代入到函数 $A=[H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\phi_0(\omega_c)$ 中,计算得到对应不同截止频率 $\omega_{c,i}$ 的参数A的预测值,记为 $[\tilde{A}_{1,l}, \tilde{A}_{2,l}, \dots, \tilde{A}_{i,l}]$,根据步骤7.2.3得到的参数A的实际值,通过式15计算参数A的拟合误差,得到每个参数 ϕ_l 所对应的参数A的拟合误差 J_l ;

$$J_l = \sum_{i=1}^m (A_{i,l} - \tilde{A}_{i,l})^2 \quad \text{式 15}$$

步骤7.2.7,以最小的拟合误差所对应的参数 ϕ 、参数H和参数K作为比例系数b的估计模型的模型参数;

步骤7.3具体包括以下步骤:

步骤7.3.1,以函数 $B=R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T$ 作为模型,以截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入值,以每个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下对应参数B作为输出值,将步骤7.2.7中得到的参数 ϕ 代入到函数 $B=R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T$ 中,得到如式16所示的方程中;

$$\begin{aligned} R \log_{10}(\omega_{c,1} + \phi) + T &= B_1 \\ &\vdots \\ R \log_{10}(\omega_{c,r} + \phi) + T &= B_r \end{aligned} \quad \text{式 16}$$

采用最小二乘法求解可得参数R以及参数T的值。

一种PID控制器参数最优比例模型建立方法

技术领域

[0001] 本发明涉及PID控制器技术领域。

背景技术

[0002] 目前,伺服系统广泛使用的是传统的基于输出误差的反馈控制方式,而这种控制方式主要是通过PID控制器实现的,传统的PID控制器的控制模型如式1所示:

$$[0003] \quad C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) \quad \text{式 1}$$

[0004] 其中 K_p 是比例增益, K_I 是积分增益, K_D 是微分增益, s 是拉普拉斯算子。

[0005] 传统PID控制器具有结构简单、容易实现等优点。但是传统的PID控制器的控制模型容易出现超调量过大、调节时间过长等问题,无法满足高性能运动控制系统的性能指标要求。

[0006] 基于上述问题,本领域技术人员对PID控制器的控制模型进行改进,改进后的PID控制器的控制模型如式2所示:

$$[0007] \quad C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^u \right) \quad \text{式 2}$$

[0008] 其中 λ 是积分阶次, u 是微分阶次,已有研究表明,对伺服系统采用分数阶PID控制器能够获得比采用整数阶PID控制器更好的控制性能。但是由于分数阶微积分的物理意义尚不明确,对分数阶次的整定目前尚无普遍认同的原则或方法。因此,对运动控制系统进行分数阶建模和分数阶控制器设计,比采用传统的整数阶模型和控制器对运动控制系统进行建模和控制更加困难。

[0009] 目前分数阶PID控制器的参数整定方法主要分为频域设计法和时域优化算法两类。频域设计法通过指定系统的增益穿越频率和相位裕度,根据鲁棒性准则求解分数阶控制器的参数。时域优化算法根据给定的动态性能指标搜索控制器参数。

[0010] 频域设计法通过指定系统的增益穿越频率和相位裕度,根据鲁棒性准则求解分数阶控制器的参数,得到的分数阶控制器能保证系统对开环增益扰动具有鲁棒性,但现有的频域设计法无法直接用于分数阶PID控制器的设计,而且,由于对增益穿越频率和相位裕度的选取并没有明确的准则或方法,因此,频域设计法无法保证控制系统具有最优的动态响应性能。时域优化算法根据给定的动态性能指标搜索控制器参数,得到的控制器能使系统达到良好的阶跃响应跟随性能,但无法保证系统具有良好的稳定性和对增益扰动的鲁棒性。同时,采用时域优化算法搜索控制器参数需要进行大量的数值计算,不利于实际应用。

[0011] 因此本领域技术人员再次对式2所示的控制模型进行改进,令式2中 $K_D = aK_I$, $u = b\lambda$,其中 a 和 b 为比例系数,重新设定PID控制器的控制模型,如式3所示:

$$[0012] \quad C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_I}{s^\lambda} + aK_I s^{b\lambda} \right) \quad \text{式 3}$$

[0013] 通过建立分数阶PID控制器积分增益 K_I 和微分增益 K_D 之间的比例关系,以及积分阶次 λ 和微分阶次 u 之间的比例关系,降低了分数阶PID控制器参数的自由度,降低了参数整定难度。但是现有技术中比例系数 a 和比例系数 b 的估计模型效果欠佳,导致比例系数 a 和比例系数 b 的设定过程较为繁琐。

发明内容

[0014] 本发明要解决的技术问题是:如何简化比例系数 a 和 b 的设定过程。

[0015] 本发明解决其技术问题的解决方案是:

[0016] 一种PID控制器参数最优比例模型建立方法,PID控制器的控制模型如式3所示:

$$[0017] \quad C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_I}{s^\lambda} + aK_I s^{b\lambda} \right) \quad \text{式 3}$$

[0018] 其中 a 和 b 为比例系数;

[0019] 其特征在于,本方法包括以下步骤:

[0020] 步骤1,本模型建立方法针对的被控对象建立如式4所示的传递函数:

$$[0021] \quad G(s) = \frac{K}{s^3 + \tau_1 s^2 + \tau_2 s} \quad \text{式 4}$$

[0022] 其中 τ_1 、 τ_2 和 K 是对象模型参数;

[0023] 步骤2,根据被控对象的对象模型参数的范围,在 τ_1 的取值范围内平均选取 U 个值,记为 $\tau_{1.1}$ 、 $\tau_{1.2}$ …… $\tau_{1.U}$,在 τ_2 的取值范围内平均选取 L 个值,记为 $\tau_{2.1}$ 、 $\tau_{2.2}$ …… $\tau_{2.L}$,其中 $U=L$,将 U 个 τ_1 的取值以及 L 个 τ_2 的取值两两组合,得到 $U*L$ 个组合 $(\tau_{1.U}, \tau_{2.L})$,将各个组合代入到式4中,得到 $U*L$ 个被控对象 $G_k(s)$, $k=1, 2, \dots, U*L$;

[0024] 步骤3,设置控制系统的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m ,在截止频率 ω_c 的取值范围内平均选取 r 个值,记为 $\omega_{c.1}$ 、 $\omega_{c.2}$ …… $\omega_{c.r}$,在相位裕度 φ_m 的取值范围内平均选取 t 个值,记为 $\varphi_{m.1}$ 、 $\varphi_{m.2}$ …… $\varphi_{m.t}$,将 r 个截止频率 ω_c 的取值以及 t 个相位裕度 φ_m 的取值两两组合,得到 $r*s$ 个组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$,其中 $i=1, 2, 3, \dots, r$, $j=1, 2, 3, \dots, t$;

[0025] 步骤4,设置比例系数 a 和比例系数 b 的取值范围,分别记为 $[a_{\min}, a_{\max}]$ 以及 $[b_{\min}, b_{\max}]$,在比例系数 a 的取值范围内平均选取 P 个值,记为 a_1, a_2, \dots, a_p ,在比例系数 b 的取值范围内平均选取 Q 个值,记为 b_1, b_2, \dots, b_q ,将 P 个比例系数 a 和 Q 个比例系数 b 两两组合,得到 $P*Q$ 个组合 (a_p, b_q) ,其中 $p=1, 2, 3, \dots, P$, $q=1, 2, 3, \dots, Q$;

[0026] 步骤5,针对各个被控对象 $G_k(s)$, $k=1, 2, 3, \dots, U*L$,在不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$ 条件下,计算比例系数 a 和比例系数 b 的最优值;

[0027] 步骤6,建立比例系数 a 的估计模型;

[0028] 步骤7,建立比例系数 b 的估计模型。

[0029] 进一步,所述步骤5具体包括以下步骤:

[0030] 步骤5.1,提取一个被控对象 $G_k(s)$;

[0031] 步骤5.2,针对给定的被控对象 $G_k(s)$,选取不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的

组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 作为条件;

[0032] 步骤5.3, 计算PID控制器参数, 得到不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下, 根据每个比例系数组合 (a_p, b_q) 计算得到PID控制器的参数;

[0033] 步骤5.4, 以各个PID控制器作为被控对象的反馈控制器, 在MATLAB软件仿真平台上进行控制系统阶跃响应仿真, 得到每个控制系统对应的ITAE值, 计算ITAE值的公式如式5所示;

$$[0034] \quad J_{ITAE} = \sum_{z=1}^{N_s} (n_0[z] - n[z])^2 \quad \text{式 5}$$

[0035] 其中 $n_0[z]$ 表示控制系统输出参考值的第 z 个采样值, $n[z]$ 表示控制系统输出仿真的第 z 个采样值;

[0036] 步骤5.5, 比较得到的多个ITAE值, 选取最小的ITAE值所对应的比例系数 a 和比例系数 b 作为最优值, 从而得到不同截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 下最优比例系数 a 和比例系数 b 的取值;

[0037] 步骤5.6, 提取下一个被控对象 $G_k(s)$, 重复步骤5.2和步骤5.5, 直到对于每个被控对象 $G_k(s)$, 得到对应不同截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 下最优比例系数 a 和比例系数 b 的取值。

[0038] 进一步, 所述步骤5.3包括以下步骤:

[0039] 步骤5.3.1, 获取比例系数 a 和比例系数 b 不同的组合 (a_p, b_q) ;

[0040] 步骤5.3.2, 根据式6和式7分别计算被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的幅值信息以及相位信息, 式6和式7如下所示;

$$[0041] \quad |G(j\omega_{c,i})| = \frac{K}{\sqrt{A(\omega_{c,i})^2 + B(\omega_{c,i})^2}} \quad \text{式 6}$$

$$[0042] \quad \text{Arg}|G(j\omega_{c,i})| = -\arctan \left[\frac{B(\omega_{c,i})}{A(\omega_{c,i})} \right] \quad \text{式 7}$$

[0043] 其中, $A(\omega) = -\tau_1 \omega^2$, $B(\omega) = \tau_2 \omega - \omega^3$;

[0044] 步骤5.3.3, 根据比例系数 a 和比例系数 b 不同的组合 (a_p, b_q) , 列出关于积分增益 K_I 与积分阶次 λ 的两个方程, 分别如式8和式9 所示;

$$[0045] \quad K_I = \frac{-M}{M\omega_{c,i}^{-\lambda} \cos(\frac{\lambda\pi}{2}) + aM\omega_{c,i}^{b\lambda} \cos(\frac{b\lambda\pi}{2}) + aN\omega_{c,i}^{b\lambda} \sin(\frac{b\lambda\pi}{2}) - N\omega_{c,i}^{-\lambda} \sin(\frac{\lambda\pi}{2})} \quad \text{式 8}$$

$$[0046] \quad Q_2 K_I^2 + Q_1 K_I + Z = 0 \quad \text{式 9}$$

[0047] 其中式8中 $M = A(\omega_{c,i}) \tan(-\pi + \varphi_{m,j}) + B(\omega_{c,i})$,

$N = B(\omega_{c,i}) \tan(-\pi + \varphi_{m,j}) - A(\omega_{c,i})$, 式9中

$$Q_2 = \frac{a(1+b)\lambda}{\omega_{c,i}^{1+(1-b)\lambda}} \sin\left(\frac{(b+1)\lambda\pi}{2}\right) + 2aZ\omega_{c,i}^{(b-1)\lambda} \cos\left(\frac{(b+1)\lambda\pi}{2}\right) + a^2Z\omega_{c,i}^{2b\lambda} + Z\omega_{c,i}^{-2\lambda},$$

$$Q_1 = ab\lambda\omega_{c,i}^{b\lambda-1} \sin\left(\frac{b\lambda\pi}{2}\right) + \lambda\omega_{c,i}^{-\lambda-1} \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + 2aZ\omega_{c,i}^{b\lambda} \cos\left(\frac{b\lambda\pi}{2}\right) + 2Z\omega_{c,i}^{-\lambda} \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right),$$

$$Z = \left. \frac{d[\text{Arg}[G(j\omega)]]}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_{c,i}};$$

[0048] 步骤5.3.4,根据式8和式9,求解积分增益 K_I 与积分阶次 λ ;

[0049] 步骤5.3.5,根据关系 $K_D = aK_I$, $u = b\lambda$,求解微分增益 K_D 与微分阶次 u ;

[0050] 步骤5.3.6,根据式10计算比例增益 K_P ,式10如下所示;

$$[0051] \quad K_P = \frac{\sqrt{A(\omega_{c,i})^2 + B(\omega_{c,i})^2}}{K\sqrt{P(\omega_{c,i})^2 + Q(\omega_{c,i})^2}} \quad \text{式 10}$$

[0052] 其中 $P(\omega) = 1 + K_I\omega^{-\lambda} \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + K_D\omega^u \cos\left(\frac{u\pi}{2}\right)$,

$$Q(\omega) = K_D\omega^u \cos\left(\frac{u\pi}{2}\right) - K_I\omega^{-\lambda} \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)。$$

[0053] 进一步,步骤6具体包括以下步骤:

[0054] 步骤6.1,设置比例系数 a 的估计模型,比例系数 a 的估计模型如式11所示;

$$[0055] \quad a = (M\varphi_{m0} + N)\varphi_m + C\varphi_0(\omega_c) + E\omega_c + F \quad \text{式 11}$$

[0056] 步骤6.2,计算参数 M 以及参数 N ;

[0057] 步骤6.3,计算参数 C ;

[0058] 步骤6.4,计算参数 E 以及参数 F ;

[0059] 步骤6.2具体包括以下步骤:

[0060] 步骤6.2.1,针对各个被控对象 $G_k(s)$,分别获取在各个不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下,比例系数 a 的最优值,记为 $a_{i,j,k}$;

[0061] 步骤6.2.2,以线性函数 $a = X\varphi_m + Y$ 作为模型,以步骤6.2.1所获取的多个比例系数 a 的最优值 $a_{i,j,k}$ 作为输出值,以相位裕度 φ_m 作为输入值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每个被控对象 $G_k(s)$ 每一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下参数 X 和参数 Y 的值,记为 $(X_{i,k}, Y_{i,k})$;

[0062] 步骤6.2.3,针对各个被控对象 $G_k(s)$,对所有截止频率 $\omega_{c,i}$ 对应的参数 X 的值: $X_{1,k}, X_{2,k}, \dots, X_{r,k}$ 求取平均值,记为 X_k ;

[0063] 步骤6.2.4,对于每个截止频率 $\omega_{c,i}$,通过式12计算每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度 $\varphi_{0,k}(\omega_{c,1}), \varphi_{0,k}(\omega_{c,2}), \dots, \varphi_{0,k}(\omega_{c,r})$,式12如下所示:

$$[0064] \quad \varphi_{0,k}(\omega_{c,i}) = \text{Arg}[(G_k(j\omega_{c,i}))] + 180^\circ \quad \text{式 12}$$

[0065] 其中 $\text{Arg}[(G_k(j\omega_{c,i}))]$ 表示被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位,再由每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度求得每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 范围内

相位裕度的平均值 $\varphi_{m0.k}$ ；

[0066] 步骤6.2.5,以线性函数 $X = M\varphi_{m0} + N$ 作为模型,以被控对象 $G_k(s)$ 在不同的截止频率 $\omega_{c.i}$ 下多个参数 X 的平均值 X_k 作为输出值,以被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 范围内相位裕度的平均值 $\varphi_{m0.k}$ 作为输入值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到参数 M 和参数 N 的值;

[0067] 步骤6.3具体包括以下步骤:

[0068] 步骤6.3.1,以线性函数 $Y = C\varphi_0(\omega_c) + D$ 作为模型,以步骤6.2.2得到的不同截止频率参数 $\omega_{c.i}$ 下所有被控对象 $G_k(s)$ 对应的 Y 的值 $Y_{i.1}, Y_{i.2}, \dots, Y_{i.U*L}$ 作为输出值,以步骤6.2.4得到的每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c.i}$ 处的相位裕度 $\varphi_{0,1}(\omega_{c.i}), \varphi_{0,2}(\omega_{c.i}), \dots, \varphi_{0,U*L}(\omega_{c.i})$ 作为输入值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每一个截止频率 $\omega_{c.i}$ 下参数 C 以及参数 D 的值 $(C_i, D_i), i=1, 2, \dots, r$;

[0069] 步骤6.3.2,求出各个截止频率 $\omega_{c.i}$ 下参数 C 的值: C_1, C_2, \dots, C_r 平均值,以此作为参数 C 的最终值;

[0070] 步骤6.4中以线性函数 $D = E\omega_c + F$ 作为模型,以各个截止频率 $\omega_{c.i}$ 作为输入值,以步骤6.3.1中参数 D_i 作为输出值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到参数 E 以及参数 F 的值。

[0071] 进一步,步骤7具体包括以下步骤:

[0072] 步骤7.1,设置比例系数 b 的估计模型,比例系数 b 的估计模型如式13所示;

$$b = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c) + R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T \quad \text{式 13}$$

[0074] 步骤7.2,求解参数 H 、参数 K 以及参数 ϕ ;

[0075] 步骤7.3,求解参数 R 以及参数 T ;

[0076] 步骤7.2具体包括以下步骤:

[0077] 步骤7.2.1,针对各个被控对象 $G_k(s)$,分别获取在各个不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$ 条件下,比例系数 b 的最优值,记为 $b_{i,j,k}$;

[0078] 步骤7.2.2,针对同一个截止频率 $\omega_{c.i}$ 以及被控对象 $G_k(s)$,对取不同相位裕度 $\varphi_{m.j}$ 所对应的比例系数 b 的最优值 $b_{i,1,k}, b_{i,2,k}, \dots, b_{i,s,k}$ 求取平均值,以其作为不同被控对象 $G_k(s)$ 对应截止频率 $\omega_{c.i}$ 下比例系数 b 的最优值 $b_{i,k}$;

[0079] 步骤7.2.3,以线性函数 $b = A\varphi_0(\omega_c) + B$ 作为模型,在同一个截止频率 $\omega_{c.i}$ 下,以各个被控对象 $G_k(s)$ 的相位裕度 $\varphi_{0,k}(\omega_{c.i})$ 作为输入值,以步骤7.2.2中求得的不同被控对象 $G_k(s)$ 所对应的比例系数 b 的最优值 $b_{i,k}$ 作为输出值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每个截止频率 $\omega_{c.i}$ 下,参数 A 以及参数 B 的值 $(A_i, B_i), i=1, 2, \dots, r$;

[0080] 步骤7.2.4,以各截止频率 $\omega_{c.i}$ 作为输入: $[\omega_{c.1}, \omega_{c.2}, \dots, \omega_{c.r}]$,以对应不同截止频率的 A 值作为输出: $[A_1, A_2, \dots, A_r]$,以函数 $A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 作为模型,估算参数 ϕ 的取值范围 $[\phi_{\min}, \phi_{\max}]$,将参数 ϕ 的取值范围平均分成 S 份,得到一组参数 ϕ 的取值,记为 $[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_S]$;

[0081] 步骤7.2.5,将 ϕ 的每个取值 $\phi_1, 1=1, 2, \dots, S$,将其代入模型

$A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 中,再将每组 $(\omega_{c,i}, A_i)$ 值代入模型

$A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 中,得到如式14所示的方程组:

$$\begin{aligned} H \log_{10}(\omega_{c,1} + \phi_1) + K &= A_1 \\ &\vdots \\ H \log_{10}(\omega_{c,r} + \phi_r) + K &= A_r \end{aligned} \quad \text{式 14}$$

[0083] 利用最小二乘法求解对应的每个参数 ϕ_1 的参数H和参数K的值,记为 (H_1, K_1) ;

[0084] 步骤7.2.6,将步骤7.2.5求得的对应每个参数 ϕ_1 的参数 H_1 和参数 K_1 的值代入到

函数 $A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 中,计算得到对应不同截止频率 $\omega_{c,i}$ 的参数A的

预测值,记为 $[\tilde{A}_{1,l}, \tilde{A}_{2,l}, \dots, \tilde{A}_{i,l}]$,根据步骤7.2.3得到的参数A的实际值,通过式15计算参

数A的拟合误差,得到每个参数 ϕ_1 所对应的参数A的拟合误差 J_1 ;

$$J_1 = \sum_{i=1}^m (A_{i,l} - \tilde{A}_{i,l})^2 \quad \text{式 15}$$

[0086] 步骤7.2.7,以最小的拟合误差所对应的参数 ϕ 、参数H和参数K 作为比例系数b的估计模型的模型参数;

[0087] 步骤7.3具体包括以下步骤:

[0088] 步骤7.3.1,以函数 $B = R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T$ 作为模型,以截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入值,以每个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下对应参数B作为输出值,将步骤7.2.7中得到的参数 ϕ 代入到函数 $B = R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T$ 中,得到如式16所示的方程中;

$$\begin{aligned} R \log_{10}(\omega_{c,1} + \phi) + T &= B_1 \\ &\vdots \\ R \log_{10}(\omega_{c,r} + \phi) + T &= B_r \end{aligned} \quad \text{式 16}$$

[0090] 采用最小二乘法求解可得参数R以及参数T的值。

[0091] 本发明的有益效果是:本发明提出的利用最优比例系数估计模型设计分数阶PID控制器,能够在保证控制系统获得良好的鲁棒性的同时使系统达到最优的动态响应性能,而且,只要被控对象的特性参数和系统性能指标在模型指定范围内,就可以根据模型直接计算出最优的比例系数a和b,从而使分数阶PID控制器参数整定过程大为简化,能够满足实际工程应用的要求。

附图说明

[0092] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单说明。显然,所描述的附图只是本发明的一部分实施例,而不是全部实施例,本领域的技术人员在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他设计方案和附图。

[0093] 图1是本发明的方法流程图。

具体实施方式

[0094] 以下将结合实施例和附图对本发明的构思、具体结构及产生的技术效果进行清楚、完整的描述,以充分地理解本发明的目的、特征和效果。显然,所描述的实施例只是本发明的一部分实施例,而不是全部实施例,基于本发明的实施例,本领域的技术人员在不付出创造性劳动的前提下所获得的其他实施例,均属于本发明保护的范围。

[0095] 参照图1,本发明创造公开了一种PID控制器参数最优比例模型建立方法,PID控制器的控制模型如式3所示:

$$[0096] \quad C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_I}{s^\lambda} + aK_I s^{b\lambda} \right) \quad \text{式 3}$$

[0097] 其中a和b为比例系数;

[0098] 其特征在于,本方法包括以下步骤:

[0099] 步骤1,本模型建立方法针对的被控对象建立如式4所示的传递函数:

$$[0100] \quad G(s) = \frac{K}{s^3 + \tau_1 s^2 + \tau_2 s} \quad \text{式 4}$$

[0101] 其中 τ_1 、 τ_2 和K是对象模型参数;

[0102] 步骤2,根据被控对象的对象模型参数的范围,在 τ_1 的取值范围内平均选取U个值,记为 $\tau_{1.1}$ 、 $\tau_{1.2}$ …… $\tau_{1.U}$,在 τ_2 的取值范围内平均选取L个值,记为 $\tau_{2.1}$ 、 $\tau_{2.2}$ …… $\tau_{2.L}$,其中 $U=L$,将U个 τ_1 的取值以及L个 τ_2 的取值两两组合,得到 $U*L$ 个组合 $(\tau_{1.U}, \tau_{2.L})$,将各个组合代入到式4中,得到 $U*L$ 个被控对象 $G_k(s)$, $k=1, 2, \dots, U*L$;

[0103] 步骤3,设置控制系统的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m ,在截止频率 ω_c 的取值范围内平均选取r个值,记为 $\omega_{c.1}$ 、 $\omega_{c.2}$ …… $\omega_{c.r}$,在相位裕度 φ_m 的取值范围内平均选取t个值,记为 $\varphi_{m.1}$ 、 $\varphi_{m.2}$ …… $\varphi_{m.t}$,将r个截止频率 ω_c 的取值以及t个相位裕度 φ_m 的取值两两组合,得到 $r*s$ 个组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$,其中 $i=1, 2, 3, \dots, r$, $j=1, 2, 3, \dots, t$;

[0104] 步骤4,设置比例系数a和比例系数b的取值范围,分别记为 $[a_{\min}, a_{\max}]$ 以及 $[b_{\min}, b_{\max}]$,在比例系数a的取值范围内平均选取P个值,记为 a_1 、 a_2 …… a_p ,在比例系数b的取值范围内平均选取Q个值,记为 b_1 、 b_2 …… b_q ,将P个比例系数a和Q个比例系数b两两组合,得到 $P*Q$ 个组合 (a_p, b_q) ,其中 $p=1, 2, 3, \dots, P$, $q=1, 2, 3, \dots, Q$;

[0105] 步骤5,针对各个被控对象 $G_k(s)$, $k=1, 2, 3, \dots, U*L$,在不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c.i}, \varphi_{m.j})$ 条件下,计算比例系数a和比例系数b的最优值;

[0106] 步骤6,建立比例系数a的估计模型;

[0107] 步骤7,建立比例系数b的估计模型。

[0108] 具体地,本发明提出的利用最优比例系数估计模型设计分数阶PID控制器,能够在保证控制系统获得良好的鲁棒性的同时使系统达到最优的动态响应性能,而且,只要被控对象的特性参数和系统性能指标在模型指定范围内,就可以根据模型直接计算出最优的

比例系数 a 和 b ,从而使分数阶PID控制器参数整定过程大为简化,能够满足实际工程应用的要求。

[0109] 进一步作为优选的实施方式,本发明创造具体实施方式中,所述步骤5具体包括以下步骤:

[0110] 步骤5.1,提取一个被控对象 $G_k(s)$;

[0111] 步骤5.2,针对给定的被控对象 $G_k(s)$,选取不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 作为条件;

[0112] 步骤5.3,计算PID控制器参数,得到不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下,根据每个比例系数组合 (a_p, b_q) 计算得到PID控制器的参数;

[0113] 步骤5.4,以各个PID控制器作为被控对象的反馈控制器,在MATLAB软件仿真平台上进行控制系统阶跃响应仿真,得到每个控制系统对应的ITAE值,计算ITAE值的公式如式5所示;

$$[0114] \quad J_{ITAE} = \sum_{z=1}^{N_s} (n_0[z] - n[z])^2 \quad \text{式 5}$$

[0115] 其中 $n_0[z]$ 表示控制系统输出参考值的第 z 个采样值, $n[z]$ 表示控制系统输出仿真的第 z 个采样值;

[0116] 步骤5.5,比较得到的多个ITAE值,选取最小的ITAE值所对应的比例系数 a 和比例系数 b 作为最优值,从而得到不同截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 下最优比例系数 a 和比例系数 b 的取值;

[0117] 步骤5.6,提取下一个被控对象 $G_k(s)$,重复步骤5.2和步骤5.5,直到对于每个被控对象 $G_k(s)$,得到对应不同截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 下最优比例系数 a 和比例系数 b 的取值。

[0118] 进一步作为优选的实施方式,本发明创造具体实施方式中,所述步骤5.3包括以下步骤:

[0119] 步骤5.3.1,获取比例系数 a 和比例系数 b 不同的组合 (a_p, b_q) ;

[0120] 步骤5.3.2,根据式6和式7分别计算被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的幅值信息以及相位信息,式6和式7如下所示;

$$[0121] \quad |G(j\omega_{c,i})| = \frac{K}{\sqrt{A(\omega_{c,i})^2 + B(\omega_{c,i})^2}} \quad \text{式 6}$$

$$[0122] \quad \text{Arg}|G(j\omega_{c,i})| = -\arctan \left[\frac{B(\omega_{c,i})}{A(\omega_{c,i})} \right] \quad \text{式 7}$$

[0123] 其中, $A(\omega) = -\tau_1 \omega^2$, $B(\omega) = \tau_2 \omega - \omega^3$;

[0124] 步骤5.3.3,根据比例系数 a 和比例系数 b 不同的组合 (a_p, b_q) ,列出关于积分增益 K_I 与积分阶次 λ 的两个方程,分别如式8和式9 所示;

$$[0125] \quad K_I = \frac{-M}{M\omega_{c,i}^{-\lambda} \cos(\frac{\lambda\pi}{2}) + aM\omega_{c,i}^{b\lambda} \cos(\frac{b\lambda\pi}{2}) + aN\omega_{c,i}^{b\lambda} \sin(\frac{b\lambda\pi}{2}) - N\omega_{c,i}^{-\lambda} \sin(\frac{\lambda\pi}{2})} \quad \text{式 8}$$

$$[0126] \quad Q_2 K_I^2 + Q_1 K_I + Z = 0 \quad \text{式 9}$$

$$[0127] \quad \text{其中式 8 中 } M = A(\omega_{c,i}) \tan(-\pi + \varphi_{m,j}) + B(\omega_{c,i}),$$

$$N = B(\omega_{c,i}) \tan(-\pi + \varphi_{m,j}) - A(\omega_{c,i}), \text{式 9 中}$$

$$Q_2 = \frac{a(1+b)\lambda}{\omega_{c,i}^{1+(1-b)\lambda}} \sin(\frac{(b+1)\lambda\pi}{2}) + 2aZ\omega_{c,i}^{(b-1)\lambda} \cos(\frac{(b+1)\lambda\pi}{2}) + a^2 Z \omega_{c,i}^{2b\lambda} + Z \omega_{c,i}^{-2\lambda},$$

$$Q_1 = ab\lambda\omega_{c,i}^{b\lambda-1} \sin(\frac{b\lambda\pi}{2}) + \lambda\omega_{c,i}^{-\lambda-1} \sin(\frac{\lambda\pi}{2}) + 2aZ\omega_{c,i}^{b\lambda} \cos(\frac{b\lambda\pi}{2}) + 2Z\omega_{c,i}^{-\lambda} \cos(\frac{\lambda\pi}{2}),$$

$$Z = \frac{d[\text{Arg}[G(j\omega)]]}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_{c,i}};$$

[0128] 步骤 5.3.4, 根据式 8 和式 9, 求解积分增益 K_I 与积分阶次 λ ;

[0129] 步骤 5.3.5, 根据关系 $K_D = aK_I$, $u = b\lambda$, 求解微分增益 K_D 与微分阶次 u ;

[0130] 步骤 5.3.6, 根据式 10 计算比例增益 K_P , 式 10 如下所示;

$$[0131] \quad K_P = \frac{\sqrt{A(\omega_{c,i})^2 + B(\omega_{c,i})^2}}{K\sqrt{P(\omega_{c,i})^2 + Q(\omega_{c,i})^2}} \quad \text{式 10}$$

$$[0132] \quad \text{其中 } P(\omega) = 1 + K_I \omega^{-\lambda} \cos(\frac{\lambda\pi}{2}) + K_D \omega^u \cos(\frac{u\pi}{2}),$$

$$Q(\omega) = K_D \omega^u \cos(\frac{u\pi}{2}) - K_I \omega^{-\lambda} \sin(\frac{\lambda\pi}{2}).$$

[0133] 进一步作为优选的实施方式, 本发明创造具体实施方式中, 步骤 6 具体包括以下步骤:

[0134] 步骤 6.1, 设置比例系数 a 的估计模型, 比例系数 a 的估计模型如式 11 所示;

$$[0135] \quad a = (M\varphi_{m0} + N)\varphi_m + C\varphi_0(\omega_c) + E\omega_c + F \quad \text{式 11}$$

[0136] 步骤 6.2, 计算参数 M 以及参数 N ;

[0137] 步骤 6.3, 计算参数 C ;

[0138] 步骤 6.4, 计算参数 E 以及参数 F ;

[0139] 步骤 6.2 具体包括以下步骤:

[0140] 步骤 6.2.1, 针对各个被控对象 $G_k(s)$, 分别获取在各个不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下, 比例系数 a 的最优值, 记为 $a_{i,j,k}$;

[0141] 步骤 6.2.2, 以线性函数 $a = X\varphi_m + Y$ 作为模型, 以步骤 6.2.1 所获取的多个比例系数 a 的最优值 $a_{i,j,k}$ 作为输出值, 以相位裕度 φ_m 作为输入值, 采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合, 得到每个被控对象 $G_k(s)$ 每一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下参数 X 和参数 Y 的值, 记为 $(X_{i,k}, Y_{i,k})$;

[0142] 步骤6.2.3,针对各个被控对象 $G_k(s)$,对所有截止频率 $\omega_{c,i}$ 对应的参数 X 的值: $X_{1,k}, X_{2,k} \dots X_{r,k}$ 求取平均值,记为 X_k ;

[0143] 步骤6.2.4,对于每个截止频率 $\omega_{c,i}$,通过式12计算每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度 $\varphi_{0,k}(\omega_{c,1}), \varphi_{0,k}(\omega_{c,2}) \dots \varphi_{0,k}(\omega_{c,r})$,式12如下所示:

$$[0144] \quad \varphi_{0,k}(\omega_{c,i}) = \text{Arg}[G_k(j\omega_{c,i})] + 180^\circ \quad \text{式 12}$$

[0145] 其中 $\text{Arg}[G_k(j\omega_{c,i})]$ 表示被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位,再由每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度求得每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 范围内相位裕度的平均值 $\varphi_{m0,k}$;

[0146] 步骤6.2.5,以线性函数 $X = M\varphi_{m0} + N$ 作为模型,以被控对象 $G_k(s)$ 在不同的截止频率 $\omega_{c,i}$ 下多个参数 X 的平均值 X_k 作为输出值,以被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 范围内相位裕度的平均值 $\varphi_{m0,k}$ 作为输入值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到参数 M 和参数 N 的值;

[0147] 步骤6.3具体包括以下步骤:

[0148] 步骤6.3.1,以线性函数 $Y = C\varphi_0(\omega_c) + D$ 作为模型,以步骤6.2.2得到的不同截止频率参数 $\omega_{c,i}$ 下所有被控对象 $G_k(s)$ 对应的 Y 的值 $Y_{i,1}, Y_{i,2} \dots Y_{i,U*L}$ 作为输出值,以步骤6.2.4得到的每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度 $\varphi_{0,1}(\omega_{c,i}), \varphi_{0,2}(\omega_{c,i}) \dots \varphi_{0,U*L}(\omega_{c,i})$ 作为输入值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下参数 C 以及参数 D 的值(C_i, D_i), $i=1, 2, \dots, r$;

[0149] 步骤6.3.2,求出各个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下参数 C 的值: $C_1, C_2 \dots C_r$ 平均值,以此作为参数 C 的最终值;

[0150] 步骤6.4中以线性函数 $D = E\omega_c + F$ 作为模型,以各个截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入值,以步骤6.3.1中参数 D_i 作为输出值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到参数 E 以及参数 F 的值。

[0151] 进一步作为优选的实施方式,本发明创造具体实施方式中,步骤7具体包括以下步骤:

[0152] 步骤7.1,设置比例系数 b 的估计模型,比例系数 b 的估计模型如式13所示;

$$[0153] \quad b = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c) + R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T \quad \text{式 13}$$

[0154] 步骤7.2,求解参数 H 、参数 K 以及参数 ϕ ;

[0155] 步骤7.3,求解参数 R 以及参数 T ;

[0156] 步骤7.2具体包括以下步骤:

[0157] 步骤7.2.1,针对各个被控对象 $G_k(s)$,分别获取在各个不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下,比例系数 b 的最优值,记为 $b_{i,j,k}$;

[0158] 步骤7.2.2,针对同一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 以及被控对象 $G_k(s)$,对取不同相位裕度 $\varphi_{m,j}$ 所对应的比例系数 b 的最优值 $b_{i,1,k}, b_{i,2,k} \dots b_{i,s,k}$ 求取平均值,以其作为不同被控对象 $G_k(s)$ 对应截止频率 $\omega_{c,i}$ 下比例系数 b 的最优值 $b_{i,k}$;

[0159] 步骤7.2.3,以线性函数 $b = A\varphi_0(\omega_c) + B$ 作为模型,在同一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下,以各个被控对象 $G_k(s)$ 的相位裕度 $\varphi_{0,k}(\omega_{c,i})$ 作为输入值,以步骤7.2.2中求得的不同被控对象 $G_k(s)$ 所对应的比例系数 b 的最优值 $b_{i,k}$ 作为输出值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下,参数 A 以及参数 B 的值 (A_i, B_i) , $i=1, 2, \dots, r$;

[0160] 步骤7.2.4,以各截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入: $[\omega_{c,1}, \omega_{c,2}, \dots, \omega_{c,r}]$,以对应不同截止频率的 A 值作为输出: $[A_1, A_2, \dots, A_r]$,以函数 $A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 作为模型,估算参数 ϕ 的取值范围 $[\phi_{\min}, \phi_{\max}]$,将参数 ϕ 的取值范围平均分成 S 份,得到一组参数 ϕ 的取值,记为 $[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_S]$;

[0161] 步骤7.2.5,将 ϕ 的每个取值 $\phi_l, l=1, 2, \dots, S$,将其代入模型

$A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 中,再将每组 $(\omega_{c,i}, A_i)$ 值代入模型

$A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 中,得到如式14所示的方程组:

$$\begin{aligned} H \log_{10}(\omega_{c,1} + \phi_l) + K &= A_1 \\ &\vdots \\ H \log_{10}(\omega_{c,r} + \phi_l) + K &= A_r \end{aligned} \quad \text{式 14}$$

[0163] 利用最小二乘法求解对应的每个参数 ϕ_l 的参数 H 和参数 K 的值,记为 (H_l, K_l) ;

[0164] 步骤7.2.6,将步骤7.2.5求得的对应每个参数 ϕ_l 的参数 H_l 和参数 K_l 的值代入到函数 $A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 中,计算得到对应不同截止频率 $\omega_{c,i}$ 的参数 A 的预测值,记为 $[\tilde{A}_{1,l}, \tilde{A}_{2,l}, \dots, \tilde{A}_{i,l}]$,根据步骤7.2.3得到的参数 A 的实际值,通过式15计算参数 A 的拟合误差,得到每个参数 ϕ_l 所对应的参数 A 的拟合误差 J_l ;

$$J_l = \sum_{i=1}^m (A_{i,l} - \tilde{A}_{i,l})^2 \quad \text{式 15}$$

[0166] 步骤7.2.7,以最小的拟合误差所对应的参数 ϕ 、参数 H 和参数 K 作为比例系数 b 的估计模型的模型参数;

[0167] 步骤7.3具体包括以下步骤:

[0168] 步骤7.3.1,以函数 $B = R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T$ 作为模型,以截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入值,以每个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下对应参数 B 作为输出值,将步骤7.2.7中得到的参数 ϕ 代入到函数 $B = R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T$ 中,得到如式16所示的方程中;

$$\begin{aligned} R \log_{10}(\omega_{c,1} + \phi) + T &= B_1 \\ &\vdots \\ R \log_{10}(\omega_{c,r} + \phi) + T &= B_r \end{aligned} \quad \text{式 16}$$

[0170] 采用最小二乘法求解可得参数 R 以及参数 T 的值。

[0171] 为更充分地说明本发明创造所述PID控制器参数最优比例模型建立方法的具体过程,现通过一个应用在永磁同步电机伺服系统的分数阶PID控制器参数整定过程进行说明。

[0172] 假设永磁同步电机伺服系统对象模型参数 $K=3000$, 参数 τ_1 的取值范围为100至140, 参数 τ_2 的取值范围为8000至11000, 把参数 τ_1 取值分成100、120以及140三个值, 把 τ_2 取值分为8000、9500 以及11000三个值, 将参数 τ_1 以及参数 τ_2 两两组合, 得到以下9个被控对象 $G_k(s)$:

$$[0173] \quad G_1(s) = \frac{30000}{s^3 + 100s^2 + 8000s}$$

$$[0174] \quad G_2(s) = \frac{30000}{s^3 + 120s^2 + 8000s}$$

$$[0175] \quad G_3(s) = \frac{30000}{s^3 + 140s^2 + 8000s}$$

$$[0176] \quad G_4(s) = \frac{30000}{s^3 + 100s^2 + 11000s}$$

$$[0177] \quad G_5(s) = \frac{30000}{s^3 + 120s^2 + 11000s}$$

$$[0178] \quad G_6(s) = \frac{30000}{s^3 + 140s^2 + 11000s}$$

$$[0179] \quad G_7(s) = \frac{30000}{s^3 + 100s^2 + 9500s}$$

$$[0180] \quad G_8(s) = \frac{30000}{s^3 + 120s^2 + 9500s}$$

$$[0181] \quad G_9(s) = \frac{30000}{s^3 + 140s^2 + 9500s}$$

[0182] 根据工程设计的一般需要, 设定控制系统的开环截止频率范围为 35~60rad/s, 相位裕度范围45~60deg, 把开环截止频率范围分成35、37、40、45、50、55、60共7个值, 相位裕度范围分成45、50、55、60共4个值, 这两组取值两两组合, 一共得到28个截止频率和相位裕度的取值组合。

[0183] 设定比例系数 a 的取值范围为0.00001~0.002, 比例系数 b 的取值范围为0.7~1.3, 分别在比例系数 a 与比例系数 b 的取值范围内抽取 25, 将这两组取值两两组合, 一共得到625个比例系数 a 和比例系数 b 的取值组合。

[0184] 计算被控对象 $G_1(s)$ 至 $G_9(s)$ 在不同给定的截止频率和相位裕度 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下, 比例系数 a 和比例系数 b 的最优值, 其中被控对象 $G_1(s)$ 在不同给定的截止频率和相位裕度 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下比例系数 a 和比例系数 b 的最优值分别如表1和表2所示。

[0185]

$\omega_c \backslash \varphi_m$	45	50	55	60
35	0.000212	0.000296	0.000416	0.00068
37	0.00023	0.00032	0.000436	0.000566
40	0.00028	0.00036	0.000488	0.000608
45	0.00034	0.00044	0.000536	0.000656
50	0.000392	0.000464	0.000584	0.000732
55	0.000408	0.000512	0.00065	0.000744
60	0.000488	0.000608	0.000664	0.000856

[0186] 表1

[0187]

$\omega_c \backslash \varphi_m$	45	50	55	60
35	1.104	1.088	1.088	1.056
37	1.092	1.092	1.079	1.104
40	1.092	1.092	1.09	1.075
45	1.088	1.104	1.088	1.088
50	1.104	1.104	1.104	1.110
55	1.100	1.114	1.130	1.122
60	1.112	1.133	1.120	1.140

[0188] 表2

[0189] 设置比例系数a的估计模型,比例系数a的估计模型如式11所示;

[0190]
$$a = (M\varphi_{m0} + N)\varphi_m + C\varphi_0(\omega_c) + E\omega_c + F \quad \text{式 11}$$

[0191] 计算参数M以及参数N,以线性函数 $a = X\varphi_m + Y$ 作为模型,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每个被控对象 $G_k(s)$ 每一个截止频率 ω_c 下参数X和参数Y的值。以被控对象 $G_1(s)$ 为例,根据表1中的数据,可得被控对象 $G_1(s)$ 在每一个截止频率 ω_c 下参数X和参数Y的值,如表3所示。

[0192]

ω_c	35	37	40	45	50	55	60
X	0.00003048	0.00002836	0.00002224	0.00002088	0.0000228	0.00002292	0.0000232
Y	-0.0012	-0.0011	-0.0007336	-0.0006032	-0.000654	-0.0006248	-0.000564

[0193] 表3

[0194] 针对各个被控对象 $G_k(s)$,计算在不同的截止频率 ω_c 下多个参数 X的平均值,其中被控对象 $G_1(s)$ 对应参数X的平均值为0.00002411。

[0195] 对于每个截止频率 $\omega_{c,i}$,通过式12计算每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度,再由每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度求得每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 范围内相位裕度的平均值,其中被控对象 $G_1(s)$ 对应不同截止频率 $\omega_{c,i}$ 的相位裕度如表 4所示。

[0196]

$\omega_{c,i}$	35	37	40	45	50	55	60
$\varphi_{m,j}$	62.679	60.840	57.995	53.015	47.726	42.131	36.254

[0197] 表4

[0198] 计算表4中各个 $\varphi_{m,j}$ 的平均值, 各个 $\varphi_{m,j}$ 的平均值为51.520deg。

[0199] 以线性函数 $X = M\varphi_{m0} + N$ 作为模型, 以在不同的截止频率 ω_c 下多个参数X的平均值作为输出值, 以每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 ω_c 范围内相位裕度的平均值作为输入值, 得到9个被控对象模型的相位裕度平均值及相应参数X的平均值如表5所示。

[0200]

传递函数	$G_1(s)$	$G_2(s)$	$G_3(s)$	$G_4(s)$	$G_5(s)$	$G_6(s)$	$G_7(s)$	$G_8(s)$	$G_9(s)$
$\varphi_{m,j}(\text{deg})$	51.520	46.624	42.442	62.216	57.839	53.880	57.620	52.930	48.794
$X(\times 10^{-5})$	2.441	2.890	3.361	1.410	1.815	2.225	1.845	2.311	2.739

[0201] 表5

[0202] 采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合, 得到 $M = -9.846 \times 10^{-7}$, $N = 7.523 \times 10^{-5}$ 。

[0203] 计算式11中参数C, 以线性函数 $Y = C\varphi_0(\omega_c) + D$ 作为模型, 以步骤6.2.2得到的参数Y作为输出值, 以步骤6.2.4得到的每个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i}$ 处的相位裕度作为输入值, 此处与截止频率 $\omega_{c,i} = 35\text{rad/s}$ 为例, 各个被控对象 $G_k(s)$ 在截止频率 $\omega_{c,i} = 35\text{rad/s}$ 时的相位裕度以及对应的参数Y如表6所示。

[0204]

传递函数	$G_1(s)$	$G_2(s)$	$G_3(s)$	$G_4(s)$	$G_5(s)$	$G_6(s)$	$G_7(s)$	$G_8(s)$	$G_9(s)$
$\varphi_{m,j}(\text{deg})$	62.679	58.204	54.124	70.230	66.748	63.376	67.074	63.090	59.368
$X(\times 10^{-5})$	-8.806	-9.894	-10.733	-6.438	-7.535	-8.578	-7.614	-8.855	-9.652

[0205]

[0206] 表6

[0207] 采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合, 得到对应截止频率 $\omega_{c,i}$ 下参数C以及参数D的值, 对应参数C以及参数D的值如表7所示。

[0208]

ω_c	35	37	40	45	50	55	60
$C(\times 10^{-5})$	2.649	2.699	2.691	2.570	2.335	2.078	1.833
$D(\times 10^{-3})$	-2.531	-2.496	-2.391	-2.158	-1.877	-1.604	-1.355

[0209] 表7

[0210] 对表7中的各截止频率 $\omega_{c,i}$ 对应的参数C求平均值得到 $C = 2.408 \times 10^{-5}$ 。

[0211] 以线性函数 $D = E\omega_c + F$ 作为模型, 以表7中各个截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入值, 参数D作为输出值, 采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合, 得到参数E以及参数F的值, $E = 3.196 \times 10^{-5}$, $F = -0.0035$ 。

[0212] 建立比例系数b的估计模型如式13所示：

$$b = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c) + R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T \quad \text{式 13}$$

[0214] 对比例系数b的估计模型的参数H、参数K以及参数φ进行求解,针对各个被控对象 $G_k(s)$,分别获取在各个不同的截止频率 ω_c 以及相位裕度 φ_m 的组合 $(\omega_{c,i}, \varphi_{m,j})$ 条件下,比例系数b的最优值,记为 $b_{i,j,k}$;针对同一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 以及被控对象 $G_k(s)$,求取不同相位裕度 $\varphi_{m,j}$ 所对应的比例系数b的最优值 $b_{i,j,k}$ 的平均值;以被控对象 $G_1(s)$ 为例,被控对象 $G_1(s)$ 在同一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下,不同相位裕度 $\varphi_{m,j}$ 所对应的比例系数b的最优值 $b_{i,j,k}$ 的平均值如表8所示。

[0215]

ω_c	35	37	40	45	50	55	60
b	1.084	1.092	1.087	1.092	1.106	1.117	1.126

[0216] 表8

[0217] 以线性函数 $b = A\varphi_0(\omega_c) + B$ 作为模型,在同一个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下,以各个被控对象 $G_k(s)$ 的相位裕度 φ_m 作为输入值,以不同相位裕度 $\varphi_{m,j}$ 所对应的比例系数b的最优值 $b_{i,j,k}$ 的平均值作为输出值,采用最小二乘法对输入输出数据进行拟合,得到每个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下,参数A以及参数B的值,分别记为 $[A_1 \dots A_i]$ 以及 $[B_1 \dots B_i]$ 。

[0218] 以截止频率 $\omega_{c,i} = 35\text{rad/s}$ 为例,对应的比例系数b的最优值 $b_{i,j,k}$ 的平均值如表9所示。

[0219]

传递函数	$G_1(s)$	$G_2(s)$	$G_3(s)$	$G_4(s)$	$G_5(s)$	$G_6(s)$	$G_7(s)$	$G_8(s)$	$G_9(s)$
$\varphi_{m,j}(\text{deg})$	62.679	58.204	54.124	70.230	66.748	63.376	67.074	63.090	59.368
b	1.086	1.070	1.049	1.137	1.118	1.088	1.110	1.085	1.070

[0220] 表9

[0221] 采用最小二乘法拟合得截止频率 $\omega_{c,i} = 35\text{rad/s}$ 时,参数A为0.0054,参数B为0.753。

[0222] 以函数 $A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K]\varphi_0(\omega_c)$ 作为模型,以不同截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入值,以不同截止频率 $\omega_{c,i}$ 所对应的参数A作为输出值,其中各个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下所对应的参数A和参数B的值如表10所示。

[0223]

ω_c	35	37	40	45	50	55	60
------------	----	----	----	----	----	----	----

[0224]

$A(\times 10^{-3})$	5.366	4.148	2.692	1.236	0.204	-0.894	-1.510
B	0.753	0.835	0.931	1.024	1.094	1.156	1.190

[0225] 表10

[0226] 将参数φ的范围定位为 $[0, 40]$,分为40份,分别代入到函数

$A = [H \log_{10}(\omega_c + \phi) + K] \phi_0(\omega_c)$ 中, 得到比例系数b的估计模型中, 参数 ϕ 为27, 参数H为-0.0111, 参数K为0.0153。

[0227] 计算比例系数b的估计模型中参数X以及参数Y的值, 以函数 $B = R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T$ 作为模型, 以截止频率 $\omega_{c,i}$ 作为输入值, 以每个截止频率 $\omega_{c,i}$ 下对应参数B作为输出值, 将步骤7.2.7中得到的参数 ϕ 代入到函数 $B = R \log_{10}(\omega_c + \phi) + T$ 中, 求解得到比例系数b的估计模型中参数R为0.0709, 参数T为0.127。

[0228] 以上对本发明的较佳实施方式进行了具体说明, 但本发明创造并不限于所述实施例, 熟悉本领域的技术人员在不违背本发明精神的前提下还可作出种种的等同变型或替换, 这些等同的变型或替换均包含在本申请权利要求所限定的范围内。

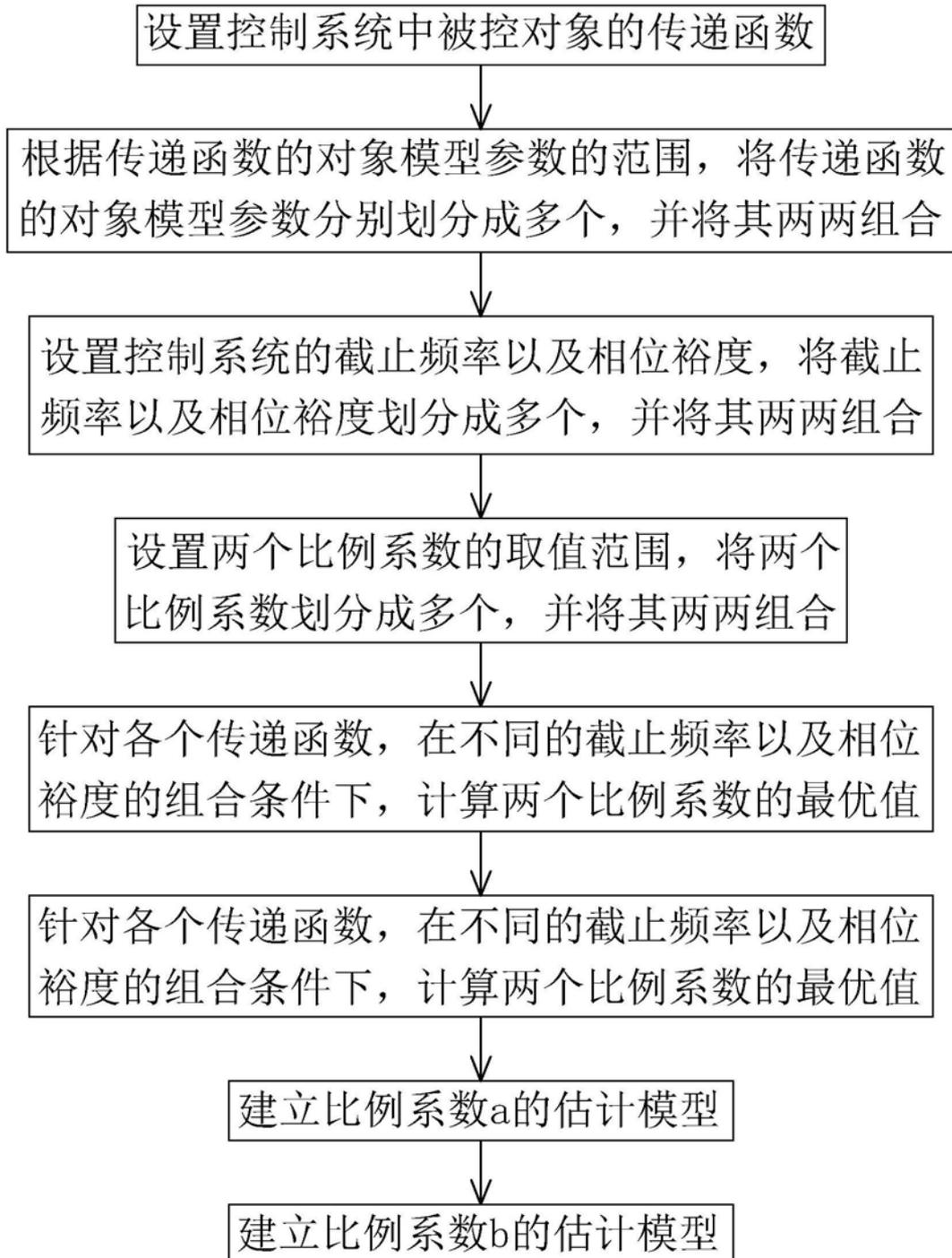


图1