

基于混合编码遗传算法的检验质量 释放模糊PID控制策略

石海琳¹, 纪玉杰¹, 鲁伯林^{2,3}

(1. 沈阳理工大学 机械工程学院, 沈阳 110159; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110169;
3. 辽宁省智能检测与装备技术重点实验室, 沈阳 110169)

摘要: 检验质量作为空间引力波探测的重要检测基准, 要求其被释放机构释放后的残余动量极低, 但实际由于释放机构释放不对称及受外界扰动力的影响, 检验质量会产生一定的加速度与位置偏移, 导致其不易控制。针对上述问题, 提出基于混合编码遗传算法的模糊PID控制策略, 通过混合编码方式的遗传算法优化模糊PID的量化因子与比例因子, 实现检验质量的最优释放控制。联合仿真结果显示: 在 3.5×10^{-3} N的脉冲扰动力作用下, 调节时间缩短至0.06 s, 超调量减小至4.288 9%, 表明了基于混合编码遗传算法的检验质量模糊PID控制器控制精度高、响应速度快、鲁棒性强, 能够显著提高检验质量释放控制系统的动态性能。

关键词: 混合编码; 遗传算法; 模糊控制; 检验质量

中图分类号: TP273+.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.02.007

Fuzzy PID Control of Test Mass Based on Hybrid Encoding Genetic Algorithm

SHI Hailin¹, JI Yujie¹, LU Bolin^{2,3}

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 3. Key Laboratory on Intelligent Detection and Equipment Technology of Liaoning Province, Shenyang 110169, China)

Abstract: As an important test benchmark for space gravitational wave detection, the test mass is required to be very low after being released by the release mechanism. However, in reality, due to the asymmetric release of the release mechanism and the influence of external disturbances, the test mass will generate certain acceleration and position deviation, making it difficult to control. To solve these problems, a fuzzy PID control method based on hybrid coding genetic algorithm is proposed. The quantization factor and scale factor of fuzzy PID are optimized by hybrid coding genetic algorithm to achieve the optimal release control of test mass. The co-simulation results show that under the impulse disturbance force of 3.5×10^{-3} N, the adjustment time is shortened to 0.06 s and the overshoot is reduced to 4.288 9%. Therefore, the fuzzy PID controller based on hybrid coding genetic algorithm has high control precision, fast response speed and strong robustness, which can significantly improve the dynamic performance of the test mass release control system.

Key words: hybrid encoding; genetic algorithm; fuzzy control; test mass

空间引力波探测是观测中低频段引力波的重要方式,通过利用迈克尔逊干涉测量原理、激光干涉仪精密测量引力波引起的光程变化,能够为研究宇宙和黑洞起源与演化、引力本质等提供全新的方法。中国科学院于2016年2月26日正式发布了中国空间引力波探测“太极计划”,规划在2033年前后将发射三颗卫星组成的引力波探测星组,用激光干涉方法实现对中低频波段引力波的直接探测^[1]。

惯性传感器作为空间引力波探测系统的核心载荷,为激光干涉测距系统提供稳定的惯性基准。其中,检验质量(test mass, TM)是惯性传感器中惯性基准的物理载体,充当反光镜发挥作用^[2],在发射阶段要保证其安全可靠地固定在惯性传感器内部,并在入轨后将其释放到轨道空间,并由静电力将其捕获。由于静电力捕获能力有限,且释放过程会有不可控的扰动,要求释放残余动量极低,因此需要对检验质量释放的控制策略进行研究。

从事检验质量精确控制的研究主要有上海交通大学付海清等^[3]及中山大学 Zhang 等^[4]的成果。用于检验质量精确位移控制的控制方法较多,包括自适应控制、滑模控制、模糊控制等。通常模糊控制的控制效果明显,但其在检验质量释放控制方面的应用较少。张森等^[5]针对水温控制系统设计了一款模糊 PID 控制器,相较于常规控制器达到了更好的控制效果。吴泽华等^[6]采用模糊 PID 控制六足轮腿式机器人,其直线运动偏差比普通 PID 更小。Chotikunann 等^[7]提出了一种使用 PID 驱动的数据采集技术和具有平方权的多重多项式回归算法设计模糊逻辑控制器隶属函数的方法。

优化模糊 PID 可以通过量化因子与比例因子的优化展开研究,量化因子与比例因子是将变量从基本论域转换为模糊论域的基础^[8]。但是量化因子、比例因子往往通过试错法得到,无法保证其最优性,且费时费力。遗传算法是一类可用于复杂系统优化的鲁棒搜索算法,具有较强的鲁棒性^[9],通过遗传算法可以解决模糊控制器中量化因子与比例因子的优化问题。待优化参数的不同取值范围适用于不同的遗传算法编码方式,若编码方式选取不当会导致控制效果不理想。因此,本文提出基于混合编码遗传算法的模糊 PID 控制策略进行检验质量的位移控制,在拥有强鲁棒性的基础上,由遗传算法优化其比例因子与量化因子,解决模糊 PID 控制算法响应速度慢、超调量大

等问题,提高控制器的动态性能。

1 惯性传感器系统及数学模型

1.1 惯性传感器原理

惯性传感器结构及原理如图1所示,检验质量金属质量块 TM 位于敏感结构中,与其周围的三对电极板组成三对差分电容器,其中一对差分电容器电容为 C_1 与 C_2 , V_r 为预加载电压, V_b 为方形波高频激励信号,以上均通过导电金属丝施加到检验质量上。当检验质量位移发生变化时,电容 C_1 与 C_2 随之发生变化,前端电子学单元中的电容传感电路检测到该差分电容信号后,经过信号解调与低通滤波进入 PID 控制模块,然后静电驱动电路将反馈电压 V_f 施加到电极板上,通过该电压产生的静电力会将检验质量拉回电极中心位置。

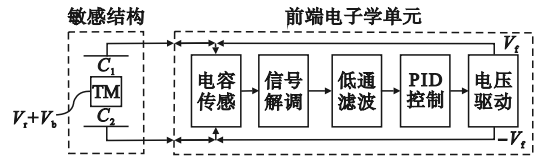


图1 惯性传感器结构及原理

Fig.1 Structure and principle of the inertial sensor

1.2 静电反馈控制系统的数学模型

敏感结构中差分电容器 C_1 与 C_2 计算表达式为

$$C_1 = C_2 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d_0} \quad (1)$$

式中: d_0 为 TM 与电极板之间的初始间隙; S 为电容极板之间的有效面积; ϵ_r 是相对介电常数,其在真空环境中约为 1; ϵ_0 为真空介电常数。

当检验质量位于初始位置时,差分电容 $\Delta C = C_1 - C_2 = 0$,当检验质量发生位移变化 x 时,差分电容为

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d_0 - x} - \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d_0 + x} = 2\epsilon_r \epsilon_0 S \frac{x}{d_0^2 - x^2} \quad (2)$$

实际上 $x \ll d_0$, 上式可简化为

$$\Delta C = 2\epsilon_r \epsilon_0 S \frac{x}{d_0^2} \quad (3)$$

当电压 V 施加在电极板上时会产生静电力,则单个极板产生的静电力 F_e 为

$$F_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r S \left(\frac{V}{d_0} \right)^2 \quad (4)$$

由于惯性力或外部激励的作用,检验质量会

产生微小位移 x , 此时检验质量受到的静电力可以表示为^[10]

$$F_e = F_{e1} - F_{e2} = \frac{1}{2} \varepsilon_r \varepsilon_0 S \left(\frac{V_r + V_f}{d_0 - x} \right)^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_r \varepsilon_0 S \left(\frac{V_r - V_f}{d_0 + x} \right)^2$$

$$= 2 \varepsilon_r \varepsilon_0 S \frac{V_r V_f x^2 + (V_r^2 + V_f^2) d_0 x + V_r V_f d_0^2}{(d_0^2 - x^2)^2} \quad (5)$$

式中: F_{e1} 为上极板产生的静电力; F_{e2} 为下极板产生的静电力。当 $x \ll d_0$ 时, 上式可改写为

$$F_e = 2 \varepsilon_r \varepsilon_0 S \frac{(V_r^2 + V_f^2)}{d_0^3} x + 2 \varepsilon_r \varepsilon_0 S \frac{V_r V_f}{d_0^2} \quad (6)$$

静电力刚度 k_e 可表示为

$$k_e = 2 \varepsilon_r \varepsilon_0 S \frac{(V_r^2 + V_f^2)}{d_0^3} \quad (7)$$

惯性传感器的 TM、静电反馈力和气体阻尼构成了一个经典的弹簧 - 质量 - 阻尼机械系统, 因此, 惯性传感器的静电反馈控制系统动力学方程可以简化为

$$m\ddot{x} + c(\dot{x}) + F_e = F_{out} \quad (8)$$

式中: F_{out} 表示惯性传感器的外部干扰; m 是检验质量的质量; x 是检验质量的位移; c 是气体阻尼系数。气体分子阻尼系数在真空环境中很小, 可以忽略不计^[11]。

因此由公式(6)、(7)、(8)可以得到系统的动力学方程为

$$m\ddot{x} - k_e x = F_{out} - 2 \varepsilon_r \varepsilon_0 S \frac{V_r V_f}{d_0^2} \quad (9)$$

2 模糊 PID 控制器设计

通常情况下模糊 PID 算法可表示为^[12]

$$U = K_p e_j + K_i \sum_{j=1}^N e_j + K_d (e_j - e_{j-1}) \quad (10)$$

式中: U 为 PID 控制器输出; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分项系数; e_j 为当前位置偏差; e_{j-1} 为前一位置偏差; N 为采样总次数。

模糊控制器设计主要分为三部分: 确定控制器输入输出; 确定输入输出变量的模糊论域与量化、比例因子的范围; 确定模糊化与解模糊化方法与模糊规则。模糊系统模型如图 2 所示。图中 K_e 为输入变量误差 e 的量化因子, K_{ec} 为输入变量误差 e 经过 simulink 中的 Derivative 模块求导后得到的误差变化率 ec 的量化因子, K_{up} 、 K_{ui} 、 K_{ud} 分别为变量 K_p 、 K_i 、 K_d 的变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的比例因子。

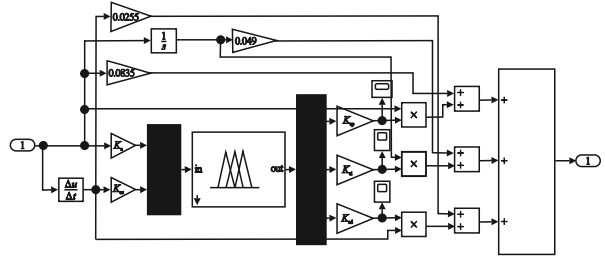


图 2 模糊 PID 控制器系统模型

Fig. 2 System model of the fuzzy PID controller

2.1 确定变量的模糊论域范围与量化、比例因子

设模糊控制器的输入变量为误差 e 与误差变化率 ec , 输出量为 K_p 、 K_i 、 K_d 的变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。输入变量的模糊论域取 $[-6, 6]$, 输出变量的模糊论域取 $[-6, 6]$ 。

误差基本论域为 $[-0.1, 0.1]$ 、模糊论域为 $[-6, 6]$, 误差变换率的基本论域为 $[-6, 6]$ 、模糊论域为 $[-6, 6]$, 输出控制量的基本论域为 $[-0.3, 0.3]$ 、模糊论域为 $[-6, 6]$ 。

则误差量化因子 $K_e = 6/0.1 = 60$, 误差变化率量化因子 $K_{ec} = 6/6 = 1$, 输出控制量比例因子 $K_{up} = K_{ui} = K_{ud} = 0.05$ 。

2.2 确定模糊化与解模糊化方法及模糊规则

模糊化方法: 将 $[-6, 6]$ 内变化的连续量分为七个档次, 每一档次对应一个模糊子集 (表示变量的模糊程度), 取为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, NB 表示负大, NM 表示负中, NS 表示负小, ZE 表示正零, PS 表示正小, PM 表示正中, PB 表示正大。选用三角形与高斯相结合的隶属度函数。

解模糊化方法: 使用“Centroid”法^[13]解模糊化。

模糊规则确立: 每个输出变量都有 49 条模糊控制规则, 设计模糊控制规则如表 1 所示, 图 3 为输入变量误差 e 、误差变化率 ec 分别与三个输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则曲线图, 可以看到输出变量随着两个输入变量的变化而变化。

K_p 、 K_i 、 K_d 三参数实时调整的计算表达式为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + K_{up} \cdot \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + K_{ui} \cdot \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + K_{ud} \cdot \Delta K_d \end{cases} \quad (11)$$

式中 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为模糊控制器的原始值。 K_{up} 、 K_{ui} 、 K_{ud} 用于将模糊控制器输出的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 转换为基本论域内的值。

表1 模糊控制规则表
Table 1 Fuzzy control rule

		e						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ec	NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZE/ZE/NM	ZE/ZE/PS
	NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZE/ZE/NS	NS/ZE/ZE
	NS	PM/NB/ZE	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZE/ZE/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZE
	ZE	PM/NM/ZE	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZE/ZE/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZE
	PS	PS/NM/ZE	PS/NS/ZE	ZE/ZE/ZE	NS/PS/ZE	NS/PS/ZE	NM/PM/ZE	NM/PB/ZE
	PM	PS/ZE/PB	ZE/ZE/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
	PB	ZE/ZE/PB	ZE/ZE/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

注:表中每格数据里有3个模糊控制规则,从左到右分别为 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊控制规则。

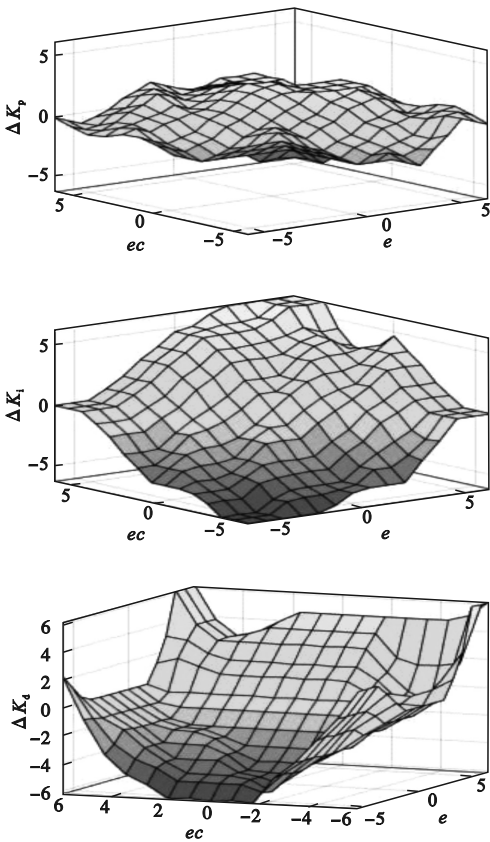


图3 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 模糊曲线图

Fig. 3 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d fuzzy graphs

3 改进的混合编码遗传算法

编码方式的选择是遗传算法优化中首要解决的问题,除了决定个体染色体排列形式之外,还决定个体从搜索空间的基因型变换到解空间表现型时的解码方法,编码方法也影响到交叉算子、变异算子等遗传算子的运算方法。

二进制编码在编码、解码操作简单易行;交叉、变异等遗传操作便于实现,但存在着连续函数

离散化时的映射误差,当个体编码串的长度较短时,可能达不到精度要求。实数编码在遗传算法中能表示范围较大的数,且编码精度较高,便于较大空间的遗传搜索。基于两者的优点,提出二进制与实数混合编码遗传算法,对于模糊PID控制器中的量化因子,其取值范围较大,采用实数编码,而比例因子的取值范围较小,采用二进制编码。

混合编码遗传算法优化模糊PID参数流程如下:首先在Matlab中依靠代码对量化因子与比例因子分别编码,编码完成后通过代码合成原始种群;然后通过assignin函数将待优化的变量赋值并保存在Matlab工作区,实时反馈给SIMULINK模型中,通过sim函数运行SIMULINK模型并读取检验质量位移误差、PID控制器输出值、控制系统输出的上升时间,根据设置的目标函数进行适应度计算;最后通过选择交叉变异操作保留优秀的个体形成下一代种群。随后开启下一次迭代,直到达到设定的迭代次数后终止循环。

3.1 混合编码方法

量化因子 K_e 与 K_{ec} 采用实数编码,比例因子 K_{up} 、 K_{ui} 、 K_{ud} 采用二进制编码。每一个种群个体用 $[K_e, K_{ec}, K_{up}, K_{ui}, K_{ud}]$ 表示,即种群矩阵前两列为量化因子,后三列为比例因子。

混合编码规则为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{mn} = K_{emin} + (K_{emax} - K_{emin}) \cdot \varepsilon, & n=1 \\ \mathbf{E}_{mn} = K_{ecmin} + (K_{ecmax} - K_{ecmin}) \cdot \varepsilon, & n=2 \\ \mathbf{E}_{mn} = \begin{cases} 1, \text{rand}() < 0.5 \\ 0, \text{其他}, \end{cases} & 2 < n \leq L \end{cases} \quad (12)$$

式中: \mathbf{E}_{mn} 为 m 行 n 列的种群编码矩阵; m, n 为整数, $1 \leq m \leq \text{Size}$, $1 \leq n \leq L$, Size 为种群个体总数, L 为个体编码总长度; K_{emin} 、 K_{ecmin} 为 K_e 、 K_{ec} 最小值矩

阵,大小都为 m 行 1 列; $K_{e_{\max}}$ 、 $K_{ec_{\max}}$ 为 K_e 、 K_{ec} 最大值矩阵,大小都为 m 行 1 列; ε 为 $(0,1)$ 范围内的随机数; $\text{rand}()$ 为 $(0,1)$ 区间内均匀分布的随机数。

式(12)表示种群矩阵的前两列通过一个取值范围在 $(0,1)$ 的随机数与量化因子的取值范围相乘得到一个在量化因子取值范围内的随机数,然后与量化因子最小值相加得到不同的量化因子数值,此为实数编码方法;而种群矩阵的第三列到最后一列为比例因子,通过生成一个随机数进行判定,若判定结果小于 0.5,则该位置编码为 1,否则为 0,以此进行二进制编码。

3.2 目标函数选取

本文采用多参数的目标函数,如式(13)所示,在无超调情况下,以检验质量位移偏差作为主要指标,加入 PID 控制器输出值的平方项是为了防止控制能量过大,加权后的上升时间用于提高检验质量位移的响应速度。一旦超调出现,将超调量作为最优指标的一项,加大对位移偏差的控制力度,如式(14)所示。此目标函数可以使控制系统在减小误差、降低能量消耗的同时,考虑到控制输入的时间成本,从而达到系统性能的最佳平衡点。

$$J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt + w_3 \cdot t_{up} \quad (13)$$

如果 $e(t) < 0$,则

$$J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |e(t)|) dt + w_3 \cdot t_{up} \quad (14)$$

式中: J 为目标函数值; t 为仿真时间; $u(t)$ 为 PID 控制器输出值; t_{up} 为控制系统输出的上升时间; w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 为权值,且 $w_4 \gg w_1$,本文取 $w_1 = 0.999$ 、 $w_2 = 0.01$ 、 $w_3 = 2$ 、 $w_4 = 100$ 。

3.3 遗传选择方法

由于确定式采样选择方法可保证适应度较大的一些个体一定能够被保留在下一代群体中,并且操作也比较简单;且经过仿真实验验证后发现采用确定式采样选择方法得到的优化参数比轮盘赌选择法得到的优化参数控制效果好,因此采用确定式采样选择方法。

3.4 遗传交叉策略

实数编码部分采用算术交叉方法,其个体 g 、 q 的交叉算子遵循的交叉规则为

$$\begin{cases} E_g^{k+1} = \alpha E_q^k + (1 - \alpha) E_g^k \\ E_q^{k+1} = \alpha E_g^k + (1 - \alpha) E_q^k \end{cases} \quad (15)$$

式中: E_g^{k+1} 表示第 $k+1$ 代种群中的第 g 个个体; E_g^k 为原种群第 k 代的第 g 个个体; E_q^{k+1} 表示第 $k+1$ 代种群中的第 q 个个体; E_q^k 为原种群第 k 代的第 q 个个体; α 为 $(0,1)$ 范围内的随机数。

二进制编码部分选用单点交叉方法,通过随机数随机选择交叉点位置,如式(16)所示,在此交叉点后的编码互换。

$$v = a + \lfloor \beta \times (L - a + 1) \rfloor \quad (16)$$

式中: v 为交叉点位置; β 为 $(0,1)$ 范围内的随机数; a 为二进制编码初始位置,取值为 3; $\lfloor x \rfloor$ 表示不大于 x 的最大整数。

3.5 遗传变异策略

变异率一般取为 0.000 1 ~ 0.1,本文选取的变异率随着个体适应度值的增大而减小,个体变异率计算公式如下。

实数编码部分个体变异率 $P(h)$ 实数为

$$P(h)_{\text{实数}} = 0.1 - \frac{h \times 0.03}{\text{Size}} \quad (17)$$

二进制编码部分个体变异率 $P(h)$ 二进制为

$$P(h)_{\text{二进制}} = 0.1 - \frac{h \times 0.01}{\text{Size}} \quad (18)$$

式中 h 为种群中个体的顺序号。此操作的前提是已计算出个体适应度值并对其降序排序。

4 仿真实验

4.1 ADAMS 联合仿真

为了更直观地验证控制算法对检验质量位移的控制策略,采用 ADAMS 与 Matlab/SIMULINK 联合仿真方法,通过 ADAMS/control 模块将输入输出变量导出到 Matlab 工作区中,同时将 ADAMS/view 程序建立的敏感结构 ADAMS_SOB 模块直接导入到 SIMULINK 控制回路中,进行控制系统的仿真,验证控制系统的鲁棒性。联合仿真方法结合了 ADAMS 与 Matlab 各自的优点,实现数据实时传输的同时提高了虚拟模型的真实性和直观性^[14-15]。

4.2 控制系统内部关系

整个检验质量位移控制系统内部环环相扣,如图 4 所示。ADAMS 求解系统动力学部分通过输出变量将结果传输到 SIMULINK, SIMULINK 控制系统通过输入变量将结果回传到 ADAMS 中,实现两者数据互通;Matlab 遗传算法更新迭代 SIMULINK 中待优化参数,通过 assignin、sim 函数与 SIMULINK 控制系统实现互联互通,最终构成

检验质量位移控制最优控制系统。

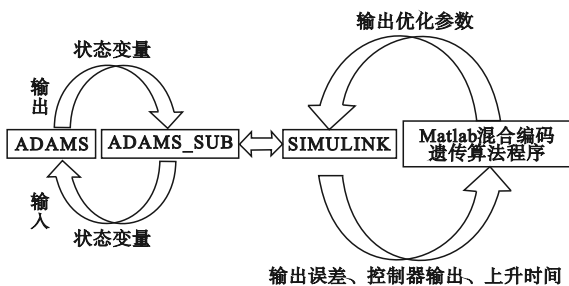


图4 控制系统关系

Fig. 4 Control strategy system relationship

4.3 仿真实验思路

针对检验质量抗扰动效果,设置一组五种控制策略对比实验。实验结束后根据系统输出检验质量的位移变化数据计算超调量、调节时间,判断各控制策略的优劣。

五组控制策略分别为:①普通PID控制;②模糊PID控制;③实数编码遗传算法优化模糊PID控制;④混合编码遗传算法优化模糊PID控制;⑤模型参考自适应控制。

4.3.1 脉冲扰动力设置

检验质量成功释放的考核指标为对检验质量释放的冲量不超过 $1 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 的情况下,检验质量的平移量不超过 $200 \mu\text{m}$,针对该考核指标设定施加的扰动力大小。

将最大冲量指标 $1 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 等效为在 0.01 s 内施加一个 $1 \times 10^{-3} \text{ N}$ 的力,本实验施加的扰动力大小为 $3.5 \times 10^{-3} \text{ N}$,远大于 $1 \times 10^{-3} \text{ N}$,且力的持续时间为 0.01 s 。若在 $3.5 \times 10^{-3} \text{ N}$ 的外力扰动下依然能够成功控制检验质量位移,则证明控制策略有效。

4.3.2 对比实验及结果

实数编码与混合编码遗传算法迭代过程对比如图5所示,目标函数值越小则适应度越大,得到的参数控制效果越好,图中 X 、 Y 为坐标值。

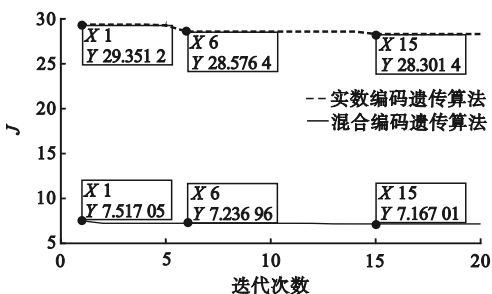


图5 不同编码方式遗传算法迭代效果对比图

Fig. 5 Comparisons of iterative effects of genetic algorithms with different encoding methods

不同控制策略效果对比如图6所示。

经混合编码遗传算法优化后得到的模糊PID参数 k_{up} 、 k_{ui} 、 k_{ud} 、 k_e 、 k_{ec} 为 $[-0.023, 0.0439, 0.0001, -17.0784, -0.0696]$;经实数编码遗传算法优化后得到的模糊PID参数 k_{up} 、 k_{ui} 、 k_{ud} 、 k_e 、 k_{ec} 为 $[-0.0444, 0.0066, 0.0022, -29.7421, 0.0983]$ 。

不同控制策略脉冲扰动力实验数据如表2所示。

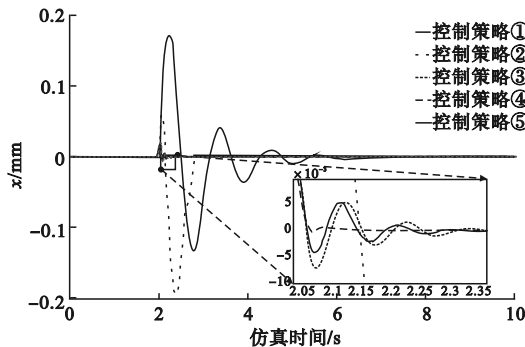


图6 不同控制策略效果对比

Fig. 6 Comparisons of the effects of different control strategies

表2 脉冲扰动力实验数据

Table 2 Pulse disturbance force experimental data

控制策略	调节时间/s	超调量/%
控制策略①	3.35	76.4720
控制策略②	3.01	321.9297
控制策略③	0.15	34.2659
控制策略④	0.06	4.2889
控制策略⑤	0.18	20.5067

从图6可以看出,在外界扰动力作用下四种控制策略成功地将检验质量的位移波动控制在 0.2 mm 内,且控制策略④的波动最小。从表2可以看出:采用控制策略④时系统超调量为 4.2889% ,是四种控制策略中最小的,其次是⑤,两者相差了 19.2178% ;控制策略④的调节时间为 0.06 s ,是四种控制策略中最短的,调节时间最长的是控制策略①,两者相差了 3.29 s 。

综合来看,使用混合编码遗传算法优化的模糊PID控制器时系统抗干扰能力最佳,控制精度最高,有明显优势。

5 结论

本文针对检验质量的位移控制,设计了混合编码遗传算法优化的模糊PID控制器,并针对抗扰动效果与其他三种控制器进行对比。仿真实验结果表明:混合编码遗传算法优化的模糊PID控

制器将调节时间缩短至 0.06 s, 超调量限制到 4.288 9%, 其调节时间和超调量均为最优, 证明其抗干扰能力最佳, 鲁棒性最好, 能够对检验质量实现最优控制。

参考文献 (References):

- [1] CYRANOSKI D. Chinese gravitational-wave hunt hits crunch time[J]. *Nature*, 2016, 531:150–151.
- [2] 齐文. LISA Pathfinder 任务中检验质量释放不对称影响的地面研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
- [3] 付海清, 吴树范, 刘梅林, 等. 基于干扰观测器的空间惯性传感器自适应控制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(10):2799–2806.
- FU H Q, WU S F, LIU M L, et al. Disturbance-observer based adaptive control for space inertial sensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(10):2799–2806. (in Chinese)
- [4] ZHANG J Z, ZHANG Y, TAO W J, et al. Robust control allocation for space inertial sensor under test mass release phase with overcritical conditions[J]. *Sensors*, 2023, 23(6):2881.
- [5] 张森, 李静. 基于模糊 PID 控制器的水温控制系统仿真[J]. *工业控制计算机*, 2019, 32(7):32–33, 38.
- ZHANG S, LI J. Simulation of water temperature control system based on fuzzy-PID controller [J]. *Industrial Control Computer*, 2019, 32(7):32–33, 38. (in Chinese)
- [6] 吴泽华, 张霖, 王玉玉, 等. 基于模糊 PID 的箱梁移动焊接机器人[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2023(9):141–144, 150.
- WU Z H, ZHANG L, WANG B Y, et al. Mobile welding robot for box girder based on fuzzy PID[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2023(9):141–144, 150. (in Chinese)
- [7] CHOTIKUNNAN P, CHOTIKUNNAN R, NIRAPAI A, et al. Optimizing membership function tuning for fuzzy control of robotic manipulators using PID-driven data techniques [J]. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2023, 4(2):128–140.

- [8] DOGRUER T, CAN M S. Design and robustness analysis of fuzzy PID controller for automatic voltage regulator system using genetic algorithm [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2022, 44(9):1862–1873.
- [9] LOTFY A, KAVEH M, MOSAVI M R, et al. An enhanced fuzzy controller based on improved genetic algorithm for speed control of DC motors [J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2020, 105(2):141–155.
- [10] FAN D, LIU Y F, HAN F T, et al. Identification and adjustment of the position and attitude for the electrostatic accelerometer's proof mass[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 187:190–193.
- [11] WANG Y K, QI K Q, WANG S X, et al. Capacitive sensing and electrostatic control system design and analysis with a torsion pendulum[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:1021–1030.
- [12] 李文新, 刘凤丽, 张欣, 等. 热电池电极片自动堆叠控制方法研究[J]. *沈阳理工大学学报*, 2023, 42(2):73–78, 85.
- NING W X, LIU F L, ZHANG X, et al. Research on automatic stacking control method of electrode in thermal cell [J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2023, 42(2):73–78, 85. (in Chinese)
- [13] 高潇, 王庆辉, 薛智慧, 等. PSO-Fuzzy-PID 复合控制器在喉栓调节发动机压强控制中的应用[J]. *推进技术*, 2024, 45(7):274–283.
- GAO X, WANG Q H, XUE Z H, et al. Application of Fuzzy-PID composite controller based on PSO in pintle adjustment engine pressure control [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(7):274–283 (in Chinese)
- [14] CHEN C, SUN Y G, DONG D S, et al. Design of magnetic levitation ball control based on co-simulation of SIMULINK and ADAMS [J]. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2016, 3(3):146–150.
- [15] LIU H T, FANG Y B, BAI B, et al. Co-simulation using ADAMS and SIMULINK for adaptive vibration isolation system with piezoelectric stack actuator [C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, China: IEEE, 2017:3385–3390.

(责任编辑:和晓军)

(上接第 40 页)

- [5] 曾庆化, 罗怡雪, 孙克诚, 等. 视觉及其融合惯性的 SLAM 技术发展综述[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(6):1007–1020.
- ZENG Q H, LUO Y X, SUN K C, et al. Review on SLAM technology development for vision and its fusion of inertial information[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(6):1007–1020. (in Chinese)
- [6] 马艾强, 姚顽强. 煤矿井下移动机器人多传感器自适应融合 SLAM 方法[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(5):107–117.
- MA A Q, YAO W Q. Multi sensor adaptive fusion SLAM method for underground mobile robots in coal mines [J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(5):107–117. (in Chinese)
- [7] LI H L, STUECKLER J. Visual-inertial odometry with online calibration of velocity-control based kinematic motion models [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3):6415–6422.
- [8] ZHAO X Y, LI Q H, WANG C H, et al. Robust depth-aided visual-inertial-wheel odometry for mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(8):9161–9171.
- [9] JUNG J H, CHA J, CHUNG J Y, et al. Monocular visual-iner-

- tial-wheel odometry using low-grade IMU in urban areas[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(2):925–938.
- [10] LIU W L, LI Z X, LI W H, et al. Time delay error online correction of LiDAR-IMU system through MSCKF integrated DLRNN method [J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(3):1878–1890.
- [11] SEOK H, LIM J. ROVINS: robust omnidirectional visual inertial navigation system [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4):6225–6232.
- [12] QIN T, LI P L, SHEN S J. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4):1004–1020.
- [13] CAMPOS C, ELVIRA R, RODRÍGUEZ J J G, et al. ORBSLAM3: an accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6):1874–1890.
- [14] DAI Y, WANG D. A tube model predictive control method for autonomous lateral vehicle control based on sliding mode control [J]. *Sensors*, 2023, 23(8):3844.
- [15] 陈慧岩, 熊光明, 龚建伟, 等. 无人驾驶汽车概论 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.

(责任编辑:宋颖韬)