

基于 PID 算法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制

王征义

(遵义职业技术学院 汽车工程系, 贵州 遵义 563000)

摘要: 针对汽车发动机在怠速状态下存在超调过大以及响应时间慢等问题, 提出一种基于 PID 算法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制方法。分析汽车发动机怠速控制系统的要求, 结合 PID 算法构建燃油汽车发动机怠速跟踪控制器, 同时获取发动机的基本参数以及工作数据。在标准粒子原有搜索策略的基础上加入混沌搜索策略, 通过混沌粒子群算法优化 PID 参数, 将优化后的参数存储到控制器中, 完成 PID 控制器参数的离线整定, 最终实现燃油汽车发动机怠速跟踪控制。经实验测试结果表明: 所提方法可以有效降低跟踪误差以及超调量, 同时还能够减少响应时间。

关键词: PID 算法; 燃油汽车; 发动机; 怠速跟踪控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2023)02-0197-04

Idle Speed Tracking Control of Fuel Vehicle Engine Based on PID Algorithm

WANG Zhengyi

(Department of Automotive Engineering, Zunyi Vocational and Technical College, Zunyi 563000, China)

Abstract: To solve the problems such as excessive overshoot and slow response time of automobile engine in idling state, a PID algorithm-based idle speed tracking control method for fuel automobile engine is proposed. The requirements of the idle speed control system of the automobile engine are analyzed, the engine idle speed tracking controller of the fuel vehicle is constructed by combining the PID algorithm, and the basic parameters and working data of the engine are obtained at the same time. On the basis of the original search strategy of standard particles, the chaotic search strategy is added, the PID parameters are optimized by the chaotic particle swarm algorithm, and the optimized parameters are stored in the controller to complete the offline tuning of the PID controller parameters, and finally the idle tracking control of fuel vehicle engine is realised. The experimental results show that the proposed method can effectively reduce tracking error and overshoot as well as response time.

Keywords: PID algorithm; fuel vehicle; engine; idle tracking control

0 引言

怠速工况是发动机的重要工况之一, 和发动机的排放水平以及能源消耗存在密切的关联。怠速工况下, 由于汽车各个部件以及装置之间的加载是突变的, 各种扰动因素的出现会打破一直处于稳定运行状态的发动机, 使其出现比较明显的波动, 所以确保发动机稳定运行是十分必要的。如何在日益严格的排放法规下, 确保发动机在怠速工况下的稳定运行就显得十分重要。由于发动机经常处于怠速状态, 经过统计发现, 汽车内大约有 30% 的燃料消耗在怠速节点上^[1-2]。所以减少怠速过程中的燃油消耗刻不容缓, 同时也是怠速控制的核心需求。

国内相关专家针对燃油汽车发动机怠速跟踪控制方面的内容展开了大量研究。路颜等^[3]分析了混合动力汽车以及电液泵的组成结构和原理, 以此为依据构建分段控制策略, 采用蓄能器以及所搭建的平台完成汽车自动怠速系统控制。康铭鑫等^[4]通过 Lyapunov 稳定性理论和可测转速信号设计观测器, 同时估算对应的压力取值, 以此为

依据获取发动机实时估计转矩; 引入预测控制算法设计转矩跟踪控制器, 通过控制器完成实时跟踪控制。隗寒冰等^[5]通过基于庞特里亚金极小值原理制定汽车多目标优化控制策略。

在以上几种方法的基础上, 为进一步提升汽车发动机在怠速状态的响应时间, 减小超调量, 本文提出基于 PID 算法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制方法。

1 发动机怠速跟踪 PID 控制器设计

燃油汽车发动机怠速跟踪控制的主要目的是确保燃油形成的转矩以及负荷全部处于平衡状态, 并且在事先设定好的转速范围内活动, 且一直处于这种运行状态, 具有良好的尾气排放功能以及平稳运行功能。为了有效满足燃油汽车发动机怠速跟踪控制需求, 需要通过电子节气门的控制需求分别调整不同类型的负荷运动, 并且展开相关的调整和修正工作, 确保发动机处于正常工作状态, 且一直在设定的区域内活动。

在上述分析的基础上, 引入 PID 算法设计燃油汽车发

动机怠速跟踪控制器^[6]。PID 控制器是目前使用比较广泛的一种控制方法,被应用于不同研究领域内。

基于 PID 的发动机怠速跟踪控制器设计的基本原理是:调节节气门开度 PWM,设定怠速转速 1 000 r/min,测量实际转速,算出偏差,通过怠速跟踪控制转速测量模块给定值 $x(t)$ 和输出值 $e(t)$ 两者共同组成怠速跟踪控制偏差 $p(t)$,对控制偏差展开比例、积分以及微分的调节工作,获取怠速跟踪控制连续的表达形式:

$$k(t) = L_p p(t) + Gx(t) dt + N_d e(t) \quad (1)$$

式中: $k(t)$ 代表怠速跟踪控制连续的表达形式; L_p 代表怠速跟踪控制的参考设定值; G 代表怠速跟踪控制对象的输入值; N_d 代表怠速跟踪控制测量输出值。

对控制器展开离散化处理^[7-8],通过发动机中的温度测量模块控制量完成计算机控制偏差。利用积分以及微分项两者替换初始数值,采用离散点 $b(t)$ 替换怠速跟踪控制的时刻 t ,具体的计算公式为

$$\begin{cases} t \approx b(t) \\ \int_0^t p(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(t) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{dp(t)}{dt} \approx \frac{e(K_t) - e(k-1)}{T} = \frac{e(t) - e(k-1)}{T} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 代表怠速跟踪控制的采样时刻; k 代表怠速跟踪控制的迭代次数; $e(j)$ 代表积分项; $e(k-1)$ 代表控制偏差信号; T 代表控制设定时间段; $e(K_t)$ 代表设定时间段内怠速的采样序列。

离散化处理后的 PID 表达式为

$$f(k) = L_p p(t) + Gx(t) + \frac{e(K_t) - e(k-1)}{dp(t)} \quad (3)$$

式中 $f(k)$ 代表离散化处理的发动机怠速跟踪 PID 控制结果。

由于基于位置的 PID 控制算法是由全部变量输出^[9],得到一个发动机中的 PWM 驱动模块控制增量,把这个增量做个放大化缩小系数,直接给 PWM 的占空比赋值。因此,需要在每个计算结果中加上 $e(j)$ 。另外,如果传感器发生故障时,说明控制偏差的实际位置输出存在比较明显的变化。为了有效避免上述问题的发生,需要采用基于增量位置的 PID 控制算法。采用递归控制的原则可以获取 $k-1$ 的控制变量 $f(k-1)$ 为

$$f(k-1) = L_p p(t) + Gx(t) + \frac{e(k-2) - e(k-1)}{N_d e(t)} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)相减之后,即可获取增量式 PID 控制算法对应的表达形式 $\Delta f(k)$:

$$\Delta f(k) = L_p p(t) - e(k-1) + Gx(t) + \frac{e(k-2) - e(k-1)}{T} \quad (5)$$

将 PID 算法引入到燃油汽车发动机怠速跟踪控制器的过程中,构建一个全新的控制器,详细的操作步骤如下所示。

1) 优先确定模糊控制器的具体组成结构。通过燃油汽车发动机的构成原理,在控制系统的接口内,加入取值不同的输入变量,分别在不同的采样时间内输出一系列采样值,以动态向量为依据,获取控制模型的输出值,同时确定控制器最终的组成结构。

其中 PID 控制器的输出预测值 $y_m(k+N/k)$ 可以表示为式(6)的形式:

$$\begin{cases} y_m(k+1/k) = y_0(k+1/k) + a_1 \Delta u_k \\ y_m(k+2/k) = y_0(k+2/k) + a_2 \Delta u_k \\ y_m(k+3/k) = y_0(k+3/k) + a_3 \Delta u_k \\ \vdots \\ y_m(k+N/k) = y_0(k+N/k) + a_n \Delta u_k \end{cases} \quad (6)$$

式中: N 代表发动机怠速控制动态系数的总数; a_n 代表怠速跟踪控制对象的空间负荷补偿; Δu_k 代表怠速跟踪控制对象的流量补偿范围。

2) 通过式(7)确定变量论域以及量化因子。

$$\begin{cases} u_{\text{lag}} = t_{\text{race}} [x(t) \cdot e(t) \cdot p(t)] \\ v_{\text{lag}} = t_{\text{race}} [x(t) \cdot e(t)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{lag} 代表怠速跟踪控制对象的变量论域; v_{lag} 代表怠速跟踪控制对象量化因子; t_{race} 代表状态怠速跟踪控制对象的取值范围。

3) 设定不同怠速状态下的隶属函数,如式(8)所示。

$$C(z_i) = \frac{t_{\text{race}} [x(t) \cdot e(t) \cdot p(t)]}{L_p p(t) + Gx(t)} \quad (8)$$

式中 $C(z_i)$ 代表隶属函数。

4) 确定推理关系,同时以此为依据构建对应的燃油汽车发动机怠速跟踪控制器。正确的控制器应该基于转矩控制,通过模型估算出怠速的摩擦功,根据其计算出进气量和点火提前角度来修正。通过控制节气门开度、大气压力和水温,来稳定控制怠速在 1 000 r/min 左右。

2 燃油汽车发动机怠速跟踪控制器参数优化

采用粒子群算法(PSO)对燃油汽车发动机怠速跟踪 PID 控制器参数优化,粒子群算法(PSO)由于操作和编程过程简单^[10],需要调整的参数数量较少且寻优效率较高,能够实现控制器参数的高精度优化。

PSO 算法在寻优过程中需要优先在可行解中对粒子初始化处理^[11],使全部粒子可以被均匀分布在设定空间范围内,采用粒子位置、速度以及适应度取值描述粒子的特征,同时通过一定的指标评价现阶段粒子所在位置的优劣。粒子在空间内是按照设定的速度以及规律运行的,以此为依据可以获得评价指标值最优的位置,即全局最优解。

在多次迭代过程中,需要实时更新各个粒子的位置以及速度,同时采用启发式搜索策略,将粒子逐渐聚集到求解全局最优解的附近。图 1 为 PSO 算法的详细操作流程。

通过分析发现,PSO 算法在寻优过程中具有一定的局限性,同时还会出现陷入全局最优解的现象。为了有效避免上述问题的发生,将混沌搜索机制引入到 PSO 算法中,全面增强 PSO 算法对燃油汽车发动机怠速跟踪 PID 控制器参数的全局寻优能力。

混沌运动可以在有限的时间范围内运动,同时运动轨迹不会重新出现在已经通过的混沌区域内。另外,随着迭代次数的持续增加,个体会运动到全局最优位置,在混沌算法的指引下,种群会朝着全局最优位置聚集,最终获取

期望的全局最优解。其中,对应的混沌序列 $X_{m,n}$ 可以表示为式(9)的形式:

$$X_{m,n} = \begin{bmatrix} x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n} \\ x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,n} \\ x_{3,1}, x_{3,2}, \dots, x_{3,n} \\ \vdots \\ x_{m,1}, x_{m,2}, \dots, x_{m,n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $x_{m,n}$ 代表混沌子序列。

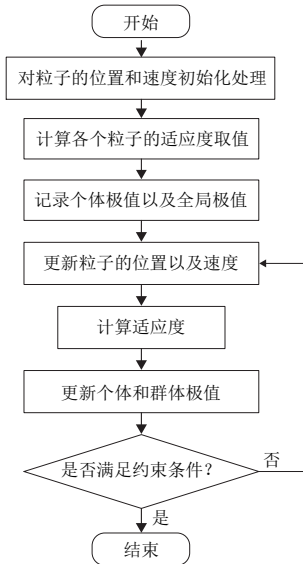


图1 PSO算法的基本操作流程

为了有效避免 PSO 算法在寻优过程中陷入局部最优,需要引入全新的搜索机制,将新旧两种不同的搜索机制有效结合,两者相互完善,形成一种全新的优化算法——混沌 PSO 算法。通过该算法完成 PID 控制器参数优化处理,以下给出详细的操作步骤。

1) 优先确定 3 个不同参数的上下界,确定种群规模,将形成的变量设定为初始种群,确定优化的目标精度以及加速因子等参数。

2) 为了有效评价上文所构建燃油汽车发动机怠速跟踪控制器各个方面的性能,选择最大迭代次数作为系统的目标函数,分别评价每组参数的性能。

3) 粒子经过初始化处理之后,需要将各个粒子直接赋值给燃油汽车发动机怠速跟踪控制器的参数中,同时计算适应度函数 J ,具体的计算公式如下:

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (10)$$

同时记录每一次迭代过程中种群的平均适应度取值。

4) 通过粒子速度更新公式更新粒子的速度,假设获取的计算结果大于种群的平均适应度取值,则继续更新粒子的位置和速度;反之,则需要将粒子对应的 PID 参数代入相关公式中。同时将其映射到对应的区间内,展开混沌映射计算,进而获取控制器参数的取值范围。

5) 重新计算各个粒子的适应度取值以及整个种群中全部粒子的适应度取值。

6) 在完成粒子个体以及全部最优位置更新后,需要将其记录下来。

7) 判断是否满足迭代运算的终止条件,假设是,则直接输出燃油汽车发动机怠速跟踪控制器参数优化结果,同时完成跟踪控制;反之,则返回至步骤 4)。

3 实验结果与分析

为了验证所提基于 PID 算法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制方法的有效性,展开实验测试。实验所采用的燃油汽车发动机型号为涡轮增压 2.0T Si4 发动机,怠速状态下发动机输入信号采用转速 600~700 r/min 的方波信号,采样周期 10 s, PID 算法及 PSO 算法的起始参数如表 1 所示。

表 1 算法参数设置

| 类别 | 参数 | 数值 |
|--------|---------|-----|
| PID 算法 | k_p | 0.1 |
| | k_i | 0.1 |
| | k_d | 0.1 |
| PSO 算法 | 惯性因子 | 1.0 |
| | 学习因子 C1 | 0.5 |
| | 学习因子 C2 | 1.0 |

优先利用图 2 分析 3 种不同方法的基于 PID 算法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制响应曲线变化情况。

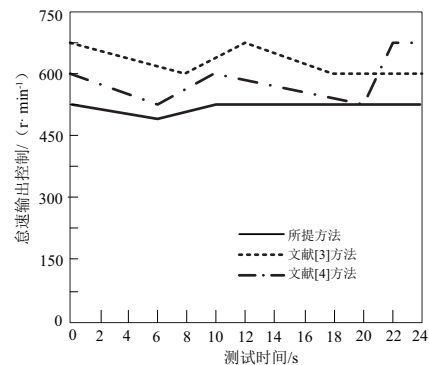


图2 不同方法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制响应曲线测试结果对比

分析图 2 可知,在 3 种控制方法中,所提方法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制响应曲线一直处于比较平稳的状态,而其他方法波动幅度比较明显。

通过图 3 进一步分析 3 种不同方法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制误差变化情况。

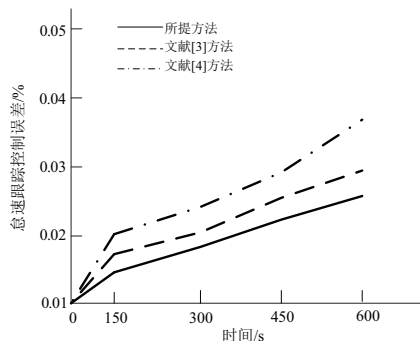


图3 不同方法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制误差测试结果对比分析

由图 3 可知,随着时间的不断增加,各个方法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制误差也在不断发生变化。在 3 种方法中,本文所提方法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制误差明显更低一些,说明所提方法可以获取比较满意的控制效果。

为了进一步验证所提方法的有效性,实验选取超调量作为测试指标,详细的实验测试结果如表 2 所示。

表 2 不同方法的超调量测试结果对比分析

| 测试对象 编号 | 超调量/($r \cdot \min^{-1}$) | | |
|------------|-----------------------------|---------|---------|
| | 所提方法 | 文献[3]方法 | 文献[4]方法 |
| 01 | 8.59 | 20.25 | 24.63 |
| 02 | 10.20 | 24.22 | 28.41 |
| 03 | 13.54 | 28.63 | 34.20 |
| 04 | 11.63 | 26.33 | 36.98 |
| 05 | 7.96 | 19.25 | 40.52 |
| 06 | 8.77 | 21.14 | 45.85 |
| 07 | 9.56 | 22.74 | 46.72 |
| 08 | 10.23 | 25.74 | 48.96 |
| 09 | 11.85 | 26.74 | 50.22 |
| 10 | 12.36 | 25.41 | 51.25 |
| 11 | 14.85 | 30.14 | 53.63 |
| 12 | 13.00 | 32.74 | 55.74 |
| 13 | 12.36 | 27.14 | 56.85 |
| 14 | 10.03 | 25.00 | 56.97 |
| 15 | 9.63 | 23.96 | 57.85 |

由表 2 可知,在测试对象不同的条件下,各个方法所得到的超调量测试结果也存在比较明显的差异。但是与另外 2 种方法相比,所提方法的超调量得到明显降低,全面验证了所提方法的优越性。

在上述实验测试的基础上,选取调节时间作为测试指标,详细的实验测试结果如图 4 所示。

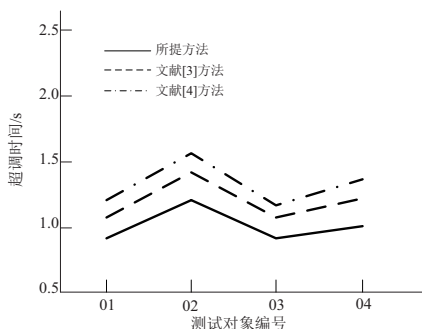


图 4 不同方法的超调时间测试结果对比分析

分析图 4 中的实验数据可知,由于不同方法的操作环节不同,导致最终获取的超调时间结果也存在比较明显的

差异。经过具体对比分析可知,所提方法获取的超调量测试结果明显低于另外 2 种方法,进一步验证了所提方法的有效性和实用性。

4 结语

汽车发动机出现故障,会直接对汽车的舒适性和安全性产生不良影响。在交通拥堵的状态下,汽车常常处于怠速状态,会有一部分燃油被消耗。所以对汽车发动机怠速跟踪控制对提升发动机经济性能具有十分重要的意义。为此,提出一种基于 PID 算法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制方法。经实验测试结果证明,所提方法可以准确完成燃油汽车发动机怠速跟踪控制,同时还能够减少超调量以及发动机启动响应时间。应用该方法能快速检测燃油汽车发动机怠速状态,避免燃油过量消耗,提升发动机的经济环保性。汽油机的转速较高、质量较轻,柴油机需要的马力较大,质量较重。而这两种发动机点火方式不同,但均存在燃油形成的负荷不平衡状态,导致怠速状态下存在超调过大以及响应时间慢等问题,因此本文方法能够适用于这两种发动机。结合 PID 算法构建燃油汽车发动机怠速跟踪控制器,通过混沌粒子群算法优化 PID 参数,实现燃油汽车发动机怠速跟踪控制。

参考文献:

- [1] 展新,许恩永,何水龙. 保险杠动态谐振机理分析和怠速抖动控制研究[J]. 机械科学与技术,2021,40(8):1225-1232.
- [2] 庄远,朱国冬,滕勤. 汽油氢气缸内双喷射发动机控制试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(2):170-174.
- [3] 路颜,高攀科,程光威,等. 液压混合动力汽车自动怠速系统控制策略[J]. 液压与气动,2022,46(1):169-177.
- [4] 康铭鑫,李长平,刘腾飞. 基于观测器的发动机转矩跟踪模型预测控制[J]. 控制与决策,2020,35(4):791-798.
- [5] 隗寒冰,贺少川,陈思意,等. 发动机冷启动阶段插电式柴油混合动力汽车多目标优化控制策略[J]. 机械传动,2020,44(2):28-36.
- [6] 马彦,丁浩,牟洪元,等. 基于模糊 PID 算法的动力电池液体冷却策略[J]. 控制理论与应用,2021,38(5):549-560.
- [7] 余建军,蔡世波,胥芳,等. 基于分数阶 PID 算法的磁流变液柔顺关节控制研究[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(2):393-401.
- [8] 宫鹤,李佳星. 基于蛙跳 PID 算法的温室温湿度控制系统设计[J]. 农机化研究,2021,43(1):186-190.
- [9] 梁新荣,肖龙,王雪奇,等. 高速列车速度跟踪神经网络 PID 控制器的设计[J]. 计算机工程与应用,2021,57(10):252-258.
- [10] 王毅,李晓梦,耿国华,等. 基于直觉模糊熵的混合粒子群优化算法[J]. 电子学报,2021,49(12):2381-2389.
- [11] 陈强,王宇嘉,梁海娜,等. 目标空间映射策略的高维多目标粒子群优化算法[J]. 智能系统学报,2021,16(2):362-370.

收稿日期:2022-06-23