

DOI:10.16236/j.cnki.nrjxb.202505052

基于神经网络和粒子群寻优的空气系统解耦控制

刘丹阳¹, 沈照杰¹, 乔奉亮², 王彦岩¹

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 威海 264209;

2. 华域汽车系统股份有限公司上海第一分公司, 上海 200433)

摘要: 基于内燃动力智能控制算法国际挑战赛提供的多输入、多输出增压直喷发动机模型和整车模型, 结合反向传播神经网络(BPNN)、粒子群寻优算法(PSO)、比例-积分-微分(PID)控制, 设计一种 BPNN-PSO-PID 联合解耦控制器。为了减小耦合误差, 实现对废气再循环(EGR)和涡轮放气阀等效流通直径的目标跟踪及解耦控制, 采用 PSO 算法对 EGR 阀门开度的 PID 控制参数进行寻优, 采用 BPNN 算法以误差反向传播的方式对涡轮放气阀等效流通直径的 PID 控制参数进行迭代, 并在 Simulink 平台上评测联合解耦控制器在两种行驶车速下的控制效果。结果表明: 相比于 BPNN-PID 算法, BPNN-PID 与 PSO-PID 联合算法使增压压力和 EGR 率的平均积分绝对误差分别降低 31.86%和 2.46%, 在不同行驶车速下均表现出良好的控制效果。

关键词: 增压直喷发动机; 反向传播神经网络; 粒子群算法; 空气系统解耦控制

中图分类号: TK401

文献标志码: A

文章编号: 1000-0909(2025)05-0460-09

Decoupling control of air system based on neural network and particle swarm optimization

Liu Danyang¹, Shen Zhaojie¹, Qiao Fengliang², Wang Yanyan¹

(1. School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China;

2. Shanghai First Branch, Hua Yu Automotive Systems Company Limited, Shanghai 200433, China)

Abstract: Based on the multi-input and multi-output model of a supercharged direct injection engine and vehicle, which was provided by the internal combustion power intelligent control algorithm challenge, a joint decoupling controller was developed by combining back propagation neural network (BPNN), particle swarm optimization (PSO) and proportional-integral-derivative (PID) control. In order to reduce the coupling error and achieve both target tracking and decoupling control for the exhaust gas recirculation (EGR) valve and the turbine vent valve, the PSO algorithm was employed to optimize the PID control parameters to control the opening of the EGR valve. Meanwhile, the BPNN algorithm was utilized to iterate the PID control parameters of the equivalent flow diameter of the turbine vent valve through the method of error backpropagation. The control effectiveness of the combined decoupling controller with respect to different driving speeds was evaluated on the Simulink platform. The results show that compared with the BPNN-PID algorithm, the mean integrated absolute error of the boost pressure and EGR rate of the combined BPNN-PID and PSO-PID algorithm is reduced by 31.86% and 2.46% respectively, and the controller demonstrates excellent performance under different driving speeds.

Keywords: supercharged direct injection engine; back propagation neural network; particle swarm optimization; air system decoupling control

发动机空气系统是多输入、多输出^[1]的非线性系统,其实时精确控制^[2]是改善发动机燃油经济性和

排放性能的重点和难点问题^[3]。此外,废气再循环(EGR)阀和涡轮放气阀等效流通直径控制具有很强的

收稿日期: 2024-12-01; 修回日期: 2025-04-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51606052, 52402107).

作者简介: 刘丹阳, 硕士研究生, 793545415@qq.com.

通信作者: 沈照杰, 博士, 副教授, shenzj@hitwh.edu.cn.

耦合关系^[4-5],大大增加了空气系统的控制难度.当 EGR 阀门开度不变时,改变涡轮放气阀等效流通直径会使进/排气压力改变,引起 EGR 率变化^[6];当涡轮放气阀等效流通直径不变时,EGR 阀的开度变化会影响排气压力,导致增压压力变化^[7].传统空气系统控制方法依赖大量实车标定,耗时长、成本高及适应度差^[8]且无法覆盖全域最优^[9].为此,研究者将智能控制算法引入发动机空气系统控制,减少实车标定工作量,智能协调控制系统变量^[10],实现多输入、多输出非线性耦合系统的解耦控制.

Kim 等^[11]采用反步进的输入、输出线性化方法,将非线性系统转换为线性系统;但空气系统线性化后的控制效果在某些工况上存在较大偏差,为进一步提高控制系统的精度,研究者转向非线性控制算法开发^[12].Keller 等^[13]和 Liao-McPherson 等^[14]将线性模型预测控制(MPC)和非线性模型预测控制(NMPC)相结合,实现对空气系统的非线性控制.于海鹏等^[15]采用自抗扰算法和模型预测控制算法,实现了跟踪误差的最佳折中;Hanggi 等^[16]基于单个气路组件,提出 NMPC,使其能够跟踪任意气路参考信号;Wahlstrom 等^[17]和 Murtaza 等^[18]均采用滑模控制器构建控制器结构进行 EGR 和可变截面涡轮增压(VGT)控制;文献[19-21]基于空气系统误差和反馈,采用神经网络参与控制,减少系统稳态误差,达到了较好的控制效果.

发动机空气系统是一个非线性耦合系统,为提高控制效果,除采用非线性控制算法外,还需充分考虑到系统耦合的影响,并进行解耦控制^[22-23].唐蛟等^[24]和张科勋等^[25]均采用对角矩阵解耦方法结合比例-积分-微分(PID)控制对空气系统进行解耦;Sun 等^[26]采用前馈和内部模型解耦控制相结合的控制方法;刘兴义等^[27]提出一种基于极值搜索的模型预测控制算法,通过三入三出线性变参数预测模型和扩张状态观测器实现了空气系统的解耦控制.

基于以上研究分析,国内外学者通过解耦控制方法与线性控制算法相结合或非线性控制算法与误差反馈控制相结合的方法,实现了发动机空气系统非线性解耦控制,但仍存在控制算法复杂及计算量大等问题^[28-29].综合考虑非线性和控制变量解耦问题,笔者提出寻优算法和非线性控制算法相结合的非线性解耦控制算法,使用两个 PID 控制器独立控制 EGR 率和增压压力,在 PID 控制的基础上,采用粒子群算法对 EGR 阀门开度的控制参数进行寻优,减小 EGR 率跟踪误差;同时,采用反向传播(BP)神经网络调整

涡轮放气阀等效流通直径的控制参数,将耦合误差和增压压力跟踪误差进行反向传播,不断更新迭代网络的权重和偏置,最终输出误差最小的控制参数,减小增压压力跟踪误差.将 PSO-PID 控制算法与 BPNN-PID 控制算法相结合,两个回路同时进行运算,不断更新两个算法的控制参数,最终得到使系统误差最小的控制参数.使用 PSO-PID 算法与 BPNN-PID 算法相结合的非线性控制器,减少空气系统的耦合误差,实现多 PID 控制算法的解耦.

1 发动机空气系统模型

以内燃动力智能控制算法国际挑战赛提供的多输入、多输出增压直喷发动机和车辆为研究对象^[30],发动机模型由 GT-Power 搭建,其主要性能参数如表 1 所示,搭载该发动机的车辆参数见表 2.

表 1 发动机主要性能参数

Tab.1 Engine main performance parameters

参数	数值
基本构型	直列 4 缸
排量/L	1.5
标定功率/kW	120 (6 000 r/min)
最大扭矩/(N·m)	242 (2 000 r/min)

表 2 仿真平台车辆参数

Tab.2 Simulation platform vehicle parameters

参数	数值
车重/kg	1 540
车轮滚动半径/mm	334
滚动阻力系数	0.01
迎风面积/m ²	2.3
风阻系数	0.33
主减速比	2.77
变速箱 1 挡位速比	4.484
变速箱 2 挡位速比	2.872
变速箱 3 挡位速比	1.842
变速箱 4 挡位速比	1.414
变速箱 5 挡位速比	1.000
变速箱 6 挡位速比	0.742

1.1 空气系统组成

空气系统包括进/排气管、电子节气门、涡轮、涡轮放气阀、三元催化器、EGR 中冷器、EGR 阀、压气机、增压中冷器和空气滤清器等.空气系统结构如图 1 所示.

压气机吸入回流 EGR 和新鲜空气,增压后经中冷器冷却,通过节气门流进进气歧管.排出的废气流经涡轮做功,实现进气增压,并通过调节涡轮放气阀等效流通直径控制增压压力,通过调节 EGR 阀门开度控制 EGR 率.

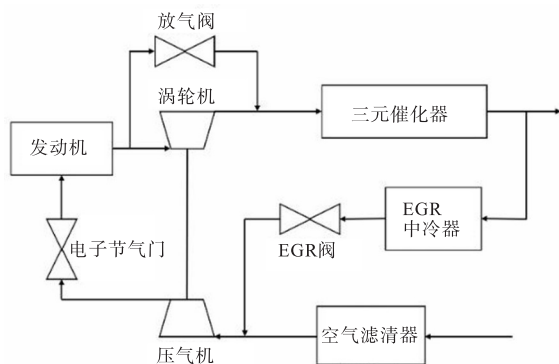


图 1 空气系统结构示意图

Fig.1 Schematic of air system structure

1.2 研究目标

主要研究目标是在给定道路坡度和距离、红绿灯数量及相位、车辆及发动机参数情况下,实现增压压力、EGR 率和车速在车辆整个路段行驶过程中保持较高精度的控制。尤其对于变工况过程,实现快速、精确地跟踪系统目标值。由于空气系统各结构之间存在较强的耦合关系,瞬态工况下增压压力和 EGR 率响应慢,导致实际值与发动机稳态工况下标定的目标值出现较大偏差,因而空气系统控制的主要难点是对 EGR 阀和涡轮放气阀的解耦控制问题。

2 空气系统控制算法

针对空气系统耦合控制问题,提出 BPNN-PID 算法与 PSO-PID 算法相结合的控制策略,控制变量为 EGR 阀开度、放气阀等效流通直径,被控变量为增压压力、EGR 率和目标车速,通过控制变量调整被控变量,实现整车控制。

2.1 PID 控制算法

PID 算法是工业应用中最广泛算法之一,基于 PID 控制算法开展智能控制算法的设计和研究。

PID 控制器的数学表达式为

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{K_i} \int e(t) dt + \left[K_d \frac{de(t)}{dt} \right] + u_0 \right\} \quad (1)$$

式中: K_p 为比例放大系数; K_i 为积分时间常数; K_d 为微分时间常数; $u(t)$ 为控制变量; $e(t)$ 为误差; u_0 为控制变量; t 为当前时间。

空气系统是一个非线性、强耦合的系统,为了使发动机运行在最佳状态,需要引入非线性算法对 PID 控制算法的比例、积分和微分参数进行快速合理的标定和匹配。

2.2 PSO-PID 控制算法

为实现解耦控制,提高系统跟踪效果、非线性逼

近能力和响应速率,将 PSO-PID 优化算法与 BPNN-PID 控制算法相结合。

首先初始化粒子群中初始粒子的位置和速度,设定粒子群数量为 100,迭代次数为 200,惯性因子 $\omega = 0.6$,加速常数 $c_1 = c_2 = 2$,速度范围为 ± 5 ,然后进行粒子群算法的迭代。

限制 3 个增益系数的取值范围为

$$\begin{cases} 0 \leq K_p \leq 200 \\ 0 \leq K_i \leq 200 \\ 0 \leq K_d \leq 200 \end{cases} \quad (2)$$

在迭代过程中不断更新粒子速度和位置信息,粒子速度迭代更新公式为

$$v_{t+1} = \omega v_t + c_1 \text{rand}_1(P_t - x_t) + c_2 \text{rand}_2(P_G - x_t) \quad (3)$$

式中: v_{t+1} 为粒子的速度; rand_1 、 rand_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; P_t 为此粒子在搜索过程中的最优位置,为整个粒子群搜索过程中的最优位置; x_t 为粒子上一次迭代的位置; P_G 为整个粒子群的最优位置。

由式 (3) 可得出当前粒子位置信息为

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} dt \quad (4)$$

式中: x_{t+1} 为当前粒子的位置。

迭代过程中,不断更新整个粒子群的最优位置 P_G ,迭代结束后得到全局最优的粒子。粒子群 PSO-PID 优化流程如图 2 所示。

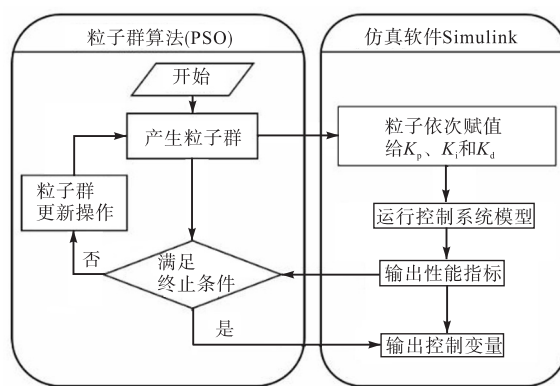


图 2 PSO-PID 算法优化流程

Fig.2 PSO-PID algorithm optimization flow chart

2.3 BPNN-PID 控制算法

随着智能动力的发展,神经网络在内燃机上的应用越来越多。其中, BP 神经网络简单易用、适用性强,在理论上可以逼近任意函数,具有很强的非线性映射能力、泛化能力及灵活性好,通过反向传播不断调整网络的权重和偏置,使网络的误差平方最小。BP 神经网络结构如图 3 所示。

设置 BP 神经网络输入层节点数为 7,分别为误

图 4 控制系统示意
Fig.4 Schematic of control system

指标为目标,对 3 个控制参数不断迭代优化. 两个控制算法相结合,在离线寻优的过程中同时进行在线迭代控制,系统互相影响,两个 PID 算法的控制参数也互相影响,最终达到离线寻优和在线参数调整的统一,以达到减少耦合误差的目标,实现多 PID 控制算法的解耦.

3 仿真结果与分析

根据内燃动力智能控制算法国际挑战赛提供的道路信息、红绿灯信息及发动机和车辆模型,以不闯红灯、不停车、不超速、行驶平稳和燃油消耗低为目标,规划出两种不同风格的行车速度. 选取规划路径中用时最短的高速模式驾驶工况 A 和用时最长的保守模式驾驶工况 B 进行算法开发和验证. 驾驶工况 A 和工况 B 的车速曲线如图 5 所示.

采用平均积分绝对误差(MIAE)对算法控制效果进行评价,MIAE 表达式为

$$\text{MIAE} = \left(\int_0^T |h(x_i) - y_i| \right) / T \quad (14)$$

式中: T 为运行总时间; $h(x_i)$ 为系统真实输出; y_i 为系统目标输出.

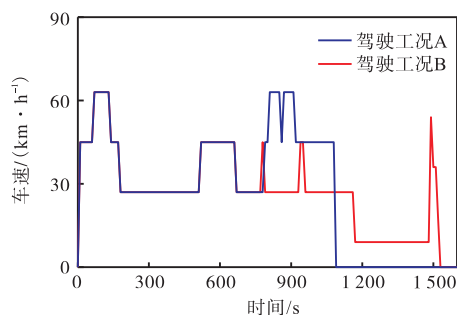


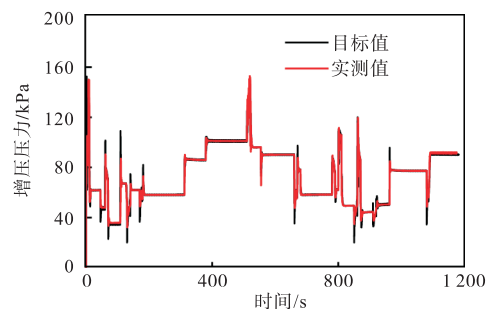
图 5 两种驾驶工况的车速曲线

Fig.5 Speed profiles for two driving conditions

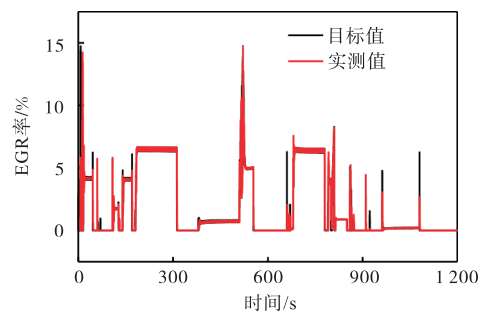
3.1 BPNN-PID 控制效果

BPNN-PID 控制算法对空气系统中增压压力、EGR 率和车速的控制效果如图 6 所示. 图 6(a)为真实增压压力与目标增压压力对比,曲线整体较为平稳,跟随效果较好,无明显振荡.

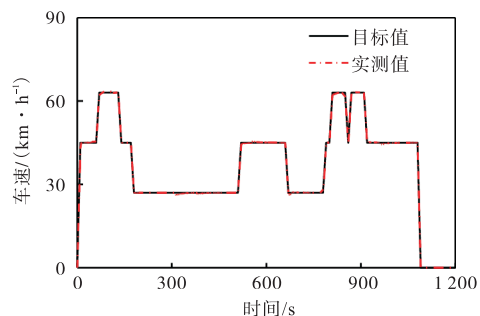
由图 6 可知,增压压力、EGR 率和车速控制曲线与目标曲线吻合较好,实时跟踪和响应较好. 其中,增压压力 MIAE 为 1.422 kPa, EGR 率 MIAE 为 0.122%, 车速 MIAE 为 0.166 km/h. 在 BPNN-PID 控制算法中,增压压力和 EGR 率均采用误差反向传播的方式调整参数,利用神经网络的学习能力降低两者的耦合影响,减少了因两者耦合而产生的误差.



(a) 增压压力



(b) EGR 率



(c) 车速

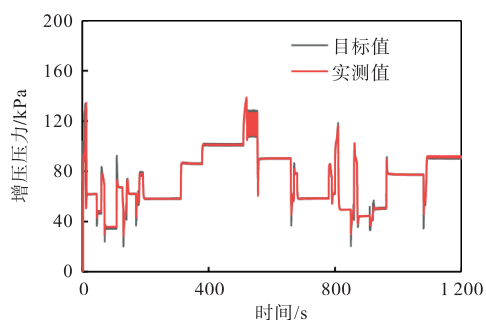
图 6 基于车速 A 曲线的 BPNN-PID 算法控制效果

Fig.6 Control effect of BPNN-PID algorithm based on velocity A curve

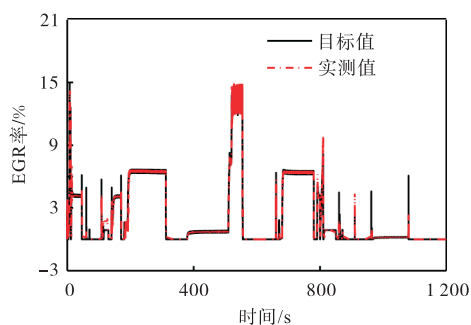
3.2 BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制效果

BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法对空气系统中增压压力、EGR 率和车速的控制效果如图 7 所示. 其中,增压压力 MIAE 为 0.969 kPa, EGR 率 MIAE 为 0.119%, 车速 MIAE 为 0.169 km/h.

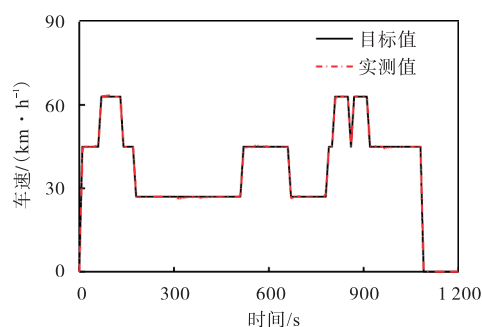
BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法对控制 EGR 阀门开度的 PID 参数进行粒子群寻优,得到在所有工况下 EGR 率误差最小的参数. 粒子群寻优过程中, EGR 阀门开度的 PID 控制的参数固定,消除了 EGR 率对增压压力的影响, BPNN-PID 控制根据误差反向传播不断调整放气阀有效流通直径的 PID 控制参数,有效控制增压压力与目标值一致,计算得出使误差最小的控制参数,降低空气系统控制误差,达到较好的解耦效果.



(a) 增压压力



(b) EGR 率

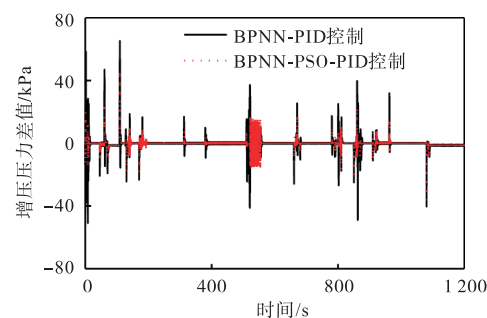


(c) 车速

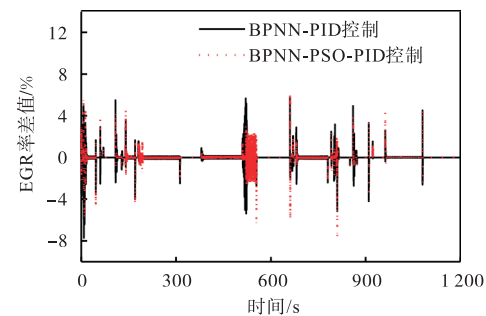
图 7 基于车速 A 曲线的 BPNN-PSO-PID 算法的控制效果
Fig.7 Control effect of BPNN-PSO-PID algorithm based on velocity A curve

3.3 控制效果对比分析

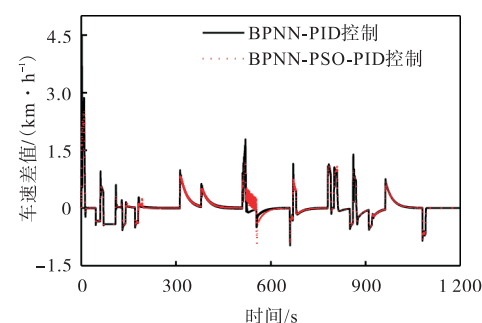
将 BPNN-PID 算法控制器控制 EGR 和放气阀控制的绝对误差与 BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法的绝对误差进行对比. 图 8 为两种算法的增压压力、EGR 率和车速在整个行车过程中的绝对误差对比. BPNN-PID 控制算法的增压压力、EGR 率和车速绝对误差最大值均大于联合控制算法. 对绝对误差进行时间积分后, 以式 (14) 计算 MIAE. 相比于 BPNN-PID 算法, BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法的增压压力 MIAE 降低 31.86%, EGR 率 MIAE 降低 2.46%, 而车速 MIAE 增加 1.81%. 整体上看, BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法对增压压力和 EGR 率进行解耦后, 可以有效减小增压压力和 EGR 率的 MIAE.



(a) 增压压力误差对比



(b) EGR 率误差对比



(c) 车速误差对比

图 8 基于车速 A 曲线的两个算法的误差对比
Fig.8 Error comparison of two algorithms based on velocity A curve

为更好地评估算法控制效果, 以目标值为 X 轴、真实值为 Y 轴, 分别绘制增压压力和 EGR 率, 如图 9 和图 10 所示. 相较于 BPNN-PID 控制算法, 将 BPNN-PID 算法与 PSO-PID 算法结合, 空气系统中增压压力和 EGR 率的目标值与真实值分布更集中于对角线附近. 其中, 双 BPNN-PID 算法和 BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法的增压压力在误差为 5% 以内占比分别为 90.52% 和 93.45%; EGR 率在误差为 5% 以内占比分别为 84.28% 和 90.13%, 联合控制算法的增压压力和 EGR 率控制精度均高于 BPNN-PID 算法.

由平均积分绝对误差和误差为 5% 以内占比分析可知, BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法可以在不进行 EGR 阀和涡轮放气阀等效流通直径标定的前

提下,实现对空气系统增压压力和 EGR 率的解耦控制,并达到更好的控制效果。

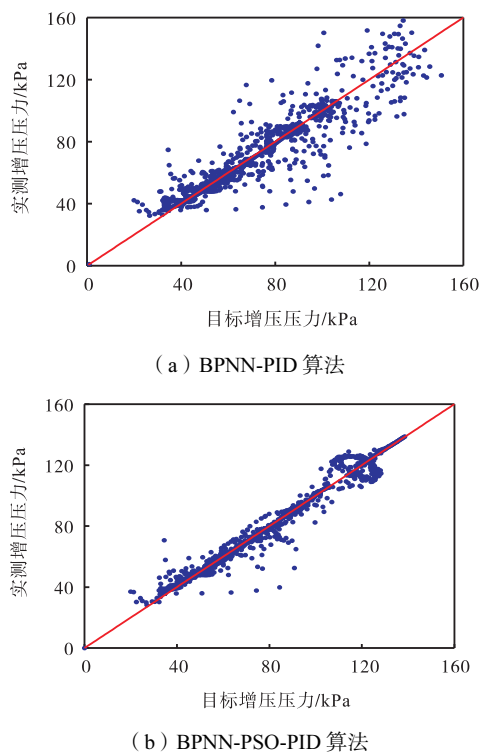


图 9 增压压力目标值与真实值

Fig.9 Target and real value of boost pressure

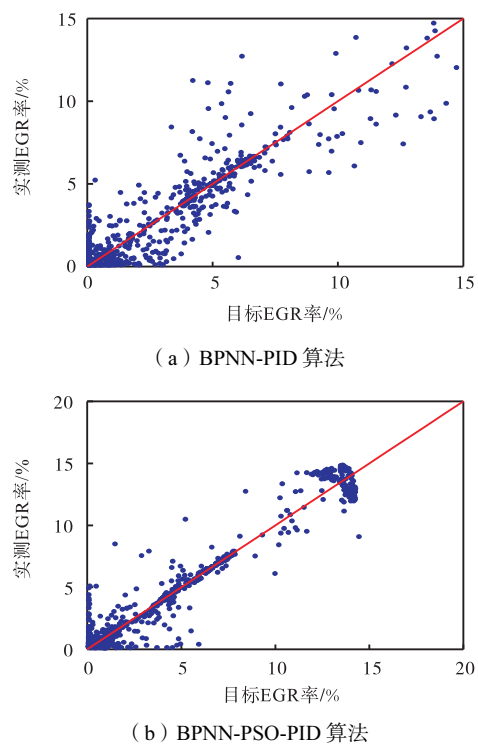


图 10 EGR 率目标值与真实值

Fig.10 Target and real value of EGR rate

3.4 控制算法测试

以车速 B 曲线为目标车速,分析 BPNN-PID 与

PSO-PID 联合控制算法对增压压力和 EGR 率的控制效果,如图 11 所示. 在工况 B 下,联合控制算法对增压压力、EGR 率和车速的控制效果均较好. 增压压力、EGR 率和车速 MIAE 分别为 0.872 kPa、0.112% 和 0.148 km/h. 表 3 为 BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法在车速 A 和 B 曲线下增压压力、EGR 率和车速的 MIAE 对比. 工况 B 的 MIAE 均小于工况 A. 这说明 BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法在

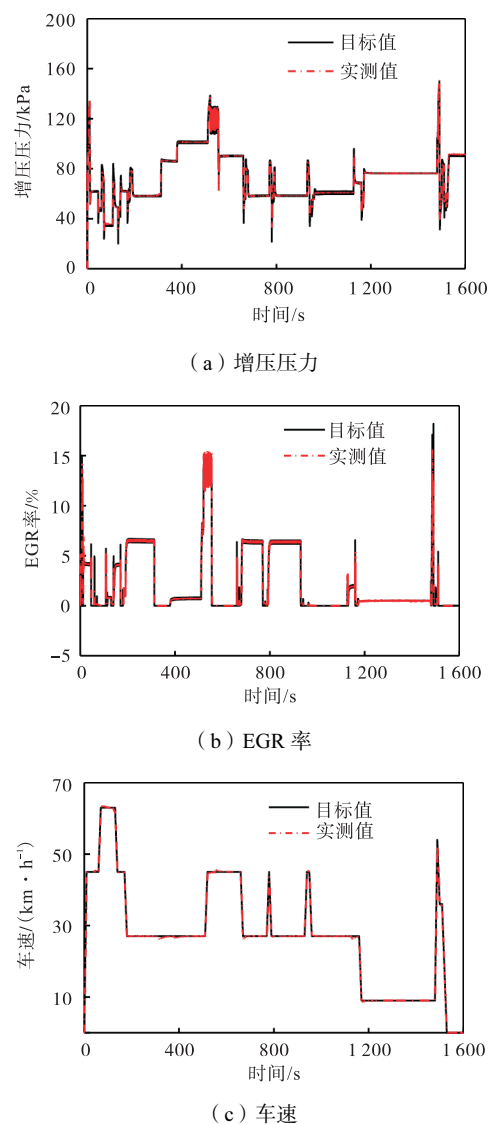


图 11 基于车速 B 曲线的 BPNN-PSO-PID 算法的控制效果

Fig.11 Control effect of BPNN-PSO-PID algorithm based on velocity B curve

表 3 不同输入下的控制效果对比

Tab.3 Comparison of control effects under different input conditions

参数	行驶车速 A	行驶车速 B
增压压力的 MIAE/kPa	0.969	0.872
EGR 率的 MIAE/%	0.119	0.112
车速的 MIAE/(km · h ⁻¹)	0.169	0.148

不同车速曲线行驶工况下均具有较低的 MIAE, MIAE 值越小, 联合控制器的控制误差越小。

增压压力和 EGR 率的目标值和真实值如图 12 所示。BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法的增压压力和 EGR 率控制误差为 5% 以内的占比分别为 93.56% 和 92.35%。进一步表明更换车速工况, BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法仍具有较好的控制效果。

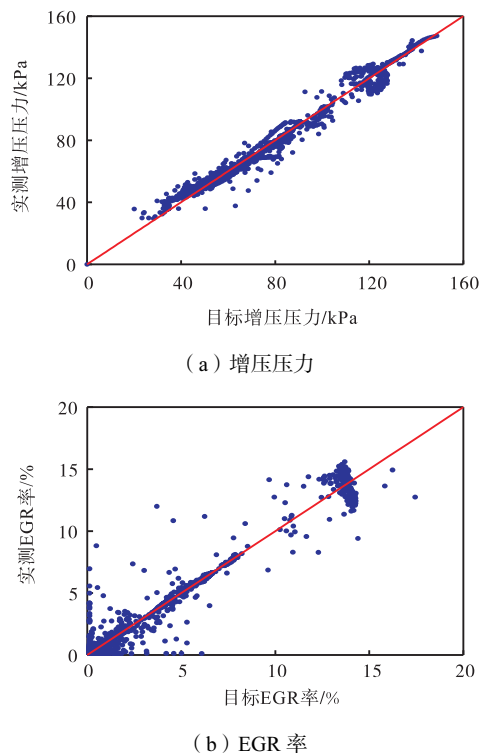


图 12 增压压力和 EGR 率的目标值与真实值

Fig.12 Plot of target and true values of boost pressure and EGR rate

4 结 论

为解决空气系统增压压力与 EGR 率的耦合控制问题, 提出了 BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法。由 PSO-PID 控制 EGR 率, 由 BPNN-PID 控制增压压力, 并通过误差反向传播进行权重和参数的调整, 提高增压压力控制精度。粒子群寻优后, 控制 EGR 率的 PID 参数固定, 降低其对增压压力的影响, 达到解耦效果。

(1) 在车速 A 曲线工况下, 相较于 BPNN-PID 控制算法, BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法的增压压力 MIAE 降低 31.86%, EGR 率 MIAE 降低 2.46%, 车速 MIAE 增加 1.81%, 其中, 增压压力在误差为 5% 以内占比为 93.45%, EGR 率在误差为 5% 以内占比为 90.13%。

(2) 在车速 B 曲线工况下, BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法增压压力、EGR 率和车速的 MIAE 值均小于工况 A, 增压压力和 EGR 率在误差为 5% 以内占比分别为 93.56% 和 92.35%, 表明不同行驶车速工况下, BPNN-PID 与 PSO-PID 联合控制算法均具有较好的控制效果。

致谢:

感谢 2023 内燃动力智能控制算法国际挑战赛提供整车和发动机模型平台, 支撑笔者解耦控制的算法开发及验证。

参考文献:

- [1] Joshi M C, Gosala D, Shaver G M, et al. Exhaust valve profile modulation for improved diesel engine curb idle aftertreatment thermal management[J]. International Journal of Engine Research, 2021, 22(10): 3179-3195.
- [2] 姚晔, 石磊, 邓康耀, 等. 瞬态 EGR 对柴油机低温燃烧切换平顺性影响[J]. 内燃机学报, 2021, 39(1): 11-17.
- [3] Gu W, Su W. Study on the effect of exhaust gas recirculation coupled variable geometry turbocharger and fuel quantity control on transient performance of turbocharged diesel engine[J]. Energies, 2023, 16(16): 6008-6027.
- [4] Wu B, Shi M, Zi Z, et al. Influence of cooling loss on the energy and exergy distribution of heavy-duty diesel engines based on two-stage variable supercharging, VVT, and EGR[J]. International Journal of Engine Research, 2024, 25(5): 896-910.
- [5] Ramon S J, Climent H, De La M J, et al. On the impact of turbocharger thermo-mechanical limitations on new generation gasoline engines[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 222: 119934.
- [6] 董天普, 张付军, 刘波澜, 等. EGR 对涡轮增压柴油机瞬态特性的影响[J]. 内燃机学报, 2017, 35(2): 118-124.
- [7] Sum M, Hu Y, Xu F, et al. Integrated control of torque and emission of a diesel engine based on LPV-MPC[J]. International Control Theory and Applications, 2020, 14(20): 3610-3620.
- [8] Gamache C, Van N M, Martz J, et al. Dual-output PID transient control of an electric-assisted air charge system[J]. International Journal of Engine Research, 2023, 24(8): 3519-3531.
- [9] 师文洁, 宋康, 谢辉. 电辅助涡轮增压器对柴油机热效率调控规律的研究[J]. 内燃机工程, 2018,

- 39(5): 58-65.
- [10] Keller M, Geiger S, Kluge K, et al. Setup and control of a two-stage turbocharged gasoline engine with low pressure EGR in a prototype vehicle[C]// 21st IFAC World Congress on Automatic Control-Meeting Societal Challenges, Berlin, Germany, 2020, 2020-12-2673.
- [11] Kim S, Choi S, Jin H. Pressure model based coordinated control of VGT and dual-loop EGR in a diesel engine air-path system[J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(2): 193-203.
- [12] 李欢, 黄英, 郝东浩, 等. 基于燃烧模型的增压柴油机动态指示转矩预测[J]. 内燃机学报, 2016, 34(4): 357-364.
- [13] Keller M, Geiger S, Gunther M, et al. Experimental validation of model predictive charging pressure and EGR rate control for an SI engine[C]// 2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), New York, USA, 2020: 415-422.
- [14] Liao-McPherson D, Huang M K, Kim S, et al. Model predictive emissions control of a diesel engine airpath: Design and experimental evaluation[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(17): 7446-7477.
- [15] 于海鹏, 宋康, 谢辉. 基于模型预测的电辅助涡轮增压柴油机空气系统优化控制研究[J]. 内燃机工程, 2018, 39(4): 39-46.
- [16] Hanggi S, Frey J, Van D S, et al. A modular approach for diesel engine air path control based on nonlinear MPC[J]. Transactions on Control Systems Technology, 2023, 31(4): 1521-1536.
- [17] Wahlstrom J, Eriksson L, Nielsen L. EGR-VGT control and tuning for pumping work minimization and emission control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(4): 993-1003.
- [18] Murtaza G, Bhatti A I, Butt Y A. Unified FDI and FTC scheme for air path actuators of a diesel engine using ISM extended with adaptive part[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(1): 117-129.
- [19] Peng Q, Huo D, Hall M C. A comparison of neural network-based strategies for diesel engine air handling control[C]// 2022 American Control Conference (ACC), Atlanta, GA, USA, 2022: 3031-3037.
- [20] Ventura L, Malan A S. NLQR control of high pressure EGR in diesel engine[C]// 2020 20th International Conference on Control, Busan, Korea, 2020: 721-726.
- [21] Wang D, Hashimoto Y, Ohmori H. Feedback error learning control using OS-ELM or SI engine airpath systems[J]. IFAC-Papers Online, 2021, 54(10): 182-188.
- [22] Zhang P, Zhang J, Du X, et al. Nonlinear active disturbance rejection control of VGT-EGR system in diesel engines[J]. Journal of Marine Engineering and Technology, 2022, 19(4): 17-30.
- [23] 晁岳栋, 陆海峰, 李理光, 等. 基于理论循环的汽油机 EGR 技术节油机理[J]. 内燃机学报, 2017, 35(3): 208-214.
- [24] 唐蛟, 李国祥, 王志坚, 等. 基于欧 VI 柴油机 EGR 阀与 VGT 阀解耦控制策略研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(3): 63-67.
- [25] 张科勋, 褚全红, 张春, 等. 基于 P 规范形式的柴油机空气系统解耦控制算法研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(6): 1-4.
- [26] Sun T, Zhang X, Chen B, et al. Coordination control strategy for the air management of heavy vehicle fuel cell engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(39): 20360-20368.
- [27] 刘兴义, 王标, 吕宪勇, 等. 基于极值搜索的柴油机空气系统模型预测控制[J]. 内燃机学报, 2024, 42(5): 439-446.
- [28] Zhang P, Zhang J, Du X, et al. Comparative study on LADRC and NLADRC of VGT-EGR system in diesel engine[C]// 39th Chinese Control Conference (CCC), Shenyang, China, 2020: 5566-5571.
- [29] 神艳艳, 王浩平, 田杨. 废气再循环-可变几何截面涡轮增压柴油发动机燃气双环系统建模及协同控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1072-1079.
- [30] 中国内燃机协会. 关于举办 2023 内燃动力智能控制算法国际挑战赛的通知[EB/OL]. <http://www.csice.org.cn/news/notice/a759.html>, 2023-06-29.
- [31] Chen B Q, Niu X F. Quantum neural network with improved quantum learning algorithm[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2020, 59(7): 1978-1991.