

基于自适应 LS—SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统设计

教传艳^{1,2}

(1. 沈阳工学院 机械工程与自动化学院, 辽宁 抚顺 113122;

(2. 辽宁省数控机床信息物理融合与智能制造重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 针对当前柴油机废气再循环冷却控制系统受到时滞问题影响, 导致系统开度走势与设定走势不一致、废气再循环效果差的问题, 提出基于自适应 LS—SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统; 以 AT89C51 单片机 40 针作为电控单元核心部件, 利用位置传感器向系统发送负载信号, 利用温度传感器来传输信号并反馈至 D/A 转换器; 在 D/A 转换器中, 反馈信号以串行或并行方式进入寄存器, 并在转换后输出电流电压, 控制系统阀门在排气再循环时的开启; 伺服泵采用冷却系统, 为系统提供液压动力源; 利用自适应 LS—SVM 原理计算柴油机废气再循环冷却控制目标边界值, 在最小二乘支持向量机基础上, 利用求解线性方程组进行优化, 消除了控制误差; 根据控制差的大小, 调整控制系统的输出值; 由试验结果可知, 该系统开度走势与设定开度走势一致, 且与设定开度误差为 1 开度, 说明使用该系统具有良好稳态特性, 有效克服了系统中时滞问题, 废气再循环效果较好。

关键词: 自适应 LS—SVM; 柴油机; 废气再循环; 冷却控制开度

Design of Diesel Engine Exhaust Recycling Cooling Control System Based on Adaptive LS—SVM

JIAO Chuanyan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Information Physics Fusion and Intelligent Manufacturing for CNC Machine, Fushun 113122, China)

Abstract: Aiming at the current diesel engine exhaust gas recirculation cooling control system affected by time lag, which causes the system opening trend to be inconsistent with the set trend and the exhaust gas recirculation effect is poor, a diesel exhaust gas recirculation cooling control system based on adaptive LS—SVM is proposed. The 40-pin AT89C51 single-chip microcomputer is used as the core component of the electronic control unit, and the position sensor is used to send load signals to the system, and the temperature sensor is used to transmit the signals and feedback to the D/A converter. In the D/A converter, the feedback signal enters the register in a serial or parallel manner, and outputs the current and voltage after the conversion, and controls the opening of the system valve during exhaust gas recirculation. The servo pump adopts a cooling system to provide a hydraulic power source for the system. The adaptive LS—SVM principle is used to calculate the target boundary value of the diesel engine exhaust gas recirculation cooling control. Based on the least square support vector machine, the linear equations are

收稿日期:2021-07-12; 修回日期:2021-08-19。

作者简介:教传艳(1982-),女,辽宁沈阳人,硕士,副教授,主要从事单片机应用技术、计算机辅助机械制造及计算机基础类课程教学改革方向的研究。

引用格式:教传艳. 基于自适应 LS—SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 124-128,144.

solved for optimization and the control error is eliminated. According to the size of the control difference, adjust the output value of the control system. From the test results, it can be seen that the system opening trend is consistent with the set trend, and the error of the setting opening degree is within 1 opening degree. The recycling effect is better.

Keywords: adaptive LS-SVM; diesel engine; exhaust gas recirculation; cooling control opening

0 引言

为了减少柴油机工业生产中废气的排放, 采用柴油机废气再循环系统对部分废气进行再循环和调节, 避免对环境造成污染。随着内燃机尾气回收技术在我国广泛应用, 对其排放标准和排放法规的要求也越来越高^[1]。目前, 针对柴油机系统的排气回流及冷却程度的研究也在不断地探索研究, 例如在系统输出功率较小的情况下, 柴油微粒排放就会增加, 燃油的动力性明显降低, 导致其经济性较低^[2]; 在系统输出功率较大而柴油机的排气循环控制系统控制较差, 此时 NO 等废气的排放量就会增大, 严重污染周围环境。因此, 针对这一问题, 相关学者对柴油机废气再循环冷却控制系统做出了研究, 并得出了一定的研究成果。

王晓^[3]设计了一种防爆废气再循环冷却系统。基于防爆文丘里管原理, 对防爆柴油机水泵选型, 计算整体散热量作为冷却系统约束条件, 控制系统散热量在计算值的范围内, 实现防爆废气再循环冷却系统设计; 舒坚等^[4]提出根据动态矩阵算法的湿法脱硫系统优化策略, 在使用浆液循环泵基础上, 将浆液向上运送, 采用粒子群优化算法对脱硫系统的目标函数迭代优化, 建立 DMC 控制策略。该方法的 SO₂ 质量浓度变化范围更小, 分布集中, 控制品质更好。

针对上述方法存在的问题, 面对该情况, 提出了基于自适应 LS-SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统设计。通过对向量机系统线性方程解作为损失函数, 避免控制误差, 降低计算复杂程度, 缩短系统控制延迟时间, 提高系统控制效率。

1 系统总体结构设计

基于自适应 LS-SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统的基础上, 将柴油机废气燃烧于汽缸中, 不仅降低了燃烧温度, 还破坏了高温下一氧化氮和富氧的形成条件^[5]。与此同时, 柴油尾气在尾气回流时得到冷却, 减少内燃机排放^[6]。气冷式和水冷式是柴油

机排气循环冷却方式, 空气冷却器易于实现, 但冷却效果差, 不宜用于高温柴油废气。水容大于热容, 冷却效果较好, 故以水为介质冷却, 机组采用电控方式, 能自动控制泵的转速, 通过调节冷却水循环来调控排烟温度^[7]。在此基础上, 设计了柴油机废气再循环冷却控制系统整体架构, 如图 1 所示。

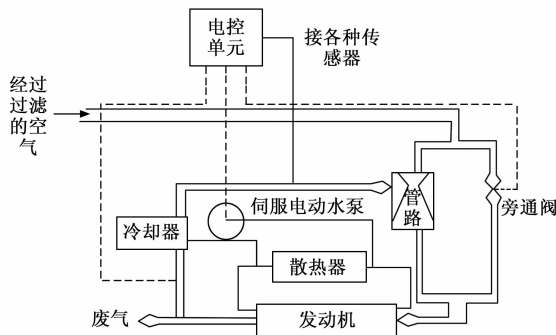


图 1 柴油机废气再循环冷却控制系统整体架构

如图 1 所示, 该系统整体结构较为简单, 以原有冷却系统为基础, 包括伺服电动泵、冷却器、散热器、控制阀及电控单元等^[8]。通过系统控制阀, 冷却器独立地冷却产生的废气, 此时经过散热器流出的水温度较低, 保证了控制阀的冷却效果^[9]。将电动水泵安装到控制阀冷却器的进水管中, 最大程度避免冷却液回流, 提升控制阀的安全性。

2 系统硬件结构设计

基于自适应 LS-SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统硬件结构如图 2 所示。

如图 2 所示, 该系统曲轴位置传感器的传感器输出信号是由脉冲信号和模拟电压传感器提供的, 微机控制系统通过其多路开关控制各传感器的模拟信号, 可编程放大器在单片机系统控制下进行增益调节, 使不同的信号振幅在强度上达到/D/A 转换的要求, 然后将模数信号转换成数字信号反馈给微处理器系统^[10]。通过数模转换器, 对单片机进行光电隔离和信息处理, 利用数字信号的输入可完成数模转换。因为变换后的电压信号不能直接驱动泵, 所以要用电源

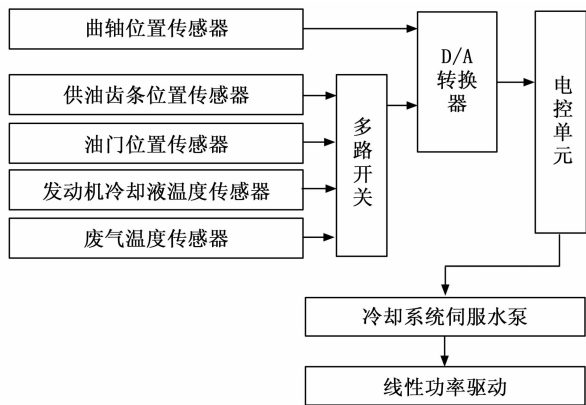


图 2 系统硬件结构

来驱动，最后才能使泵运转。

2.1 电控单元

电控单元采用 AT89C5140 单片机，通过曲轴位置传感器测量发动机转速脉冲，传递给电子控制装置。通过装置中的输入信号实现数字信号形式的转换，再进行存储，从而有效地控制输出信号。

2.2 传感器

柴油机废气再循环冷却控制系统主要用到了供油齿条位置传感器、发动机冷却液温度传感器、油门位置传感器及柴油机废气再循环温度传感器。

供油齿条位置的传感器选用 E3S—CS3C1D 光电式位置传感器，其每一转能达到 50~5000 脉冲 (cpr) 输出，负责采集发动机提供负荷信号，若负荷值较小时，电控单元输出控制信号，发动机排气冷却泵的转速减小，若负荷值达到较大值时，泵的转速增大^[11]。发动机冷却液温度传感器选用 LM60CIM3 型温度传感器，负责采集并传输内燃机温度信号，温度在 50℃ 以下时，柴油机排气再循环冷却泵停止工作。油门位置传感器选用 M8M12M18 型电容式位移传感器，负责采集发动机空转信号，发动机空转时不利于尾气回收，此时电控装置输出控制信号，泵停止转动。柴油机废气再循环温度传感器向电控单元发出反馈信号，控制电控泵调节冷却水。

2.3 废气再循环系统

为了实现电路中废气再循环系统的仿真，必须在电子控制单元与废气再循环系统阀门之间建立通信，使电子控制单元能够根据来自发动机发电机的信号来判断发动机的工作状态，从而控制执行机构废气再循环系统阀门的开启和关闭^[13]。废气再循环系统结构

如图 3 所示。

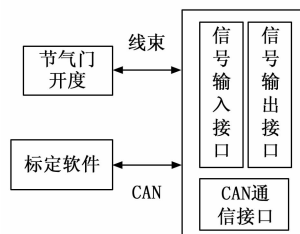


图 3 废气再循环系统

由图 3 可知，传感器信号发生器与电控单元的连接方式主要有两种：1) 从发动机信号发生器发出的信号通过线束和相应的模拟或数字信号接口与电控装置相连；2) 通过 CAN 总线将凸轮轴相位输入到主控核^[14]。脉宽调制的驱动信号由电控装置发出，其电磁驱动机构与脉宽调制开启的排气回流阀通过线束连接^[15]，控制废气再循环阀的开启。

2.4 冷却系统伺服水泵

冷却系统的伺服水泵是通过控制液压泵^[16]，直接向液压缸提供动力的，由此构成了冷却系统伺服泵。液压缸是伺服泵的动力来源，其主要控制原理是根据不同的工作条件，安排不同的液压流量的供给量，从而提高能源利用率。通过伺服电机的供水量可知，液压水循环次数将降低，水温也会降低。而且，选用伺服电机和水泵还能有效降低噪音，有利于维护。

3 系统软件部分设计

3.1 基于自适应 LS—SVM 应用原理

应用自适应 LS—SVM 原理控制柴油机废气再循环冷却过程^[17]。自适应 LS—SVM 原理能够将 SVM 优化问题的非等式约束用等式约束替换。设置柴油机废气再循环冷却系统的控制目标：正常运行、排气门漏气多或少、进排气缝隙大或小，计算训练样本集的控制边界值，利用最小二乘支持向量机决策函数得到最佳控制值，并输出至硬件控制模块，实现柴油机废气再循环冷却控制系统设计。

设训练的样本集共有 n 个样本 $\{x_i, y_i\}_{i=1}^n$ ，其中输入样本属于权向量 $x_i \in R^n$ ，输出样本 $y_i \in \{-1, +1\}$ 。在该训练样本支持下，控制边界值可由下边问题得到：

$$\min J(\omega, e) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^N e_i^2$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} y_i [\varphi(x_i) \cdot \omega + b] - 1 + e_i = 0 \\ i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, $\varphi(\cdot)$ 表示权向量和空间映射函数; ω 表示权向量; e_i 表示控制误差; b 表示偏移项; γ 表示容错惩罚函数。

定义拉格朗日函数为:

$$L(\omega, b, e, \alpha) = J(\omega, e) - \sum \alpha_i (y[\varphi(x_i) \times \omega + b] - 1 + e_i) \quad (2)$$

公式 (2) 中, α_i 表示拉格朗日乘子。当训练集中存在输入样本满足 $0 < \alpha_i < \gamma$ 条件时, 可将这些输入样本视为支持向量。

为了将优化问题转化为求解线性方程问题, 需要消除权向量和控制误差^[18], 得到如下所示线性方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & -y^T \\ y & \Omega + \gamma^{-1} I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

公式 (3) 中, I, Ω 均表示核函数。依据该公式, 可得到偏移项, 并得到任意一项测试样本的分类最小二乘支持向量机决策函数为:

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x, x_i) + b \right\} \quad (4)$$

公式 (4) 中, K 表示核函数。

3.2 控制过程

针对柴油机废气再循环冷却系统的控制, 需从 5 个方面入手, 分别是正常运行、排气门漏气多或少、进排气缝隙大或小^[19], 对这 5 种类型进行标识, 记为 $Y = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]^T$ 。对标志进行编码处理后, 可得到 5 种柴油机废气再循环冷却系统运行状态下的编码, 记为:

$$Y_c = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

使用基于自适应 LS-SVM 输出编码的柴油机废气再循环冷却系统控制过程, 如下所示:

1) 采用开环控制和自适应 LS-SVM 主从式控制方法, 对在不同工况下发动机的排气温度, 通过 MAP 前馈进行控制确定^[20]。

2) 分析各传感器的信号, 如发动机转速、供油齿条的位置等, 利用电子控制单元推断发动机的工作状态。

3) 在测量工况参数的基础上, 由电控单元输出信号, 控制柴油机尾气循环冷却伺服泵的转速, 从而控制冷却水的流量, 实现对水温的控制。它的功能是判断发动机的工作状态, 决定工作水温, 并控制发动

机。基于电控装置设定的温度控制, 作为辅助控制的自适应 LS-SVM 控制系统, 为达到所要求的柴油机排气温度, 实现对伺服控制泵的高低速旋转或停止比的实时控制。

以电动水泵为控制对象, 利用自适应 LS-SVM 对电动水泵平均转速进行控制。在控制目标较远的情况下, 还可以高速运行, 并在预报的温度附近向泵输送低电压, 控制执行部门可以根据控制差来调整速度。

综上, 基于自适应 LS-SVM 的柴油机废气再循环冷却控制流程如图 4 所示。

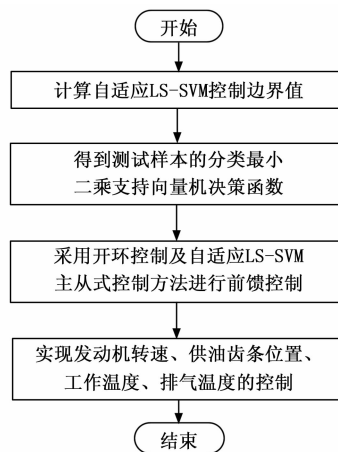


图 4 柴油机废气再循环冷却控制流程图

4 实验结果与分析

通过对基于自适应 LS-SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统进行实验验证分析, 使柴油机废气再循环冷却控制系统的设计具有合理性和有效性。

4.1 试验对象确定

以某汽车厂商生产的柴油机为试验对象, 参数如表 1 所示。

表 1 柴油机性能参数

型式	4 冲程、气门的双顶置凸轮轴
缸径	90.5 mm
行程	95.5 mm
总排量	2.5 L

原始的柴油机 NO 排放量超过了国家规定的标准, 本文所选柴油机采用进气节流式结构, 通过增压器涡轮提供进气量, 发动机气缸内的废气经过再循环冷却系统, 引入到进气管中, 避免废气对环境污染。

4.2 系统控制效果测试

在此基础上,以文献 [3] 方法、文献 [4] 方法作为实验对比方法,分别测试 3 种方法对柴油机废气再循环冷却控制的效果,如图 5 所示。

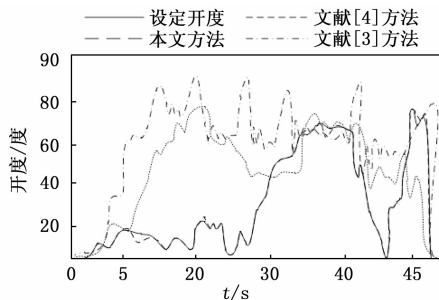


图 5 3 种系统控制效果对比分析

由图 5 可知,使用基于非参数模型的柴油机废气再循环冷却控制系统开度走势与设定开度走势相差较大,曲线高峰值为 90;基于动态控制算法的柴油机废气再循环冷却控制系统开度走势与设定开度走势不一致,曲线高峰值为 75;基于自适应 LS-SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统开度走势与设定开度走势一致,曲线高峰值为 75。

当柴油机废气再循环冷却控制系统阀设置开度较小时,电磁驱动装置产生的驱动力较小。由于复位弹簧影响,基于自适应 LS-SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统开度走势与设定的开度稍有偏差。随着设定开度增大,该系统开度随着设定开度变化趋势而发生改变,且偏差较小为 1 开度。说明使用基于自适应 LS-SVM 的柴油机废气再循环冷却控制系统,具有良好稳态特性,有效克服了系统中时滞问题,能够有效控制柴油机废气的再循环冷却。

5 结束语

柴油机废气再循环冷却控制系统采用自适应 LS-SVM 的技术,采用组态法对柴油机排气循环冷却控制系统进行设计,获取柴油发动机的运行参数,从而实现不同工况下的最佳控制。内燃机排气再循环冷却系统稳定,能有效降低氮氧化物排放,具有良好的稳态特性。通过设计的再循环冷却系统进行实验可知,控制时阻塞较小,能够有效降低 NO 等废气的排放,使一氧化氮在各种工作条件下均处于最佳状态。

虽然现阶段实现了控制系统仿真的实现,但仍有

大量的创新研究工作要做。该控制系统可用于今后研制的发动机台架试验,通过对控制系统各部件参数的优化控制,使得它在运行中不影响发动机性能,降低使用成本,最终达到废气低排放的目的。

参考文献:

- [1] 冯永明,王占广,朱元清,等. 船用低速 EGR 柴油机匹配运行特性仿真 [J]. 船舶工程, 2019, 41 (s1): 251-254.
- [2] 李临蓬,毛 斌,刘海峰,等. 多缸重型柴油机的预混低温燃烧 [J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25 (1): 16-23.
- [3] 王 晓. 防爆柴油机废气再循环冷却系统研究 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (5): 142-147.
- [4] 舒 坚,郑成航,郭一杉,等. 基于动态矩阵算法的湿法脱硫控制系统设计 [J]. 动力工程学报, 2020, (1): 44-50.
- [5] 刘 勇,鲍久圣,李宝林,等. 矿用防爆柴油机温度控制技术的研究 [J]. 煤炭技术, 2019, 38 (10): 169-171.
- [6] 王英敏. 基于融合模型的柴油机空气管理系统故障诊断 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (25): 169-175.
- [7] 瞿 磊,王 忠,刘 帅,等. EGR 率对单缸柴油机颗粒微晶结构及氧化特性影响的试验研究 [J]. 车用发动机, 2020 (5): 59-64.
- [8] 刘 宁,王兴光,田 勇,等. VNT 和 EGR 耦合对柴油机性能及排放特性影响的试验研究 [J]. 车用发动机, 2020 (1): 54-59, 66.
- [9] 石 磊,姚 晔,杨 凯,等. EGR 对柴油机低温燃烧模式切换过程影响研究 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41 (10): 263-269.
- [10] 张 博,张 萍,郭 旭,等. 基于试验设计-遗传算法的船用柴油机冷却系统多目标优化 [J]. 推进技术, 2020, 41 (11): 125-136.
- [11] 黄荣辉,曹春晖,余光耀. 外置废气再循环在增压发动机上的应用研究 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2019, 48 (3): 11-14, 24.
- [12] 王莹杰,张振东,沈 凯,等. 高低压废气再循环对直喷增压汽油机影响的实验研究 [J]. 上海理工大学学报, 2019, 41 (6): 557-562.
- [13] 成晓北,浦 涵,杨 灿. 可调二级增压结合 EGR 策略对米勒循环柴油机性能的影响 [J]. 车用发动机, 2019, 243 (4): 7-13.

(下转第 144 页)