

基于自适应观测器的氢内燃机排气流量估计

孙鹏远¹, 陈国栋¹, 张慧峰¹, 陈伟轩¹, 刘 帅²

(1. 中国第一汽车集团有限公司 研发总院, 长春 130011; 2. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

摘要: 为了精准实时估计内燃机的废气质量流量, 提出了一种基于自适应观测器的氢内燃机排气流量估计方法。该方法结合速度密度公式, 通过实时自适应估计关键待辨识参数——排气效率, 估计内燃机排气流量。首先, 根据排气歧管处压强动态模型和排气口处废气质量流量模型建立排气模型; 为兼顾信号采集精度与计算资源效率, 对建立的排气模型进行离散化处理。其次, 设计自适应状态观测器, 对其参数进行调整, 以确保性能和收敛性。最后, 通过自适应观测器估计待辨识参数——排气效率, 并根据废气速度密度公式计算得出气缸的废气流量。GT-SUITE 与 Simulink 联合仿真结果表明, 本文方法在稳态和瞬态工作过程中均具有良好的性能表现。

关键词: 控制理论与控制工程; 氢内燃机; 对置活塞二冲程内燃机; 废气流量估计; 自适应观测器

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1671-5497(2025)09-2837-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250361

Adaptive observer-based estimation of exhaust gas flow in hydrogen internal combustion engines

SUN Peng-yuan¹, CHEN Guo-dong¹, ZHANG Hui-feng¹, CHEN Wei-xuan¹, LIU Shuai²

(1. General Research and Development Institute, China FAW Group Co., Ltd., Changchun 130011, China; 2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To enable accurate and real-time estimation of exhaust mass flow rate in internal combustion engines, a hydrogen internal combustion engine exhaust flow estimation method based on adaptive observer was proposed. By combining the velocity density formula, the exhaust efficiency of the internal combustion engine was estimated through real-time adaptive estimation of key parameters to be identified. Firstly, an exhaust model was established based on the pressure dynamics model at the exhaust manifold and the mass flow model of exhaust gas at the exhaust outlet. To balance signal acquisition accuracy and computational resource efficiency, the established exhaust model was discretized. Then, an adaptive state observer was designed, and its parameters were adjusted to ensure performance and convergence. Finally, the exhaust efficiency of the parameter to be identified was estimated through an adaptive observer, and the exhaust gas

收稿日期: 2025-03-12.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20240301005ZD).

作者简介: 孙鹏远(1974-), 男, 正高级工程师, 博士. 研究方向: 发动机电控系统开发.

E-mail: sunpengyuan@faw.com.cn

flow rate of the cylinder was calculated based on the exhaust gas velocity density formula. The co-simulation results using GT-SUITE and Simulink demonstrate that the proposed method exhibits good performance in both steady-state and transient operating conditions.

Key words: control theory and control engineering; hydrogen internal combustion engine; opposed-piston two-stroke engine; exhaust gas flow estimation; adaptive observer

0 引言

为应对日益严重的碳排放和环境污染问题,各国纷纷出台更严格的环保政策。传统化石能源因碳排放高且不可再生,其局限性日益凸显。在此背景下,氢能源凭借清洁性和可再生潜力,成为极具前景的替代能源^[1]。汽车领域正积极推进氢能源技术的应用,其中氢内燃机因燃烧效率高、可显著减少一氧化碳和碳氢化合物等有害排放,受到广泛关注^[2]。

然而,氢内燃机的实际应用仍面临关键技术挑战。氢燃料具有高能量密度和宽可燃范围,导致发动机在高负荷下更易发生早燃、回火和爆震等异常燃烧现象^[3]。这不仅会削弱发动机性能,还对电子控制系统的精确设计及排放控制提出了更高要求。现有尾气排放测量方法,如五气体分析仪^[4]、激光吸收光谱传感器^[5]、基于机器学习的预测模型^[6]及便携式排放测量系统(PEMS)^[7],在应用中普遍存在响应时间滞后、噪声干扰显著及高度依赖昂贵传感器等问题。因此,开发一种能够实时、精确且低成本监测内燃机尾气排放量的方法,对于实现发动机精确控制、优化燃烧过程及确保排放法规达标具有重要的应用价值。

水平对置二冲程发动机因其结构紧凑、功率密度高、热效率潜力高等特点^[8],成为氢内燃机技术路线中值得探索的方向。但其换气过程与四冲程发动机存在本质差异:进气与排气过程相互耦合,导致新鲜工质易短路直接进入排气管。这种特性不仅会造成效率损失和排放增加,还使排放控制更为复杂。此外,对置活塞结构进一步增加了扫气过程的复杂性,因其受进排气正时和气流路径影响,面临扫气效率优化和残余废气干扰等难点。

因此,优化换气过程是提升二冲程氢内燃机性能与降低排放的关键^[9]。虽然已有研究通过调整进气口倾角^[10]、进排气道高度冲程比^[11]、进气壁厚度^[12]等方法改善扫气效果,但这些方法对已

投用的发动机难以实施。这凸显了通过先进控制策略优化扫气过程、提升整体效率的必要性。

状态观测器作为控制理论的核心工具,在发动机领域已被用于估计燃烧扭矩、缸压等关键状态参数^[13],以及实现柴油发动机气路故障的自适应观测与容错控制^[14]。其优势在于能通过有限的传感器数据估计难测变量,减少对传感器的依赖并降低成本,同时能处理系统非线性以优化性能^[15],特别适用于工况动态变化的氢内燃机。然而,发动机系统的高度非线性、模型不确定性和参数漂移^[16],对观测器的鲁棒性和适应性提出了挑战。设计能动态调整参数以适应工况变化的自适应观测器,是应对上述挑战的有效途径。

针对现有方法普遍存在的响应滞后、噪声干扰及高度依赖昂贵传感器等问题,本文提出了一种基于排气系统动态模型和自适应观测器的水平对置二冲程氢内燃机排气流量估计方法。与传统方法相比,本文所提方法的核心优势在于无需大量昂贵传感器即可实现对排气流量的实时、精准估计,显著降低成本。此外,通过动态调整自适应观测器的参数,可以更好地适应内燃机工况变化,有效应对模型不确定性和参数漂移,为氢内燃机的空燃比控制、异常燃烧抑制及整体性能优化提供了更为可靠、经济的解决方案。

1 排气系统建模

研究发动机排气系统的动态特性,对于分析发动机性能和优化排放控制具有重要意义。准确的排气系统模型能够为后续自适应观测器设计提供理论基础,从而实现对废气流量和排气效率的实时估计。本节将详细阐述排气系统建模过程,包括排气门处空气流量模型和排气压强动态模型的建立。模型推导基于理想气体状态方程和质量守恒定律,同时结合发动机运行特性以适应不同工况下的动态变化。

建立排气模型可为排气流量估计方法提供基础,使其能够精准估计排气门处的废气质量流量

与排气歧管内的压强。进气系统和排气系统中的基本模块均为储气室,由于二者中气体的停留时间很短,均具有良好的储气室特性,因此可采用相似的平均值模型来描述其动态特性^[17]。

1.1 基本假设

排气过程是一个复杂的过程,涉及热力学和流体动力学。为了使其更适用于观测器的设计,根据文献[17]对进排气系统的分析,引入以下关键假设:

(1)等温过程假设:在排气模型建模过程中,假设排气歧管内的气体温度在短时间内变化缓慢。虽然实际排气温度会随工况发生变化,但对于平均值模型而言,该假设可以在计算复杂度与模型精度间取得较好的平衡,具有合理性,因此可以将温度视为恒定,将排气过程近似为等温过程。

(2)理想气体假设:假设排气歧管内的废气遵循理想气体状态方程,即将废气视为理想气体,因而具有理想气体常数。

(3)空间均一性假设:假设排气歧管内的气体在空间上均匀变化和流动,并且流动中无显著的势能和动能变化。

上述假设会对模型精度产生一定影响。等温过程假设忽略了排气温度随工况的变化,在稳态工况下温度变化较小,该假设具有合理性;但在瞬态工况下,排气温度会显著波动,导致排气流量估计出现误差。理想气体假设假定废气遵循理想气体状态方程,而实际废气成分复杂,实际气体常数与理想气体常数存在一定的偏差,在异常燃烧工况下该偏差更为显著,但由于偏差值很小,并不影响排气流量估计的精度。空间均一性假设简化了排气歧管内的流体动力学特性,但在高转速或复杂几何结构的排气系统中,湍流和压强波可能引发局部压强和密度不均,影响排气流量估计精度。然而,通过自适应观测器的动态调整,可以补偿上述假设带来的误差,从而保证工程精度。

1.2 进气系统模型

文献[18]提出了一种发动机进气流量估计方法,该方法设计过程中建立了进气系统的动态平均值模型:

$$\dot{P}_m = \frac{RT_m}{V_m} \dot{m}_{at}(P_m, \varphi) - \frac{V_s n P_m \eta_v}{120 V_m} \quad (1)$$

式中: R 为理想气体常数; φ 为节气门开度; P_m 为进气歧管压强; T_m 为进气歧管温度; V_m 为进气歧

管体积; V_s 为发动机排量; η_v 为充气效率; n 为发动机转速; $\dot{m}_{at}(P_m, \varphi)$ 为节气门空气流量。

由于进气系统和排气系统中的基本模块均为储气室,因此可参考进气系统的动态模型推导建立排气系统的动态模型。

1.3 排气门空气流量模型

发动机工作循环中,从气缸排到排气歧管的废气质量是建模的关键。理想情况下,一个循环内排出的废气体积等于发动机的排量。因此,理想的每循环排气质量 m_{egp} 为气缸排量 V_s 与气缸内废气密度 ρ_{eg} 的乘积:

$$m_{egp} = V_s \rho_{eg} \quad (2)$$

然而,实际排气质量受排气效率、发动机转速等多种因素影响,因此需要将其转化为每秒的废气质量流量 \dot{m}_{egp} 以便动态分析。废气质量流量可通过每秒工作循环次数与单次循环排气量的乘积计算。

对于四冲程发动机,曲轴每转动两圈(即 720°)完成一个工作循环,每分钟循环次数为 $n/2$,因此每秒循环次数为 $n/120$ 。对于二冲程发动机,曲轴每转动一圈(即 360°)完成一个工作循环,每秒循环次数为 $n/60$ 。因此,废气质量流量为:

$$\dot{m}_{egp} = \frac{n}{60} m_{egp} = \frac{n V_s \rho_{eg}}{60} \quad (3)$$

通过对理想气体状态方程进行转化,可得气体密度为:

$$\rho = P/(RT) \quad (4)$$

在排气门开启的排气冲程期间,基于等温过程假设和压强平衡趋势,可以认为气缸内废气密度近似等于排气歧管内废气密度。排气歧管内废气密度 ρ_e 可由歧管压强 P_e 和温度 T_e 表示为:

$$\rho_e = \frac{P_e}{RT_e} \quad (5)$$

最终得到排气门处的速度密度公式^[19]为:

$$\dot{m}_{egp} = \frac{V_s n P_e \eta_{ex}}{60 R T_e} \quad (6)$$

在实际运行中,受空气阻力、排气门开启持续时间有限及气缸内残余废气等因素影响,实际排出的废气量通常小于理论值。为修正这一偏差,引入排气效率 η_{ex} 。该参数定义为实际排出气缸的废气质量与理论上可充满排量的废气质量之比。 η_{ex} 是一个随发动机工况变化的参数,取值范围为 $0 \sim 1$ 。将其引入流量模型,可对速度密度公式进行修正。

1.4 排气歧管压强动态模型

排气压强动态模型用于描述排气歧管压强 P_e 的变化规律,其建立基于理想气体状态方程和质量守恒定律。内燃机进排气系统结构如图 1 所示。

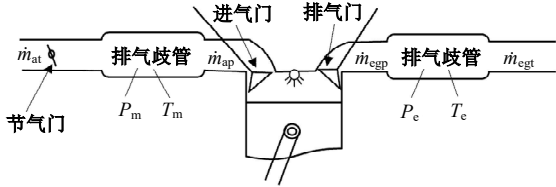


图 1 内燃机进排气系统结构图
Fig. 1 Schematic diagram of internal combustion engine intake and exhaust system

排气歧管内气体的状态方程为:

$$P_e V_e = m_e R T_e \quad (7)$$

式中: V_e 为排气歧管体积; m_e 为排气歧管内废气质量; R 为废气气体常数; T_e 为排气歧管温度。

对式(7)左右两侧同时取微分,得到:

$$\dot{P}_e = \frac{RT_e}{V_e} \dot{m}_e + \frac{Rm_e}{V_e} \dot{T}_e \quad (8)$$

由于排气过程近似为等温过程,因此可以忽略温度变化项,式(8)简化为:

$$\dot{P}_e = \frac{RT_e}{V_e} \dot{m}_e \quad (9)$$

根据质量守恒定律,排气歧管内气体质量变化率等于流入与流出排气歧管的废气流量之差:

$$\dot{m} = \dot{m}_{egp} - \dot{m}_{egt} \quad (10)$$

由此可得^[20]:

$$\dot{P}_e = \frac{RT_e}{V_e} (\dot{m}_{egp} - \dot{m}_{egt}) \quad (11)$$

将 \dot{m}_{egp} 的计算公式代入,可得最终的发动机排气系统平均值模型为:

$$\dot{P}_e = \frac{V_s n P_e \eta_{ex}}{60 V_e} - \frac{RT_e}{V_e} \dot{m}_{egt} \quad (12)$$

式中: \dot{m}_{egt} 为经过排气口的流量,可通过流量传感器或车辆电控系统直接获得。

为适应发动机工况变化,该模型需从时间域离散化转为基于曲轴转角的变步长运算,以平衡高转速精度与低转速资源消耗。离散化后的状态空间方程为:

$$P_e(k+1) = P_e(k) + \Delta T \frac{V_s n}{60 V_e} P_e(k) \eta_{ex} - \Delta T \frac{RT_e}{V_e} \dot{m}_{egt} \quad (13)$$

式中: ΔT 为动态步长,与曲轴转速实时同步。

为便于后续工作,将式(13)改写为状态空间表达式形式:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + f[x(k)] + \Psi(k)\theta(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中: 状态变量 $x(k) = P_e(k)$; 系数 $A = 1, C = 1$; 非线性项 f 为 \dot{m}_{egt} ; 系数 $\Psi(k) = \Delta T \frac{V_s n}{60 V_e} P_e(k)$; 参数 $\theta(k) = \eta_{ex}$ 。

2 自适应观测器设计

选用一种自适应观测器,对系统的状态变量和未知参数进行联合估计。该观测器可通过系统的输入、输出和已知扰动信号,同时估计状态变量和扰动前系数^[21]。

2.1 自适应观测器和收敛性分析

自适应观测器是一种强大的工具,能够在动态系统中同时估计状态变量和未知参数。其基本思想是通过系统的可观测性,利用输入输出数据和设计参数构建估计器,使估计误差随时间指数收敛至零。本文选用的自适应观测器包含以下 3 个核心公式:

状态估计公式为:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + f[x(k)] + \\ &\Psi(k)\hat{\theta}(k) + K(y(k) - C\hat{x}(k)) + \\ &\gamma(k+1)[\hat{\theta}(k+1) - \hat{\theta}(k)] \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\hat{x}(k)$ 为状态估计值; $f[x(k)]$ 为系统非线性输入; $y(k)$ 为系统输出; $\hat{\theta}(k)$ 为参数估计值; $\Psi(k)$ 为已知系数矩阵; K 为观测器增益; $\gamma(k)$ 为中间变量。

参数更新公式为:

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) - \Gamma(k) \gamma^T(k) C^T \Sigma C \hat{x}(k) \quad (16)$$

式中: $\hat{x}(k) = \hat{x}(k) - x(k)$ 为状态估计误差; $\Gamma(k)$ 为自增益矩阵; Σ 为正定对角矩阵。

中间变量更新公式为:

$$\gamma(k+1) = (A + KC)\gamma(k) + \Psi(k) \quad (17)$$

为了保证自适应观测器的收敛性和性能,需要合理设计参数 $K, \Gamma(k)$ 和 Σ 。

为了保证状态估计误差的指数收敛性和稳定性,观测器增益矩阵 K 的设计需使闭环系统矩阵 $A + KC$ 的谱半径 < 1 , 即:

$$\rho(A + KC) < 1 \quad (18)$$

式中:谱半径 $\rho(\bullet)$ 为矩阵特征值的最大模值。

因为本文中 A 、 K 和 C 均为实数,所以式(18)对应的条件可简化为 $0 < A + KC < 1$ 。

$\Gamma(k)$ 的形式如下:

$$\Gamma(k) = \frac{I}{\alpha I + \gamma^T(k) C^T \Sigma C \gamma(k)} \quad (19)$$

式中: I 为单位矩阵; α 为需设计参数,当 $\alpha > 0$ 时,可以保证观测器的收敛性和性能。

Σ 为有界的正定对角矩阵,其具体取值需根据系统特性和应用目标进行优化设计。

自适应观测器的性能和收敛性与其内部参数选取密切相关。在不同氢内燃机系统或更广泛的运行工况下,这些参数的最优值可能存在差异。本文提出的自适应观测器设计严格遵循文献[21]中针对多输入多输出线性时变系统的通用自适应观测器理论框架。该理论为观测器参数的选取提供了理论基础和指导原则,确保了系统的渐近收敛性和稳定性。具体需遵循的指导原则如下:①保证稳定性优先,增益参数需满足特定数学条件,以确保误差渐近收敛;②平衡响应速度与鲁棒性,需权衡快速跟踪与抗噪声能力;③应对模型不确定性与参数漂移,通过动态调整内部参数,补偿未建模动态和实际运行变化;④模型驱动结合自适应特性,赋予方法超越单一工况的普适性,能主动追踪补偿系统参数变化;⑤仿真实验与工程经验辅助初步优化,确保参数在合理范围内。

2.2 排气流量估计

根据内燃机排气系统的状态空间表达式(式(14))和状态观测器的核心公式(式(15)~式(17)),可得排气系统流量估计算法为:

$$\gamma(k+1) = (A + KC)\gamma(k) + \Delta T \frac{V_s n}{60 V_e} P_e(k) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_e(k+1) = & A\hat{P}_e(k) - \Delta T \frac{RT_e}{V_e} \dot{m}_{\text{egt}} + \\ & \Delta T \frac{V_s n}{60 V_e} P_e(k) \hat{\eta}_{\text{ex}}(k) + \\ & [KC - \gamma(k+1)\Gamma(k)\gamma^T(k)C^T \Sigma C] \tilde{P}_e(k) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\hat{\eta}_{\text{ex}}(k+1) = \hat{\eta}_{\text{ex}}(k) - \Gamma(k)\gamma^T(k)C^T \Sigma C \tilde{P}_e(k) \quad (22)$$

$$\dot{m}_{\text{egt}}(k) = \frac{V_s n \hat{P}_e(k) \hat{\eta}_{\text{ex}}(k)}{60 RT_e} \quad (23)$$

式中: $\tilde{P}_e(k)$ 为进气压强估计误差, $\tilde{P}_e(k) = \hat{P}_e(k) -$

$P_e(k)$; K 、 $\Gamma(k)$ 和 Σ 为需要根据实际情况进行设计和调整的参数; $P_e(k)$ 为通过传感器测量的排气压强; \dot{m}_{egt} 为观测器对应的非线性项输入,其值通过传感器或者车辆电控系统直接测量获得。

为了简化设计过程, n 、 $P_e(k)$ 和 \dot{m}_{egt} 作为观测器的输入量。排气流量估计方法的结构框图如图2所示。

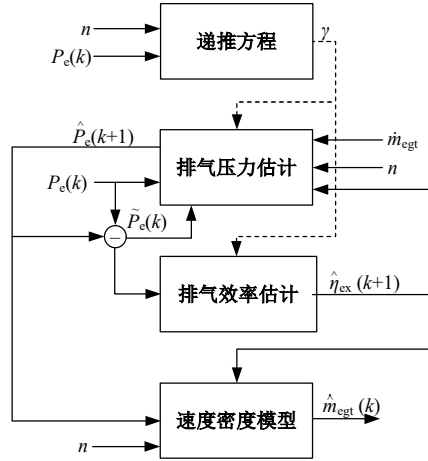


图2 基于自适应观测器的排气量估计方法结构框图
Fig. 2 Block diagram of the adaptive observer-based exhaust gas flow estimation method

3 仿真实验验证和结果分析

本实验在GT-SUITE与Simulink联合仿真平台上进行。首先在GT-SUITE中搭建氢内燃机模型后,通过GT-SUITE与Simulink联合仿真模块实时、准确地获取实验所需物理量;随后在Simulink中搭建排气系统流量估计算法模型进行仿真实验,以验证本文所提方法的有效性。

3.1 氢内燃机模型搭建

为了验证本文所提方法的有效性,在GT-SUITE中搭建单缸氢燃料对置活塞二冲程内燃机模型。由于GT-SUITE中没有OP2S发动机仿真模块,因此采用二冲程发动机等效替代OP2S发动机,等效时遵循如下原则:①等效模型主要结构参数与OP2S模型相同;②工作容积变化率保持不变;③活塞运动规律和进排气正时保持不变。等效模型中,将体积最小的位置定义为内止点,体积最大的位置定义为外止点^[22]。燃烧模型采用Wiebe模型,传热模型采用Hohenberg模型,将氢气设置为燃料喷射装置供应的燃料。在GT-SUITE中搭建的对置活塞二冲程氢内燃机等效模型如图3所示,相关参数如表1所示。

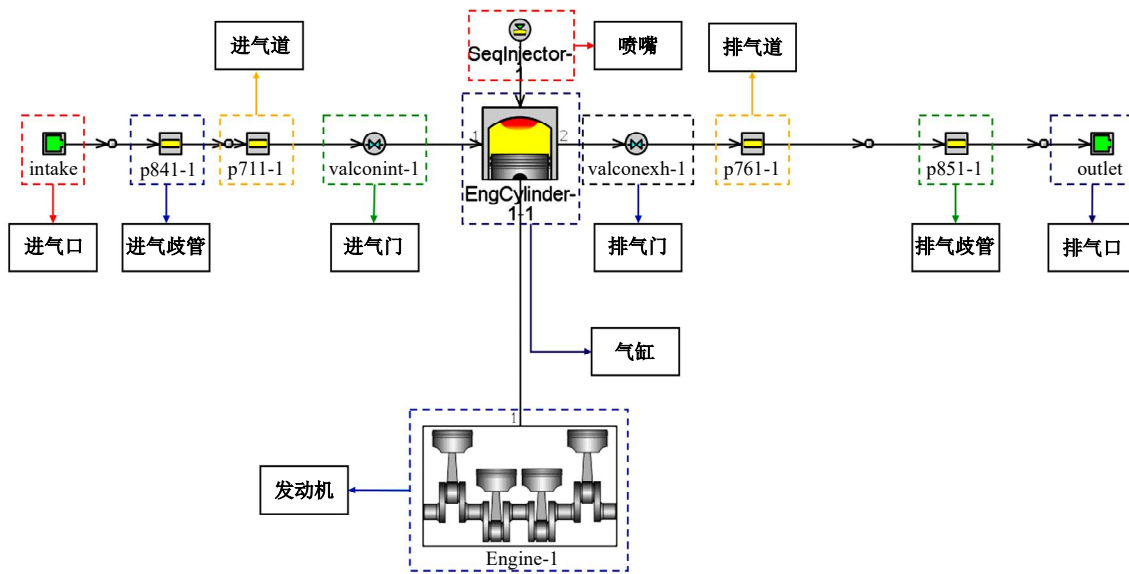


图 3 OP2S 氢内燃机等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the OP2S hydrogen internal combustion Engine

表 1 内燃机参数

Table 1 Internal combustion engine parameters

参数	数值	参数	数值
气缸直径/mm	119	排气歧管长度/mm	90
活塞行程/mm	175	最大工作容积/L	2.12
压缩比	12	内燃机排量/L	1.95
进气歧管直径/mm	55	缸径/mm	119
进气歧管长度/mm	140	冲程	2
排气歧管直径/mm	52	喷射器输送速率/(g·s ⁻¹)	30

3.2 仿真实验验证

3.2.1 进气系统流量估计方法仿真验证

本文所提方法的核心是估计排气系统的排气效率 η_{ex} , 但 GT-SUITE 仿真软件无法直接获得该参数, 因此需验证其估算结果的可靠性。为了验证所提方法对排气效率的估计能力, 采用间接验证策略: 首先实施进气系统流量模拟实验, 通过检验模型对充气效率 η_v 的预测精度, 推断其估计 η_{ex} 的可行性。

本实验设计了多转速工况下的对比实验, 探究进气流量估计方法在不同转速条件下对充气效率的估计能力。本文共设置 3 组对照实验验证充气效率估计的准确性, 分别对应内燃机转速为 1 800、3 600 和 5 400 r/min。

由图 4 所示的对比结果可知, 模型估计的充气效率与基于 GT-SUITE 仿真模型获得的参考值一致性良好, 偏差在工程允许误差范围内, 验证了估算模型的有效性和可靠性。

由图 5 所示的对比结果可知, 实际进气流量

与模型估计值在动态特性上具有良好的一致性。在转速为 1 800 和 3 600 r/min 时, 仅内燃机启动阶段误差较大, 随着内燃机运行逐渐稳定, 进气流量估计值快速收敛至参考值。当转速提升至 5 400 r/min 时, 启动阶段进气流量估计值和参考值的偏差显著减小。

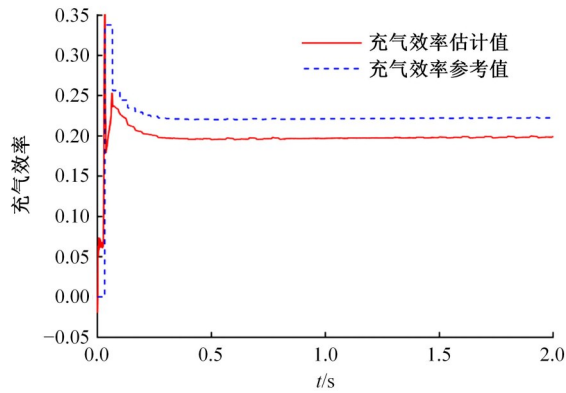
为了探究启动阶段进气流量估计值波动的影响, 本文设计了进气质量估计误差分析实验。定义质量误差为进气质量估计值和进气质量参考值的差值, 二者均由进气流量积分运算获得。由图 6 可知, 在不同转速条件下, 进气质量估计值和进气质量参考值的误差均在合理范围内, 表明进气流量估计值的波动对质量估计结果无显著影响。

仿真结果表明, 进气流量估计方法能够有效估计充气效率 η_v 和进气流量。由此推导出, 采用排气流量估计方法估计排气效率 η_{ex} 和排气质量流量具有可行性。

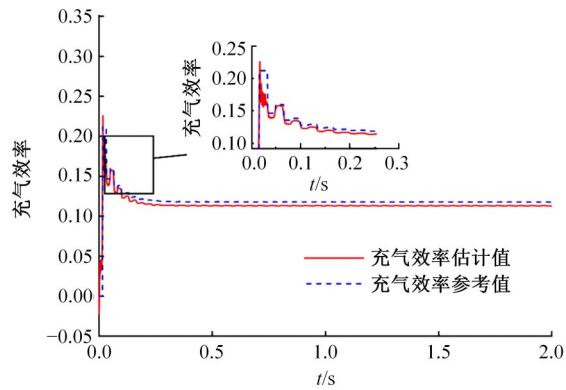
3.2.2 排气系统流量估计方法仿真验证

排气系统流量估计模型的实验方案与进气系统流量估计模型基本一致, 设置 3 组对照实验验证本文所提方法的准确性, 实验工况转速分别为 1 800、3 600 和 5 400 r/min。为了验证所提方法对排气系统状态变量估计的准确性, 增加排气压强估计值和排气压强参考值的对比实验。

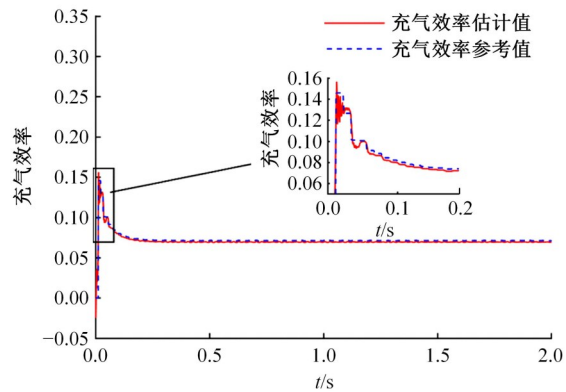
图 7 展示了本文所提方法估计的排气压强和参考值的对比结果。不同转速的 3 组实验结果表明, 在内燃机启动阶段, 排气压强估计值存在超调量, 但能在短时间内快速收敛至排气压强参考值;



(a)转速为1 800 r/min



(b)转速为3 600 r/min



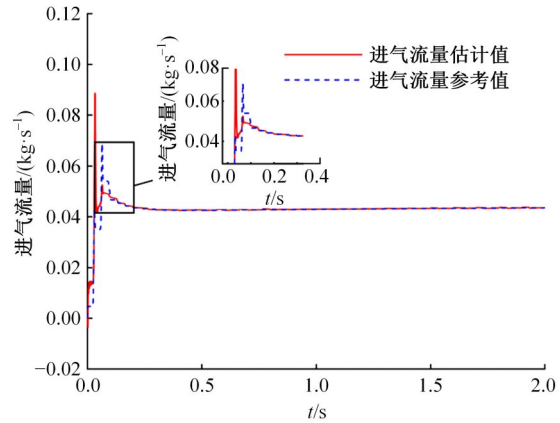
(c)转速为5 400 r/min

图 4 充气效率仿真结果

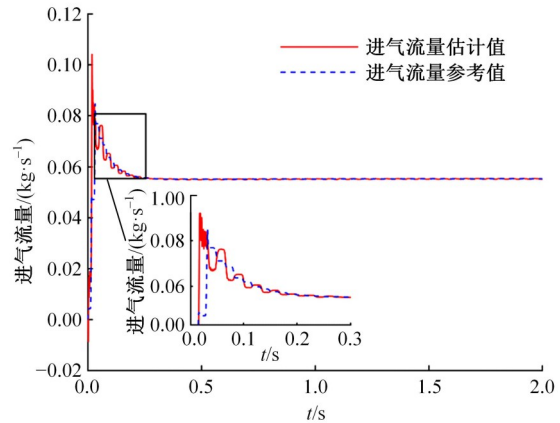
Fig. 4 Simulation results of intake efficiency

当实验工况由 1 800 r/min 变为 5 400 r/min 时,超调量随着转速的增加而变大。

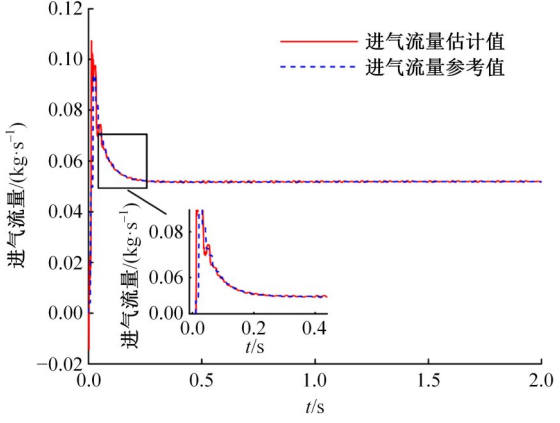
图 7 中排气压强的超调现象是氢内燃机瞬态特性、排气系统模型简化及观测器动态响应等多因素综合作用的结果,且在高转速下该效应更明显。首先,氢内燃机独特的燃烧特性在瞬态加速时可能导致缸内压强剧烈波动,进而加剧超调;其次,排气系统模型简化未完全考虑复杂几何结构、高频脉冲等因素,在高转速瞬态下会影响模型精



(a)转速为1800 r/min



(b)转速为3600 r/min



(c)转速为5400 r/min

图 5 进气流量仿真结果

Fig. 5 Simulation results of intake flow

度,导致观测器出现较大瞬态误差;再次,自适应观测器在系统状态剧烈变化时可能暂时牺牲平滑性以追求快速响应,从而产生瞬态超调;最后,瞬态工况下排气效率的快速动态变化及其估计误差也会影响排气压强超调。

图 8 为排气效率的估计值,其取值范围为 0~1。虽然无法通过 GT-SUITE 直接获得排气效率的参考值,但充气效率的估计实验结果和排气流

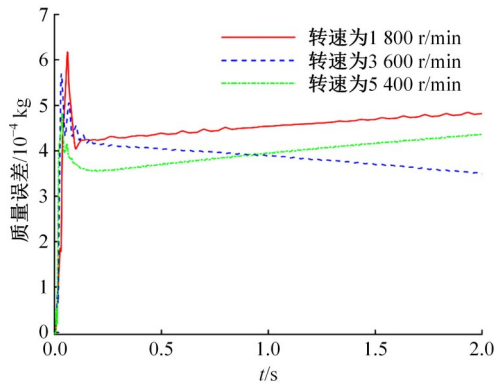


图 6 质量误差仿真结果

Fig. 6 Simulation results of quality error

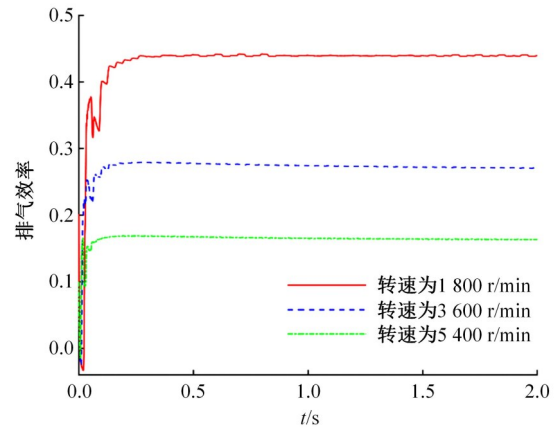
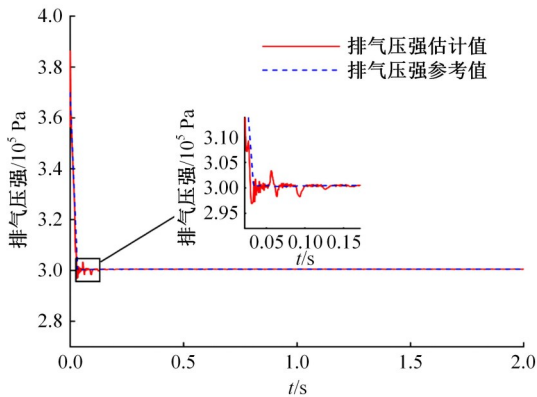
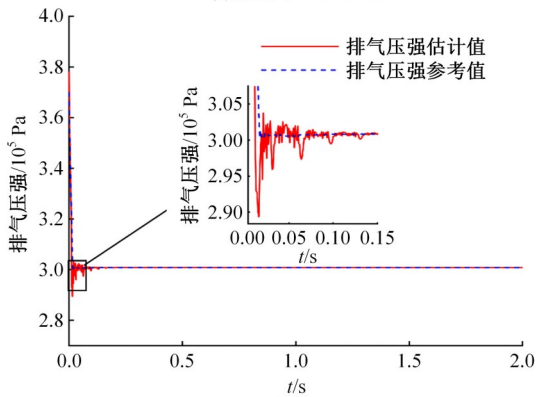


图 8 排气效率仿真结果

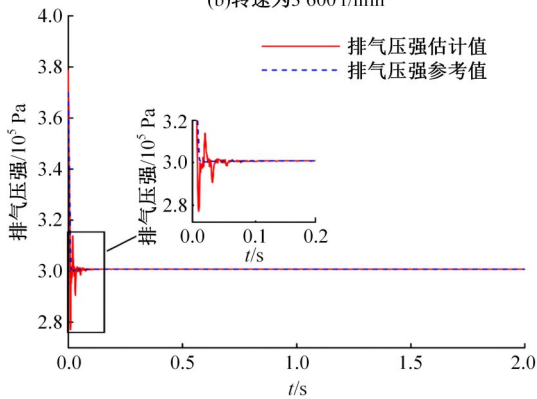
Fig. 8 Simulation results of exhaust efficiency



(a)转速为1 800 r/min



(b)转速为3 600 r/min



(c)转速为5 400 r/min

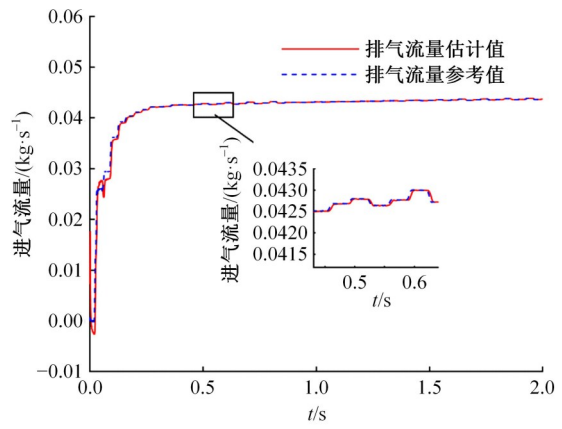
图 7 排气压强仿真结果

Fig. 7 Simulation results of exhaust pressure

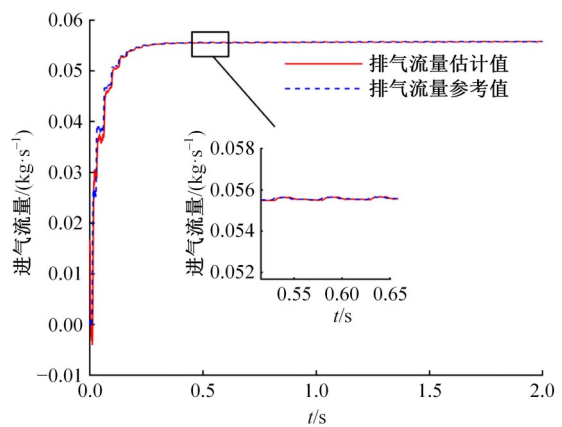
量的估计实验结果可以共同证明排气效率估计的有效性。

图 9 为排气流量估计值和排气流量参考值的对比实验结果。由图 9 可知,在不同转速条件下,排气流量估计值的变化趋势和排气流量参考值一致,仅存在局部微小差异。

为探究微小差异对排气量估计的影响,本文对排气质量估计值和排气质量参考值的误差进行



(a)转速为1 800 r/min



(b)转速为3 600 r/min

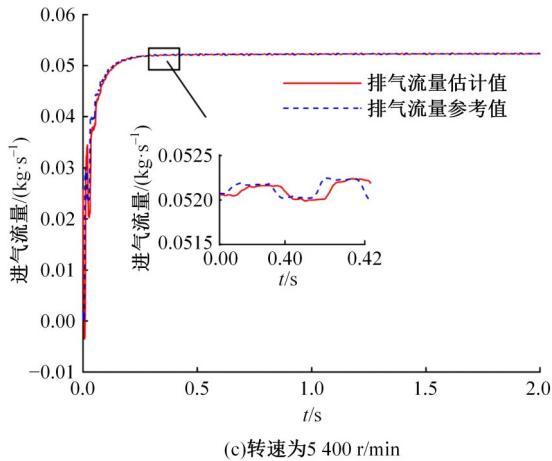


图9 排气流量仿真结果

Fig. 9 Simulation results of exhaust mass flow

分析。排气质量估计值和排气质量参考值均通过对相应排气流量的积分运算获得。

定义排气质量误差为排气质量估计值与排气质量参考值的差值。如图10所示,内燃机进入稳态后,排气质量误差迅速收敛至 -2×10^{-4} 量级并持续减小。在工程实践中,该累积误差量级可忽略不计,表明局部流量微小差异的累积效应对排气量估计无显著影响。

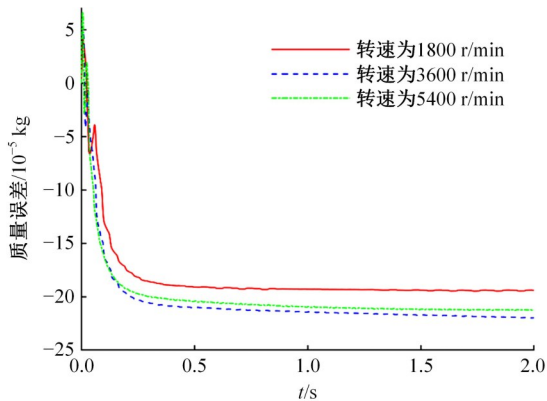


图10 排气质量误差仿真结果

Fig. 10 Simulation results of exhaust quality error

4 结束语

本文针对氢内燃机排气流量测量问题,提出一种基于自适应观测器的排气流量估计方法。首先,建立了氢内燃机排气系统模型,并进行了离散化处理;其次,基于排气系统模型搭建了自适应观测器,并对其收敛性进行了分析;最后,为验证排气效率预测的准确性,分别进行了进气系统流量估计实验和排气系统流量估计实验。GT-SUITE与Simulink联合仿真结果表明,本文方法

在稳态及不同转速的瞬态工况下均能有效估计排气压强等内燃机关键状态量,并实现对排气流量的精准估计,展现出良好的工况适应性。

参考文献:

- [1] Stępień Z. Analysis of the prospects for hydrogen-fuelled internal combustion engines[J]. Combustion Engines, 2024, 197(2): 32-41.
- [2] Wróbel K, Wróbel J, Tokarz W, et al. Hydrogen internal combustion engine vehicles: a review[J]. Energies, 2022, 15(23): No. 8937.
- [3] Wang L J, Li X Y, Hong C, et al. Research and development of hydrogen-fueled internal combustion engines in China[J]. ACS Omega, 2023, 8(51): 48590-48612.
- [4] Frey H C, Unal A, Roupail N M, et al. On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53(8): 992-1002.
- [5] Zhou W B, Cao Z, Dou S Y, et al. 120 kHz mid-infrared TDLAS sensor for H₂O concentration and temperature measurement in rotating detonation engine exhaust flows[J]. Measurement, 2024, 234: No. 114787.
- [6] Liao J, Hu J X, Yan F W, et al. A comparative investigation of advanced machine learning methods for predicting transient emission characteristic of diesel engine[J]. Fuel, 2023, 350: No. 128767.
- [7] Giraldo M, Restrepo J C, Huertas J, et al. Signal synchronization methods when measuring tailpipe emissions with PEMS[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 129: No. 104154.
- [8] Regner G, Herold R E, Wahl M H, et al. The Achates power opposed-piston two-stroke engine: Performance and emissions results in a medium-duty application[J]. SAE International Journal of Engines, 2011, 4(3): 2726-2735.
- [9] Ma F K, Zhao C L, Zhao Z F, et al. Scavenge flow analysis of opposed-piston two-stroke engine based on dynamic characteristics[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(4): 1-11.
- [10] Zhou L, Li H, Chen Z Y, et al. Numerical simulation and optimization for combustion of an opposed piston two-stroke engine for unmanned aerial vehicle (UAV) [R]. Warrendale, PA: SAE International, 2020.
- [11] Yang W, Li X R, Kang Y, et al. Evaluating the

- scavenging process by the scavenging curve of an opposed-piston, two-stroke (OP2S) diesel engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 336-346.
- [12] Wang W X, Liang Y S, Zuo Z X, et al. Effects of multitype intake structures on combustion performance of different opposed-piston engines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 235: No. 121438.
- [13] Shiao Y, Moskwa J J. Cylinder pressure and combustion heat release estimation for SI engine diagnostics using nonlinear sliding observers[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995, 3(1): 70-78.
- [14] Poloni T, Dickinson P, Zhang J R, et al. Self-adaptive air-path health management for a heavy duty-diesel engine[J]. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 2023, 14(3): 1-18.
- [15] Liu Y. Robust adaptive observer for nonlinear systems with unmodeled dynamics[J]. *Automatica*, 2009, 45(8): 1891-1895.
- [16] Norouzi A, Heidarifar H, Shahbakhti M, et al. Model predictive control of internal combustion engines: A review and future directions[J]. *Energies*, 2021, 14(19): No. 6251.
- [17] Guzzella L, Onder C H. Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems [M]. Berlin: Springer, 2009: 30-40.
- [18] 高金武, 孙铂奇, 高炳钊, 等. 基于自适应观测器的发动机进气流量估计[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2020, 50(6): 1958-1966.
- Gao Jin-wu, Sun Bo-qi, Gao Bing-zhao, et al. Engine inlet flow estimation based on adaptive observer [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(6): 1958-1966.
- [19] Hendricks E, Chevalier A, Jensen M, et al. Modeling of the intake manifold filling dynamics[J]. *SAE Transactions*, 1996, 105(3): 122-146.
- [20] Hassani M V, Salehi R, Salarieh H, et al. Real-time estimation of the volumetric efficiency in spark ignition engines using an adaptive sliding-mode observer [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2015, 229(14): 1925-1933.
- [21] Zhang Q. Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(3): 525-529.
- [22] 杨伟, 马富康, 许俊峰, 等. OP2S 双燃料发动机气口匹配特性研究[J]. *重庆理工大学学报: 自然科学*, 2024, 38(4): 275-282.
- Yang Wei, Ma Fu-kang, Xu Jun-feng, et al. Study on port matching characteristic of the OP2S dual-fuel engine[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2024, 38(4): 275-282.