

发动机废气文丘里流量计回流结构应用分析

安宁,姚旺,张晨,栾军山

潍柴动力股份有限公司,山东 潍坊 261061

摘要:为提高废气文丘里流量计测量精度和边界适应性,对比不同废气测量方式,分析文丘里流量计结构及测量原理,设计具有回流测量结构的文丘里流量计,通过发动机台架试验对比分析有、无回流结构的文丘里流量计的测量精度和边界适应性。结果表明:有回流结构的文丘里流量计测量精度高于无回流结构,无回流测量结构的文丘里管的修正脉谱最小标定因数为 0.5,有回流测量结构的文丘里管的修正脉谱标定数系数为 0.9~1.1;无回流结构的文丘里流量计无法准确测量排气脉冲状态;有回流结构文丘里流量计适用于发动机不同的运行模式,有较高的边界适应性。

关键词:文丘里管;回流结构;测量精度;边界适应性

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)04-0062-05

引用格式:安宁,姚旺,张晨,等.发动机废气文丘里流量计回流结构应用分析[J].内燃机与动力装置,2022,39(4):62-66.

AN Ning,YAO Wang,ZHANG Chen,et al. Application analysis of measured backflow structure of exhaust Venture tube[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(4):62-66.

0 引言

柴油发动机具有良好的动力性和经济性,广泛应用于各种动力装置^[1],但也存在着 NO_x 和颗粒物(particulate matter,PM)排放高的缺点。随着国家标准对车用内燃机排放要求越来越高,为有效降低柴油机 NO_x 排放,废气再循环(exhaust gas re-circulation,EGR)技术的应用越来越广泛。

EGR 系统能够将一部分空气和柴油燃烧后的废气引入进气系统,使废气再次参与燃烧,提高进气系统中水和 CO_2 的比例^[2]。由于水和 CO_2 不参与化学反应,从而稀释了气缸内的混合气体,增大了混合气的比热容,降低了柴油机燃烧过程中缸内的峰值温度,同时 EGR 系统的稀释作用降低了混合气中氧气的体积分数,破坏 NO_x 生成所需的高温、富氧条件,降低了 NO_x 排放^[3-4]。因此,EGR 技术已成为控制柴油机 NO_x 排放的有效技术手段之一。

文丘里效应是指流体在流经变小的截面面积时出现的流速增大现象。流体流速增大,压力降低,在截面较小的位置(也称喉管)产生压差,形成对周围流体有吸附作用的负压^[5]。文丘里流量计作为一种流量测量装置,广泛应用于发动机 EGR 废气流量的测量,但由于发动机排气时存在压力脉冲,进气压力相对稳定,EGR 废气存在瞬时回流现象,导致文丘里流量计测量误差较大,无法精确测量出此时的废气状态。

本文中设计一种具有回流测量结构的文丘里流量计,当废气正向流动时,与传统文丘里管相似;当废气反向流动时,采用皮托管原理判断气流流动状态,通过发动机台架试验对比有、无回流测量结构的文丘里流量计的测量精度及边界适应性。

收稿日期:2021-10-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3503205);山东省重点研发计划项目(2021CXGC010703)

第一作者简介:安宁(1984—),女,内蒙古呼伦贝尔人,工学硕士,工程师,主要研究方向为机械设计,E-mail:ann@weichai.com。

1 EGR 测量方式及文丘里流量计

1.1 EGR 测量方式

为满足国家排放标准以及整车动力性要求,精确控制通过 EGR 引入的废气至关重要^[6]。

带 EGR 系统的发动机可通过测量新鲜进气量、废气流量或废气中氧气的体积分数等参数实现对 EGR 阀的精确控制,不同测量方式的测量参数、安装位置和敏感性如表 1 所示。由表 1 可知,废气文丘里流量计具有相对良好的测量精度以及发动机和整车的应用边界适应性,广泛应用于柴油机。

表 1 不同测量方式的测量参数、安装位置和敏感性

测量方案	测量参数	安装位置	测量敏感性
热模式流量计	新鲜进气量	空滤器与压气机之间	对气体流速敏感,管路适用性差
进气文丘里流量计	新鲜进气量	中冷前或中冷后	对管路容积比较敏感,适应性差
废气文丘里流量计	废气再循环量	EGR 冷却器与混合器之间	前后管路布置在发动机,边界适应性好
氮氧传感器	废气中氧体积分数	涡轮增压器后排气尾管	富氧燃烧工况测量精度差

1.2 文丘里流量计的结构及测量原理

文丘里流量计主要包括文丘里管、压差传感器、压力传感器和温度传感器。文丘里管由圆筒段(也称入口段)、收缩段、喉部和扩散段等组成,结构如图 1 所示,其中喉部直径小于圆筒段直径,此处的气体流速大于入口处气体流速,气体在管内流动时的流速增大,压力降低^[7],可以根据 A、B 2 处流速差异产生的压差计算流经文丘里管的流体流量。气体在收缩形喉口部位流动时速度增加,压力降低;在扩散段通道内流动时,速度减小,压力升高,从而减小了喉口段带来的压力损失^[8-10]。

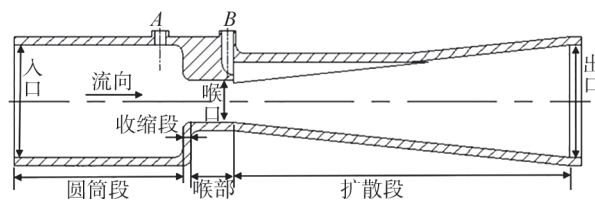


图 1 文丘里管结构图

基于伯努利原理改变流体流速产生静压压差^[11],根据传感器测量结果计算得到 EGR 废气的质量流量。

废气质量流量

$$q_m = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \sqrt{2\Delta p \rho_1}, \quad (1)$$

式中: d 为文丘里管喉口直径,m; C 为通过装置的实际流量与理论流量之间关系的因数; β 为文丘里管喉口直径与入口直径的比; ε 为膨胀因数; Δp 为文丘里管入口与喉口的静压差,Pa,由文丘里压差传感器测量得到; ρ_1 为废气密度, kg/m^3 ,通过废气温度和压力计算。

1.3 文丘里管结构对比

实现 EGR 的前提条件为发动机排气压力高于进气压力,但由于发动机排气时存在压力脉冲,虽然平均排气压力高于进气压力,理论上废气由排气侧到进气侧,但在部分负荷工况点会出现中冷器后进气压力高于涡轮前压力^[12],此时排气压力处于波谷,存在瞬时反向回流,若无法识别该状态会影响废气流量的测量精度。

传统结构的文丘里流量计(无测量回流结构)测量压差时,流体的正向流动和反向回流测量压差均为正,即使气流反向流动,喉口处流速依然大于入口流速,入口压力大于喉口压力。基于皮托管原理在文丘里管喉口处设计回流测量结构,当出现反向流动时,在喉口处测量废气总压,入口处为静压,此时压差测量结果为负,通过压差传感器采集该信号计算流量,可以提高测量精度。

有、无回流测量结构的废气文丘里管结构对比如图2所示。

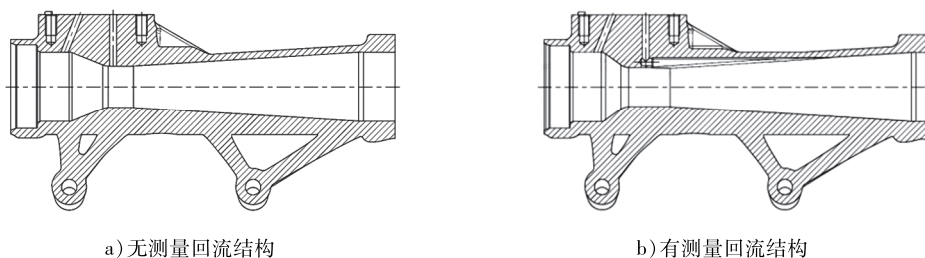


图2 有、无回流测量结构的文丘里管结构对比

2 试验验证

2.1 文丘里流量因数标定

文丘里结构确定后,式(1)中的 β 、 d 为定值, ε 根据文献[13]进行标定,压差和流体密度由压差传感器、温度传感器和压力传感器测量计算得到,根据式(1)计算废气质量流量。控制发动机运行在高速高负荷工况,调节EGR阀开度,根据台架测量EGR率和进气量计算实际的废气流量,与文丘里计算结果对比,标定流量因数 C 。 C 与文丘里管结构和流体相关,具体取值通过试验确定^[14]。由于发动机实际运行过程中存在瞬时回流,设计基于雷诺数的正向流量因数和负向流量因数。完成标定的正向流量因数如图3所示,由于正常使用过程中瞬时负向流动占比很少,因此负向流量因数标定为常数1。

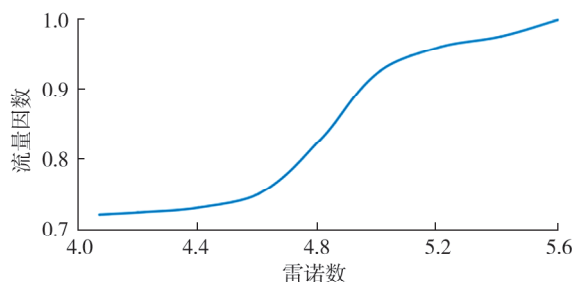


图3 文丘里流量因数与雷诺数的关系

2.2 测量精度对比

不同负荷下的发动机排气脉冲不同,单一工况标定的流量因数 C 可能不适用于全部工况,因此EGR控制策略中增加基于转速和废气流量的修正脉谱,满足全工况范围的精度要求。增加基于转速和废气流量的修正脉谱,在式(1)的基础上与修正因数相乘,得到当前工况的废气流量,保证与台架计算结果相同。有、无回流测量结构的文丘里的修正脉谱如图4所示。

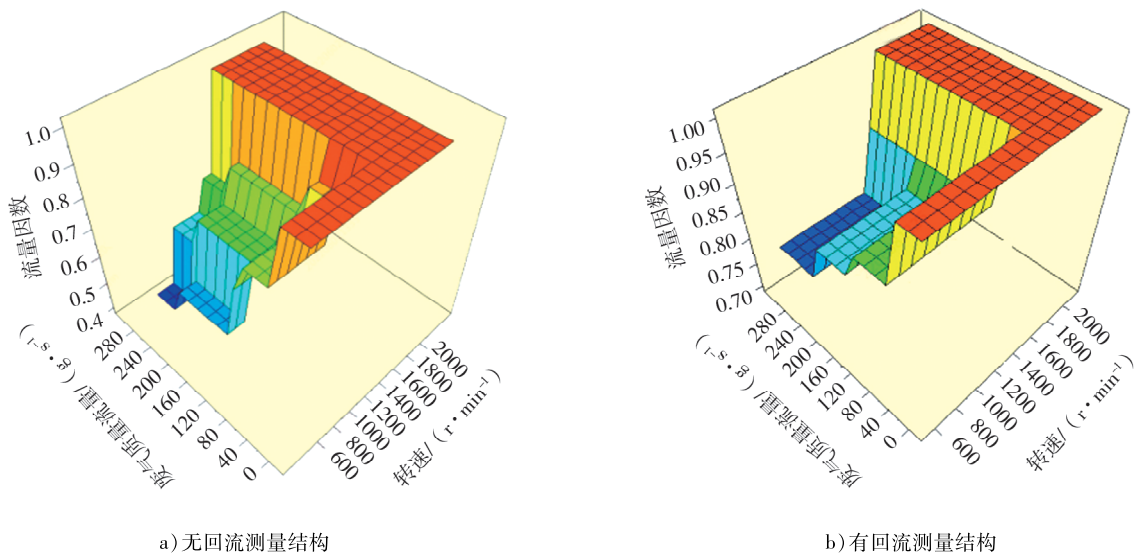


图4 正常模式下有、无回流测量结构文丘里修正脉谱对比

由图4可知:不带回流测量结构的文丘里管的修正脉谱最小标定因数为0.5,当发动机运行在中、低转速和中、高废气流量工况时,EGR驱动压差为负,无回流测量结构无法准确测量排气脉冲状态,导致在标定时将修正因数设为较小数值才能使文丘里计算的废气流量和实际测量的废气流量相吻合;有回流测量结构的修正脉谱标定因数为0.9~1.1。因此,在发动机同一工况标定流量因数后,有回流测量结构的文丘里管测量精度高于无回流测量结构。

根据发动机发火顺序,有、无回流测量结构文丘里流量计测量的6缸发动机的第1~3缸的排气脉冲压差随曲轴转角的变化如图5所示,排气冲程起点从每个周期的波谷开始,循环往复^[15]。由图5可知:无回流测量结构的文丘里管压差传感器测量的压差大于有回流测量结构的,根据式(1)计算的废气质量流量偏高,应采用更小的修正因数才能与台架气体分析仪测量的实际废气流量相等。这是因为当排气脉冲处于波谷时,存在瞬时的回流趋势,但未达到真正的回流,此时无回流测量结构无法测量脉冲在波谷时的压差,使在脉冲波谷时压差测量结果偏高,计算的废气流量偏高。带回流测量结构的文丘里管能够有效测量瞬时排气脉冲时的压差信号,实时准确测量废气流经文丘里管时的状态,有效提升测量精度。

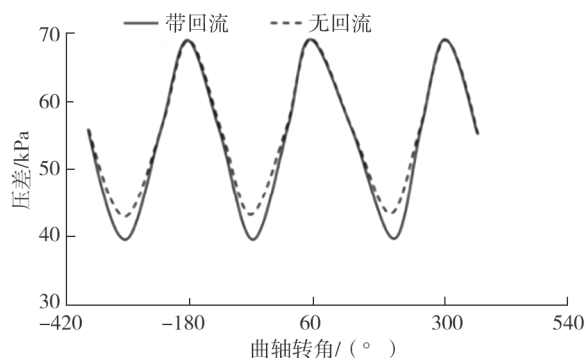


图5 有、无回流测量结构文丘里压差变化曲线

2.3 边界适应性对比

发动机正常工作模式下,标定文丘里流量因数以及修正脉谱,即使修正因数比较小,也可以保证发动机整个工况范围内废气流量的精度。但在加热模式(提排温模式)下,需关闭部分进气节流阀,减少进气量,使燃烧过程恶化,从而提升排气温度,满足后处理需求。加热模式下有无、回流测量结构修正脉谱如图6所示。

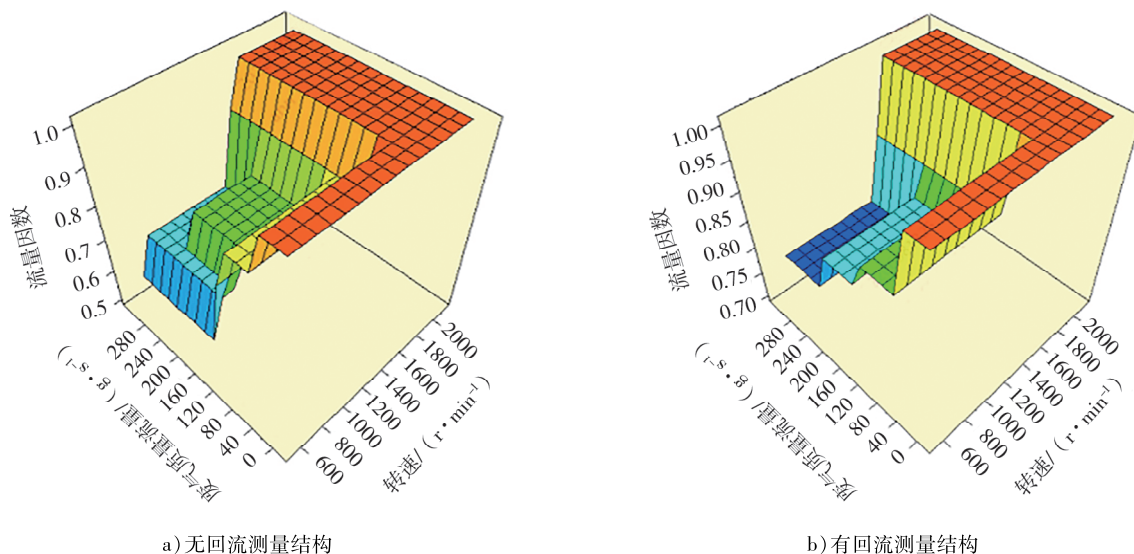


图6 加热模式下有无、回流测量结构修正脉谱

由图6可知:发动机加热模式下,进气节流阀起作用区域的中、低速大流量(中、低负荷)工况的修正因数与正常模式下的修正因数相差较大。当发动机进、排气压差变化时,无回流测量结构的文丘里管测量精度受到较大影响,如采用与正常模式相同的修正脉谱无法满足要求,需要重新标定该脉谱。而带回流测量结构文丘里管的修正脉谱采用与正常模式相同的修正数据也能够满足要求。由于能够有效识别排气脉冲状态,带回流测量结构文丘里管有良好的进、排气压差适应性。

3 结论

1) 发动机废气文丘里流量计增加回流测量结构后能够有效测量瞬时排气脉冲,实时准确测量废气流经文丘里管时的状态,有效提升测量精度。

2) 文丘里流量计增加回流测量结构后,由于能够有效识别排气脉冲状态,有良好的进、排气压差边界适应性。

参考文献:

- [1] 李勤. 现代内燃机排气污染物的测量与控制[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 鹿文慧,江楠,许帅,等. 一种文丘里 EGR 方案的废气流量计算方法[J]. 内燃机与动力装置,2019,36(6):64-67.
- [3] 李环. WD615 柴油机增压系统匹配分析及试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2010.
- [4] 张正兴,赵文辅,李科,等. 基于 PID 的柴油机闭环 EGR 控制策略研究[J]. 汽车技术,2014(5):54-57.
- [5] 黎娜,王孔龙. 文丘里管在国六排放标准中的应用分析[J]. 北京汽车,2019(3):6-8.
- [6] 张腾,韩文涛,田占勇,等. 天然气发动机 EGR 系统应用研究[J]. 内燃机与动力装置,2020,37(4):80-85.
- [7] 沈维道,蒋智敏,童钧耕. 工程热力学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2001:232-255.
- [8] 王海军. 文丘里管射流装置的结构及工作原理[J]. 西南科技大学学报,2004,19(2):41-44.
- [9] 张也影. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,1992.
- [10] 王泓亮,邓康耀,朱义伦,等. 文曲利管排气再循环系统在涡轮增压柴油机上的应用研究[J]. 内燃机学报,2002,20(2):129-132.
- [11] 罗惕乾. 流体力学[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2008.
- [12] 王琦玮,倪计民,陈泓,等. 文丘里管废气再循环系统对涡轮增压柴油机性能影响的研究[J]. 机械工程学报,2016,52(4):157-164.
- [13] 中国机械工业联合会. 安装在圆形界面管道中的压差装置测量满流体流量 第 3 部分:喷嘴和文丘里管:GB/T 2624.3—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [14] 梁邦岳,朱万冬,谢正良. 基于文丘里管测量的 EGR 闭环控制试验研究[J]. 天津科技,2020,47(2):43-46.
- [15] 周龙保. 内燃机原理[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

Application analysis of measured backflow structure of exhaust Venturi tube

AN Ning, YAO Wang, ZHANG Chen, LUAN Junshan

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to improve the measurement accuracy and boundary adaptability of the exhaust gas Venturi flowmeter, different exhaust gas measurement methods are compared, and the structure and measurement principle of the Venturi flowmeter are analyzed, a Venturi flowmeter with backflow measurement structure is designed. The measurement accuracy and boundary adaptability of Venturi flowmeter with and without backflow structure are then compared and analyzed through engine bench test. The results show that the measurement accuracy of the Venturi flowmeter with backflow measurement structure is higher. The minimum calibration factor of the modified pulse spectrum of the Venturi without backflow measurement structure is 0.5, and the calibration number coefficient of the modified pulse spectrum of the Venturi with backflow measurement structure is 0.9~1.1. The Venturi flowmeter without backflow measurement structure cannot accurately measure the exhaust pulse state, the Venturi flowmeter with backflow measurement structure is applicable to different operating modes of the engine and has high boundary adaptability.

Keywords: Venturi tube; backflow structure; measurement accuracy; boundary adaptability

(责任编辑:刘丽君)