

# 废气再循环率的测量方法及其分析

周英杰

(同济大学中德学院车辆工程, 上海 201804)

**摘要:** 废气再循环技术, 简称 EGR (exhaust gas recirculation), 是发动机上用于降低废气中 NO<sub>x</sub> (氮氧化物) 含量的有效手段。但 EGR 是以牺牲发动机性能为代价实现的, 因此必需严格控制各个工况点下的废气再循环率, 即 EGR 率, 在减少 NO<sub>x</sub> 排放的同时尽可能避免对发动机功率、HC (碳氢化物)、颗粒等因素的负面影响。为此必需获得尽可能准确的 EGR 率, 文政介绍了几种用于 EGR 系统的 EGR 率测量方法。

**关键词:** 废气再循环; 发动机; 测量; 传感器

## 1 对 EGR 系统传感器的要求

根据 EGR 率的定义

$$EGR = \frac{m_E}{m_E + m_A} \quad (1)$$

式中,  $m_A$  为新鲜进气,  $m_E$  为循环废气。

为获得 EGR 率必需知道废气流量。不论是直接测量废气流量, 还是通过测量体积流量和密度, EGR 测量装置相对空气流量计受到的更高的热、化学和机械负载, 因为废气的温度高, 并伴有污染物和未燃烧化学成分。

对于用于试验台架上的 EGR 测量装置有下列要求: 精度, 重复性, 快速响应能力, 高信噪比, 健壮性 (抗干扰能力)。

对于车用 EGR 测量装置还需满足以下要求: 低成本, 小体积, 维护周期长。

## 2 通过混合温度确定 EGR 率

废气再循环过程实质上是废气和新鲜进气的热力学混合过程, 混合过程可视为气体的绝热变化。设新鲜进气的压力和温度:  $P_A$ ,  $T_A$ ; 循环废气的压力和温度:  $P_E$ ,  $T_E$

根据气体的热力学平衡方程可以得到

$$T_\Sigma \cdot (\dot{m}_A \cdot c_{pA} + \dot{m}_E \cdot c_{pE}) = \dot{m}_A \cdot c_{pA} \cdot T_A + \dot{m}_E \cdot c_{pE} \cdot T_E \quad (2)$$

将(1)代入(2)可得

$$EGR = \frac{1}{1 + \frac{c_{pE} \cdot (T_E - T_\Sigma)}{c_{pA} \cdot (T_\Sigma - T_A)}} \quad (3)$$

假如忽略定压比热的差距, 设  $c_{pA} = c_{pE}$ , 公式可改写为

$$EGR = \frac{T_\Sigma - T_A}{T_E - T_A} \quad (4)$$

用温度差来确定 EGR 率有一个严重的缺陷, 当进气和废气温度相差不大时, 比如现在普遍使用的 EGR 冷却系统, 相对测量误差显著增大。因此这种方法使用不多。

## 3 通过 CO<sub>2</sub> 浓度变化确定 EGR 率

这是发动机试验台上使用最多的用于测量 EGR 率的方法, 被称为示踪气体法。挑选 CO<sub>2</sub> 作为示踪气体 (Tracer-Gas) 是因为它在测量过程中既不会新生成, 也不会被消耗。通过 CO<sub>2</sub> 在混合过程的稀释确定 EGR 率。

$$EGR = \frac{[CO_2]_\Sigma}{[CO_2]_E} \quad (5)$$

这种方法存在 2 种引起测量误差的因素:

(1) 忽略了新鲜空气中的 CO<sub>2</sub> 含量。

将准确的关系式  $EGR = \frac{[CO_2]_\Sigma - [CO_2]_A}{[CO_2]_E - [CO_2]_A}$  简化为

(5), 其相对误差为  $\frac{EGR_{\text{测量值}} - EGR_{\text{真实值}}}{EGR_{\text{真实值}}}$

设环境空气中的 CO<sub>2</sub> 浓度为 500 ppm, 绘出相对测量误差与进气及废气中 CO<sub>2</sub> 含量的关系图。

(2) 用于浓度测量的 NDIR (分光红外线气体分析仪)测得的是体积浓度, 而 EGR 定义使用的是质量浓度。

$$EGR = \frac{\dot{m}_E}{\dot{m}_\Sigma} = \frac{\dot{m}_{CO_2}/\dot{m}_\Sigma}{\dot{m}_{CO_2}/\dot{m}_E} = \frac{\dot{V}_{CO_2} \cdot R_\Sigma}{\dot{V}_\Sigma \cdot R_{CO_2}} = \frac{[CO_2]_E \cdot R_E}{[CO_2]_\Sigma \cdot R_\Sigma}$$

CO<sub>2</sub> 法忽略了废气和混合气体的气体常数的不同,

$$\frac{R_\Sigma}{R_E} = 1。$$

在稀释机理方面理论上也可以将气态水作为示踪气体, 用湿度传感器测量 EGR 率。但当前的湿度传感器不适合这种测量, 因为需要测量进、排气管和环境的温度和压力, 这是耗费很大的。

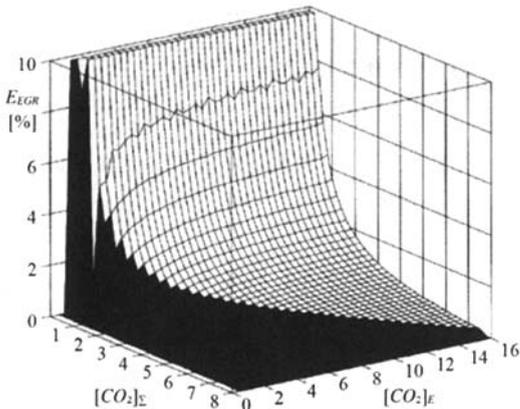


图1 忽略环境空气 CO<sub>2</sub> 含量的 EGR 率测量误差

#### 4 通过额外的空气流量计确定 EGR 率

这种方法既可用于发动机试验台架, 也可用于汽车上。在动态特性方面这种方法有优势, 因为传感器在设计时就考虑了空气质量流量的动态采集性能。但是在汽车上安装空气流量传感器的花费很大, 是除 ECU 之外最昂贵的发动机电控配件。

当前的发动机控制使用卡曼涡流传感器和热线/

热膜传感器。

卡曼涡流法的原理是, 流体通过特定形状的障碍物后产生涡流, 其频率与体积流量成一定比例。涡流频率可以通过测量压力或垂直于流动方向传播的超声波来确定。卡曼涡流法对测量进气有效, 但不适合测量废气流量。因为废气中含有远多于进气的杂质, 用于引起涡流的障碍由于污染而改变形状, 使涡流发生相应变化, 而且对超声波的测量也受到随气体流动的固体颗粒的影响。

热量流量计的原理是: 为保持元件的温度不变所需的加热电流与所测量的气体质量流量成比例。传感器受杂质污染后, 热传递受到干扰而影响测量信号。这个问题可以通过使杂质自然而减轻。由于耐久性和功率消耗的缘故, 测量温度不能随意提升, 稳态工况下被测气体的温度不应超过 120°C。杂质污染和测量温度的问题都可以通过空气流量计的布置改善, 例如将流量计布置在混合腔, 然后用测得的总流量减去进气流量获得循环废气的流量。

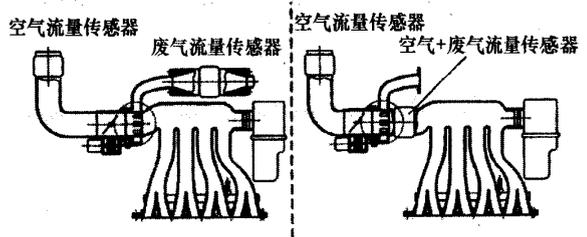


图2 空气流量传感器的布置方式

#### 5 通过进气管压力确定 EGR 率

通过压力测量流量的根据是文丘里原理, 通过减小流通截面使低于当地音速的流体速度增大而压力下降。根据贝努利方程  $P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = const$ 。这里忽略势能项  $\rho g z$  压力的下降同流体速度有确定的关系, 压力传感器用这种方法测量新鲜进气同废气混合后的进气管压力。由于这种测量方式会引起进气管中的压力下降, 使进、排气管之间的压力差发生变化, 从而对 EGR 率产生影响。因此压力差必需控制在小范围变动, 这就需要高分辨率的压力传感器。

理论的气体流量可以通过发动机的转速和排量确定。

$$\dot{V}_h = n \cdot V_H \cdot z$$

式中,  $n$  为转速,  $V_H$  为工作容积,  $z$  为每转的工作循环数 (例如 4 缸发动机  $z=2$ )。

实际的体积流量还需考虑进气过程中的节流效应, 也就是环境压力和进气管压力的差  $\dot{V}_{re} = f(p_2, n)$

$$\text{设流通系数 } \alpha = \frac{\dot{V}_{re}}{\dot{V}_h}$$

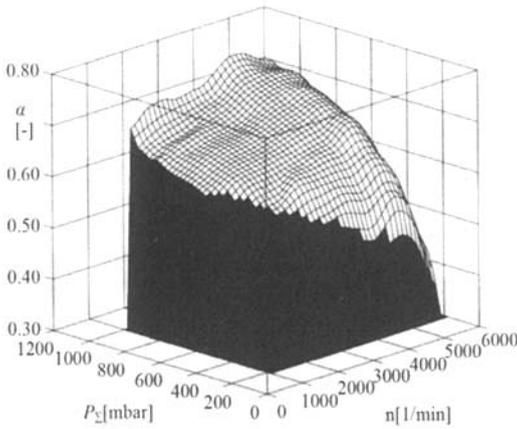


图3 流通系数相对进气管压力和发动机转速的特性曲线

根据理想气体状态方程  $p \cdot \dot{V} = \dot{m} \cdot R \cdot T$ , 知道了体积流量, 加上测量得到的  $p$ , 就能计算出混合后的气体质量流量。用混合后的气体质量减去新鲜进气量就能得到循环废气量, 也就得到了 EGR 率。

### 6 对几种方法的比较

为比较基于不同机理的测量方法, 选出最优方案, 进行了实验比较。空气流量计选用 Bosch 公司的 HFMS, 压力传感器选用 Keller 公司的压阻式压力传

感器, CO<sub>2</sub> 浓度测量装置选用 Horiba 公司的快速响应 NDIR, EGR 阀使用日本 DENSO 的升程传感器, 通过多相电动机进行无级调节。

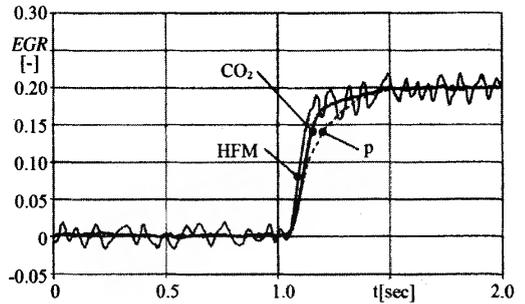


图4 上述几种方法的比较

从图上看, 3 种方法对于 EGR 率的测量都是可行的。HFM 方法的曲线产生了振荡, 需要通过额外的信号处理装置, 在信号处理上的花费相当高。用压力测量获得 EGR 率必需知道进气量同进气压力的关系。CO<sub>2</sub> 方法的信号处理最简便, 但取样的花费很高, 所以其应用还局限于发动机试验台上。

### 参考文献

- [1] Christoph Wagner. Untersuchung der Abgasrückführung an Otto- und Dieselmotor[J]. VDI Verlag GmbH Düsseldorf 1999.
- [2] 康乐明, 李力能, 吴家正, 潭羽飞编, 工程热力学(第4版)[M]. 中国建筑工业出版社.
- [3] Bernd Bareis, Thomas Blank, Gunnar Deichmann, Bernhard Flaig, Abgasrückführsysteme Emissionssenkung bei Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor[J]. Verlag moderne Industrie.
- [4] Axel Poehls. Untersuchung eines Verfahrens zur gesteuerten Abgasrückführung bei Ottomotoren.
- [5] 秦文新, 程熙. 排气净化与噪声控制[M]. 人民交通出版社.
- [6] 建晰, 傅立新, 黎维彬. 汽车排气污染治理及催化转化器[M]. 化学工业出版社.

收稿日期:2007-06-11

# 废气再循环率的测量方法及其分析

作者: [周英杰](#)  
 作者单位: [同济大学中德学院车辆工程, 上海, 201804](#)  
 刊名: [交通节能与环保](#)  
 英文刊名: [MARINE ENERGY SAVING](#)  
 年, 卷(期): 2007, (3)  
 引用次数: 0次

## 参考文献(6条)

1. [Christoph Wagner](#) [Untersuchung der Abgasrückführung an Ottound Dieselmotor](#) 1999
2. [康乐明](#), [李力能](#), [吴家正](#), [潭羽飞](#) [工程热力学](#)
3. [Bernd Bareis](#), [Thomas Blank](#), [Gunnar Deichmann](#), [Bernhard Flaig](#), [Abgasrückführsysteme Emissionssenkung bei Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor](#)
4. [Axel Poehls](#) [Untersuchung eines Verfahrens zur gesteuerten Abgasrückführung bei Ottomotoren](#)
5. [秦文新](#), [程熙](#) [排气净化与噪声控制](#)
6. [建晰](#), [傅立新](#), [黎维彬](#) [汽车排气污染治理及催化转化器](#)

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 [吴君华](#), [黄震](#), [乔信起](#), [张武高](#), [WU Jun-hua](#), [HUANG Zhen](#), [QIAO Xin-qi](#), [ZHANG Wu-gao](#) [废气再循环对增压二甲醚发动机性能和排放影响的试验研究 - 内燃机学报](#)2008, 26(2)  
 在一台增压二甲醚发动机为研究对象, 研究废气再循环(EGR)对二甲醚发动机性能和排放的影响. 试验结果表明, EGR率增大, 进气量减少, 低负荷下, 适当的EGR量会使发动机的油耗率降低. 在中高负荷下, EGR的加入会导致油耗率增大, 经济性恶化. 随着EGR率的增加, 发动机NO<sub>x</sub>排放大幅度下降, 高负荷时下降幅度更大. EGR率增大, HC排放上升. EGR率在一定范围内时, EGR率对CO排放影响不大, 但当EGR率超过一定范围时, EGR率增加会引起CO排放急剧加大. EGR率对二甲醚发动机的碳烟排放影响不大, 碳烟排放测试值保持为零. 在二甲醚发动机上采用废气再循环, 没有碳烟增大的压力, 确定各工况下的最佳EGR率时, 只需在NO<sub>x</sub>排放和燃油经济性以及CO之间进行折中. 低负荷时可以采用大的EGR率, 高负荷时EGR率不宜过大.
2. 期刊论文 [姚春德](#), [敬章超](#), [傅晓光](#), [刘文胜](#), [傅德才](#) [冷却废气再循环对发动机性能影响的试验研究 - 汽车工程](#) 2003, 25(6)  
 在一台双顶置凸轮轴、16气门的四缸汽油机上, 研究了不同结构的EGR进气方式以及不同EGR进气温度对发动机综合性能的影响. 结果表明: 冷却的EGR可以更大幅度地降低NO<sub>x</sub>生成量, 同时可以获得更好的发动机动力性和经济性. 另外, 试验结果还表明, 对每一个工况来说, 两者都存在一个最佳的EGR率.
3. 期刊论文 [刘德新](#), [赵新顺](#), [LIU Dexin](#), [Zhao Xinshun](#) [废气再循环对HCCI发动机UHC和CO排放的影响 - 农业机械学报](#)2005, 36(2)  
 在中、低温化学反应分解链的基础上阐明了内部废气再循环(EGR)的作用, 试验了火花点火和稳定燃烧在高EGR水平时的可能性, 证实了第一阶段着火之前预燃反应的重要性, 分析了未燃碳氢化合物(UHC)和CO的来源, 指出了降低UHC和CO排放的有效方法, 将预燃反应和可靠的火花点火、稳定的火焰传播与减少UHC和CO排放有效地联系在一起, 指出了UHC和CO主要来自燃烧室余隙中的燃料, 证实了影响UHC和CO排放的主要因素不是燃烧温度.
4. 期刊论文 [宋睿智](#), [李珂](#), [刘圣华](#), [霍卫红](#) [深度废气再循环对二甲醚发动机性能及排放的影响 - 西安交通大学学报](#) 2009, 43(11)  
 在一台两缸二甲醚发动机上开展了不同废气再循环(EGR)率下发动机的性能和排放特性研究, 测量了不同工况下发动机的油耗, HC、CO和NO<sub>x</sub>的排放. 研究表明: 二甲醚发动机可承受的最大EGR率接近60%, 但在高负荷时, 过大的EGR率会导致发动机燃油消耗率显著升高; EGR率对发动机的NO<sub>x</sub>排放量影响很大, 随着EGR率的增加, 发动机的NO<sub>x</sub>排放量大幅度下降, 高负荷时下降幅度更大; EGR率增大, HC和CO排放增加, 高负荷时增加的幅度更大, 特别是当EGR率超过一定范围时, EGR率的增大会引起HC和CO排放的急剧增加; 低负荷时, 最佳EGR率应保持在30%左右, 而高负荷时, 应采用较小的EGR率.
5. 期刊论文 [王婕](#), [黄佐华](#), [刘兵](#), [WANG Jie](#), [HUANG Zuohua](#), [LIU Bing](#) [天然气掺氢配合废气再循环发动机燃烧过程的数值模拟 - 西安交通大学学报](#)2009, 43(5)  
 基于AVL-FIRE软件, 数值模拟了掺氢比为20%、不同当量比(0.9~1.4)、不同废气再循环率(0~0.25, 指废气的质量分数)的情况下, 天然气掺氢发动机缸内压力、温度、氮氧化物随曲轴转角的变化规律及其三维空间分布. 缸内压力的计算值与实测值达到很好的吻合, 表明模拟计算能进行天然气掺氢发动机的燃烧分析. 计算结果表明: 当天然气掺氢发动机使用废气再循环(EGR)后, 缸内温度、压力、放热量和NO质量分数都降低, NO出现的时刻推迟. 废气再循环率大于15%时, NO质量分数降低的速度已不明显. 使用EGR是降低NO排放最直接和最有效的手段. 在过量空气系数1.1处, NO生成量最高. 稀薄燃烧也是天然气掺氢发动机实现低NO排放的重要手段.
6. 期刊论文 [周冬](#) [发动机废气再循环净化系统 - 中国环保产业](#)2004(8)  
 较为全面地分析了发动机废气再循环系统的基本原理和控制过程.
7. 期刊论文 [姜雪](#), [胡二江](#), [巩静](#), [黄佐华](#), [JIANG Xue](#), [HU Erjiang](#), [GONG Jing](#), [HUANG Zuohua](#) [天然气掺氢配合废气再循环发动机的性能及排放研究 - 西安交通大学学报](#)2009, 43(5)  
 在一台火花点火天然气发动机上开展了不同掺氢比 $\phi$ (H<sub>2</sub>)和废气再循环率 $\phi$ 下发动机性能和排放的实验研究. 研究表明: 引入废气再循环(EGR)会使发动机功率降低, 但掺氢可以提高大 $\phi$ 值工况下的发动机功率. 有效燃油消耗率随 $\phi$ 的增大呈现先减小后增大的趋势, 在 $\phi$ 为5%时达到最低, 有效燃油消

耗率随  $\phi$  (H2) 的增大而降低。天然气掺氢后NOx排放增加, 引入EGR使NOx排放得到降低, 此降低效果在大掺氢比情况下更为显著。在  $\phi$  较大时, 天然气掺氢具有较好的效果。HC和CO排放随  $\phi$  的增大而增加, 随  $\phi$  (H2) 的增大而降低。当  $\phi$  为10%、 $\phi$  (H2) 为20%时, 发动机可获得较好的综合性能。

8. 会议论文 [何超, 纪常伟, 何洪 废气再循环改善均质压燃发动机高负荷爆燃的试验研究 2008](#)

针对均质压燃发动机高负荷易爆燃的问题, 在一台均质压燃发动机上加装废气再循环装置, 把燃烧废气冷却后引入到进气中, 在台架上进行试验并验证其可行性。试验结果表明, 采用高浓度的EGR能够有效抑制HCCI发动机的爆震并拓宽高负荷的工况范围, 发动机峰值压力升高率降低, 着火时刻推迟, 有效放热时间增长, 缸内最大压力峰值降低。

9. 期刊论文 [张齐斌, ZHANG Qi-bin 发动机废气再循环净化系统分析 -铜业工程2008\(4\)](#)

有关分析发动机废气再循环系统的文章很多, 但着重点各有不同, 且深浅度不一。本文通过深入浅出的分析、简洁的文字叙述、合理地插图配置, 将废气再循环系统的意义、工作原理、实施原则、主要零件和整体组成等知识重点糅合在一起, 较为全面地分析了该系统的基本原理和控制过程, 有助于专业人员更快地掌握该系统的全面知识, 为合理运用、改善该项技术打好基础。为满足技改需求, 扩大生产能力, 武山铜矿的二期扩产设计采用下向分级尾砂胶结充填新工艺试验研究, 通过研究改进胶结充填工艺过程、取消钢筋混凝土人工假底、扩大回采断面来扩大生产规模, 提高工作效率。

10. 期刊论文 [何超, 纪常伟, 何洪, He Chao, Ji Changwei, He Hong 废气再循环改善均质压燃发动机高负荷爆燃的试验研究 -小型内燃机与摩托车2009, 38\(1\)](#)

针对均质压燃发动机高负荷易爆燃的问题, 在1台均质压燃发动机上加装废气再循环装置, 把燃烧废气冷却后引入到进气中, 在台架上进行试验并验证其可行性。试验结果表明, 采用高浓度的EGR能够有效抑制HCCI发动机的爆燃并拓宽高负荷的工况范围, 发动机峰值压力升高率降低, 着火时刻推迟, 有效放热时间增长, 缸内最大压力峰值降低。

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_cbjn200703008.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cbjn200703008.aspx)

下载时间: 2010年3月20日