

汽油机

●张雨 著●

瞬态排放分析

国防科技大学出版社

北科院
2024.11

汽油机瞬态排放分析

The Analysis on Transient Exhaust of Gasoline Engine

张 雨 著

TK41

1

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

汽油机瞬态排放分析/张雨著. —长沙:国防科技大学出版社, 2005. 2
ISBN 7-81099-172-8

I. 汽… II. 张… III. 汽油机-排气-分析 IV. TK411
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 023893 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gdtbooks@public.cs.hn.cn

责任编辑:石少平 责任技审:黄煌

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:6.125 字数:157 千

2005 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-1000 册

ISBN 7-81099-172-8/TK·1

定价:14.00 元



作者简介

张雨 (1958 —), 教授, 轮机工程博士, 机械工程博士后。

自上世纪90年代中期开始致力于汽车检测理论与状态智能监测技术的研究。主持并参加了国家自然科学基金项目2项、省部级科研课题10项, 其中有7项课题经政府科研成果鉴定达到国际先进水平或国内领先水平。获得省部级各种科研奖励10项、出版学术专著4部及专业工具书1部、公开发表科研论文100余篇, 其中有17篇进入SCI、EI、ISTP国际三大检索系统。

本书由

国家自然科学基金(编号 50176006)
长沙理工大学学术著作出版基金

联合资助出版

内容简介

对于汽油机瞬态工况下的排放问题,引述了汽油机主要排放污染物的生成机理及其对环境和人类的危害,回顾了自上世纪 60 年代以来国内、外汽油汽车排放限制法规的演变过程,介绍了汽油机瞬态排放特征分析的研究思路,提出了规范的瞬态工况参数,基于废气分析仪的检测性能对比实验和管道系统的频率响应模型,给出了汽油机瞬态排放信号的间接检测与修正方法,为汽油机瞬态实验台架研制了基于运动控制卡的汽油机节气门瞬态控制器,通过整车实验分析了汽油汽车在冷启动、暖车和加速—空挡滑行等工况下的瞬态排放状况,通过台架实验分析了汽油机节气门匀加速开启—关闭、匀速开启—关闭两类组合工况下的瞬态排放状况,基于符号时间序列分析方法获得了汽油机瞬态排放的基本特征,提供了控制汽油机冷启动和加速—滑行过程中尾气排放状况的技术措施。

本书可作为内燃机、车辆工程和交通运输专业的研究人员及技术人员排放控制参考书,也可作为工科类高等院校相关专业师生的教学参考书。

目 录

第一章 概 述

- 1.1 瞬态工况下的排放问题 (1)
- 1.2 汽油机瞬态工况 (3)

第二章 汽油机主要排放污染物的生成机理

- 2.1 汽油机主要排放污染物生成机理及其影响因素
..... (5)
- 2.2 汽油机主要排放污染物对环境和人类的危害 ... (10)

第三章 国内、外汽油汽车排放限制法规综述

- 3.1 国外汽油汽车排放限值法规 (13)
- 3.2 我国汽油汽车排放限值法规 (20)
- 3.3 我国控制汽车产品排放的目标和工作方针 (25)

第四章 汽油机瞬态排放分析的研究思路

- 4.1 有关汽油机瞬态排放及其分析的思考 (27)
- 4.2 应用符号时间序列方法分析内燃机瞬态数据的现状
..... (29)
- 4.3 汽油机瞬态排放检测技术的国内外状况 (31)
- 4.4 汽油机瞬态排放研究中的技术路线 (33)

第五章 五组分排放分析仪管道系统的特性分析、仿真及误差修正

- 5.1 五组分排放分析仪管道频率响应特性的分析 … (40)
- 5.2 五组分排放分析仪频率响应(时延)特性仿真
..... (55)
- 5.3 五组分排放分析仪瞬态检测性能对比实验 …… (60)
- 5.4 五组分排放分析仪瞬态检测误差修正步骤 …… (71)

第六章 汽油机瞬态排放的台架器件与控制

- 6.1 基于运动控制卡的汽油机节气门瞬态控制器 … (72)
- 6.2 汽油机瞬态转速检测 (80)
- 6.3 瞬态实验台架中电涡流测功机的神经网络控制
..... (89)
- 6.4 底盘测功机及其测试系统 (96)

第七章 符号时间序列分析 STSA 方法

- 7.1 符号化过程的简要说明 (103)
- 7.2 符号树图解及其 Shannon 熵 (104)
- 7.3 符号序列编码、符号序列直方图 (107)
- 7.4 符号序列直方图的几个统计量 (108)
- 7.5 选择符号化参数 (109)
- 7.6 符号时间序列分析的计算流程 (112)

第八章 汽车瞬态排放的实验与定性分析

- 8.1 汽车冷启动工况排放定性分析 (114)
- 8.2 汽车暖车和热怠速工况排放定性分析 (124)
- 8.3 汽车加速一空挡滑行工况排放定性分析 (128)

第九章 汽油汽车瞬态排放的符号时间序列分析

- 9.1 瞬态排放参数的符号时间序列直方图与 Shannon 熵
..... (136)
- 9.2 排放信号曲线的面积量诠释 (137)
- 9.3 汽油汽车瞬态过程排放量的 Shannon 熵分析 ... (150)

第十章 汽油机瞬态排放的符号时间序列分析

- 10.1 实验机型和瞬态实验检测结果 (154)
- 10.2 汽油机瞬态过程排放量的 Shannon 熵分析 (156)

第十一章 汽油机瞬态排放的控制

- 11.1 现阶段汽油机在用排放控制技术 (164)
- 11.2 汽油机在用排放控制技术的机理 (164)
- 11.3 控制汽油机冷启动排放物的技术 (172)
- 11.4 控制加速—强制减速—空挡滑行工况排放物的思路
..... (175)

参考文献

- 附录 1 国家自然科学基金资助项目“基于符号时间序列方法的汽油机瞬态排放特征分析”简介
- 附录 2 课题组撰写的论文

第一章 概 述

本章摘要 通过汽车在城区行驶时的统计数据说明汽油机稳态工况与瞬态工况的差异,表明汽车汽油机在城区道路行驶时的工况与实验室台架实验中的稳态工况相比相去甚远,从而引出瞬态工况下的排放问题。以曲轴转速变化 dn 和节气门开度变化 dK_a 两个量及其它们的组合对汽油机瞬态工况进行分类,给出了几类基本的汽油机瞬态工况。

1.1 瞬态工况下的排放问题

随着我国国民经济的持续发展,城市大气环境污染变得日益突出;在大、中型城市,导致城区大气低层的污染以机动车为首要污染源,机动车行驶也以非稳态工况为主,因此有必要采取一系列措施来改善汽油汽车的排放水平。

目前国、内外均未制定瞬态排放测试法规,而是在汽油机稳态运转时通过测量排放数据对其排放状况进行评判,这显然与汽车的实际使用环境相去甚远。现阶段欧洲已制定的欧洲Ⅲ号和欧洲Ⅳ号法规含有循环排放的测试内容,美国也有 EPA 循环排放法规,但仍然是在一组稳定的发动机转速及负荷工况范围内获得排放数据。中国国家质量技术监督局制定的中华人民共和国国家标准《汽车排气污染物限值及测试方法》(GB18285 - 2000)中仅包含

了简单的循环排放测试内容。

根据有关统计资料,汽车在城区道路条件下行驶时,由于受到红绿灯、公交车站、行人以及其它交通因素的影响,汽车的加速、减速、启动等工况约占总运行时间的 50% ~ 90%,其中 30% ~ 50% 为加速工况。即使在国道环境下,频繁的变挡超车也使得汽车发动机经常工作于瞬时工况。在汽车底盘测功机或发动机实验台上所进行的循环工况实验表明,在启动、加速等工况,由于燃油供给和空气供给的速率均在瞬时变化,有害排放物的某些成分如 HC、CO 的含量将明显改变。有资料表明,汽车有害排放物的 40% ~ 80% 来自瞬态工况,其中 30% ~ 70% 来自加速工况,因此由稳态运转时获得的排放数据不能真正反映汽油机的瞬态排放状况。统计资料还给出了汽车在城区行驶时的以下特点:

① 汽油机节气门开启次数每 100 km 达 1500 ~ 3000 次,比在郊区行驶时高 10 ~ 30 倍。

② 换挡次数每 100 km 达 400 ~ 800 次,比在郊区行驶时高 10 倍。

③ 曲轴平均工作转速比在郊区行驶时低 25% ~ 50%。

④ 行驶每单位里程的曲轴转数比在郊区行驶时增加 30% ~ 80%。

⑤ 由于汽车经常被迫停车,故汽油机怠速运转时间占运行总时间的比例高达 30%。

⑥ 交通干扰密度的增加造成汽油机的热力状态不正常。

上述数据表明汽车汽油机在城区道路行驶时的工况与实验室台架实验中的稳态工况相比相去甚远,如何评价此时的汽油机排放状况? 国内外的科研机构对于汽油机瞬态排放的研究还处于初级阶段,目前尚没有实用性的成果公布,相关的文献介绍也较少。

作为广泛运用于国民经济和国防的动力机械,作为环境可持续发展的建设内容,汽油机的排放控制和治理工作日益受到重视。

目前人们对于汽油机稳态工作过程的排放机理和排放特征了解得较为透彻,配套的排放治理手段也较为成熟;相比之下,对于使用中经常出现的汽油机瞬态工作过程的有关内容却了解得不多。由于缺乏合适的获取汽油机瞬态排放数据的实验手段和分析方法,目前国、内外相关的研究一般囿于通过燃烧理论探讨汽油机瞬态排放的机理成因。

研究汽油机瞬态排放需要考虑的几个问题是:①如何实现汽油机瞬态工况,②如何检测瞬态排放信号,③如何选择瞬态排放分析手段,④如何给出汽油机瞬态排放控制措施。围绕上述问题,本书引述了汽油机主要排放污染物的生成机理及其对环境和人类的危害,回顾了自上世纪 60 年代以来国内外汽油汽车排放限制法规的演变形成过程,介绍了汽油机瞬态排放特征分析的研究思路,基于废气分析仪的检测性能对比实验和管道系统的频率响应模型给出了汽油机瞬态排放信号的检测与修正方法,为汽油机瞬态实验台架研制了基于运动控制卡的汽油机节气门瞬态控制器,通过整车实验分析了汽车在冷启动、暖车和加速—空挡滑行等工况下的瞬态排放状况,通过台架实验分析了汽油机节气门匀速开启—关闭、节气门匀加速开启—关闭两类组合工况下的瞬态排放状况,基于符号时间序列分析方法获得了汽油机瞬态排放的基本特征,给出了控制汽油机冷启动和加速—滑行过程中尾气排放状况的控制措施。

1.2 汽油机瞬态工况

汽油机曲轴的转速 n 、输出扭矩 T_e 及其内部热平衡状态 Q 基本不随时间 t 变化的工况称为稳态工况。汽车汽油机的实际运行工况是随路况不断变化的,并会导致汽油机热力状态的变化,汽油机零部件的温度状况也会随之变化。其影响因素有:起始热力状态、工况进行的时间和快慢、环境温度、冷却系统的性能等。在基

本稳定的正常热力状态下工作的汽油机通过曲轴转速 n 、节气门开度 K_d 和空燃比 α 实现工况的调节与控制。在稳态工况下, $dn \approx 0$ 、 $dK_d \approx 0$ 、 $d\alpha \approx 0$; 在瞬态工况下, $dn \neq 0$ 或 $dK_d \neq 0$ 或 $d\alpha \neq 0$ 。因此在瞬态工况下可以用 n 、 dn 、 K_d 、 dK_d 、 α 和 $d\alpha$ 六个量确定汽油机的工况。对于化油器式汽油机, 空燃比 α 是节气门开度 K_d 及其变化 dK_d 的函数, 电控汽油喷射式汽油机在不考虑温度补偿时也是如此。

有各种不同的瞬态工况分类方法, 通常可以简单地通过 dn 和 dK_d 两个量及其它们的组合对汽油机瞬态工况进行分类, 在变速箱挡位一定时, 存在表 1-1 所示的三种 dn 状况与不同 dK_d 状况的组合, 从而形成不同的汽油机瞬态工况。

表 1-1 汽油机基本瞬态工况

序	dn 状况	dK_d 状况	汽油机负荷	备注
1	$dn > 0$, 加速	$dK_d > 0$, 节气门开启	汽油机负荷增加	在使用中, 这两种情况经常依次发生, 从而出现加速时的两个阶段, 即节气门处于开启过程的加速初期, 节气门位置不变的加速中间段和尾段。
		$dK_d = 0$, 节气门不变	汽油机负荷稳定	
		$dK_d < 0$, 节气门关闭	汽油机负荷减小	例如汽车从水平路段过渡到下坡。
		$dK_d \neq 0$	汽油机空载	节气门开度周期性地增加或减小。
2	$dn < 0$, 减速	$dK_d > 0$	汽油机负荷显著增加	例如汽车在上坡途中。
		$dK_d = 0$	汽油机负荷增加	
		$dK_d = 0$	空载	暖车过程。
		$dK_d < 0$	汽油机卸除负荷	例如汽车在停车时。
3	$dn = 0$, 匀速	$dK_d > 0$	汽油机负荷增加	例如汽车从水平路段过渡到缓坡段。

第二章 汽油机主要排放污染物的生成机理

本章摘要 从生成机理的角度,结合汽油机状态变化时空燃比 α 和过量空气系数 λ 的变化,对一氧化碳 CO、碳氢化合物 HC、氮氧化合物 NO_x 的生成原因进行了分析,讨论了这些排放污染物对环境和人类的危害。

汽油机在燃烧过程中产生的有害成分主要为一氧化碳 CO、碳氢化合物 HC、氮氧化合物 NO_x、硫氧化物 SO_x 和铅化合物等。其中,硫氧化物和铅化合物可以通过降低燃料中的含硫量以及采用无铅汽油来有效控制,目前各国执行的排放法规主要限制的是 CO、HC 和 NO_x,还有一些目前各国排放限制法规尚未限制的排气成分,如甲醛、乙醛、苯、乙酰甲醛和丁二烯等。本章主要讨论排放法规限制的 HC、NO_x、SO_x 三种有害排放成分的生成机理和危害等内容。

2.1 汽油机主要排放污染物生成机理及其影响因素

2.1.1 一氧化碳 CO

CO 是燃料在燃烧过程中的重要中间产物和不完全燃烧产物,

是汽油机排气中有害浓度最大的成分,其生成机理比较复杂。若以 R 代表碳氢根,则在燃烧过程中生成 CO 要经历如下反应:



式(2-1)中 RCO 自由基生成 CO 是通过热分解或通过 O₂、OH、O、H 等发生反应实现的。

在汽油机缸内混合气达到一定的反应温度,并在有氧化剂存在的情况下,CO 将继续按链反应机理进行反应而生成最终燃烧产物 CO₂:



在燃烧火焰中,通常 OH 的浓度较高,因此 CO 按下式进行氧化反应的速度是很慢的:



如果燃烧过程中局部空间和瞬时存在下列条件之一,则 CO 不能继续燃烧生成 CO₂ 而被排出机外:① 反应着的气体温度突然过低;② 反应着的气体突然缺乏氧化剂;③ 反应物停留在适合于反应条件的时间过短。

CO 的生成除了跟上述反应有关外,还与 CO₂ 和 H₂O 的高温离解反应有关,CO₂ 和 H₂O 的离解反应分别为:



两个离解反应均为吸热反应,其离解率随温度的升高而增大,其中离解产物 H₂ 和 CO₂ 发生反应生成 CO 和 H₂O:



这就是汽油机在不缺氧的情况下仍有 CO 排出的两个原因。

CO 的生成主要受混合气浓度的影响,在过量空气系数(实际空燃比与理论空燃比的比值) $\lambda < 1$ 的浓混合气工况时,由于缺氧使燃料中的 C 不能完全氧化成 CO₂,CO 作为其中间产物生成。在

$\lambda > 1$ 的稀混合气工况时,理论上不应有 CO 产生,但实际燃烧过程中,由于混合不均匀造成局部区域的 $\lambda < 1$ 条件成立,由局部燃烧不完全而产生 CO;或者已成为燃烧产物的 CO_2 和 H_2O 在高温时吸热,产生热离解反应,由此生成 CO。另外,在排气过程中,未燃碳氢化合物 HC 的不完全氧化也会产生少量 CO。

燃烧终了时的 CO 浓度一般取决于燃气温度,但由于汽油机膨胀过程中缸内温度下降很快,以至于温度下降速度远快于气体中各成分建立新的平衡过程的速度,即产生“冻结”现象,使实际的 CO 浓度要高于排气温度相对应的化学平衡浓度。根据经验,CO 在汽油机排气中的浓度近似等于 1527°C 时的 CO 平衡浓度。

2.1.2 碳氢化合物 HC

汽油机排气中的碳氢化合物其成分极其复杂,有未参加燃烧的燃油碳氢化合物分子,有燃烧过程中高温分解和合成的中间产物和部分氧化物,如醛、烯及芳香族烃等。不完全燃烧产物以及润滑油的碳氢化物等成分,种类达 200 余种。在以预均匀混合气进行燃烧的汽油机中,HC 与 CO 一样,也是一种不完全燃烧(氧化)的产物,因而与过量空气系数 λ 有密切关系。但即使 $\lambda \geq 1$ 的条件下,往往也会产生很高的 HC 排放,这是因为 HC 还有淬熄、缝隙效应和吸附等生成原因。液化石油气和压缩天然气等燃气发动机中 HC 的生成机理与汽油机基本相同。

(1) 不完全燃烧

汽油机中不完全燃烧的原因主要有:怠速及高负荷工况时,可燃混合气浓度处于 $\lambda < 1$ 的过浓状态,加之怠速时残余废气系数较大,燃烧速率下降,火焰不能传遍整个燃烧室,发生大面积的可燃混合气淬熄现象,造成不完全燃烧,使未燃 HC 排放剧增。失火也是汽油机 HC 排放的重要原因;另外,汽车在加速或减速时,会造成瞬时的混合气过浓或过稀现象,也会产生不完全燃烧或失火。

当然,即使在 $\lambda > 1$ 时,由于油气混合不均匀,也会因不完全燃烧产生 HC 排放。

(2) 燃烧室内的缝隙效应

燃烧室内存在很多缝隙,如由活塞顶部与缸壁之间,及第一、二道活塞环背后组成的缝隙,这部分缝隙占总缝隙的 80%,其它缝隙还存在于气缸盖和气缸垫的接合面、火花塞螺栓、进排气门头周围等处。缝隙对 HC 的生成起着重要的作用。当缸内压力升高时,会将一部分未燃的可燃混合气压进缝隙中去,由于缝隙很窄,面容很大,混合气流入缝隙中被双壁冷却,火焰无法传入到缝隙中去,使其中存在的燃油(也包括润滑油)不能燃烧,于是形成未燃 HC,当膨胀、排气过程中缸内压力降低时,未燃 HC 从缝隙中返回气缸并随废气排出气缸。研究表明,约有 5% ~ 10% 新鲜混合气由于缝隙效应会躲过火焰传播的燃烧过程。这种缝隙效应是产生未燃 HC 的重要来源。

(3) 燃烧室缸壁淬熄效应

在燃烧过程中,燃气温度高达 2000℃ 以上,而气缸壁面温度在 300℃ 以下,因而靠近壁面的气体受低温壁面的影响,温度远低于燃气温度,并且气体的流动也较弱。所谓壁面淬熄效应是指温度较低的燃烧室壁面对火焰的迅速冷却(也称冷激),使活化分子的能量被吸收,链式反应中断,在壁面形成厚约 0.1 ~ 0.2 mm 左右的不燃烧或不完全燃烧的火焰淬熄层,产生大量未燃 HC。淬熄层厚度随发动机工况、混合气湍流程度和壁温的不同而不同,小负荷时较厚,特别是冷启动和怠速时转速较低,此时压缩终了混合气的温度和压力都较低,因此有很大一部分燃油将以油膜的形式滞留在气道壁面上、进气门处和气缸上,这些油膜将随环境温度的提高而挥发,形成“后汽化”现象,使排放情况恶化。

(4) 壁面油膜和积碳的吸附

在进气和压缩过程中,气缸壁面上的润滑油膜,以及沉积在活