

综 述

《非道路用柴油机燃料消耗率限值》 标准中限值的影响因素研究

谢亚平, 计维斌

(上海内燃机研究所, 上海 200432)

摘 要: 介绍了我国《非道路用柴油机燃料消耗率限值》标准中限值确定的影响因素, 通过对功率分档、冷却方式、用途、产量、国外柴油机燃料消耗率水平及提高柴油机燃料经济性措施的分析, 科学、合理地确定燃料消耗率限值。

关键词: 非道路柴油机; 燃料经济性; 标准; 限值

中图分类号: T-652.1; TK421.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)04-0001-04

The Study of Factors Affecting the Limits in the Standard of Non-road Diesel Engine Fuel Consumption Limits

Xie Yaping, Ji Weibin

(Shanghai Internal Combustion Engine Research Institute, Shanghai 200432)

Abstract: The factors affecting the limits decided in the standard of Non-road Diesel Engine Fuel Consumption Limits are introduced. Diesel engine fuel consumption limits can be determined reasonably and scientifically by analyzing rated power category and cooling method classifying, application, production volume, other country's diesel engine fuel consumption level and the measures of improving the economy of diesel engine fuel.

Keywords: non-road diesel engine; fuel economy; standard; limits

1 概 述

我国已成为全球内燃机制造大国, 2009 年全国生产内燃机约 6 700 万台, 总功率达到 11.3 亿 kW。其中, 道路车辆用发动机约 1 379 万台, 包括车用汽油发动机 879 万台, 车用柴油发动机 500 万台; 非道路移动机械用发动机 170 万台, 包括用于工程机械约 80 万台, 用于农业机械约 90 万台; 机动三轮车、拖拉机、排灌、发电机组等用单缸柴油机 700 万台; 四轮低速货车用多缸柴油机为 40 万台; 摩托车用汽油机 2 500 万台; 通用小型汽油机共生产 1 900 万台; 其他用于铁路、船舶、军工、大型发电机组约 4.5 万台。

2008 年我国机动车保有量就达到了 6000 多万辆, 根据国家环境保护部最近统计, 大气中有 12%

的二氧化碳来自汽车的尾气排放(未考虑工业/农业/其它运输等内燃机排放), 我国非道路用移动机械发动机微粒(PM)、氮氧化合物(NO_x)排放, 分别占整个移动排放源排放的 61%、42.2%。农业机械、农用运输车这两大类的一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化合物(NO_x)和微粒(PM)排放, 在非道路移动机械排放中的比例分别高达 89.7%、89.8%、71.8%、87.5%。自 2000 年以来, 我国汽车(包括农用车)汽油、柴油年消费量约占我国汽油、柴油消费总量的 50%、石油消费的三分之一左右。我国柴油的消费量一半以上是用于农业, 在农村使用的以内燃机为动力的拖拉机、联合收割机、三轮汽车、低速货车、其他移动农牧机械年产 600 多万台, 依目前的产量和保有量都与汽车的数量相当。内燃机行业每年要消耗近 2 亿吨石油。我国已成为

收稿日期: 2010-03-05

作者简介: 谢亚平(1963-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为内燃机标准化、标准科研项目, Email: ypxie@sina.com。

石油进口大国, 2006 年上半年我国就净进口原油 7 033 万吨, 进口额 320 亿美元; 净进口成品油 1 203 万吨, 进口额 43.7 亿美元, 2006 年上半年我国石油对外依存度已达 47.3%。

中国是世界上第二大能源消费国, 使用量大约相当于美国的三分之一。中国经济中能源使用强度, 即每生产 1 美元的国内生产总值所需的能源量为印度的两倍, 工业化国家的四倍。

鉴于日益严峻的环保和能源压力, 我国政府特别制定了《中国应对气候变化国家方案》, 节能、减排成为我国的基本国策。我国在“十一五”汽车发展规划中提出, 到 2010 年实现新车平均单车百公里油耗比 2005 年降低 15% 的目标。《国家中长期科学和技术发展规划(2006~2020 年)》要求重点研究开发低能耗、高效低排放内燃机等关键部件技术等。

制定发动机燃料消耗率限值标准是响应国家节能减排号召、维护国家能源安全 and 经济安全的有利举措。中国机械工业联合会中机联标[2007] 206 号文下达了计划编号: 20074732-T-604 的标准制修订项目, 项目名称为《非道路用柴油机燃油消耗、机油消耗限值》, 该标准为强制性标准, 由上海内燃机研究所负责制定。

我国虽然是柴油机生产大国, 但柴油机生产技术水平、质量水平尤其是燃料消耗率性能指标水平与国外发达国家相比还有相当大的差距。柴油机, 尤其是非道路用柴油机, 产量大, 用途和功率覆盖范围广, 不同的标定功率、冷却方式、为达到国家排放标准所采取的不同措施等对柴油机燃料消耗率的影响较大。柴油机产业在我国某些地区是支柱产业之一, 它还直接带动着地方柴油机配件行业的发展。制定先进、合理的燃料消耗率限值标准, 有利于淘汰落后技术产品, 促进企业在节能减排方面的技术投入和改造, 促进产品生产的质量水平和管理水平的提高。本文通过数据收集整理、实测摸底试验、国外同类产品的比较, 确定了限值标准中应采用的燃料消耗率测量用试验循环、燃料消耗率评价指标、功率档的划分。

2 数据收集和调查研究

为使样本数据更具代表性, 选择了各功率段国内非道路用柴油机骨干生产企业的产品进行调查, 共收集了 36 家企业 278 个机型的基本参数, 包括机型、用途、标定功率、标定转速、最大扭矩、最大扭矩转速、进气方式、冷却方式、燃烧室型式、标定工况燃料消耗率、机油消耗率、年

产量等。产品按用途分布总体情况为: 工程机械用柴油机 260 多万台, 拖拉机用柴油机约 234 万台, 手扶拖拉机、固定作业机械、农用排灌机组、小四轮拖拉机、渔船、脱粒机、发电机组、微耕机、插秧机和收割机等非道路用单缸柴油机产量达 870 万台(1.2 亿 kW); 功率不大于 100 kW、缸数不大于 4, 配套用于大中型拖拉机、拖拉机变型运输机、农业机械、船舶、中小型工程机械、排灌、发电、压气机、冷冻机、电焊机的小缸径多缸机约 209 万台; 缸径在 100~160 mm 之间配套用于大型农机、大型工程机械、船舶和发电机组的中等缸径多缸柴油机约 177 万台。78 mm 缸径以上柴油机采用直喷式燃烧室较多, 除发电和大中型船舶用柴油机转速在 1 500 r/min (50 Hz)、1 800 r/min (60 Hz)、3 000 r/min (50 Hz)、3 600 r/min (60 Hz) 外, 其余柴油机转速大多在 2 200~2 600 r/min 左右。

3 功率分档

非道路用柴油机功率覆盖范围很广, 从 1.47 kW 到 1 000 多 kW, 由于大功率柴油机与小功率柴油机在机械效率、散热损失、供油喷射系统都有较大的差别, 因此, 燃料消耗率差异也较大, 有必要进行客观、科学的分档。考虑到本标准中燃料消耗率测试循环和系族划分原则将采用排放标准中排放测量用试验循环和原则, 因此初始分档时大体与排放标准功率分档相近, 将 560 kW 以下柴油机分成 8 kW 以下、8~19 kW、19~37 kW、37~56 kW、56~75 kW、75~130 kW、130~225 kW、225~450 kW、450~560 kW 共九档。经过对国内近 200 个机型的实测摸底试验, 并对初始分档方案中各功率段内柴油机燃料消耗率平均值进行统计分析(见图 1), 发现 8 kW 以下柴油机中, 4.5 kW 以下柴油机要比 4.5~8 kW 之间柴油机的平均燃料消耗率明显高出约 50 g/kW·h, 因此有必要在 8 kW 以下再细分一档。

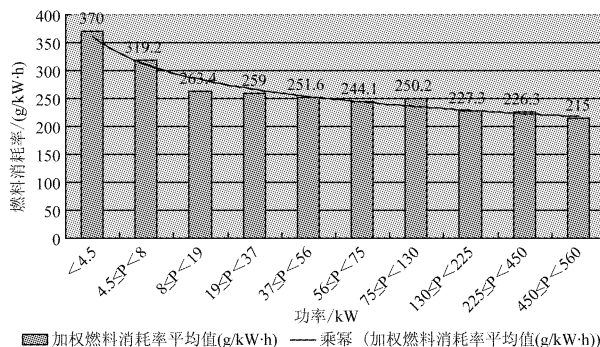


图 1 各功率段内柴油机燃料消耗率平均值

4 不同用途柴油机燃料消耗率测量用试验循环

以前，内燃机燃料消耗率指标考核评定都以标定工况下的燃料消耗率为准（见 GB/T 1147.1-2007），但非道路用柴油机实际运行工况随动力装置的需要而相应地不断变化着，不会始终停留在某一固定不变的工况下，即使是带发电机运行的柴油机，虽然基本上是在不变的转速下运行，但它发出的有效功率却是随着电网中负荷的大小而上下变化的，而配套工程机械、船舶、拖拉机、农业机械等非恒速用柴油机，实际使用中转速、负荷变化很

大，标定工况燃料消耗率不能真实反映柴油机实际使用情况，必须用能够真实反应实际使用情况的综合工况加权燃料消耗率来评定柴油机的燃料消耗率。从摸底试验情况也可看出两者的差异，表 1 为根据近 200 个实测机型的试验结果对各功率档内加权燃料消耗率平均值与标定工况点燃料消耗率平均值比值进行的统计结果。可以看出，加权燃料消耗率平均值比标定工况点燃料消耗率平均值要高出 9% 左右，较小标定功率的柴油机其加权燃料消耗率要比标定工况点燃料消耗率高出更多，最高达 22%。因此选用加权燃料消耗率来评定非道路用柴油机的燃料经济性更科学、合理。

表 1 实测机型加权燃料消耗率平均值与标定工况点燃料消耗率平均值比值

功率档/kW	$P < 4.5$	$4.5 \leq P < 8$	$8 \leq P < 19$	$19 \leq P < 37$	$37 \leq P < 56$	$56 \leq P < 75$	$75 \leq P < 130$	$130 \leq P < 225$	$225 \leq P < 450$	$450 \leq P < 560$
比值	1.22	1.18	1.09	1.08	1.05	1.06	1.05	1.03	1.05	1.03
平均值										1.09

5 国内外燃料消耗率水平差异

为了分析研究我国非道路用柴油机目前的燃料消耗率水平，找出与国外同类柴油机的差别，先后收集了日本、瑞典、德国等国家各种非道路用柴油机相关资料。日本非道路用柴油机生产企业包括井关农机株式会社、久保田株式会社、富士重工株式会社、本田技研工业株式会社、石川岛芝浦机械株式会社、五十铃船舶制造株式会社、三菱汽车工业株式会社、三菱重工株式会社、洋马株式会社、康明斯柴油机（日本）株式会社、小松株式会社、日野汽车株式会社、三菱扶桑卡车和巴士株式会社、神钢造机株式会社等 14 家。共整理了 237 个机型的燃料消耗率数据，这些机型的用途为工程机械、农业机械、船用主机和辅机、工业用发电机组、压缩机、水泵等。

收集整理了瑞典 Scania 公司 92 个机型的燃料消耗率数据，这些机型的用途为工业用柴油机、发电机组、船用主机。

收集了德国道依茨公司 127 个机型的燃料消耗率数据，机型的用途分别为工程机械、地下矿、发电机组、农业机械和船舶。

共收集了 456 个国外机型的燃料消耗率数据。表 2 为我国与国外柴油机 10 个功率档中标定工况燃料消耗率的平均值。

表 2 各国各功率档标定工况燃料消耗率平均值

单位：(g/kW·h)

功率 P/kW	中国	日本	德国	瑞典
$P < 4.5$	313.4	284.1		
$4.5 \leq P < 8$	270.2	275.1		
$8 \leq P < 19$	241.9	258.9	229.2	
$19 \leq P < 37$	239.3	244.3	229.2	
$37 \leq P < 56$	238.7	232.8	220	
$56 \leq P < 75$	230.5	223.8	221.5	
$75 \leq P < 130$	238	212.4	218	
$130 \leq P < 225$	220.9	210.9	222	221.7
$225 \leq P < 450$	214.8	208.9	210.4	211.2
$450 \leq P \leq 560$	209.6	207	208	209.7

从表 2 可以看出，4.5 kW 以下、37 ~ 560 kW 功率范围内我国柴油机与国外柴油机标定工况燃料消耗率还有一定的差距，其中 4.5 kW 以下、75 ~ 130 kW 功率范围内的差距较大，达 10% 左右。

6 降低柴油机燃料消耗率的措施

(1) 强化燃烧过程：包括减少节流和机械损失、减少散热损失、减少燃烧过程不可逆损失、采用高喷油压力缩短燃烧持续时间，采用高增压比等，气缸燃烧压力由 120 MPa 增加到 180 MPa，油耗约可降低 25%。

(2) 采用先进燃烧和控制技术(HCCI, TCDI)。

(3) 改善机械效率，降低怠速转速可降低油耗约 1%，减少气门机构摩擦损失可降低油耗约 2%；

减少轴承、油封等摩擦损失可降低油耗约 1% ~ 3%；采用电子控制、共轨、高压喷射可降低油耗约 3% ~ 5%；主要驱动机构：气缸珩磨、减小轴承宽度、降低活塞等重量可降低油耗约 1%；气门驱动机构：用滚动摩擦驱动可减小气门驱动机构重量，可降低油耗约 1% ~ 2%。

(4) 燃油喷射系统：采用特殊的共轨系统结构，进油计量的高压泵可降低油耗约 1%。

(5) 燃烧条件：提高喷射压力、缩短燃烧时间可降低油耗约 1% ~ 3%。

(6) 改善进/排气过程(系统)：增加进气质量、降低进气涡流、提高涡轮增压效率、减小排气管(消音器)背压可降低油耗约 2% ~ 4%。

7 柴油机节能与减排措施的最佳选择

在降低柴油机 NO_x 排放的措施中，推迟喷油可降低 25% 的 NO_x 排放，达到 $5\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ，但会使燃料消耗率增加 8% ~ 14%；推迟喷油 + 预喷可降

低 33% NO_x 排放，达到 $4.5\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ，但会使燃料消耗率增加 6% ~ 12%；EGR 可降低 50% NO_x 排放，达到 $3.3\text{g/kW}\cdot\text{h}$ 的 NO_x 排放，若使 NO_x 排放达到 $3.5\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ，则会使燃料消耗率增加 4% ~ 8%，若使 NO_x 排放达到 $5\text{g/kW}\cdot\text{h}$ 则会使燃料消耗率增加 2% ~ 4%；尿素型 SCR 可降低 75% NO_x 排放，达到 $1.7\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ，对燃料消耗率影响很小；喷水可降低 50% NO_x 排放，达到 $3.3\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ，对燃料消耗率影响很小。但采用尿素型 SCR 需要增加一套容积相当于燃油箱容积 5% 的尿素储存箱；采用喷水方法需要增加一套容积相当于燃油箱容积 30% 的水箱。

我国非道路用柴油机现行的排放标准执行 II 阶段排放限值，目前正在起草 III 阶段排放标准，而 III 阶段排放标准主要参考欧盟非道路移动机械用柴油机 III A 阶段排放标准限值，我国 II 阶段排放限值与将执行的 III 阶段排放限值(即欧盟 III A 阶段排放标准限值)的差异见表 3。

表 3 我国非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值(第 II、III 阶段) 单位: ($\text{g/kW}\cdot\text{h}$)

标定净功率 P/kW	CO		HC		NO_x		THC + NO_x		PM	
	II	III	II	III	II	III	II	III	II	III
$130 \leq P \leq 560$	3.5	3.5	1.0		6.0		相当于 7.0	4.0	0.2	0.2
$75 \leq P < 130$	5.0	5.0	1.0		6.0		相当于 7.0	4.0	0.3	0.3
$37 \leq P < 75$	5.0	5.0	1.3		7.0		相当于 8.3	4.7	0.4	0.4
$18 \leq P < 37$ (II)	5.5		1.5		8.0		相当于 9.5		0.8	
($19 \leq P < 37$)(III)		5.5						7.5		0.6
$8 \leq P < 18$ (II)	6.6						9.5		0.8	
$0 < P < 8$	8.0						10.5		1.0	

由此可见，若第 III 阶段排放标准适用范围不包括 37 kW 以下柴油机，即 37 kW 以下柴油机在 37 kW 以上柴油机执行 III 阶段排放标准时仍然执行 II 阶段排放标准，则 37 kW 以下柴油机可采用推迟喷油来降低 NO_x 排放的方法，不需要增加成本，但会使燃料消耗率增加；而 37 kW 以上柴油机要达到 III 阶段排放标准则必须采用尿素型 SCR 或喷水来降低 NO_x 排放，这两种方法对燃料消耗率几乎没有影响。

8 节能减排的贡献

2009 年全国生产内燃机总功率达 11.3 亿 kW，其中非道路用柴油机产量达 1 000 多万台，保守估算，平均每台以 50 kW 计，则年产非道路用柴油机功率达 5 亿 kW，每年每台柴油机按运行 200 h 计，燃料消耗率每降低 $1\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ，每年可节约燃油

$200 \times 5 \times 1 = 1\,000$ 亿 $\text{g} = 1$ 亿 kg 。同时，根据柴油的化学组分可知，每 kg 柴油中含 0.87 kg 的 C，而每 kg C 完全燃烧后将产生 3.19 kg 的 CO_2 ，因此每年可减少 CO_2 排放： $0.87 \times 3.19 \times 1\,000$ 亿 $\text{g} = 2.78$ 亿 $\text{kg} = 27.8$ 万 t。

9 结 论

(1) 我国非道路用柴油机功率覆盖范围广，而不同功率柴油机燃料消耗率水平相差较大，要合理地划分各个限值所对应的功率档，因此在参考我国非道路用柴油机排放标准 GB 20891-2007 中的功率分档基础上，应适当增加分档档数，本标准在排放标准分档(共 6 档) $130 \leq P \leq 560$ 、 $75 \leq P < 130$ 、 $37 \leq P < 75$ 、 $18 \leq P < 37$ 、 $8 \leq P < 18$ 、 $0 < P < 8$ 的基础上，增加了 4 档，改为 $450 \leq P \leq 560$ 、 $225 \leq P < 450$ 、
(下转第 28 页)

本次数值模拟结果具有较好的可信度。

6 结 论

(1) 为使稳流试验结果和数值模拟结果具有可比性, 数值模拟计算应取与稳流试验相同的边界条件以及评价方法;

(2) 在小气门升程下涡流主要是由切向气道形成的, 并且切向气道在进气量比较少的情况下, 能形成相对较大的涡流强度, 而在大气门升程下涡流以螺旋气道形成为主, 切向气道主要对气体的流入起导向作用, 以增加进气量;

(3) 切向气道气门座孔加工出的偏心倒角, 对气道形成涡流能力的影响比较大, 尤其是在气门开度较小的情况下, 其偏心倒角可使气道产生相对较大的涡流比;

(4) 通过计算与试验对比分析可以看出, 数值模拟结果与试验数据基本相吻合, 由此可见气道内纯流动模拟计算已有了较高的预测精度, 可以部分地代替试验。

参考文献

[1] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安: 西安交通大

学出版社, 2001.

[2] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

[3] 夏兴兰. 6110 柴油机进气过程的三维数值模拟及其性能改进[D]. 浙江: 浙江大学, 2001.

[4] 韩义勇. 应用 CFD 评价和改进柴油机进气道[D]. 广西: 广西大学, 2005.

[5] 吴志军, 黄震. 柴油机气道试验中缸内涡流转速的测量方法[J]. 汽车工程, 2000, 22(5): 358 ~ 360.

[6] 白慧星. 发动机进气道稳流试验的计算机模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

[7] 赵振武. 内燃机气道的稳流试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.

[8] 张宁宁. 小缸径直喷式柴油机螺旋进气道的设计和试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.

[9] 曹暑林, 黄荣华. 四气门柴油机进气道的三维实体造型及流场数值模拟[J]. 内燃机工程, 2004, 25(6): 38 ~ 43.

[10] AVL Fire User Manual[R]. AVL List GmbH Graz, 2002.

[11] Fuchs T R, Rutland C J. Intake flow effects on combustion and emissions in a diesel engine[C]. SAE Transactions, 1998, 107(3): 566 ~ 581.

[12] 王志, 黄荣华. 4BTAA 柴油机螺旋进气道三维数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(2): 176 ~ 180.

(上接第 4 页)

$130 \leq P < 225$ 、 $75 \leq P < 130$ 、 $56 \leq P < 75$ 、 $37 \leq P < 56$ 、 $19 \leq P < 37$ 、 $8 \leq P < 19$ 、 $4.5 \leq P < 8$ 、 $0 < P < 4.5$, 共 10 档。

(2) 标定工况燃料消耗率不能反映非道路用柴油机实际燃料消耗情况, 加权燃料消耗率才能真实反映柴油机实际燃料消耗情况, 因此, 本标准采用加权燃料消耗率作为限值指标。

(3) 我国柴油机标定工况燃料消耗率与国外发达国家相比还有一定的差距, 尤其是 4.5 kW 以下和 $75 \leq P < 130 \text{ kW}$ 功率范围内柴油机, 差距较大, 这两个功率档内柴油机生产企业还须加大节能技术研究和开发, 缩小与国外柴油机的水平差距。

(4) 节能减排既有矛盾, 又相互促进, 要根据各柴油机自身特点, 研究和开发适宜于本柴油机节

能减排的措施, 在节能与减排、企业效益和社会责任中寻求最佳的解决方案。

参考文献

[1] 中国内燃机工业协会. 内燃机工业综合动态[R]. 2010(1).

[2] GB20891-2007, 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国 I、II 阶段)[S].

[3] 国産エンジンデータブック編集委員会. engine data book 06/07[R]. 2007.

[4] GB/T 1147.1-2007, 中小功率内燃机第 1 部分: 通用技术条件[S].

[5] 蒋德明. 内燃机原理[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.