

船用柴油机满足 GB15097 的试验分析

张世恒, 杨志勇, 王忠俊

(武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要:船用柴油机国标排放规范实施以来,针对现有机型寻找行之有效的排放改善措施,首先从几个方面对比了国标与国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)标准的差异,然后在两个机型上进行了不同喷油正时下的排放试验,对试验结果进行了分析,并分别进行修正计算以比较差异性。结果表明:两机型在喷油正时延后 2° CA时, NO_x 比排放量下降明显,PM比排放量略有增加,HC比排放量变化因机型和测试循环而异;经IMO标准修正的 NO_x 湿度修正系数均比国标修正的略高,使得 NO_x 比排放量比国标修正后的结果略高;在PM满足限值的前提下,可以通过优化喷油正时,使现有机型满足国标第一阶段限值。

关键词:船用柴油机;国标排放标准;IMO标准;修正系数;喷油正时

中图分类号:U664.121;U692.1 **文献标志码:**A

Test of Marine Diesel Engine for GB15097 Compliance

ZHANG Shiheng, YANG Zhiyong, WANG Zhongjun

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The differences between GB15097 and IMO standard are discussed. The exhaust emission of two engines of different model is tested for a set of injection timing settings. The test results, after correction, are analyzed and compared. The tests show that for both of the engines, the NO_x specific emission goes down noticeably and PN specific emission goes up slightly when injection is retarded 2° CA. The change of HC specific emission is complex, depending upon the engine model and testing cycle. The IMO humidity correction factor for NO_x is slightly higher than GB correction. This makes IMO corrected NO_x specific emission higher. The first phase emission limit of GB standard can be complied by optimizing the injection timing of an engine without violating the PM emission limitation.

Key words: marine diesel engine; GB emission standard; IMO standard; correction factor; injection timing

船用柴油机因热效率高、经济性和适应性好而被广泛应用于船舶领域,但由于转速较低、爆压高和使用劣质燃油等原因也存在高污染排放问题。随着全球污染加剧,许多国家及国际组织积极采取各种排放控制措施,其中IMO于1997年9月在议定书中新增了《MARPOL 73/78》附则VI-防止船舶造成空气污染规则,附则VI中包括船用柴油机氮氧化物排放控制技术规则,并在2008年10月的MEPC.177(58)决议中通过技术规则修正案,即2008年 NO_x 技术规则(以下简称“IMO标准”),该规则对输出功率超过130 kW的船用柴油机进行 NO_x 排放控制^[1,2],生效后可有效控制船用柴油机 NO_x 排放,但控制对象较单一。

我国既是港口大国,也是内河航运资源丰富的国家,但是内河及沿海船舶排放控制水平与发达国家差距较大,致使内河及沿海港口船舶排放的污染物在整个大气污染中的分担率日益增加,给内河沿岸和港口城市的公共健康和生活环境带来严重影响^[3-5]。为了改善我国内河及沿海船机的污染物排放现状,我国颁布了《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段)》即GB15097—2016(以下简称“国标”),目前执行第一阶段。相较于IMO标准,国标控制对象增多,并将HC与 NO_x 协同控制,另外增加了PM的排放测试和限值要求^[6]。

国标实施前船用柴油机改善排放的研究多集中

收稿日期:2021-03-01

作者简介:张世恒(1988—),男,河南周口人,硕士生,研究方向为内燃机性能优化与排放控制。E-mail:zhshheng0808@163.com

通信作者:王忠俊(1970—),男,湖北汉川人,副教授,研究方向为内燃机性能优化与排放控制。E-mail:zhjw153624@163.com

在 NO_x 排放控制方面,包括喷油嘴的设计、调整喷油定时、改变燃烧室形状以及改进增压技术等^[7-10],其最终都是对柴油机缸内燃烧工况的研究,即通过调整燃烧系统参数来改善燃烧环境,以达到改善燃烧和提高排放性能的目的。国标实施后,因柴油机自身燃烧特点,HC 排放量相对较少,CO 限值对富氧燃烧柴油机而言也十分宽松,所以现有船机在满足 IMO 要求的同时能否满足国标的要求主要是协调好 NO_x 和 PM 排放此消彼长的关系。在 IMO 排放测试过程中改善 NO_x 排放最简单有效的方法就是调整喷油正时,但需要牺牲部分燃油经济性^[11-13]。该方法在国标范围内的适用性有待进一步研究。

本文针对国标排放的要求,以及国标与 IMO 标准的诸多差异,在两个柴油机型上(以下均简称机型 1 和机型 2)完成了优化喷油正时的国标排放测试,对各排气污染物在喷油正时调整前后的变化趋势进行了分析,对测试结果经两标准修正后的差异和评判结果进行了对比,提出部分机型关于国标第一阶段达标的建议,以达到改善船用柴油机排放的目的。

1 国标与 IMO 排放要求差异

国标与 IMO 标准存在诸多差异,本文仅从适用范围、限值要求、 NO_x 湿度修正系数、耐久性试验要求以及颗粒物测试系统等方面进行简要对比。

1.1 适用范围和控制对象差异

IMO 标准适用于所有额定功率大于 130 kW 的船机。国标适用于额定功率大于 37 kW 且单缸排量小于 30 L 的内河船、沿海船、江海直达船和海峡渡船用船机。

IMO 标准仅对 NO_x 排放进行限值要求。国标将 HC 与 NO_x 进行协同控制,并且增加了 CO 和 PM 限值。

1.2 限值要求差异

国标与 IMO 适用范围不同,现仅针对额定功率在 130 kW 以上且单缸排量小于 30 L 的船机,对两者进行比较。在限值要求方面,因国标与 IMO 计算基准不同,并且国标将 HC 与 NO_x 协同控制,难以将两者的 NO_x 限值进行直接对比。但国标的适用机型主要为中高速船机,在此范围内国标第一阶段 NO_x 限值与 IMO Tier II 中 NO_x 限值的差异大致表现为:单缸排量小于 20 L 的船机,国标 NO_x 限值比 IMO 严格,而单缸排量大于 20 L 小于 30 L 的船机,国标 NO_x 限值与 IMO 大致相当。

例如:某船机企业额定转速为 750 RPM 的船机,按照 IMO Tier II 要求 NO_x 限值均为 9.60 g/kW·h。其中对于单缸排量为 9.42 L 的机型 2,按照国标第一阶段要求 HC + NO_x 限值为 7.8 g/kW·h,扣除 HC 排放量之后国标 NO_x 限值明显比 IMO 严格。而对于单缸排量为 20.16 L 的机型 1,按照国标第一阶段要求 HC + NO_x 限值为 9.8 g/kW·h,扣除 HC 排放量之后,国标 NO_x 限值与 IMO 大致相当。

1.3 耐久性试验要求差异

IMO 标准中无耐久性试验要求。国标为了保证船机在有效寿命期内排气污染物均能满足限值要求,在型式检验前需进行排放耐久性试验,确定劣化系数或劣化修正值。耐久性试验时间应不少于国标允许的最短试验时间,但可以采用加速老化的试验方法,加速老化试验应遵从等油耗原则或者等功原则。排放测试应在磨合期结束时、耐久性试验结束时以及耐久性试验期间选择几个间隔点进行,当排放耐久试验没有覆盖整个排放耐久期时,排放耐久期结束时的排放值应根据试验期间确立的劣化趋势外插到排放耐久期结束点,最后将周期性记录的耐久性试验期间的排放试验结果采用最小二乘法确定有效寿命终点的排放值,然后根据计算公式计算得出各污染物的劣化系数或劣化修正值。

船机在进行国标排放型式检验时,试验得出的各污染物排放值需用劣化系数或劣化修正值进行修正。

1.4 NO_x 湿度修正系数 (K_H)

1.4.1 修正系数计算公式差异

国标 NO_x 湿度修正系数计算公式考虑到进气的温湿度条件和燃油流量与进气干空气流量的比值对 NO_x 排放的影响,见式(1)^[6]。对于增压中冷柴油机,IMO 考虑到温湿度条件和增压空气温度(即进机温度)与增压空气参考温度的差值对 NO_x 排放的影响,见式(2)^[1]。因国标与 IMO 修正系数考虑因素不同会使得排放测试后的 NO_x 计算结果产生一定的差异。

$$K_H = \frac{1}{1 + A \times (H_a - 10.71) + B \times (T_a - 298)} \quad (1)$$

式中: $A = 0.309 \times \frac{G_{\text{FUEL}}}{G_{\text{AIRD}}} - 0.0266$;

$$B = -0.209 \times \frac{G_{\text{FUEL}}}{G_{\text{AIRD}}} + 0.00954;$$

另外: G_{FUEL} 为燃油流量; G_{AIRD} 为进气空气流量(干基); T_a 为进气温度; H_a 为进气湿度。

$$K_H = \frac{1}{1 - 0.012 \times (H_a - 10.71) - 0.00275 \times (T_a - 298) + 0.00285 \times (T_{SC} - T_{SCRef})} \quad (2)$$

式中: T_a , H_a 同式(1); T_{SC} 为增压空气温度; T_{SCRef} 为对应于海水温度 25 °C 的每个模式点的增压空气温度,一般由制造厂提供。

1.4.2 修正系数计算结果对比

以机型 1 和机型 2 为例,对 NO_x 湿度修正系数计算结果进行对比。其中机型 1 在喷油正时为上止点前(Before Top Dead Center, BTDC)9°CA 和 7°CA 时 NO_x 湿度修正系数经国标和 IMO 修正后的结果对比如图 1 所示。由图可知,机型 1 在 9°CA BTDC 时各工况点 IMO 修正系数均比国标修正系数高,高出约 1.7% ~ 3.6%; 机型 1 在 7°CA BTDC 时各工况点 IMO 修正系数同样比国标修正系数高,高出约 1.9% ~ 3.3%。

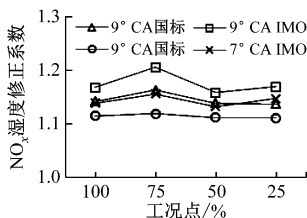


图 1 机型 1 NO_x 湿度修正系数对比

机型 2 在喷油正时为上止点前 5.5°CA 和 3.5°CA 时 NO_x 湿度修正系数经国标和 IMO 修正后的结果对比如图 2 所示。由图可知,机型 2 在 5.5°CA BTDC 时除 100% 工况点修正系数基本一致外,其余工况点 IMO 修正系数均比国标修正系数高,高出约 1.8% ~ 2.5%; 机型 2 在 3.5°CA BTDC 时各工况点 IMO 修正系数均比国标修正系数高,高出约 2.0% ~ 4.1%。

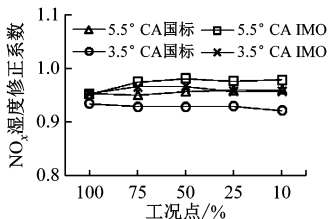


图 2 机型 2 NO_x 湿度修正系数对比

由以上对比结果可知,相同试验条件下国标 NO_x 湿度修正系数总体上比 IMO 修正系数略低(除个别工况点两者差异不大外)^[14],这是因为 IMO 标准考虑了船机的工作环境对 NO_x 排放的影响,增加了增压空气温度与增压空气参考温度差值的修正,而两机型在实际台架试验时增压空气温度略低于制造企业提供的增压空气参考温度,使得 IMO NO_x 湿度修正系数在计算时有变大的趋势。

1.5 颗粒物排放测试要求

国标与 IMO 标准相比最大的差异是增加了颗粒物的测试和限值要求,国标对颗粒物测试系统、取样系统、称重要求和测试过程要求等作了详尽的介绍,其中对稀释系统和取样系统的要求大致如图 3 所示。本文对稀释系统和颗粒物称重要求做简要概述。

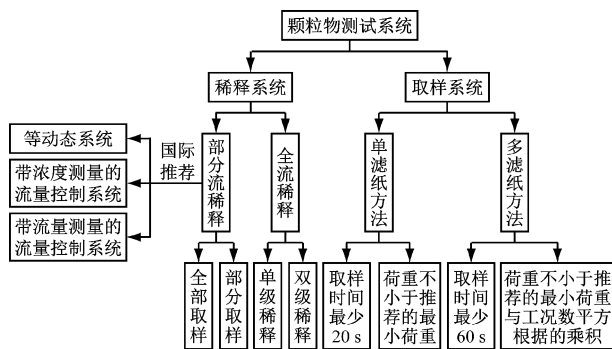


图 3 颗粒物测试要求

1.5.1 稀释系统

国标认可的颗粒物测试系统分为全流稀释系统和部分流稀释系统。全流稀释系统是对全部排气进行稀释,各工况点稀释排气的总体积保持不变,在稀释通道中进行颗粒物取样,其最大的优势是能够减少采样管和传输管道内的水蒸气凝结,稳定废气压力和废气温度,测量精度高尤其是能够瞬态测试工况,但造价很高且需要占用很大的空间。而部分流稀释系统是以全流稀释采样为基础建立起来的,将发动机的一部分废气取到稀释通道,经洁净空气稀释以后,将稀释混合气部分或全部通过滤纸,进而计算颗粒排放量,具有体积小、价格低、操作简单的优点。

对于中型或大型柴油机,颗粒物测试因场地的限制很难实现全流稀释,采用适当调整和控制的的部分流稀释系统与全流稀释系统具有很高的相关性^[15-16]。船用柴油机排放测试为稳态测试,排气流量可用流量计准确测得,多采用部分流稀释系统,其中国标推荐的带有流量测量的流量控制系统通过保持废气流量为常数,改变稀释空气的流量来控制废气采样量,该系统不仅操作简单方便,而且测量较准确。

1.5.2 颗粒物称重要求

颗粒物测试过程中滤纸的称重至关重要,具体的称重要求可归纳为以下几点^[6]:

1) 试验前至少 1 h,将滤纸放入称重室进行稳

定。如果滤纸在离开称重室的 8 h 内没有使用,在使用前必须重新稳定、称重。

2) 参比滤纸的要求:在取样滤纸(对)称重后的 4 h 内,应同时称重两张未经使用的参比滤纸或参比滤纸对。在取样滤纸两次称重期间,如果参比滤纸(对)平均质量的改变量超过推荐滤纸最小荷重的 $\pm 5%$ (滤纸对 $\pm 7.5%$),则所有取样滤纸作废,重做排放试验。

3) 试验完成后,应将滤纸送回称重室稳定至少 1 h,然后才可称重,但不得超过 80 h。

2 试验条件及实施

2.1 试验机参数

排放试验在两台增压中冷中速柴油机上进行,高压油泵均为机械增压式,其基本参数如表 1。

表 1 试验机基本参数

名称	机型 1	机型 2
缸径 × 行程 (mm × mm)	260 × 380	200 × 300
压缩比	13.15:1	13.42:1
活塞单缸排量(L)	20.16	9.42
额定功率(kW)	1 667	531
额定转速(RPM)	750	750
供油提前角(°CA)	9	5.5

2.2 试验台架布置

本试验在船机企业试验台架上进行,试验台架和测试仪器的布置简图与要求如图 4 所示。气体分析仪采用的是 CAI 600 排气分析系统,颗粒物采样设备为意大利 Control System 生产的 Micro-PSS 颗粒物采样系统,该系统是带流量控制和总取样的部分流稀释系统。气态污染物各成分对取样点废气温度要求不同,满足 HC 测试要求的取样点处废气温度应至少为 190 °C,对于原始废气单探头直接取样系统,为了兼顾 HC 与其他各成分的温度要求,规范要求取样点处废气温度大于 190 °C。其他试验条件及

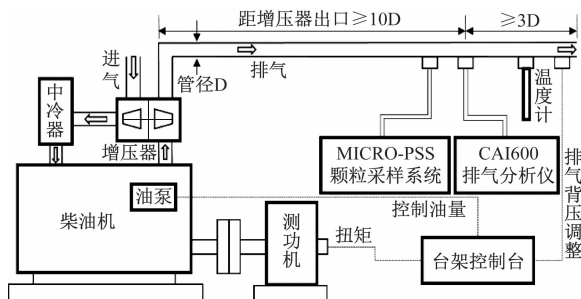


图 4 试验台架现场布置简图

安装均符合要求。

2.3 试验机型的限值

两试验机型均属于国标第二类船机,其第一、二阶段限值要求如表 2 所示^[1,6]。

表 2 试验机第一、二阶段限值

标准		国标/(g/kW·h)			IMO/ (g/kW·h)
		CO	HC + NO _x	PM	NO _x
机型 1	第一阶段	5.00	9.80	0.50	11.97
	第二阶段	5.00	9.80	0.27	9.60
机型 2	第一阶段	5.00	7.80	0.27	11.97
	第二阶段	5.00	6.20	0.14	9.60

2.4 试验的实施

针对国标与 IMO 要求的差异,为了使试验条件在满足国标要求的同时,也能满足 IMO 对母型机的要求,试验条件按国标的相关要求进行控制:中冷器冷却介质温度应不低于 20 °C,增压空气的温度保持在制造企业规定的最大增压温度(即 100% 负荷时增压温度)的 $\pm 5K$ 范围内。试验时机型 1 采用主机循环(E3 循环),在额定功率下分别在喷油正时为 9°CA BTDC 和 7°CA BTDC 时进行测试;机型 2 采用辅机循环(D2 循环),在额定功率下分别在喷油正时为 5.5°CA BTDC 和 3.5°CA BTDC 时进行测试。

3 试验结果与分析

3.1 各排气组分的变化分析

3.1.1 NO_x 排放浓度对比

图 5 中机型 1 喷油正时为 7°CA BTDC 时各工况点的 NO_x 排放浓度比 9°CA BTDC 时均降低,并且随着负荷的增加 NO_x 排放浓度降低。而机型 2 喷油正时延后 2°CA 后 NO_x 排放浓度同样下降,但随着负荷的增加 NO_x 排放浓度升高。因为 NO_x 的生成主要与高温、氧浓度和反应时间有关,喷油正时延后 2°CA,缸内燃烧所达到的最高温度降低,从而抑制 NO_x 的生成。而在 E3 循环中随着负荷增加,柴油机转速升高,燃烧速度加快,燃烧温度升高,这些有利于 NO_x 的生成,但转速升高使高温持续时间缩短,又不利于 NO_x 的生成。NO_x 排放浓度随负荷增加而降低是上述原因综合作用的结果。在 D2 循环中各工况点转速不变,负荷减小,循环喷油量减少,缸内最高燃烧温度降低,不利于 NO_x 的生成。

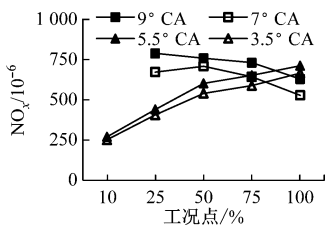
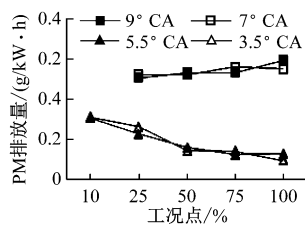
图5 NO_x 排放对比

图7 PM 比排放量对比

3.1.2 HC 排放浓度对比

HC 的生成主要是因为混合气的过浓或过稀,以及缸壁的冷激效应。图 6 中两机型随着负荷减小,HC 排放浓度均升高;机型 1 喷油正时延后 2°CA 后,HC 排放浓度在各工况点都降低;机型 2 喷油正时延后 2°CA 后 100% 工况点 HC 排放浓度降低,其余各工况点均升高。首先随着负荷减小,转速下降,过量空气系数增大,缸内存在过稀混合气,同时低负荷时燃烧温度较低,HC 的氧化作用弱,使得低负荷时 HC 的排放浓度比高负荷时高^[17]。然后推迟喷油,排气温度升高,有利于 HC 后期的氧化,HC 的排放浓度会降低。但在 D2 循环中高负荷时缸壁的冷激效应不明显,HC 后期的氧化作用占主要因素,而低负荷时推迟喷油使滞燃期缩短,不利于燃气的混合,同时缸壁温度降低,冷激效应变明显,使混合气的过浓或过稀和冷激效应占主要因素。

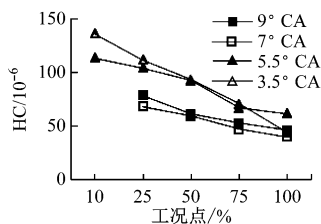


图6 HC 排放对比

3.1.3 PM 排放量对比

图 7 中,机型 1 PM 排放量随负荷减小而减少,而机型 2 PM 排放量随负荷减小而增加,喷油正时延后 2°CA 时 PM 排放量在各工况点变化不一。因 PM 排放与 NO_x 排放在理论上是 trade-off 关系,各工况点测试结果总体上与第 3.1.1 节中 NO_x 变化趋势在理论上相符合。其中 PM 主要包括碳烟和未燃 HC,碳烟的生成主要在燃烧初期和中期,而碳烟和未燃 HC 的氧化基本伴随整个燃烧过程。随着喷油正时延后,扩散燃烧阶段燃烧的油量增多,有利于碳烟生成,同时排气温度升高,有利于碳烟和未燃 HC 的氧化,各工况点 PM 比排放量有升有降,是生成量和氧化量叠加作用的结果。

3.1.4 油耗率对比

由图 8 可知机型 1 喷油正时延后 2°CA 时油耗

率均有增加。而机型 2 喷油正时延后 2°CA 时,低负荷工况点油耗率基本无变化,高负荷工况点的油耗率略有增加。

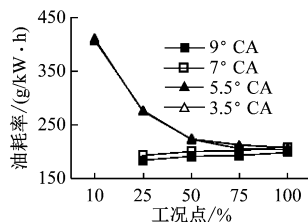


图8 油耗率对比

3.2 试验结果判定和比排放量对比

测试结果分别按国标和 IMO 要求进行修正和计算,结果如表 3。修正后的比排放量分别对应表 2 中限值可知;机型 1 喷油正时为 9°CA BTDC 时 HC + NO_x 比排放量不满足国标第一阶段限值,PM 和 CO 比排放量能满足国标第一阶段限值,且余量较大;喷油正时延后 2°CA,PM 的恶化趋势较平缓,远低于 NO_x 降低的趋势,且 HC 有一定改善,7°CA BTDC 时 HC + NO_x、CO 和 PM 比排放量均能满足国标第一和第二阶段限值。机型 2 喷油正时为 5.5°CA BTDC 时 NO_x 比排放量满足 IMO Tier II 限值,但 HC + NO_x 比排放量不满足国标第一阶段限值,PM 和 CO 比排放量能满足国标第一阶段限值,且有余量;喷油正时延后 2°CA,NO_x 的改善效果同样比 PM 的恶化程度较明显,但 HC 稍有恶化,3.5°CA BTDC 时

表 3 试验机型比排放量修正计算结果对比

排放量 (g/kW·h)		HC	NO _x	HC + NO _x	PM	CO
机型 1 9°CA	国标修正	0.202	9.531	9.733	0.131	0.508
	IMO 修正	0.202	9.926	—	—	0.514
机型 1 7°CA	国标修正	0.191	8.531	8.722	0.136	0.817
	IMO 修正	0.191	8.864	—	—	0.825
机型 2 5.5°CA	国标修正	0.359	7.618	7.977	0.159	0.354
	IMO 修正	0.359	7.844	—	—	0.357
机型 2 3.5°CA	国标修正	0.371	6.797	7.168	0.167	0.344
	IMO 修正	0.371	7.102	—	—	0.347

HC + NO_x、CO 和 PM 比排放量均能满足国标第一阶段限值。两机型 NO_x 湿度修正系数 IMO 修正结果均比国标修正略高,另外干湿修正系数差异不大,使得测试结果经 IMO 修正后的 NO_x 比排放量比国标修正后的结果略高。

对于类似上述试验机型的现有船机,在优化喷油正时的过程中,NO_x 降低的趋势很明显,HC 比排放量变化不大,CO 限值很宽松,故仅需考虑 PM 的恶化趋势。若 PM 排放满足限值,HC + NO_x 不满足限值,即可考虑牺牲部分燃油经济性,通过推迟喷油正时来满足国标第一阶段限值。而对于更小排量机型,国标 NO_x 限值比 IMO Tier II 中 NO_x 限值苛刻很多,并且 PM 限值也较低,同时不同制造企业的机型各排气污染物对提前角的敏感程度会不同,仅通过推迟喷油正时虽能使 NO_x 排放得以改善,但燃油经济性、排气温度和 PM 排放也会有不同程度升高,为了能在满足国标排放要求的同时使柴油机保持良好的状态,可考虑结合其他优化措施。

4 结束语

1) 国标与 IMO 标准存在诸多差异,并且国标增加了耐久性试验要求、颗粒物测试与限值要求。在限值方面国标 NO_x 限值与 IMO Tier II 中 NO_x 限值的差异性在不同功率机型上表现不同,对于同一机型按照两标准要求排放测试的计算结果和评判结果也会存在差异。两机型 NO_x 湿度修正系数均表现出 IMO 修正结果比国标修正略高,使得经 IMO 修正后的 NO_x 比排放量比国标修正后的结果略高。

2) 在优化喷油正时的过程中,一定范围内 PM 排放对喷油正时的变化不敏感,NO_x 排放量变化较大,HC 排放随喷油正时调整变化不一,但比排放量变化不大。

3) 对于满足 IMO 要求的现有机型,在 PM 满足限值的前提下,可以通过喷油正时的优化,使其满足国标第一阶段限值,从而达到改善排放的目的。

参 考 文 献

- [1] International Maritime Organization. Report of the Marine Environment Protection Committee on Its Fifty Eighth Session-Revised NO_x Technical Code [R]. London: International Maritime Organization, 2008: 10-17.
- [2] 中国船级社. 船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南,2020[S].
- [3] LIU Z M, LU X H, FENG J L, et al. Influence of Ship Emissions on Urban Air Quality: A Comprehensive Study Using Highly Time-Resolved Online Measurements and Numerical Simulation in Shanghai [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(1):202-11.
- [4] 马冬,丁焰,尹航,等. 我国船舶港口空气污染防治现状及展望[J]. 环境与可持续发展,2014,39(6): 40-44.
- [5] 冯淑慧,朱祉熹,RENILDE B,等. 中国船舶和港口空气污染防治白皮书[EB/OL]. (2014-10)[2021-04-13] <http://www.nrdc.cn/information/informationinfo?id=91>
- [6] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段):GB 15097—2016[S].
- [7] HU N, ZHOU P L, YANG J G. Reducing Emissions by Optimizing the Fuel Injector Match with the Combustion Chamber Geometry for a Marine Medium-Speed Diesel Engine[J]. Transportation Research Part D,2017:53.
- [8] 黄加亮,温朋,尹自斌,等. 燃烧室对 4190 船用柴油机燃烧及排放性能的影响[J]. 中国航海,2015,38(3): 23-28.
- [9] 刘勤安,邢辉,武占华,等. 米勒循环降低船用低速柴油机 NO_x 排放[J]. 中国航海,2016,39(4):113-117.
- [10] DONG D L, ZHAO C P, LI X Z, et al. Simulation Study of the Impact of Two-Stage Turbocharged System on Diesel Engine [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1800: 3555-3559.
- [11] ZHOU S, LIU Y, LI C L. Study on Reducing NO_x Emission from a Marine Diesel Engine[J]. Advanced Materials Research, 2014:2880.
- [12] 田兆波. 船用中速主柴油机降低 NO_x 排放试验分析[J]. 船海工程,2012,41(1):70-72+76.
- [13] 李可顺,李斌,孙培廷. 喷油提前角对船用柴油机 NO_x 排放特性的影响[J]. 大连海事大学学报,2010,36(3):87-89.
- [14] 贾建雄,张世恒,王忠俊. 船舶发动机排气污染物满足不同标准的差异分析[J]. 船海工程,2020,49(5): 23-27+32.
- [15] 王凤滨. 基于全流和部分流稀释采样系统测试柴油发动机排放的相关性分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [16] SILVIS W M, MAREK G, KREFT N, et al. Diesel Particulate Measurement with Partial Flow Sampling Systems: A New Probe and Tunnel Design that Correlates with Full Flow Tunnels [J]. SAE Transactions,2002:111.
- [17] 尹自斌,薛阳,马海涛,等. 某船用中速柴油机排放特性试验[J]. 中国航海,2013,36(3):37-40.