船舶主机氮氧化物排放三层次（Tier III）技术

江苏省江阴中等专业学校 （214400） 朱达新

摘要：环保问题目前已得到全球的重视，对废气排放的要求也越来越严格，提供船舶动力的主机控制排放，目前已成为推进船用柴油机优化设计的重要驱动力。文章简单介绍了SCR和废气循环EGR使用的一些技术问题，并对SCR和EGR系统进行比较，提出了满足IMO排放NO_x、Tier III的船舶主机解决方案。

大型船舶动力装置中的发动机一般采用中、低速柴油机，通常称为主机。船舶主机是以柴油为燃料的内燃机，低速和中速柴油机可以采用中质或重质燃油以降低油耗，达到降低航运成本的目的；通过对扫气、增压系统以及燃油系统等进行相应的改进，即提高平均有效压力以提高单缸功率，柴油机的性能得到了极大的改善，与其他热力机相比具有热效率高的特点。因此，柴油机以其良好的经济性和可靠性在船舶上得到了广泛应用，但在其燃烧过程中产生大量CO_2、氮氧化物（NO_x）、SO_2、CO及HC化合物等有害物质，这些物质造成的大气污染是不容忽视的。

1. 对船舶柴油机排放的限制

目前国际范围内对船舶柴油机排放的限制越来越严格，所以控制排放已成为现在推进船用柴油机优化设计最重要的驱动力。2008年10月，在国际海事组织（IMO）的海洋环境保护委员会（MEPC），通过了《MARPOL公约—附则Ⅵ》修正案，同意通过两个阶段实现减排目标：即2011年达到二层次（TierⅡ）限值，2016年达到更严格限制的TierIII（见附表）。

2. 满足IMO排放NO_x TierIII的船舶主机解决方案

目前MAN公司的研究有两种较成熟的方案：船舶柴油机排放NO_x技术规则（NO_xCode修正案）和选择性催化还原系统导则（SCR导则），它们于2011年7月15日在伦敦召开的IMO第62届海环会（MEPC62）上获得了通过。随着不断有新的区域被指定为排放控制区（ECA），意味着越来越多的船舶（见图1）将安装满足TierⅢ要求的柴油机。

58届海环会上通过的MEPC.176（58）决议（MARPOL附则Ⅵ修正案），已于2010年7月1日生效，其中第13条有关“NO_x”的规定：2016年1月1日或以后建造的船舶，若在第14条规定的排放控制区（ECA，2011年8月1日为北美区域）航行，船上柴油机NO_x排放满足Tier Ⅲ标准；当船舶在ECA区外航行时，满足TierⅡ排放标准即可。

（1）选择性催化还原SCR（Selective Catalytic Reduction）。SCR技术为后处理技术，其工作流程如图2所示。

NO_x排放三层次表

	转速n/（r·min^{-1}）	NO_x排放/（g·（kW·h）$^{-1}$）
Tier Ⅰ(一层次) 适用于2000年1月1日～2010年12月31日之间建造的船舶	$n<130$	17
	$130\leqslant n\leqslant 2\,000$	$45.0Xn^{-0.2}$
	$n\geqslant 2\,000$	9.8
Tier Ⅱ(二层次) 适用于2011年1月1日以后建造的船	$n<130$	14.4
	$130\leqslant n\leqslant 2\,000$	$44.0Xn^{-0.2}$
	$n\geqslant 2\,000$	7.7
Tier Ⅲ(三层次) 适用于2016年1月1日以后建造的船排放控制区（ECA）	$n<130$	3.4
	$130\leqslant n\leqslant 2\,000$	$9Xn^{-0.2}$
	$n\geqslant 2\,000$	2

图1　船舶

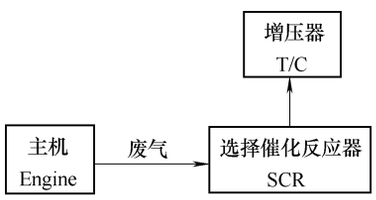

图 2

船舶主机废气出来经过SCR，通过化学反应，除去其中的NO和NO_2，形成无污染的N_2和H_2O，SCR内的化学物质为尿素或氨水。

目前阶段如果全航程使用SCR，其使用成本太高，所以在SCR接一路旁通管路，当船舶航行在ECA区域外时，废气旁通，不使用SCR；在主机启动阶段，由于排气温度达不到SCR工作所需的温度（≥300°C），所以在扫气箱和排气进增压器管上加一路旁通管，通过控制管路上的阀减少进主机（见图3）进气量，使排气温度升高到SCR工作温度，根据MAN试验结果，在主机负荷为25%时，排气温度从258°C增加到300°C，此阶段油耗增加了约1.9g/kW·h。

SCR系统发证。根据MEPC62通过的NO_xCode修正案和SCR导则，对于配备SCR系统的柴油机，由于技术和其他实际原因，不能按正常的程序进行整体台架试验（即传统的A方案Scheme A），以及不能按现有NO_xCode要求进行船上试验时，在主管机关批准下允许按SCR导则规定的B方案方式（Scheme B）进行验证，即允许SCR系统和柴油机分别进行台架试验，但对SCR系统（主要指选择催化反应器）又可使用等同于柴油机实际排气的模拟气体进行试验，且可采用尺寸缩放而非全尺寸的SCR系统来进行，此外还允许采用计算机模拟方式来计算SCR系统的NO_x转化率，所以，配备SCR系统的柴油机NO_x排放值可以基于前期单独进行台架试验的柴油机的NO_x排放值和计算出来的SCR系统NO_x转换率，根据SCR导则中的公式计算得出，这样NO_x技术案卷所需信息和数据也被认为齐全，可据此签发柴油机排放证书（EIAPP证书）。在柴油机连同SCR系统安装到船上，进行了额定功率25%、50%、75%三个负荷点的整体船上核实试验（On board confirmation test）并满意后，可以签发国际防止空气污染证书（IAPP证书）。

目前SCR使用的技术问题。尺寸缩放试验采用的催化器比实际使用的小，加之主机排气管实际安装尺寸不同和排气系统在空气动力方面的复杂性。根据缩放试验得到的NO_x转化率能否真实反映该柴油机所配备实际SCR催化剂的转化是不确定的，模型常数的选取是否合理，模拟计算出的数据可信度和准确性的考核，目前无成熟的方法。

如果由于前期的模拟计算、缩放试验等本身存在不合理或误差，导致方案不能真实反映该柴油机所配备实际SCR催化器的转换能力，装配全尺寸的SCR的主机排放肯定是不达标的，但根据SCR导则，主机厂家只要完成NO_x技术方案，主机肯定能获得EIAPP证书，但当主机和SCR装船后，船厂将对SCR系统和柴油机进行整体的船上核实试验，如果根据该试验结果计算出来的转化率超出前期技术方案中对应负荷点的转换率的5%，船舶将不能获得IAPP证书，造成船舶无法正常航行，但仅根据船上试验结果，根本无法判定是由于SCR在实船上布置不合理造成的，还

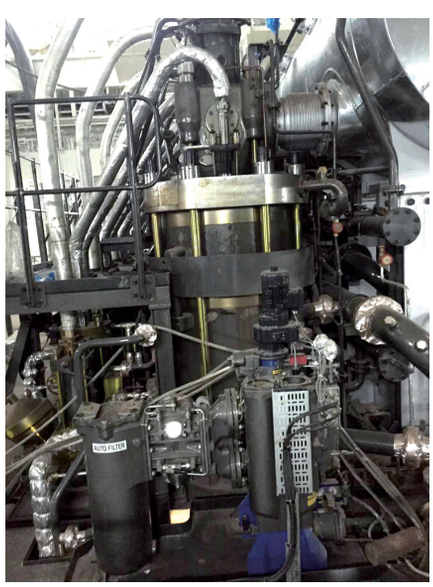

图3　船舶主机

是由于前期的模拟工具计算或尺寸缩放试验造成的，根据SCR导则，申请对方最终接受SCR系统导则，主机和SCR已经由船厂接受，且持有EIAPP证书，而船舶IAPP证书的申请方却是船厂，所以一旦发生上述问题，船厂将非常被动。船上核实试验费用较高，船上试验的程序、工艺必须要得到主机厂家足够和及时的技术支撑，否则必将影响到船厂的取证和交船。

由此可见，现阶段采用SCR导则，船厂承担了很大部分根据传统方法本应由主机厂家承担的责任风险，增加了船厂的费用和负担，延长交船时间，所以在订购主机时，必须要和主机厂家就上述问题达成双方都能接受的方案。

（2）废气循环EGR（Exhaust Gas Recirculation）。根据NO_x的形成原理，在燃料燃烧产生高温高压的条件下，它是由空气中的N_2和O_2通过化学反应而产生的，为了减少这种化学过程，就需要降低反应温度，破坏产生NO_x的条件。据此MAN公司研究了废气再循环（EGR）系统，此系统是MAN公司的专利产品，原理为使主机燃烧过程中使用含氧量比大气低的气体，进机气体中O_2量减少的同时燃烧温度下降，破坏了NO_x的形成原理（见图4）。

其流程如下：部分废气引出来以后，通过应急停止阀（S/D Valve）进入洗涤器（Scrubber），洗去废气中的油灰、SO_2等，形成“干净”的废气，主要成份为CO_2，然后经过冷却器、水分分离器（Cooler/WMC），增加压力通过系统启停阀（C/O valve）进入主机扫气集管并和主机本身进气混合进主机燃烧。通过上述过程，使进气中的O_2由通常的约21%降至约16%，此时的燃烧温度和NO_x的产生量大幅下降。

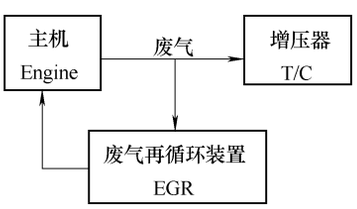

图 4

经过一段时间，洗涤器中的水会呈酸性，通过系统中的水处理装置（WTS）处理，加入NaOH进行中和处理，产生的无害物质可以排到海中。

全球首台满足IMO的Tier Ⅲ排放标准要求的主机（见图5）订单已经生效，为MAN公司的6S80ME-C9型船机，集成MAN公司第二代EGR系统，未来MAN公司为了满足IMO的Tier Ⅲ排放要求，EGR系统将作为MAN机型的标配。

（3）SCR和EGR系统比较。SCR系统体积较大，要求安装空间大，压力损失约为0.1×10^5Pa，运行时必须大量使用尿素等化学药剂，对船东来说使用成本较高，同时于船厂来说，使用时取证等有一定的风险；但是SCR装置对于主机本身改动非常少，油耗损失较小，对于旧主机改装也有一定优势，并且SCR目前研发厂家较多，已有成熟的产品。

EGR系统与主机能够很好地整合，主机布局只需微小改动，不会使主机的尺寸产生太大的变化，安装空间要求小，船厂使用风险小一些；但目前还没有成熟的产品。由于增加了功率较大的鼓风机，额外的燃料消耗约为主机的1%。其油耗损失相对SCR要大，由于废气旁通，进入增压器的废气量减少（据估计达到减少80%的NO_x，废气旁通量约为30%～40%），因此增压器的工作效率肯定降低，目前MAN还没有具体数据。

目前来说，双方设备成本差不多，参考价约为45EUR/kW（主机）；对于船东来说，使用何种方式，要结合航运中燃料、化学药剂的使用成本综合考虑。

图5 主机全景

3. 结语

综上所述，SCR和EGR各有优势，随着强制生效日期的逐渐临近，其相关技术的研发也会突飞猛进，技术方面的改造也会源源不断地涌现出来。

参考文献：

[1] 王福亮. 柴油机SCR技术[J]. 内燃机，2011（3）：34-35.

MW （收稿日期：20160718）