

2011 年大功率柴油机国际技术交流研讨会专题报道

涡轮增压系统 IMO III 技术与解决方案

Christoph Rofka¹, 胡伯宗², 刘秋颖², 王伟才²

- (1. ABB 涡轮增压系统有限公司, 瑞士巴登 5401;
2. 重庆 ABB 江津涡轮增压系统有限公司上海分公司, 上海 201208)

摘 要: 介绍了通过涡轮增压系统结合发动机机内技术来实现 IMO III 排放标准的技术及解决方案。在 IMO II 排放水平的基础上通过机内技术进一步降低 NO_x 排放需要采用极强的米勒定时, 因此需要较高的增压压力即两级涡轮增压, 同时结合 VCM(气阀控制系统)、紧凑型 SCR 系统或 EGR 等技术方法来实现 IMO III。ABB 的研究发现, 两级涡轮增压系统具有同时降低油耗与 NO_x 的潜能, 并且具有运行灵活性等优势。

关键词: IMO III; 两级涡轮增压; VCM; 紧凑型 SCR; EGR

中图分类号: TK421⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)04-0011-05

Turbocharging System Technologies and Solutions for IMO III

Christoph Rofka¹, Hu Bozong², Liu Qiuying², Wang Weicai²

- (1. ABB Turbo Systems Co., Ltd., SwitzerlandBaden 5401;
2. ABB Jiangjin Turbo Systems Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai201208)

Abstract: The technologies and solutions which combines turbocharging system and in-engine technologies to realize IMO III emissions regulations are introduced. Based on IMO II emissions level, strong Miller timing is necessary for further reduction of NO_x emission with in-cylinder technology, therefore, higher charging pressure, which means two-stage turbocharging should be adopted, together with VCM, compact SCR system and EGR to realize IMO III. ABB research shows that two-stage turbocharging could reduce both fuel consumption and NO_x emission and has the advantages of operational flexibility.

Keywords: IMO III; two-stage turbocharging; VCM; compact SCR; EGR

0 引 言

全球船舶行业日益严格的排放法规陆续出台, 国际海事组织通过的 IMO II 标准已于 2011 年初生效, IMO III 标准将于 2016 年实施, 这意味着在排放控制区域(ECA)要实现 NO_x 排放水平大幅降低(在 IMO I 基础上降低 80%)。实现 IMO II 标准的方法较多, 例如机内措施, 包括米勒定时、提高压缩比、延迟燃油喷射定时、加湿技术等; 还可采用后处理技术, 主要是 SCR(选择性催化还原)。由于多数船用发动机均采用增压技术, 因此可根据 Miller 循环结合高增压比增压器来实现 IMO II, 目前较多采用这种方法。在此基础上进一步实现 IMO III 则需要开发新技术, ABB 对此进行的研究表明:

强米勒定时两级涡轮增压系统结合 VCM(气阀控制系统)、紧凑型 SCR 系统或 EGR 可大幅度降低 NO_x 同时提高发动机的燃油经济性。

1 实现 IMO III 的方式

实现 IMO III 排放标准的方式有多种, 本文主要介绍两级增压结合其他一些措施来实现。

1.1 IMO II 解决方案

对于船舶柴油机, 目前实现 IMO II 方案的主要方法是中等米勒定时与高压比单级增压, 可以在不降低柴油机经济性的情况下使 NO_x 的排放量较 IMO I 标准减少 20%。

图 1 中 λ_1 为充量系数, 表征米勒强度, λ_1 越小, 则表示米勒程度越大; B_{mep} 为平均有效压力;

π_c 为压气机压比。由图 1 可见,若要保持平均有效压力不变,越强的米勒定时,则需要越高的压比。

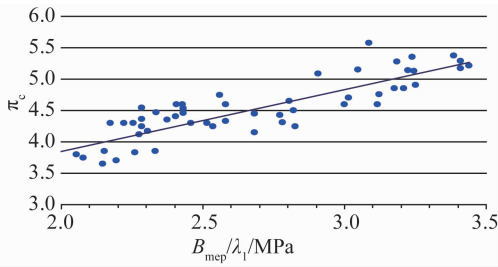


图 1 压比与平均有效压力/米勒强度的关系

IMO II 排放标准要求 NO_x 排放量比 IMO I 降低 20%, 因此利用中等米勒定时结合高增压比的单级增压器, 例如 ABB 的 TPS-F、TPL-C 及 A100 系列增压器(如图 2 所示单级涡轮增压)即可实现。

IMO III 排放标准要求 NO_x 排放量在 IMO I 的基础上降低 80%, 因此要采用极强的米勒定时, 即要求非常高的压比, 若此时采用单级增压, 则增压器的价值(效率、尺寸、应力、匹配难度等)大大降低, 如图 2 所示, 因此需要采用两级增压来实现更高的增压压比, 以提高整个增压系统的价值。

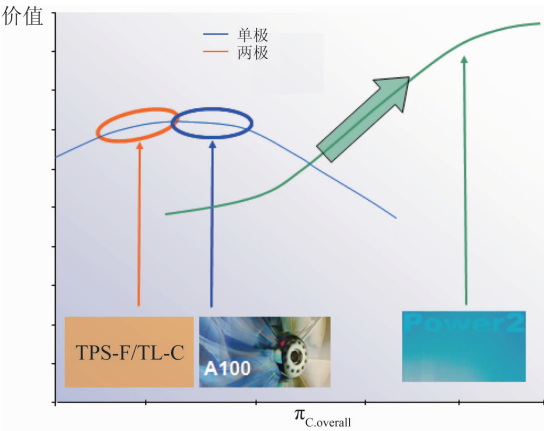


图 2 压比提高与增压器及系统的选择关系

1.2 两级增压的必要性

当单级增压压比 π_c 大于 5.0 时, 发动机的部分负荷将面临挑战, 即部分负荷时增压器效率降低以及进气门早关导致过量空气系数降低, 当降低较多时则会出现燃烧不良, 冒黑烟等状况。但 VVT 是很好的弥补措施, 可以改善部分负荷性能。在高压比时需要大量的配机元件进行匹配, 使得增压器型谱变复杂, 增加成本。当单级增压压比 π_c 大于 5.8 时, 需要增大增压器尺寸, 增压器效率、配机灵活性方面受到限制, 同时增压器件应力增加。

相对于单级增压随压比提高而带来的一些限

制, 采用两级增压, 当压比 π_c 大于 6.5 时, 可以减小增压器尺寸、提高增压器效率、提高配机灵活性、降低应力等。鉴于单级高压比增压有其局限性, 因此随着排放法规达到 IMO III, 则要求两级增压代替单级增压, 以进一步发掘发动机的潜能。

2 技术方法

利用米勒定时结合发动机技术来实现 IMO III 的主要技术方法为: 两级涡轮增压结合 VCM 气阀控制系统、紧凑型 SCR 系统或者高压 EGR 增压器。

2.1 Power2-两级涡轮增压

两级增压的潜能:

- (1) 涡轮增压器总效率达到 75% ;
- (2) 压比高达 10 ~ 12 ;
- (3) 增加气缸前后压差。

其中增加气缸前后压差可增加扫气, 因此可减小气阀重叠角, 减少燃油消耗量, 提高发动机效率, 提高经济性。

两级增压高低压级间中冷对涡轮增压器总效率影响较大, 如图 3 所示。在理想状况下, 经过级间中冷后, 高压级压气机进口温度由 60℃ 降低到 25℃, 增压器总效率大约提高 6%。这是因为中冷可使两级压缩接近等温过程, 即理想状态, 提高压缩效率。

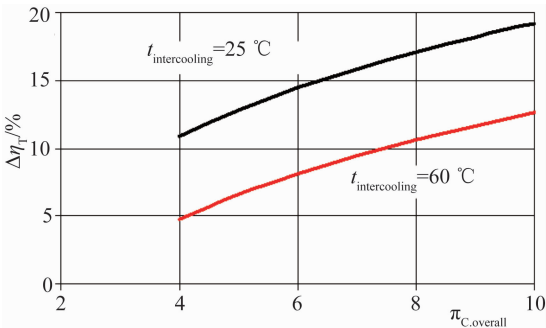


图 3 级间中冷对涡轮增压效率的影响

两级增压可充分利用米勒定时潜能, 如图 4 所示。两级增压系统下若维持 NO_x 排放水平不变, 则可比单级增压降低 9% 的燃油消耗率; 若保持燃油消耗率不变, 则相对于 IMO I 标准下的单级增压可减少 70% 的 NO_x , 接近 IMO III 排放标准。目前可达到的区域如图 4 所示。同时两级增压面临着一些挑战, 如: 强米勒定时在部分负荷时温度过低, 燃烧困难, 发动机冷起动问题凸显。针对这些问题, 需要采用下面介绍的 VCM 系统。

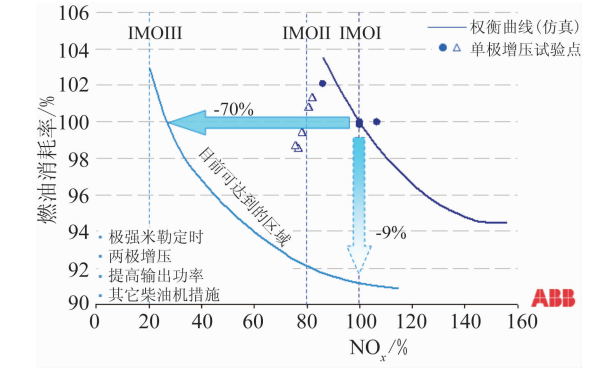


图 4 应用两级增压与极强米勒定时的理论潜能

两级增压对增压器设计有较大的影响，具体如表 1 所示。

表 1 两级增压对增压器设计的要求

高压级增压器设计要求	低压级与高压级增压器的热力学要求
高增压压力↔密封，壳体	较低的增压比/膨胀比
高推力↔轴向轴承设计	宽广的压气机图谱↔可应用 (如 VVT, EGR, ...)
高扭矩↔扩大转子直径 Φ	
高废气应力↔安装，壳体	较高的总效率

2.2 VCM-气阀控制系统

针对极强米勒定时两级增压面临的低负荷、冷启动和响应速度慢等问题，ABB 和 INA 公司合作开发了 VCM 气阀控制系统(如图 5 所示)来解决上述问题。

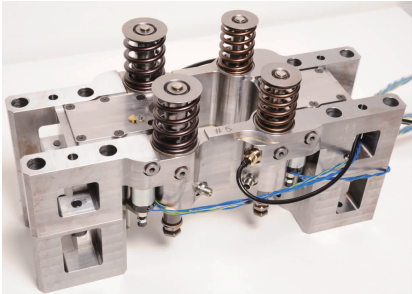


图 5 VCM 气阀控制系

VCM 支持不同运行模式：

- (1) 瞬态与稳态；
- (2) 排放控制区域的开/关模式 (ECA vs. non-ECA)；
- (3) 柴油与气体；
- (4) 等转速与主推进。

VCM 可以实现快速响应，即它具有较陡的气阀开启与/或关闭升程曲线；VCM 可实现内部 EGR，同时它还可以替代现有的控制措施，如旁通、放气、节流阀等。

下面通过稳态与瞬态 FPP 仿真计算来对比单级增压、两级增压以及两级增压(带可变进气关角度)对油

耗和排放的影响。计算的发动机参数如表 2 所示。

表 2 所计算的发动机参数

平均有效压力/MPa	2.5
转速/(r/min)	750
单级增压/ 增压压力/MPa	0.46
两级增压/ 增压压力/MPa	0.85
单总管排气系统	

由图 6 可见，单级增压系统(BP + WG)低负荷时 BP 阀开，防止压气机喘振，同时提高空燃比；高负荷时 WG 阀开，防止增压器超速，但此时空燃比降低，低于两级增压时的空燃比。全工况范围内单级增压保持较高的空燃比，未出现冒烟情况。但普通两级增压系统在低负荷时空燃比低于冒烟极限，出现冒烟的现象。带 IVC(Inlet Valve Closure)的两级增压系统在低负荷时通过进气阀晚关提高空燃比，解决了冒烟问题。

图 7 和图 8 所示，当负荷低于 40% 工况时，带 IVC 的两级增压系统的燃油消耗率和 NO_x 排放最低，单级(BP + WG)增压次之，而普通的两级增压系统经济性和排放最差；中高负荷工况时，两级增压的燃油消耗和排放较低。综合考虑，带 IVC 的两级增压系统对发动机的经济性和排放最有利。

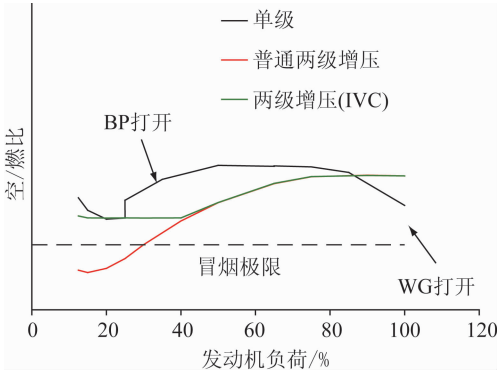


图 6 单级 (BP + WG)、普通两级增压、两级增压 (IVC) 对空燃比的影响 (稳态)

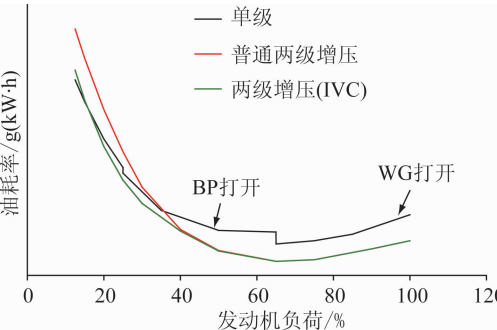


图 7 单级 (BP + WG)、普通两级增压、两级增压 (IVC) 对油 耗率的影响 (稳态)

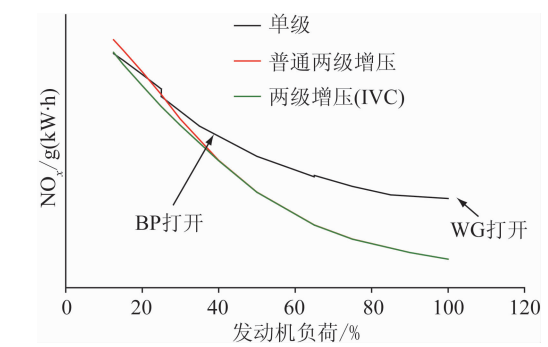


图 8 单级 (BP + WG)、普通两级增压、两级增压 (IVC) 对 NO_x 的影响 (稳态)

图 9 和图 10 所示, 当气阀不变时, 两级增压系统响应较单级增压慢, 当 VCM 系统只对排气阀进行调节则响应速度提高不明显, 而进排气阀同时调节与只调节进气阀响应速度提高显著, 且两者基本无差异。说明采用 VCM 系统可大大提高发动机的瞬态响应速度, 即提高了发动机的瞬态性能。

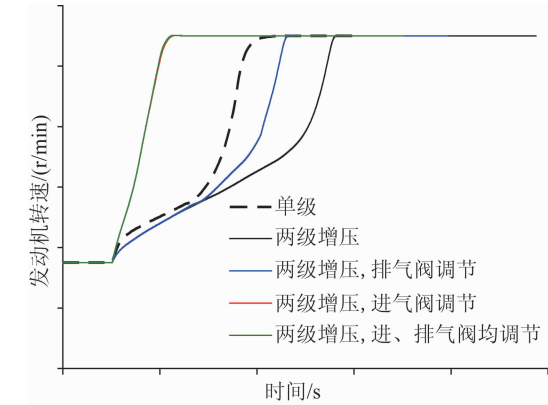


图 9 单级、两级增压 VCM 不同控制模式对发动机转速的瞬态响应速度比较

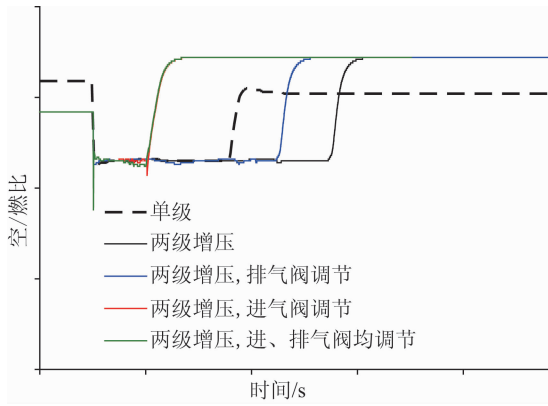


图 10 单级、两级增压 VCM 不同控制模式对发动机空燃比的瞬态响应速度比较

目前 VCM 系统的开发状态如下: 升程和定时的核对, 仿真 = 实测; 滑油流量测量; 制动功能试验; 电磁阀开启与关闭特性; 温度测量; 1 000 h

耐久试验和性能稳定性; 发动机试验 (FPP、发电、瞬态); 能耗测量。

将要进行和正在进行的试验包括: 进一步发动机台架试验, 包括气体机试验; 液力间隙调整; 内部 EGR 等。

2.3 紧凑型 SCR 系统

单级增压降低排放的最直接方法是利用 SCR (选择性催化还原) 后处理系统, 对于两级增压系统, 仍需采用其他措施 (如 SCR) 来进一步降低排放, 以达到 IMO III 标准。由于催化剂有其最佳的反应温度范围, 因此两级增压系统的 SCR 可置于高压级与低压级涡轮之间。高压级涡轮出口压力较环境压力高, 相同质量流量的废气密度增加, 相应地, SCR 的体积将大幅度减小, 所以该 SCR 系统被称为紧凑型 SCR 系统。

对带 VCM 和紧凑型 SCR 系统的强米勒定时两级增压系统进行发动机试验, 结果如下: 满负荷 NO_x 降低量: > 80% @ NH₃ slip < 20 × 10⁻⁶; 较好的瞬态性能; 60 l/MW 的催化剂消耗量。由此可见, 系统达到了 IMO III 排放标准, 同时发动机性能良好。

目前开发的紧凑型 SCR 方案可应用于 LFO (轻油); 下一步将进行优化设计以应用于 LFO (轻油) 和 HFO (重油)。

2.4 高压 EGR 增压器

EGR 可以降低燃烧温度, 因而减少 NO_x 生成量, 两级增压采用外部冷却高压 EGR, 将成为 IMO III 解决方案之一。由于两级增压发动机进气压力较高, 所以可用一个小型高压 EGR 增压器 (如图 11) 压缩废气, 经过冷却后和进气混合进入气缸, 此时无需使用 SCR 系统, 节省了部分成本, 但由于 EGR 增压器在重油柴油机的废气条件下工作容易腐蚀受损, 因此需要提高燃油品质, 即脱硫。但如果使用硫分较少的 MDO, 会使船东运行成本显著增加。

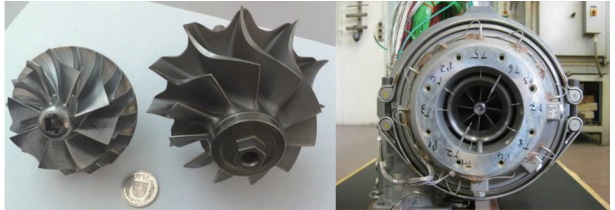


图 11 ABB 高压 EGR 增压器

目前高压 EGR 增压器开发的技术演示已实现, 发动机试验正在计划中, 其实际应用情况还需试验

结果和评估来决定。

3 IMO III 方案评估

排放标准由 IMO II 提升到 IMO III，相应所采取的方案主要需考虑如下几方面因素：

- (1) 初成本；
- (2) 燃油价格和可用性；
- (3) 附加运行成本(尿素，水，维护等)；
- (4) 必要的运行灵活性(ECA 与 non-ECA，气体与柴油等)；
- (5) 船舶设计方面(空间要求等)；
- (6) 开发难度和投放市场的时间；
- (7) 技术复杂性和相关的不确定因素等。

实现 IMO III 的最简单方法是，在 IMO II 柴油机的基础上加后处理 SCR 系统。但 ABB 主要研究了两级增压 + VCM + 紧凑型 SCR 的方案，本文从初成本和运行成本方面对两种方案进行了对比，如下图所示 12、13 所示。

IMO III 结构	影响初成本	影响燃油消耗率	影响年运行成本%燃油成本	注释
IMO II发动机 SCR	±0 +10%	±0%	+4%	尿素
Power 2 VCM 紧凑型 SCR	+15%	-3%~6%	+2%~+4%	NO _x 与油耗优化

图 12 IMO III 方案已证实的 NO_x 减排潜能与新技术对比

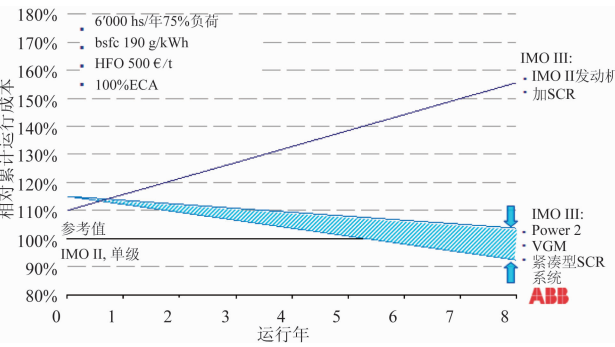


图 13 对船东总成本影响的估计

由图 12 可见，方案 1(IMO II + SCR 方案)初成本增加 10%，但由于采用尿素，则运行成本增加 4%，即总成本增加 14%。而方案 2(两级增压

+ VCM + 紧凑 SCR 方案)初成本增加 15%，但由于经济性提高，运行成本相对降低，如图 13 所示。方案 2 随着运行时间年增加成本不断降低，主要因为此种方案提高了发动机的经济性，使得油耗降低，累计运行成本减少。综合以上数据，采用强米勒定时两级增压 + VCM + 紧凑 SCR 的方案应用潜能较大。

鉴于两级增压结合 VCM 的优点，它可以支持其他不同的 IMO III 方案，如图 14。

Power 2 VCM	降低油耗	优化的ECA 和non-ECA	替代其它控制系统	第二措施影响最小程度
气体	×		×	
双燃料	×	×	×	
EGR	×	×	×	×
加湿技术	×	×	×	×

图 14 强米勒定时两级增压 + VCM 的其他 IMO III 方案效果

由图 14 对比可知，强米勒定时两级增压 + VCM 可以支持气体机、双燃料发动机、EGR 以及加湿技术，这几种方式均可降低油耗，替代其它控制系统，其中气体机不需要优化排放控制区域，EGR 和加湿技术对整个系统的影响程度较小。

4 总 结

本文回顾了 IMO II 解决方案，主要技术为中等米勒定时与高压比单级增压结合。但随着排放要求越来越严格，需要采用强米勒定时，即要求更高的增压压力，而单级增压面临着增压器尺寸、增压器效率、配机灵活性和应力增加等方面的限制，因此，如要进一步提高压比，则必须应用两级增压技术。为满足 IMO III 排放标准，ABB 开发了强米勒定时两级增压 + VCM + 紧凑型 SCR 的方案，VCM 弥补了两级增压低负荷性能较差、响应速度慢的问题，同时可降低油耗和 NO_x 排放；加上紧凑型 SCR 系统可进一步降低 NO_x 排放，达到了 NO_x 排放降低 80% 的目标。最后利用简化模型对比了两种 IMO III 方案的经济性，从多年运行累计成本考虑，强米勒定时两级增压 + VCM + 紧凑 SCR 的方案更经济合理，同时两级增压和 VCM 系统可支持 EGR 和加湿技术等多种不同的技术方案。