

烟研究是一种实用的双燃料发动机性能研究方法

烟，作为一种可用能量，是热力学第二定律提出的概念，该定律量化了从一个给定系统中可获得的最大功。

来自瑞典皇家理工学院（KTH）的博士研究生 Beichuan Hong，及他的导师 Anders Christiansen Erlandsson 教授和 Andreas Cronhjort 博士采取一种比过去更实际的方法来研究发动机零部件设计中烟的理论概念。

“以往的很多研究都是从烟的角度来讨论发动机的性能。” Beichuan Hong 说，“但是，由于烟是一个来自热力学的先进概念，它通常从理论上解释发动机的过程，如不可逆性或熵产生，而此概念并不容易掌握。因此，人们通常在宏观层面上应用它，而没有把它与具体的工程问题联系起来。尽管船用发动机的能效很高，但要研究其理论效率的极限，就要将其视作一个系统，并找出阻碍在实践中达到理论极限的因素。通过对发动机的全面观察，我们试图给出一些答案。”

他们研究了一台带两级顺序涡轮增压器的 Wartsila 10 缸 V 型 31DF 发动机部件内部的烟损失。高、低压涡轮增压器在每个压缩阶段后依次进行增压冷却，并且该系统使用空气旁通阀和废气旁通阀来提高增压效率及保护零部件。

发动机以 750 r/min 的转速在 25%、50%、75% 和 100% 的负载下运行。烟损失表征为：与燃烧相关的，散热或气体交换的损失。在商业平台 GT-Suite 上开发并验证了该发动机的一维仿真模型。分别对动态子模型，如通过进气阀的气流特性、气缸和管道中的热传递以及曲轴处的机械摩擦等进行了标定。

“我们没有把重点放在某个特定的发动机部件上，而是从系统的层面上研究了发动机的性能，并分析了效率低下的原因以及出现效率损失的原因。” Beichuan Hong 说，“简而言之，这个项目试图证明我们离‘理想’的发动机还有多远，以及哪里还有进一步改进的潜力。”研究发现：发动机燃烧烟破坏占比最大，占总烟破坏的一半以上；而气体交

换中流动烟破坏占第二，略高于其他烟破坏形式，且在高负荷时有所上升；发动机机械摩擦造成的热损失保持在相同水平，其对燃料模式和运行负荷的敏感性较低。

燃料烟

在双燃料模式下使用压缩天然气（CNG）（燃料预混，引燃柴油点燃）和常规柴油模式对发动机进行了评估。“这样的发动机配置使我们能够比较两种燃烧模式之间的差异。” Beichuan Hong 说。基于标定过的一维仿真模型，研究发现：燃烧不可逆性是造成发动机烟损失的最大原因，至少占燃料烟的 25%。烟破坏是由非平衡燃烧气体的化学反应、热传导和传质引起的，其中化学反应占比最大。

“根据我们的分析，双燃料模式比柴油模式具有更高的效率。例如，在相同制动平均有效压力（BMEP）的满负荷工况下，双燃料模式下的效率为 48.6%，而柴油模式下的效率为 47%。其中一个原因是，CNG 燃料比一般的化石燃料具有更高的能量密度。此外，CNG 的预混燃烧更容易集中在上止点，这使得气体模式下的燃烧过程更快，更均匀，从而减少了熵的产生。燃料烟损失导致指示平均有效压力（IMEP）和废气能量的降低，进一步限制了用于驱动涡轮机或其他废能回收系统的流动能量。燃料烟损失超过 25% 的研究表明：即使发动机已优化了效率，仍可通过优化缸内过程实现更快的燃烧，更低的热损失及更好的运行。” Beichuan Hong 说。

余热

“考虑了两类余热：一类是经涡轮和后处理后的废气的流动能量，另一类是冷却器带来的能量。这些总余热占燃料能量的 30% 以上。但是，烟分析表明，这些余热源的能量质量不高。从理论上讲，对于测试过的船用发动机系统，将余热转换为机械功最多可回收 9% 的燃料能量（例如，在柴油模式下，5 500 kW 的发动机输出功率可回收 492 kW）。针对这种情况的替代解决方案是可以将其直接用作加热系统。对于热电联产系统，能量回收效率可能更高。” Beichuan Hong 说。

气体交换损失

气体交换系统中的烟破坏是由阀门节流引起的管道限制、管道中的流体摩擦以及涡轮增压器流动能量回收所引起的流量损失造成的。烟破坏大部分发生在涡轮增压系统中，其中高压涡轮增压器贡献了约40%。与管道系统中的流动损失不同，涡轮增压器中的流动烟并未完全浪费，因为它有助于涡轮增压做功和压缩机增压。

“进排气阀约造成20%的流动烟破坏，气体路径中流动烟破坏的70%~80%发生在涡轮增压系统。对于每个充气阶段，压缩机总是比涡轮机侧造成更多的烟破坏。然而，由于质量流量的增加，阀门的流动损失也随着负荷的增加而增加。”Beichuan Hong说。

与发动机管道系统中纯粹浪费的流动损失不同，涡轮做功和压缩机增压也造成了烟的破坏。“我们关于烟的分析表明：在被测试的船用发动机中，现有的两级涡轮增压系统提取流动烟的效率相当高。然而，涡轮机也破坏了15%的流动烟，同时回收剩余的部分并送至压缩机。也许，可在对涡轮机械方面进一步研究时纳入诸如减少熵产生等与烟相关的研发目标。”Beichuan Hong说。

Beichuan Hong称：“我们特别感兴趣的是废气流动中可用能量的量化。流动烟相当于曲轴输出功率的65%。因此，废气能量回收的管理对提高船舶发动机效率具有重要意义。当我们将船用发动机和卡车发动机的预研究结果进行比较时发现：20%的流动烟破坏发生在进气阀和排气阀处，而卡车发动机的这一比例约为7%。这是相当出乎意料的，暗示了阀门运动的敏感性。此外，还须进一步研究 Miller

正时策略对流动烟利用率的影响。”

因此，Hong的下一步研究计划将重点放在排气系统的流动烟上。他说：“项目的目的是了解如何减少流动损失和优化流动烟的使用。项目的一部分是将计算流体动力学模拟与测量数据相结合，以修改潜在的设计缺陷，特别是排气系统的结构，例如管道几何形状和阀门型线。这项研究还将增强我们对发动机废气烟的理解，特别是它与涡轮或其他余热回收系统性能之间的关系。”

快速流量传感器

除其工程应用外，Beichuan Hong和他的导师正在进行的一项研究涉及使用快速测量技术来表征废气能量脉冲。“快速流量烟测量的一大挑战来自于快速流量传感器的发展。流量传感器有望应用在船用发动机的排气测量中，并保持较高的采样精度。快速压力传感器有许多商用的，然而，为了实现快速的温度和流速测量，我们须要自行设计制造。幸运的是，来自KTH流体物理实验室的同事正在与我们合作开发高精度的发动机脉冲定向传感器。”Beichuan Hong说。

发动机仿真方法

Wartsila在数据和监控方面为研究提供了支持，该公司表示：“该研究得出的结果基于Wartsila提供的仿真模型，而不是实际的发动机测量值。这意味着结果的准确性取决于仿真模型运行工况的标定输入。在实际的测试和测量中，结果取决于运行和环境条件。因此，最终结果取决于模型的精度。绝对值不是最重要的，最重要的是要得出中速机能量损失和烟损失的行为和原理。”

WinGD 谨慎乐观地展望未来

近日，《The Motorship》采访了总部位于瑞士的发动机制造商WinGD的全球销售总监Volkmar Galke，他表示，WinGD将继续开发其产品组合，以期在2021年实现市场温和复苏。

与航运业的其他供应商一样，WinGD目睹了新冠对新造机市场的影响。但是，WinGD在2020年表现强劲，得益于年末的一系列新订单。以发动机

功率来衡量，2020年WinGD在全球二冲程发动机市场中占据了36%的份额。因此虽然大环境不好，WinGD却取得了不错的成绩。

低压双燃料二冲程X-DF发动机的订单量使WinGD获益的同时，也有助于扩大液化天然气生产能力，进而促进新建液化天然气运输船的订单。“WinGD在双燃料领域继续取得成功，2020年年底

在双燃料市场的占有率为 59%。”

该公司的低压双燃料 X-DF 发动机仍然是大型天然气运输船的首选，这有助于 WinGD 巩固其在船东中的强劲地位。

WinGDX-DF 发动机销量提升的同时，交付量也在稳定增长。目前，该公司已经交付了 90 台 X-DF 发动机，其发动机的运行时间已超过 85 万小时。

该公司在 2020 年取得了多项首创，包括首次为 H-Line Newcastlemaxes 的双燃料船交付了两台 X-DF 发动机，以及 CMA-CGM 公司的双燃料船 Jacques Saade 号的首次航行。该船被吉尼斯世界纪录认定为拥有世界上最强大的双燃料发动机。

该船的工程师反馈，系统运行良好。该船已往返亚洲，途经热带地区，发动机运行状况良好。

Volkmar Galke 还指出，在 X-DF 2.0 平台发布后，该公司已经收到了一份 X62DF2.0 发动机的订单。该发动机采用了 WinGD 的 iCER（废气再循环智能控制）技术。该解决方案将使发动机的甲烷逃逸减少 40% 以上。持续创新的主要动力是满足市场需求，最大限度地减少船舶发动机的甲烷逃逸。然而，Volkmar Galke 说：“简单地将 Otto 循环低压 X-DF 发动机和高压双燃料柴油循环替代方案的排放进行比较，可能会产生误导。如果考虑到船上所有机器的全部能源消耗，包括主机、发电机、泵、电动机、锅炉和其他所有设备，那么高压和低压两个系统的排放量是相等的。”船东、造船厂和发动机制造商对 X-DF 2.0 的市场反应较为积极。“该解决方案对市场如此具有吸引力的原因之一是，新一代 iCER 设计可使机舱中不再须要安装一些相关设备。”这样做的结果是以尽可能低的成本实现排放降低。

船东权益

展望 2021 年的市场，基于 WinGD 销售网的反馈，Volkmar Galke 预计全球市场将略有回升，预计不会有大幅飙升。在某些细分市场中需求可能会保持弹性。在液化天然气运输船市场，Volkmar Galke 注意到 Total 的 Mozambique 项目中订购了一些船。预计今年该领域将继续增长：中国和韩国的船厂已做好

充足准备，为北方气田扩产项目（NFE）提供新造的液化天然气运输船。但是，当被问及液化天然气运输业以外的行业对将液化天然气作为燃料的看法时，Volkmar Galke 指出，该市场的增长速度比 2020 年初要慢。集装箱船和散货船市场均未接近足以形成大趋势的引爆点，在这种情况下，支撑性经济可能会鼓励该板块转换燃料类型。我们不应专注于船舶的细分市场，而是应该从使用方的角度来考虑某艘船是否适合使用双燃料推进系统。无论是散装船还是集装箱船，以长租船或班轮形式运营的船舶，都较现货市场的船舶更倾向于选择液化天然气发动机。他称：“如果你有一份从澳大利亚向中国出口铁矿石的长期合同，你就得清楚货舱如何布置。箱船班轮也是如此。因此我想说的是，在这些应用领域，你会看到液化天然气的发展比其他领域更快。”

尽管全球使用液化天然气的船队所占比例仍然很小，但 Volkmar Galke 指出，预计该比例将进一步增长：“我们认为，很快我们就会看到全球订单中约有 10% 将配备双燃料发动机。”

未来发展

Volkmar Galke 指出，WinGD 专注于开发解决方案，以满足未来技术进入市场的需求。WinGD 正在扩展产品范围，包括混合动力解决方案。该解决方案将涵盖轴发电机、电池，辅机以及其他动力源设备。WinGD 已向一些感兴趣的船东提供了特定的解决方案，为减少温室气体排放提供一种替代方法。WinGD 将继续以设计师和系统集成商的身份提供相关产品，目前不打算进入硬件供应商领域。

“通过将二冲程发动机置于船舶能源配置的核心位置，您可以在船查看能源组合，查看设备规格并提出优化建议——无论这意味着选用较少气缸的主机，还是减少发电机组的数量，并引入电池组和智能电源管理系统。这就是 WinGD 将在 2021 年探索的新技术之一。我们已经在与潜在的船东和船厂进行讨论。”Volkmar Galke 称。

替代燃料的作用

Volkmar Galke 指出，虽然集成轴功率的电池混合动力解决方案是实现 IMO 2030 标准的一种方法，

但其他解决方案(例如废热回收)的潜在效能有限。除了减速航行,其它技术方案的效率提升空间已接近技术极限。空气润滑和进一步的船体形态优化等技术有利于减排,但不足以满足即将实施的减排目标。

MAN 能源解决方案推出了 10.6 发动机的扩展版本

MAN Energy Solutions 公布了三种新推出的低速发动机 S50ME-C10.6, S60ME-C10.6 和 G80ME-C10.6 的更多细节。

该公司在 2020 年 12 月 16 日发布的“市场更新说明”(MUN)中披露了这些新发动机的一些细节。该报告称,在整个负载范围内,新版发动机的燃油消耗率(SFOC)均有所降低。

新推出的 10.6 型发动机为其 2020 年 2 月推出的 G95ME-C10.6 发动机的升级版,但 MAN Energy Solutions 的二冲程推广和客户支持团队负责人 Thomas Hansen 告诉《The Motorship》,现在公布新一代 10.6 发动机最新的技术规格细节“还为时过早”。但他表示,这些发动机将被纳入 MAN Energy Solutions 的下一版船用发动机计划,该计划将于 2021 年的前几个月发布。

S50ME-C10.6 发动机的改进包括使用新型低压排气阀,改变排气阀阀杆材料,这两项改进都有助于减轻重量。

S50ME-C10.6 的主要升级

S50ME-C10.6 的主要升级包括:新型气缸盖,新型低压排气阀,顺序燃油喷射系统,新型液压缸单元,燃油阀高压管改进,排气阀液压管改进。

Thomas Hansen 还提供了有关其他两型发动机的更多信息,这表明与 G95ME-C10.6 发动机一样,这两款发动机都将与该公司去年引入的 Triton 发动机控制平台兼容,最终取代自 2003 年开始使用的多功能控制器(MPC)。Triton 是一种模块化系统,使其面向未来,并与数据交换等创新技术兼容。

顺序燃油喷射

“市场更新说明”指出,新推出的发动机相比

“为了达到 IMO 2030 和 IMO 2050 的目标,我认为除了开发未来燃料,别无选择。”然而, Volkmar Galke 指出,除了液化天然气,目前正在考虑的替代燃料中没有一种是在全球范围内大规模商用,且具备所需的基础设施和安全标准的。

于早期版本的发动机,一个关键变化是 10.6 型将采用顺序燃油喷射技术(该技术是 G95ME-C10.6 上的先驱技术)和废气旁通调节技术,使发动机具备低负载调节功能,以优化燃油消耗率,并使氮氧化物排放量满足排放法规要求。

Thomas Hansen 在 2021 年 1 月 28 日举行的客户网络研讨会上说:“顺序燃油喷射可对气缸盖上的每个燃油阀进行单独控制,从而实现燃油消耗率和氮氧化物排放量之间的最佳平衡。”

但是,该型机没有采用相继涡轮增压技术。MAN Energy Solutions 负责二冲程推广和客户支持的新技术总监 Kjeld Aabo 在研讨会期间表示,虽然相继涡轮增压理论上可以应用于这些发动机,但成本效益分析的结果使我们决定不在较小尺寸的发动机上采用该技术。当被问及是否可以对新发动机进行相继涡轮增压改造时,他表示:成本太高了,可能必须更换其所有涡轮增压器,同时还要升级发动机控制系统、管路和阀门。在任何情况下,相继涡轮增压只能应用于带有多个涡轮增压器的发动机,而新 10.6 平台的 50 缸径和 60 缸径版本将只配备一个涡轮增压器。

这是技术的革新,而不是技术的改进。“该技术基本上等于涡轮增压器切断技术。”Thomas Hansen 说,“尽管该过程是由发动机控制系统自动控制的。”他认为,这一发展不仅得益于公司在其他发动机上使用涡轮增压器切断技术所获得的经验,还得益于合作伙伴 ABB 和三菱的投入。这是一个非常聪明的系统。

(白春艳 编译)