智能化与控制

# 电子示功器在大型船舶柴油机动力装置能耗管理中的应用研究

潘戌蕙[1]，夏志澜[2]，俞　臻[1]

(1. 七一一研究所,上海 201108;2. 武汉铸诚科技有限公司,湖北 武汉 430000)

**摘　要**：分析了大型船舶柴油机动力装置能耗管理的成效和存在的问题,提出了相应的解决方案。论述了柴油机电子示功器在大型船舶能耗管理中的作用。介绍了 ZC 系列电子示功器的功能和性能指标,以及在大型船舶柴油机动力装置管理中的应用。应用表明:该系列电子示功器的性能和可靠性满足大型船舶柴油机动力装置能耗管理的要求。

**关键词**：船用柴油机;电子示功器;能耗

**中图分类号**:TK421$^{+}$.27　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001 - 4357(2016)05 - 0013 - 05

# Research on Application of Electronic Indicator in Energy Consumption Management of Large Marine Diesel Engine Power Plant

**Pan Xuhui**[1], **Xia Zhilan**[2], **Yu Zhen**[1]

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;
2. Wuhan Zhucheng Co., Ltd., Hubei Wuhan 430000)

**Abstract**: The efficiency and exist problems of energy consumption management for large marine diesel engine power plant are analyzed, and the corresponding solutions are put forward. The function of diesel engine electronic indicator used in the energy management of large ships is discussed. The ZC series electronic indicator's function and performance indexes are introduced, as well as its application in the energy management of large ships. Application results show that this electronic indicator's performance and reliability satisfies the requirements of energy management of large ships.

**Key words**: marine diesel engine; electronic indicator; energy consumption

## 0　引　言

目前，燃油成本已占航运总成本的 45% 左右。对航运业而言，节能减排就是效益。降低船舶能耗的方法有很多，降速航行是目前应用较多的一种，远洋轮的航速已经降到了 12kn 左右。在此基础上，人们又开始进行各种以节能为目的的燃油添加剂和润滑油添加剂的研究。但对发动机状态管理的研究不多，尤其是，实际应用中一直沿用传统的测爆压、看排温、观烟色等传统管理模式。在这种经验管理模式下，发动机大多不是工作在其最佳状态，能耗高于设计值。

在武汉铸诚参与测试和分析的几十台大型柴油机中，除了青岛淄柴博洋柴油机股份公司出厂的尚在台架上的柴油机，以及长江轮两台出厂不到一年的主机外，都存在燃烧异常、能耗明显高于设计值的现象。

**收稿日期**：2015-12-30

**作者简介**：潘戌蕙(1963 - )，女，高级工程师，主要研究方向为柴油机性能设计与运营管理，E-mail：panxuhui@csic711.com。

## 1 大型船舶柴油机动力装置节能减排的成效与矛盾

大型船舶柴油机动力装置的节能减排措施可以归纳为两类：

第一类是宏观措施。主要包括：合理安排航线、船期和配载；燃用质量较低的廉价燃油；在燃油和润滑油中添加各种添加剂，提高燃油的可用性，减少摩擦损失。

第二类是微观措施。主要是对船员实施节油奖；机务部门根据定时上报的发动机爆压、排温等运行参数适时安排设备维护。

在长期的管理实践中，宏观措施取得了良好的成效，已没有多少潜力可挖；而微观措施的成效差强人意，其主要矛盾集中在两个方面：

一，油耗指标和节油奖矛盾。油耗指标最初是根据历史耗油量定的，随着节能减排技术的发展与应用，各公司不断调低油耗指标，而船员的节油奖却不随油耗的降低稳步提高，从而造成设备管理水平越高，船员付出的劳动越多；油耗指标越低、节油奖越难拿的问题。这个问题促使船员在节油奖和工作量之间寻求平衡，在一定程度上抑制了新技术的应用，阻碍了节能减排技术的推广。

二，燃油费与修理费矛盾。在大多数航运公司，燃油费和修理费是分别结算的，两者都有控制目标。要使柴油机工作在理想状态，保证低油耗运行时间，必须根据柴油机的细微变化及时调整或更换引起柴油机工作异常的零部件，这必然造成修理费的增加。由于修理费是显性的、可计算的，而燃油消耗的增加是隐性的，在传统管理手段下难以区分哪部分油耗是由于柴油机工作异常所产生的。所以，为了降低修理费用，航运业普遍存在推迟柴油机供油定时，降低柴油机爆压，以增加耗油量为代价，减少设备维修费的情况。

要解决以上两个矛盾，必须在国家有关产业政策和技术政策引导下，采取管理措施与技术措施相结合的方式，一方面航运公司应将燃油消耗、维修费和船员节油的积极性做通盘考虑，寻求效益最大化的管理模式；另一方面要积极采用新技术、新装备，客观、真实、准确地判定柴油机的状态，杜绝柴油机带病工作或长期运行在高油耗状态的现象。

## 2 大型船舶柴油机动力装置能耗管理的常用方法和问题

大型船舶柴油机动力装置能耗管理的常用技术方法有以下几种：

一，油耗总量控制。通过各个油舱的油位测量获得燃油存量，以航次为单位计算燃油消耗量。这种方法虽然简单，但油耗的增减与船舶吃水、风向风速、洋流的流速、流向以及柴油机运行效率间的密切关系无法做到一一对应。管理中常常忽略柴油机的变化因素，把柴油机的效率当成一个常数，以最低耗油量为目标进行航线、航速优化。

二，耗油率管理。在一部分船舶上，除第一种方法外，在船舶的大轴上安装扭矩仪测量柴油机的输出扭矩，还在柴油机燃油进回油路上安装流量计。扭矩乘以转速可获得柴油机的输出功率，流量计可测量单位时间内柴油机的燃油消耗量。根据有效功率和航速，依据螺旋桨推进特性判断船舶污底状态，当污底达到一定值时，适时安排进坞保养船体。燃油消耗量被功率除可获得单位时间、单位功率下的有效耗油率，这一有效耗油率可以准确判断柴油机的总体状态；但如果有效耗油率偏高，则该方法无法确定造成有效耗油率升高的具体原因。

三，柴油机缸内工作过程监测。当柴油机动力装置有效耗油率异常升高时，就须要了解柴油机每个气缸的工作状态，排除导致有效耗油率升高的异常因素。传统方法是用机械示功器测量低速柴油机的示功图。这种传统的测量手段所能获得的信息有限、粗略，示功图的优劣以主观判断为准，存在极大的或然性，大量的柴油机异常信息被遗漏。随着计算机技术的发展，20 世纪 90 年代起，以 LEMAG 公司 Preme 系列电子示功器[1]、ABB 公司 Cylmate System 为代表的电子示功器[2]逐渐进入大型柴油机的管理领域，这些电子示功器采用电测技术和计算机技术精确测量柴油机的示功图和燃油喷射压力曲线，通过对示功图的分析可获得循环功、最高压力、最高压力时曲轴转角等参数，不仅可以客观、准确、及时地获知柴油机每个气缸的热功转换状态，还可以发现传统测试手段无法发现的问题，使大型船舶柴油机动力装置能耗管理实现了一次技术飞跃。

武汉铸诚科技有限公司经过数十年的努力，研发出 ZC 系列柴油机电子示功器，其功能、技术指标和可靠性已与国际同类产品相当。

## 3 ZC 系列电子示功器的功能和技术指标

ZC 系列柴油机电子示功器系列产品包括 ZCP-1（A）型便携式电子示功器和 ZCO-1（A）型在

线式柴油机电子示功器，其主要配置如表 1[3] 所示。图 1 和图 2 分别为 ZCP-1 型便携式柴油机电子示功器和 ZCO-1A 型在线式柴油机电子示功器。

表 1　ZC 系列电子示功器

| 型号 | ZCP-1 型 | ZCP-1A 型 | ZCO-1 型 | ZCO-1A 型 |
|---|---|---|---|---|
| 便携式主机（ZCP-1） | ☆ | ☆ | | |
| 示功图采集模块（ZCO-1（A）） | | | ☆ | ☆ |
| 气缸压力传感器（ZCY-25） | ☆ | ☆ | ☆ | ☆ |
| 喷射压力传感器（HM90） | | ☆ | | ☆ |
| 高压针阀、三通 | | | | ☆ |
| 曲轴转角传感器（ZCA） | ☆ | ☆ | ☆ | ☆ |
| MIP System 2012 软件 | ☆ | ☆ | ☆ | ☆ |
| 充电器 | ☆ | ☆ | | |
| 电源 | | | ☆ | ☆ |
| 便携式密封箱 | ☆ | ☆ | | |
| 说明书 | ☆ | ☆ | ☆ | ☆ |

图 1　ZCP-1 型便携式柴油机电子示功器

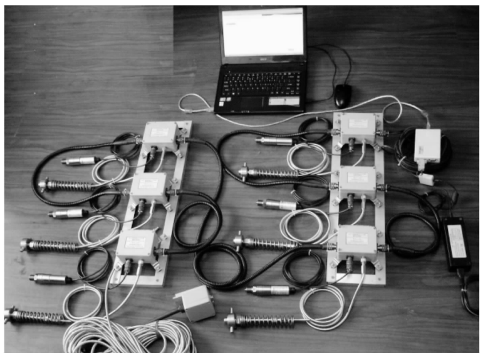


图 2　ZCO-1A 型在线式柴油机电子示功器

### 3.1　ZC 系列电子示功器功能

ZC 系列柴油机电子示功器同时测量柴油机气缸内的气体压力和曲轴转角，形成示功图；并引入燃烧分析技术对所测示功图进行放热规律计算；从放热规律计算结果中提取一系列特征值用于柴油机状态评估和故障诊断。

首先对各缸示功图进行一般分析，获得循环功、最高燃烧压力、最高燃烧压力位置、压力升高率和着火点位置等特征值；再将各缸的循环功进行累加、乘以转速获得柴油机整机的指示功率；整机的指示功率减去同转速下的空车指示功率即为整机的有效功率。然后根据示功图压缩过程曲线拟合，并外推整个压缩和动力冲程的理论纯压缩、膨胀曲线，获取最高压缩压力特征值。采用示功图燃烧分析方法获得瞬时放热率、累计放热率百分比和燃烧温度；按照预混燃烧、扩散燃烧和后燃三个阶段计算各自的放热量，并提取上止点后 30°的累积放热百分比，得到示功图的所有特征参数。

根据燃油喷射压力曲线可提取供油定时、最高喷射压力、供油持续角和高压油管残余压力四个特征值。

应用所获得的特征参数可以对柴油机各缸负荷不平衡、气缸漏气、供油定时错误、燃油雾化不良、供油装置漏油等故障做出诊断，并提示用户对相关零部件进行检查。

### 3.2　ZC 系列电子示功器技术性能指标

ZC 系列电子示功器技术性能指标如表 2 所示，各部件使用环境要求如表 3 所示。

表 2　ZC×型电子示功器技术性能

| 名称 | 量程 | 分辨率 | 精度 |
|---|---|---|---|
| 气缸压力/MPa | 0～25 | 0.01 | 1.0% |
| 喷射压力/MPa | 0～200 | 0.1 | 1.0% |
| 转速/（$r \cdot min^{-1}$） | 0～2 000 | 1 | ±1 |
| 有效功率/kW | 0～100 000 | 1 | |
| 曲轴转角/（℃A） | 0～360 | | |

表 3　ZC×型电子示功器使用环境要求

| 部件 | 仪器 | 气缸压力传感器 | 燃油喷射压力传感器 | 曲轴转角传感器 |
|---|---|---|---|---|
| 型号 | ZCP-1、ZCO-1（A） | ZCY-25 | HM90 | ZCA-1 和 ZCA-2 |
| 温度/℃ | －10～55 | －10～450 | －10～150 | －10～55 |
| 湿度 | <80% | <80% | <80% | <80% |

## 4　ZC 系列电子示功器应用案例

### 4.1　在柴油机制造企业中的应用

青岛淄柴博洋柴油机股份有限公司采用 ZC 系列柴油机电子示功器进行柴油机出厂检验和新型柴油机的研发。图 3 为该公司 6N330 柴油机 100% 负荷、2 206 kW 时所有气缸的示功图，图 4 为第一

缸的燃烧分析，图 5 为 6N330 柴油机 100% 负荷时各缸的特征参数。经比对：ZC 电子示功器所测功率与测试台架上测功器所测功率一致性好。

新柴油机的示功图是以后对柴油机实施管理的参照标准。

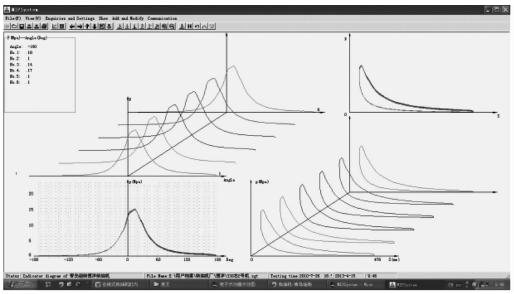


图 3　6N330 柴油机所有气缸的示功图

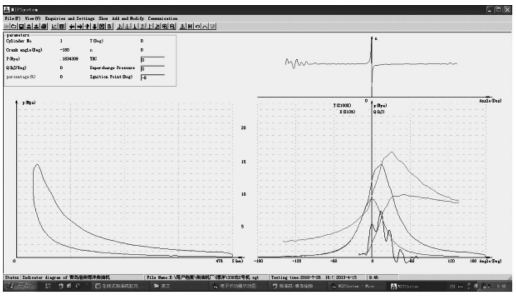
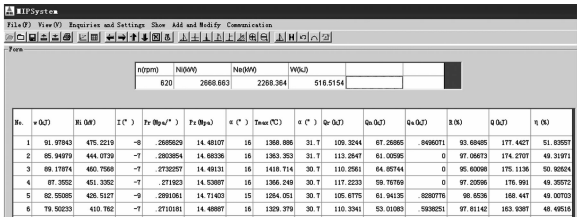


图 4　第一缸燃烧分析图



| No. | w (kJ) | Hi (kW) | I (°) | Pr (kPa/°) | Pz (kPa) | α (°) | Tmax (℃) | α (°) | Qr (kJ) | Qn (kJ) | Qs (kJ) | B (%) | Q (kJ) | η (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 91.97843 | 475.2219 | -8 | .2685829 | 14.48107 | 16 | 1368.886 | 31.7 | 109.3244 | 67.26865 | .8496071 | 93.68485 | 177.4427 | 51.83557 |
| 2 | 85.94979 | 444.0739 | -7 | .2803854 | 14.68336 | 16 | 1363.353 | 31.7 | 113.2847 | 61.00595 | 0 | 97.06673 | 174.2707 | 49.31971 |
| 3 | 89.17874 | 460.7568 | -7 | .2732257 | 14.49131 | 16 | 1418.714 | 30.7 | 110.2561 | 64.05744 | 0 | 95.60098 | 175.1136 | 50.92624 |
| 4 | 87.3552 | 451.3352 | -7 | .271923 | 14.53687 | 16 | 1366.249 | 30.7 | 117.2233 | 59.76769 | 0 | 97.20596 | 176.991 | 49.35572 |
| 5 | 82.55085 | 426.5127 | -9 | .2891061 | 14.71403 | 15 | 1284.051 | 30.7 | 105.6775 | 61.94135 | .8280776 | 98.6536 | 168.447 | 49.00703 |
| 6 | 79.50233 | 410.782 | -7 | .2710161 | 14.46887 | 16 | 1329.379 | 30.7 | 110.3341 | 53.01083 | .5938251 | 97.61142 | 163.9387 | 48.49516 |

图 5　6N330 柴油机 100% 负荷时的特征参数

## 4.2　在航运企业中的应用

采用 ZC 电子示功器测量的大连航运总公司某客滚船 12VPC2-5 柴油机示功图如图 6、图 7 所示。该柴油机用爆压表测量的爆压和排温显示正常，但用 ZCP 型柴油机电子示功器测量获得的示功图则显示：该柴油机着火点滞后，有爆燃倾向，且第六缸供油规律明显异常。经维修、调整后，性能得到基本恢复。

2010 年 10 月，大连航运总公司在德银海轮上测试 MAZ600 燃油添加剂的效果，采用 ZCO 型电子示功器测量了柴油机的示功图和指示功率，并结合流量计获取指示耗油率。图 8 是 ZCO 型柴油机电子示功器在船上的安装情况；图 9 是所测示功图。示功图显示：燃油添加剂的使用获得了较好的效果，可以节约燃油 4% ~7%。同时，测试结果还表明该柴油机存在供油定时滞后问题。

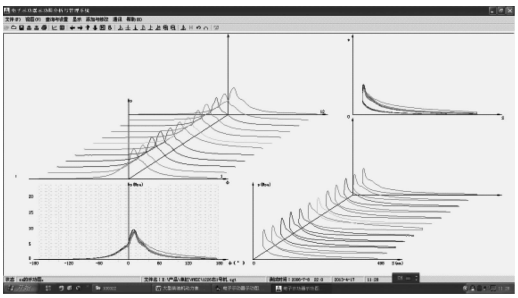


图 6　客滚船所有气缸的示功图

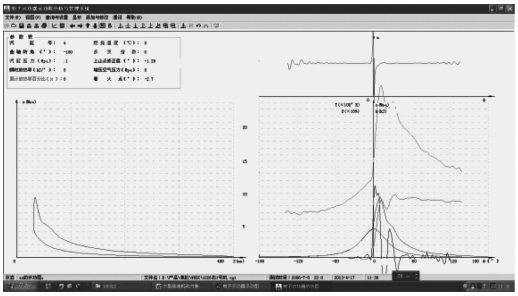


图 7　第一缸的示功图和燃烧分析曲线

图 8　ZCO 型柴油机在德银海轮的安装情况

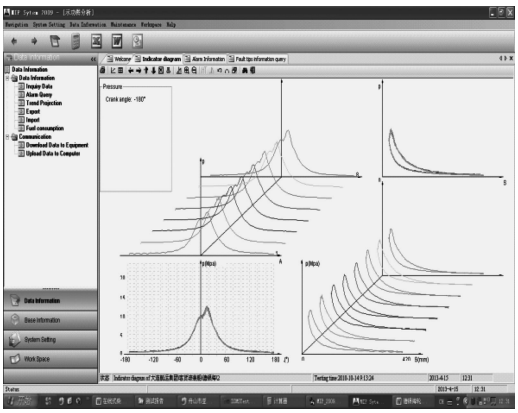


图 9　德银海轮左主机示功图

海丰国际控股有限公司海丰航运集团的基隆轮是一条船龄为几十年的老船，三台发电机组柴油机为 6AL20/24 柴油机，额定转速 1 000（r · $min^{-1}$），额定功率 412 kW。2012 年 10 月，每台柴油发电机组只能发出 60 kW 的功率（到达 60

kW 功率时排温就超标）。测试示功图（图 10）表明：该机存在着火延迟、气缸漏气问题，原因是供油凸轮磨损。根据示功图信息，将供油提前角提前 5°（图 11）后，输出功率可以达到 120 kW。根据示功图估算：指示耗油率下降了 83（g·(kW·h)$^{-1}$），换算成有效耗油率，油耗至少下降 110（g·(kW·h)$^{-1}$），每台柴油发电机组日节油可达 316 kg，按一年 200 个工作日算，一台辅机年节油可达 63 t；减少 $CO_2$ 排放 170 t。该轮的主机也同样存在这个问题，采用同样措施后，主机有效功率得到有效提高，油耗降低。

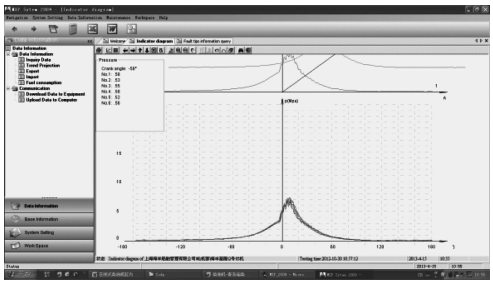


图 10　基隆轮 3 号副机调整前的示功图

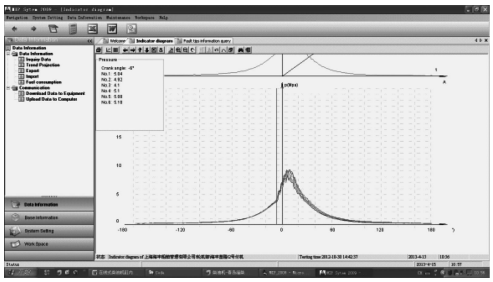


图 11　基隆轮 3 号副机调整后的示功图

上海航道局航浚 9001 和航浚 9002 的情况与基隆轮相似，之前航速只能达到 4 kn，主机只能输出 1 250 kW 左右的功率。根据 ZC 系列电子示功器测试结果（图 12），调整了供油提前角后主机输出功率达到 1 830 kW（图 13），满足了长江口航道疏浚的最低航速要求；估算耗油率下降了 37（g·(kW·h)$^{-1}$），日节油可达 1.6 t，减少 $CO_2$ 排放 4.3 t，效益显著。

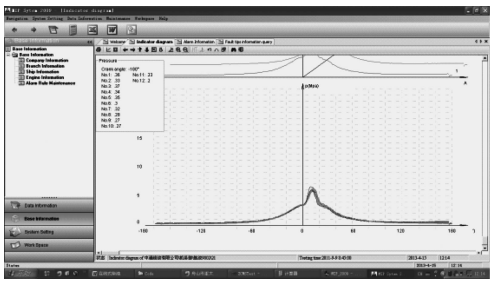


图 12　航浚 9002 主机调整前示功图

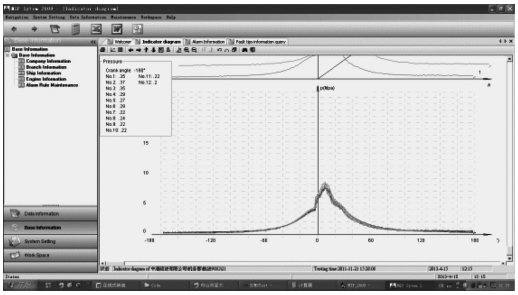


图 13　航浚 9002 调整后示功图

### 4.3　在院校试验室中的应用

某大学国家重点实验室的一台 TBD234 柴油机安装了 ZCOA 型柴油机电子示功器，用于柴油机故障诊断研究。图 14 是电子示功器在 TBD234 柴油机上的安装图；图 15 测试的示功图和燃油喷射压力波形；图 16 是该柴油机的故障提示。

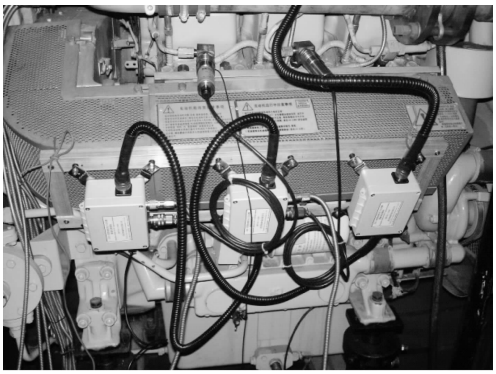


图 14　ZCOA 型电子示功器安装图

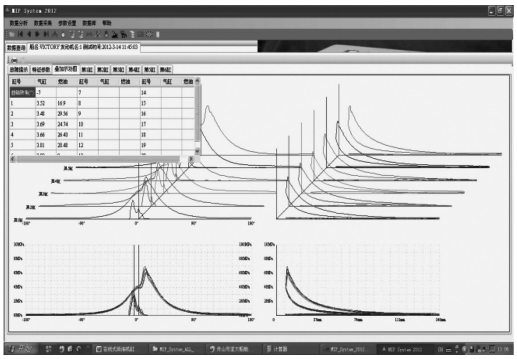


图 15　TBD234 柴油机示功图和燃油喷射压力波

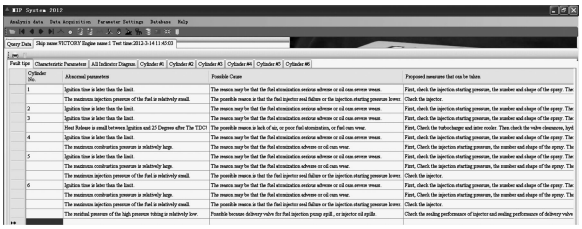


图 16　TBD234 柴油机故障提示

（下转第 32 页）

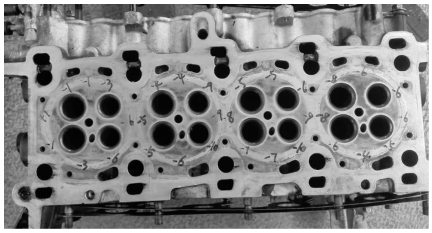


图 15　冷热冲击后底面平面度检测值

## 6　结论及建议

提高气缸盖的抗变形性能是解决其冲缸垫和开裂故障的主要方向，对薄弱部位和水套内大跨度区域采取加筋、加厚，使之连接成框架结构是很有效的抗变形强化手段。借助 FEM 有限元强度分析和 CFD 计算可以快速找到薄弱点，并可对改进方案进行核算，大幅缩短了设计开发周期，节省了大量的时间和经费。

### 参考文献


[1] 张儒华，左正兴，廖回东，等. 气缸盖中一些关键功能结构中的承载机理研究［J］. 内燃机学报，2004，22（3）：282-287. ［2］ 申国山，刘文珽，颜景龙. 整体铝气缸盖疲劳可靠性控制［J］. 兵工学报，2000，21（4）：293-296.

[3] 梁莎莉，代秀红，姚海民，等. 柴油机气缸盖的三维有限元结构强度分析［J］. 农业机械学报，2004，23（3）：45-49.

[4] DANIEISION E，TUNTER D，ELWART J，et al. Thermo-mechanical stress analysis of novel low heat rejection cylinder head designs［C］. SAE 930985，1993.

[5] MIYAIR Y. Computer simulation of an LHR DI diesel engine［C］. SAE 880187，1988.

[6] 郭昌明，曾高文，候岳，等. 大功率柴油机整体铝合金气缸盖结构优化研究［J］. 内燃机，2008（2）：5-9.

[7] 张强，李娜，王志明. 车用柴油机缸盖冷却水腔的 CFD 分析［J］. 车用发动机，2005，160（6）：59-62.

[8] 贾延林，张翼，陈少休. 气缸盖的有限元研究［J］. 农业装备与车辆工程，2010，224（3）：23-25.

[9] 张勇，张有，陈国华. 车用发动机气缸盖的三维有限元结构分析［J］. 车用发动机，1998，117（5）：18-21.


（上接第 17 页）

## 5　结　论

现阶段，大型船舶能耗管理的薄弱环节是柴油机本身的能耗管理，迫切须要在国家有关政策引导下，通过新技术、新产品的应用，结合相关的管理手段，确保大多数船舶的柴油机动力装置运行在良好的状态下。发达国家十几年的应用证明：柴油机电子示功器是大型船舶能耗管理中的关键设备。具有完全知识产权的 ZC 系列柴油机电子示功器在实际工程应用中取得了良好的节能减排效果，经济效益和社会效益显著；同时表明该产品的功能、技术指标和可靠性能够满足大型船舶柴油机动力装置能耗管理的要求。

### 参考文献


[1] LEHMANN & MICHELS GmbH. PREMET®. online［R］.

[2] ABB Automation Technologies AB. Cylmate System［R］.

[3] 武汉铸诚科技有限公司. 示功图测量与分析系统使用说明书［R］.


（上接第 20 页）

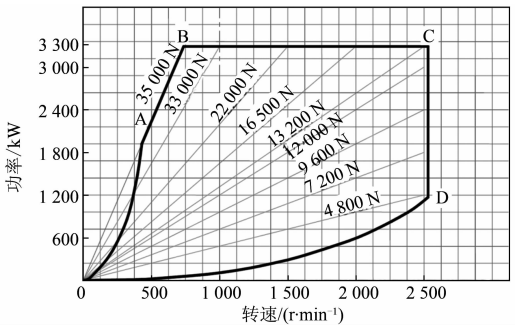



图 1　3300 测功器扭矩量程

## 3　结　论

结合影响船用柴油机功率测量不确定度的来源、不确定度分量的大小以及不确定度结果的分析，可以得出如下结论：在进行船用柴油机功率测量时，应合理选择水力测功器，在满足功率测量要求的前提下，尽可能使用较小量程的水力测功器，以提高测量精度，降低测量不确定度，为船用柴油机动力性能的评价提供准确、可靠的保障。

### 参考文献


[1] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示：JJF1025-2012［S］. 北京：中国标准出版社，2013.

[2] 中国船舶工业总公司. 船舶柴油机台架试验 试验方法：CB/T 3254.2-94［S］. 北京：中国标准出版社，1995.