

船用柴油机功率测量不确定度评定

顾俊杰, 王欢, 郭凯, 徐大伟, 张培堃

(河南柴油机重工有限责任公司, 河南 洛阳 471039)

摘要: 针对船用柴油机功率测量存在的不确定度, 根据 JJF1059-2012《测量不确定度评定与表示》中规定的方法, 对标定工况下发动机功率测量不确定度进行评定, 得出影响不确定度较大的分量以及原因, 在此基础上, 提出了对船用柴油机功率测量时测功器选择的建议。

关键词: 船用柴油机; 功率; 测量不确定度; 测功器

中图分类号: TK427+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)05-0018-03

Evaluation of Uncertainty in Measurement of Marine Diesel Engine's Power

Gu Junjie, Wang Huan, Guo Kai, Xu Dawei, Zhang Peilong

(Henan Diesel Engine Industry Co., Ltd., Henan Luoyang 471039)

Abstract: Aiming at the uncertainty in the measurement of diesel engine power, according to the method in JJF1059-2012 "Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement", the uncertainty of engine power under the nominal working condition was evaluated, and the component which has bigger influence on the uncertainty and its reasons were sorted out. Finally, suggestions about the selection of dynamometer for the power measurement of marine diesel engines were put forward.

Key words: marine diesel engine; power; uncertainty in measurement; dynamometer

0 引言

船用柴油机功率是评价柴油机状态性能的一项重要指标, 在柴油机研发、制造、使用等过程中均须对其进行测量, 且测量结果直接关系到柴油机动力性能评价的准确性和可靠性, 因此, 对船用柴油机功率测量不确定度进行评定显得极为重要。本文以河南柴油机重工有限责任公司生产的 HND 316V16 柴油机 (1 107 kW, 2 165 ($r \cdot \min^{-1}$)) 作为试验研究对象, 依据 CB/T 3254.1-1994《船用柴油机台架试验》规定的试验方法对其功率进行测试。从影响柴油机功率测量不确定度的来源出发, 对柴油机功率测量不确定度进行分析和评定, 明确各不确定度来源分量大小; 据此采取有效措施, 降低功率测量不确定度, 提高功率测量精度。

1 检测依据

(1) 技术依据

本文测试分析的依据为 CB/T 3254.1-1994《船用柴油机台架试验》和 JJF1059-2012《测量不确定度评定与表示》。

(2) 环境条件

测试的环境条件为环境温度: 19 ± 1 °C; 环境湿度: $20\% \pm 5\%$; 大气压力: 100.1 ± 0.2 kPa。

(3) 测量仪器

本次测试采用联通启测 Y-3300-S 型水力测功器。该测功器性能参数如下。功率量程: 0 ~ 3 300 kW; 扭矩量程: 0 ~ 33 400 ($N \cdot m$), 精度为 $\pm 0.2\%$ FS; 转速量程: 0 ~ 2 500 ($r \cdot \min^{-1}$), 转速测量精度为 $\pm 0.05\%$ FS, 转速传感器精确度

为 ± 1 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

2 功率测量结果不确定度分析

功率的数学模型为

$$P = f(M, n) = \frac{Mn}{9\,550} \quad (1)$$

式中： P 为现场条件下柴油机的标定功率，kW； M 为柴油机扭矩，($\text{N} \cdot \text{m}$)； n 为柴油机转速，($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

按分层评定方法，功率测量的不确定度来源有以下几个方面：

- (1) 试验重复性引起的不确定度；
- (2) 试验设备引起的不确定度；
- (3) 校正试验设备标准器所引起的不确定度；

- (4) 各计算分量引起的不确定度；

(5) 试验环境条件引起的不确定度（由于环境条件波动对不确定度影响很小，在此不予评定）。

2.1 柴油机扭矩测试结果标准不确定度 $u_{(M)}$ 评定

2.1.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_{(M1)}$

表 1 为扭矩重复性测试数据，对其进行 A 类不确定度评定。

使用贝塞尔法进行计算， M_{ik} 为第 k 次测量的观测值； M_i 为 n 次测量所得观测值的平均值， $M_i = 4\,884.3$ ($\text{N} \cdot \text{m}$)。则

标准差：

$$s_M = \sqrt{\frac{\sum (M_{ik} - M_i)^2}{n-1}} = 15.0 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (2)$$

标准不确定度：

$$u_{(M1)} = \frac{s_M}{\sqrt{n}} = 4.74 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (3)$$

表 1 柴油机扭矩重复性测试数据

测量次数	1	2	3	4	5
M_{ik} / ($\text{N} \cdot \text{m}$)	4 890	4 850	4 910	4 880	4 880
测量次数	6	7	8	9	10
M_{ik} / ($\text{N} \cdot \text{m}$)	4 890	4 890	4 883	4 880	4 890

2.1.2 试验设备引入的标准不确定度分量 $u_{(M2)}$

- (1) 测功器误差引入的标准不确定度分量

$u_{(M21)}$

$$a = 0.2\% \times 33\,400 = 66.8 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (4)$$

在 ± 66.8 ($\text{N} \cdot \text{m}$) 区间服从矩形分布，进行 B 类不确定度评定，半宽为 66.8 ($\text{N} \cdot \text{m}$)，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_{(M21)} = \frac{a}{k} = \frac{66.8}{\sqrt{3}} = 38.6 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (5)$$

(2) 测功器扭矩示值分辨率引入的标准不确定度分量 $u_{(M22)}$

测功器扭矩示值分辨率为 1 ($\text{N} \cdot \text{m}$)，在 ± 0.5 区间服从矩形分布，进行 B 类不确定度评定，半宽为 0.5 ($\text{N} \cdot \text{m}$)，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_{(M22)} = \frac{a}{k} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (6)$$

(3) 测功器扭矩示值稳定性引入的标准不确定度分量 $u_{(M23)}$

测功器扭矩示值稳定性引起的最大误差为 5.0 ($\text{N} \cdot \text{m}$)，服从矩形分布，进行 B 类不确定度评定，半宽为 5.0 ($\text{N} \cdot \text{m}$)，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_{(M23)} = \frac{a}{k} = \frac{5.0}{\sqrt{3}} = 2.89 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (7)$$

- (4) 试验设备引入的合成标准不确定度 $U_{(M2)}$

$$\begin{aligned} u_{(M2)} &= \sqrt{u_{(M21)}^2 + u_{(M22)}^2 + u_{(M23)}^2} \\ &= \sqrt{38.6^2 + 0.289^2 + 2.89^2} = 38.7 \text{ (N} \cdot \text{m)} \end{aligned} \quad (8)$$

2.1.3 标准器引入的标准不确定度分量 $u_{(M3)}$

测功器扭矩校准系统采用的标准器包括标准砝码及扭力杆，数学模型为

$$M = FL = 9.806 \times L \quad (9)$$

式中： M 为扭矩，($\text{N} \cdot \text{m}$)； F 为力值，N； G 为砝码质量，kg，使用 M2 等级砝码； L 为扭力杆长度，取 $0.973\,8$ m

- (1) 砝码质量引入的标准不确定度 $u_{(M31)}$

在本测试中， $M_i = 4\,884.3$ ($\text{N} \cdot \text{m}$)，砝码质量 $G = 511.494$ kg，使用 M2 等级砝码， 512 kg 质量允差为 77.824 g，按均匀分布，进行 B 类不确定度评定，半宽为 $0.077\,824$ kg，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_{(M31)} = \frac{a}{k} = \frac{0.077\,824}{\sqrt{3}} = 0.044\,9 \text{ kg} \quad (10)$$

- (2) 扭力杆长度引入的标准不确定度 $u_{(M32)}$

扭力杆长度误差为 $\pm 0.000\,125$ m，按均匀分布，进行 B 类不确定度评定，半宽为 $0.000\,125$ m，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_{(M32)} = \frac{a}{k} = \frac{0.000\,125}{\sqrt{3}} = 0.000\,07 \text{ m} \quad (11)$$

- (3) 标准器引入的合成标准不确定度 $u_{(M3)}$

根据数学模型，灵敏系数

$$c_G = \frac{\partial M}{\partial G} = 9.806 \text{ L} = 9.549 \quad (12)$$

$$c_L = \frac{\partial M}{\partial L} = 9.806 \text{ G} = 5\,015.7 \quad (13)$$

合成标准不确定度:

$$u_{(M3)} = \sqrt{[c_G u_{(M31)}]^2 + [c_L u_{(M32)}]^2} = 0.554 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (14)$$

2.1.4 柴油机扭矩测试结果合成标准不确定度

$$u_{(M)}$$

合成标准不确定度:

$$\begin{aligned} u_{(M)} &= \sqrt{u_{(M1)}^2 + u_{(M2)}^2 + u_{(M3)}^2} \\ &= \sqrt{4.74^2 + 38.7^2 + 0.554^2} = 39.0 \text{ (N} \cdot \text{m)} \end{aligned} \quad (15)$$

相对不确定度:

$$u_{(M)\text{rel}} = \frac{u_{(M)\text{rel}}}{M_i} = 7.97 \times 10^{-3} \quad (16)$$

2.2 柴油机转速测试结果的标准不确定度 $u_{(n)}$

2.2.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_{(n1)}$

柴油机扭矩测量的同时,进行相应转速测量,数据见表 2。对其进行 A 类标准不确定度评定。

使用贝塞尔法进行计算, n_{ik} 为第 k 次测量的观测值; n_i 为 n 次测量所得观测值的平均值, $n_i = 2\,168 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 。则

标准差:

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum (n_{ik} - n_i)^2}{n-1}} = 1.15 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (17)$$

标准不确定度:

$$u_{(n1)} = \frac{s_n}{\sqrt{n}} = 0.364 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (18)$$

表 2 柴油机转速重复性测试数据

测量次数	1	2	3	4	5
$n_{ik}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 168	2 168	2 169	2 169	2 168
测量次数	6	7	8	9	10
$n_{ik}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 167	2 170	2 167	2 166	2 168

2.2.2 转速表误差引入的标准不确定度 $u_{(n2)}$

转速表误差为 $\pm 0.05\% \text{ FS} \pm 1$, 最大误差为 $\pm 0.05\% \times 2500 \pm 1 = \pm 2.75 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$, 按均匀分布, 进行 B 类不确定度评定, 半宽为 $2.75 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则

$$u_{(n2)} = \frac{a}{k} = \frac{2.75}{\sqrt{3}} = 1.59 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (19)$$

2.2.3 柴油机转速测试结果的综合标准不确定度合成标准不确定度

$$u_{(n)} = \sqrt{u_{(n1)}^2 + u_{(n2)}^2} = 1.63 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (20)$$

相对不确定度

$$u_{(n)\text{rel}} = \frac{u_{(n)\text{rel}}}{n_i} = 7.52 \times 10^{-4} \quad (21)$$

2.3 不确定度分量汇总

对各不确定度分量汇总如表 3 所示。

表 3 不确定度分量汇总

不确定度来源	标准不确定度
重复性测量 $u_{(M1)}/(\text{N} \cdot \text{m})$	4.74
试验设备 $u_{(M2)}/(\text{N} \cdot \text{m})$	38.5
扭矩校准系统 $u_{(M3)}/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.554
扭矩测量合成 $u_{(M)}/(\text{N} \cdot \text{m})$	39.0
重复性测量 $u_{(n1)}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	0.364
试验设备 $u_{(n2)}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1.59
转速测量合成 $u_{(n)}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1.63

2.4 柴油机功率测试结果合成不确定度 $u_{(P)}$ 评定

合成相对不确定度

$$\begin{aligned} u_{(P)\text{rel}} &= \sqrt{u_{(M)\text{rel}}^2 + u_{(n)\text{rel}}^2} \\ &= 8.005 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (22)$$

柴油机功率

$$P = Mn/9550 = 1\,108.8 \text{ kW} \quad (23)$$

则 $u_{(P)} = u_{(P)\text{rel}} P = 8.89 \text{ kW}$

$$(24)$$

2.5 扩展不确定度评定

根据 JJF1059-2012《测量不确定度评定与表示》,在检测领域中,一般不考虑被测量参数的分布及自由度,包含因子取 $k = 2$, 故功率测量结果的扩展不确定度为

$$U = u_{(P)} k = 17.9 \text{ kW} \quad (25)$$

2.6 不确定度结果分析

从不确定度汇总表中可以看出,扭矩试验设备的标准不确定度分量最大,其中又以测功器扭矩测量误差的影响最大,而此参数又取决于测功器的扭矩量程的大小。此次检测使用的 3300 测功器,其扭矩量程为 33 400 (N·m),而被测柴油机的扭矩为 4 884 (N·m),仅占有有效量程的 1/8,导致测量结果有较大误差。选用大量程的测功器是因为:船用柴油机选择测功器时不仅要保证最大扭矩符合要求,且测功器扭矩曲线必须包含柴油机的扭矩曲线;而由于水力测功器在低转速时扭矩较低,为满足柴油机的外特性曲线要求,须选择大量程的水力测功器,见图 1。

(下接第 32 页)

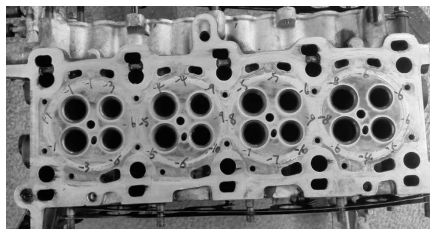


图 15 冷热冲击后底面平面度检测值

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

(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

(上接第 20 页)

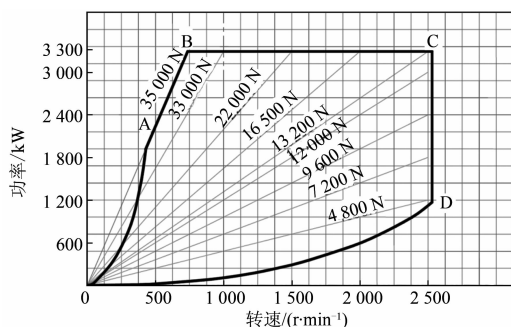


图 1 3300 测功器扭矩量程

3 结 论

结合影响船用柴油机功率测量不确定度的来

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, 刘文斑, 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.

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. PREMETS®. 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].

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.