

船舶柴油机载荷测试技术应用分析

李勇焕

(广西玉柴机器股份有限公司, 广西 玉林 537005)

摘要: 应用船舶柴油机载荷测试技术, 在固定航线上进行船舶柴油机载荷测试试验, 为确定主机运行状态及船舶运营状态提供有效试验数据。实船测试及应用情况表明: 船舶柴油机载荷测试技术可对船舶的船、机、桨匹配性以及船舶运营的经济性状态做出有效的评价, 可为后续船舶柴油机产品性能优化、技术营销等提供依据。

关键词: 船舶柴油机; 载荷; 测试; 试验

中图分类号: TK427⁺. 121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)05-0021-07

Analysis on the Application of Marine Diesel Engine Load Testing Techniques

Li Yonghuan

(Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Guangxi Yulin 537005)

Abstract: With the use of marine diesel engine load test technology, experiment of marine diesel engine load test applied on the fixed route were carried out to offer effective test data for the confirmation of main engine and the ship's operation condition. The onboard test and application results showed that marine diesel engine load technology could effectively evaluate the matching of ship, engine and propeller as well as economic performance of ship operation, and provide references for performance optimization and technical marketing of marine diesel engines afterwards.

Key words: marine diesel engine; load; test; experiment

0 引言

我国幅员辽阔, 拥有众多河流, 为天然航道, 其中以长江、珠江干道为代表, 沿岸遍布大型港口, 船舶运输业尤其发达。我国船用柴油机市场每年都保持较大的需求量, 为满足市场需要, 近年, 国内外品牌船用柴油机的应用推广、投放也越来越多。如何评价不同船用柴油机产品在不同航道上的船、机、桨匹配性和船舶运营的经济性, 最终提高产品综合竞争力, 满足不同顾客的需求, 是船舶柴油机研发、生产、营销中需要思考的问题。

目前, 中小内河运输船舶建造完工后, 出厂检验时一般通过系泊试验和航行试验进行主机负荷试

验。由于测试条件限制和考虑试航成本, 船厂和船检部门针对主机负荷试验, 仅通过测出主机转速判断主机负荷轻或重。其中在系泊试验时要求主机转速达到 80% ~ 85% 为合理; 在航行试验时要求主机转速达到 105% ~ 130% 为合理。主机负荷试验只能评价柴油机是否满足船舶设计要求, 不能综合评价柴油机在不同航道上的船、机、桨匹配性和船舶运营的经济性。为解决该问题, 柴油机厂家须建立船舶柴油机载荷测试能力, 运用船舶正常营运的试验方法, 选择不同航线进行船舶柴油机载荷测试试验, 采集不同的船舶柴油机载荷的相关数据, 为确定主机运行状况及船舶运营状态提供有效试验数据, 为船舶柴油机厂家研发生产、技术营销提供

依据。

1 测试思路

不同船用柴油机产品在不同航道上船、机、桨匹配性和船舶运营的经济性有所差别,船舶柴油机载荷测试采集的船舶柴油机载荷相关数据也有所不同。这关系到新产品的综合竞争力,因此测试数据必须准确有效。船舶柴油机载荷测试思路如下:

- (1) 采用船舶正常营运的试验方法;
- (2) 选择固定的航线和停靠港口;
- (3) 落实要研究的船舶柴油机动力;
- (4) 保证航线上适配动力的船型为代表船型。

2 技术方案

制定本测试技术方案的目的是:确定不同船用柴油机产品在不同航道上的船、机、桨匹配性和船舶柴油机载荷的相关参数。采用船舶正常营运的试验方法,选择固定的贵港港到广州南沙港西江干道航线;以配套 YC6T 型船舶柴油机动力,载货吨为 4 000 t 的集装箱船为代表船型,在船舶上安装测试主机转速、扭矩、功率、排气温度、油耗、船舶航速等的测试仪器设备,在该航线上进行长时间的船舶柴油机载荷测试试验;严格遵守该船舶日常航行运营时间、停靠港口,并实现参数的实时记录,得到实船试验数据。这些试验数据真实地反映该代表船型的航行状况,最终综合评价出 YC6T 船用柴油机产品在西江航道运输船舶上的船、机、桨匹配性和船舶运营的经济性。

2.1 测试系统总体设计

测试系统主要功能如下:

- (1) 安全有效地采集船舶柴油机载荷相关数据,实现参数的实时记录;
- (2) 运用采集的测试数据对船舶的船、机、桨匹配状态进行评价;
- (3) 通过后期的处理分析,对船舶的运营状态做出评价。

2.2 测试参数确定

2.2.1 静态采集信息

静态采集信息主要有主机装置参数、螺旋桨参数、船体相关参数等,静态采集信息的主要功能是初步判断设计过程中船、机、桨的匹配状态。

2.2.2 动态采集信息

船、机、桨系统实际上是一个能量转换系统。主机是能量发生器,提供某一转速下的旋转力矩,通过传动装置将能量传送到螺旋桨;螺旋桨是能量

转换器,将主机的旋转能转换为推力能;船体是能量消耗体,克服阻力航行。由能量转换关系可以看出,油耗量影响主机输出功率,进而影响螺旋桨转速和船舶航速。要使效率最大化,须研究船、机、桨三者的运行特性,及相互之间的能量转换关系,得到船舶运行过程中能量转化规律、船舶主机运行状态、船机桨匹配状态。这期间须对某些动态信息进行实时采集,再基于静态信息对采集的大量数据进行处理,研究船舶运营状态。

动态采集信息主要包括:转速、扭矩、燃油进回油流量、排气温度和压力、中冷前后温度等主机运行参数;以及航速、航程、实际吃水等船体运营参数。

2.3 测试采集系统组成

船舶柴油机载荷测试采集系统主要由两部分组成:PC 上位机、信号采集处理单元。

2.3.1 PC 上位机

PC 上位机的主要功能:接收 CAN 总线来自采集处理单元的数据,并显示及记录;实现人机交互功能。其主要包括三个部分:便携式计算机、USB CAN 接口盒、采集软件。

主要采集的信号有:主机(主轴)转速、扭矩、燃油(回)油流量、排气温度、排气压力、中冷前(后)温度、航速、实际吃水、 NO_x 排放。

2.3.2 信号采集处理单元

信号采集处理单元为自行设计研发,主要由单片机最小系统、外围接线模块、电源模块、调理模块和 CAN 模块组成。基于船舶柴油机载荷测试采集系统的测量参数,信号采集处理单元又分为:油耗采集处理单元、扭矩采集处理单元、添蓝控制器采集处理单元、航速采集处理单元、 NO_x 传感器。

信号采集处理单元主要有以下功能:

(1) 信号采集模块:接收传感器输出信号并进行调理,之后发送至信号处理模块。

(2) 信号处理模块:将调理后的信号处理成 CAN 网络信号,并发送至 CAN 总线。

2.3.3 传感器选型

采集信号所用传感器见表 1。

2.4 测试装置标定

为了保证测试系统测量的准确性、有效性,须对测试装置做标定,以减少测试装置带来的误差影响。主要须标定的装置包括:燃油流量计、转速传感器、扭矩仪等。

2.5 测试装置安装方案

测试装置的整体安装布局如图 1 所示。PC 上

位机放置机舱船员住处，GPS 信号及流速仪信号放置在驾驶台，其他采集处理单元放置在机舱。

表 1 传感器选型

采集信号	传感器选型	备注
转速	磁电式转速传感器	量程： $0 \sim 2\,000 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1}\text{)}$
扭矩、功率	TT10K 遥感式测扭仪	9 V 高能锂电池； 通信接口：RS232 或模拟信号
燃油进油、 回油流量	LC-W 系列微小流量计	量程： $20 \sim 600 \text{ (l} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$ ； 通信接口：脉冲信号
排气温度	PT200 型热电阻传感器	量程： $-40 \sim 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$
排气压力、燃 油进、回油压力	压力变送器	量程： $-50 \sim 50 \text{ kPa}$
中冷前、后温度	PT100 型热电阻传感器	量程： $0 \sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
对地航速	嵌入式 GPS 模块 SR-87	通信协议：NMEA-0183 通信接口：串口 RS232
对水航速	流速传感器	数据接口：RS232 供电电压： $9 \sim 16 \text{ VDC}$
电源模块	220 V 转 24 V 电源模块 220 V 转 12 V 电源模块	必要情况在电源 模块前加稳压模块
实际吃水		均由船舶提供， 不需要时刻记录
NO_x	西门子 VDO Uninox24 V	量程： $0 \sim 1\,500 \times 10^{-6}$

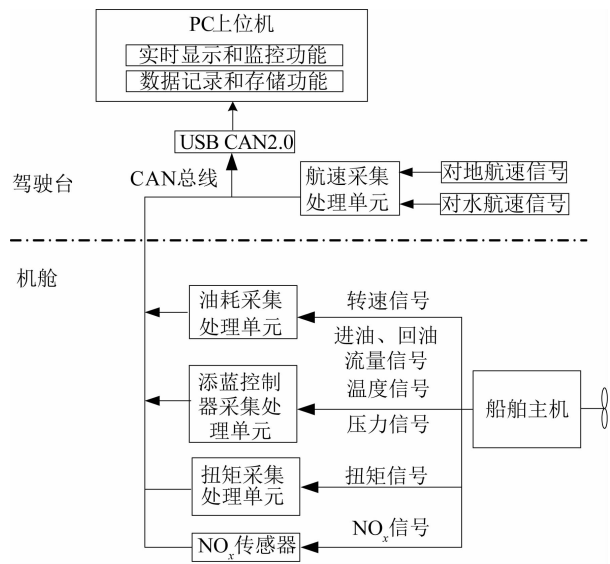


图 1 船舶柴油机载荷测试系统安装方案

2.5.1 PC 上位机安装

PC 上位机硬件设备包括便携式计算机、USB CAN 接口盒；软件包括：USB CAN 接口盒驱动，船舶发动机载荷测试采集系统软件。

2.5.2 油耗采集处理单元安装

(1) 实船流量计安装

在测取主机油耗值时，尽量减少对管路的改

造，燃油流量测试布置如图 2 所示。

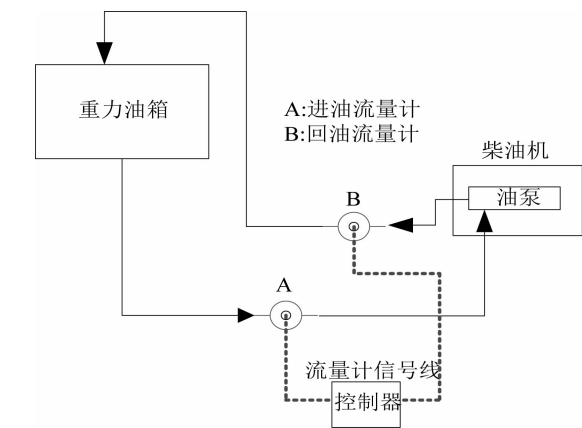


图 2 燃油流量测试布置

(2) 磁电式转速传感器安装

将传感器的探头安装在齿轮端的孔内，保证传感器探头顶端与齿轮两者相距 1 ~ 2 mm，然后将传感器信号输出线接到油耗采集处理模块的转速接口。

2.5.3 扭矩采集处理单元安装

扭矩采集处理单元包括全桥式应变片、TX10K-S 发射机、RX10K 接收机、扭矩采集处理模块、9 V 锂电池及 24 V 电源模块，其连接示意如图 3 所示。

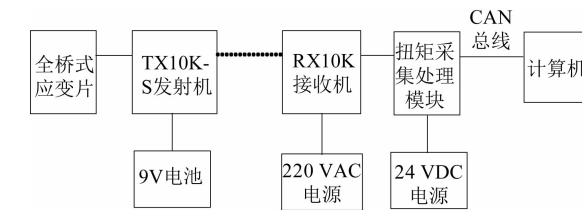


图 3 扭矩采集处理单元安装方案

应变片贴好之后，将 4 根导线分别与 TX10K-S 发射机末端的 + / - E 和 + / - S 相接，连接方式如图 4 所示。

2.5.4 航速采集处理单元安装

航速采集处理单元主要包括流速传感器、天线、串口采集处理模块、GPS 采集处理模块及电源模块，其连接示意如图 5 所示。

(1) 流速传感器安装

SVR 电波流速传感器主要功能是测量水流速度。安装在船头时，实际测得的速度为船舶对水航速。

(2) 天线安装

天线选用的是 GPS 授时天线，长度 30 m。天线安装于驾驶台顶部，避免其他物体遮挡，有利于接收卫星信号。

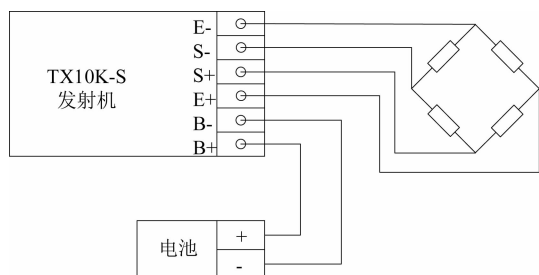


图 4 TX10K-S 发射机安装方案

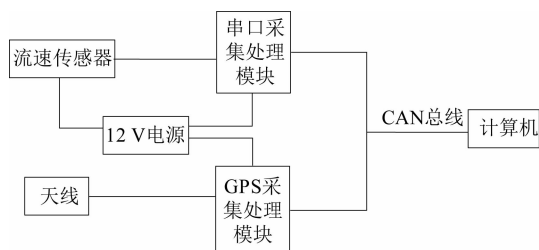


图 5 航速采集处理单元安装方案

2.5.5 添蓝控制器采集处理单元安装

添蓝控制器采集处理单元主要包括添蓝控制器、温度传感器、压力传感器等，其连接示意如图 6 所示。

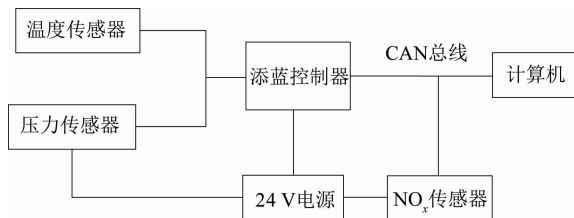


图 6 添蓝控制器采集处理单元安装方案

2.5.6 NO_x 传感器安装

NO_x 传感器安装在发动机涡轮后接管，信号直接通过 CAN 总线发送。排放实时监测仅作为备用选项。

3 实船应用

试验测试船舶见图 7 所示，为贵港某公司 4 000 t 集装箱船，为西江航道代表性船型。该船主要经营贵港港到广州南沙港固定航线普通货物运输；配套新一代 YC6T540C 柴油机动力，双主机推进。具体发动机、轴系、航速等数据采集布点见图 8~10，数据采集处理见图 11。

船舶运行航线图如图 12 所示，总航程为 623.2 km。

3.1 静态采集信息

静态采集信息如表 2~表 4 所示。



图 7 测试船舶

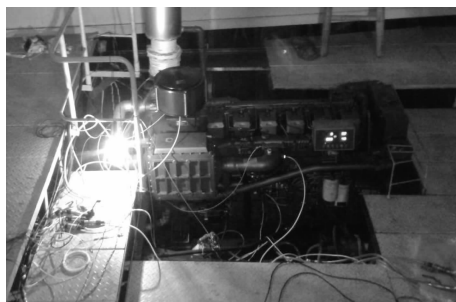


图 8 发动机数据采集布点

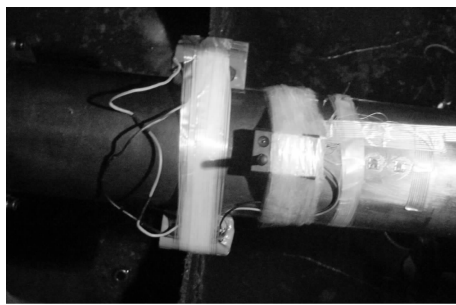


图 9 轴系数据采集布点



图 10 航速数据采集布点



图 11 数据采集处理

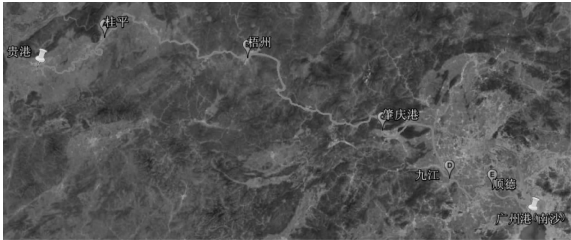


图 12 船舶运行航线图

表 2 主机装置参数

1	主机额定功率/kW	396
2	减速比	5:1
3	燃油进油、回油流量/(kg·h ⁻¹)	200 以内
4	主机特性曲线	推进特性曲线、万有特性曲线
5	额定转速、最大转速/(r·min ⁻¹)	1 800、1 850
6	轴系效率/%	95
7	功率储备/%	10 (超负荷点)
8	主机最大背压/kPa	10

表 3 螺旋桨参数

1	螺旋桨形式	AU
2	螺旋桨个数	2
3	相对旋转效率	0.5
4	螺距比	0.7
5	叶数	4
6	螺旋桨直径/m	1.700
7	盘面比	0.55
8	材料	钢质

表 4 船体相关参数

1	设计水线长/m	66.09
2	型宽/m	15.65
3	设计吃水/m	4.3
4	菱形系数	0.93
5	水线面系数	0.98
6	船舶设计航速/(km·h ⁻¹)	18
7	具体航线	贵港港—广州港南沙港
8	垂线间长/m	65
9	型深/m	5.7
10	排水量/m	4 059.28
11	方形系数	0.92
12	浮心距舯	-1%
13	载货量/t	4 000
14	航期/d	10

3.2 匹配理论校核

根据静态采集信息初步判断设计过程中船、

机、桨的匹配状态。由 ShipPower 软件计算得到的结果如表 5 所示。

表 5 匹配理论校核

螺旋桨直径/m	1.721 3
盘面比	0.515 0
螺距比	0.613 3
航速/kn	8.581 3
螺旋桨效率	0.428 6

螺旋桨参数与实际采集到数据基本吻合，满载时理论航速为 15 (km·h⁻¹)。为综合评价 YC6T 船用柴油机产品在西江航道运输船舶上的船、机、桨匹配性和船舶运营经济性，须进一步提取动态采集信息分析。

3.3 动态采集信息

本次测试周期为贵港港到广州南沙港固定航线 1 个航期。动态采集信息主要有主机运行参数、船体运营参数等。有效数据采集 819 631 组，包括柴油机载荷谱、柴油机油耗分布谱、船舶对水航速分布谱等。

选取本次测试中具有代表性的稳定工况点与万有特性进行比较，见图 13 所示。

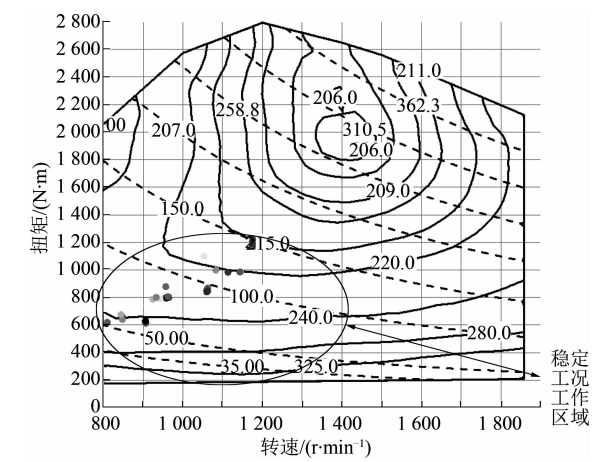


图 13 稳定工况工作区域图

对比结果表明：发动机工作在万有特性之内，发动机的油耗与比油耗也分布在规定的范围内，因此可以认为试验数据有效。

3.4 主机工作范围验证

理论推进特性曲线 $P = Cn^3$ 是发动机制造厂台架试验所遵循的理论曲线。对该发动机实际工作状态的统计分析表明：该发动机工作在理论外特性曲线之内，未超负荷运转，见图 14。

3.5 载荷谱分析

(1) 载荷谱体现的是发动机工况的分布情况。因此，依据柴油机工况，将该柴油机载荷谱划分为

30×30 大小的区间, 横坐标区间: 功率 0~290 kW, 间隔 10 kW; 转速: 0~1 450 ($r \cdot \min^{-1}$), 间隔 50 ($r \cdot \min^{-1}$), 见图 15。

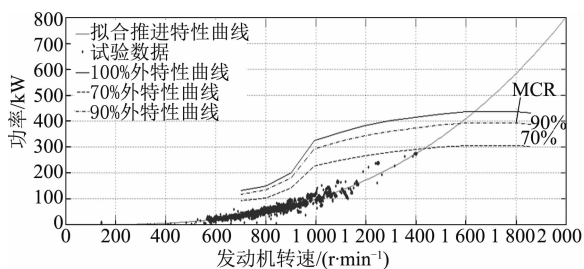


图 14 主机工作范围与试验拟合推进特性曲线

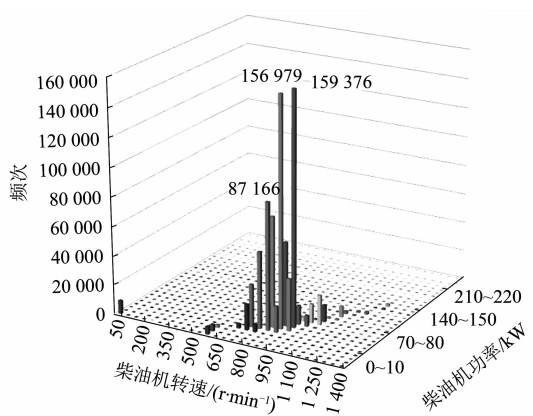


图 15 载荷谱

(2) 分布概率

由发动机载荷谱及分布概率 (图 16、17), 发动机主要工作工况如表 6 所示。发动机的额定转速及额定功率为 1 800 ($r \cdot \min^{-1}$)、396 kW, 而船舶实际运行过程中, 发动机较大部分时间处于低转速、低负荷 (800~950 ($r \cdot \min^{-1}$), 30~70 kW) 状态, 占 58.46%。

表 6 功率分布

转速区间/ ($r \cdot \min^{-1}$)	功率区间/kW	比重/%
800~850	40~50	10.64
800~850	50~60	9.22
850~900	50~60	19.15
900~950	60~70	19.45

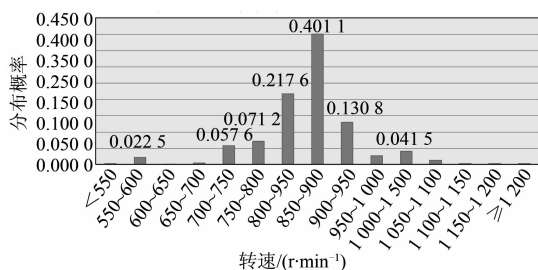


图 16 发动机转速分布概率

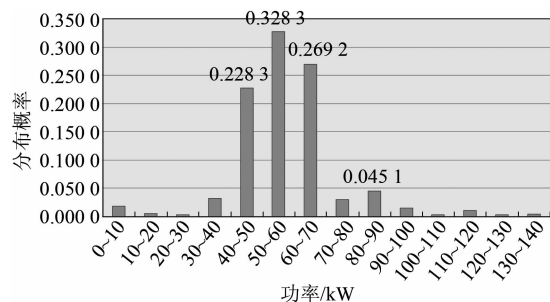


图 17 发动机功率分布概率

3.6 发动机油耗分布谱分析

(1) 发动机油耗谱划分为 30×14 大小区间: 横纵坐标区间: 油耗: 0~65 ($kg \cdot h^{-1}$), 间隔为 5 ($kg \cdot h^{-1}$); 转速: 0~1 450 ($r \cdot \min^{-1}$), 间隔为 50 ($r \cdot \min^{-1}$), 如图 18。

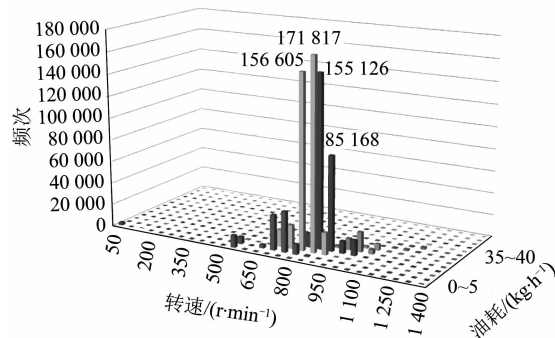


图 18 油耗分布谱

(2) 分布概率

由发动机油耗谱, 对应发动机低转速分布, 发动机油耗主要分布区间如表 7 所示。油耗在 10~15 ($kg \cdot h^{-1}$) 和 15~20 ($kg \cdot h^{-1}$) 的比例达 69.39%, 见图 19。

表 7 油耗分布

转速区间/ ($r \cdot \min^{-1}$)	油耗区间/ ($kg \cdot h^{-1}$)	比重/%
800~850	10~15	19.11
850~900	10~15	20.96
850~900	15~20	18.93
900~950	15~20	10.39

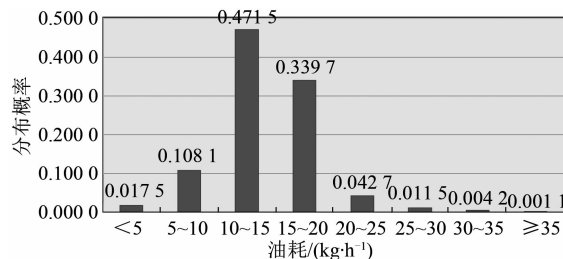


图 19 发动机油耗分布概率

3.7 船舶对水航速分布谱分析

(1) 船舶对水航速谱划分为 10×16 大小区间：横坐标区间：航速： $0 \sim 18 \text{ (km} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$ ，间隔为 $2 \text{ (km} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$ ；转速： $0 \sim 1\,500 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1}\text{)}$ ，间隔为 $100 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1}\text{)}$ 。见图 20。

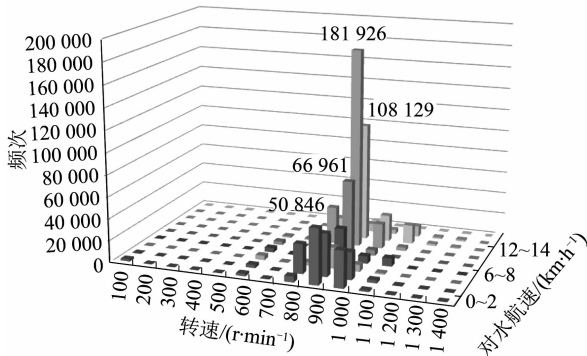


图 20 船舶对水航速分布谱

(2) 分布概率

由船舶对水航速分布谱，对应发动机转速分布，船舶运行工况最主要的工作区间见表 8。由于受航道的影响，船舶阻力变化较大，对水航速运行存在差异。但航速集中在 $8 \sim 14 \text{ (km} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$ ，占 43.56%。

船舶对水航速分布概率见图 21。

表 8 航速分布

转速区间/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	航速区间/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	比重/%
800 ~ 950	8 ~ 10	8.17
800 ~ 950	10 ~ 12	22.20
800 ~ 950	12 ~ 14	13.19

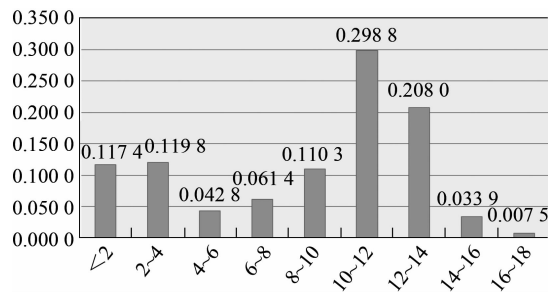


图 21 船舶对水航速分布概率

3.8 实船应用综合分析

通过以上实船应用分析表明：该新一代 YC6T540C 柴油机动力匹配性合理，动力储备大，可靠性强，整船设计满足使用要求，运营油耗低，经济性较好。

(1) 配套齿轮箱速比 5:1，螺旋桨直径 1.7 m，可作为 YC6T540C 在该船型上应用的主推配置。

(2) YC6T540C 工作在发动机理论外特性曲线

之内，未超负荷运转；主要在低转速、低负荷工况下工作，所以具有较大的转速储备和功率储备，可满足冲滩和应急要求。

(3) 综合对水航速与油耗间关系（表 9），可以看出：经济航速在 $13 \sim 14 \text{ (km} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$ 附近，而船舶大部分时间运行在 $10 \sim 13 \text{ (km} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$ 以下。所以须和客户沟通：在航道允许情况下，船舶航速尽量保持在 $13 \sim 14 \text{ (km} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$ 。

表 9 对水航速与油耗关系

对水航速/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	8 ~ 9	9 ~ 10	10 ~ 11	11 ~ 12	12 ~ 13	13 ~ 14
对水航速平均值/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	8.469	9.638	10.582	11.571	12.490	13.449
对水航速分布概率	0.022	0.093	0.139	0.161	0.143	0.104
每公里航程燃油消耗/ $(\text{kg} \cdot \text{km}^{-1})$	3.26	2.61	2.47	2.37	2.30	2.28

(4) 针对该发动机超过一半的运营时间在低转速、低负荷工况下工作，要注意燃油泵、增压器、喷油器、活塞等性能零部件的匹配开发，以及机油泵和淡水泵冷却系统零部件热平衡能力的开发。

4 总 结

采用船舶柴油机载荷测试技术对 YC6T 船用柴油机在贵港某公司 4 000 t 集装箱船上的应用进行分析，可知：该产品在西江航道运输船舶上具有较强的匹配性和良好的船舶运营经济性。实测数据为后续 YC6T 船用柴油机产品性能优化、技术营销等提供了强有力的依据。目前，船舶柴油机载荷测试技术已应用在 YC6C 等机型配套的长江流域、京杭大运河流域等内河样板船，以及广西北海、浙江台州、江苏连云港等渔船样板船上，并建立了样板船数据库，受到了发动机厂商和船东用户的欢迎。

参考文献

[1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京：机械工业出版社，1998.

[2] 盛振邦. 船舶原理 [M]. 上海：上海交通大学出版社，2003.

[3] 中国国家标准化管理委员会. 内燃机、发动机功率的确定和测量方法一般要求：GB/T 21404-2008 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[4] 国家技术监督局. 柴油动力内河船舶系泊和航行试验大纲：GB/T 3221-1996 [S]. 北京：中国标准出版社，1997.