

某船用柴油机调速特性瞬态仿真分析

景国辉¹, 郑 亮², 李先南², 沈 刚², 谭晓星²

(1. 海军驻七一一研究所军事代表室, 上海 201108; 2. 七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 某高速柴油机用作船用发电机组原动机时, 对瞬态性能有较高的要求, 而原柴油发电机组为 3 级调速精度, 现须提高到 2 级调速精度。建立了该机一维瞬态仿真模型, 并根据该机稳态试验数据及机组瞬态试验数据进行标定; 基于原机调速精度指标与目标要求的差距, 提出了该机调速精度优化方法。仿真计算验证了该优化方案切实有效, 优化后该机调速精度满足 2 级调速精度要求。

关键词: 船用柴油机; 发电机组; 调速特性

中图分类号: TK424.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)06-0016-04

Optimization of Speed Governing Performance of a Marine Diesel
by Transient SimulationJing Guohui¹, Zheng Liang², Li Xiannan², Shen Gang², Tan Xiaoxing²

(1. Naval Deputy Office of Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: To be used as marine generation sets, a certain marine diesel has high requirement regarding to the transient performance. However, the speed governing accuracy of the original diesel gensets was degree 3, and needed to be improved to degree 2. The 1D transient simulation model was built and calibrated by both steady and dynamic engine testing data. With regard to the gap between the speed governing performance of the original gensets and targeted requirement, the optimization method of improving speed governing accuracy was put forward. The method was verified to be feasible and practical through simulation calculation, and could meet with degree 2 speed governing accuracy.

Key words: marine diesel; genset; speed governing performance

0 引 言

某船用柴油机在匹配不同电机时须根据调速精度要求调整机组的惯量情况及调速器的控制参数。本文采用瞬态仿真计算手段研究该船用柴油发电机组由 3 级调速精度提高到 2 级调速精度的优化方法, 以缩短机组调速精度优化周期及降低试验成本。

1 柴油机技术参数

该船用柴油机为 V 型 12 缸机, 分为 A 列和 B 列, 每列 6 缸。采用 MPC 增压方式, 每列连接一台增压器, 共两台增压器。该机主要技术参数如表

1 所示。

表 1 某船用柴油机技术规格

缸数	12
型式	直喷四冲程
缸径/mm	170
冲程/mm	195
压缩比	13.5
连杆长度/mm	350
单缸排量/L	4.43
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
额定功率/kW	1 251
平均有效压力/MPa	1.89

收稿日期: 2017-09-11

作者简介: 景国辉(1971-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为船用柴油机性能。

2 计算模型建立与标定

2.1 计算模型的标定分析

在一维仿真软件中建立稳态计算模型，如图 1 所示。由于该机为对称结构 V 型，为简化计算过程，仅搭建单列计算模型。计算模型中的管路、空冷器、涡轮增压器以及发动机燃烧等参数，采用和发动机结构尺寸和性能一致的计算参数。为了准确地模拟原机性能，根据该机试验数据对仿真模型进行标定，精度达到 90% 以上。最高燃烧压力、增压器转速标定情况如图 2、3 所示。

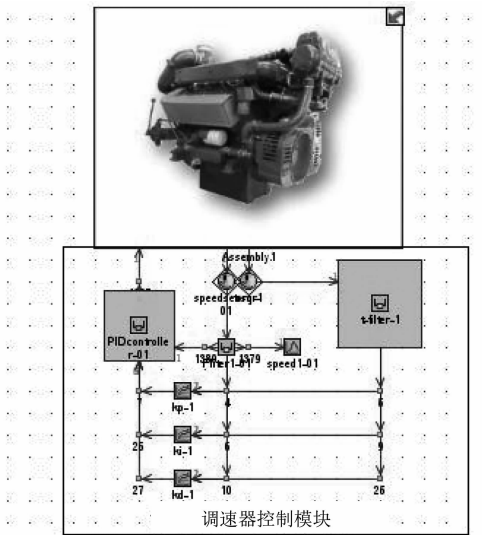


图 1 某船用柴油机一维仿真计算模型

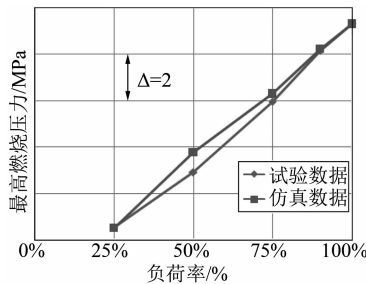


图 2 全工况最高燃烧压力标定精度

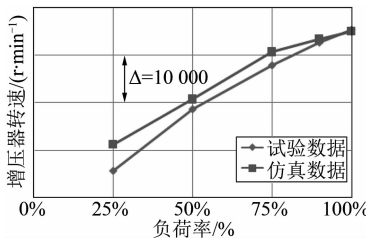


图 3 全工况增压器转速标定精度

在稳态标定过程中发现：增压器转速存在低负荷下偏离较大的问题，这与增压器 MAP 在低负荷下精度较低有关系。

柴油机瞬态特性研究主要是分析柴油机工况突变过程中柴油机性能的变化过程，以及评估优化技术措施对瞬态性能的影响；而对于稳态计算结果精度的要求并不高，因此，该模型仍可用于下一步的瞬态模型标定与计算。

2.2 调速器建模及瞬态模型标定

在原有稳态模型的基础上增加了调速器模块，在 GT-Power 中用 PID 控制来简化实际的调速器模块。基于搭建的瞬态计算模型开展该船用柴油机调速特性计算分析。

该船用柴油机的突加突卸方式为：100%→0→60%→100%。根据加载方式及目标转速调整瞬态仿真模型，计算得到的调速过程转速波动情况如图 4 所示，图中还给出了与试验数据的对比情况。

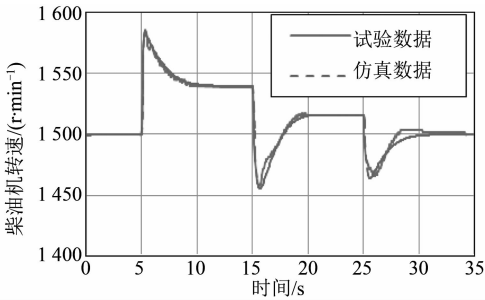


图 4 某船用柴油机瞬态一维仿真模型标定

通过调整 P、I 参数，最终使仿真计算结果与试验结果相似，完成瞬态计算模型的标定。

3 调速特性优化

3.1 原机组调速特性分析

国标对发电机组调速特性做出了专门的规定，按照不同调速精度等级将发电机组分为 4 级，针对每个等级，对稳态调速率、瞬态调速率、转速稳定时间等参数都做出了具体规定，如表 2 所示。

表 2 不同精度等级的调速性能指标

精度等级	负载变化		
	突卸或缓卸 100% -> 0；一次突加 0 -> 100%；分段突加 0 -> 50%，稳定后再加载 50% -> 100% *	突卸 100% -> 0；一次突加 0 -> 100%；分段突加 0 -> 50%，稳定后再加载 50% -> 100% *	
	稳态调速率 $\delta_{st}/\%$	瞬态调速率 $\delta_d/\%$	τ/s
1	2	5	2
2	3	7	3
3	5	10	5
4	10	高速机：12 中低速机：15	

* GB/T 13032-2010 中规定：对于废气涡轮增压且标定平均有效压力大于 1.61 MPa 的柴油机，允许分段突加，但未规定如何分段。一般按照实际负载对电站的需求并结合柴油机的工作能力确定分段方式。

按照 GB/T 3475-2008 中各调速特性参数的计算方法, 对该船用柴油发电机组的调速特性进行计算。依据实际使用要求, 该柴油机一级突加为 0→60%。结果如表 3 所示。从表中可以看出: 该发电机组调速精度达到 3 级调速精度的要求。而要达到 2 级调速精度, 还须控制突卸及一级突加时的转速稳定时间。

表 3 某船用柴油机调速性能

调速特性 特征参数	突卸 100%→0	一级突加 0→60%	二级突加 60%→100%
稳态调速率 $\delta_{st}/\%$	2.67		
瞬态调速率 $\delta_d/\%$	5.7	5.2	3.3
转速稳定时间 τ/s	3.3	3.5	2.9

负荷突卸过程, 转速稳定时间主要取决于调速器执行器的响应时间、机组轴系的转动惯量以及调速器控制器的控制参数; 而负荷突加过程, 转速稳定时间主要取决于增压系统匹配情况、增压器转动惯量、机组轴系转动惯量、负荷加载幅度以及调速器控制器的控制参数^[1]。

分析表 3 数据可知: 相较于 2 级调速精度, 该发电机组负荷突卸时的转速稳定时间仅超标 0.3 s, 负荷突加时的转速稳定时间度仅超标 0.5 s, 两者超标量均较小。若优化执行器响应时间、轴系转动惯量及增压器等, 都须在硬件上考虑设计变更, 且牵涉到对其他系统的影响, 难度较大。因此优先考虑通过调整调速器控制器的控制参数来解决负荷突卸时稳定时间超标的问题。

该船电站柴油机调速器采用 PID 控制方式进行调速控制。P、I 参数能够较为方便地改善调速性能。根据经验: I 参数主要影响的就是转速稳定时间; 同时考虑不至于对 60%→100% 负荷突加过程产生影响, 对 I 参数进行分段设置^[2]。

3.2 I 参数分段处理

在不同的功率下采用不同的 I 参数, 从而可以对不同的负荷突加突卸过程分别做分析。同时, 为了保证在转速偏离目标值较大时调速器能够更快地响应, 一般将 P、I 参数设置为“浴盆型”: 转速偏离大时, P、I 参数取值大; 转速在目标转速附近时, P、I 参数取值小。综上, I 参数分段设置如表 4 所示。

表 4 中 4 800 (N·m) 扭矩对应该机的 60% 负荷, 8 000 (N·m) 对应 100% 负荷。表中的 I 参数为 GT-Power 自带的 PID 模块中的参数, 而实际调速器中的 PID 控制一般是有一些变形的, 因此, 并不能直接对应实际调速器中的 P、I 参数设置。

表 4 I 参数分段设置情况

I 参数		转速/ (r · min ⁻¹)				
		1 400	1 450	1 500	1 550	1 600
扭矩/ (N · m)	0	6	5	3	5	6
	4 800	6	5	4	5	6
	8 000	8	6	5	6	8

在柴油机突加突卸负荷过程中, 负荷瞬间切换到目标负荷, 此时调速器采用的 P、I 参数必然为目标负荷的设置值。

要调整 100%→0 突卸及 0→60% 突加时的转速稳定时间, 主要调整 I 参数 (P 参数一般影响转速波动幅度, 而 I 参数主要影响稳定时间)。

3.3 突卸过程优化

为控制转速稳定时间, 须增大 I 参数, 以原 I 参数为对比方案, 进行 2 个方案的计算, 具体方案如表 5 所示; 计算结果如图 5 所示。其中稳定转速为满足 GB/T 3475-2008 中对柴油机发电机组转速波动率 ($\leq 0.4\%$) 所要求的最大转速。

表 5 突卸过程优化计算方案

I 参数	转速/(r·min ⁻¹)				
	1 400	1 450	1 500	1 550	1 600
原方案	6	5	3	5	6
方案 1	6	5	4	5	6
方案 2	8	6	5	6	8

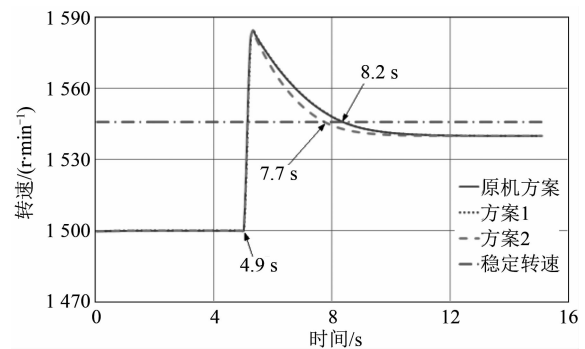


图 5 不同 I 参数对负荷突卸过程转速稳定时间的影响

从图中可以看出: 通过提高 I 参数能够有效缩短转速稳定时间, 同时对瞬态转速波动率影响不大; 但也看到: 方案 1 与原机方案差异极小, 说明单独调整目标转速时的 I 参数, 对调速特性影响不大。采用方案 2 的 I 参数后, 负荷突卸时转速稳定时间由 3.3 s 减小到 2.8 s。

3.4 0→60% 突加过程优化

以原 I 参数为对比方案, 进行 2 个方案的计算, 具体方案如表 6 所示; 计算结果如图 6 所示。采用方案 1 后, 转速稳定时间由 3.5 s 降为 3.2 s,

再次增大 I 参数，转速稳定时间由 3.2 s 进一步下降至 2.3 s；方案 2 下降幅度较大，可见 I 参数的调整与转速稳定时间的关系并不呈线性关系。

表 6 0→60%突加负荷优化计算方案

I 参数	转速/ (r · min ⁻¹)				
	1 400	1 450	1 400	1 450	1 400
原方案	4	2.5	1.8	2.5	4
方案 1	5	3	2	3	5
方案 2	6	4	3	4	6

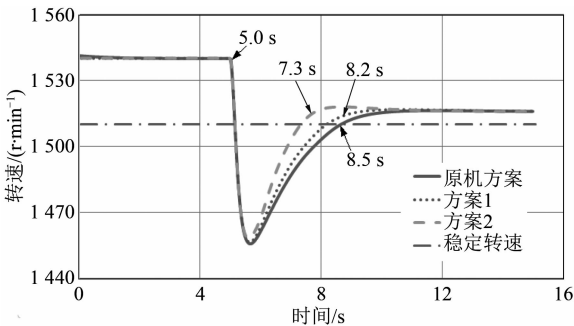


图 6 不同 I 参数对负荷突加过程转速稳定时间的影响

(上接第 15 页)

[11] CARIU P, CHEAITOU A. The effectiveness of a European speed limit versus an international bunker-levy to reduce CO₂ emissions from container shipping [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2012, 17 (2): 116-123.

[12] NORSTAD I, FAGERHOLT K, LAPORTE G. Tramp ship routing and scheduling with speed optimization [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2011, 19 (5): 853-865.

[13] LINDSTAD H, ASBJØRNSLETT B E, STRØMMAN A H. Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds [J]. Energy Policy, 2011, 39 (6): 3456-3464.

[14] RONEN D. The effect of oil price on containership speed and fleet size [J]. Journal of the Operational Research Society, 2011, 62 (1): 211-216.

[15] 王在忠. 内河船舶分段航速节能优化研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.

[16] 江涛. 内河船舶能效的数学模型及算法研究 [D]. 武汉理工大学, 2012.

[17] 张伟, 王红, 张澍宁, 等. 内河船舶主机动态油耗模型的研究与建立 [J]. 交通运输研究, 2013 (22): 95-97.

[18] 苑毅. 船舶最低单位距离油耗航速及控制系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.

[19] 王在忠, 张跃文, 孙培廷, 内河船用中速柴油机油耗率模型的建立 [J]. 中国航海, 2015, 38 (2): 34-37.

4 结 语

本文搭建了某船用柴油机的一维仿真计算模型，通过稳态试验数据的标定得到了具有一定精度的仿真计算模型；根据该船用柴油机的调速特性试验数据对瞬态模型进行了标定。通过对调速特性数据的分析表明：该柴油机为 3 级电站调速精度，但通过参数优化提高调速精度的潜力较大。通过调整 I 参数，达到了控制突卸及一级突加时转速稳定时间的目的；该船用柴油机最终达到 2 级电站调速精度要求。

参考文献

[1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[2] 霍荣康, 高德明, 李宁, 等. 8G32 型船用中速柴油机的设计开发 [J]. 柴油机, 2008, 30 (3): 1-6.

[20] 刘伊凡, 张剑, 张跃文. 纵倾优化下的船舶能效数值模型 [J]. 船舶工程, 2015 (12): 31-34.

[21] 范爱龙, 严新平, 尹奇志, 等. 船舶主机能效模型 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15 (4): 69-76.

[22] 陈前昆, 严新平, 尹奇志, 等. 基于 EEOI 的内河船舶航速优化研究 [J]. 交通信息与安全, 2014, 32 (4): 87-91.

[23] BIALYSTOCKI N, KONOVESSIS D. On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: a statistical approach [J]. Journal of Ocean Engineering & Science, 2016, 1 (2): 157-166.

[24] 宋昕. 考虑水流速度的内河营运船舶主机能效分析研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.

[25] LEIFSSON L P, SÆVARSDÓTTIR H, SIGURÐSSON S P, et al. Grey-box modeling of an ocean vessel for operational optimization [J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2008, 16 (8): 923-932.

[26] YAN X P, SUN X, YIN Q Z. Multiparameter sensitivity analysis of operational energy efficiency for inland river ships based on backpropagation neural network method [J]. Marine Technology Society Journal, 2015, 49 (1): 148-153 (6).

[27] GARSON G D. Interpreting neural-network connection weights [J]. Ai Expert, 2012, 6 (4): 46-51.

[28] PETERSEN J P, WINTHER O, JACOBSEN D J. A machine-learning approach to predict main energy consumption under realistic operational conditions [J]. 2012, 59 (1): 64-72.