

LNG 船舶推进系统动态性能分析研究

许力文¹, 盛晨兴¹, 孟嗣斐², 周晓洁², 郭丰泽²

(1. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063; 2. 七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 以某 LNG 动力工程船舶为研究对象, 采用 AMESim 仿真软件对船舶推进系统进行建模仿真。为保证模型的精确性, 采用试验数据进行标定, 标定结果表明: 各重要参数误差均在允许范围内。采用该仿真模型分别对分级加减速工况和负荷突变工况下推进系统各主要参数随时间的变化规律进行分析。结果表明: 在上述动态过程中该气体机运行稳定。

关键词: 气体机; 推进系统; 动态性能; 仿真

中图分类号: U664.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)06-0027-06

Research on the Dynamic Performance of the LNG Ship Propulsion System

Xu Liwen¹, Sheng Chenxing¹, Meng Sifei², Zhou Xiaojie², Guo Fengze²

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063;
2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Taking an LNG engineering ship as the research object, AMESim simulation software was used in the modeling and simulation of the ship propulsion system. In order to ensure the accuracy of the model, the test data were used for calibration. The errors of the important parameters were acceptable. The model was used to analyze the change of key parameters along with the time under stepped acceleration and deceleration condition, as well as load mutation condition respectively. It is concluded that the LNG engine operates steadily during the above mentioned dynamic process.

Key words: LNG engine; propulsion system; dynamic performance; simulation

0 引言

随着环境污染问题日益突出, 国家对于清洁能源的推广力度越来越大。在中国, 水路运输为运输总量仅次于公路运输的第二大运输方式。2016 年水路运输总量达到 63.6 亿吨, 较上年增长 5.6%。航运过程中产生的 NO_x 、 SO_x 排放已经严重影响航道周围的空气质量。随着 IMO Tier III 标准和我国《船舶发动机排气污染物排放限制及测量方法(中国第一、二阶段)》的相继实施, 清洁燃料船舶推进系统的研究得到发展。

天然气在我国储量丰富, 且具有高热值的优点。采用 LNG 作为单一燃料, 具有显著的经济效

益和排放优势。目前, 天然气发动机直接用作船舶推进相较于传统柴油机推进系统, 存在接排性能不稳定、动态响应慢的缺点。

本文以七一一研究所自主研发的某型天然气发动机为推进主机, 根据某特种船舶结构参数, 构建 LNG 船舶推进系统仿真模型, 对中速气体机的推进系统的动态特性进行仿真研究。

1 船舶推进系统

船舶推进系统由推进用气体机、减速齿轮箱、传动轴系、螺旋桨组成。船舶推进系统模块划分结构如图 1 所示。根据图 1 可以确定气体机-推进器-船体的相互作用关系, 达到两个运动平衡, 即推

进用气体机转速与螺旋桨转速的转动平衡；船舶航速与螺旋桨进速的平动平衡。

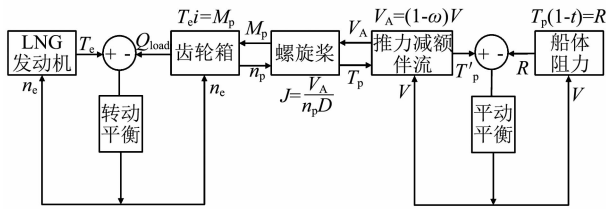


图1 船舶推进系统组成

气体机转速的计算公式如式(1)：

$$\frac{dn_e}{dt} = \frac{T_e i - M_p}{I_{EA} + I_p + I_w} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (1)$$

式中： T_e 为气体机输出扭矩， M_p 为螺旋桨水阻力矩， i 为传动比， I_{EA} 、 I_p 、 I_w 分别为气体机及传动轴系、螺旋桨、螺旋桨附连水的转动惯量^[1]。

事实上，船舶的运动过程十分复杂，是惯性坐标系六个自由度的任意运动。因本文是对LNG推进系统动态性能进行研究，因此将船体的运动模型简化为只在X轴的一维运动。船舶航速的计算公式如式(2)：

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(1-t)T_p - R}{m_s + m_w} \quad (2)$$

式中： T_p 为螺旋桨有效推力， R 为船身阻力， t 为推力减额分数， m_s 、 m_w 分别为船体质量和船体附连水的质量。

2 船舶推进系统仿真模型

对船舶推进系统进行模块化建模，分为气体机系统、传动装置及螺旋桨、船体系统^[2-3]。所建仿真模型如图2所示。

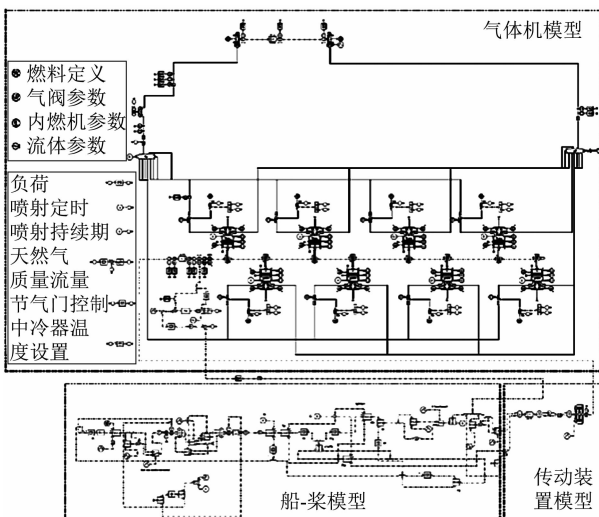


图2 船舶推进系统仿真模型

2.1 气体机系统

本文以某型中速四冲程天然气推进用发动机为建模对象，该气体机基本参数如表1所示。

表1 气体机主要参数

额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
额定功率/kW	1 600
最高燃烧压力/MPa	≤14
冲程数	4
缸数	8
发火顺序	1-2-4-6-8-7-5-3
压缩比	13
缸径/mm	230
冲程/mm	320
燃料组成	甲烷值≥80
燃料低热值/(MJ·m ⁻³)	≥34

利用AMESim搭建该LNG单燃料发动机仿真模型，本文目的是研究气体机的做功能力和负载变化的响应能力，燃烧模型选取Twin-Wiebe model可以节约运算时间，传热模型选用Woschni模型。

在AMESim模型中首先设置气体机的全局变量：燃料属性、结构参数、进排气阀升程曲线、流量系数以及流体计算精度等；然后完善各子模型的边界条件；最后通过COMB Wiebe标定工具对气体机模型的韦伯燃烧参数做标定。进行DOE运算对燃烧室换热系数、中冷器冷却效果、增压器修正系数进行调整，使仿真计算得到的机组功率、输出扭矩、缸内最高燃烧压力、平均有效压力、增压器转速和流量、中冷器后进气参数、涡前压力等数据贴近试验数据。

利用试验台架获得的稳态工况点数据对仿真模型运算的结果进行校核。仿真数据与试验数据对比如图3所示，误差均不超过10%，在允许范围以内。

为了验证LNG推进系统仿真模型的准确性，须要对仿真模型进行动态工况的标定。

试验中选取1 000 (r·min⁻¹) @ 1 600 kW为MCR点，设置水力测功器螺旋桨模式系数，经计算 $C=1.528$ 。气体机带水负载以400 (r·min⁻¹)的转速稳定运行一段时间，待高温水、增压器转速、最高燃烧压力以及空燃比等参数稳定，进行恒升速率加速过程。设置调速器参数，以恒定升速率 $\Delta v=3$ (r·s⁻¹)加速到额定转速1 000 (r·min⁻¹)。

结合上述试验过程，合理设置仿真模型系统边界，确定仿真步长，进行仿真计算。将仿真得到的动力系统各部件主要参数与试验数据做对比；通过Batch运算优化LNG推进系统仿真模型，完成动态工

况标定。仿真结果与试验结果的对比如图 4 所示。

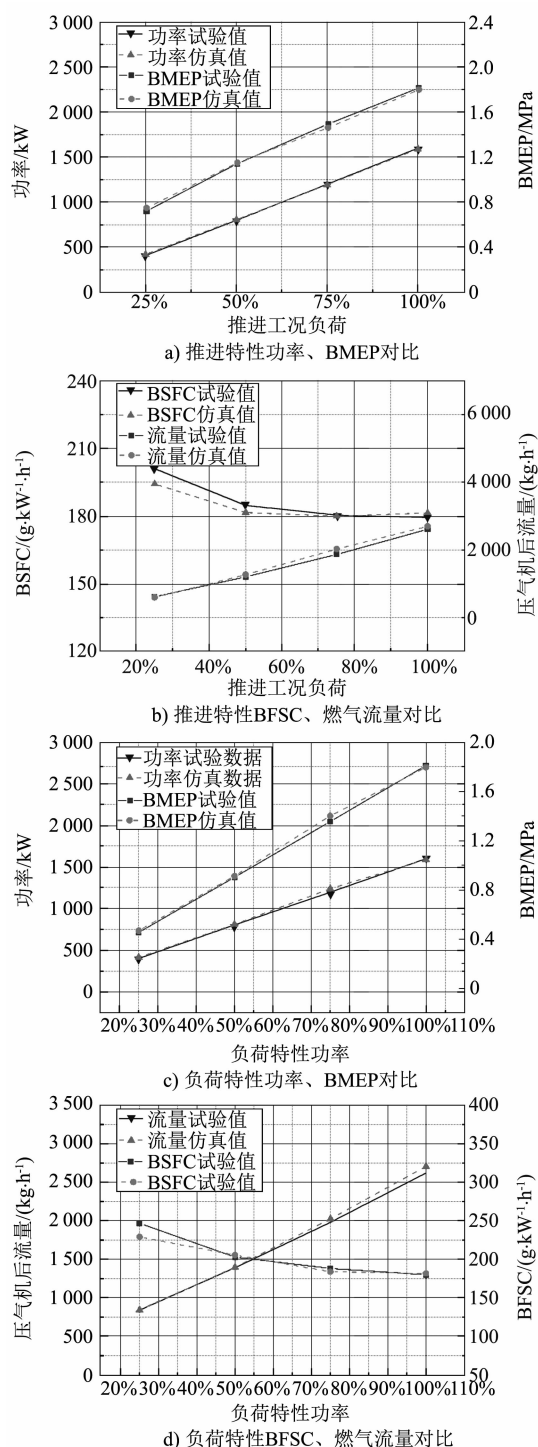


图 3 稳态过程标定结果

从图中可以看出: 恒速率加速过程中, 各参数仿真值与试验值的动态变化趋势基本一致。仿真计算所得的气体机转速、功率、涡前排温等主要参数与试验数值偏差不超过 5%; 涡轮增压器转速仿真值与计算值偏差不超过 10%。根据推进系统模型动态标定结果, 认定此 LNG 船舶推进系统模型可以满足后续动态性能研究需要。

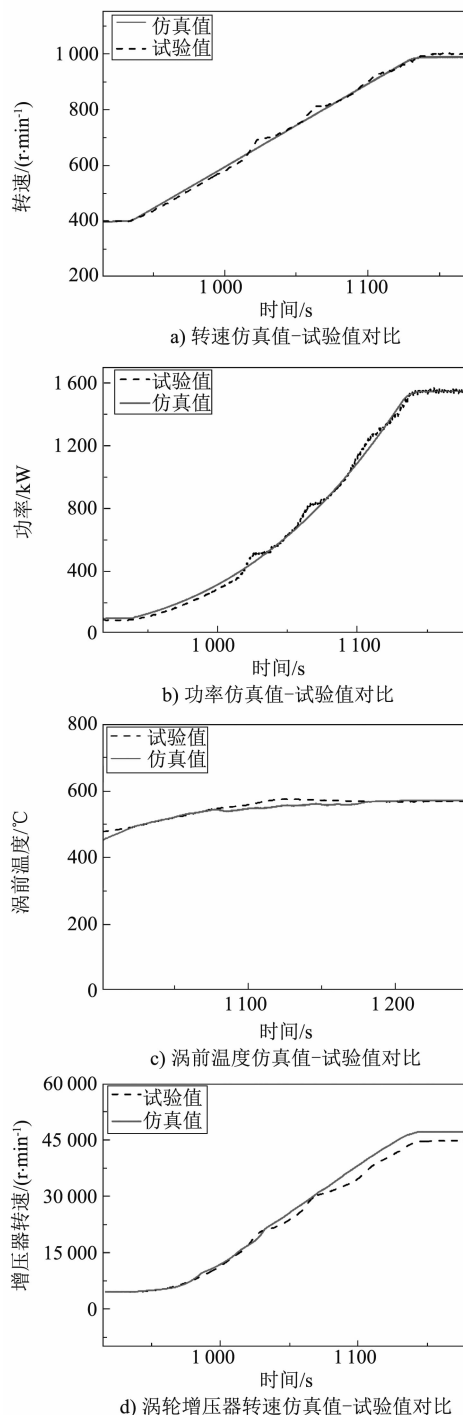


图 4 动态工况标定结果

2.2 船-桨模型

2.2.1 LNG 推进系统螺旋桨匹配

根据确定的推进系统, 已知主机功率 P_e 、转速 n_e 和有效功率曲线后, 确定船舶所能达到的最大航速 $V_{\max}$ 、螺旋桨直径 D 、螺距比 P/D 以及螺旋桨效率 η_0 。

本文利用 $B_p - \delta$ 图谱法进行船-机-桨的匹配设计。图谱法有简单易懂, 计算方便的优点^[4]。通过分析螺旋桨的敞水试验结果可知: 确定进速系

数 $J = V_A / (nD)$ 后, 可以得出不同螺距比下螺旋桨的性能。按照定义: 螺旋桨发出功率 Q 和螺旋桨收到功率 P_D 相等, 结合进速系数 J 的表达式, 可以消除匹配计算系数中不包含的未知量 D 。此过程可得到图谱法所需的螺旋桨功率系数 B_p 以及直径系数 δ 。绘制 $B_p - \delta$ 图谱, 得到当前进速 V_A 下各螺距比桨的最高效率, 这样便可以求出不同进速下螺旋桨效率最高点的螺旋桨参数, 完成最终匹配。

本研究考虑到某型特种船舶采用双机双桨的推进形式, 预留 10% 的功率储备, 进行最终匹配, 船舶设计航速为 14.5 kn。

2.2.2 船桨数学模型

根据匹配计算得出的结果建立船桨数学模型, 逻辑关系如图 5 所示。

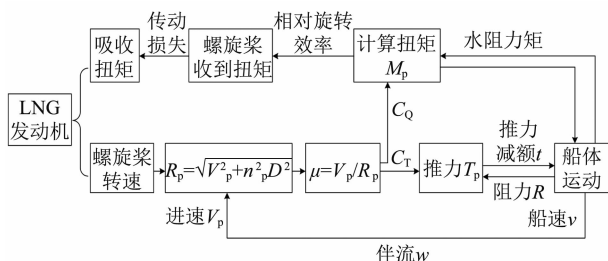


图5 船桨数学模型

设置推进系统边界条件, 推进系统模型稳态加速过程仿真结果如图 6、7 所示。

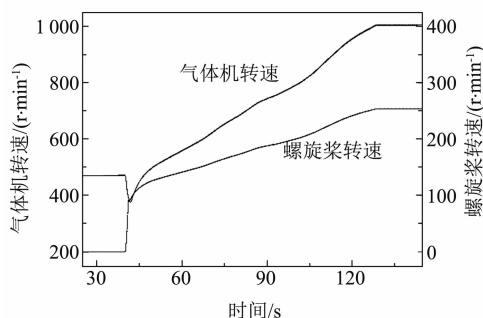


图6 稳态加速转速变化

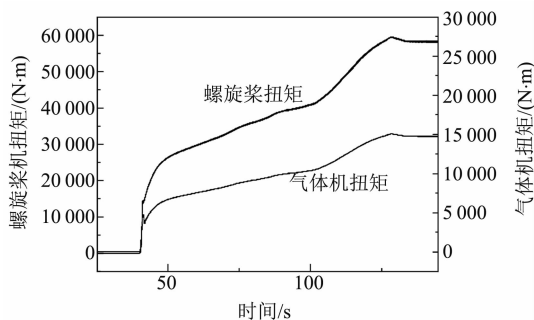


图7 稳态加速扭矩变化

气体机运行在接排转速, 转速波动率不超过

1%, 转速稳定 40 s 后, 模拟离合器接排过程。接排过程中, 气体机转速下降, 扭矩随负载的增大而升高; 螺旋桨转速从零开始上升, 扭矩根据螺旋桨特性曲线随转速升高而增大。待接排完成后, 气体机转速、扭矩与螺旋桨转速、扭矩达到平衡, 推进系统接到加速信号, 持续加速至额定工况。

3 LNG 推进系统动态性能分析

3.1 加速减速工况仿真分析

船舶运行的加速方式可分为直接加速和分级加速。对于 LNG 船舶推进系统, 须要保证船舶的操纵性和机动性, 选择分级加速方式。

设置分级加速策略: 给定气体机一个初始的进气压力和喷射脉宽, 相当于车钟处于前进一状态, 气体机转速和航速保持稳定; 然后定一个分级加速信号, 模拟前进一加速到前进二再加速到前进三, 气体机稳定至额定转速并持续运行一段时间; 最后给定一个减速信号, 从前进三减速至前进二。转速设定值如图 8 所示。

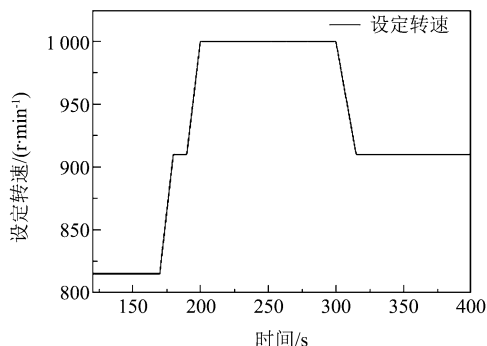


图8 转速设定值

在仿真分析过程中, 由于仿真总时间较长, 须要合理设置边界条件, 确定仿真步长。仿真模拟在离合器接排后, 给定初始喷气压力, 使系统达到前进一状态并稳定运行; 在 170 s 后给出分级加速信号; 在 300 s 时给出减速信号。转速设定值与实际转速的差值输入调速器, 控制喷气压力和喷气时间, 调节每循环进入气缸的天然气的质量流量。分级加速过程中气体机的转速 - λ 响应关系如图 9 所示。

由图 9 可以看出: 在变速工况过程中, 调速器动作迅速、准确, 超调量控制得很好。从前进一状态的 815 ($r \cdot \min^{-1}$), 经分级加速后, 推进气体机转速快速上升至稳定转速 1000 ($r \cdot \min^{-1}$), 过程约 60 s。从前进三减速到前进二, 转速达到稳定约 25 s。经试验验证, 气体机在变速工况中过量空气系数 λ 维持在 1.8 ~ 2.25, 保证了气体机运行在稳

定状态,不存在主机过载^[5]。

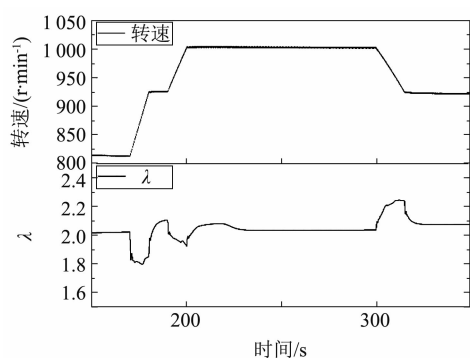


图9 全过程气体机转速- λ 变化

变速工况过程中,气体机的功率-扭矩变化如图10所示。基于时间轴可以看出:气体机的扭矩、功率动态变化滞后于转速变化。但扭矩和功率最大超调量均在允许范围内;分级加速稳定时间小于100 s,减速稳定时间小于40 s。

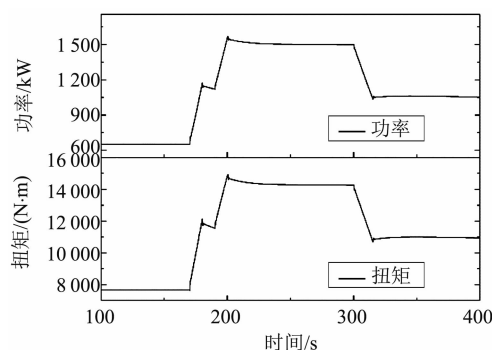


图10 全过程功率-扭矩变化

该工程船舶采用双机双桨带减速齿轮箱间接推进的方式,气体机转速的变化会直接影响螺旋桨转速,进而影响船速。经推进系统仿真计算,航速变化如图11所示。在变工况达到额定航速的过程中加速度是稳定的,船舶不会有明显的晃动,保证了船舶运行的稳定性和安全性。

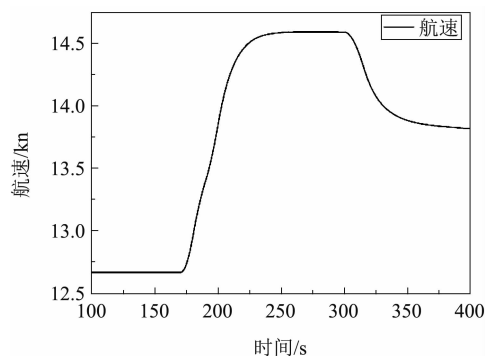


图11 航速

螺旋桨的推力系数 C_t 和扭矩系数 C_q 这两个无量纲数是进速系数的函数,在几何尺寸确定的情况下受船速和螺旋桨转速影响, C_t 、 C_q 的变化趋势如图12所示。根据螺旋桨工作原理,由 C_t 、 C_q 计算出的有效推力和扭矩变化如图13所示。可见在变速工况过程中,螺旋桨推力和扭矩调节迅速,保证了船舶变速的机动性。

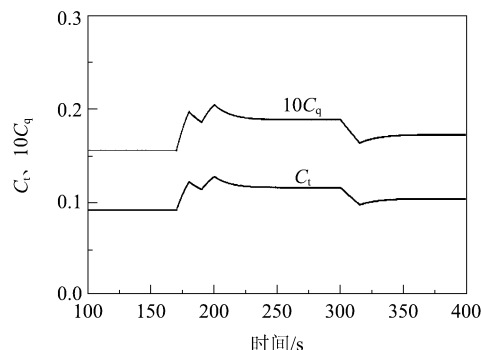


图12 C_t 、 $10C_q$ 变化趋势

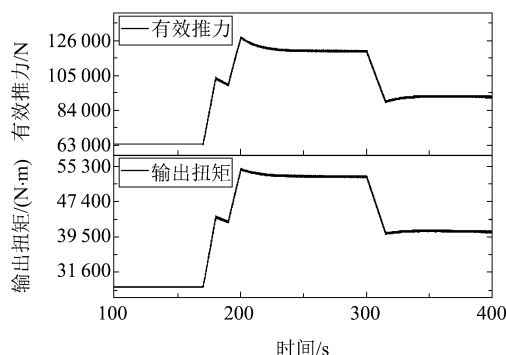


图13 螺旋桨有效推力-输出扭矩变化

由于采用减速齿轮箱带螺旋桨的推进方式,在船舶航行过程中,气体机按照推进特性曲线运行。以加速过程为例,当给定加速信号后,喷气压力升高,每循环消耗燃气量增大,气体机带动螺旋桨转速升高,此时推力上升,船体近似等效成一个很重的质量块,由于惯性,船舶存在一个加速度,但航速尚未增大,这导致推力达到最大值时推力大于船身阻力,为了达到稳定航速,螺旋桨推力将下降,最后与阻力相等。在上述过程中,船身有效功率增量始终滞后于主机功率的增量,在数值上,主机功率也会大于船身功率,主机功率与船身功率的变化如图14所示。

3.2 负荷突变工况仿真分析

LNG 动力船舶在航行过程中可能会出现螺旋桨部分出水,导致水阻力矩瞬间变小;或者螺旋桨缠绕网绳水草等导致水阻力矩瞬间增大的情况。外部载荷的变化会导致气体机遭受负载变化的冲击。

本研究中突变负荷为瞬态变化,在气体机稳定在75%负荷的状态下,转速稳定在 $915\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$,瞬间增加10%负荷,持续50 s,再瞬间降低20%负荷。设定好LNG推进系统模型边界条件,得到突变系统主要参数和性能指标随时间变化的曲线,如图15、16所示。

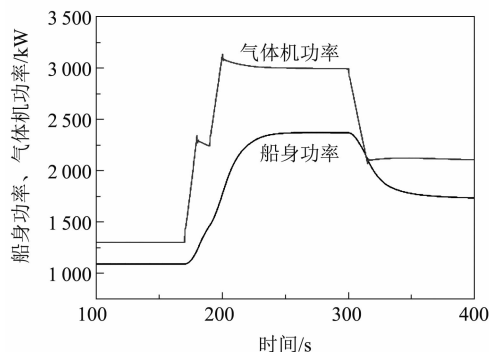


图14 功率对比

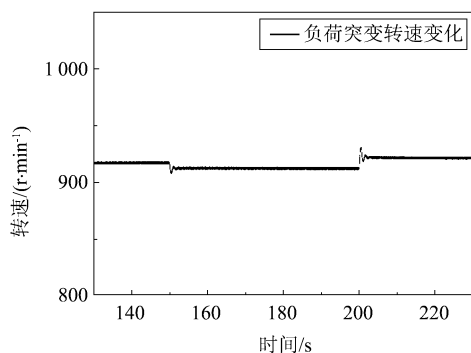


图15 负荷突变气体机转速

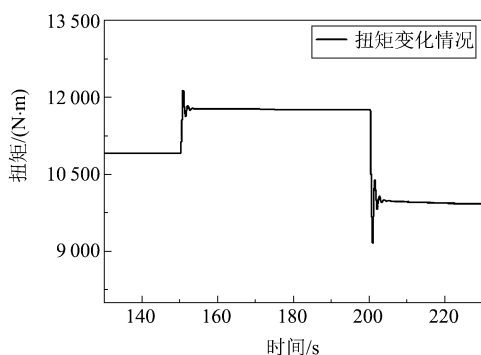


图16 负荷突变气体机扭矩

外部负荷突加,导致主机转速下降,调速装置根据实际转速和设定转速的偏差调节LNG喷射压力,使每循环进入缸内参与燃烧的燃气增加,以维持主机转速相对恒定。从扭矩变化图中可以看出:负荷从85%突卸至65%,波动相对剧烈,主机扭矩的超调量已经接近临界值,稳定时间满足要求。

负荷突变会导致气体机转速波动,但航速基本

不发生变化,如图17所示。主要原因是各旋转部件的转动惯量以及船体惯性使航速还未来得及变化,调速装置就已经使气体机转速保持恒定。

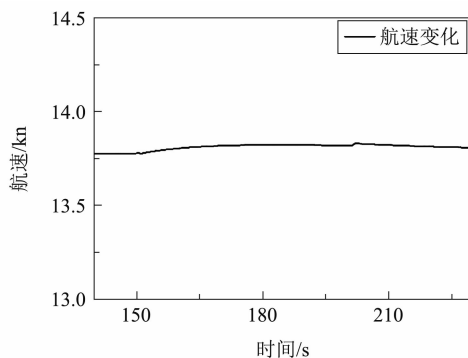


图17 负荷突变航速变化

4 总 结

本文应用AMESim仿真软件对某LNG动力工程船舶动态性能,主要是分级加速减速工况和负荷突变工况下的动态特性进行分析研究,得到以下结论:

(1) 船舶从前进一加速至前进三并保持航速稳定,此加速过程在100 s以内完成,前进三至前进二减速过程,稳定时间小于40 s。变速工况下气体机不会出现过载。

(2) 大负荷突变,虽然气体机转速可以在短时间内稳定到设定转速,但扭矩波动较大,因此要尽量避免大的负荷突变。

试验表明:在高功率下气体机爆震倾向更加明显,而气体机需要相对较稳定的运行条件,因此建议:稳定运行工况不要设置为100%负荷,而以部分负荷运行;在推进系统中可增加全工况液粘调速器,以减少负荷突变对气体机的冲击。

参考文献

- [1] 涂环,陈辉. 大型船舶柴油机推进系统建模与仿真[J]. 中国造船,2014(2):158-167.
- [2] 周晓洁,赵同宾,陈金涛,等. AMESim仿真技术在船舶推进系统中的应用研究[J]. 船舶工程,2009,31(6):28-31.
- [3] 张维竞. 舰船动力装置系统仿真[M]. 上海:上海交通大学出版社,2006.
- [4] 刘红编. 船舶原理[M]. 上海:上海交通大学出版社,2009.
- [5] MAFTEI C, MOREIRA L, SOARES C G. Simulation of the dynamics of a marine diesel engine [J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2009, 8(3): 29-43.