

基于 Simulink 的船舶推进系统仿真研究^{*}

刘世伟¹ 陈海洲²

(武汉交通职业学院, 湖北 武汉 430065)

摘 要:船舶推进系统仿真是分析和改进推进系统性能的重要方法。文章介绍 Matlab/Simulink 在系统建模、动态仿真和综合分析方面的使用, 基于 Simulink 核心组件, 建立船舶推进系统的仿真模型, 并对所建数学模型进行仿真分析。

关键词: Matlab/Simulink; 船舶推进系统; 船用柴油机

DOI: 10.3969/j.issn.1672-9846.2014.03.020

中图分类号: TK422

文献标志码: A

文章编号: 1672-9846(2014)03-0080-03

船舶推进系统的装置结构复杂, 加上航行时工况多变是一个涉及到众多方面的非线性系统。因而在其设计和优化的过程中, 常常需要反复的修改, 传统的设计与优化工作需耗费大量的人力物力, 且难以准确掌握其动态特性。随着计算机学科快速发展, 现代化的仿真技术在船舶动力工程方面的应用越来越广泛, 为船舶推进系统设计和改进的各个阶段提供了很大帮助, 如推进系统的性能分析、状态监测、稳态特性和动态特性分析等^[1]。本文利用 Matlab 的 Simulink 核心组件对船舶推进系统进行了模块化的建立, 对推进系统进行模拟仿真。研究推进系统的动态特性, 为深入了解推进系统的控制规律和相应参数优化提供了数据基础。

1 Matlab/Simulink 的应用

Simulink 集成软件包基于 Matlab 语言环境, 是 Matlab 软件功能的扩展。它将框图界面与交互仿真功能结合在一起, 相比于纯粹的数值模拟编写具有方便快捷、简单易用等特点。得益于 Simulink 的许多可视化的系统功能模块, 在建模时, 操作者只需了解每个模块的输入、输出以及模

块实现的功能。将创建的各个子模块连接起来就构成了最终所需要的整个系统模型(以 mdl 文件进行存取), 接下来就可以利用创建完成的整体模型进行仿真与分析。Simulink 能够根据要求处理多种多样的系统, 包括: 线性、非线性系统; 离散、连续及混合系统; 单任务、多任务离散事件系统等。Simulink 核心组件提供的是图形化的单元与模块, 用户不需要从最底层一步步编写程序代码, 通过软件界面上的 GUI 操作, 就可以创建出复杂的仿真模型进行分析。上述特性使得用户在使用 Simulink 时, 不需要将过多的精力放在代码编写上, 而是专注于完善模型的创建上面。这种利用简单的鼠标操作创建各个模块的方法, 使得花费在系统仿真研究上面的时间大大减少。

Simulink 采用分层式结构, 其中模块表现为方块式的图标形式。图形化的模块呈现形式使得繁琐的数据细节得以隐藏, 不再是 Matlab 软件冰冷的命令行, 使用环境显得更加亲切友好, 用户体验更加轻松。在模型创建方面, Simulink 不仅能够实现自上而下式的流程设计, 也能够实现自下而上的逆流程设计。在研究分析方面, Simulink

*收稿日期: 2014-04-28

作者简介: 刘世伟(1982-), 男, 黑龙江拜泉人, 武汉交通职业学院船舶与海洋工程学院讲师, 主要从事船舶动力系统研究。

陈海洲(1959-), 男, 湖北孝感人, 武汉交通职业学院船舶与海洋工程学院教师, 主要从事船舶动力系统研究。

创建的系统模型不单单是让用户了解各个环节的特性细节,也能够让用户清晰地了解各器件、各子系统、各系统间的信息交换,从而各部分之间的相互影响。除此之外,在 Simulink 进行仿真分析时,用户改变想要研究的参数,及时地观察系统对于此参数的动态响应。最后 Simulink 还能将分析计算结果保存在 Matlab 的工作空间中,借助 Matlab 语言所具有的众多分析功能、可视化优势和工具箱工具操作数据^[2]。

2 推进系统模型的建立

2.1 推进系统的组成

船舶推进系统是推动船舶正常航行的设备。主机通过将其他形式的能量转换为转动动力,带动螺旋桨等推进器产生推力,推动船舶克服航行时受到的阻力正常行驶。它是船舶动力装置中最根本的组成部分,其中包括:主机、传动装置、船舶轴系、推进器等^[3]。

2.2 推进系统的模块

通过对船舶推进系统研究,可将其整体模型划分为:柴油机模块、传动装置模块、螺旋桨模块和船舶的阻力模块等。根据船舶推进系统与船体相互之间的关系,推导出各个模块化的结构体系(以单机单桨柴油机推进系统为例)。各个参数之间满足公式(1)、(2)、(3)、(4):

$$T_E - R(V) = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

$$Q_s - Q_p = J \frac{d\omega_p}{dt} \quad (2)$$

$$Q_i = Q_D \times i - Q \quad (3)$$

$$n_p = n_s = n_r = n_D / i \quad (4)$$

式中: T_E 为推进器的有效推力; $R(V)$ 为船体的阻力; V 为航速; m 为船舶的总质量; Q_D 、 Q_s 、 Q_p 、 Q_i 分别为柴油机输出转矩、传递给螺旋桨的转矩、螺旋桨受到的阻力矩及轴系产生的摩擦力矩; J 是转动系统的惯性当量; i 为减速齿轮箱的减速比; n_p 、 n_D 分别为螺旋桨的转速和柴油机的转速。根据推进装置的基本工作原理,应用动量定理、能量守恒定律以及流体学理论,采用机理建模方法,可以建立系统的各个模块。以下以柴油机、传动装置、推进器模块的建立为例^[4]。

2.2.1 柴油机模块

柴油机模块又可划分为增压器模块、进排气模块、中冷器模块、柴油机本体模块等子模块。其

中各个模块的数学方法为:使用稳态特性曲线表示压气机模型;使用效率特性曲线和流量表示涡轮机模型;通过求解数值积分形式增压器动态特性力矩方程得到增压器的转速;根据冷却效率推导出中冷器的出口温度,结合增压空气的质量流量得出其压降。除了上述的增压器和中冷器模块外,利用理想气体状态方程、连续性方程和能量守恒方程,可以求解出进排气模块的压力、温度等参数。使用柴油机工作循环的平均参数,通过有效压力等效率数据得出扭矩、质量流量和出口参数等,进而表示气缸模块。采用上述方法完成柴油机模块的建立,列举其中模块公式如下^[5]:

(1) 增压器模块的数学公式为:

$$\frac{\pi}{30} I_k \frac{dN_k}{dt} = M_t - M_c \quad (5)$$

(2) 气缸容积变化所用公式为:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R_m}{VC_m} [\sum_{in} w(i) C_p(i) T(i) - \sum_{out} w(i) C_p(i) T(i) - K_w (T - T_w)] \quad (6)$$

(3) 本体模块中的气缸的空气流量公式为:

$$w = \frac{2}{S} \frac{N}{2\pi} V \eta_v \frac{P_1}{RT_1} \quad (7)$$

2.2.2 传动装置模块

离合器和减速齿轮箱组成传动装置。离合器的形式主要有摩擦式和液压式两种,减速齿轮箱则主要有普通减速式、并车减速式两种,根据具体的推进系统进行不同的数学建模。离合器模型建立时主要考虑结合状态、离合过程和分离状态三种情况,但是对于分离后的离合器应将推进系统划分为两个子系统进行处理。使用功率损失的方法可以建立减速齿轮箱模型,即 $N_{输入} \times \eta = N_{输出}$,从而推导出转矩、输入转速、输出转速之间的相互关系。

2.2.3 推进器模块

现在船舶常用的推进形式为螺旋桨推进,其中包括定距桨和可调桨两大类。但它们的推力与转矩都可以表示为公式(8)、(9)。

$$T_p = K_t \cdot \rho \cdot n_p^2 \cdot D^4 \quad (8)$$

$$Q_p = K_q \cdot \rho \cdot n_p^3 \cdot D^5 \quad (9)$$

式中, K_t 、 K_q 分别为螺旋桨推力系数、转矩系数; ρ 为海水的密度; D 为螺旋桨的直径。 K_t 、 K_q 与螺旋桨的进速系数 J 和桨叶的旋转角度 θ 有关,它们可通过螺旋桨的产敞水特性曲线找出。

螺旋桨工作时,因为船体的影响,产生推力减

额和伴流现象。螺旋桨的有效推力和桨的进速的公式如下:

$$T_e = T_p(1 - t) \quad (10)$$

$$V_p = V_s(1 - w) \quad (11)$$

式中 V_s 为船速, 伴流系数 w 和推力减额系数 t 可由试验数据及经验公式获得。

因此, 轴系运动方程为:

$$\frac{\pi}{30}(I_e + I_L) \frac{dN_d}{dt} = M_e - \frac{1}{ij} M_p - M_f \quad (12)$$

式中 N_d 为柴油机转速; I_e 为柴油机及到偶合器输入轴的转动惯量; I_L 为负载(偶合器输出轴、轴系到螺旋桨等)的当量转动惯量; M_e 为柴油机有效扭矩; i 为齿轮箱减速比; j 为每轴柴油机工作台数; M_p 为螺旋桨扭矩; M_f 为传动轴系及机组的摩擦扭矩。

船体直线运动方程为:

$$k_w m \frac{dV_s}{dt} = Z \cdot T_e - R_s \quad (13)$$

式中 m 为船体直线运动质量; k_w 为附水系数; Z 为同时工作的螺旋桨数; R_s 为船体阻力。

其余部分的模块参考以上几个模块的创建过程, 最后在 Simulink 里面完成的推进系统仿真的模型如图 1 所示。

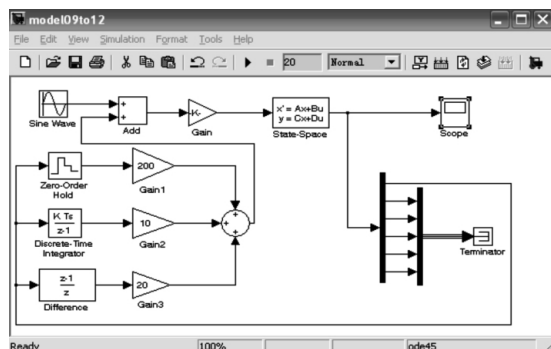


图 1 推进系统的仿真模型

3 推进系统模型的仿真分析

当转速变化曲线是无震荡或者衰减过程时才能够实现推进系统的动态稳定。通过对相关参数的优化改进, 最终实现推进系统的稳定运转。此外本文对调速器的调速率要求稳定在 30% 左右, 其峰值变化不超过 5%, 为此可通过调整对调速有影响的各个参数实现。

进而对该型船舶推进系统的单机单桨、双机双桨以及三机三桨等工作状况进行了稳态仿真, 计算出不同转速时对应的船舶航速, 并将得出的数据与实际测得的数据进行比较。从图 2 可以看

出, 所创建推进系统模型的仿真结果与实际航行时的航速转速对应结果基本相同, 其稳态误差经过计算 4% 以内^[6]。因此, 该型船舶推进系统的仿真模型符合要求。产生误差的原因一方面是与实际航行时的海况不同, 本文推进系统的仿真是在标准海况下进行模拟的; 另一方面是对推进系统进行仿真时船舶排水量存在一定差别。

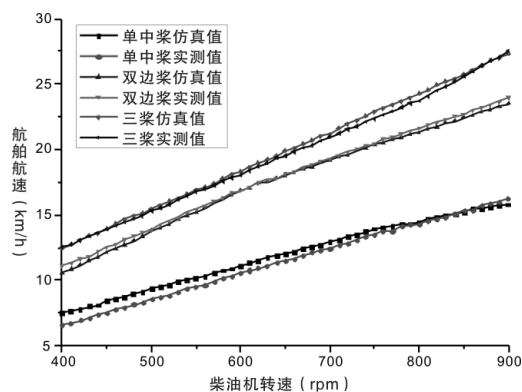


图 2 航速的稳态仿真结果和实测值的比较

4 结论

本文基于 Matlab 的 Simulink 核心组件, 研究和建立了某型船舶推进系统的仿真模型。根据相关原理, 构建了推进系统的各个模块的准确的数学模型。对其稳态性能进行仿真分析, 实测值和仿真值对比结果表明本文模型建立的方法正确, 该方法对船舶推进系统的性能研究及运行控制极具价值。除此之外, 本文建立的模型还可以用在新型船舶推进系统的性能预测工作上面, 利用仿真结果进行推进系统的性能分析和优化设计, 可以及时根据模型仿真结果修改相关参数和模型, 相较传统方法更加直观。

参考文献:

- [1] 隋琳, 张维竞. CODAD 推进系统准稳态建模方法及运行性能分析[J]. 船舶工程, 2004, (1): 34-36.
- [2] 杨高波, 简清华. 基于 Matlab Simulink 的仿真方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2000, (4): 59-62.
- [3] 杨承参, 施润华. 船舶动力装置[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 67.
- [4] 朱小平. 舰船主推进系统的建模理论、控制策略及优化设计[D]. 上海: 上海同济大学, 2007.
- [5] 龚金科, 刘梦祥, 刘湘玲, 谭凯, 周立迎. 用 Simulink 实现柴油机的建模与仿真[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, (4): 38-41.
- [6] 吴小平, 杨松林, 奚炜. 翼滑艇智能推进系统仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2004, (4): 19-22.