

A Summary of Simulation Model in Ship's Power System

Shuhua Yang^{1,2}, Qianchao Liang¹, Yufei Jiao²

¹Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

²The Equipment Department of Naval, Ningbo Zhejiang

Email: lqc163cc@163.com

Received: Apr. 2nd, 2017; accepted: May 15th, 2017; published: May 18th, 2017

Abstract

In this paper, the simulation model of ship's power system is studied. And the complexity of simulation design in ship's power system is discussed. A simulation model of the ship's power system include the model of a turbocharged diesel engine, gas turbine, combined power system and the application in ship's equipment.

Keywords

Diesel Engine, Gas Turbine, Simulation Model

船舶动力系统仿真模型综述

杨叔华^{1,2}, 梁前超¹, 焦宇飞²

¹海军工程大学, 湖北 武汉

²浙江宁波某装备部, 浙江 宁波

Email: lqc163cc@163.com

收稿日期: 2017年4月2日; 录用日期: 2017年5月15日; 发布日期: 2017年5月18日

摘要

本文研究了各种船舶动力系统仿真模型问题, 讨论了船舶动力装置系统仿真设计的复杂性。船舶动力系统仿真模型包括涡轮增压柴油机仿真系统模型、燃气轮机仿真系统模型、联合动力系统模型及它们在船舶动力装置中的应用。

关键词

柴油机, 燃气轮机, 仿真模型

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

船舶动力装置系统设计的复杂性和难度很大, 船舶动力系统仿真模型包括涡轮增压柴油机仿真系统模型、燃气轮机仿真系统模型、联合动力系统模型[1]。涡轮增压柴油机的系统模型从功能区分来看不仅包括气体流动和燃烧模型, 还包含有喷雾、燃烧、排放等其他模型, 从建模空间分可以分为一维模型和三维模型等等。需要注意的是, 建模方法的选择与模型的应用场合有密切的关系。一般来说, 在模型的复杂程度和精度间需要进行权衡, 而且模型的精度也取决于能够获得的数据以及进行模型构建的条件。举例来讲, 对于涡轮增压柴油机建模来说, 用于发动机设计和性能预测的模型与用于发动机动态过程控制的模型之间存在一定的差别, 后者通常是前者在不同程序上的简化。

2. 涡轮增压柴油机系统模型

船舶动力系统仿真中建模是工作的重要一环。一般来讲建模方法分为准稳态法、容积法和压力波动作用法, 而应用计算机建模或模拟计算已有近三十年多年, 额定工况下涡轮增压柴油机的稳态性计算、变工况稳态性能、动态性能计算等。研究表明计算机模拟不仅仅能够预测柴油机的性能、节省大量人力物力和财力、缩短计算仿真周期, 还可以相对于实际的动力试验得到更多的信息。

(1) 简单可靠的方法之一是准稳态方法

准稳态法不涉及动力机械内部构件的详细过程, 部件工作特征由输入和输出量表达, 可以由根据实验获得或经验公式计算得来。一般部件在发动机中处于非稳态下时很难得到精确理论计算模型, 但可以有多个稳态过程组成, 所以部件模型往往由它们的稳态实验数据来表示。因此, 实验通常在稳态工况下进行, 各个部件模型由相同的质量流率和压力连接起来, 由此来构成系统的模型, 部件间不允许产生质量聚集即管道容积可以忽略。在瞬态性能模型中, 转速变化由一阶常微分程表示, 其它方程都是代数方程, 所以称为准稳态模型。例如 MTU16V396 型涡轮增压柴油机准稳态模型由它的稳态实验数据表示、采用 8 缸共用一根排气管的脉冲增压系统建起换气模型和废气倒灌模型, 柴油机准稳态模型的仿真模型库见图 1 所示。

国内外用于涡轮增压柴油机仿真的通用软件很多。例如: MATLAB、CFD 等等[1] [2], 专用仿真软件国内外报道也非常多[3] [4]。例如, 文献 4 作者给出了公司 MTU16V396 型涡轮增压柴油机的专用仿真软件 MTU2000, 可以比较准确地模拟了 MTU16V396 型柴油机的性能在特殊工况下的变化规律, 模拟精度在 5% 以内(见文献 4 仿真精度误差表格), 满足了工程上对模拟计算精度的要求。该专用仿真软件还适用于 MTU16V396 型柴油机在特殊工况下的性能预测[4]。

(2) 方法之二是容积法

容积法是用有限容积来表示柴油机本体和增压器之间的管道以及气缸容积。又称为充排方法。因为在管道中可以聚集质量, 部件之间不再由相等的质量流率连接。系统的模型使用一组一阶微分方程组来

近几年来各种建模方法层出不穷。再比如键合图建模技术，它是一种用于表示存在着各种能量形式的子系统之间相互关系的统一标准图形符号，最初出现在 60 年代；神经网络仿真技术，它是一个由神经单元构成并采用神经网络技术的并行分布式信息处理结构，其研究也是始于 60 年代；模块化建模技术，1977 年 M. H. Ghaemi 给出了舰船推进装置主要部分的模型，包括发动机、螺旋桨、传动轴、调速器、减速齿轮箱和螺距控制器(在调距桨情况下)，用户可以根据需要任意组合；面向对象仿真建模，NASA 研究中心自 1991 年起在 NPSS(Numerical Propulsion System Simulator)及其各子计划中系统地进行了面向对象方法的研究和实践，如今面向对象建模方法的研究极为活跃，这是一个有战略意义的发展方向。

3. 燃气轮机系统模型

燃气轮机的物理模型有很多型式，当前在船舶上应用得最多的是单转子分轴式(构成燃气发生器的是一根轴，带动螺旋桨的是与燃气发生器分开的另一根轴)和双转子分轴式(构成燃气发生器的有两根轴：低压轴和高压轴，带动螺旋桨的是与燃气发生器分开的另一根轴即动力涡轮轴)。但是无论是何种型式，均是由压气机、燃烧室、涡轮和轴等基本模块所组成，因此只要将这些基本部件模块化以后就可以组合成想要的任何型式的燃机[2]。

国内外燃气轮机的数学模型近些年发展非常迅速，根据研究对象中存在的物理现象，建立数学模型，并转换为计算机可以理解的形式，采用面向对象的模块化建模方法，建立通用的燃气轮机仿真模型，将燃气轮机整体划分为压气机、燃烧室、涡轮、转子和容积环节等模块。燃气轮机数学模型一般来讲它是一个多输入多输出、非线性、连续、复杂的系统。国外早在 20 世纪 70 年代早期，美国海军就启动了燃气轮机舰船推进控制系统研究和开发计划，并选择 PD 公司来承担计划的实施，美国 GE 公司针对舰艇燃气轮机的多输入多输出、非线性、连续、复杂的系统，提出 LM2500 燃气轮机的数学模型采用片断线性化的方法。具体方法是根据该发动机的精细模型，将表达动态特性的函数按线数据展开后，忽略高阶偏导数，保留稳态特性和一阶偏导数。在提供的模型中，压气机的出口压力、燃气发生器涡轮出口压力、动力涡轮输出扭矩、燃气发生器的不平衡扭矩的稳态特性和偏导数都表示为燃油流量、燃气发生器转速、动力涡轮转速的表格函数。由于忽略了高阶偏导数，模型对于发动机变量在小范围内偏离特性是有效的，一般称为小偏差方法。

国内针对燃气轮机舰船推进及控制系统研究有清华大学、上海交通大学、哈尔滨工程大学、海军工程大学等单位。例如燃气轮机 GT25000 为双转子分轴式燃气轮机，即三轴燃气轮机，它的工作特点和燃气轮机的数学模型也非常复杂。三轴燃气轮机动力装置由高压、低压两个转子构成的双转子燃气发生器、动力涡轮及轴系等组成，GT25000 燃气轮机通常是由高压涡轮带动高压压气机，低压涡轮带动低压压气机，而动力涡轮则带动发电机或其它负荷。对于该系统仿真而言，它也是一个多输入多输出的复杂非线性连续系统[5]。燃气轮机压气机的出口压力、燃气发生器涡轮出口压力、动力涡轮输出扭矩、燃气发生器的不平衡扭矩的稳态特性和偏导数都表示为燃油流量、燃气发生器转速、动力涡轮转速的表格函数建模，然后进行数学仿真。

燃气轮机的控制模型一般是根据系统的控制特性和控制要求进行建模和仿真。燃气轮机的控制能够根据单一手柄的指令信号运行，在稳态和各种机动过程的不同阶段自动选用最合适的控制策略以实现良好的稳、动态匹配。舰船燃气轮机采用了比较复杂的控制策略，包括对轴转速的闭环控制和对螺距的闭环控制甚至对扭矩进行闭环控制，典型燃气轮机控制系统单一手柄仿真模型库见图 2 所示。

在对燃气轮机的混合实时仿真中，可将燃气轮机动态系统分解为与时间相关和无关的两个系统，对时间无关子系统进行离线预处理，使在线运算量大大降低，达到实时仿真要求。对于较复杂的三轴燃气

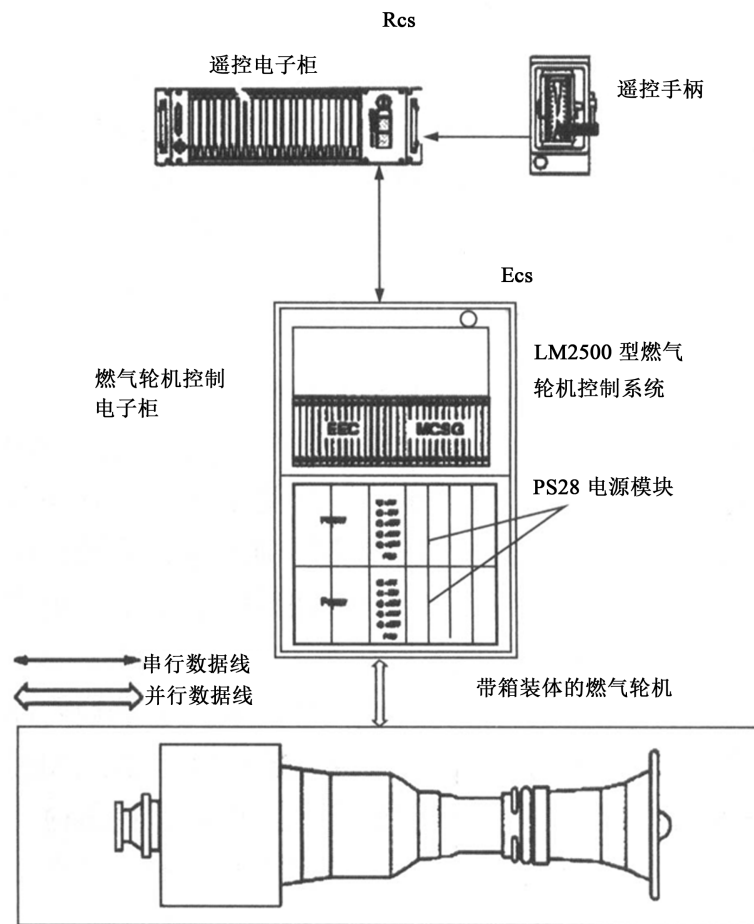


Figure 2. The simulation model of gas turbine engine in the remote control system
图 2. 燃气轮机遥控系统仿真模型

轮机，提出了一个分析动态过程的参考曲面——准动态运行面的概念，并建立了准非线性混合实时燃气轮机动态系统仿真模型。

舰船燃气轮机动力装置的仿真应用国内起步更晚但进展甚快，在较短的时间内便完成了理论研究向实用化的过渡。经过十多年的研究，上海交通大学、海军论证中心、海军工程大学、海军舰艇学院、船总七院、系统工程部等单位都相继从不同侧面和角度开展了研究，使燃气轮机动力装置各部分模型均已建立且实用。先后在舰船燃气轮机本体、控制系统设计、作战效能评估等方面的仿真应用研究取得了较大的成果，都已接近或达到国外九十年代同期的先进水平、军事经济效益日趋显著[6]。同时，国内在神经网络技术、虚拟现实技术 VR、面向对象技术等舰船燃气轮机动力装置仿真中的应用也取得了一定的成就。然而这些仿真模型尚未完善，仿真精确度和仿真运算速度有待于进一步的提高，否则难以适应当代燃气轮机动力装置在应用广度和深度上的迅猛发展。

4. 船舶动力装置系统仿真应用

4.1. 船舶动力装置系统

动力装置中的推进系统可能采用不同的推进方法和传动方式，基本组成有很大的差别，但都可以概括为三大件：发动机、传动装置、推进器。传动装置一般包括齿轮箱装置、离合器装置和联轴节等。弹

性联轴节可以改变轴系的振动特性, 隔离柴油机输出的脉动扭矩对传动齿轮的作用, 并在一定范围内用以补偿轴系的对中误差。现代舰船中常用的离合器有摩擦离合器、液力偶合器和 SSS 同步离合器, 其主要功能包括: 用以实现主动轴与从动轴的接合或分离, 便于发动机空载启动或空车运转; 与齿轮箱一起组成倒顺车或双(多)速离合器, 改变从动轴的转向转速; 与齿轮箱组成并车装置, 构成多发动机的功率合并或交替使用; 也可以用以实现发动机的一机多用。动力装置中的推进系统仿真模型可以处理成为数学模式的二阶或三阶系统模型; 也可以通过某些简化处理变为一阶系统。主要取决于舰船系统计算分析中要求的系统精度和计算机的速度等等。

4.2. 船舶联合动力装置

在船舶联合动力装置中, 加速机和巡航机之间切换或并车时, 要求拟投入运行的轴运速十分接近正在运行轴的转速时, 才能将两根轴连接起来。自动同步离合器是达到这一要求的传动装置部件, 目前应用较多的是带有棘齿同步机的自动同步离合器。在已进行的联合动力装置仿真中, 通常是忽略自动同步离合器的动态啮合和脱离过程, 用逻辑表达式处理啮合前后轴转速的变化。国内苏文斗对自动同步离合器的动力学问题进行了详细的分析。国内苏文斗对自动同步离合器的动力学问题进行了详细的分析, 并给出了棘爪和棘轮、螺旋齿花键、轴承等元件的啮合时的动负荷计算公式。哈尔滨工业大学建立了专门的柴燃交替动力装置并车装置试验台, 以评价冲击扭矩、相对冲击、同步时间、切换过程总时间、过调转速、最大相对角速度等特征参数对动力装置的安全性和舰船机动性的影响。由于重点在切换过程的实验研究, 对于发动机的模型作了较大程度简化, 模型计算方法也有待完善。上海交通大学也在进行柴一柴并车试验台的建设, 采用液力传动吸收扭振并改善柴油机的负荷特性, 现在主要在柴油机动力装置中使用。倪军曾经根据国外的资料对舰用燃气轮机倒顺车液力传动进行了方案论证, 进行结构和模型试验。仿真模型可以处理成为数学模式的二阶或三阶系统模型。

4.3. 船舶动力装置元件

目前在船舶上使用的推进器以螺旋桨为主[5]。螺旋桨的性能曲线可以通过理论计算获得, 也可以用试验方法获得, 后者是工程实践中大量采用的一种方法。位于船后的螺旋桨与水流的相对速度不完全等于船速, 而且在螺旋桨的各处也是不均匀的; 同时, 螺旋桨在船后工作, 引起附近的流场变化, 导致舰体阻力发生变化。船体对螺旋桨的影响用伴流系数来表达, 伴流系数是伴流速度与船速的比值, 一般来说不是定值, 随船速变化而变, 而且与船型有关, 所以需要通过船模试验得到相应数据。螺旋桨在船尾工作时, 由于抽吸作用, 使船体阻力增加, 等效于推力损失, 用推力减额系数表示, 它与船型、螺旋桨尺寸、螺旋桨与船体的相对位置等有关, 可由船模自航试验或实船试验来确定。仿真模型可以处理成为数学模式的二阶或三阶系统模型; 也可以通过某些简化处理变为一阶系统。主要取决于计算分析中要求的系统精度和计算机的速度等等。

普通螺旋桨的桨叶与轴毂是固定连接的, 因而其螺距是固定不变的。而可调螺旋桨的桨叶可以绕某一垂直螺旋桨轴线转动而改变螺距, 其作用相当于一组不同螺距比的普通螺旋桨, 为舰船的推进、机动等带来一系列的好处。调距桨的变距机构可以采用人工、电动或液压控制, 现在大型调距桨多采用液压控制。在瞬态工况下, 变距系统的动态性能影响整个动力装置的动态性能。如果考虑变距机构的质量惯性, 变距系统的仿真模型可以成为二阶系统模型; 否则可以处理为一阶系统。

4.4. 先进的 COGAG 动力装置控制系统

现代船舶动力装置的控制系統能够根据单一手柄指令 PLA 实现良好的稳、动态匹配, 包括对轴转速

的闭环控制和对螺距的闭环控制, 甚至对扭矩进行闭环控制[6]。由于各个回路之间存在交叉耦合会出现各种问题。例如高速回转舰艇的轴转速闭环控制会产生传动装置的超扭; 低工况运行时螺距闭环控制使螺距达到最大而引起轴转速过小等。为了避免这些问题, 随后的控制系统采用开环控制和速度限制的控制策略。解决了安全性问题但牺牲了机动性能。Kidd 等人开发了 COGAG 动力装置的多变量闭环控制器, 设计出的控制器与非线性仿真模型连接, 调整 PID 控制器的参数, 并观察非线性系统响应的变化, 得到最终的控制设计。仿真模型可以处理成为数学模式的二阶或三阶非线性系统模型取决于舰船系统要求的精度和速度等等。

5. 结论

本文讨论了涡轮增压柴油机气体流动建模方法可以分为准稳态法、容积法和波动作用法。用于发动机动态过程控制的气体流动模型主要是准稳态模型和容积法模型, 特征线法用于动态过程计算的情况很少见。最后讨论了舰船动力装置系统仿真模型包括涡轮增压柴油机仿真系统模型、燃气轮机仿真系统模型、系统元器件复杂仿真模型以及它们在船舶动力装置中的应用。

参考文献 (References)

- [1] 康凤举. 舰船仿真技术发展综述[J]. 舰船电子工程, 2004, 24(1): 9-11.
- [2] 刘永文. 基于通用平台的系统建模和半物理仿真及其在舰船动力装置中的应用[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [3] 陈华清, 敖晨阳. 舰船推进系统仿真中的柴油机数学模型[J]. 船舶工程, 2000(5): 33-37.
- [4] 向军, 许光, 杨叔华, 梁前超. 涡轮增压柴油机修后试验及性能仿真[J]. 内燃机与配件, 2016(10): 92-94.
- [5] Ding, J.M., Wang, Y.S., Ao, C.Y., *et al.* (2014) Mathematical Modeling and Simulation of Maneuvering for Waterjet-Propelled Catamarans. *International Conference of Waterjet Propulsion 4*, London, The Royal Institution of Naval Architects, 1-7.
- [6] 廖瑛, 梁加红, 姚新宇, 等. 实时仿真理论与支撑技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: dsc@hanspub.org