

基于数模混合模拟的船舶柴油机调速特性模拟

张安明¹, 马天帅², 刘华龙¹

(1. 海军驻大连 426 厂军事代表室, 辽宁 大连 116005; 2. 海军驻七一一研究所军事代表室, 上海 201108)

摘 要: 采用数模混合模拟的方法建立了一种柴油机调速模拟系统。试验验证表明: 该模拟系统的瞬态调速率和稳定时间相对误差均小于 5%, 模拟效果较好, 可以反映实际柴油机调速系统的动态过程; 满足船舶电力系统设计、研制和维修的需要。

关键词: 船舶柴油机; 调速特性; 数模混合; 模拟

中图分类号: TK424.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)06-0021-03

Simulation for Speed Regulating Characteristics of Marine Diesel Engine Based on Analogue-digital Hybrid Method

Zhang Anming¹, Ma Tianshuai², Liu Hualong¹

(1. Naval Deputy Office of No. 426 Factory, Liaoning Dalian 116005;

2. Naval Deputy Office of Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: A speed regulating simulation system was built based on analogue-digital hybrid method. Experiments verified that the relative error of the transient speed regulating rate and stabilization time was within 5%, which means the simulation effect was good and could reflect the dynamic process of actual diesel engine's speed regulating system. It could satisfy the requirements of design, development, manufacturing and maintenance.

Keywords: marine diesel engine; speed regulating characteristic; analogue-digital hybrid method; simulation

0 引 言

在船舶设计、研究过程中, 为保证电力系统稳定, 往往采取试验的方式对柴油发电机组调速特性进行分析。由于实船试验受条件限制难以实现, 本文提出采用数模混合模拟的方法建立模拟系统, 实现对柴油机调速特性的准确模拟。

1 数模混合模拟系统的设计

柴油机发电机组的运动方程按照达朗贝尔原理可以写成^[1]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_l - T_f \quad (1)$$

式(1)中, J 为柴油机发电机组的转动惯量, ω 为柴油机发电机组的角速度, T_m 为柴油机机械驱动转矩, T_l 为柴油机负载转矩, T_f 为柴油机发电机组空载损耗转矩。

由式(1)可知, 柴油发电机转速变化的动态过程由 T_m 、 T_l 、 T_f 和 J 确定。通常, 空载损耗转矩 T_f 可以忽略, 负载转矩 T_l 为设计、研究中使用的实际负载, 不需要模拟。因此, 按照数模混合模拟的思想, 由变频器驱动异步电动机构成交流调速系统实现柴油机的物理功能; 驱动转矩由数字仿真计算机实时计算得到; 由于模拟系统转动惯量与实际系统不一致, 也需要补偿。为了具备无级补偿能力, 按照转速特性一致的原则, 通过施加转动惯量

补偿转矩的方式实现。模拟系统构成如图 1 所示。

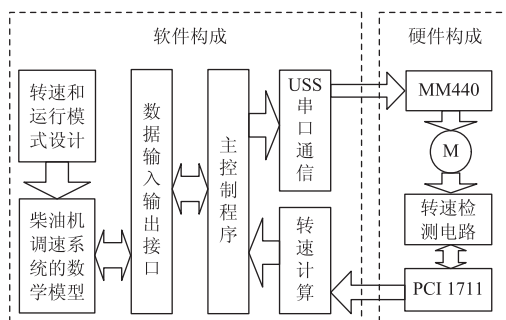


图 1 模拟系统原理框图

2 系统的数学模拟

2.1 数学模型的建立

对于船舶电站研究，仅关心柴油机的外部转矩特性，忽略柴油机内部热力过程，认为：驱动转矩 T_m 由燃油泵喷油量 Δg (调速系统输出轴位移 L) 和转速 n_1 决定，而且二者是相互解耦的，即：

$$T_m = f_1(L, n_1) \quad (2)$$

对于同一转速，驱动转矩 T_m 与调速器输出轴位移 L 为直线关系：

$$T_m = T_m^* - \frac{T_m^*}{L_e} L \quad (3)$$

式中， T_m^* 为柴油机额定供油时的转矩， L_e 为调速器最大输出轴位移。

通常柴油机的速度特性平坦，具有非线性特征。采用分段线性化的方法，将额定转矩的速度特性分成 n 段，用 n 个线性线段来逼近速度特性^[2]，每一分段的转矩可以写成：

$$T_{mi} = k_i n + b_i \quad (4)$$

式中， $i=1, 2, \dots, n$ ，对于各个分段， k_i 、 b_i 取不同的数值。

综合柴油机的速度特性与调整特性，考虑柴油机的转矩输出延迟 $e^{-\tau_{0d}s}$ [3-5]，可得柴油机驱动转矩 T_m 的表达式为：

$$T_{mi} = (k_i n + b_i - aL) e^{-\tau_{0d}s} \quad (5)$$

式中， $i=1, 2, \dots, n$ ， τ_{0d} 为柴油机的转矩延迟时间。

调速系统的数学模型^[6] 由传感器 $G_1(s) = K_s$ ，控制器 $G_2(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_{is}} + T_{rd}s)$ 和执行器 $G_3(s) =$

$\frac{K_a}{1 + T_a s}$ 构成。

转动惯量补偿转矩按照模型参考自适应方式^[7] 实现：

$$J\Delta T''_i(t) + k_{cp}\Delta T'_i(t) + k_{ci}\Delta T_i(t) = -\Delta J[k_{cp}\omega''(t) + k_{ci}\omega'(t)] \quad (6)$$

式中， ΔJ 为模拟系统转动惯量与实际系统转动惯量之差， $\omega(t)$ 为模拟系统的角速度， $\Delta T_i(t)$ 为转动惯量补偿转矩， k_{cp} 和 k_{ci} 分别为转动惯量补偿环节的比例和积分系数。

2.2 数值算法的选择

模拟系统实时仿真要求仿真时钟与实际时钟完全一致，对数值积分算法具有确定性、快速性和计算执行中数据的可取性要求^[8,9]。显式、单步、定步长、低阶的 Euler 法 $y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n)$ ，是关于 y_{n+1} 的一个直接计算公式，公式简单，运算量小，求解速度快，每一步的运算时间固定；同时每次计算只用到前一步 y_n 的信息，保证了数值解法中数据的可取性。因此，模拟系统的数值算法采用 Euler 法进行。

2.3 数值算法的稳定性分析

采用数值方法对柴油机及调速系统的数学模型进行求解，必须考虑数值算法的稳定性问题。通常，转动惯量补偿环节的时间常数远小于柴油机调速系统的时间常数。当快变过程的转动惯量补偿环节数值算法稳定，则柴油机调速系统数学模型的计算也是数值稳定的。因此，只需由转动惯量补偿环节数值算法的稳定条件确定整个模拟系统的数值算法稳定域。

由方程(6)，可得到其 Jacobi 矩阵：

$$J_a = \left(\frac{\partial f_i}{\partial \Delta T_{ij}} \right)_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{ci}}{J} & -\frac{k_{cp}}{J} \end{bmatrix} \quad (7)$$

当 $k_{cp} \geq 2\sqrt{k_{ci}J}$ 时，其特征值为 $\lambda = \frac{-k_{cp} \pm \sqrt{k_{cp}^2 - 4k_{ci}J}}{2J}$ ，只要计算步长 $0 < h < \frac{4J}{\sqrt{k_{cp}^2 - 4k_{ci}J}}$ ，

就可以保证转动惯量补偿环节数学模型数值算法的绝对稳定。当 $k_{cp} < 2\sqrt{k_{ci}J}$ 时，其特征值为 $\lambda = re^{\pm i\theta}$ ，

其中 $r = \frac{\sqrt{2k_{cp}^2 - 4k_{ci}J}}{k_{cp}}$ ， $\theta = \pi - \arctg \frac{\sqrt{k_{cp}^2 - 4k_{ci}J}}{k_{cp}}$ ，只要

计算步长 $0 < h < \frac{-2\cos\theta}{r}$ ，就可以保证转动惯量补偿环节数学模型数值算法的绝对稳定。

3 系统的物理功能模拟

由于在数字模拟部分已经考虑了转动惯量补偿，因此模拟系统物理功能模拟装置只要由转速检测电路、变频器和异步电动机组成的交流调速系统

等设备构成，使模拟系统硬件变得非常简单。

3.1 转速检测装置

转速检测装置由光电编码器、数据采集卡和转速检测电路等组成，用于实现模拟系统中转速信号的检测，为数字仿真计算机实时仿真计算提供输入信号。

光电编码器采用 Omron 公司的 E6B2-CWZ3E 光电编码器，编码器每旋转一圈发出 600 个 TTL 电平的脉冲信号。

数据采集卡选用研华公司的 PCI1711 多功能采集卡，该采集卡采用一个 Intel 82C54 可编程定时/计数芯片，可以提供 16 位的事件触发计数器。

转速检测电路由时基脉冲频率为 20 MHz 的 T 法测速电路实现，测速电路如图 2 所示。该测速电路具有较高精度，最大测速误差小于 1 (r·min⁻¹)。

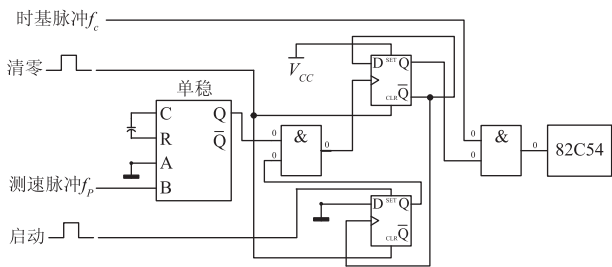


图 2 转速检测电路

3.2 交流调速系统

交流调速系统按照数学模拟的结果输出转矩，主要由交流电机和变频器组成，变频器按照数字仿真计算机实时运算得到的指令驱动交流电机。

交流电机采用 15 kW 的三相鼠笼异步电动机。变频器采用 Siemens MicroMaster440 变频器，它是以绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 作为功率输出器件的全新一代多功能标准变频器，由高性能微处理器控制，采用矢量控制技术，可以实时接收并精确实现数字仿真计算机实时发送的转矩指令。

4 试验验证

采用模拟系统对四倍于模拟系统转动惯量的柴油发电机组调速特性进行模拟，按照 0→60% P_N→100% P_N (P_N 为柴油机发电机组的额定功率) 的方式施加有功负载，实测得到模拟系统的动态特性曲线如图 3 所示。

图 3 中，负载突变后，模拟系统的转速按照实际柴油机调速系统的特性，经短暂的波动后快速恢复到稳定状态。运算得到反映柴油机调速系统动态性能的瞬态调速率和稳定时间如表 1 所示。

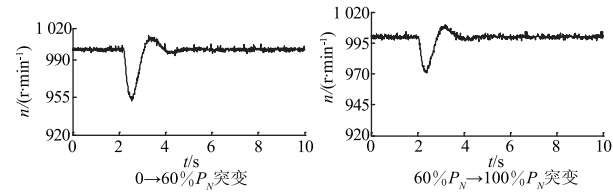


图 3 模拟系统动态性能试验曲线

表 1 模拟系统系统的动态特性

负荷	瞬态调速率		稳定时间/s	
	实际系统	模拟系统	实际系统	模拟系统
0→60%	4.28%	4.39%	1.61	1.59
60%→100%	2.85%	2.85%	1.53	1.43

表 1 中，模拟系统的瞬态调速率和稳定时间相对误差均小于 5%，模拟效果较好，基本上可以反映出实际柴油机调速系统的动态过程。

5 总 结

采用数模混合模拟的方式对船舶柴油发电机组调速特性进行模拟，模拟系统具有响应速度快，建模灵活方便的特点。该模拟系统已经作为研究平台，成功应用于某新型船舶电力系统的研究与设计当中。

参考文献

[1] 邵家骧. 发动机转速自动控制[M]. 北京:人民交通出版社,1990. 146-147.

[2] 黄曼磊,唐嘉亨,郭镇明. 柴油机及调速系统的数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报,1997,18(6):20-25.

[3] Roy S, Malik O P, Hope G S. Adaptive control of speed and equivalence ratio dynamics of a diesel driven power-plant [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993. 13-19.

[4] Roy S, Malik O P, Hope G S. An adaptive control scheme for speed control of diesel driven power-plants[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991. 605-611.

[5] Hassan I D, Weronick R, Bucci R M, et al. Evaluating the transient performance of standby diesel-generator units by simulation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992. 470-477.

[6] 滕万庆. 柴油机调速新技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2000. 159-221.

[7] 张安明,柴建云,王善铭. 电力系统动态模拟中发电机组转动惯量的补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006 ,46(10):1661-1664.

[8] 刘德贵,朱珍民. 实时仿真算法的研究进展. 系统仿真学报[J],2001,13(1):60-63.

[9] 刘德贵,费景高. 动力学系统数字仿真算法[M]. 北京:科学出版社,2000.