

基于 Simulink 柴油发电机组工作性能仿真

刘常峰, 陈 瑾, 赵同宾, 曾宪友

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 基于 Simulink 仿真平台, 采用变步长算法建立柴油发电机组仿真模型, 进行柴油发电机组在高排气背压、高进气真空条件下稳态、瞬态工作过程的系统仿真, 并与试验数据进行对比, 证明了模型具有较高的仿真精度, 最后利用该仿真模型研究了排气背压、进气真空度对机组性能的影响。

关键词: Simulink; 柴油发电机组; 系统仿真

中图分类号: TK421.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)06-0015-05

Simulation in Working Performance of Diesel Generator Set Based on Simulink

Liu Changfeng, Chen Jin, Zhao Tongbin, Zeng Xianyou

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The simulation model of a diesel generator set was built up with variable-step computing method based on Simulink, the system simulation of steady and dynamic process with high exhaust back pressure and high intake vacuum was completed. The result was compared with the experiment data, proving that the simulation model has high precision. Then the model was used to study the influence of exhaust back pressure and intake vacuum on the performance of diesel generator set.

Keywords: Simulink; diesel generator set; system simulation

1 前 言

柴油发电机组的系统仿真相比于试验研究, 具有成本较低、危险性小、灵活性强以及不受工作条件限制的特点, 并且随着仿真技术与仿真理论不断发展, 仿真研究越来越多地应用于柴油发电机组的研究当中。

本文基于 Matlab/Simulink 仿真平台建立了柴油发电机组的非线性仿真模型, 进行了高排气背压、高进气真空条件下不同负载稳态工况以及负载突加、突卸时瞬态工况的仿真计算, 并将仿真结果与试验结果进行对比, 验证了机组仿真模型的正确性, 最后利用该仿真模型研究了排气背压、进气真

空度对机组性能的影响。

2 机组仿真实论

2.1 系统划分

将柴油发电机组主要划分为气缸、进气管、排气管、中冷器、调速装置、压气机、涡轮以及带整流负载的同步发电机, 如图 1 所示。

2.2 缸内模型

柴油机缸内计算采用零维模型, 其数学模型主要包括质量守恒方程、能量守恒方程以及理想气体状态方程, 分别为

$$\frac{dm_z}{d\varphi} = \frac{dm_f}{d\varphi} + \frac{dm_s}{d\varphi} - \frac{dm_E}{d\varphi} \quad (1)$$

$$\frac{d(m_z u_z)}{d\varphi} = \frac{dW}{d\varphi} + \sum_i \frac{dQ_i}{d\varphi} + \sum_j \frac{dm_j h_j}{d\varphi} \quad (2)$$

$$p_z V_z = m_z R_z T_z \quad (3)$$

式中, φ 为曲轴转角, ($^\circ$); m_E 、 m_s 、 m_z 分别为流出气缸、流入气缸以及在气缸内的气体质量, kg; R_z 为气体常数, kJ/(kg·K); $\frac{d(m_z u_z)}{d\varphi}$ 为缸内工质的内能变化率, kJ/($^\circ$); $\frac{dW}{d\varphi}$ 为缸内气体对活塞做功的变化率, kJ/($^\circ$); $\sum_i \frac{dQ_i}{d\varphi}$ 为缸内的纯热量交换变化率, kJ/($^\circ$); $\sum_j \frac{dm_j h_j}{d\varphi}$ 为由质量交换所生成的能量变化率, kJ/($^\circ$)。

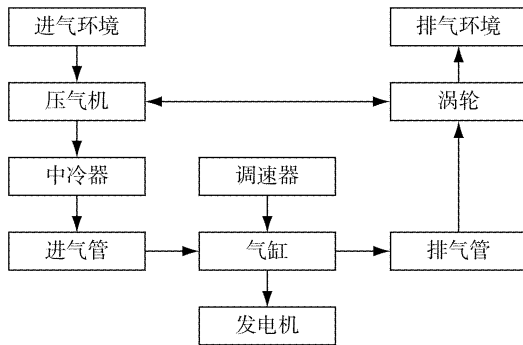


图 1 柴油发电机组系统划分示意图

2.3 进、排气管

考虑到进排气系统对气体的容积惯性作用, 采用容积法对进排气管进行建模, 其数学模型与缸内模型类似, 主要包括质量守恒方程、能量守恒方程以及理想气体状态方程, 并且同样考虑了管壁处的散热。

2.4 中冷器

为了增加增压柴油机循环进气质量, 采用中冷器对增压空气进行冷却。中冷器计算模型用代数方程描述为

$$T_s = T_K - \eta_{cw}(T_K - T_{cw}) \quad (4)$$

$$p_s = p_K + \Delta p \quad (5)$$

式中, T_K 为压气机出口增压空气温度, K; T_s 为中冷器出口的增压空气温度, K; η_{cw} 为中冷器效率; T_{cw} 为中冷器冷却水进口温度, K; p_K 为压气机出口增压空气压力, kPa; p_s 为中冷器后进缸前增压空气压力, kPa; Δp 为中冷器阻力损失, kPa。

2.5 调速装置

采用 PID 控制的方法对调速器的控制特性进行模拟, P、I、D 的大小反映调速器的控制特性。调速系统 PID 控制原理如图 4 所示, 其中 $r(t)$ 表示额定转速, $c(t)$ 表示实际转速, $e(t)$ 表示转速偏差,

$u(t)$ 表示循环油量, 被控对象表示整个机组系统。

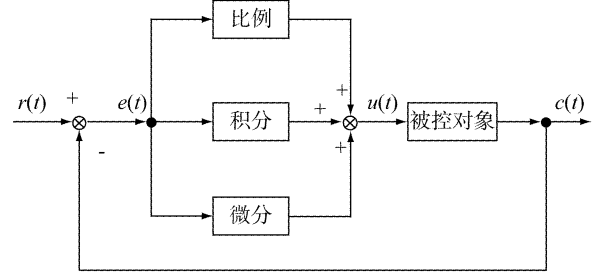


图 2 调速装置 PID 控制原理图

2.6 压气机

压气机基本方程为

$$\frac{dW_k}{d\varphi} = \frac{1}{\eta_k} \frac{dm_k}{d\varphi} \frac{k_k}{k_k - 1} R_k T_k \left[1 - \left(\frac{P_{ki}}{P_k} \right)^{(1-k_k)/k_k} \right] \quad (6)$$

$$T_k = \frac{T_{ki}}{\eta_k} \left[1 - \left(\frac{P_{ki}}{P_k} \right)^{(1-k_k)/k_k} \right] + T_{ki} \quad (7)$$

$$p_k = \pi_k p_{ki} \quad (8)$$

式中, $\frac{dm_k}{d\varphi}$ 为通过压气机的空气质量流量, kg/($^\circ$); η_k 为压气机的效率; π_k 为压气机的进气压比; n_k 为增压器的转速, r/min。本文压气机子系统模型中采用二维插值的计算方法, 将增压器转速、流量作为子系统的输入, 压比、效率作为子系统的输出。

2.7 涡轮

涡轮基本方程:

$$\frac{dW_T}{d\varphi} = \gamma_T \eta_T \frac{dm_T}{d\varphi} \frac{k_T}{k_T - 1} R_T T_T \left[1 - \left(\frac{P_T}{P_{T0}} \right)^{(1-k_T)/k_T} \right] \quad (9)$$

$$T_{T0} = T_T \left[1 - \eta_T \left(\frac{P_T}{P_{T0}} \right)^{(1-k_T)/k_T} \right] \quad (10)$$

式中, $\frac{dm_T}{d\varphi}$ 为通过涡轮的废气质量流量, kg/($^\circ$); P_T 为涡轮前排气压力, kPa; P_{T0} 为涡轮后排气背压, kPa。计算排气流量时, 将涡轮看作当量喷嘴^[1]。

2.8 燃烧模型

本文采用双韦伯燃烧模型表示燃烧规律, 将整个燃烧过程分为预混合燃烧以及扩散燃烧两部分, 故燃烧规律为:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{dx_p}{d\varphi} + \frac{dx_Q}{d\varphi} \quad (11)$$

放热规律为:

$$\frac{dQ}{d\varphi} = \eta_u H_u m_f \left(\frac{dx}{d\varphi} \right) \quad (12)$$

$$\text{其中: } x_p = \left[1 - e^{-6.908 \left(\frac{1}{2\tau} \right)^{m_p+1} (\varphi - \varphi_{cb})^{m_p+1}} \right] Q_p \quad (13)$$

$$x_d = \left[1 - e^{-6.908 \left(\frac{1}{\varphi_{zd}} \right)^{m_d+1} (\varphi - \varphi_{cb} - \tau)^{m_d+1}} \right] Q_d \quad (14)$$

2.9 发电机

本文采用十二相同步发电机等效模型。将电抗 x_t 和电阻 r 移至整流器前, 作为一个外阻抗来看待, 则每套三相桥式整流器 a 、 b 、 c 各相电压表示为^[2]:

$$\begin{aligned} u_{ai} &= -\sqrt{2}E_1 \sin(\theta - \delta_i) - x_t p i_{ai} - r i_{ai} \\ u_{bi} &= -\sqrt{2}E_1 \sin(\theta - 120^\circ - \delta_i) - x_t p i_{bi} - r i_{bi} \\ u_{ci} &= -\sqrt{2}E_1 \sin(\theta + 120^\circ - \delta_i) - x_t p i_{ci} - r i_{ci} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, i 为 1、2、3、4; i_{ai} 、 i_{bi} 、 i_{ci} 分别为第 i 套三相整流电路 a 、 b 、 c 各相电流。

2.10 机组动力学方程

在瞬态工况下, 柴油机转速发生变化, 将柴油发电机组简化成一个当量系统, 由两个旋转质量即柴油机和发电机以及一个无惯性的联轴轴组成, 并认为两个旋转质量间旋转角速度无差别, 则该系统扭矩平衡方程为:

$$M_e - M_L = (J_e + J_L) \frac{d\omega}{dt} \quad (16)$$

式中, J_e 为柴油机的转动惯量, $kg \cdot m^2$; J_L 为发电机的转动惯量, $kg \cdot m^2$; M_e 、 M_L 分别为柴油机有效输出扭矩、发电机的负载扭矩, $kg \cdot m$; ω 为旋转的角速度, rad/s 。

3 机组模型的建立

本文基于 *Simulink* 仿真平台展开柴油发电机组的系统建模, 其主要子系统及其计算流程如图 3 所示。其中, 8 个气缸采用独立建模的方式(为求简略, 将 2 至 8 缸联合表示), 以提高瞬态过程仿真模型的合理性; 涡轮增压器转速采用动力学方程计算, 以保证机组瞬态工作过程仿真的系统性; 数值计算方法采用自适应变步长算法, 以提高数值计算精度, 同时也有利于分析仿真误差与更好的完善建模过程。

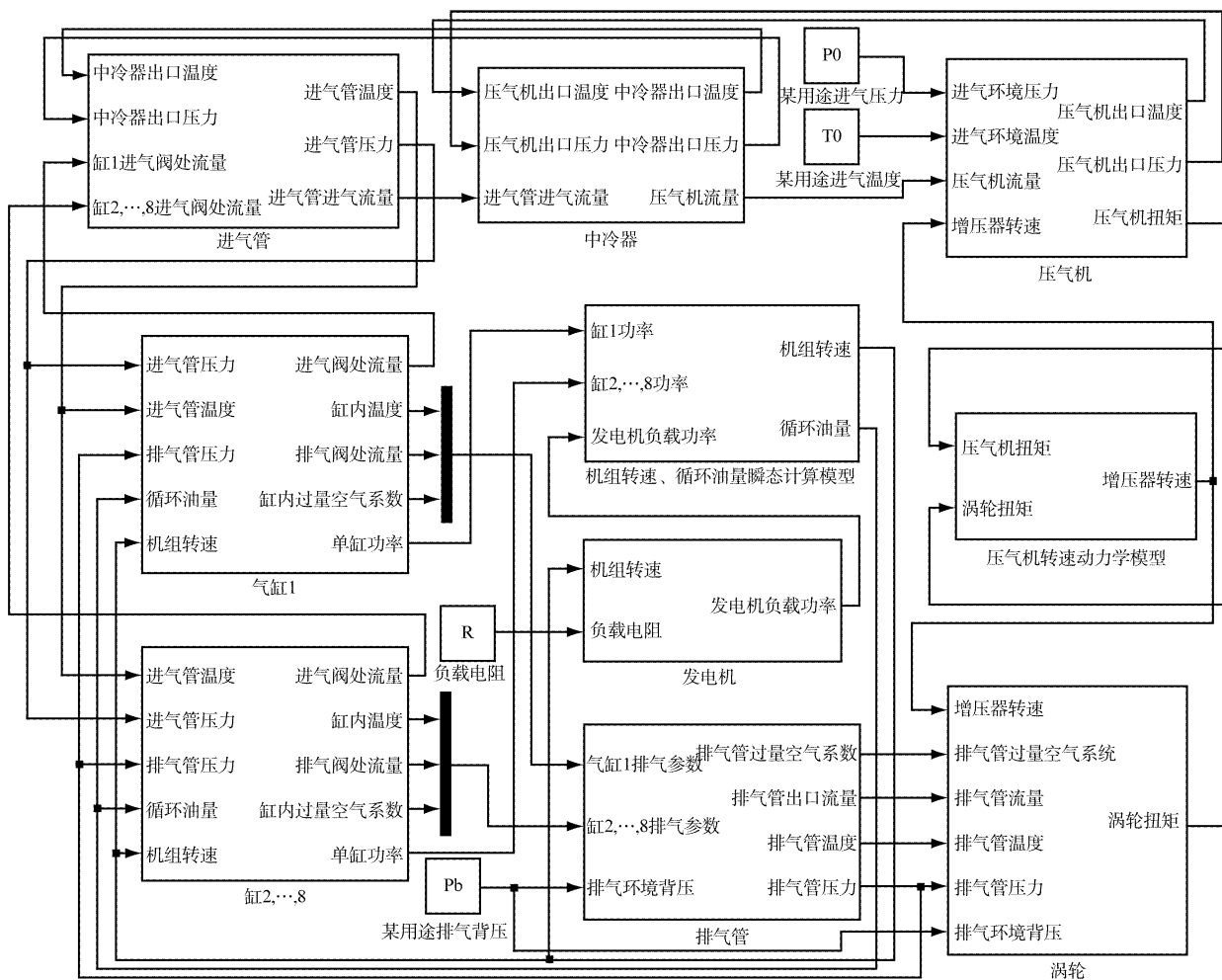


图3 机组系统模型仿真计算流程图

建模过程中, 首先根据机组系统的划分, 将机组整体模型划分为若干模块, 设计各模块的外部输入输出端口, 从而确立相关模块间的耦合关系;

然后分别建立各模块的内部模型, 并保证内部模型与外部端口相一致; 然后对各个模块进行独立调试, 此时各模块的外部输入端口均作为边界条件来

人为设定, 而输出端口均作为仿真结果加以考核; 然后对机组整体模型进行调试, 通过仿真结果与试验结果的对比, 调整不同工况下如调速系统 P、I、D 及燃烧品质指数 m_p 、 m_d 等模型参数的大小, 从而使仿真结果尽量接近试验数据; 最后, 根据仿真结果设定不同工况时的初始化条件。

4 仿真模型验证

4.1 稳态过程仿真验证

保持转速 1 800 r/min、发电机直流端电压 560 V 不变, 对机组进行 100%、75%、50%、10%、0% 负载特性仿真, 并对油耗、涡轮后排温、进缸前压力等参数进行对比验证, 如图 4 所示。可以看出, 仿真结果与试验数据十分接近, 除 50% 工况进缸前空气压力外, 其余结果误差均在 3% 以内。此处误差与压气机在低工况的特性曲线不完整、从而导致压气机效率设定不精确有关。

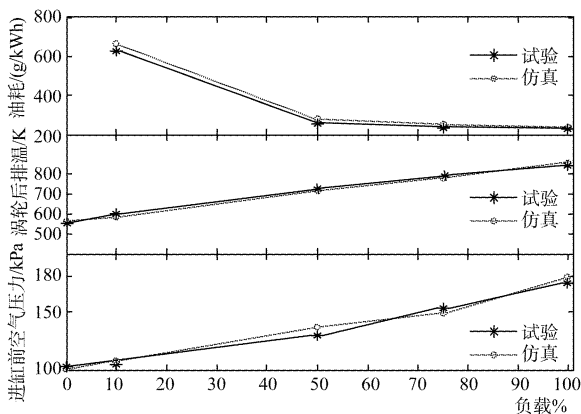


图 4 不同负载下稳态过程仿真结果对比图

4.2 瞬态过程仿真验证

首先, 对负载 0 ~ 60% ~ 100% 突加时的柴油机瞬态过程进行仿真, 并将转速、齿条位置的响应曲线与试验结果进行对比验证, 如图 5 所示。

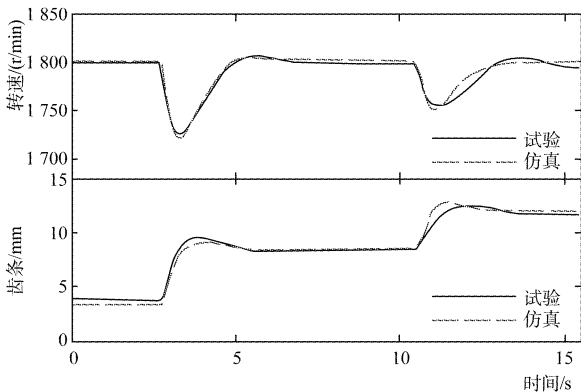


图 5 负载 0 ~ 60% ~ 100% 突加时转速、齿条响应曲线对比图

然后, 对负载 60% ~ 0 突卸、0 ~ 60% 突加时发电机的瞬态过程进行仿真, 并将电压、电流与试验结果进行对比验证, 分别如图 6、7 所示。

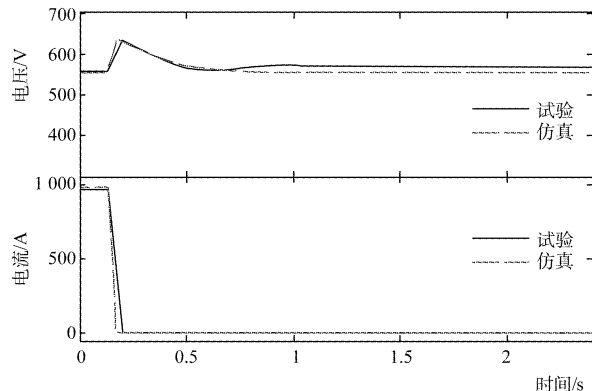


图 6 负载 60% ~ 0 突卸时电压、电流响应曲线对比图

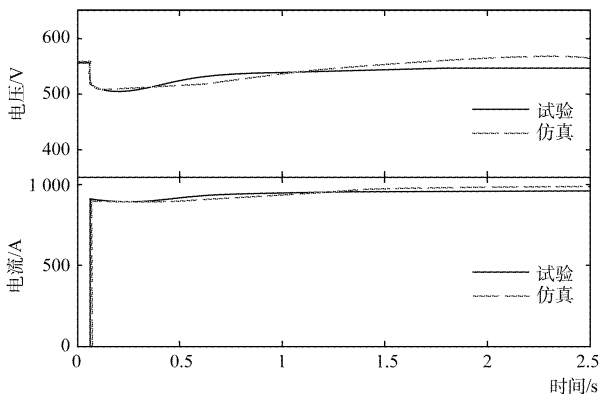


图 7 负载 0 ~ 60% 突加时电压、电流响应曲线对比图

验证结果表明, 机组瞬态过程仿真结果与试验曲线变化规律完全一致, 而且十分接近, 除齿条位置外, 其余结果误差均在 5% 以内。齿条的误差与调速系统的工作原理十分复杂有关, 本文采用相对简便的 PID 调节模拟调速系统工作原理可以有效提高建模仿真效率, 但同时也给齿条与转速的仿真结果带来一定误差。

综上所述, 该机组仿真模型对机组稳态、瞬态工作过程的仿真具有较高精度, 可以用于机组性能的仿真研究。

5 机组性能仿真

利用经过验证的机组仿真模型考察排气背压、进气压力对油耗、涡轮后排温、增压器流量、缸内最高燃烧压力等机组性能的影响。

5.1 排气背压对机组性能的影响

考察机组主要性能参数随排气背压增大时的变化规律, 如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 随着排气背压从 106 kPa 增加到 166 kPa 时, 柴油机废气对涡轮做功能力下

降、涡轮增压器转速明显下降、增压压力明显降低,致使进气量明显减少、做功能力下降、齿条位移增加、循环喷油量增加,同时导致各缸排温上升,从而使涡轮增压器重新稳定在较低转速下工作。并且,排气背压每增加 10 kPa,油耗增加 1.6 g/kWh,涡轮后排温增加 28 K,增压器进气流量减少 0.08 kg/s,缸内最高燃烧压力降低 0.25 MPa。

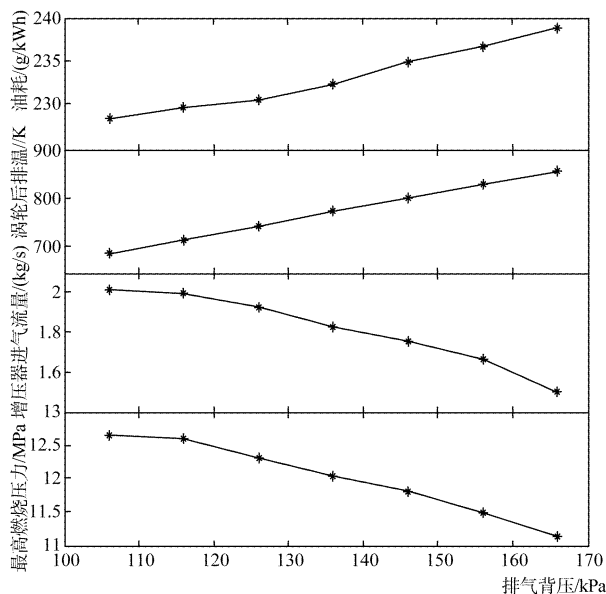


图 8 不同排气背压下机组性能参数变化图

5.2 进气压力对机组性能的影响

考察机组的主要性能参数随进气压力从 100.4 kPa 减小到 94.4 kPa 时的变化规律,如图 9 所示。

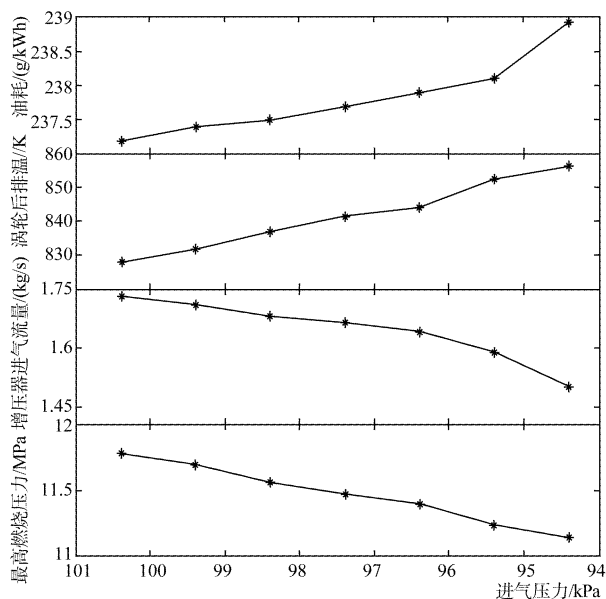


图 9 不同进气压力下机组性能参数变化图

由图 9 可以看出,随着进气压力的降低,增压器进气流量减小,柴油机做功能力下降,齿条位置增加,柴油机各处温度整体上升、压力整体下降。并且,进气压力每减小 1 kPa,油耗增加 0.3 g/kWh,涡轮后排温增加 5 K,增压器进气流量减少 0.04 kg/s,缸内最高燃烧压力减低 0.1 MPa。

6 总 结

本文基于 Matlab/Simulink 平台建立柴油发电机组的非线性仿真模型,并将机组在高排气背压、高进气真空条件下不同负载稳态工况、负载突加突卸瞬态工况的仿真结果与试验结果进行对比,最后利用该仿真模型研究了排气背压、进气真空对机组性能的影响。

得出以下主要结论:

- 1) 基于 Simulink 建模仿真平台对柴油发电机组工作性能进行仿真研究具有可行性;
- 2) 对柴油发电机组的工作性能进行仿真研究,有利于缩短研发周期,降低开发成本;
- 3) 排气背压与进气真空的增加不利于机组工作性能,在机组选型、增压器匹配等问题中应予以足够重视。

研究中还发现,由于机组系统庞大、涉及面广,仿真误差较难控制。而当误差出现时,如何完善仿真模型、修正经验参数、确定边界条件以及协调三者间的主次关系,是十分重要的,切忌为了追求仿真结果与试验数据的一致性,而不科学地修改模型参数。这方面的问题还有待继续展开研究。

参考文献

- [1] 刘永长. 内燃机工作过程模拟[M]. 华中理工大学出版社,1996.
- [2] 张宁. 永磁同步发电机整流系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.