

智能化与控制

电控柴油机平均值模型建模研究

周海涛, 闫 萍, 王新权

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 电控共轨发动机的喷油压力、正时、脉宽都柔性可调, 因此要确定其燃烧热效率必须综合考虑这些因素的影响, 通过利用神经网络方法进行数据处理得到一种快速计算指示热效率方法, 所建立的发动机模型在仿真精度与计算耗时方面都能满足要求, 并已用于高压共轨柴油机电控平台的开发上, 有一定的实用价值。

关键词: 电控柴油机; 平均值模型; BP 神经网络; 实时仿真

中图分类号: TK421+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)02-0012-06

Study on Mean Value Model of Electronically Controlled Diesel Engine

Zhou Haitao, Yan Ping, Wang Xinquan

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Injection pressure, timing and pulse width of electronically controlled diesel engine are flexible parameters, and should be taken into consideration in determining engine's combustion thermal efficiency. Data processing are conducted using neural network, and a fast calculation method indicating thermal efficiency was obtained. An engine model established by this method could satisfy the requirements of simulation precision and time cost. It has already been applied on high pressure common rail diesel engine's electronically controlled platform, and is valuable in application.

Keywords: electronically controlled diesel engine; mean value model; BP Neural Network; real-time simulation

1 前 言

高压共轨燃油系统以其对喷油压力和正时的灵活控制极大地改善了柴油机的经济性和排放性能, 但要发挥高压共轨燃油系统对柴油机性能提高的作用, 还需要功能完善的电控系统与之相匹配, 并进行大量的标定工作。

高压共轨燃油系统控制的灵活性也使电控 ECU 控制策略功能越来越复杂, 需要标定的参数也越来越多, 在开发阶段迫切需要建立接近实际发动机的性能虚拟样机, 既能接收控制器的控制指令, 又能实时反馈控制器控制参数变化后柴油机的性能指标变化情况, 这一系统被称为硬件在环仿真

系统(HIL)。该系统已被广泛应用于柴油机电控 ECU 的开发和验证, 以及 ECU 控制参数的初步标定工作。

2 硬件在环仿真用柴油机模型选型

柴油机实时仿真模型是硬件在环仿真系统的核心, 直接影响系统的精度及实时性。柴油机模型按组成一般分为缸内工作过程模块、进排气模块、涡轮增压器模块、燃油喷射系统模块和曲轴动力学模块等, 其中缸内工作过程模型是计算最为复杂的模块。

发动机缸内工作建模, 按照气缸燃烧室内工质成分是否假定为均质, 划分成两种: 多维模型和经

收稿日期: 2009-01-05; 修回日期: 2009-09-23

作者简介: 周海涛(1976-), 男, 工程师, 主要研究方向为发动机燃油系统控制, E-mail: zhouht@sjtu.org。

唯象模型^[1]。多维模型为燃烧性能模型, 它将燃烧室空间划分为精细的网格, 工质成分随空间分布而不同, 由于多维模型需要用到复杂的计算流体力学方法, 因此多用于专业的软件进行发动机缸内气体流动, 燃烧和排放模拟等方面的计算, 计算结果输出也比较详细, 但由于计算量大, 进行一次仿真的时间以小时计算, 不满足发动机工作过程实时仿真的要求。

唯象模型又分为容积法模型和平均值模型, 前者一般将发动机缸内空间分为一个或多个控制容积, 每个容积内部假定成均质, 采用经验公式或曲线拟合方法计算气缸内燃烧放热规律, 可计算出精确到按曲轴转角的气缸内瞬时温度、压力、排放等指标, 由瞬时气体压力通过曲柄连杆机构计算柴油机的输出扭矩, 进一步得到功率。后者只对进排气系统、曲轴转速采用微分方程, 但对缸内工作过程避开复杂的燃烧放热规律计算, 采用一个宏观的指示热效率经验参数来替代缸内热功转换过程, 计算出指示功率, 油耗率等指标。

容积法模型的优点是采用零维燃烧模型的方法, 可计算缸内瞬时温度压力、示功图等瞬时参数, 但由于模型计算复杂, 计算速度依然太慢, 实时性上无法满足高速柴油机控制器开发要求, 一般也不用作柴油机电控 ECU 的开发。

平均值模型的优点是对柴油机各个系统进行了物理意义明确的简化, 只表示过程的综合结果和状态变量的时间平均效应, 突出实时性, 因此现有的电控柴油机特别是高速机实时仿真系统中大量采用的是平均值模型。本课题的研究也采用平均值模型进行缸内工作过程的计算, 同时在建模过程中引入性能计算模型中较为精确的燃烧模型的计算结果。

3 指示热效率计算

3.1 与指示热效率计算有关的变量分析

采用平均值模型计算涉及到指示热效率的选取问题, 共轨柴油机由于可调节的控制量比常规柴油机多, 其指示热效率的影响因素也更复杂, 因此柴油机模型要能精确地反馈控制量的变化, 就必须选用较为精确的燃烧性能计算模型。柴油机燃烧性能计算模型主要有零维燃烧模型、准维燃烧模型和多维燃烧模型。零维燃烧模型是在假设整个气缸为一个均匀场的条件下, 燃烧放热率是用经验公式或曲线拟合方法构造的经验数学关系, 如 Vibe 模型; 而准维燃烧模型是将燃烧室模化为无燃烧的空气区、混合区和燃烧产物区, 同时将喷射子系统作为

热力系统中的一个子区来考虑, 其表征特征参数为喷射压力和喷射规律, 如广安博之模型; 多维燃烧模型是用数值方法求解描述燃烧过程的质量、动量、能量和化学组分的守恒方程, 一般由模拟缸内各个物理化学过程的若干子模型组成^[2]。

在准确性和工程适用性方面, 准维燃烧模型是较好的折衷方案。因此, 本文采用准维燃烧模型模拟柴油机工作的燃烧过程, 进行指示热效率的计算。

如前所述平均值模型计算缸内工作过程的核心是指示热效率的计算。根据热力学, 柴油机指示热效率主要受最高燃烧压力 p_z 影响, p_z 与压缩比、喷油提前角、喷油持续期、增压压力都有关, 取决于燃烧的完善程度。压缩比是柴油机的固有参数, 增压压力由压气机的流量特性决定。对非共轨柴油机, 喷油过程由高压油泵的特性决定, 喷油提前角按角度域由固定的油泵凸轮相位确定, 按时间域还要考虑转速因素; 喷油持续期按角度域由油泵齿条位移确定, 按时间域也要考虑转速因素; 喷油压力由凸轮型线设计和转速决定; 增压压力反映进入气缸新鲜充量的多少, 可以用燃烧过量空气系数来等效代替, 由此可见指示热效率是转速与燃烧过量空气系数的函数, 一般有经验公式:

$$\eta_i = (c_1 + c_2 n + c_3 n^2)(m_1 + m_2 \alpha + m_3 \alpha^2 + m_4 \alpha^3)$$

式中: η_i 为指示热效率; n 为转速; α 为燃烧过量空气系数; c_1 、 c_2 、 c_3 、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 为系数。

喷油提前角和喷油持续期的影响因素已经包含进转速项的系数 c 里面, 喷油压力也作为固有因素隐含在上述公式的系数里。但对于电控共轨发动机而言, 由于喷油压力(共轨压力)、提前角、喷油持续期都相对曲轴相位转速独立可调, 因此就导致了指示热效率 η_i 不再仅仅是转速和过量空气系数的函数, 而与上述所有变量都有关, 也就是有函数:

$$\eta_i = f(n, \alpha, \theta, \tau, CPR)$$

式中: n 为转速; α 为燃烧过量空气系数; θ 为喷油提前角; τ 为喷油持续期; CPR 为喷油压力。

3.2 参与计算的变量组合

本模型需要实现真实电控柴油机在喷油压力、喷油正时、增压比发生改变时, 功率、燃油耗、排温、扭矩等性能指标也能随之改变, 因此指示热效率函数必须包含上述控制参数的影响。对于还在设计阶段的柴油机, 尚无试验数据可用, 可以按照设计参数分别在 AVL 的 BOOST 软件里建立柴油机工作过程仿真模型, 在 AMESim 软件里建立共轨燃油

系统电磁液力模型进行计算。先根据喷油压力, 喷油正时在 AMESim 软件喷油器模型里计算出喷油规律, 然后将计算得到的喷油规律输入到 BOOST 软件中的 MCC (Mixture Control Combustion) 准维燃烧模型中, 最后通过计算得到不同工况下的缸内压力曲线, 过量空气系数和指示热效率等参数。

某型号船用柴油机的上述变量设计范围如表 1 所示, 范围选取做到单个变量在所有工况范围全覆盖, 因此必然会出现一些不可能出现的变量组合, 如低转速高喷油压力, 这是因为作为硬件在环仿真建模的目的就是要尽可能地考虑到各种可能工况, 包括非常规工况或者极限工况。

表 1 计算指示热效率变量表

变量	设计取值范围	备注
转速 $n/(r/min)$	600 ~ 1 800	步长取 100, 额定 1 500 r/min
燃烧过量空气系数 α	1.6 ~ 2.5	步长取 0.1, 双增压器
喷油提前角 $\theta/^\circ CA$	11 ~ 20	步长取 1°
喷油持续期 $\tau/^\circ CA$	20 ~ 32	喷油脉宽指令与实际喷油持续角有延迟, 对应 32° 的持续期脉宽指令为 28° , 步长取 1°
喷油压力 CRP/MPa	65 ~ 140	低工况 65 MPa, 正常工况 100 ~ 140 MPa。步长取 10 MPa

考虑到电控 ECU 输出的喷油持续期指令为时间而非角度, 所以这里将喷油持续期的角度量 ($^\circ CA$) 转换为时间量 (ms), 转换系数由发动机转速决定。按照 1 800 r/min 时 $20^\circ CA$ 对应 1.85 ms, 1 200 r/min 时 $28^\circ CA$ 对应 3.89 ms, 将喷油持续期限定在 2.2 ~ 4 ms 之间。

表 1 中的变量互相独立, 有的由控制器设定, 如转速、喷油提前角、喷油持续期、喷油压力 (通过控制油泵电磁阀开度实现对喷油压力的精确控制); 有的由增压器匹配决定, 如过量空气系数。因此设定数据查表, MAP 将有五维, 建立五维 MAP 不仅过程繁琐, 而且按照数据密度所需准备的数据量也将呈几何级数增长, 因此考虑采用建模的方法进行数据处理。一般可采用多项式模型或神经网络模型两种方法, 这里采用前向反馈 (BP) 神经网络来构建一个五输入一输出的数据处理模块。

转速、喷油持续期、喷油压力这三个变量在 AMESim 仿真软件中设定, 输出喷油率曲线。理论分析表明: 喷油持续期、喷油压力与指示热效率有单调递增递减的关系^[3], 所以这两个变量可以取较大的步长, 以减少参与下一步 BOOST 计算的方案组合。故喷油持续期分 4、3、2.2 ms 三组, 喷油压力分 140、100、65 MPa 三组, 而转速不存在这种单调关系, 故转速分 1 800、1 500、1 200、900、600 r/min 五组, 这样共有 45 组喷油率曲线。如图 1 所示是 1 500 r/min、脉宽 3 ms、喷油压力 100 MPa 时的喷油率曲线。

将喷油率曲线输入 BOOST 软件, 进行计算时还需确定喷油正时, 即喷油始点相对于上止点的角

度提前量 BTDC, 通过将喷油率曲线进行前后平移实现不同喷油提前角的喷油规律。电控 ECU 对喷油相位采用角度正时齿轮数齿控制, 所以这里的变量采用角度域, 分别取值 11、15、 $20^\circ CA$ 。将前面的 45 组喷油率曲线输入计算, 将有 135 组数据, 考虑到匹配的涡轮增压器只有固定的一个型号, 因此对应每一组数据只有一个特定的燃烧过量空气系数, 因此将模型中间输出的过量空气系数作为神经网络模型的输入量, 虽然限制了此模型的适用范围, 但对本课题而言已经足够。

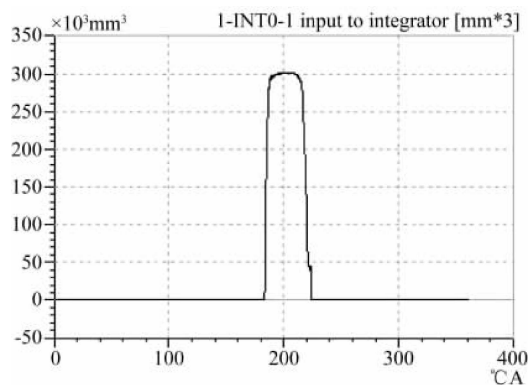


图 1 喷油率曲线

3.3 仿真计算结果的神经网络处理

将上述仿真方案输入 AVLBOOST 软件进行计算, 得到的仿真结果共 135 组, 部分示例如表 2 所示。

这 135 组数据一部分作为训练样本, 剩下的作为检验样本进行神经网络训练, 得到指示热效率的 BP 神经网络模型, 然后加入柴油机的 Simulink 仿真模型, 如图 2 中灰色模块 IndEff 所示。

表 2 部分仿真计算结果示例

转速 /(r/min)	喷油压力 /MPa	喷油脉宽 /ms	喷油量 /g	喷油提前角 /°CA	喷油持续期 /°CA	过量空气系数	指示热效率
1 500	140	2.2	0.770 698	11	33	2.015 1	0.475 9
1 500	140	2.2	0.770 698	15	33	1.962 7	0.485 5
1 500	140	2.2	0.770 698	20	33	1.908 9	0.492 3
900	100	3	0.848 647	11	25	1.121 4	0.457 2
900	100	3	0.848 647	15	25	1.090 3	0.456 9
900	100	3	0.848 647	20	25	1.061 9	0.452 4

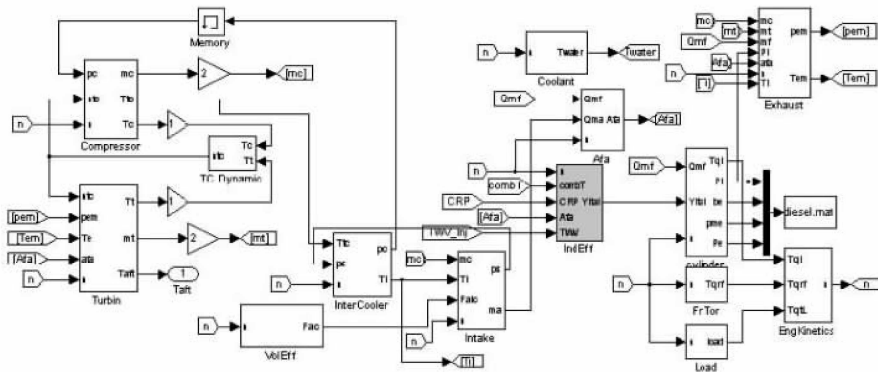


图 2 电控柴油机 Simulink 仿真模型

4 柴油机模型各模块算法

其余的模块如进排气、涡轮增压器、曲轴动力学等按照常规方法建模^[4]。这里选取算法较复杂的几个模块简述如下。

4.1 压气机计算模块

压气机模块输入分别为增压器转速 n_{tc} 和压气机增压压力 p_c ，输出为压气机流量 m_c ，消耗扭矩 T_c ，出口温度 T_{tc} ，如图 3 所示。主要包括效率和流量查表计算，输出增压后温度及压气机耗功。

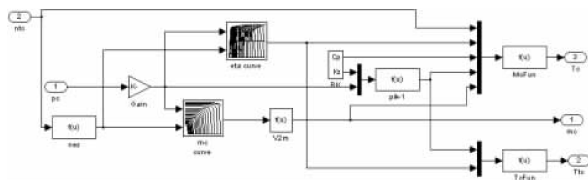


图 3 压气机模块计算流程

采用瞬时绝热指数 k 的经验公式为:

$$k = 1.4373 - 1.318 \times 10^{-4} T + 3.12 \times 10^{-8} T^2 - \frac{4.8 \times 10^{-2}}{\alpha}$$

气体定容比热 c_{vz} 、定压比热 c_{pz} :

$$c_{va} = \frac{R_z}{(k_z - 1)}; c_{pz} = \frac{R_z k_z}{(k_z - 1)}$$

增压后温度计算公式为:

$$T_{tc} = T_a [1 + (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1)/\eta]$$

压气机耗功计算公式为:

$$T_c = \frac{60 m_c c_p T_a (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1)}{2\pi n_{tc} \eta}$$

4.2 涡轮机计算模块

涡轮机模块输入参数有涡轮前排温 T_e ，排气压力 p_{em} ，涡轮转速 n_{tc} ，过量空气系数 α 输出参数有涡轮发出扭矩 T_t ，涡轮流量 m_t ，涡轮后排温 T_{aft} ，如图 4 所示。

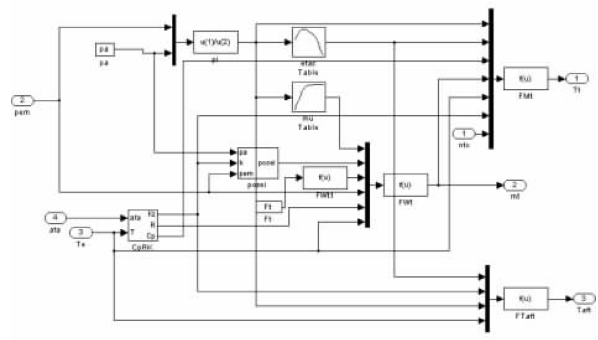


图 4 涡轮机模块计算流程

由于废气成分复杂,其气体常数不再是常量,可以利用理想混合气体理论计算工质的气体常数,但为减少模型的计算量,以过量空气系数 α 为参数,根据气体表中数据,利用最小二乘法拟合得到工质的气体常数 R 的近似计算公式:

$$R_g = g(29.2647 - \frac{0.0402}{\alpha_k})$$

式中: g 为重力加速度;绝热指数与定容、定压比热容计算同前。

通流函数 ψ 是压比和绝热指数的函数。根据喷管理论,流量并不是随涡轮膨胀比的增大而增大,而是有一个极限值,当超过此极限时流速达到当地音速,此时达到该当地音速的截面流量不再增加,因此涡轮流量计算需要考虑涡轮背压(大气压力) p_a 与临界压力 p_{cr} 的大小关系。

当 $p_a > p_{cr}$ 时,

$$\psi = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left(\frac{p_{em}}{p_a} \right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{p_{em}}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}$$

当 $p_a < p_{cr}$ 时,

$$\psi = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}$$

$\mu \cdot F_t$ 用来计算涡轮出口当量截面积, μ 查表计

算, F_t 用排气管直径计算。则流量 m_t 计算公式为:

$$m_t = \mu \psi F_t p_{em} \sqrt{\frac{1}{R_z T_e}}$$

涡轮扭矩计算公式为:

$$T_t = \frac{60}{2\pi n_{tc}} \eta_{cp} m_t T_e \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_{em}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

涡轮出口排气温度公式为:

$$T_{aft} = T_e \left(1 - \eta \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_{em}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \right)$$

4.3 负载及燃油系统模块

负载模型按推进特性扭矩与转速的二次方成正比计算。对喷油量 Q_{mf} 及喷油压力 CRP 另建燃油系统模型计算,喷油压力 CRP 即共轨压力由油泵油嘴的 AMESim 模型仿真得到,输入为上一循环共轨压力 CRP 、凸轮轴转速 $n/2$ 、控制器油泵电磁阀开启角度 PCV 指令,用分页技术实现在 Simulink 里的三维 MAP 插值。

5 模型的验证

按推进特性进行了四个工况下的仿真,与在 AVLBOOST 软件中的计算结果进行比较,如表 3 所示。

表 3 仿真结果与 BOOST 计算结果对比

负荷	50%		75%		100%		110%	
	模型计算	BOOST 计算	模型计算	BOOST 计算	模型计算	BOOST 计算	模型计算	BOOST 计算
转速/(r/min)	1 192	1 191	1 363	1 363	1 500	1 500	1 548	1 548
指示功率/kW	1 387	1 383.7	2 077.8	2 074.5	2 769.8	2 762.3	3 045.1	3 049.4
有效功率/kW	1 206	1 202.5	1 801.7	1 798.9	2 400	2 393.5	2 640.1	2 643.7
平均有效压力/MPa	1.551	1.548	2.027	2.024	2.453	2.447	2.615	2.619
燃油消耗率/(g/kWh)	209.5	201.5	201	201.6	203.3	205	203.6	207.7
涡轮前温度(℃)	576.9	620.75	568.9	572.35	524.9	556	549.5	560.35
涡轮前排气平均压力/MPa	0.187 1	0.160 3	0.208 3	0.238 5	0.302	0.337 4	0.319	0.368 9
增压压比	2.43	1.903	2.944	2.982 6	4.100 5	4.108 2	4.131	4.547 5
总过量空气系数	1.994	1.573 1	1.933 3	1.867 4	2.196 1	2.083 5	2.07	2.07
增压空气流量(单台)/(kg/s)	1	0.955	1.39	1.665	2.128	2.414	2.21	2.669 9

从表 3 可以看出,在 50%、75%、100%、110% 负荷下模型计算结果与 BOOST 软件计算结果有相同的变化趋势,偏差在可接受范围内。低工况时涡轮增压器的数据差别较大,与选配的增压器型号不同有关。

为考察模型在电喷参数改变时的响应,选取喷

油提前角从 17 °CA 变为 11 °CA 时发动机性能变化曲线,突变发生在仿真第 10 s,如图 5 所示;同时选取喷油压力从 140 MPa 变为 90 MPa 再恢复到 140 MPa 时发动机性能变化曲线,突变发生在仿真进行到第 7 s 时和第 12 s 时,其他参数都不变,如图 6 所示。

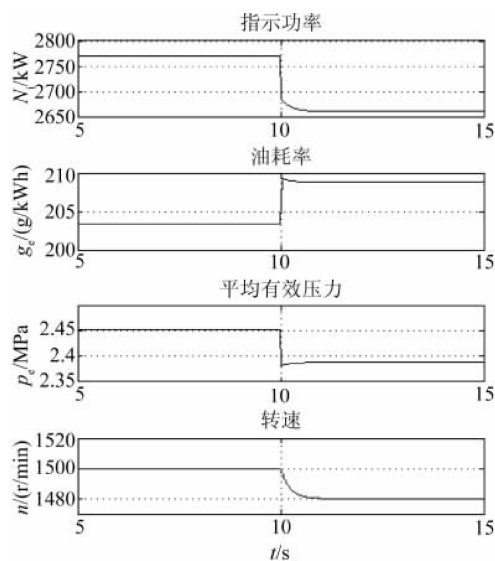


图5 喷油提前角改变时性能变化曲线

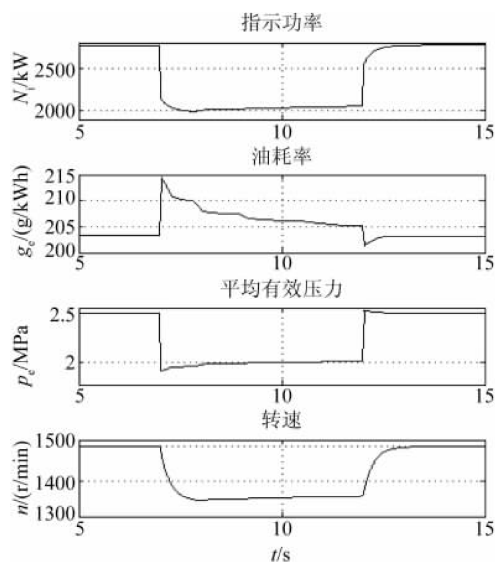


图6 喷油压力改变时性能变化曲线

由图可知当仅改变喷油提前角或者仅改变喷油压力时,发动机的指示功率、油耗率、平均有效压力、转速等性能参数都发生改变,因此可用作电控 ECU 控制策略开发阶段的初步标定范围,这是传统的平均值模型无法做到的。

由于 BOOST 软件计算结果也只是软件模拟仿真,与实机运行仍会有差距,所以模型是否能精确反映实机运行的性能参数还需在试验台架上进行验证,但在发动机电控系统开发阶段可以作为初步标定的虚拟样机。

6 结 论

本文通过使用准维燃烧模型建立计算共轨柴油机指示热效率的神经网络模型,将该模型引入发动机控制系统仿真用的平均值模型,并用于正在进行的高压共轨柴油机电控系统开发上,使平均值模型的适用范围扩大到电控共轨柴油机,解决了电控系统开发缺乏合适的虚拟样机及平均值模型精度较低的难题,具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] Pradheepam Ottikkutti, Jon Van Gerpen, Ke Run Cui. Multizone modeling of a fumigated diesel engine [C]. SAE Paper No 910076, (1991).
- [2] 周俊杰等. 柴油机工作过程数值计算 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1990.
- [3] D. T. Hountalas, Available strategies for improving the efficiency of DI diesel engines-a theoretical investigation [C]. SAE Paper No 2000-01-1176, 2000.
- [4] 鹿笑冬, 欧阳明高, 白露. 用于发动机控制模型的基于循环的平均值离散建模方法 [J]. 内燃机学报, 2001, 19 (1).

(上接第 6 页)

(2) 提高船用柴油机核心竞争力, 发展电子控制装置是关键。推动产学研结合, 加快核心技术的研发, 以电控燃油喷射装置项目为龙头, 带动船用柴油机产业的发展。

(3) 推进新技术的发展与新型动力装置的配机应用有着密不可分的关系。为使国产化船用柴油机在技术引进基础上再走持续发展的道路, 要培育专业化的船用柴油机制造基地, 提高船用柴油机及其

配套产品的制造水平, 提高船用柴油机产品的竞争力。要全面实施知识产权战略, 深入推进自主创新能力, 提升行动计划, 形成优胜劣汰的竞争机制。

(4) 船用柴油机制造领域中的产学研单位, 只有通过清晰明确的思想交流和信息沟通, 达到知识、经验、资料的交流和分享, 建立贯穿项目标定过程的知识共享, 才能在消化吸收许可证技术的基础上形成自主创新能力, 做到管理创新。