

文章编号: 1000-582X(2012)10-152-06

配气阀结构参数对活塞凸轮发动机性能的影响

徐勤超, 王树宗, 练永庆

(海军工程大学 海军兵器新技术应用研究所, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了研究配气阀结构参数对活塞凸轮发动机性能的影响, 使用瞬态分析方法建立了发动机缸内热力过程的数学模型, 并通过计算机仿真分析了各配气阀结构参数对发动机性能的影响。研究表明, 配气机构的气道孔直径大于某一定值后, 其对凸轮活塞发动机耗量和指示功率影响较小; 在保证功率的前提下, 减小进气角可以提高发动机的经济性; 选择使活塞在回行开始时缸内压力降到背压值的预排气角, 可以提高发动机的动力性; 最佳的压缩角、预进气角可以通过本文的计算模型从多种方案中优选得到。

关键词: 活塞发动机; 凸轮; 配气机构; 配气参数; 建模仿真

中图分类号: TJ630.2

文献标志码: A

Effect on the performance of piston cam engine with the parameters of valve mechanism

XU Qincao, WANG Shuzong, LIAN Yongqing

(Naval Research Institute of New Weaponry Technology and Application,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China)

Abstract: In order to investigate the effect on the performance of piston cam engine by the valve parameters, the instantaneous state analysis method is used to model the thermal process in cylinder and that is analyzed through computer simulation. The researching results indicate that the aperture of the air hole have little effect on performance of the piston cam engine when it is greater than a certain value; economy can be increased by decreasing intake angle on the premise of power need; power can be increased by decreasing the pressure of cylinder to back pressure at time of piston begin to get back; the forehead intake angle and compress angle for optimum power and economy can be get by comparing to different simulation results.

Key words: piston engine; cam; valve mechanism; valve parameters; simulation modeling

活塞凸轮发动机把活塞的往复运动变为发动机的旋转运动, 具有体积小、重量轻、比功率大、结构简单等优点^[1], 在特种发动机领域获得了广泛的应用。活塞凸轮发动机采用转阀配气机构, 合理的选择配气参数不仅可以减少不完全膨胀损失, 增大相对指示效率, 提高发动机的经济性, 而且还可以提高发动

机的功率, 保证启动可靠及工作平稳。

近年来, 国内外研究者对发动机配气问题的研究主要对发动机工作过程的进行仿真, 分析各配气参数对发动机性能的影响, 并结合适当的优化算法来实现对发动机性能的优化^[2-12]。在凸轮式活塞发动机领域, 对配气阀结构参数的研究, 以往的文献主

收稿日期: 2012-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009142)

作者简介: 徐勤超(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事鱼雷动力技术方向研究, (E-mail)hangyuandulang@163.com。

要采用功率耗量比作为优化目标对配气阀结构进行参数优化^[13-14],并不能具体反映各参数对发动机性能的影响。为了分析了配气阀结构参数对活塞凸轮发动机性能的影响,本文利用瞬态的分析方法,建立了凸轮活塞发动机缸内热力过程的数值模型,并进行了数值仿真。结论可为活塞发动机的设计提供理论指导。

1 发动机缸内热力过程建模

1.1 缸内热力过程模型

发动机的缸内状态与工质的流入、流出,工质在缸内做功和工质向缸外散热情况有关。根据能量平衡原理,带入缸内的净能量应等于缸内工质做功、内能的增量和向外散热量的总和^[1]。缸内的内能变化率 dU/dt 为

$$c_{pm} \cdot T_1 \cdot \frac{dm_j}{dt} - c_{pm} \cdot T \cdot \left(\frac{dm_h}{dt} + \frac{dm_p}{dt} \right) = \frac{dU}{dt} + p \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{dQ_w}{dt} \quad (1)$$

式中: dV/dt 为缸内工质的体积变化率; dQ_w/dt 为缸内工质向外散热损失率; c_{pm} 为缸内工质的平均定压比热容; T_1 为流入缸内工质温度; T 为缸内工质的温度; dm_j/dt 为工质向缸内流入的流率; dm_p/dt 为工质流出气缸的流率; dm_h/dt 为工质回流的流率。

缸内工质的质量变化率等于工质向缸内流入与由缸内流出的流率之差。

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm_j}{dt} - \left(\frac{dm_h}{dt} + \frac{dm_p}{dt} \right) \quad (2)$$

在发动机工作温度范围内,把工质平均定容比热容 c_{vm} 当成温度 T 的线性函数,系数决定于工质的成分,若把工质成分看作一直不变,则系数为常数^[1]。由缸内工质的质量及内能的关系 $U = mc_{vm}T = m(b_{v0} + b_1 T)T$ 可得缸内工质温度变化率为

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{1}{m} \cdot \frac{dU}{dt} - \frac{U}{m^2} \cdot \frac{dm}{dt} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(b_{v0}^2 + \frac{4b_1 U}{m} \right)}} \quad (3)$$

式中, b_{v0} 、 b_1 为由工质成分决定的常数。

假设缸内工质为理想气体,对气体热力学方程求导可得气体压强变化率为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \cdot \frac{dm}{dt} + \frac{mR}{V} \cdot \frac{dT}{dt} - \frac{mRT}{V^2} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

式中: R 为气体常数; V 为缸内工质气体体积。

缸内工质的体积决定于活塞的位移,则缸内工质体积为

$$V = V_0 + \frac{\pi d^2}{4} s \quad (5)$$

式中: d 为气缸直径; s 为活塞的位移,假设凸轮的曲线是使活塞的位移按转角正弦的平方规律变化 $s = H \cdot \sin^2 \theta$; H 为活塞的冲程。对上式求导可得工质体积变化率

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi^2 d^2 n_0}{2} \cdot H \cdot \sin(2\theta) \quad (6)$$

式中: n_0 为发动机转速。

1.2 燃气流率模型

燃气通过配气阀流进气缸内或从气缸中流出是按准稳态进行计算的,假定流动是等熵的,则燃气流经阀门的质量流率 \dot{m}_x 为

$$\dot{m}_x = \begin{cases} \mu_s \cdot A_{jp} \cdot P_s \cdot \frac{\sqrt{k} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{\sqrt{R \cdot T}}; \\ \text{当 } \frac{P_x}{P_s} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ 时;} \\ \mu_s \cdot A_{jp} \cdot P_s \cdot \left(\frac{P_x}{P_s} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{R \cdot T \cdot (k-1)} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_x}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}; \\ \text{当 } \frac{P_x}{P_s} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ 时。} \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ_s 为流量系数; T 为燃气温度; A_{jp} 为进气或排气中阀门打开的面积; k 为燃气比热比; P_s 、 P_x 分别为燃气在阀门上下游的压强。

燃气在进气或排气时阀门打开的面积可由旋转配气机构的进气孔与气道孔或气道孔与排气槽的几何重叠面积进行计算。进气面积和排气面积的变化过程可分为增长、定值和缩小 3 个阶段,如图 1、2。进气面积和排气面积各变化阶段的始末点由气道孔相对于由凸轮轴线与凸轮峰顶形成的峰截面的转角 ψ 表示。

对于任意时刻的进气面积 A_j 可表示为

$$A_j = \begin{cases} A_{jq}, & 0 \leq \psi < \alpha_{zj}; \\ \pi r_2^2, & \alpha_{zj} \leq \psi < \alpha_{sk}; \\ A_{jq}, & \alpha_{sk} \leq \psi < \alpha_{sj}; \\ 0, & \alpha_{sj} \leq \psi < \theta_T + \alpha_{zk}; \\ A_{jq}, & \theta_T + \alpha_{zk} \leq \psi \leq \theta_T. \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$A_{jq} = \begin{cases} \frac{\bar{r}_1^2}{2} (\psi_1 - \sin \psi_1) + \frac{\bar{r}_2^2}{2} (\psi_2 - \sin \psi_2), & A_{jq} < \pi \bar{r}_2^2; \\ \pi \bar{r}_2^2, & A_{jq} > \pi \bar{r}_2^2. \end{cases} \quad (9)$$

式中: \bar{r}_1 、 \bar{r}_2 分别为进气孔和气道孔展平圆半径; ψ_1 、 ψ_2 分别为公共弦对应的气道孔圆和进气孔圆圆心

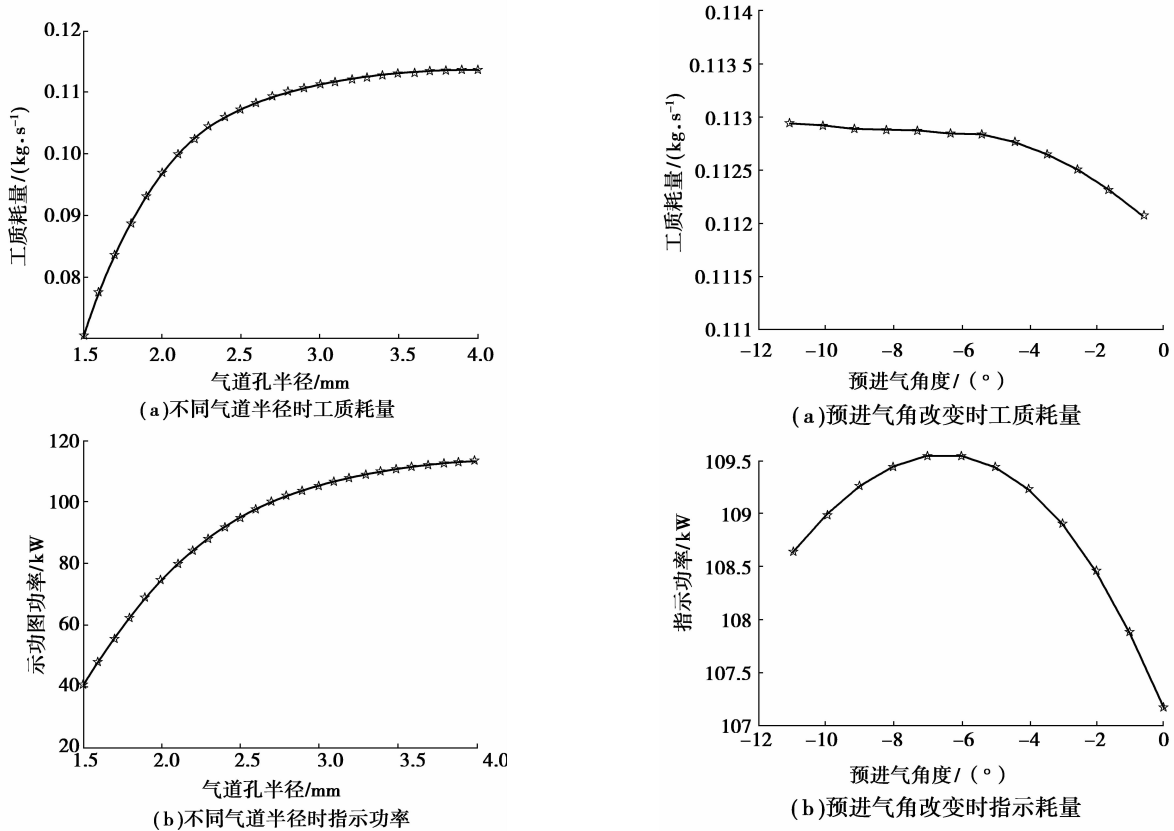


图 3 气道孔直径大小对工质的耗量和功率的影响

由图 4(d)可知,预进气角越小,预进气过程越大,其评比点处压强越大(取转角为 175°时作为评比点,此时,活塞返回离前止点约 0.16 mm,缸内压强需大于一定值才能缓冲活塞的往复惯性力)。当预进气角大于 -5°后,评比点处的压强由压缩程度决定,如果评比点处压强较小,增大预进气过程可以有效增大评比点处的压强,以便产生足够的压强消除活塞由换向产生的冲击。

2.3 进气角的影响

进气角变化主要影响进气过程和膨胀过程,其变化对发动机的影响如图 5(a)~(c)。发动机的功率、耗量和耗量功率比均随着进气角的增大而增大,所以在保证功率的前提下,其进气角较小为宜。

2.4 预排气角的影响

预排气角变化主要影响膨胀过程和排气过程,其变化对发动机的影响如图 6(a)~(c)。由图 6(a)可知,预排气角的变化对发动机工质的耗量没有影响。由图 6(b)~(c)可知,随着预排气角增大,发动机指示功率先增大后减小,存在最大值;当排气背压为 4.5 Mpa,指示功率为最大时的预排气角增大到 75°。这是由于预排气角增大,膨胀过程增加,但是预排气过程减小,活塞在回行时的缸内压强变大,活

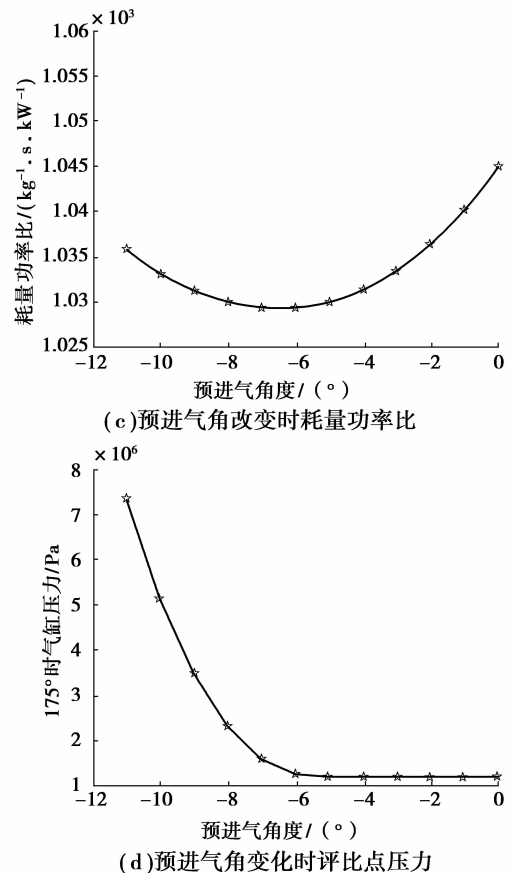


图 4 预进气角变化对压缩过程和预进气过程的影响

塞回行时的阻力功增加,所以预排气角存在着最佳值,发动机指示功率最大。当排气背压增大时,缸内

压强降到背压所需要的预排气过程较小,所以指示功率为最大值的预排气角增大。因此,选择预排气

角应保证活塞在回行开始时,缸内压力降到接近背压值。

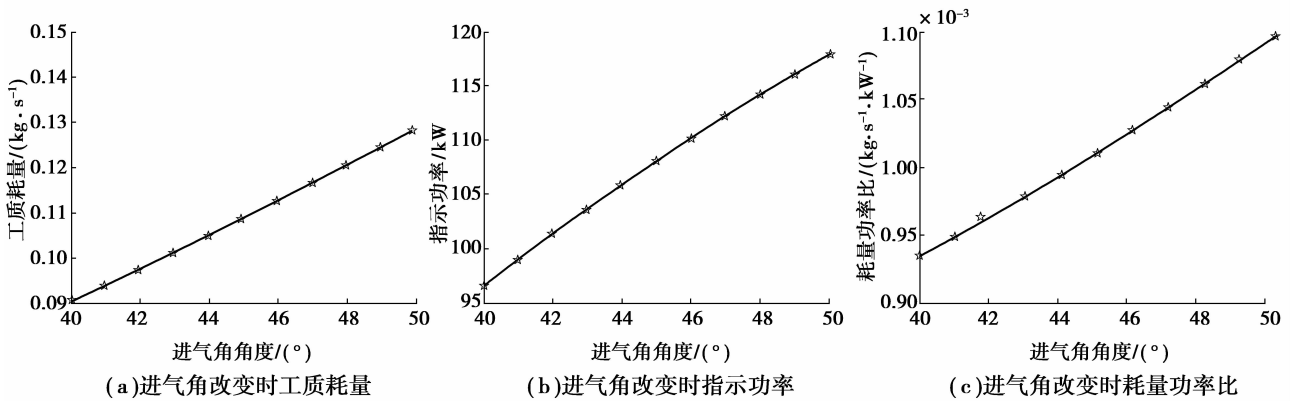


图 5 进气角变化对发动机的影响

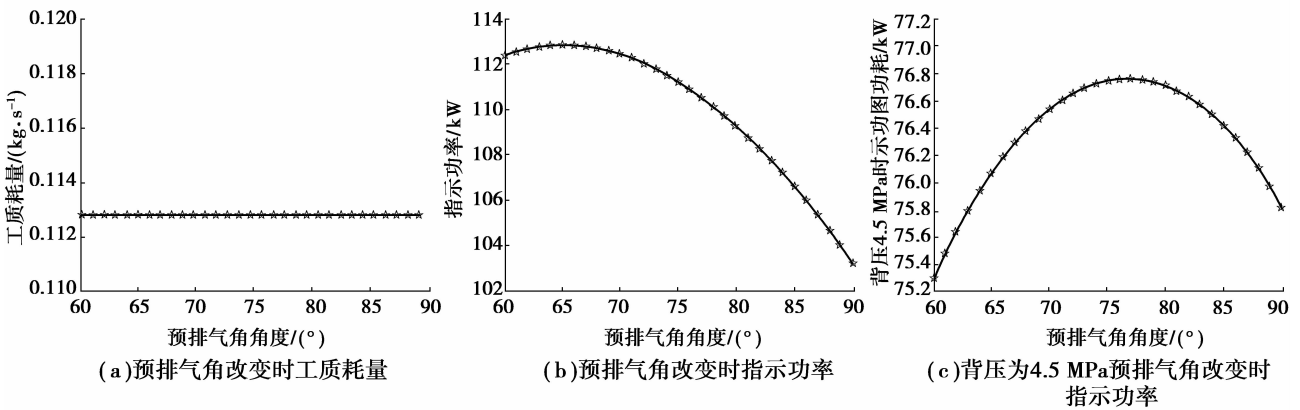
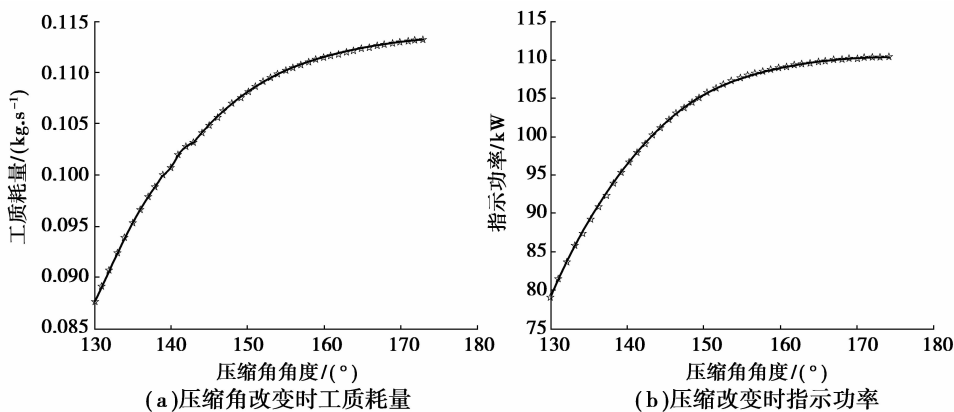


图 6 预排气角对膨胀过程与排气过程的影响

2.5 压缩角的影响

压缩角变化主要影响排气过程和压缩过程,其变化对发动机的影响如图 7(a)~(d)。随着压缩角增大,发动机工质耗量和指示功率均增大,当压缩角超过 150°后,增幅变小。由图 7(c)可知,压缩角在 155° 时,发动机功率耗量比最小。这是由于随着压缩角增

大,排气过程增加,压缩角处的缸内压强降低(如图 7(d)),活塞回行的阻力功减少,发动机指示功率增大;同时,压缩角增大,压缩过程减小,压缩过程结束时缸内压强减小,需要补充的燃气量增加,工质耗量增大。当压缩角超过 150°后,压缩角处的缸内压强降低幅度变小,此时工质耗量和指示功率增幅减小。



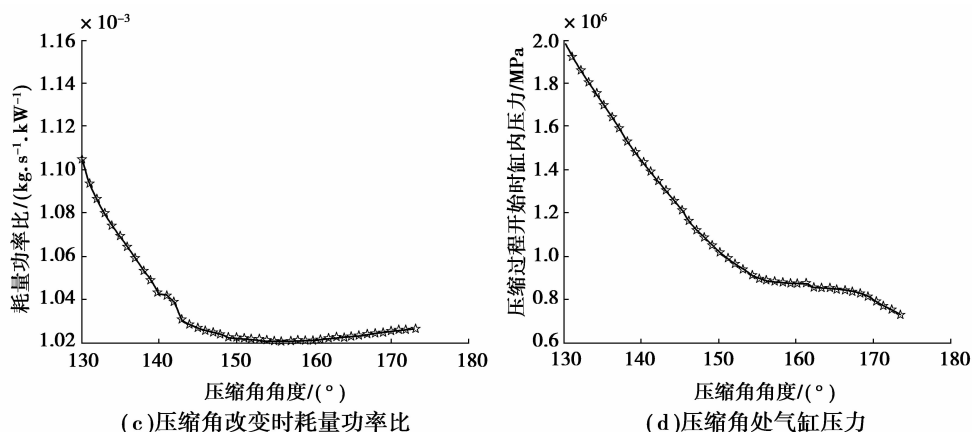


图 7 压缩角变化对排气过程和压缩过程的影响

3 结 论

1) 配气机构的气道孔直径大于某一定值后,其对凸轮活塞发动机耗量和指示功率影响较小。

2) 在保证功率的前提下,进气角较小为宜。

3) 选择使活塞在回行开始时缸内压力降到背压值的预排气角,可以提高发动机的动力性。

4) 运用模型,通过仿真计算评比不同方案,可得到使发动机性能最佳的压缩角、预进气角值。

参考文献:

- [1] 马士杰. 鱼雷热动力装置设计原理[M]. 北京:兵器工业出版社, 1992.
- [2] Manjunatha, Shivanand H K, Manjunath T C. Development of an integrated logistic model in an organization for an automotive application problem[J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2010, 5(6): 658-667.
- [3] XU Q C, WANG S Z, LIAN Y Q. Thermal transfer boundary condition and thermal load of piston for torpedo cam engines [J]. Material Science Forum, 2011, 704/705(619): 619-624.
- [4] Gerzeli I, Baykara C, Kutlar O A. Mechanical design and theoretical analysis of a skip-cycle mechanism for an internal combustion engine[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, 29: 403-410.
- [5] Gao S Y, Zhu Y Y, Wang D S. Thermodynamic modeling and simulation of cam engine with the counter-position placement[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, September 23-26, 2008, Tianjin, China. [S. l.]: [S. n.], 2008:108.
- [6] Gerzeli I, Baykara C, Kutlar O A. Mechanical design

and theoretical analysis of a skip-cycle mechanism for an internal combustion engine[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, 29: 403-410.

- [7] Shabir M F, Tamilporai P, Rajendra P B. Analysis of combustion, performance and emission characteristics of turbocharged LHR extended expansion DI diesel engine [J]. International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering, 2010; 2(2): 126-137.
- [8] Govardhan J, Rao G V S. Evaluation of thermal characteristics of oscillating combustion [J]. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, 2(2):165-173.
- [9] Benny P, Ganesan V. Flow field development in a direct injection diesel engine with different manifolds [J]. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, 2(1):80-91.
- [10] Uddin M N, Ali M M S. Modeling and programming for a computer controlled direct gasoline fuel injection system of SI engine [J]. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 2010, 10(4):6-12.
- [11] 秦凤莲, 毕玉华, 申立中, 等. 柴油机配气机构动力学仿真及优化[J]. 拖拉机与农用运输车, 2010, 37(5): 71-73, 76.
QIN Fenglian, BI Yuhua, SHEN Lizhong, et al. Simulation and optimization of valve train of diesel engine [J]. Tractor & Farm Transporter, 2010, 37(5): 71-73, 76.
- [12] 杨海涛, 夏兴兰, 王胜利, 等. 非道路柴油机进气及喷油系统的虚拟优化匹配[J]. 现代车用动力, 2011(1): 10-15.
YANG Haitao, XIA Xinglan, WANG Shengli, et al. Virtual optimal matching of intake and injection system

- in non-road diesel engine[J]. *Modern Vehicle Power*, 2011(1):10-15.
- [13] 陈宜辉, 王树宗, 昌放辉, 等. 活塞式鱼雷凸轮发动机配气参数优化研究[J]. *舰船科学技术*, 2005, 27(6): 61-62, 66.
CHEN Yihui, WANG Shuzong, CHANG Fanghui, et al. Research on the optimization of the piston cam torpedo engine's gas distribution parameter[J]. *Ship Science Technology*, 2005, 27(6): 61- 62, 66.
- [14] 陈刚, 杨成煜, 梁志军, 等. 对置式凸轮发动机配气机构参数优化[J]. *四川兵工学报*, 2010, 31(3): 89-92.
CHEN Gang YANG Chenyu, LIANG Zhijun, et al. Optimization of the contraposition cam engine's gas distribution parameter[J]. *Sichuan Ordnance Journal*, 2010, 31(3): 89-92.
- [15] 赵连峰. 鱼雷活塞发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1991.
- [16] 左承基, 王斌, 傅秋阳, 等. 配气系统参数对压缩空气发动机性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(4): 211-216.
ZUO Chengji, WANG Bin, FU Qiuyang, et al. Effect of parameters of compressed air system on performances for the engine [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(4): 211-216.

(编辑 张小强)

~~~~~

(上接第 135 页)

- [10] Liu G P, Xia Y, Rees D, et al. Design and stability criteria of networked predictive control systems with random network delay in the feedback channel [J]. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 2007, 37 (2): 173-184.
- [11] 张亚, 田玉平. 带随机分布时延的网络控制系统预估补偿控制[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2009, 39(2): 309-314.  
ZHANG Ya, TIAN Yuping. Predictor-based compensator of networked control systems with random distributed delays[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2009, 39(2):309-314.
- [12] 马长林, 方华京. 基于模型预测的网络化控制系统补偿控制 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30 (2): 363-365.  
MA Changlin, FANG Huajing. Compensation control of networked control systems based on model prediction [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(2): 363-365.
- [13] 李玉清, 方华京, 朱非. 随机时延网络化控制系统的自适应预测控制[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2009, 37(Sup D): 292-296.  
LI Yuqing, FANG Huajing, ZHU Fei. Adaptive predicted control of networked control system with random delays[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2009, 37(Sup D): 292-296.
- [14] 唐斌, 章云, 刘国平, 等. 面向网络诱导时延和数据包丢失补偿的网络化广义预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(7):880-890.  
TANG Bin, ZHANG Yun, LIU Guoping, et al. Networked generalized predictive control for compensation of network-induced time delay and packet loss[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(7):880-890.
- [15] 邵奇可, 俞立, 张贵军. 网络时延的在线估计技术与控制器的协同设计 [J]. *自动化学报*, 2007, 33 (7): 781-784.  
SHAO Qike, YU Li, ZHANG Guijun. Online delay evaluation and controller co-design for networked control systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(7): 781-784.
- [16] 徐立鸿, 冯纯伯. 论广义预测控制[J]. *控制与决策*, 1992, 7(4): 241-246.  
XU Lihong, FENG Chunbo. Reviews of generalized predictive control [J]. *Control and Decision*, 1992, 7(4): 241-246.
- [17] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.

(编辑 侯湘)