

发动机电控冷却系统建模设计与优化^{*}

邓义斌^{1,2} 黄荣华¹ 王兆文¹ 程伟³

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074; 2. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 武汉 430063;
3. 东风汽车有限公司商用车技术中心, 武汉 430056)

【摘要】 根据发动机冷却系统的结构及工作过程,提出简化分析发动机冷却系统的若干假定,在此基础上运用集总参数法建立发动机电控冷却系统的数学模型;对一台发动机的起动过程进行仿真计算,并进行试验验证,结果表明该模型比较合理,适用于发动机冷却系统的动态传热计算;设计了发动机冷却液温度控制系统的控制策略,并进行控制仿真;在传热稳态工况下,进行了冷却系统的能耗优化设计。

关键词: 发动机 冷却系统 集总参数法 建模 控制 优化

中图分类号: TK424.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0031-04

Modeling for Electronic-control Cooling System in Engine and Its Optimization

Deng Yibin^{1,2} Huang Ronghua¹ Wang Zhaowen¹ Cheng Wei³

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China
3. Commercial Vehicle Technical Center, Dongfeng Motor Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract

Some hypotheses were proposed to analyze engine cooling system according to its structure and operating process. Lumped parameter method was used to build a mathematical model for engine electronic-control cooling system on those hypotheses. Then simulation of engine warming up and experimental verification were implemented, and the results showed that the model was reasonable. Furthermore, numerical simulation of engine coolant temperature control system was conducted. Finally, optimal design method of energy consumption in the case of heat transfer steady state was discussed.

Key words Engine, Cooling system, Lumped parameter method, Modeling, Control, Optimization

引言

目前冷却系统的简化建模大多以集总参数法为基础,并且都包含节温器部件^[1-3],但是节温器的迟滞和热惯性等非线性特点使模型变得较复杂,同时增加系统的控制难度。在机械式驱动冷却系统中,节温器是根据冷却液温度的高低自动调节进入换热器的冷却液流量。在电控冷却系统中,由于采用可控变速泵来调节流量,可以取消节温器。本文在提出若干假定的基础上,建立取消节温器或节温器全

开工况下的冷却系统模型,并进行试验验证。在此基础上构建两输入两输出的发动机冷却液温度控制系统,设计相应的控制策略进行仿真研究,并进行冷却系统的能耗优化设计。

1 发动机电控冷却系统建模

1.1 冷却系统模型的建立

发动机及其换热器等部件的实际传热过程非常复杂,为满足冷却系统控制过程的需求,模型应简单,一般采用集总参数法处理,不考虑每个部件内部

水。选取额定转速点 1 900 r/min 和最大扭矩转速点 1 300 r/min 进行分析。

2.2 模型仿真计算

仿真计算中,发动机与冷却液的传热量由热平衡试验得到,冷却液比热容 c_{pc} 为 4.18 kJ/(kg·K),在计算中外部冷却介质的比热容 c_{pa} 、流量 G_f 用外部水的比热容和流量代替。

2.3 试验装置

试验时强制顶开节温器,把小循环堵死,进行节温器全开时发动机暖车过程试验,工况稳定后开始计时,获取该过程发动机出口和换热器出口冷却液处温度变化曲线。图 2 为试验装置结构示意图。

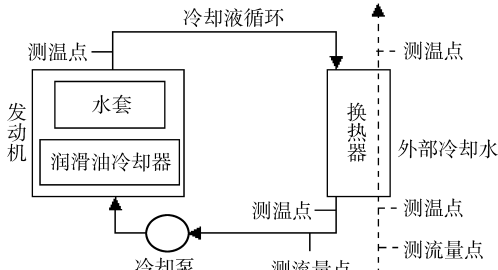


图 2 试验装置示意图
Fig. 2 Diagram of the experimental apparatus

2.4 结果分析

两种工况的计算和试验结果如图 3、图 4 所示。由图 3、图 4 可见,发动机进出口冷却液热平衡温度的计算值略高于实测值,两者比较接近,温度变化趋势也大致相同;暖车过程发动机出口冷却液温度与换热器出口冷却液温度逐渐上升,慢慢趋于热平衡。暖车过程开始的一小段时间里,发动机进出口温度的计算值升高速度稍慢于试验值,计算温度值略低于测量值;随后,计算值上升速度开始逐渐地稍快于试验值,计算温度曲线与测量曲线相交后,计算值略高于测量值,直至热平衡。这是由于计算模型基于集总参数法,假定发动机内部温度场是一致的。然而实际暖车过程是气缸等燃烧室附近部位的温度先升高,随后发动机外围的部位再慢慢升高,这与假定(1)是矛盾的。

由图 5 可见,两种工况下换热器进口外部水温度值在整个试验过程基本保持不变,假定(4)是容易满足的;换热器出口外部水温度逐渐上升,外部水带走的热量逐渐增大,当外部水带走的热量与发动机传给冷却水的热量相等时,整个系统达到热平衡。

3 发动机冷却液温度控制系统设计

3.1 发动机冷却液温度控制系统结构

由发动机冷却系统模型可知,被控对象是一个双输入双输出的系统。输入为冷却液和空气的质量

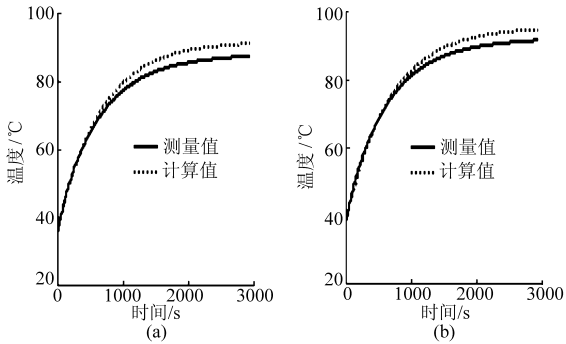


图 3 1 300 r/min (1 150 N·m) 工况暖车曲线
($G_p = 3.8$ kg/s, $G_f = 0.18$ kg/s)

Fig. 3 Warm-up on 1 300 r/min and 1 150 N·m
(a) 发动机进口冷却液温度 (b) 发动机出口冷却液温度

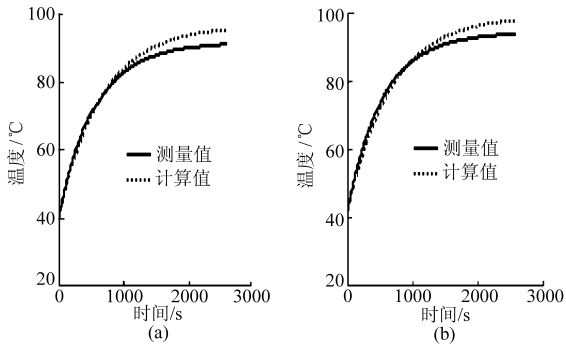


图 4 1 900 r/min (700 N·m) 工况暖车曲线
($G_p = 5.05$ kg/s, $G_f = 0.18$ kg/s)

Fig. 4 Warm-up on 1 900 r/min and 700 N·m
(a) 发动机进口冷却液温度 (b) 发动机出口冷却液温度

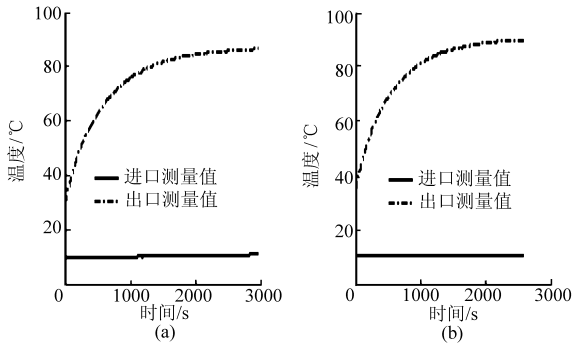


图 5 换热器进出口外部水温度
Fig. 5 External coolant temperature of
heat-exchanger inlet and outlet
(a) 1 300 r/min (b) 1 900 r/min

流量,输出为发动机与散热器出口的冷却液温度。发动机冷却液温度控制系统结构如图 6 所示, T_{ed} 、 T_{rd} 为发动机与散热器出口的冷却液目标温度,实际测量到的温度 T_e 、 T_r 与目标值通过比较器获得偏差信号 E_{Te} 、 E_{Tr} ,控制器根据偏差信号按控制策略计算出相应的控制量,通过水泵和风扇调节各自的质量流量,使发动机冷却液温度值趋向目标值。

3.2 控制策略设计及仿真

根据发动机的冷却过程,为保证发动机的正常

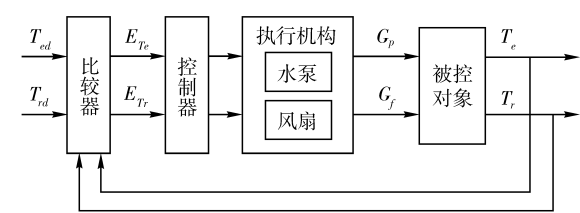


图6 发动机冷却液温度控制系统结构图

Fig.6 Diagram of coolant temperature control system

散热,总是有 $T_e > T_r > T_\infty$,控制律为

$$\begin{cases} G_p = \frac{Q_{in} - C_e(T_{ed} - T_e)K_1}{c_{pc}(T_e - T_r)} \\ G_f = \frac{Q_{in} - C_e(T_{ed} - T_e)K_1 - C_r(T_{rd} - T_r)K_2}{\varepsilon c_{pa}(T_e - T_\infty)} \end{cases} \quad (6)$$

其中 K_1 、 K_2 为调节系数,调节系数的数值越大对目标值的跟随响应越快。由于冷却液和空气只起到冷却作用,所以当控制律计算得到的 G_p 和 G_f 为负值时, G_p 和 G_f 应等于零。

为了解控制系统对目标温度的跟随性能,仿真时发动机和散热器出口冷却液目标温度分别取正弦和余弦曲线。设定燃料燃烧传递给冷却液的热量分别在200、400和600s发生跳变。控制系统的温度跟随效果以及对应的冷却液和空气的质量流量变化如图7所示。

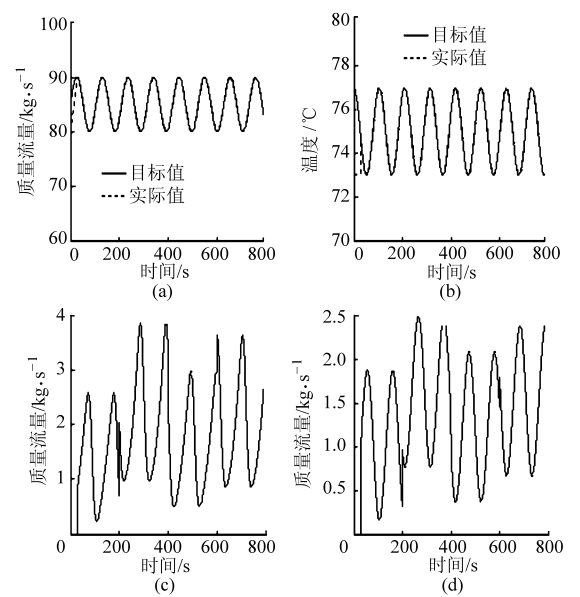


图7 控制仿真结果

Fig.7 Diagram of control system simulation

(a) 发动机出口冷却液温度 (b) 散热器出口冷却液温度

(c) 冷却液质量流量 (d) 空气质量流量

4 传热稳态时冷却系统的能耗优化

在保证冷却可靠的前提下如何降低冷却系统的能耗是发动机热管理的重要研究内容。在冷却系统的数学模型中,模型的输出为 T_e 、 T_r ,其中 T_e 设定为该工况下的最佳冷却液温度值。在传热稳态时,即 $dT_e/dt = 0, dT_r/dt = 0$,有

$$\begin{cases} G_p = \frac{Q_{in}}{c_{pc}(T_e - T_r)} \\ G_f = \frac{Q_{in}}{\varepsilon c_{pa}(T_e - T_\infty)} \end{cases} \quad (7)$$

根据换热器效能 ε 的定义,在传热稳态时可将其看作 T_r 的函数,假定 $\varepsilon = g(T_r)$ 。设 T_e 为最佳冷却液温度,即保证了冷却最优的前提,此时不同的 T_r 将对应不同的 G_p 、 G_f 组合。在电控冷却系统中由于取消了节温器,所以电控水泵的流量即为 G_p 。在这些组合中找到系统能耗最小的方案也就是冷却系统的能耗优化设计^[6-7]。按流量与转速呈正比、功耗与转速的三次方呈正比的关系,可得目标函数为

$$\min_G f(T_r) = k_1 \left[\frac{Q_{in}}{c_{pc}(T_e - T_r)} \right]^3 + k_2 \left[\frac{Q_{in}}{g(T_r)c_{pa}(T_e - T_\infty)} \right]^3 \quad (8)$$

式中 G ——约束条件 k_1 、 k_2 ——比例系数

此方程为一条开口向上的曲线,最低点的坐标值 T_r 值对应的 G_p 、 G_f 即为能耗最低点。

5 结论

(1)根据发动机冷却系统的结构及工作过程,提出发动机冷却系统的若干简化假定,用集总参数法建立冷却系统的数学模型。该模型适用于取消节温器的电控式冷却系统,也适用于节温器全开工况的机械驱动式冷却系统。应用该模型进行了发动机暖车过程的仿真计算,与暖车试验结果相比,两者比较接近,表明所建模型比较合理。

(2)根据所建模型,设计了双输入双输出的发动机冷却液温度控制系统;仿真结果表明,控制系统的跟随效果较好,控制策略设计合理。

(3)在传热稳态情况下,通过对冷却系统的能耗进行优化设计,可以求出冷却系统能耗最少的冷却液流量与外部冷却介质流量。

参 考 文 献

1 Wagner J R, Srinivasan V, Dawson D. Smart thermostat and coolant pump control for engine thermal management systems [C]. SAE Paper 2003-01-0272, 2003.

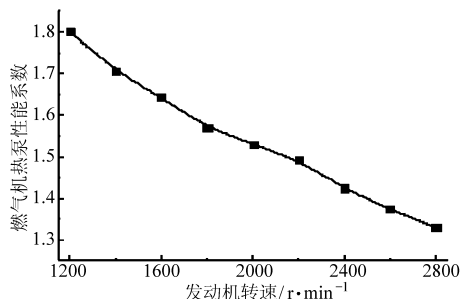


图7 发动机转速与 P_{ER} 关系

Fig.7 Relationship between the rotary speed of engine and P_{ER}

4 结论

(1) 燃气机发动机余热较大, 品位较高, 合理

充分利用发动机余热可以显著提高燃气机热泵的性能。

(2) 利用发动机余热进行除霜, 除霜热量占余热回收总量的比值为 6.5% ~ 9.5%; 不同除霜周期, 制冷剂气化热量占回收余热总量的比值变化较大, 但最大不超过 45%, 从能量平衡角度看是可行的, 并且可以克服传统四通阀换向除霜、热气旁通和显热除霜的弊端。

(3) 利用发动机余热供暖, 冷却水加热供热热水后, 温度下降 5 ~ 8℃, 在不影响发动机运行的前提下, 可以显著提高燃气机热泵的性能, C_{op} 可以提高 30%, 一次能源利用率在 1.3 ~ 1.8。

参 考 文 献

- 1 Yang Zhao, Zhao Haibo, Li Xihong. Characteristic analysis of water heater-chiller unit driven by natural-gas engine [J]. International Journal of Green Energy, 2005, 2(1): 79 ~ 89.
- 2 Payne V, O'Neal D L. Defrost cycle performance for an air-source heat pump with a scroll and a reciprocating compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18(2): 107 ~ 112.
- 3 梁彩华, 张小松, 巢龙兆, 等. 显热除霜方式与逆向除霜方式的对比试验研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(4): 20 ~ 24. Liang Caihua, Zhang Xiaosong, Chao Longzhao, et al. Experimental comparison of sensible heat defrost and the conventional reverse cycle defrost [J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(4): 20 ~ 24. (in Chinese)
- 4 徐振军, 杨昭. 沼气机热泵复合式空调系统数值计算与能耗分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 118 ~ 121. Xu Zhenjun, Yang Zhao. Numerical calculation and energy consumption analysis for air condition system driven by biogas engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 118 ~ 121. (in Chinese)
- 5 杨建华, 龚金科, 吴义虎. 内燃机性能提高技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- 6 向飞, 王立, 岳献芳. 柴油发电机驱动的热泵干燥系统开发与优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 75 ~ 80. Xiang Fei, Wang Li, Yue Xianfang. Development and optimization of a heat pump drying system driven by a diesel generator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 75 ~ 80. (in Chinese)
- 7 Yang Zhao, Zhao Haibo, Fang Zheng. Modeling and dynamic control simulation of unitary gas engine heat pump [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(12): 3 146 ~ 3 153.

(上接第 34 页)

- 2 韩树, 蔡锋, 骆清国, 等. 车用发动机冷却系统控制仿真研究综述[J]. 内燃机, 2008(5): 1 ~ 4. Han Shu, Cai Feng, Luo Qingguo, et al. Summarization of research on the vehicle engine cooling system control simulation [J]. Internal Combustion Engines, 2008(5): 1 ~ 4. (in Chinese)
- 3 肖成永, 李健, 张建武. 发动机冷却系统的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2003, 20(9): 39 ~ 42. Xiao Chengyong, Li Jian, Zhang Jianwu. A numerical modeling and simulation for truck engine cooling system [J]. Computer Simulation, 2003, 20(9): 39 ~ 42. (in Chinese)
- 4 刘毅, 周大森, 张红光. 车用内燃机冷却系统动态传热模型[J]. 内燃机工程, 2007, 28(3): 49 ~ 51. Liu Yi, Zhou Dasen, Zhang Hongguang. A dynamic simulation model for cooling system of vehicle internal combustion engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3): 49 ~ 51. (in Chinese)
- 5 Salah M. Nonlinear control strategies for advanced vehicle thermal management strategies [D]. Clemson: Clemson Univ., 2007.
- 6 Setlur P, Wagner J R, Dawson D M, et al. An advanced engine thermal management system: nonlinear control and test [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(2): 210 ~ 220.
- 7 Salah M H, Mitchell T H, Wagner J R, et al. Nonlinear-control strategy for advanced vehicle thermal management systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(1): 127 ~ 137.