

环境适应性设计与分析

车辆冷却系统高原热平衡性能研究

许翔^{1,2}, 王丹², 徐俊芳², 王普凯³, 刘刚⁴

(1.中汽研(常州)汽车工程研究院有限公司, 江苏 常州 213164; 2.中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300300; 3.陆军装甲兵学院, 北京 100072; 4.陆军军事交通学院, 天津 300161)

摘要: 目的 分析海拔高度(大气压力)、环境温度、冷却液温度以及冷却风量等对车辆冷却系统高原散热性能的影响。方法 采用模拟试验与仿真相结合的方法。结果 海拔升高1000 m, 发动机水套散热量平均增加约5.3%; 冷却液温度升高10 °C, 发动机水套散热量平均降低约14.5%; 海拔升高1000 m, 若保持发动机热平衡状态不变(出口冷却液温度恒定), 散热器入口冷却空气流量需增大约8.8%。结论 以发动机热平衡状态保持恒定为目标, 计算得到了散热器冷却风量随发动机转速、负荷以及海拔高度的变化MAP图, 为高原地区车辆冷却系统匹配设计以及优化提供了参考。

关键词: 车辆; 发动机; 冷却系统; 高海拔; 散热; 热平衡

中图分类号: TK422

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)02-0001-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.001

Study on the Heat Balance Performance of Vehicle Cooling System at Altitude Conditions

XU Xiang^{1,2}, WANG Dan², XU Jun-fang², WANG Pu-kai³, LIU Gang⁴

(1. CATARC (Changzhou) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd. Changzhou, Jiangsu 213164, China;

2. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd. Tianjin 300300, China; 3. Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China; 4. Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

ABSTRACT: This study aims to analyze the effects of altitude (atmospheric pressure), ambient temperature, coolant temperature and cooling air volume on the heat dissipation performance of vehicle cooling system at altitude conditions. The means of test and simulation were used to the study. The results show that, the heat dissipation from the engine water jacket increases by 5.3% with the altitude increase by 1,000 m; the heat dissipation from the engine water jacket decreases by 14.5% with the coolant temperature increase by 10 °C. With the altitude increase by 1,000 m, if the engine heat balance state remains unchanged (outlet coolant temperature remains constant), the cooling air volume at radiator inlet should increase by about 8.8%. With the goal of keeping the engine heat balance constant, the MAP of cooling air volume of radiator changing with the engine speed, load and altitude was calculated, which provides a reference for the matching design and optimization of the vehicle cooling system at altitude conditions.

收稿日期: 2020-08-06; 修订日期: 2020-10-19

Received: 2020-08-06; Revised: 2020-10-19

基金项目: 天津市科技支撑重点项目(20YFZCGX00580), 常州市领军人才创新项目(CQ20200020)

Fund: Tianjin Science and Technology Support Project (20YFZCGX00580) and Changzhou Leading Talents Innovation Project (CQ20200020)

作者简介: 许翔(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为汽车热管理技术。

Biography: XU Xiang (1978—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: automotive thermal management technology.

引文格式: 许翔, 王丹, 徐俊芳, 等. 车辆冷却系统高原热平衡性能研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 001-005.

XU Xiang, WANG Dan, XU Jun-fang, et al. Study on the heat balance performance of vehicle cooling system at altitude conditions [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 001-005.

KEY WORDS: vehicle; engine; cooling system; high altitude; heat dissipation; heat balance

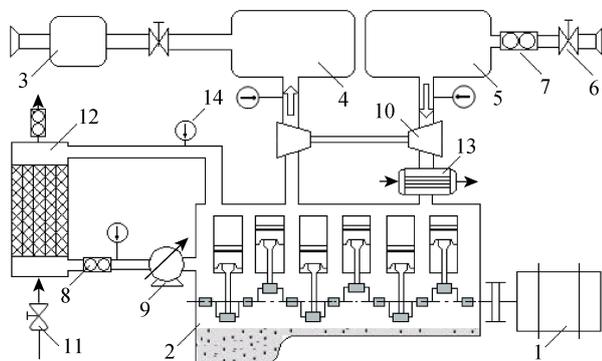
我国拥有世界上海拔最高、面积辽阔的高原。由于高原大气压力和空气密度低,车辆普遍存在动力下降明显、油耗和热负荷大、冷却系统散热能力严重不足等问题,导致发动机“开锅”、汽缸垫和排气管烧损、拉缸等故障频发^[1-5]。根本原因是设计车辆冷却系统时未考虑高原环境条件对冷却系统散热性能的影响,冷却系统散热能力不能满足车辆的高原散热需求^[6]。因此,研究高原环境条件对车辆及发动机冷却系统热平衡性能的影响规律,确定不同海拔与运行工况下冷却系统的最佳运行参数,对于车辆冷却系统的高原优化匹配设计,提高车辆的高原环境适应性具有重要意义。

文中通过高原模拟试验与仿真相结合的方法,研究了高原环境条件对发动机热平衡性能以及车辆冷却系统散热性能的影响规律,分析了海拔高度(大气压力)、环境温度、冷却液温度以及冷却风量等对车辆冷却系统散热性能的影响,为车辆冷却系统匹配、优化以及控制提供了依据。

1 发动机高原热平衡模拟试验

1.1 试验系统

发动机是车辆冷却系统的主要热源,为了获得发动机在不同海拔、运行工况和冷却条件下传给冷却液的热量,为车辆冷却系统高原热平衡性能仿真提供边界数据,设计了发动机高海拔(低气压)热平衡模拟试验系统(见图1)。该系统主要包括发动机进排气压力与温度模拟系统、电涡流测功机、瞬态油耗仪、冷却液恒温装置、中冷恒温装置、电控水泵以及各种流量、温度和压力传感器。试验系统具有以下功能和特点:试验过程中发动机的进气温度和进排气压力可



1-测功机; 2-发动机; 3-真空泵; 4-排气稳压箱; 5-进气稳压箱; 6-电动蝶阀; 7-进气流量计; 8-水流量计; 9-变频水泵; 10-增压器; 11-外水源阀门; 12-冷却液恒温装置; 13-中冷恒温装置; 14-温度计

图1 发动机高海拔热平衡模拟试验系统

Fig.1 Sketch of the engine high altitude heat balance simulation test system

控,可以模拟发动机在0~6000 m海拔范围内的工作状态;发动机冷却系统的运行参数可控,即冷却液流量和温度可根据试验需要进行精确控制。试验用发动机的主要技术参数见表1。

表1 发动机技术参数
Tab.1 Technical parameters of engine

项目	参数
型式	直喷、6缸、增压柴油机
缸径×行程	110 mm×135 mm
压缩比	17.5
额定功率	235 kW (2100 r/min)
最大扭矩	1250 N·m (1500 r/min)
喷射方式	高压共轨

1.2 试验结果

假设发动机的燃料充分燃烧,则燃烧产生的总热量 Q_0 可以分为以下几个部分:转化为有效功的热量 Q_e 、排气带走的热量 Q_{ex} 、冷却液带走的热量 Q_w 以及余项热损失 Q_{res} (包括发动机摩擦损失、机体和油底壳等表面的散热量及其他能量损失)。

$$Q_0 = Q_e + Q_{ex} + Q_w + Q_{res} \quad (1)$$

在发动机进排气压力和进口冷却液温度控制的条件下,进行了发动机变海拔热平衡模拟试验。发动机进口冷却液温度 80°C 时,发动机水套散热量随海拔高度和转速的变化如图2所示。海拔每升高1000 m,发动机水套散热量平均增加5.3%。由于海拔升高使发动机进气量减少,进而使缸内燃烧不充分,后燃严重,发动机缸内工质以及活塞和缸体等部件温度升高,导致发动机通过冷却水套传给冷却液的热量随着海拔升高明显增大。

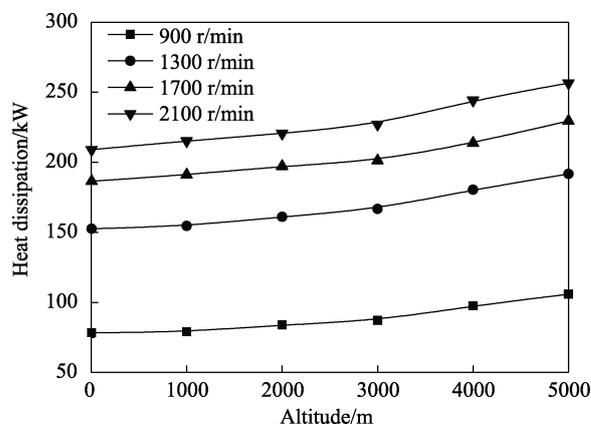


图2 发动机水套散热量随海拔高度的变化

Fig.2 Change of heat dissipation of the engine water jacket with the altitude

发动机水套散热量随海拔高度和发动机入口冷却液温度的变化如图3所示。冷却液温度每升高

10 ℃，水套散热量平均降低约 14.5%。当海拔高度、冷却液温度和循环流量一定时，影响水套散热量的主要因素是发动机缸内燃气平均温度和冷却液与发动机水套之间的换热系数。由于海拔高度和冷却液温度对缸内燃气与气缸壁面之间的换热系数影响较小^[7]。高原发动机气缸内平均燃烧温度升高^[8-9]，使缸内燃气和冷却液之间的温差变大，随着冷却液温度的升高，海拔越高发动机水套的散热量下降幅度越明显。

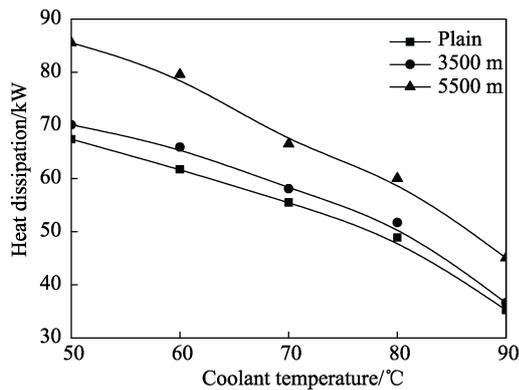


图 3 不同海拔下发动机水套散热量随冷却液温度的变化
Fig.3 Change of heat dissipation of the engine water jacket with the coolant temperature at different altitudes

2 车辆冷却系统仿真模型

基于 FlowMaster 软件建立的车辆冷却系统仿真

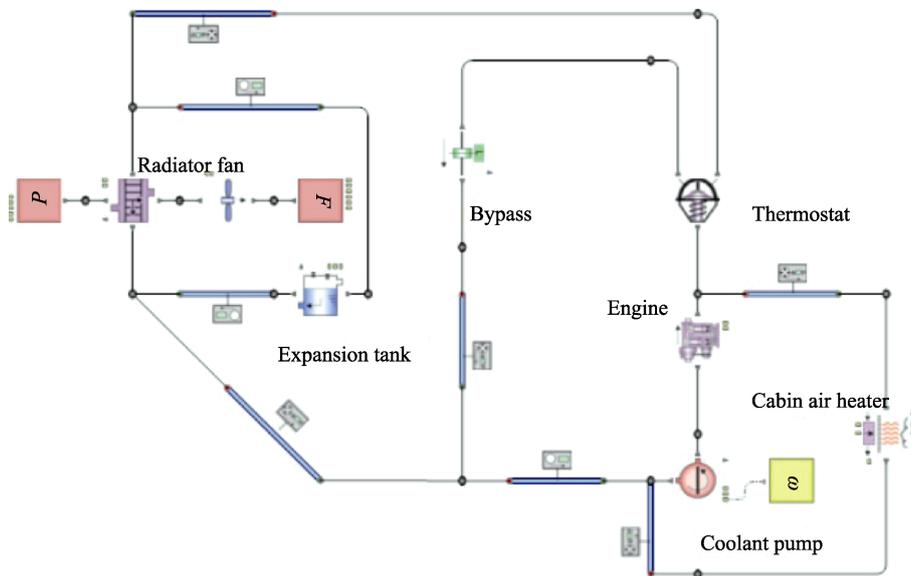


图 4 车辆冷却系统仿真模型
Fig.4 Simulation model of vehicle cooling system

3 仿真结果及分析

不同散热器进口风速下，流经散热器的冷却空气质量流量随海拔高度的变化如图 5 所示。冷却空气的质量流量随着海拔的升高而显著降低。当海拔从 0 m 升高到 5500 m 时，冷却空气的质量流量平均下降约

模型如图 4 所示。仿真模型中，水泵、节温器和散热器等关键部件的流阻特性和传热特性根据零部件实验数据确定。发动机传给冷却液的热量由发动机高原热平衡模拟试验提供。

散热器是车辆冷却系统的关键散热部件，也是受高原环境影响最大的冷却系统部件。在高原地区，由于海拔高度对空气的压力、密度、温度和运动黏度等物性参数有显著的影响，进而影响流经散热器冷却空气的质量流量和散热器的传热系数。研究表明，随着海拔的升高，流经散热器空气的流量和雷诺数减小，导致散热器的换热系数随海拔升高而减小。因此，在进行车辆冷却系统高原散热性能仿真时，必须对散热器的传热模型进行海拔高度的修正。具体修正方法可以参考文献[10]。

为了验证冷却系统模型高原仿真的精度，利用某型车辆冷却系统在海拔 4200~4700 m 条件下，2 挡爬 8% 坡时的道路热平衡试验数据，对仿真模型进行了对比。发动机进出口冷却液温度的仿真结果与试验值对比见表 2，仿真精度满足工程计算的需要。

表 2 仿真结果与试验值的对比
Tab.2 Comparison between simulation results and test values

项目	试验值/°C	仿真值/°C	误差/%
发动机进口温度	88.4	91.5	3.5%
发动机出口温度	95.5	97.9	2.5%

50.2%。

冷却系统散热量和发动机出口冷却液温度随环境温度的变化如图 6 所示。环境温度每降低 10 ℃，冷却系统的散热量平均增大 16.4%，散热器出口冷却液温度平均下降 2 ℃。高原地区，年平均气温较低，海拔升高 1000 m，大气温度平均下降约 6 ℃。由于

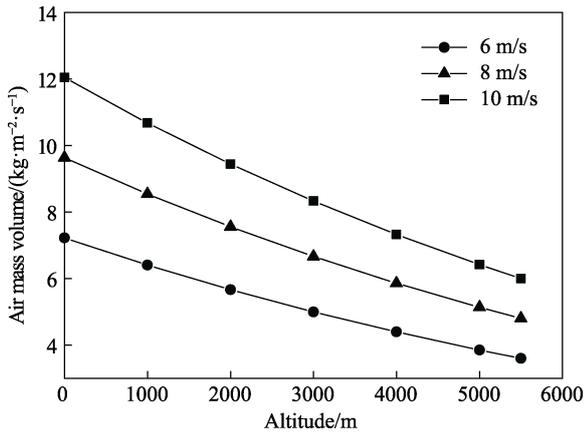


图5 不同海拔下的冷却空气质量流量
Fig.5 Mass flow rate of cooling air at different altitudes

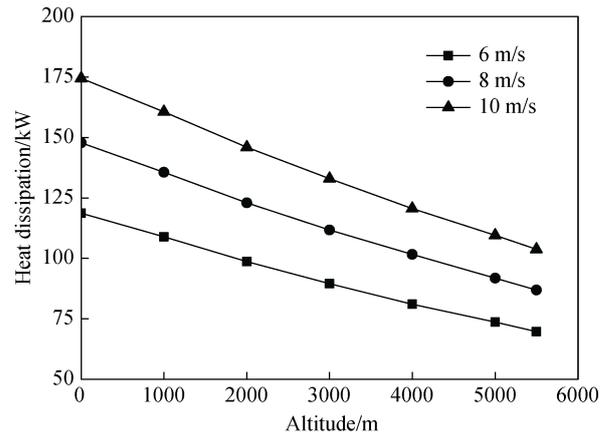


图7 冷却系统散热量随海拔的变化
Fig.7 Change of heat dissipation of the cooling system with the altitudes

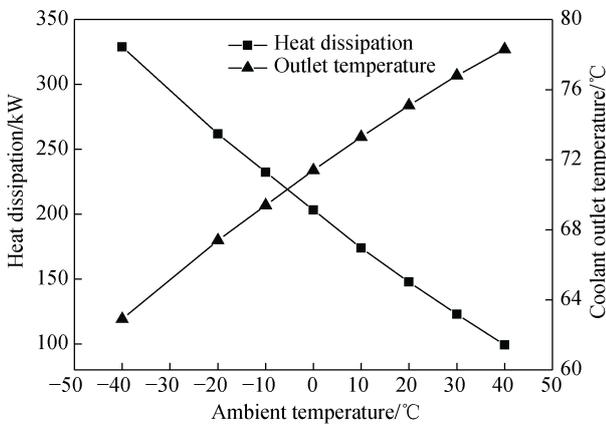


图6 散热量和出口冷却液温度随环境温度的变化
Fig.6 Change of heat dissipation and outlet coolant temperature with ambient temperature

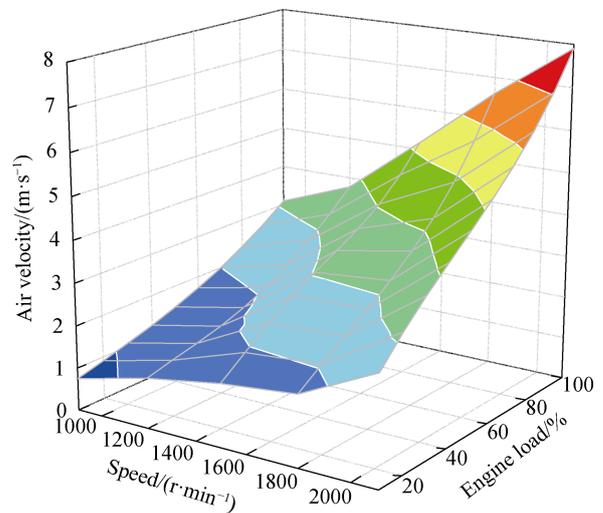


图8 空气流速-发动机转速-负荷 MAP 图
Fig.8 Air velocity - engine speed - engine load MAP

温度对冷却空气的密度等物性参数以及散热器的换热系数都有显著的影响,高原低温环境条件对发动机冷却系统散热是有利的。

当环境温度为 25 °C、发动机出口冷却液温度为 86 °C 时,不同海拔高度和散热器迎面风速对冷却系统散热量的影响如图 7 所示。当海拔高度从平原升高到 5500 m 时,冷却系统的散热量分别下降 41.2%。5500 m 海拔下,冷却系统的散热量仅为平原的 58.8%。海拔每升高 1000 m,散热量下降 9.0%。冷却系统散热能力降低会导致发动机达到热平衡时冷却液的温度明显升高。

平原条件下,环境温度为 25 °C,发动机出口冷却液温度保持在 86 °C 时,散热器入口冷却空气流速随发动机转速和负荷变化的 MAP 图见图 8。

当环境温度为 25 °C,额定转速下发动机出口冷却液温度保持在 86 °C 时,散热器入口空气流速随发动机负荷和海拔高度变化的 MAP 图见图 9。

环境温度为 25 °C,额定工况下发动机出液温度保持在 86 °C 时,散热器入口冷却空气流速和流量随海拔的变化如图 10 所示。与平原相比,海拔 5500 m

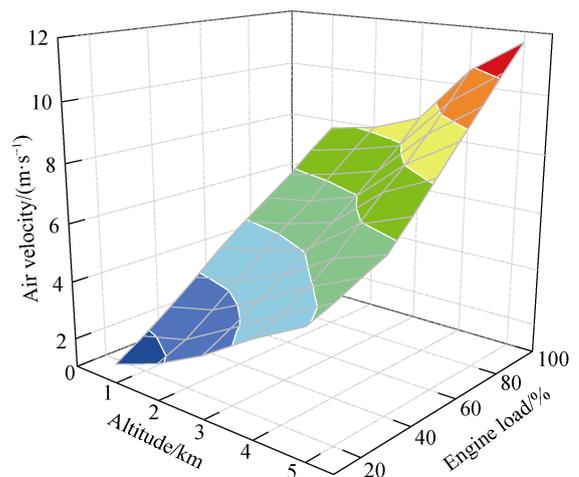


图9 空气流速-发动机负荷-海拔高度 MAP 图
Fig.9 Air velocity - engine load - altitudes MAP

时冷却系统所需的冷却空气流量增大了 48.2%。海拔平均每升高 1000 m,冷却系统所需的冷却空气流

量平均增大 8.8%。在相同环境温度、转速及负荷条件下，为了保持相同的发动机热平衡状态（出口冷却液温度一定），冷却系统的散热能力必须随着海拔的升高而增大，而且海拔越高，增大幅度越大，冷却风扇的转速（流量）必须根据海拔高度的变化进行调节控制。

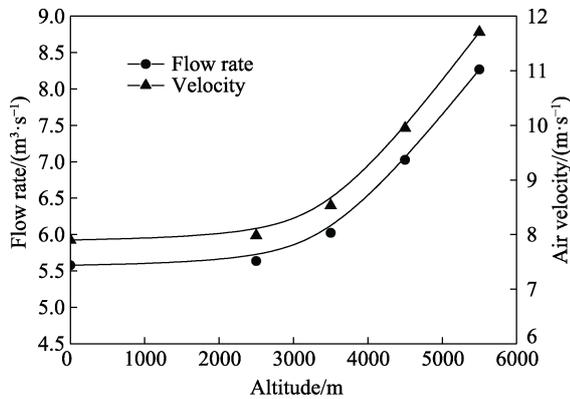


图 10 冷却空气流量和流速随海拔高度的变化

Fig.10 Change of cooling air flow rate and velocity with the altitudes

4 结语

1) 随着海拔高度增加，发动机进气量减少、缸内燃烧不充分、后燃严重等导致发动机热负荷增大，发动机通过冷却水套传给冷却液的热量明显增大。海拔升高 1000 m，发动机水套散热量平均增加 5.3%。冷却液工作温度每升高 10 °C，发动机水套散热量平均降低约 14.5%。

2) 随着海拔高度的增加，冷却系统的空气质量流量降低和散热器的换热系数减小是导致车辆冷却系统散热性能显著下降的主要原因。在相同工况和环境温度下，海拔每升高 1000 m，保持相同的发动机冷却液工作温度，冷却系统所需的冷却空气流量平均增大约 8.8%。

3) 海拔高度（大气压力）和环境温度、冷却液温度以及散热器迎面风速等环境条件和冷却系统运行参数都对车辆冷却系统的散热性能产生显著影响。在高海拔地区，冷却系统的运行参数必须进行主动调节与控制才能适应海拔变化对冷却系统散热能力造成的不良影响。

参考文献：

[1] 刘瑞林, 董素荣, 许翔. 柴油机高原环境适应性研究 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.

- LIU Rui-lin, DONG Su-rong, XU Xiang. Research on plateau environment adaptability of diesel engine[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [2] 王宪成, 郭猛超, 张晶, 等. 高原环境重型车用柴油机热负荷性能分析[J]. 内燃机工程, 2012, 33(1): 49-53. WANG Xian-cheng, GUO Meng-chao, ZHANG Jing, et al. Thermal load analysis of heavy duty vehicular diesel engine in plateau area[J]. Chinese internal combustion engine engineering, 2012, 33(1): 49-53.
- [3] YU Lin-xiao, GE Yun-shan, TAN Jian-wei, et al. Experimental investigation of the impact of biodiesel on the combustion and emission characteristics of a heavy duty diesel engine at various altitudes[J]. Fuel, 2014, 115: 220-226.
- [4] JUNG D B, YONG J W, CHOI H Y, et al. Analysis of engine temperature and energy flow in diesel engine using engine thermal management[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(2): 583-592.
- [5] BENJUMEA P, AGUDELO J, AGUDELO A. Effect of altitude and palm oil biodiesel fueling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine[J]. Fuel 2009, 88(4): 725-731.
- [6] 许翔, 刘瑞林, 刘刚, 等. 大气压力对柴油机冷却系统热平衡影响的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(7): 592-595. XU Xiang, LIU Rui-lin, LIU Gang, et al. A research on the effects of atmospheric pressure on the thermal balance of cooling system in diesel engine[J]. Automotive engineering, 2012, 34(7): 592-595.
- [7] 刘建敏, 康琦, 王普凯, 等. 高原环境下柴油机冷却系统性能仿真[J]. 车用发动机, 2018(3): 16-22. LIU Jian-min, KANG Qi, WANG Pu-kai, et al. Simulation of diesel engine cooling system in plateau environment[J]. Vehicle engine, 2018(3): 16-22.
- [8] 周广猛, 刘瑞林, 董素荣, 等. 高压共轨柴油机高海拔燃烧温度特性[J]. 内燃机学报, 2016, 34(4): 296-303. ZHOU Guang-meng, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. Combustion temperature characteristics of a common rail diesel engine under high altitude conditions[J]. Transactions of csice, 2016, 34(4): 296-303.
- [9] 赵伟, 葛蕴珊, 陆红雨, 等. 电控共轨柴油机海拔特性仿真[J]. 汽车工程, 2014, 36(1): 32-37. ZHAO Wei, GE Yun-shan, LU Hong-yu, et al. A simulation on the altitude characteristics of electronically-controlled common rail diesel engine[J]. Automotive engineering, 2014, 36(1): 32-37.
- [10] 许翔, 索文超, 杨定富, 等. 车用散热器高原传热性能仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(8): 3146-3153. XU Xiang, SUO Wen-chao, YANG Ding-fu, et al. Heat transfer simulation of vehicle heat exchanger in plateau environment[J]. Journal of system simulation, 2018, 30(8): 3146-3153.