

1-8-2019

Heat Transfer Simulation of Vehicle Heat Exchanger in Plateau Environment

Xu Xiang

1. Department of Military Vehicle, Military Transportation University, Tianjin 300161, China;;

Wenchao Suo

2.Primary Non-Commissioned Officer Training Base, Army Aviation Institute, Beijing 101123, China;;

Dingfu Yang

3.Automotive Proving Ground of Army, Dingyuan 233200, China;

Surong Dong

1. Department of Military Vehicle, Military Transportation University, Tianjin 300161, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Heat Transfer Simulation of Vehicle Heat Exchanger in Plateau Environment

Abstract

Abstract: The effect of heat transfer caused by plateau environment in vehicle heat exchanger was investigated. *The heat transfer equation for heat exchanger was modified by introducing air parameters at different altitudes.* A heat transfer modeling approach for vehicle heat exchanger was proposed by using the thermal network method. The heat transfer effect of the plateau and the flow state of fluid medium were analyzed in the vehicle heat exchanger by using the simulation software FlowMaster. *Simulation results show that the decrease of pressure and density of air in altitude was the primary cause to heat transfer ability.* With the altitude increasing and airflow velocity decreasing, the Re of airflow decreased while the flow state of air in the channel changed from turbulence to laminar state, therefore the convective heat transfer strength declined; and the heat transfer coefficient and the heat transfer ability of heat exchanger both decreased. *With every 1 000 m rising in altitude, the heat transfer coefficients of air side and the heat emission of heat exchanger declined by 9.5% and 9.0% respectively.*

Keywords

heat exchanger, plateau, thermal network method, heat transfer, simulation

Recommended Citation

Xu Xiang, Suo Wenchao, Yang Dingfu, Dong Surong. Heat Transfer Simulation of Vehicle Heat Exchanger in Plateau Environment[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3146-3153.

车用散热器高原传热性能仿真研究

许翔¹, 索文超², 杨定富³, 董素荣¹

(1. 军事交通学院军用车辆系, 天津 300161; 2. 陆军航空兵学院预选士官训练基地, 北京 101123; 3. 陆军汽车试验场, 定远 233200)

摘要: 研究高原环境对车用散热器传热性能的影响机理, 依据空气特性参数随海拔高度的变化规律, 对散热器传热公式进行修正。基于热网络法, 采用 FlowMaster 软件建立车用散热器传热仿真模型, 研究海拔高度和传热介质流量对散热器传热性能的影响规律。结果表明: 大气压力和空气密度减小是车用散热器高原传热性能显著下降的主要原因, 随着海拔升高和冷却空气流速减小, 空气侧换热通道内冷却空气的雷诺数减小, 冷却空气的流动状态从湍流渐变为层流, 对流换热强度下降, 进而使散热器传热系数减小, 导致散热器的高原散热能力下降。海拔每升高 1 000 m, 散热器空气侧对流换热系数和散热量分别下降约 9.5% 和 9.0%。

关键词: 散热器; 高原; 热网络; 传热性能; 仿真

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-3146-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808040

Heat Transfer Simulation of Vehicle Heat Exchanger in Plateau Environment

Xu Xiang¹, Suo Wenchao², Yang Dingfu³, Dong Surong¹

(1. Department of Military Vehicle, Military Transportation University, Tianjin 300161, China; 2. Primary Non-Commissioned Officer Training Base, Army Aviation Institute, Beijing 101123, China; 3. Automotive Proving Ground of Army, Dingyuan 233200, China)

Abstract: The effect of heat transfer caused by plateau environment in vehicle heat exchanger was investigated. The heat transfer equation for heat exchanger was modified by introducing air parameters at different altitudes. A heat transfer modeling approach for vehicle heat exchanger was proposed by using the thermal network method. The heat transfer effect of the plateau and the flow state of fluid medium were analyzed in the vehicle heat exchanger by using the simulation software FlowMaster. Simulation results show that the decrease of pressure and density of air in altitude was the primary cause to heat transfer ability. With the altitude increasing and airflow velocity decreasing, the Re of airflow decreased while the flow state of air in the channel changed from turbulence to laminar state, therefor the convective heat transfer strength declined; and the heat transfer coefficient and the heat transfer ability of heat exchanger both decreased. With every 1 000 m rising in altitude, the heat transfer coefficients of air side and the heat emission of heat exchanger declined by 9.5% and 9.0% respectively.

Keywords: heat exchanger; plateau; thermal network method; heat transfer; simulation

引言

我国拥有世界上海拔最高、面积辽阔的高原,



收稿日期: 2016-11-03 修回日期: 2016-12-30;
基金项目: 军队科研项目(2012ZL500.40407030103);
作者简介: 许翔(1978-), 男, 甘肃榆中, 博士, 副教授, 研究方向为车用发动机热平衡控制; 索文超(1979-), 男, 河北, 博士, 讲师, 研究方向为军用车辆性能仿真与优化。

恶劣的高原环境对车用发动机的动力性、经济性、起动性、排放性以及冷却传热等性能产生诸多不利的影响^[1-2]。散热器是车辆冷却系统的重要组成部分和关键散热部件, 散热器的散热能力受空气的特性参数(温度、压力、密度等)影响较大, 而不同海拔高度下空气的特性参数差别很大^[3]。但是通常情况下进行车用散热器设计和传热计算时, 忽略了海拔高度对其传热性能的影响。高海拔地区空气密度

<http://www.china-simulation.com>

• 3146 •

小, 空气特性参数的改变导致散热器的传热系数和冷却空气的质量流量均减小, 使车辆冷却系统的散热能力明显下降, 最终导致车用发动机在高原工作时热负荷增大, 过热现象频发。研究高原环境条件对车用散热器传热性能的影响, 准确计算散热器的高原传热性能, 对合理设计和匹配车用散热器, 保证车用发动机在合理的热平衡状态下工作, 进而提高车用发动机的高原环境适应性具有重要意义。

目前, 对车用散热器在平原环境条件下的流动与传热问题研究较多, 而高原环境条件下车用散热器的传热研究鲜有报道。在已有研究中, 散热器的传热计算方法主要有对数温差法、效能-传热单元数法(ϵ -NTU)^[4]、CFD 数值算法^[5-8]、神经网络法(neural networks method)^[9]和热网络法(thermal network method)^[10-13]等。以上散热器传热计算方法在计算速度、计算精度以及对计算机性能和软件的要求等方面各有优缺点。作为传统的散热器传热计算方法, 对数温差法和 ϵ -NTU 法计算过程相对简单和快捷, 但是计算精度不够高。虽然 CFD 数值模拟提高了散热器流动与传热计算的准确性, 但是庞大的计算工作量以及对计算机和软件性能的较高要求导致该方法应用具有一定局限性。

本文分析了海拔高度对空气特性参数的影响, 根据空气特性参数的变海拔特性, 对管带式散热器空气侧对流换热系数关联式进行了修正, 基于热网络法建立了车用散热器的传热模型, 在 FlowMaster 软件平台下进行了车用散热器高原传热性能仿真, 研究了海拔高度和传热介质流量对散热器传热性能的影响规律, 为车用散热器的高原传热计算及优化匹配提供了技术参考。

1 高原环境对散热器传热影响分析

1.1 高原空气热力学参数

研究表明, 空气的物性参数中受海拔高度影响较大的有空气的压力、密度、温度和运动粘度, 空气的比热容、动力粘度、热导率等主要受空气温度

的影响, 受海拔高度的影响比较小, 可忽略不计^[14]。空气温度随着海拔的升高而下降, 假定海平面的空气温度为 T_0 , 从海平面到大气对流层内高度为 H 处的空气温度可按下式计算:

$$T_H = T_0 - 0.0065H \quad (1)$$

式中: T_H 为海拔高度为 H 处空气的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为海平面处空气的参考温度, $^{\circ}\text{C}$; H 为海拔高度, m 。

大气压力和海拔高度的对应关系为:

$$p_H = p_0(1 - 0.02257H)^{5.2559} \quad (2)$$

式中: p_H 为海拔高度为 H 处的大气压力, kPa ; p_0 为标准大气压力, kPa 。

根据式(1)和式(2)以及理想气体状态方程可得到不同海拔高度和空气温度对应的空气密度见图 1。

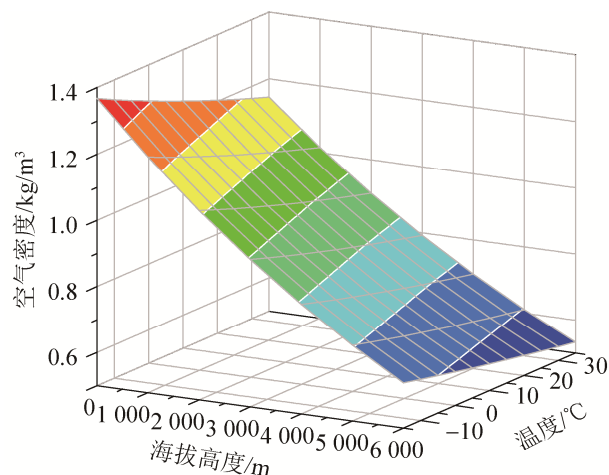


图1 空气密度随海拔高度和空气温度的变化

Fig.1 Air density variation with altitudes and air temperature

1.2 散热器的传热计算方法

车用散热器通常为管带式或板翅式结构, 图 2 为某型车用管带式水散热器芯体及局部传热示意图, 空气侧传热翅片的类型为矩形平直翅片。散热器中热量从冷却水传给冷却空气的过程, 可以用图 2 所示的三种热阻表示: 冷却水与管壁之间的对流传热热阻 R_{conv-w} ; 管壁与空气侧传热翅片之间的导热热阻 R_{conv-t} ; 冷却空气与空气侧翅片之间的对流传热热阻 R_{conv-a} 。

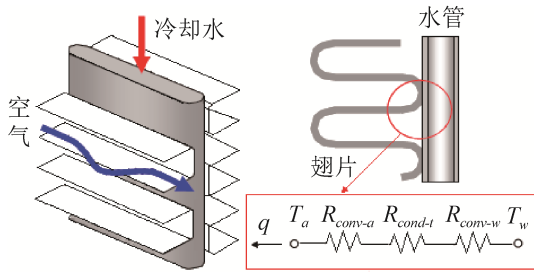


图2 散热器芯体及传热示意图
Fig. 2 Sketch of the heat transfer in heat exchanger core

散热器的传热量可以表示为:

$$\Phi = \frac{T_w - T_a}{R_{conv-w} + R_{conv-t} + R_{conv-a}} \quad (3)$$

$$R_{conv-w} = (h_w A_w)^{-1} \quad (4)$$

$$R_{conv-a} = (h_a A_a \eta_a)^{-1} \quad (5)$$

$$R_{conv-t} = \frac{\delta_t}{A_w \lambda_t} \quad (6)$$

式(3)~(6)中: T_w 、 T_a 分别为冷却水和冷却空气的温度, $^{\circ}\text{C}$; h_w 为冷却水与管壁的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; h_a 为冷却空气与空气侧传热翅片对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; δ_t 为水管的壁厚, m ; λ_t 为水管的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; A_w 为水管的传热面积, m^2 ; A_a 为空气侧翅片的传热面积, m^2 ; η_a 为翅片的肋效率。

在计算散热器内部传热介质与管壁和空气侧翅片之间的对流换热系数时,一般通过相应的努塞尔数关联式或经验公式计算^[15]。

$$\text{Nu} = \frac{h d_e}{\lambda} \quad (7)$$

$$h = \frac{C \lambda \text{Re}^n \text{Pr}^m}{d_e} \quad (8)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho u d_e}{\mu} \quad (9)$$

式中: Nu 为努塞尔数; d_e 为换热通道的当量直径, m ; Re 为雷诺数; λ 、 ρ 、 u 、 μ 、 Pr 分别为传热介质的导热系数、密度、流速、动力粘度和普朗特数; C 、 n 、 m 为无因次常数,可根据传热介质的流动状态(雷诺数)、换热表面的尺寸和传热特性等确定。

1.3 海拔高度对散热器传热性能的影响分析

当散热器的结构型式一定时, δ_t 、 λ_t 、 η_a 、 A_a 、

A_a 等参数确定,散热器的散热能力主要取决于传热介质与管壁和翅片之间的对流换热系数。由于散热器内部水管及翅片的导热性很好,壁厚很薄,因而水管的热阻 R_{conv-t} 很小;冷却水与管壁间的对流换热系数 h_w 明显大于冷却空气与翅片间的对流换热系数 h_a ,因此空气侧热阻 R_{conv-a} 远大于冷却水侧热阻 R_{conv-w} 。由于冷却水在封闭的水管内流动, h_w 与海拔高度无关,所以影响散热器高原传热性能的主要原因是海拔高度对空气侧对流换热系数 h_a 的影响^[16]。

在进行散热器高原传热计算时,必须考虑海拔高度对空气热力学参数的影响,对散热器空气侧雷诺数和对流换热系数计算公式(8)和(9)进行海拔高度的修正。

$$\text{Re}_a(H) = \rho_a(H) \frac{u d_e}{\mu_a} \quad (10)$$

式中: $\text{Re}_a(H)$ 表示海拔高度 H 处空气侧雷诺数; $\rho_a(H)$ 表示海拔高度 H 处空气的密度, kg/m^3 。

利用无量纲表面传热因子计算空气侧对流换热系数,其海拔高度修正公式为:

$$h_a(H) = \frac{j(H) \lambda_a (\text{Re}_a(H))^n \text{Pr}^m}{d_e} \quad (11)$$

式中: $h_a(H)$ 表示海拔高度 H 处的空气侧对流换热系数; $j(H)$ 表示海拔高度 H 处的传热表面无量纲传热因子。

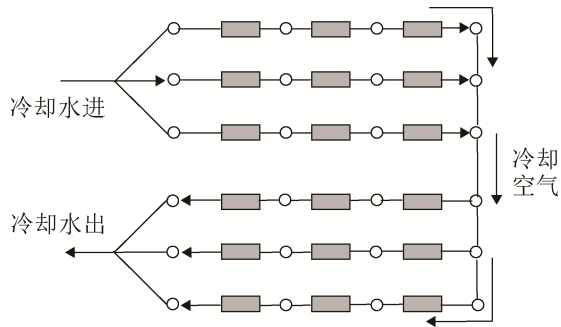
根据文献[17],传热因子同海拔高度之间有如下关系:

$$j(H) = (1 + 5 \times 10^{-5} H) j \quad (12)$$

2 散热器热网络传热模型

2.1 散热器热阻-热容传热网络

热网络法是一种利用热电比拟原理计算传热的有效方法^[18]。本文采用热网络法将散热器芯体划分成若干个由热阻和热容(即热节点)构成的传热网络见图3,热容之间的传热通过导热热阻和对流传热热阻模拟。



注: ○ 代表翅片和水管热节点, □ 代表传热热阻。

图3 散热器热阻-热容传热网络

Fig. 3 Thermal resistance and capacity network of heat exchanger

2.2 散热器 FlowMaster 传热网络仿真平台

基于散热器的热阻-热容传热网络, 利用一维流动与传热仿真软件 FlowMaster, 建立了散热器传热网络仿真平台见图 4。

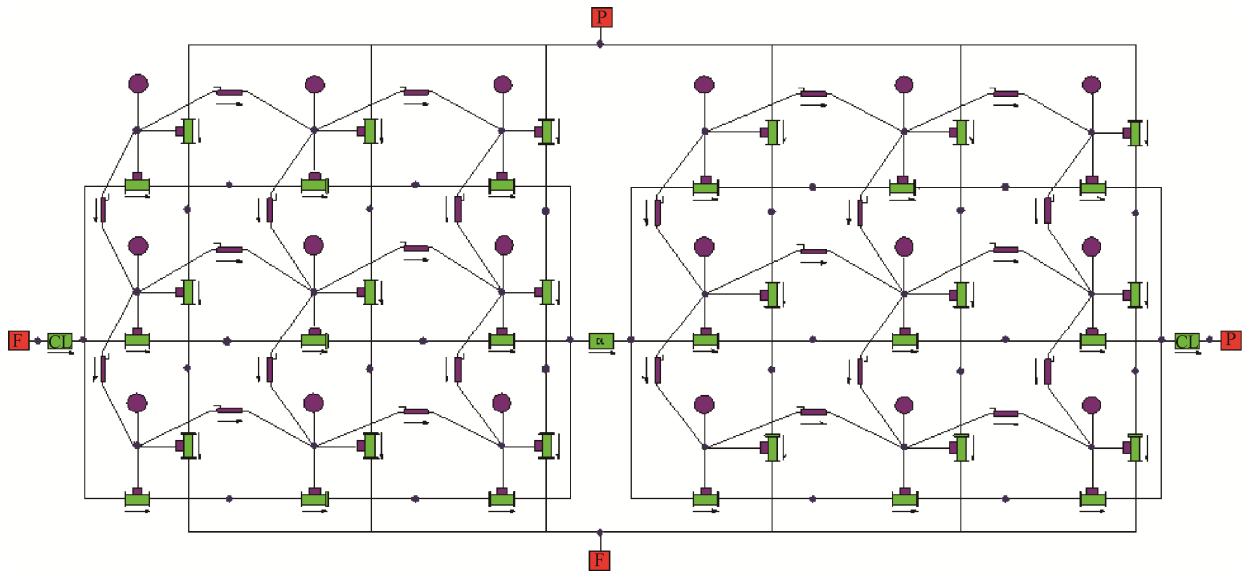
仿真计算时, 根据散热器芯体、翅片、水管等的结构尺寸、传热和流阻特性以及冷却水和冷却空气的流量和压力边界条件, 设置散热器 FlowMaster 传热网络模型中各元件的传热面积、流通截面积、液力直径、导热距离、阻力系数、计算传热系数的

无因次常数以及传热介质的流量、压力和温度边界等。FlowMaster 基于流动与能量守恒原理, 建立整个散热器传热网络的流动与传热方程, 利用软件的求解器计算得到散热器传热网络的温度和流场分布以及热节点之间的传热量和总传热量。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真模型验证

为了验证仿真模型的精度, 选取平原和青藏公路西大滩(海拔高度约 4 200 m)作为试验地点, 针对某型越野汽车进行了整车热平衡道路试验。高原试验时环境温度为 17~19 °C, 大气压力 61.9 kPa, 平均风速 2 m/s, 试验所用主要仪器见表 1。当车辆在稳定车速下行驶直到冷却系统的温度达到热平衡状态时(4 min 内冷却液进出口温差变化小于 ± 1 °C), 利用安装在散热器进出水管路上的热电偶传感器测量散热器进出口冷却液温度, 通过转速表测量发动机转速进而根据水泵转速确定冷却液循环流量, 最后计算得到散热器的散热量。



“●”(point mass)模拟散热器芯体的离散热节点; “—|—”(solid bar)模拟各热节点之间的导热热阻; “□”(thermal bridge)模拟热节点与冷却水和冷却空气之间的对流传热热阻; “F”(flow source)模拟散热器传热介质的流量边界条件; “P”(pressure source)模拟散热器的压力边界条件。

图4 散热器 FlowMaster 传热网络仿真平台

Fig. 4 Simulation model of heat exchanger using FlowMaster

表 1 试验用主要仪器
Tab. 1 The instrument of experiment

名称	型号	量程	精度
水温传感器	K 型热电偶	-100~200 °C	±0.5 °C
风速仪	F30J	0.05~30 m/s	3%
发动机转速表	KMT	8 000 r/min	1.5%
综合气象仪	NK-4000	温度: -29~70 °C	±0.1 °C
		气压: 1~110 kPa	±0.1 kPa

仿真计算时,以试验环境条件和试验测得的散热器进口冷却液温度作为计算边界条件,散热器出口冷却液温度和散热量对比结果见表 2。仿真值与试验值的误差小于 5%,证明散热器高原传热性能计算模型是可信的。

表 2 仿真结果与试验结果的对比

Tab. 2 Comparison of simulated and results with test value

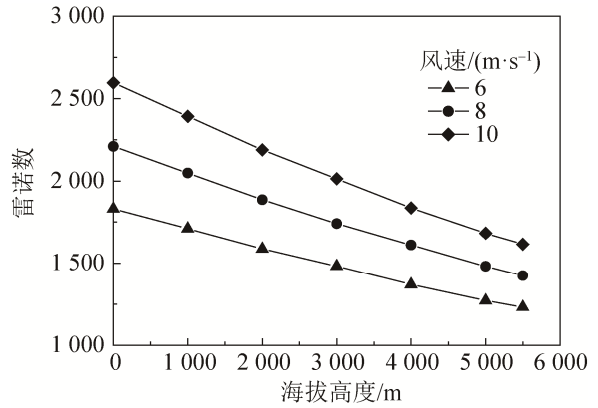
名称	海拔 50 m		海拔 4 200 m	
	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	Q/kW	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	Q/kW
试验值	80.5	110.2	90.2	70.5
仿真值	78.0	105.6	87.0	67.8
误差	3.1%	4.2%	3.5%	3.8%

注: T_{out} 为散热器出口冷却液温度, Q 为散热器散热量。

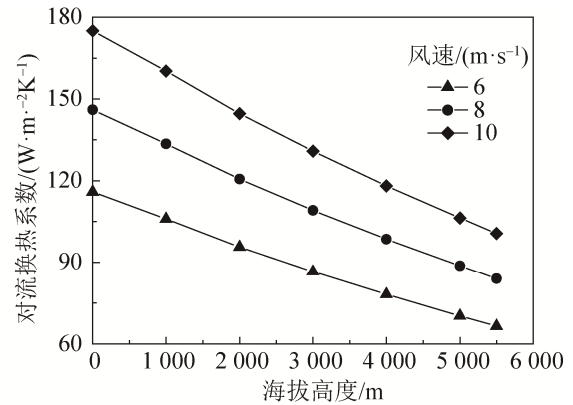
3.2 海拔高度对散热器传热性能的影响

图 5 和图 6 分别为环境温度为 20 °C、散热器入口冷却液温度为 85 °C 时,海拔高度和散热器迎面风速对散热器空气侧的流动雷诺数 Re 和对流换热系数、散热量以及出口冷却液温度的影响。根据 Re 的大小,冷却空气在散热器气侧翅片换热通道内的流动状态可以分为层流和湍流,当 $Re \leq 2\ 300$ 时为层流, $Re > 2\ 300$ 为湍流。由图 5 可知,随着海拔的升高和迎风速度的降低,由于空气的密度或流速的下降使空气流动雷诺数 Re 逐渐降低,空气的流动状态逐渐从湍流状态变为层流状态,对流换热强度明显下降,导致散热器的散热能力显著降低。当海拔高度从 0 m 升高到 5 500 m 时,流经散热器的空气质量流量下降约 50.2%,空气侧对流换热系数和散热量分别下降 42.5%和 41.2%,5 500 m 海拔下散热器的散热量仅为平原的 58.8%。海拔每

升高 1 km,空气侧对流换热系数和散热量分别下降 9.5%和 9.0%。由图 6 可知,空气侧的散热能力降低还导致冷却液热平衡温度的明显升高。

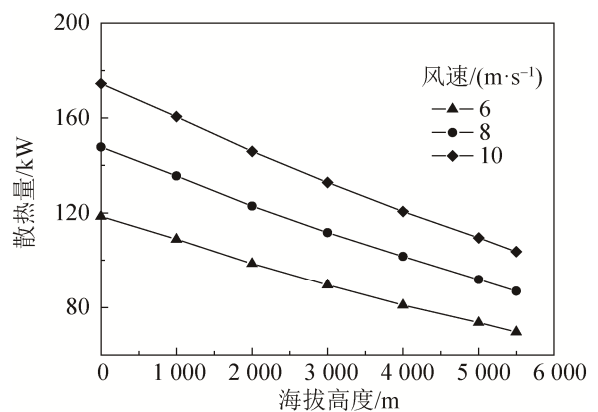


(a) 空气侧雷诺数

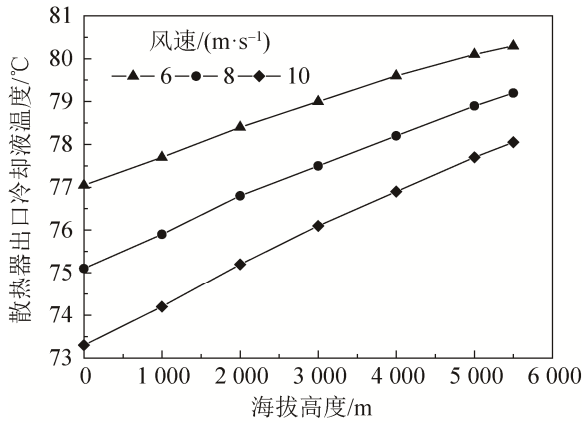


(b) 空气侧对流换热系数

图 5 散热器空气侧雷诺数及对流换热系数随海拔的变化
Fig. 5 Variations of the air side Re and heat transfer coefficients of heat exchanger with altitude



(a) 散热器的散热量



(b) 散热器出口冷却液温度

图6 散热器的散热量及出口冷却液温度随海拔的变化

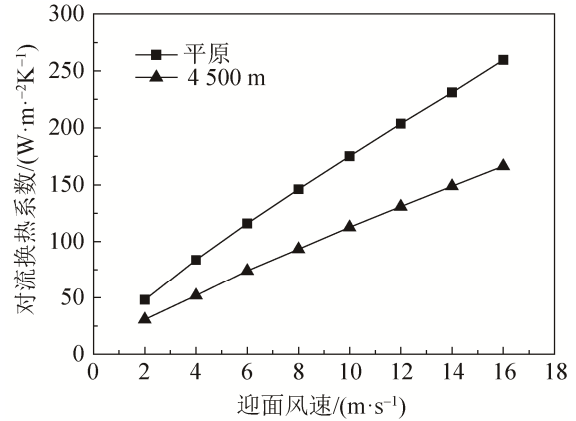
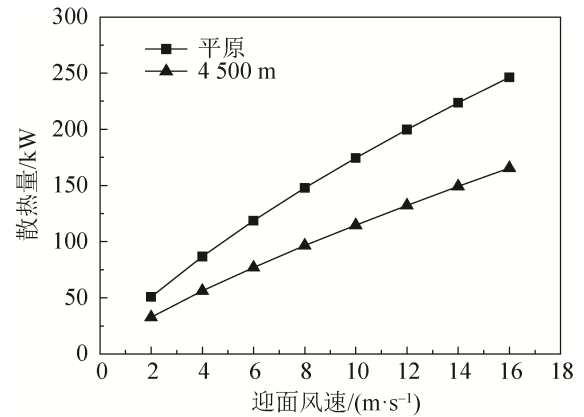
Fig. 6 Variations of the heat flowrate and outlet coolant temperature of heat exchanger with altitude

3.3 迎面风速对散热器传热性能的影响

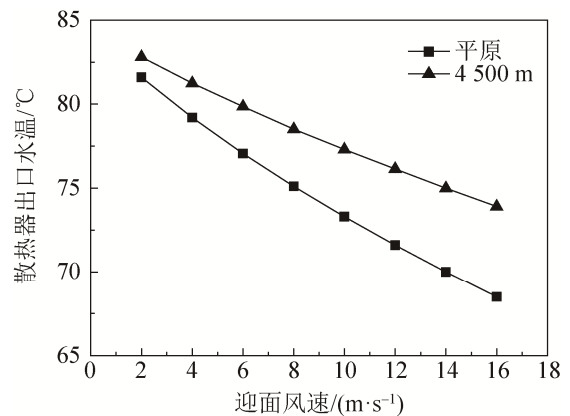
在高原实地试验和车辆高原使用中发现, 车辆在高原爬坡行驶时, 最容易出现发动机“开锅”现象, 而在平直路面高速行驶时很少发生“开锅”及其他热平衡问题。车辆爬坡行驶时发动机一般在低速、大负荷工况运转, 由于风扇转速和车速都较低, 导致车辆爬坡行驶时散热器入口迎风速度相对高速行驶时低很多。所以, 迎风速度低、发动机热负荷大、冷却系统散热能力下降是导致车辆在高原爬坡行驶时容易“开锅”的主要原因。图7为不同海拔高度下空气侧对流换热系数随散热器迎面风速的变化。迎面风速每增大2 m/s, 空气侧对流换热系数平均升高28.6%。相对于平原环境, 高原环境下迎面风速对空气侧对流换热系数的影响较小, 主要原因是大气压力和空气密度随着海拔升高而下降, 空气侧流动雷诺数减小导致对流换热强度明显下降。

图8为不同海拔高度下散热器的散热量和出口冷却液温度随迎面风速的变化。随着迎面风速的增大, 散热器的散热量明显增大, 出口冷却液温度迅速下降。迎面风速对散热器传热性能的影响随着海拔升高逐渐变小。迎面风速每增大2 m/s, 散热器的散热量平均增大26.7%~27.5%, 散热器出口冷却液温度平均下降约2.5 °C。当迎面风速从2 m/s

增大到16 m/s时, 散热器的散热量增大4倍, 散热器出口冷却液温度降幅达到19.2 °C, 散热效率显著提高。

图7 散热器空气侧对流换热系数随迎面风速的变化
Fig. 7 Variations of the air side heat transfer coefficients of heat exchanger with face velocity

(a) 散热器的散热量



(b) 散热器出口冷却液温度

图8 散热器散热量及出口冷却液温度随迎面风速的变化
Fig. 8 Variations of the heat flowrate and outlet coolant temperature of heat exchanger with face velocity

3.4 冷却液流量对散热器传热性能的影响

图9和图10分别为环境温度为20℃、散热器入口冷却液温度为85℃、散热器迎面风速为6m/s时,散热器的散热量及出口水温随海拔高度和冷却液循环流量的变化。由图可知,在相同的海拔高度、环境温度及迎面风速条件下,散热器的散热量随冷却液流量增大而小幅增大,散热器出口冷却液温度随冷却液流量增大而增大约1~2℃。通过对比可知,迎面风速(冷却空气流量)对散热器传热性能的影响非常明显,而冷却液循环流量对散热器传热性能的影响相对较小。

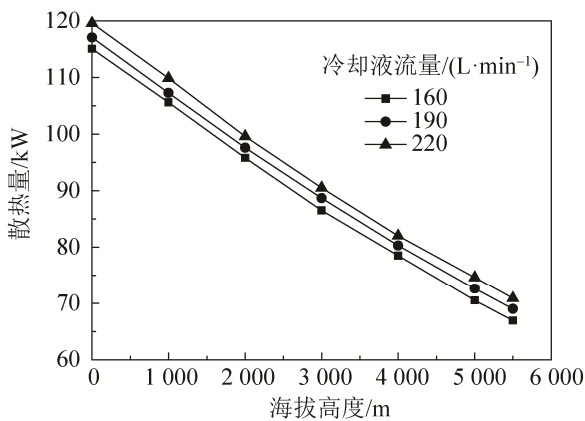


图9 散热器的散热量随海拔及冷却液流量的变化

Fig. 9 Variations of the heat flowrate of heat exchanger with altitude and coolant flowrate

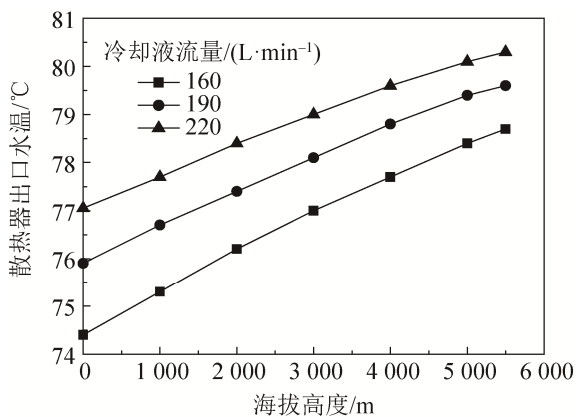


图10 散热器出口冷却液温度随海拔及冷却液流量的变化

Fig. 10 Variations of the coolant temperature at heat exchanger outlet with altitude and coolant flowrate

4 结论

(1) 车用散热器的散热能力与海拔高度有着密切的关系。大气压力下降、空气密度减小是导致车用散热器高原传热性能下降的主要原因。海拔每升高1 km,空气侧对流换热系数和散热量分别下降9.5%和9.0%。

(2) 在车用散热器的高原传热计算、设计与优化匹配时,必须考虑海拔高度对空气特性参数的影响,进而对散热器传热模型进行合理的修正,才能使散热器高原传热计算的结果更接近实际,这对保障车用发动机冷却系统在不同海拔地区正常运行十分必要。

(3) 基于热网络法,采用FlowMaster软件进行车用散热器高原传热性能仿真,能够较好地模拟海拔高度和传热介质流量对散热器传热性能的影响,为车用散热器的高原传热计算、设计与优化匹配提供了指导。

参考文献:

- [1] 刘瑞林. 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: 97-127.
LIU Ruilin. Research on plateau environment adaptability of diesel engine[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013: 97-127.
- [2] 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 Ruilin, 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.
- [3] 周兵, 兰旭东, 徐向华, 等. 柴油发动机热管理系统的高度特性[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1097-1104.
Zhou Bing, Lan Xudong, Xu Xianghua, et al. Altitude characteristics of the thermal management system of diesel engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(5): 1097-1104.
- [4] 余建祖. 换热器原理与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 9-15.
YU Jianzu. Principle and design of heat exchanger[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 9-15.
- [5] Huang Yuqi, Liu Zhentao, Lu Guodong, et al. Multi-scale thermal analysis approach for the typical

- heat exchanger in automotive cooling systems[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer* (S0735-1933), 2014, 59(12): 75-87.
- [6] 袁兆成, 朱晴, 王吉, 等. 汽车管带式散热器仿真设计方法的研究[J]. *内燃机工程*, 2011, 32(2): 85-88.
Yuan Zhaocheng, Zhu Qing, Wang Ji, et al. Study on simulation design method of corrugated tube radiator for automobile[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2011, 32(2): 85-88.
- [7] Carluccio E, Starace G, Ficarella A. Numerical analysis of a cross-flow compact heat exchanger for vehicle applications[J]. *Applied Thermal Engineering* (S1359-4311), 2005, 25(13): 1995-2013.
- [8] Pang S C, Masjuki H H, Kalam M A, et al. Correlation of engine cooling system parameters and segmented heat exchangers' analysis[J]. *Journal of Applied Sciences* (S1812-5654), 2013, 13(11): 2027-2032.
- [9] Soheil Akbari, Howard B Hemingson, David Beriault, et al. Application of neural networks to predict the steady state performance of a run-around membrane energy exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (S0017-9310), 2012, 55(2): 1628-1641.
- [10] Dohoy Jung, Dennis N Assanis. Numerical modeling of cross flow compact heat exchanger with louvered fins using thermal resistance concept[C]//SAE Paper 2006-01-0726, 2006: 1-11.
- [11] Kunihiko Kaga, Satoru Kotoh, Teturo Ogushi. Prediction of heat exchanger capacity by thermal network method[J]. *Heat Transfer-Asian Research* (S1523-1496), 2008, 37(2): 101-114.
- [12] Seok Kim, Sang Yong Lee. Quick estimation of frost growth on cold fins through thermal network analysis[J]. *International Journal of Refrigeration* (S0140-7007), 2014, 47(11): 153-163.
- [13] Siyu Zhao, Qun Chen. A thermal circuit method for analysis and optimization of heat exchangers with consideration of fluid property variation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (S0017-9310), 2016, 99(8): 209-218.
- [14] 黄延平. 电器空气冷却系统受海拔影响的理论分析[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(12): 153-160.
Huang Yanping. Theoretical analysis of the impact of altitude on electrical equipment of air cooling system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(12): 153-160.
- [15] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 415-454.
TAO Wenquan. *Heat Transfer*[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006: 415-454.
- [16] 李毅, 李远才, 刘景平. 高原车用散热器的传热计算[J]. *华中科技大学学报*, 2009, 37(9): 90-93.
Li Yi, Li Yuancai, Liu Jingping. Calculating heat transfer of radiators for plateau vehicles[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(9): 90-93.
- [17] Nelson Fumo, Pedro J Mago, Kenneth Jacobs. Design considerations for combined cooling, heating, and power systems at altitude[J]. *Energy Conversion and Management* (S0196-8904), 2011, 52(2): 1459-1469.
- [18] 康芹, 李世武, 郭建利. 热网络法概论[J]. *工业加热*, 2006, 35(5): 15-18.
Kang Qin, Li Shiwu, Guo Jianli. The thermal network method outline[J]. *Industrial Heating*, 2006, 35(5): 15-18.