

车用发动机热平衡研究进展与展望

杨春浩¹, 刘瑞林², 陈陆洋², 张众杰², 焦宇飞²

(1.海军工程大学, 武汉 430033; 2.军事交通学院, 天津 300161)

摘要: 以发动机热量分配、热负荷及冷却系统智能控制为切入点, 综述了车用发动机热平衡研究的现状, 并探讨了进一步的发展方向。指出针对我国特殊的高原环境, 进行极端工作环境下热量分配变化规律的研究、发动机热平衡模拟试验技术研究、开展高原环境柴油机冷却系统智能控制研究, 以最优化匹配散热需求是未来发动机热平衡研究的方向。

关键词: 车用发动机; 热平衡; 热量分配; 热负荷; 冷却系统智能控制

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.10.012

中图分类号: TJ810.3⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)10-0063-06

Research Progress and Prospect on Thermal Balance of Vehicle Engine

YANG Chun-hao¹, LIU Rui-lin², CHEN Lu-yang², ZHANG Zhong-jie², JIAO Yu-fei²

(1.Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2.University of Military Transportation, Tianjin 300161, China)

ABSTRACT: With heat distribution and heat load of engine as well as intelligent control of cooling system as the starting point, this paper summarized the current situation of thermal balance research of vehicle engine and discussed the further development direction. It pointed out that for the special plateau environment in China, we should focus on the mechanism of heat distribution change in extreme working environment, research on engine thermal balance simulation test technology, and carry out the intelligent control of the cooling system of the plateau environment diesel engine to optimize the matching heat dissipation requirement in the thermal balance research of engine.

KEY WORDS: vehicle engine; thermal balance; heat distribution; heat load; intelligent control of the cooling system

提高发动机热效率, 减少污染物排放一直是发动机研究的两个重要方向^[1], 进行发动机热平衡研究, 优化热量分配, 是提高发动机热效率、改善经济性和可靠性的重要手段之一^[2]。车用发动机热平衡研究旨在通过对发动机的热量分配、热负荷、冷却系统散热等过程的分析, 优化子系统与发动机匹配, 在保证动力性、经济性、可靠性的同时, 最大程度地改善热量分配, 减少有害物排放, 提高发动机的热效率^[3]。研究表明, 进行发动机热平衡研究, 优化热量分配, 可提升热效率 8.5%^[4], 降低 30% 的 NO_x 排放量^[5], 减少发动机预热时间 80% 以上^[6]。

文中以发动机热量分配、热负荷及冷却系统智能

控制为切入点, 综述了国内外车用发动机热平衡研究现状及发展趋势。

1 车用发动机热平衡研究现状

热平衡研究旨在基于对发动机工作过程热量传递和分配情况的探究, 以降低高温部件热负荷, 提高发动机热效率^[7]。随着内燃机强化程度的不断提高, 其零部件的热负荷也随之增加, 因此对零部件热负荷和可靠性的分析有着重要意义。冷却水带走热量占燃料放热总量的 20%~30%, 从循环热效率的角度出发, 希望尽量减少冷却系统散热量, 但零部件热负荷与其

可靠性对冷却系统散热量产生限制,这就要求尽可能优化内燃机冷却系统,减少传热损失,提高发动机热效率。因此热量分配、热负荷、冷却系统智能控制是发动机热平衡研究的重点。

1.1 热量分配研究

进行热量分配研究,分析并改善燃油燃烧后各子热量的分配情况,提高发动机热效率。研究方向主要集中在稳态工况,随着研究深入,为增强发动机瞬态响应特性,提高车辆极端环境适应性,在过渡工况下控制各系统温度尽快达到最佳工作状态、优化极端工作环境下热量分配的研究需求逐渐提高^[8]。

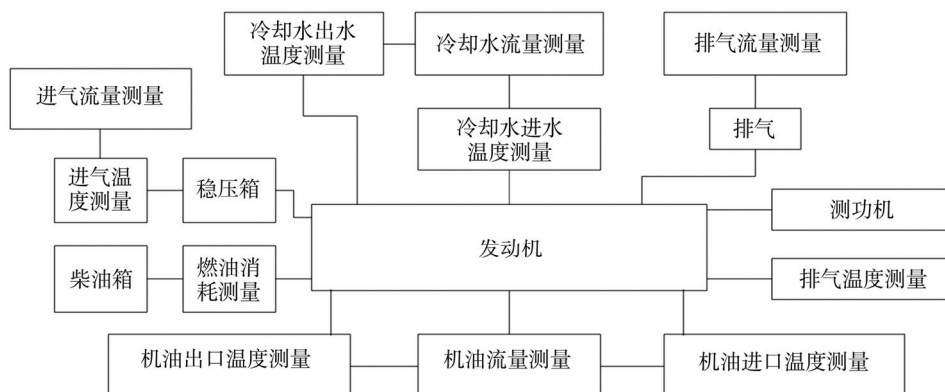


图1 热平衡试验研究框图

20世纪30年代^[10],国外学者及机构开始对汽油机的热平衡进行相关的试验研究,目前研究主要集中在燃用混合燃料、采用陶瓷隔热等技术后对发动机热量分配及排放的影响^[11-13]。Yüksel^[14]进行了掺氢汽油对四冲程V4发动机热量分配影响的研究,Taymaz^[15]使用陶瓷衬套以优化发动机热量分配,发现陶瓷隔热发动机中冷却水带走的热量减少,排气带走的热量相应增加。Pang等人^[4]开发了一套可变调节的柴油机冷却系统以更合理地分配发动机热量,应用该系统NO_x的排放量最高降低30%。Gharehghani^[5]在天然气发动机上进行热平衡试验,发现相比于自然吸气发动机,发动机燃用天然气并使用涡轮增压系统,热效率提高8.5%。

在发动机热量分配研究中,国内学者也开展了大量的研究工作,并通过燃用掺混燃料以优化热量分配,提高了发动机热效率^[16]。韩冰^[17]基于TY1100型柴油机热量分配试验,总结了柴油机运行参数对热量分配的影响规律。以此为基础,姚波^[18-19]研究了柴油与碳酸二甲酯(DMC)混合燃料对发动机热量分配的影响,发现15%~20%为DMC的最优掺混比例,此时热效率提高3%。

1.1.2 瞬态热量

在发动机过渡工况中,需要控制冷却系统散热

1.1.1 稳态热量

目前,大多数研究集中在稳态工况,试验基于热平衡方程^[9]:

$$Q_t = Q_e + Q_w + Q_o + Q_r + Q_{res} \quad (1)$$

式中: Q_t 为燃料完全燃烧产生的热量, kW; Q_e 为转化为有效功的热量, kW; Q_w 为传入冷却介质的热量, kW; Q_o 为机油带走的热量, kW; Q_r 为损失到排气中的热量, kW; Q_{res} 为余项损失, kW。研究的一般过程是基于发动机热平衡试验,测量燃料燃烧各子热量分配,确定发动机性能提升的研究方向,如图1所示^[7]。

量,使各系统温度尽快达到最佳工作状态,因此过渡工况的热平衡试验也是发动机热管理技术的研究重点^[20]。

在过渡工况中,以暖机工况为主要研究对象,与稳定工况热平衡试验不同,暖机过程需要测量机体内能变化速度。发动机热平衡方程为^[1,4]:

$$Q_t = Q_e + Q_w + Q_r + Q_b + Q_u \quad (2)$$

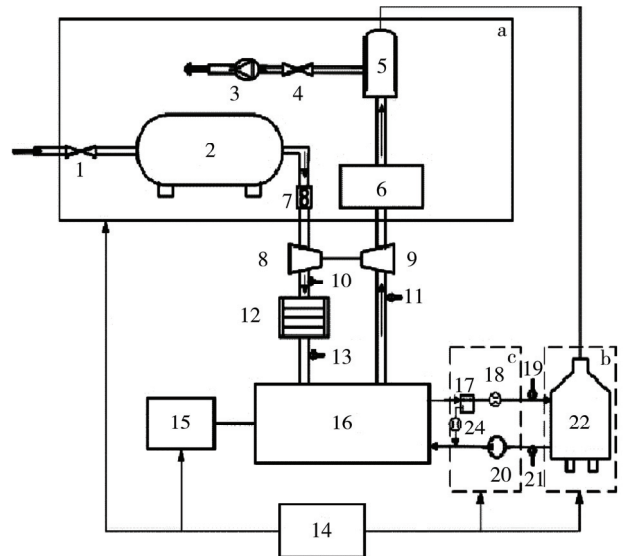
式中: Q_b 为机体吸收热量, kW; Q_u 为机体散热量, kW。刘忠民^[1]进行了暖机工况热平衡试验,认为机体吸热量随机体温度升高而迅速降低,当机体吸热量趋近于0时,发动机接近热平衡状态。建立了发动机集总参数模型,并提出了瞬态工况下热平衡方程,其可对暖机工况下机体热状态进行分析,为相应工况发动机冷却策略研究提供依据。

1.1.3 特殊环境条件热量

车用发动机工作在一些极端环境下(高原,高寒,高温),由于其气压、温度、湿度等环境参数较正常工作环境有较大差异,通常会出现冷却水易开锅、冷却系统性能下降、机体易过热等问题^[21]。如高原环境下,随着海拔的升高,大气压力降低,空气密度降低,空气侧换热系数、散热器外流阻力特性、风扇特性参数(空气流量、压升、转速)较平原发生很大变化^[22-23]。面对极端环境,发动机热平衡性能受到综合因素影

响,运用传统热平衡研究方法 & 系统模型显然已不适用,所以进行特殊工作环境下发动机热平衡性能的研究对车辆技术的发展具有突出意义。

国内外针对发动机热平衡技术的研究主要集中在平原环境,针对高原环境下发动机热量分配的研究较少,且缺乏从燃烧机理入手对高原环境下发动机热量分配问题的研究。殷琳^[24]基于工程机械高原及沙漠环境适应性研究,优化其冷却系统配置,提高了工程机械的工作性能。郑智^[25]、任晓江^[26]基于柴油机高海拔热平衡试验台(见图 2),研究了不同海拔对热量分配的影响,发现海拔 5000 m 时,转化为有效功的热量下降 15.6%,排气带走的热量下降 20.6%,余项损失上升 35%。



1,4 电动蝶阀; 2 进气稳压箱; 3 真空泵; 5 排气稳压箱; 6 热交换器; 7 空气流量计; 8 压气机; 9 涡轮机; 10,11,13,19,21 温度传感器; 12 中冷恒温装置; 14 发动机控制系统; 15 测功机; 16 柴油机; 17 电控节温器; 18、24 冷却液流量计; 20 电控变频水泵; 22 冷却液恒温装置; 23 燃烧分析仪; a 进排气模拟系统; b 冷却液恒温系统; c 冷却液流量调节系统

图 2 柴油机高原热平衡模拟试验系统原理

目前针对高原环境下发动机热量分配计算存在一定缺陷,高原环境下,气压变低、空气密度减小、氧气含量减少,如保持原有供油量,一部分燃料不能完全燃烧,应用以往的热平衡方程计算热量分配,将有过多的热量被归入余项损失中,计算准确性降低。

1.2 发动机热负荷

表征热负荷大小的主要参数是关键零部件温度、热流量及热应力。发动机部件在高温下强度降低,温度过高会使零部件热裂或局部烧熔,破坏零部件间的正常间隙,产生拉缸,温差过大导致热应力过大,零部件产生热疲劳裂纹^[27]。随着大功率柴油机向高功率

密度方向发展,柴油机零部件工作环境更加恶劣,热负荷研究对于保证柴油机可靠性、提高经济性具有重要意义,因此在热平衡研究中,发动机热负荷研究也是重要一环。

国外学者对发动机热负荷的研究主要集中在平原环境下受热部件热负荷评价,及采用高新技术控制发动机热负荷。Shojaefard^[28]基于有限元对某型发动机机缸缸盖热量分布进行了研究。Silva^[29]根据活塞的疲劳破坏情况,运用有限元对活塞不同部位进行了热应力分析。Najafabadi^[30]进行活塞冷却喷嘴技术对活塞热负荷影响的研究,结果表明,活塞顶部温度的平均值可以降低约 70 K。

相较于国外,国内科研机构及学者在评价发动机热负荷的同时,将目光更多地聚焦在优化子系统与发动机匹配以降低发动机热负荷、提高燃油经济性方面^[31-33]。骆清国^[34]基于 GT-POWER 对缸内热流分布及高温部件的温度场进行了分析,缸内高温部件最高温度对比见表 1,可见排气门头部温度在最大扭矩工况时可达 813 K。

表 1 缸内高温部件最高温度对比

名称	标定工况/K	最大扭矩工况/K
缸套	567	555
缸盖	622	615
活塞	586	564
进气门	719	722
排气门	801	813

汪茂海^[35]利用 Flow-Master 仿真软件将冷却风扇由发动机曲轴驱动改为电控液压驱动,各换热器由水冷改为风冷。结果表明,新的热管理系统有效解决了原车高原过热问题,并在海拔 3700,4500 m 下减少燃油消耗率 6 g/(kW·h)。王宪成^[36]进行了喷油参数对高原环境柴油机热负荷影响的研究,发现在海拔 4000 m 时,相较于平原环境,提前供油提前角 4 °CA,活塞表面温度、涡前排温分别下降 15,30 °C。

目前,大多数发动机热负荷研究采用试验与仿真相结合的方法,可在广泛的气候条件和发动机工况范围内对其性能进行研究,但对于一些仿真结果相差不大的情况,原机的结构参数、模型的准确性显得尤为重要。

1.3 发动机冷却系统智能控制研究

发动机冷却系统工作效率直接影响高温部件的热负荷、整机的热量分配和能量利用。传统的冷却系统由发动机曲轴通过皮带机械式驱动,不能根据发动机变工况冷却散热需求实时调节,冷却系统智能控制研究主要包括冷却系统部件的电控化和冷却系统控

制策略研究^[37]。

1.3.1 冷却系统部件电控化

电机或液压驱动冷却风扇、水泵、节温器研究是目前冷却系统部件电控化研究的主流方向,部件的电控化可根据发动机的散热需求,更准确、迅速地提供冷却介质流量,降低了能耗,提高了效率。

国外在冷却系统部件电控化研究方面,电控化冷却风扇与节温器的应用研究已逐渐进入产品化阶段,相比于风扇与节温器而言,水泵的可控化研究起步较晚,主流电控水泵由直流电机驱动。由于其功耗完全依赖于蓄电池或发电机,开发成本高,目前未形成广泛的应用。Ricardo 公司和 Daimler Chrysler 公司基于脉宽调制(PWM)方式开发的 42 V-14 V 双电压系统^[38],实现了电子风扇的无机调速,提高了电能转换效率,增强了冷却系统散热强度。博格华纳公司^[39]在结合机械泵与电控泵优势的基础上,开发了一种双模式冷却泵(DMCP),可节油 2%。一汽大众宝来 APF 冷却系统采用了多回路电控节温器^[40],其将节温器与冷却液分配法兰结合,实现了大小循环中冷却液流量的准确调节控制。

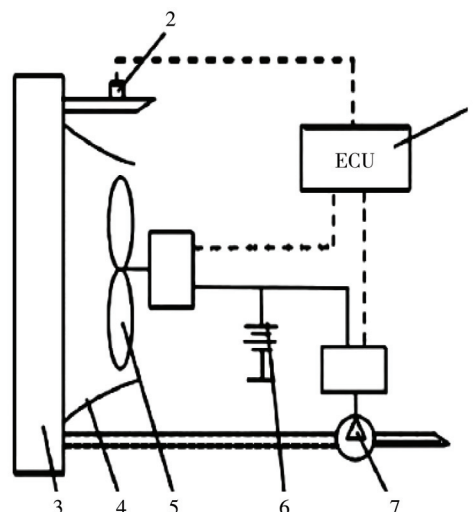
国内方面,冷却系统部件电控化研究起步晚,且主要集中在冷却风扇电控化研究。郭新民^[41]开发了冷却风扇自动控制装置,安装于载货汽车开展试验。发现相比机械式冷却系统,电控化冷却风扇降低燃油消耗率 7%。

1.3.2 冷却系统控制策略

电控化冷却系统部件,优化了冷却系统与发动机匹配的同时提高了系统运行参数的可控性,为冷却系统控制策略研究奠定了基础^[42]。冷却系统控制策略智能化,可以根据发动机散热需求合理分配冷却流量,缩短起动预热时间,减少热损失,使发动机处于最佳的工作状态^[43-44]。

为提高发动机热效率、满足愈加严格的排放法规^[45-46],国外学者开展了以智能控制为最终目标的发动机冷却系统控制策略研究^[47-48],提高了冷却系统响应速度及准确率。Salah^[47]建立了由电控风扇、电控水泵、电控三通阀组成的试验系统,基于蒸汽热交换器模拟发动机燃烧过程产生的热量,发现该热管理系统可在 3 min 内达到冷却液目标温度,追踪误差在 0.3%以内。

国内的发动机冷却系统研究正向智能化方向转变,但还处于起步阶段。刘楠^[6]综述了冷却系统部件及其集成电子控制的工作原理,如图 3 所示,分析了冷却系统部件及其控制策略对发动机性能的影响。认为冷却系统智能化可实现冷却系统与发动机优化匹配,减少发动机预热时间 80%以上,节油 7%左右。



1 微控单元 ECU; 2 冷却水温度传感器; 3 散热器; 4 风罩; 5 电控风扇; 6 电源; 7 电控水泵

图 3 电控冷却系统设计原理

综上所述,进行车用发动机热平衡研究,通过优化热量分配、冷却系统智能化控制等手段可提升热效率 8.5%,降低 30%的 NO_x 排放量,减少发动机预热时间 80%以上。国外针对发动机热平衡研究开展较早,技术领先,尤其在冷却系统智能控制方面,已有市场化的智能控制冷却系统应用案例。由于试验条件制约、技术和市场需求以及研制成本高等原因,国内针对冷却系统零部件尤其是可控风扇的研究较多,而在冷却系统集成化、控制系统及控制策略开发等方面处于劣势。国内外大部分发动机热平衡研究针对平原常温环境,由于我国特殊的地理环境,对高原环境下发动机热平衡研究需求远超国外,国内发动机高海拔热平衡研究起步较晚,且可借鉴成果较少,研究方兴未艾。

2 发动机热平衡研究发展趋势

目前车用发动机热平衡研究主要向两个方向发展:高原环境条件下发动机热平衡研究;冷却系统集成控制。

2.1 高原环境条件下发动机热平衡研究

国外关于车用发动机热平衡研究一般在海拔 3000 m 以下^[26],我国青藏高原平均海拔超过 4000 m,总面积达 240 万 km^2 ,约占国土面积的 1/4^[49],对高原环境下发动机热平衡研究需求远超国外。

针对高原环境下发动机热量分配计算存在一定缺陷,且缺少对受热部件热应力的分析。高原环境下气压变低,空气密度减小,氧气含量减少,如保持原有供油量,一部分燃料不能完全燃烧,应用以往的热平衡方程计算热量分配,将有过多的热量被归入余项

损失中, 计算准确性降低。应以冷却系统流动与传热为切入点, 从燃料燃烧后热量的传递及冷却系统流动、传热变化机理入手, 深入研究高原环境下热量分配变化规律。高原环境下发动机受热部件温差大, 热应力大, 易产生热疲劳裂纹。为评价并控制发动机热负荷, 进行发动机热平衡模拟试验技术研究是未来研究的重点。

2.2 冷却系统集成控制

智能化的冷却系统在保证发动机工作可靠性的同时, 也实现了对发动机工作温度的精确控制, 提高了发动机热效率。国内针对冷却系统零部件尤其是可控风扇的研究较多, 而在冷却系统集成化控制及控制策略开发等方面处于劣势。对于极端工作环境, 发动机冷却系统智能控制研究还停留在试验研究阶段。如高原环境下, 缸内燃料燃烧恶化, 发动机易“开锅”, 冷却系统散热能力下降, 燃烧过程不明确。

因此, 以发动机冷却系统集成控制为最终目标, 运用一维与三维联合模拟^[50]的方法, 开展高海拔对冷却系统流动与传热过程影响及柴油机冷却系统高海拔变流量控制的相关研究是发动机热平衡研究的发展趋势。

3 结语

1) 进行车用发动机热平衡研究, 改善热量分配, 降低热负荷, 优化子系统与发动机匹配, 可提升热效率 8.5%, NO_x 排放量降低 30%, 减少发动机预热时间 80%以上。

2) 高原环境下, 气压、温度、湿度等环境参数较平原有所差异, 应以冷却系统流动与传热为切入点, 从燃料燃烧后热量的传递及冷却系统流动、传热变化机理入手, 深入开展高原环境下热量分配变化规律研究。

3) 高原环境下发动机受热部件温差大, 热应力大, 易产生热疲劳裂纹, 为评价并控制发动机热负荷, 进行发动机热平衡模拟试验技术研究是未来研究的重点。

4) 发动机冷却系统工作效率直接影响高温部件的热负荷和发动机热效率。以发动机冷却系统集成控制为最终目标, 开展高原环境柴油机冷却系统智能控制研究以最优匹配散热需求是未来发动机热平衡研究的方向。

参考文献:

[1] 刘忠民, 俞小莉, 沈瑜铭. 发动机热平衡试验研究[J]. 浙江大学学报, 2008, 42(7): 1247-1250.
[2] 王迟宇. 柴油机热平衡数值仿真与试验研究[D]. 杭州:

浙江大学, 2007.

- [3] 周道锋. 基于冷却液温度的发动机热平衡试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
[4] GHAREHGHANI A, KOOCHAK M, MIRSALIM M. Experimental Investigation of Thermal Balance of a Turbocharged SI Engine Operating on Natural Gas[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 60(12): 200-207.
[5] PANG H H, BRACE C J, AKEHURST S. Potential of a Controllable Engine Cooling System to Reduce NO_x Emissions in Diesel Engines[J]. *SAE Paper*, 2004-01-0054.
[6] 刘楠, 周磊, 刘瑞林, 等. 车用发动机冷却系统智能控制研究进展[J]. *军事交通学院学报*, 2015, 17(11): 43-48.
[7] 俞小莉, 李婷. 发动机热平衡仿真研究现状与发展趋势[J]. *车用发动机*, 2005(5): 1-5.
[8] 董敬, 庄志, 常思勤. 汽车拖拉机发动机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 19-20.
[9] 龚正波, 骆清国, 张更云, 等. 柴油机全工况热平衡台架试验研究[J]. *车用发动机*, 2009(3): 31-35.
[10] 长尾不二夫. 内燃机原理与柴油机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
[11] AJAV E A, SINGH B, BHATTAVHARYA T K. Thermal Balance of a Single Cylinder Diesel Engine Operating on Alternative Fuels[J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(14): 1533-1541.
[12] TAYMAZ I. An Experimental Study of Energy Balance in Low Heat Rejection Diesel Engine[J]. *Energy*, 2006, 31(2/3): 364-371.
[13] ABEDIN M J, MASJUKI H H, KALAM M A, et al. Energy Balance of Internal Combustion Engines Using Alternative Fuels[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 26: 20-33.
[14] YUKSEL F, CEVIZ M A. Thermal Balance of a Four Stroke SI Engine Operating on Hydrogen as a Supplementary Fuel[J]. *Energy*, 2003, 28: 1069-1080.
[15] TAYMAZ I, CAKIR K, GUR M. Experimental Investigation of Heat Losses in a Ceramic Coated Diesel Engine[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003(5): 168-170.
[16] QIN J, ZHANG S, BAO W, et al. Thermal Management Method of Fuel in Advanced Aeroengines[J]. *Energy*, 2013, 49: 459-468.
[17] 韩冰. 柴油机的热平衡及缸盖的传热研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
[18] 姚波. 碳酸二甲酯与柴油混合燃料的燃烧与排放性能、热平衡及缸内传热的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
[19] 姚波, 潘克煜. 柴油机燃用碳酸二甲酯—柴油混合燃料的热平衡研究[C]// 内燃机学术年会论文集. 2004.
[20] HAMUT H S, DINCER I, NATERER G F. Exergoenvironmental Analysis of Hybrid Electric Vehicle Thermal Management Systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 67(6): 187-196.
[21] 张志强, 何勇灵, 韩志强, 等. 高原环境对车用柴油机

- 的影响分析及对策[J]. 装备环境工程, 2009, 6(2): 27-31.
- [22] 许翔, 周广猛, 郑智, 等. 高原环境对保障装备的影响及适应性研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 100-103.
- [23] 许翔, 张众杰, 凤蕴, 等. 汽车环境适应性试验综述[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 61-65.
- [24] 殷琳, 马新峰. ZL50GH 高原沙漠型特种轮式装载机——一种全新配置的高原适应型施工设备[J]. 工程机械, 2002(4): 14-16.
- [25] 郑智. 490BPG 叉车柴油机高海拔(低气压)性能试验研究[D]. 天津: 军事交通学院, 2010.
- [26] 任晓江. 柴油机高原环境冷却系统性能仿真研究[D]. 天津: 军事交通学院, 2011.
- [27] 许翔, 刘瑞林, 董素荣, 等. 轮式车辆高原环境适应性评价研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 82-87.
- [28] SHOJAEFARD M H, GHAFFARPOUR M R. Thermo-mechanical Analysis of an Engine Cylinder Head[J]. Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(5): 627-636.
- [29] SILVA F S. Fatigue on Engine Pistons-A Compendium of Case Studies[J]. Engineering Failure Analysis, 2006(13): 481-488.
- [30] NAJAFABADI M I, MIRSALEM M, HOSSEINI V, et al. Experimental and Numerical Study of Piston Thermal Management Using Piston Cooling Jet[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(3): 1079-1087.
- [31] 陆国栋, 俞小莉, 张毅. 装载机冷却组优化匹配的试验研究[J]. 内燃机工程, 2005, 26(4): 47-49.
- [32] 谭建勋. 工程机械热管理系统试验平台的开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [33] 黄鑫. 发动机热平衡试验系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [34] 骆清国, 冯建涛, 刘红彬, 等. 大功率柴油机缸内传热与热负荷分析研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(6): 32-37.
- [35] 汪茂海, 陈涛, 张扬军, 等. 高原发动机热管理系统性能分析研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(10): 851-864.
- [36] 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.
- [37] PICCIONE R, BOVA S. Engine Rapid Shutdown: Experimental Investigation on the Cooling System Transient Response[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(7): 1-10.
- [38] CHANFREAU M, JOSEPH A, BUTLER D, et al. Advanced Engine Cooling Thermal Management System on a Dual Voltage 42 V-14 V Minivan[C]// SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2001.
- [39] NEGANDHI V, JUNG D, SHUTTY J. Active Thermal Management with a Dual Mode Coolant Pump[J]. SAE Int J Passeng Cars-Mech Syst, 2013, 6(2): 817-825.
- [40] 李春明. APF 型发动机电子控制冷却系统[J]. 汽车技术, 2004(11): 13-15.
- [41] 郭新民, 高平, 孙世民, 等. 自控电动冷却风扇在汽车发动机上的应用[J]. 内燃机工程, 1993, 14(1): 79-82.
- [42] 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: 215-216.
- [43] WANG Xin, GE Yun-shan, YU Lin-xiao, et al. Effects of Altitude on the Thermal Efficiency of a Heavy-duty Diesel Engine[J]. Energy, 2013(59): 543-548.
- [44] CERIT M, COBAN M. Temperature and Thermal Stress Analyses of a Ceramic-coated Aluminum Alloy Piston Used in a Diesel Engine[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014(77): 11-18.
- [45] CHOI K W, KIM K B, LEE K H. Investigation of Emission Characteristics Affected by New Cooling System in a Diesel Engine[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(7): 1866-1870.
- [46] HE C, GE Y, MA C, et al. Emission Characteristics of a Heavy-duty Diesel Engine at Simulated High Altitudes[J]. The Science of the Total Environment, 2011, 409(17): 3138-3143.
- [47] SALAH M H, MITCHELL T H, WAGNER J R, et al. Nonlinear Control Strategies for Advanced Vehicle Thermal Management Systems[J]. Transactions on Vehicular Technology, 2007, 57(1): 127-137.
- [48] SALAH M H, FRICK P M, WAGNER J R, et al. Hydraulic Actuated Automotive Cooling Systems—Nonlinear Control and Test[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(5): 609-621.
- [49] 周广猛, 刘瑞林, 许翔, 等. 高原环境对车辆动力性的影响及动力提升措施[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 45-51.
- [50] 于秀敏, 陈海波, 黄海珍, 等. 发动机冷却系统中流动与传热问题数值模拟进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 162-167.