

车用柴油机高原性能模拟试验及性能提升策略

许翔 刘瑞林 董素荣 刘刚

军事交通学院,天津,300161

摘要:通过柴油机高原性能模拟试验,分析了柴油机的动力性、经济性随海拔高度的变化规律,以及高原环境对柴油机起动性能和热平衡性能的影响,提出了高原增压、供油系统调整及优化、低气压低温起动、热平衡控制、电控柴油机高原标定等提升车用柴油机高原性能的技术对策,为研究进一步提高柴油机的高原环境适应性提供了参考。

关键词:高原环境;柴油机;模拟试验;性能提升

中图分类号:TK427

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.17.026

Simulation Test and Performance Improvement Strategy of Vehicle Diesel Engine at Plateau Area

Xu Xiang Liu Ruilin Dong Surong Liu Gang

Military Transportation Institute, Tianjin, 300161

Abstract: The performance of diesel engine working in different altitude regions were studied by simulation test. The influence of the altitude on engine performance, such as power, economic, cold starting and thermal balance were verified, and some measures were put forward to improve diesel engine performance at plateau, such as boosting technology, fuel system improvement, cold starting, heat balance control, calibration for electronic controlled diesel engine. The purpose was to provide reference for improving plateau environmental worthiness of diesel engine.

Key words: plateau environment; diesel engine; simulation test; performance improvement

0 引言

高原环境适应性是制约高原地区车辆、工程

机械、农业机械、柴油发电机组等以柴油机作为动力源的动力机械及设备性能发挥的重要因素之一^[1]。由于受内燃机工业技术的制约及缺乏相关的高原环境适应性技术,大多数柴油机在论证、设

收稿日期:2012-06-16

基金项目:军队科研项目(BS309L030)

[2] 林尚扬.我国焊接生产现状与焊接技术的发展[J].船舶工程,2005,27(S1):15-24.

Lin Shangyang. Present Situation of Welding Production and Development Trend of Welding Technology in China[J]. Ship Engineering, 2005, 27(S1): 15-24.

[3] Chiu M C, Alsaffar A J, Haapala G E. Reducing Supply Chain Costs and Carbon Footprint during Product Design[C]//2010 IEEE Symposium on Sustainable Systems and Technology. Arlington, VA, USA, 2010: 17-19.

[4] Letete T C M, Mungwe N W, Guma M, et al. Carbon Footprint of the University of Cape Town[J]. Journal of Energy in Southern Africa, 2011, 22(2): 2-12.

[5] Kumara S. Conceptual Foundations of Energy Aware Manufacturing[C]//Proceedings of the 9th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems. New York, NY, USA, 2009: 32-37.

[6] Jeswiet J, Kara S. Carbon Emissions and CES in Manufacturing[C]//15th International Conference on Life Cycle Engineering. Sydney, 2008: 9-18.

[7] Wiedmann T. Editorial: Carbon Footprint and Input-

output Analysis - an Introduction[J]. Economic Systems Research, 2009, 21(3): 175-186.

[8] Sakano R, Murakami K. Development of Spot FSW Robot System for Automobile Body Members[C]//Third International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan, 2001: 27-28.

[9] Liu Liming, Hao Xinfeng, Song Gang. A New Laser-arc Hybrid Welding Technique Based on Energy Conservation[J]. Materials Transactions, 2006, 47(6): 1611-1614.

[10] 王元良.论低碳焊接[J].电焊机,2011,41(2):6-11.

Wang Yuanliang. Discussion of Low-carbon Welding[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(2): 6-11. (编辑 张洋)

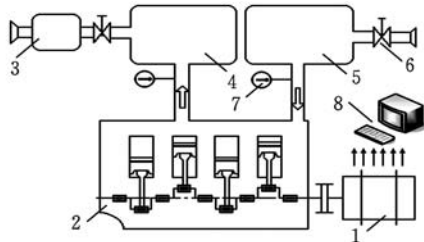
作者简介:罗毅,男,1986年生。重庆大学机械工程学院硕士研究生。主要研究方向为低碳制造、绿色设计与制造。曹华军,男,1978年生。重庆大学机械工程学院教授、博士研究生导师。李洪丞,男,1986年生。重庆大学机械工程学院博士研究生。程海琴,女,1986年生。重庆大学机械工程学院硕士研究生。

计、研制和定型时未充分考虑高原环境适应性,导致其不能满足高原地区的使用要求,造成了巨大的经济损失和严重的环境污染等问题^[2-4]。因此,研究高原环境对柴油机性能的影响规律,对研究和提高柴油机的高原环境适应性具有非常重要的意义。本文针对车用柴油机在高原使用中存在的问题,通过理论分析及高原环境模拟试验,系统分析和研究了高原低气压、低温环境条件对柴油机各主要性能的影响规律和机理,提出了提高柴油机高原适应能力的技术措施。

1 柴油机高原性能模拟试验装置

柴油机高原性能模拟试验是柴油机研制、定型、选型、使用等过程中的一项重要基础性工作,也是验证柴油机高原环境适应性的重要手段。为了考察柴油机性能随海拔高度的变化规律,在军事交通学院军用动力机械高原环境实验室,对 4 种不同排量、不同类型的柴油机进行了高原模拟试验研究。

图 1 为柴油机高海拔(低气压)模拟试验台示意图。试验台主要由柴油机高海拔(低气压)模拟系统、环境温度控制系统、CW260 电涡流测功机、油耗仪、进排气压力传感器、温度传感器、空气和冷却水流量计等仪器设备组成。



1. 测功机 2. 柴油机 3. 真空泵 4. 排气稳压箱 5. 进气稳压箱
6. 压力调节阀 7. 空气流量计 8. 数据采集系统

图 1 柴油机高海拔(低气压)模拟试验台示意图

试验台利用进气节流和排气抽真空的方法模拟柴油机在低气压下的工作状态,模拟海拔范围为 0~6000m;环境温度范围为 -41~30℃。模拟试验中气压和空气密度与海拔高度的关系见表 1。

表 1 气压和空气密度与海拔高度的对应关系

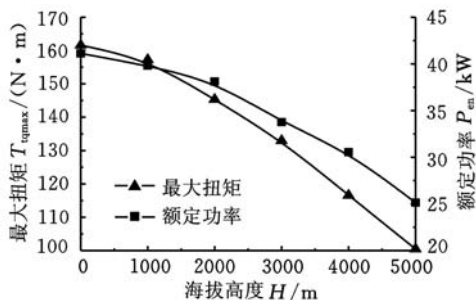
海拔高度(m)	0	1000	2000	3000	4000	5000
大气压力(kPa)	101.3	89.8	79.5	70.1	61.7	54.0
空气密度(kg/m ³)	1.225	1.112	1.006	0.909	0.819	0.763

2 高原环境对柴油机性能的影响

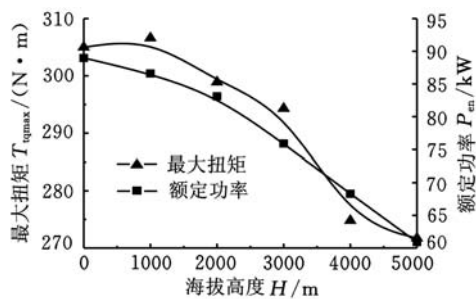
2.1 高原环境对柴油机动力性能的影响

在不同模拟海拔高度下对 4 种不同排量及类

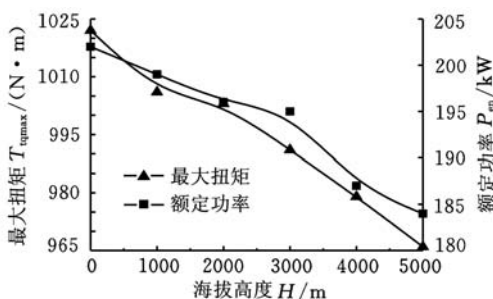
型的柴油机进行了外特性试验,图 2 所示为柴油机的额定功率及最大扭矩随海拔高度的变化关系。试验表明,尽管不同类型柴油机在不同海拔高度(气压)下的动力性随海拔变化规律存在一定差异,但它们之间的变化规律基本是一致的。



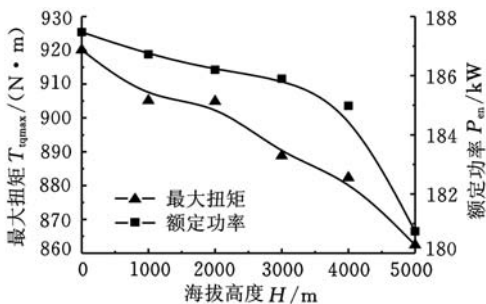
(a) 2.5L 非增压柴油机



(b) 2.8L 电控增压柴油机



(c) 9.7L 增压柴油机



(d) 12.8L 增压柴油机

图 2 柴油机额定功率及最大扭矩随海拔高度的变化关系

随着海拔的升高,气压和空气密度降低,进气量减少、燃烧恶化等导致柴油机的功率和扭矩下降。海拔高度每升高 1000m,非增压柴油机的额定功率约下降 3.2%~17.7%,增压柴油机的额定功率约下降 0.16%~10.8%;当海拔达到 5000m 时,相对于平原而言,柴油机的额定功率

下降了3.6%~38.9%，最大扭矩下降了5.5%~37.8%。由此可见，非增压型柴油机的动力性随海拔高度增加呈明显下降的趋势；涡轮增压器通过压缩空气来增加柴油机进气量，具有自动补偿柴油机高原功率下降的能力。因此，增压型柴油机的高原适应性明显优于非增压型柴油机，其动力性随海拔高度增加下降较为缓慢。

在海拔3000m以下，柴油机的额定功率随海拔升高缓慢下降；当海拔超过3000m时，额定功率随海拔升高下降明显。当海拔超过2000m时，柴油机的最大扭矩随海拔升高下降明显；海拔3000m以上时，最大扭矩随海拔升高急剧下降。对于各种不同类型的柴油机而言，海拔3000m是柴油机动力性能发生突变的“拐点”。因此，对柴油机进行海拔3000m性能试验可以评价柴油机的高原适应性，通过其动力性能指标的变化验证柴油机是否满足高原使用要求。

2.2 高原环境对柴油机经济性能的影响

图3所示为柴油机最低燃油消耗率随海拔高度的变化关系。随着海拔的升高，气压减小，空气密度下降，进入气缸内的空气量减少，导致燃烧过程变差，柴油机有效热效率减小，从而使柴油机燃油消耗率随着海拔的升高而增加^[5]。相对于平原而言，当海拔达到5000m时，柴油机的油耗增加了4.3%~49.4%。海拔为0~3000m时，柴油机的油耗随海拔变化不明显；当海拔超过3000m时，非增压柴油机的油耗量明显增大；电控柴油机由于没有进行高原标定，油耗量明显增大；较大排量柴油机的供油系统进行了调整，油耗量随海拔升高缓慢增大。

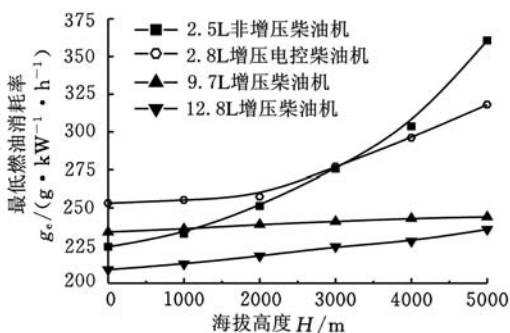


图3 最低燃油消耗率随海拔高度的变化关系

2.3 高原环境对柴油机起动性能的影响

高原地区海拔高、空气含氧量少、昼夜温差大、寒冷季节长，柴油机机体、冷却液、机油、燃油和蓄电池电解液等都处于低温状态，导致柴油机起动阻力和摩擦阻力增大。柴油机的进气温度和流量同时下降，造成柴油机缸内压缩终了的温度

和压力下降，导致缸内混合气及燃烧条件达不到柴油机点燃和续燃要求^[6]。此外，蓄电池的电量由于低温骤减^[7]（-40℃时，电量约下降50%），导致柴油机起动系统功率下降，使柴油机起动转速低于起动必需的最低转速。

以上因素的共同作用造成柴油机在高原低温条件下冷机起动十分困难。通过高原地区车辆装备的低温起动试验得知，即使采用传统冷起动措施，约75%的柴油机在海拔3000m以上、气温低于-15℃的环境条件下不能顺利起动，给高原地区车辆装备的使用造成许多不便。

2.4 高原环境对柴油机热平衡性能的影响

柴油机的热平衡性能与环境气压和温度条件密切相关。在高原地区，气压、空气密度和进气氧含量降低，这使得柴油机的过量空气系数下降，导致柴油机燃烧不充分，后燃现象严重，使柴油机热负荷增大。另外，水的沸点及冷却系统空气质量流量随着海拔的升高逐渐下降，导致冷却系统的散热能力变差^[8]。这些因素共同作用导致柴油机排温升高，冷却水和润滑油温度偏高，柴油机热负荷过大。图4所示为不同海拔高度下柴油机排气温度随转速的变化趋势。海拔每升高1000m，柴油机的排气温度约平均升高8~25℃。

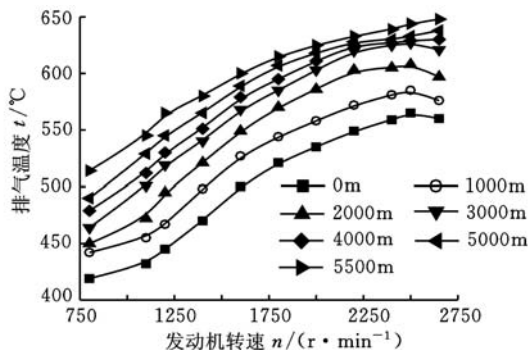


图4 不同海拔高度柴油机排气温度曲线

在平原地区运行良好的柴油机，在高原地区运行过程中出现了一系列热平衡问题，如车辆在海拔地区行驶或爬长坡时，柴油机热负荷加剧，严重时导致“开锅”、汽缸垫和排气管烧损、拉缸等现象，最终导致柴油机不能正常工作。出现这些问题的根本原因是设计冷却系统时未充分考虑高原环境对柴油机热平衡性能的影响，导致冷却系统的高原环境适应性差，柴油机的热平衡性能不能满足高原地区的使用要求。

3 柴油机高原性能提升技术措施

为了全面提升柴油机的高原性能，恢复柴油机的功率，提高柴油机的经济性、起动性能和热平

衡性能,降低柴油机的排放,可以采用高原增压技术、供油系统调整及结构优化技术、低气压低温启动技术、热平衡控制技术和电控柴油机高原标定技术。

3.1 高原增压技术

增压技术是柴油机在高原地区进行功率恢复、性能提升最有效的技术措施^[9]。柴油机匹配涡轮增压器后,可以提高柴油机的进气密度、增大进气量,改善燃烧过程,提高柴油机的动力性和经济性。但是,目前柴油机大多针对固定的海拔高度进行增压匹配,当柴油机工作海拔发生变化时,柴油机与增压器的匹配性能发生变化,性能会发生急剧下降^[10]。同时,涡轮增压器在高原运行时容易出现超温和超速现象,影响了涡轮增压器的正常使用。

目前,国际上最先进的内燃机增压技术主要有可变截面涡轮增压技术、二级增压技术和高增压技术^[11]。这3种增压技术各有优缺点,将可变截面涡轮增压技术与二级增压技术结合在一起使用,即采用可调二级增压技术,可以实现增压比的可调,具有瞬态响应特性好的特点,满足柴油机在不同海拔高原地区及运行工况下的增压需求。因此,从增压技术先进性和变海拔适应性来看,可调二级增压技术是未来高原车辆柴油机首选的增压技术。

3.2 供油系统调整及结构优化技术

调整柴油机供油系统参数,如供油提前角、循环喷油量、喷油压力等,可以解决柴油机高原功率恢复问题。但是这种方法会增大燃油消耗量,降低柴油机的燃油经济性。因此,供油系统调整一般仅作为一种辅助手段使用。

柴油机结构优化主要包括:①排气管优化,对排气管的长度、截面积等进行优化,提高废气能量的利用,进而提高增压器效率;②燃烧室结构优化,提高压缩比,进而实现柴油机高原燃烧优化;③燃油系统结构优化,通过对高压油泵和喷油器结构参数进行优化,优化喷油参数、提高燃油雾化质量,改善燃烧过程^[9]。

3.3 低气压低温启动技术

目前,我国高原地区使用的柴油机几乎都装备有冷启动辅助措施(加注启动液、电热塞、进气预热装置等),但行之有效的柴油机低气压低温启动措施还很少。传统的柴油机冷启动辅助措施均不能使柴油机在高原极端环境条件(5500m、-41℃)下顺利启动。

近几年,液体循环加热装置(如燃油加热器)、

蓄电池保温装置、胶体蓄电池、蓄电池并联超级电容等柴油机冷启动辅助装置及新型启动电源得到了广泛应用^[7-8]。将燃油加热器作为柴油机预热系统,通过加热循环冷却液来提高柴油机机体、机油、燃油或蓄电池的温度,可实现柴油机在热机状态下的启动。同时,将蓄电池保温装置、胶体蓄电池或蓄电池并联超级电容作为启动电源,可以彻底解决普通蓄电池的高原适应性问题。采用燃油加热器与新型启动电源相结合的组合式柴油机冷启动辅助措施,既提高了柴油机的启动能力,又不降低柴油机的可靠性和耐久性,能够彻底解决高原寒区柴油机的冷启动问题。

3.4 热平衡控制技术

传统的柴油机冷却系统采用蜡式节温器、机械驱动冷却水泵和冷却风扇,无法按柴油机的冷却需求调节冷却介质的流速和流量,难以使柴油机在最佳的温度下工作,甚至导致柴油机出现热平衡问题。

柴油机热平衡控制技术也称为柴油机热管理技术,是解决柴油机高原热平衡问题的有效措施^[12]。柴油机热平衡控制技术通过采用电控节温器、电控风扇、电控水泵,可以根据环境条件(气压和环境温度)、运行工况及冷却液的温度来动态调整冷却风扇转速、水泵流量、节温器的开启等,进而控制柴油机的冷却量,最终实现冷却系统的电控化和智能化,解决柴油机在高原地区的热平衡问题,保证柴油机冷却系统不过热、不“开锅”,提高柴油机冷却系统的高原环境适应能力。

3.5 优化标定技术

随着能源危机及排放法规的日趋严格,电子控制技术在柴油机上的应用越来越广泛。为了最大限度地满足柴油机在高原运行时的动力性、经济性、启动性能和排放性能等要求,必须对电控柴油机进行精确的匹配标定,以确定各控制参数和调节参数(喷油量、喷油定时、喷油压力、喷油速率等)的最优值。电控柴油机的标定已经成为柴油机开发和整车匹配中不可缺少的重要环节^[13]。

通过电控柴油机高原优化标定,可以大大地改善柴油机的高原使用性能,提高柴油机的动力性、经济性及运转稳定性,改善柴油机的低温启动性能和排放性能,使柴油机获得很宽的海拔高度使用范围,提升柴油机的高原适应能力。

4 结语

通过不同排量及类型的车用柴油机高原性能模拟试验,研究分析了海拔高度对柴油机动力性、

经济性和冷起动等性能的影响。试验表明:低气压和低温是影响柴油机高原性能的主要环境因素;当海拔高度超过 3000m 时,柴油机的各项性能指标均明显下降;柴油机高原性能的下降是导致车辆装备性能下降的主要原因。在提升车用柴油机高原性能的关键技术中,高原增压技术、供油系统调整及结构优化技术、低气压低温起动技术、热平衡控制技术、电控柴油机高原标定技术是车用柴油机高原动力性、经济性、起动性、热平衡等综合性能提升的关键技术。

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.

[2] 申立中,杨永忠,雷基林,等. 不同海拔下增压中冷柴油机性能和排放的研究[J]. 内燃机学报,2006,24(3):250-255.
Shen Lizhong, Yang Yongzhong, Lei Jilin, et al. Study of Performance and Emissions of a Turbocharged Inter-Cooling Diesel Engine at Different Altitudes[J]. Transactions of CSICE,2006,24(3):250-255.

[3] 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.
Zhang Zhiqiang, He Yongling, Han Zhiqiang, et al. Analysis of the Influence of Plateau Environment on Vehicle Diesel and Countermeasure[J]. Equipment Environmental Engineering,2009,6(2):27-31.

[4] 靳生盛. 高原环境对工程机械动力系统的影响及措施[J]. 青海师范大学学报(自然科学版),2004(4):48-50.
Jin Shengsheng. The Influence and Measure of Plateau's Environment for Engineering Mechanical Power System[J]. Journal of Qinghai Normal University(Natural Science Edition),2004(4):48-50.

[5] 刘瑞林,周广猛,许翔,等. SOFIM 电控共轨柴油机高海拔性能模拟[J]. 燃烧科学与技术,2010,16(4):303-308.
Liu Ruilin, Zhou Guangmeng, Xu Xiang, et al. Performance of SOFIM Electrically Controlled Common-Rail Diesel Engine at High Altitude [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010,16(4):303-308.

[6] 靳尚杰,王振涛,丁仕峰,等. 低气压低温对柴油机起动性能影响分析[J]. 军事交通学院学报,2010,12(2):63-66.
Jin Shangjie, Wang Zhentao, Ding Shifeng, et al. Analy-

sis of Low Air Pressure and Low Temperature on Starting Ability of Diesel Engine[J]. Journal of Military Transportation University,2010,12(2):63-66.

[7] 宁涛,沈承,张福才. 超级电容在柴油机低温启动中的应用研究[J]. 移动电源与车辆,2010(1):16-18.
Ning Tao, Shen Cheng, Zhang Fucui. The Application and Research of Supercapacitor in Low Temperature Starting Performance for Diesel Engine[J]. Movable Power Station & Vehicle,2010(1):16-18.

[8] 许翔,刘瑞林,刘刚,等. 高原发动机热管理系统性能分析研究[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.

[9] 王军. WD615 柴油机高原适应性技术研究[J]. 山东内燃机,2003(3):22-27.
Wang Jun. Research on Plateau Adaptability Technology for WD615 Diesel Engine[J]. Shandong Internal Combustion Engine,2003(3):22-27.

[10] 张海雷. 柴油机变海拔涡轮增压技术研究[D]. 北京:清华大学,2008.

[11] 张扬军,张树勇,徐建中. 内燃机流动热力学与涡轮增压技术研究[J]. 内燃机学报,2008,26(增):90-95.
Zhang Yangjun, Zhang Shuyong, Xu Jianzhong. Research in IC Engine Flowthermodynamics and Turbocharging Technology [J]. Transactions of CSICE,2008(S):90-95.

[12] 许翔,凤蕴,董素荣,等. 车辆热管理技术及其应用[J]. 军事交通学院学报,2013,15(1):43-47.
Xu Xiang, Feng Yun, Dong Surong, et al. Application and Research of Thermal Management Technology of Vehicle[J]. Journal of Military Transportation University,2013,15(1):43-47.

[13] 刘福水,仇滔,刘兴华,等. 基于模型的电控柴油机标定技术[J]. 车用发动机,2005(6):1-4.
Liu Fushui, Qiu Tao, Liu Xinghua, et al. Model Based Calibration Method for Electronic Controlled Diesel Engine[J]. Vehicle Engine,2005(6):1-4.

(编辑 张洋)

作者简介:许翔,男,1978年生。军事交通学院军用车辆系博士、讲师。主要研究方向为军用车辆性能仿真、动力机械高原环境适应性试验与评价等。发表论文 20 余篇。刘瑞林,男,1963年生。军事交通学院军用车辆系教授、博士研究生导师。董素荣,女,1967年生。军事交通学院军用车辆系副教授。刘刚,男,1981年生。军事交通学院军用车辆系讲师。