

综 述

高原环境对车辆动力性的影响及动力提升措施

周广猛¹, 刘瑞林¹, 许翔¹, 孙文龙¹, 石秉良², 祁涛², 谢来卿²

(1. 军事交通学院, 天津 300161; 2. 中国人民解放军 63969 部队, 南京 230026)

摘 要: 在总结我国高原气候和地理环境特点的基础上,从反映车辆动力性能的指标出发,以加速时间、最大爬坡度和最高车速入手,理论分析了对整车高原动力性影响较大的因素,主要包括有效热效率、循环喷油量、滚动阻力系数、空气密度对空气阻力的影响等。通过分析高原环境对这些因素的影响,总结出了高原环境对车辆动力性的影响机理,并进一步提出了整车高原动力性改进的技术措施,认为先进增压、燃烧优化、高压共轨燃油喷射、高原环境标定、热平衡控制和富氧进气燃烧等技术措施成为提高车辆动力性的有效技术措施。

关键词: 车辆; 高原环境; 动力性; 提升

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.03.010

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)03-0045-07

Effects of Plateau Environment on Power Performance of Vehicles and Measures to Improve Power Performance in Plateau

ZHOU Guang-meng¹, LIU Rui-lin¹, XU Xiang¹, SUN Wen-long¹,
SHI Bing-liang², QI Tao², XIE Lai-qing²

(1. Military Transportation University, Tianjin 300161, China; 2. 63969 PLA Troops, Nanjing 230026, China)

ABSTRACT: Based on summarizing characteristics of climatic and geographical environment, the factors which affect dynamic performance of vehicles characterized by acceleration time, maximum gradability and maximum vehicle speed evidently were analyzed theoretically, which included effective thermal efficiency, fuel delivery per cycle per cylinder, coefficient of rolling resistance and effects of air density on air friction, etc. The mechanism of plateau environment on power performance of vehicles were got by analyzing the impacts of plateau environment on these factors. Then technical measures to improve plateau power performance of vehicles were put forward. Advanced turbocharging technique, combustion optimization technique, common rail fuel injection technique, plateau environment calibration technique, heat balance control technique and oxygen-enrichment combustion technology were deemed to be effective measures to improve power performance of vehicles in plateau.

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2014-03-30

Received : 2014-03-06; Revised: 2014-03-30

作者简介: 周广猛(1984—),男,山东邹城人,博士,讲师,主要研究方向为动力机械环境适应性。

Biography: ZHOU Guang-meng (1984—), Male, from Zoucheng, Shandong, Ph. D., Lecturer, Research focus: environmental adaptability of power machine.

KEY WORDS: vehicle; plateau environment; power performance; improvement

在世界地理环境中,我国高原具有海拔高和面积广的特点。海拔 3 km 以上的高原地域占全国陆地总面积的 26%,仅我国的青藏高原就达 230 万平方公里,平均海拔在 4 km 以上^[1-3]。全世界海拔 2 km 以上的地域,才占全球陆地总面积的 13.2%,远低于我国高原的相应比例。随着海拔高度的升高,环境参数发生变化。海拔每升高 1 km,大气压力平均下降 9.5 kPa,空气密度平均减小 0.092 kg/m³,空气含氧量平均减少 30.18 g/m³,大气温度平均下降 4 ℃,水沸点平均降低 2.7 ℃^[4-5]。同时高原环境外通条件差而少,公路技术等级低,质量差,其中四级和等级外公路占 80% 左右^[1]。高原环境下气候和地理环境条件的变化导致车辆机动性能降低、加速时间和加速距离加长、最高车速下降、最大爬坡度减小、载质量减少、运输效率下降^[6],车辆的动力性下降。加速特性和爬坡性能是制约车辆高原适应性好坏的主要因素^[7],这意味着整车的动力性已成为制约车辆高原适应性的关键因素,对车辆的综合性能造成影响^[8]。对于军用车辆装备而言,由于机动性是军车最重要的评价指标之一,因此对车辆装备高原动力性能的要求更为严格。当前,车辆的动力性随海拔高度的升高而下降已经成为了共识,但高原环境对车辆动力性影响主要从高原环境对发动机性能的影响进行分析或者等同^[9-12],缺乏全面而具体的分析。笔者从反映车辆动力性能的指标出发,利用理论分析的方式,能够更为全面地分析高原环境对车辆动力性的影响,并在此基础上,提出了车辆高原动力性能提升的技术措施。

1 高原环境对车辆动力性的影响机理分析

汽车的动力性指汽车在规定总重量条件下,以尽可能高的平均技术速度在规定路面行驶的能力,其主要技术指标包括加速时间 t 、最大爬坡度 $i_{\max}$ 和最高车速 $u_{a \max}$ (km/h)。加速时间 t 反映汽车的加速能力,常用原地起步加速时间与超车加速时间表示,均可以用加速度 $\frac{du}{dt}$ 反映,用式(1)表示。

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{\delta m} [F_t - (F_f + F_w)] \quad (1)$$

式中: F_t 为驱动力, N; F_f 为滚动阻力, N; F_w 为空气阻力, N。

汽车的爬坡能力,是指汽车在良好路面上克服滚动阻力和空气阻力后的余力全部用来克服坡度阻力时能爬上的坡度,利用汽车行驶方程式确定 I 挡及低挡爬坡能力时,应采用 $G \sin \alpha$ 作为坡度阻力,式(2)给出了最大爬坡度 α 的计算公式:

$$\alpha = \arcsin \frac{F_t - (F_f + F_w)}{G} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可见,车辆的爬坡能力和加速能力均与 $[F_t - (F_f + F_w)]$ 成正比。式(3)给出了发动机转速与汽车行驶速度之间的关系,在传动比确定的前提下,整车的最大行驶速度与发动机的标定转速成正比,而整车最大转速的实现,也取决于 $[F_t - (F_f + F_w)]$ 。

$$u_a = 0.377 \frac{n}{i_g i_o} \quad (3)$$

由以上分析可得,整车的动力性与 $[F_t - (F_f + F_w)]$ 直接相关。其直接的物理意义为:当车速低于最高车速时,若驱动力大于行驶阻力,汽车就可以利用剩余的驱动力进行加速或爬坡,甚至达到最大车速,令 $\Delta F = F_t - (F_f + F_w)$,则 ΔF 反映动力性的大小。

式(4)给出了 F_t 的计算公式, T_{iq} 可由式(5)表示。

$$F_t = \frac{T_{iq} i_g i_o \eta_T}{r} \quad (4)$$

式中: F_t 为作用于驱动轮的转矩; T_{iq} 为发动机转矩; i_g 为变速器的传动比; i_o 为主减速器的传动比; η_T 为传动系的机械效率; r 为车轮半径。

$$T_{iq} = 955 \eta_{et} g_b H_u \frac{i}{3\tau} \quad (5)$$

式中: η_{et} 为有效热效率; g_b 为循环供油量, mg/(缸·循环); H_u 为燃料低热值; i 为气缸数; h 为发动机转速; τ 为冲程数。

F_f 可由式(6)表示:

$$F_f = W f \quad (6)$$

式中: W 为车轮负荷, N; f 为滚动阻力系数。

F_w 可由式(7)表示:

$$F_w = \frac{1}{2} = C_D A \rho u_r^2 \quad (7)$$

式中: C_D 为空气阻力系数; ρ 为空气密度, $N \cdot s^2/m^4$; A 为迎风面积, 即汽车行驶方向的投影面积, m^2 ; u_r 为相对速度, 在无风时即汽车的行驶速度 u_a , m/s 。

将式(4)—(7)代入式 $\Delta F = F_t - (F_f + F_w)$ 中, 可得:

$$\Delta F = \frac{955 H_u \ddot{i}_g \dot{i}_o \eta_{et} g_b \eta_T}{3\pi r} - (Wf + \frac{1}{2} C_D A \rho u_r^2) \quad (8)$$

将由常数组成的 $\frac{955 H_u \ddot{i}_g \dot{i}_o}{3\pi r}$ 设为常数项 C_1 , 在高原环境同平原一样载质量的前提下, W 可视为常数项 C_2 。由空气阻力计算公式可见: 空气密度对整车的空气阻力影响较大, 随海拔的升高, 空气密度下降, 会造成空气阻力的下降, 空气阻力的下降与空气密度的变化成正比。空气阻力的减小, 有利于提高整车的动力性, 其减小的程度小于高原环境对其他因素所造成动力性下降的影响, 且在高原环境条件下无法改变空气密度, 故该因素对改善车辆在高原环境条件的动力性影响不大。空气阻力可用空气密度的函数 $\varphi(\rho)$ 来表示, 则式(8)可以进一步表示为:

$$\Delta F = C_1 g_b \eta_{et} \eta_T - [C_2 f + \varphi(\rho)] \quad (9)$$

由式(9)可见: 车辆高原动力性能主要取决于有效热效率 η_{et} 、循环喷油量 g_b 、机械效率 η_T 、滚动阻力系数 f 和空气密度 ρ 。

1) 有效热效率 η_{et} 的影响。 η_{et} 能够表示车用发动机燃烧的完善程度, 提高 η_{et} 不仅能够提高车用发动机的燃油经济性, 也能够提高车用发动机的动力性。高原环境对 η_{et} 的影响较大, 在高原环境条件下, 大气压力降低, 车用发动机的进气密度降低, 发动机进气充量减小, 过量空气系数降低, 即便对循环喷油量进行调整, 过量空气系数仍然随海拔的升高而降低。海拔每升高 1 km, 不同转速下的过量空气系数下降 3% 以上, 低速工况过量空气系数甚至下降至 1 以内^[13]。过量空气系数的降低, 造成了压缩终点压力和温度降低, 同时由于高原环境下混合气密度减小导致反应物分子之间的碰撞机率降低, 混合气预反应的物理和化学时间延长, 滞燃期延长。同时造成化学反应速度降低, 燃烧持续期延长, 后燃比例增长, 平均指示压力降低, 造成了高原环境下的

指示热效率和有效热效率下降^[14—17], 发动机火用损失增大, 引起发动机动力性下降^[3, 18—22]。特别是增压器匹配时无法兼顾低速工况, 高海拔低转速下压气机效率降低, 进气流量大幅下降, 低速动力性下降幅度更加严重^[23—24], 造成整车的低速动力性下降, 扭矩储备系数减小, 爬坡能力降低。

2) 循环喷油量 g_b 的影响。当不对 g_b 进行调整时, 随海拔的增加, g_b 对整车动力性没有影响。随海拔的升高, 发动机燃烧恶化, 后燃增加, 造成柴油机热负荷增大。某重型车用柴油机的试验结果表明: 从平原到海拔 4000 m, 涡前排温最高上升 180 °C, 缸内燃烧温度峰值上升 300 °C 以上, 活塞表面最高温度最多上升 173 °C^[25]; 同时由于水沸点降低, 容易造成冷却水开锅, 而导致柴油机冷却能力下降。二者的共同作用, 对柴油机在高原环境条件下的综合性能造成影响, 甚至出现发动机气缸垫烧蚀和拉缸的现象, 严重影响柴油机的使用性能, 需要通过减少循环喷油量来降低发动机的热负荷。此外, 随着海拔高度的升高, 尽管大气密度降低, 导致柴油机进气量减小, 但同时涡轮背压也随之降低, 增压比增大, 增压器转速升高, 特别是在高转速区域, 增压器转速升高的更为明显, 需要减少循环喷油量, 防止增压器超速^[21, 26—28]。在高原环境条件下, 对循环喷油量进行调整, 适当牺牲发动机动力性, 可以保证发动机可靠运转^[13]。

3) 机械效率 η_T 的影响。高原环境对机械效率 η_T 的影响主要是在高原环境下, 空气密度的减小, 减速器、变速器等处散热减少, 造成的热损失增大, 由于温度的变化对机械效率造成影响。高原环境对其影响程度较对车辆发动机动力性的影响程度小, 由于在高原环境条件下风沙大, 沙尘容易进入传动部件, 同时空气的密度降低, 空气散热能力降低, 传动部件的温升增加, 润滑油使用寿命减低, 如果不能及时对车辆进行维护和保养, 会造成车辆机械效率降低, 影响车辆的动力性。

4) 滚动阻力系数 f 的影响。滚动阻力系数 f 与路面的种类, 行驶车速以及轮胎的构造、材料和气压等有关。在高原环境条件下, 道路条件发生了变化, 具体表现在路网稀而偏, 密度小, 外通条件差而少, 公路技术等级低, 这些道路通行条件的变化造成了道路滚动阻力系数的增大。特别是高原山路、高原荒漠等道路下, 滚动阻力系数不同程度地增加。如

与良好的沥青路面相比,碎石路面的滚动阻力系数增加 1 倍以上,坑洼的卵石路面增加 3 倍以上,干砂路面甚至达到了 10 倍以上。

5) 空气密度 ρ 的变化对空气阻力的影响。对整车而言,高原环境的变化对整车的动力性提升也有有益的影响,主要体现在高原环境下空气密度的下降造成空气阻力降低,降低的幅度和空气密度降低的幅度一致,然而对空气阻力的减小程度有限,无法补偿高原环境条件的变化对整车动力性下降造成的影响。

结合上述分析,高原环境对车辆动力性的影响机理示意如图 1 所示。由该图可见,高原气候和地理环境均对车辆的动力性造成影响,其中发动机动力性的下降是车辆动力性下降的主要因素。研究表明,海拔高度每升高 1000 m,非增压柴油机的功率约下降 8% ~ 13%,增压柴油机功率下降约 1% ~ 8%,增压中冷柴油机功率下降约 1% ~ 4%^[7]。在高原环境条件下,空气阻力的降低难以补偿发动机动力性的下降,造成车辆高原动力性的下降。除此之外,车辆在高原可靠性的降低也会对车辆动力性造成影响,这主要表现为车辆在使用过程中,由于其技术性能下降造成车辆动力性的下降。同时在高原环境条件下,制氧机等附件的使用也消耗部分动力,在上述因素影响下整车动力性的下降程度会进一步增加。

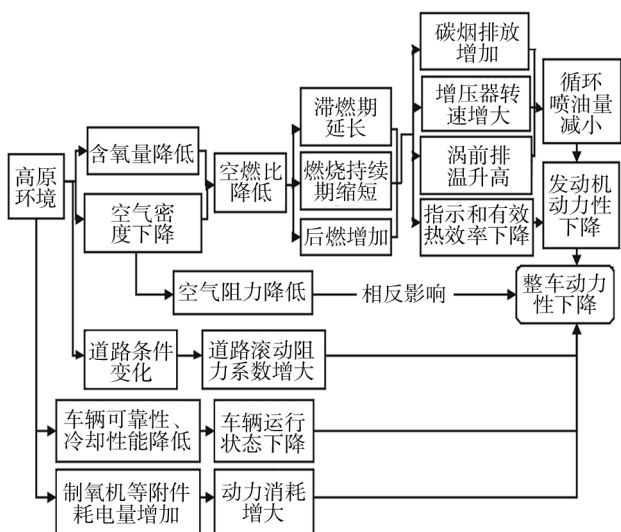


图 1 高原环境对车辆动力性的影响机理示意

Fig. 1 Influencing mechanism of plateau environment on vehicle power performance

随着对车辆节能减排要求的不断增高,特别是对车辆的高原排放问题也逐渐得到重视^[29],美国联邦环保署要求从 2002 年 10 月 1 日起,在用重型车必须满足 NTE 排放限值的规定^[17]。该规定基于车载排放测试技术^[26],对 0 ~ 1676 m 海拔范围内运行的重型车的排放做出了限制,欧洲要求在 1600 m 海拔范围内的 NO_x 排放满足 OBD 法规^[17,30]。国内北京理工大学^[21,31]和昆明理工大学^[49]现在已经开始开展高原环境条件对车辆排放影响的研究。对高原排放要求的不断增高,造成整车动力性的降低,国内外尚未对其进行定性分析。

2 提高整车高原动力性的技术措施

1) 采用可变截面涡轮增压、二级增压等先进增压技术。虽然传统的废气涡轮增压柴油机能够部分恢复高原动力,但仍然存在动力性不足、经济性差、转矩特性不良、增压器超速、热负荷大、适应性系数低等问题^[32]。虽然受压力和流量的限制,可变截面涡轮增压技术,高原功率恢复有限,但在一定程度上能够实现变工况变海拔的控制,有利于提高发动机的低速和瞬态特性。由于二级增压技术特别是融合可变截面涡轮增压的二级增压技术具有宽广的流量范围和更高的效率,因此其具有更大的变海拔适应性潜力^[33-35]。

2) 采用燃烧优化技术。高原下发动机燃烧恶化,指示和有效热效率下降,影响发动机的动力性。采用燃烧优化技术,通过优化喷油定时、循环喷油量,能够改善车用发动机高原燃烧,提高其动力性。在对循环喷油量进行优化时,需要适当减小喷油量,提高空燃比,改善燃烧;在进行喷油定时优化时,可以通过适当提前喷油,增加上止点附件燃烧放热量,提高发动机燃烧效率^[36]。

3) 采用高压共轨燃油喷射技术。该技术是建立在直喷技术、预喷射技术和电控技术基础上的一种全新概念的喷油系统^[37]。它克服了柴油机机械式供油系统中转速对轨压的影响,轨压、喷油过程和喷油持续期不受负荷和转速的影响,喷油定时与燃油计量完全分开,可以实现预喷射、三角形喷射、后喷射和多段喷射等,有利于全面改善整机性能^[38-39]。在高原环境条件下采用该技术,一方面能

够改善发动机在高原环境条件下的雾化特性,另一方面能够采用更灵活的喷油策略,更方便地实现喷油参数的大气压力修正,从而改善发动机高原燃烧,提高整机动力性^[36,40]。

4) 采用高原环境标定技术。采用电控技术后,车辆的高原动力性在很大程度上取决于高原环境标定的好坏,否则其整机性能可能比不采用电控技术下降得更多。在柴油机上采用电控后,燃油喷射参数、增压控制参数^[41]、废气再循环参数^[35,42]等控制参数均要考虑高原标定问题。西弗吉尼亚大学和墨西哥城环境署对9台柴油车进行高海拔试验时发现:由于Volvo VE D7C-300高压共轨柴油机高海拔匹配和标定工作不完善,在墨西哥城(海拔2133.6 m)运行时,出现排放性和经济性恶化,动力性下降的问题^[43]。通过对某车进行高原优化标定后,与平原相比,该车在格尔木地区最高档40~80 km/h加速由原来下降22.0%改善到4.8%,起步连续换挡0~80 km/h由原来下降8.6%改善到3.0%^[44],整车动力性得到明显改善。

5) 采用热平衡控制技术。对散热器等部件进行优化设计^[45],通过采用电控水泵、电控风扇^[46]等,根据高原环境条件、运行工况等参数,来动态调整冷却风扇转速、节温器的开启等,控制整机的冷却量,解决车辆在高原地区的热平衡问题。特别是通过运用发动机高原热管理技术充分挖掘车辆动力性提升的潜力^[47],使热平衡这一约束条件能够保证整车动力性能的发挥。

6) 采用富氧进气燃烧技术。车辆高原动力性下降主要是由于在高原环境条件下,空气稀薄、氧含量低造成的。富氧进气燃烧技术的应用可以有效地改善燃烧,提高车辆的动力性^[48-49],但受制于现阶段制氧技术水平的限制,如膜法富氧技术的能耗较高,当前该技术还处于研究阶段^[50]。

3 结语

在高原环境条件下,随海拔的升高,整车动力性降低,已成为制约车辆高原适应性的关键因素,对车辆的综合性能造成影响。对在高原环境条件下发动机有效热效率、循环喷油量等影响整车动力性的因素进行了分析,明确了高原环境对整车动力性的作用机理,进一步总结了先进涡轮增压技术、燃烧优化

技术、高压共轨燃油喷射技术、高原环境标定技术、热平衡控制技术、富氧进气燃烧等技术改善整车高原环境下的动力性能。

参考文献:

- [1] 刘瑞林,董素荣,许翔,等.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, et al. Research on Plateau Environmental Adaptability of Diesel Engines [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [2] WANG S J, CHEN J B, ZHANG J Z, et al. Development of Highway Constructing Technology in the Permafrost Region on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(2): 497—506.
- [3] ZHANG Hai-lei, ZHU-GE Wei-lin, ZHANG Yang-jun, et al. Study of the Control Strategy of the Plateau Self-adapted Turbocharging System for Diesel Engine[C]//SAE Paper. Shanghai, China, 2008.
- [4] 周广猛,刘瑞林,董素荣,等.柴油机高原环境适应性研究综述[J].车用发动机,2013(4):1—5.
ZHOU Guang-meng, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. Review on Plateau Environment Adaptability of Diesel Engine[J]. Vehicle Engine, 2013(4): 1—5.
- [5] 许翔,刘瑞林,董素荣,等.车辆高原环境模拟试验技术发展现状综述[J].装备环境工程,2012,9(6):63—66.
XU Xiang, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. On Development of Vehicle Simulated Plateau Environmental Test Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 63—66.
- [6] PENHALBEL L, MOREIRA F, ARAÚJO J. Altitude and Winter Tests for Best Vehicle Operations[C]//SAE Paper. São Paulo, Brasil, 2007.
- [7] 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 Zhi-qiang, HE Yong-ling, HAN Zhi-qiang, et al. Analysis of the Influence of Plateau Environment on Vehicle Diesel and Countermeasure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 27—31.
- [8] 胥泽奇,张世燕,宣卫芳.装备环境适应性评价[J].装备环境工程,2012,9(1):54—59.
XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 54—59.

- [9] 申立中,杨永忠,雷基林,等.不同海拔地区下增压中冷柴油机的性能研究[J].汽车工程,2005,27(6):674—677.
- SHEN Li-zhong, YANG Yong-zhong, LEI Ji-lin, et al. A Study on the Performance of Turbocharged and Intercooled Diesel Engine Working in the Different Altitude Regions[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(6): 674—677.
- [10] 叶林保,杨林,高治宏.汽车用涡轮增压柴油机高原性能的研究[J].现代车用动力,2006(1):39—43.
- YE Lin-bao, YANG Lin, GAO Zhi-hong. Research on Highland Performance of Turbocharged Diesel Engine for Vehicle[J]. Modern Vehicle Power, 2006(1): 39—43.
- [11] 刘瑞林,刘宏威,秦德.涡轮增压柴油机高海拔(低气压)性能试验研究[J].内燃机学报,2003,21(3):193—196.
- LIU Rui-lin, LIU Hong-wei, QIN De. An Experimental Study on Performance of Turbocharged Diesel Engines at High Altitude (Low Air Pressure)[J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(3): 193—196.
- [12] 徐斌,薄东,尧辉.高原发动机涡轮增压的效率修正计算[J].车用发动机,2009(6):7—10.
- XU Bin, BO Dong, YAO Hui. Correction Computation of Engine Turbocharging Efficiency under Plateau Conditions[J]. Vehicle Engine, 2009(6): 7—10.
- [13] 刘瑞林,周广猛,李骏,等.高压共轨柴油机高海拔全负荷标定[J].燃烧科学与技术,2012,18(3):199—205.
- LIU Rui-lin, ZHOU Guang-meng, LI Jun, et al. Calibration of Common-rail Diesel Engine at High Altitudes under Full Load Operating Conditions[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, 18(3): 199—205.
- [14] 周广猛,刘瑞林,董素荣,等.高压共轨柴油机高海拔(低气压)燃烧特性[J].内燃机学报,2012,30(3):220—226.
- ZHOU Guang-meng, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. Combustion Characteristics of Common Rail Diesel Engine Under High Altitude (Low Pressure) Conditions[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(3): 220—226.
- [15] 申立中,沈颖刚,毕玉华,等.不同海拔高度下自然吸气和增压柴油机的燃烧过程[J].内燃机学报,2002,20(1):49—52.
- SHEN Li-zhong, SHEN Ying-gang, BI Yu-hua, et al. Combustion Process of Naturally Aspirated and Supercharged Diesel Engines at Regions with Different Altitude[J]. Transactions of CSICE, 2002, 20(1): 49—52.
- [16] 周广猛.高压共轨柴油机高海拔标定和燃烧过程研究[D].武汉:海军工程大学,2012.
- ZHOU Guang-meng. Research on High Altitude Calibration and Combustion Process of Common Rail Diesel Engine[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2012.
- [17] 申立中,毕玉华,张伟,等.不同海拔下增压和增压中冷柴油机的燃烧过程[J].燃烧科学与技术,2005,11(6):525—529.
- SHEN Li-zhong, BI Yu-hua, ZHANG Wei, et al. Combustion Process of Turbocharged and Inter-Cooled Turbocharged Diesel Engine in Different Altitude Regions[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(6): 525—529.
- [18] SOARES S, SODRÉ J. Effects of Atmospheric Temperature and Pressure on the Performance of a Vehicle[J]. Proc Instn Mech Engrs Part D, 2002, 216(6): 473—477.
- [19] AGUDELO J, AGUDELO A, PÉREZ J. Energy and Energy Analysis of a Light Duty Diesel Engine Operating at Different Altitudes[J]. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2009, 48: 45—54.
- [20] YATES A D B. Fleet Tests to Determine the Octane Response at Different Altitudes for Vehicles Equipped with Knock Sensors[C]//SAE Paper. Yokohams, Japan, 2003.
- [21] HE C, GE Y, MA C, et al. Emission Characteristics of a Heavy-duty Diesel Engine at Simulated High Altitudes[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(7): 3138—3143.
- [22] SODRÉ J, SOARES S. Comparison of Engine Power Correction Factors for Varying Atmospheric Conditions[J]. J Braz Soc Mech Sci Eng, 2003, XXV(3): 279—285.
- [22] 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 Rui-lin, ZHOU Guang-meng, 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.
- [24] 刘瑞林,周广猛,董素荣,等.高压共轨柴油机高海拔性能仿真研究[J].车用发动机,2012(3):87—91.
- LIU Rui-lin, ZHOU Guang-meng, DONG Su-rong, et al. Simulation Study on Performance of High pressure Common Rail Diesel Engine at High Altitude[J]. Vehicle Engine, 2012(3): 87—91.
- [25] 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.
- [26] ZAVALA M, HERNDON S, WOOD E, et al. Comparison of Emissions from On-road Sources Using a Mobile Laboratory under Various Driving and Operational Sampling Modes[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009(9): 1—14.
- [27] TATUR M, LAERMANN M, KOEHLER E, et al. Development of an Emission Controls Concept for an IDI Heavy-duty Diesel Engine Meeting 2007 Phase-in Emission Standards[C]//SAE Paper. São Paulo, Brasil, 2007.
- [28] MCCORMICK R, ROSS J, GRABOSKI M. Effect of Several Oxygenates on Regulated Emissions from Heavy-duty Diesel Engines[J]. Environment of Science and Technology, 1997, 31(4): 1144—1150.
- [29] HUMAN D, ULLMAN T, BAINES T. Simulation of High Altitude Effects on Heavy-duty Diesel Emissions[C]//SAE Paper. 1990. (余不详)
- [30] GOMPEL P, WILLEMS F, DOOSJE E, et al. Exhaust-Gas Aftertreatment Under Extreme Conditions Validation in a Climatic-Altitude Chamber [J]. ATZ Autotechnology, 2010(10): 30—35.
- [31] 赵伟, 葛蕴珊, 谭建伟. 不同海拔工况下发动机排放特性研究[C]//中国内燃机学会燃烧节能净化分会学术年会论文集. 天津, 2011.
- ZHAO Wei, GE Yun-shan, TAN Jian-wei. Emission Characteristics of Diesel Engine at Different Simulated Altitudes[C]//CSICE, Tianjin; 2011.
- [32] 董素荣, 许翔, 周广猛, 等. 车用柴油机高原性能提升技术研究现状与发展[J]. 装备环境工程, 2013(2): 67—70.
- DONG Su-rong, XU Xiang, ZHOU Guang-meng, et al. Present Status and Development of Performance Advancing Technology of Vehicle Diesel Engine at Plateau[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013(2): 67—70.
- [33] 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.
- ZHANG Hai-Lei. Study of the Turbocharging System for Diesel Engine Operating at Varying Altitude Conditions [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [34] 刘系属, 魏名山, 马朝臣, 等. 不同海拔下单级和二级增压柴油机的仿真[J]. 内燃机学报, 2010, 28(5): 447—452.
- LIU Xi-hao, WEI Ming-shan, MA Chao-chen, et al. Simulation on One-Stage and Two-Stage Turbocharged Diesel Engines at Different Altitudes[J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(5): 447—452.
- [35] GALINDO J, LUJÁN J, CLIMENT H, et al. Turbocharging System Design of a Sequentially Turbocharged Diesel Engine by Means of a Wave Action Model[C]//SAE Paper. São Paulo, Brasil, 2007.
- [36] NAZAROV A, RALSTON R, REYNOLDS D. Method and System for Controlling Fuel Injection Timing to Maintain Desired Peak Cylinder Pressure for High Altitude Operation; US, 7,246,605 B2. [P].
- [37] ABDULLAH N R, WYSZYNSKI M L, TSOLAKIS A, et al. Combined Effects of Pilot Quantity, Injection Pressure and Dwell Periods on the Combustion and Emissions Behaviour of a Modern V6 Diesel Engine[J]. Archivum Combustionis, 2010, 30(4): 481—495.
- [38] ETHERIDGE J, BHAVE A, SMALLBONE A, et al. Optimization of Injection Strategy, Combustion Characteristics and Emissions for IC Engines Using Advanced Simulation Technologies[C]//SAE Paper. 2011. (余不详)
- [39] KHATAMNEZHAD H, KHALILARYA S, JAFARMADAR S, et al. Numerical Investigation on Spray Characteristics and Combustion Process in a DI Heavy Duty Diesel Engine at LTC Condition[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, 5(6): 523—537.
- [40] 刘瑞林, 周广猛, 李骏, 等. 高压共轨柴油机高海拔全负荷标定[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(3): 199—205.
- LIU Rui-lin, ZHOU Guang-meng, LI Jun, et al. Calibration of Common-rail Diesel Engine at High Altitudes under Full Load Operating Conditions[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, 18(3): 199—205.
- [41] BIAGGINI G, KNECHT W. The Advanced Iveco Cursor 10 Heavy Duty Truck Diesel Engine [C]//Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress. Seoul, 2000.
- [42] Detroit Diesel Corporation. Series 60 EGR Technician's Manual[Z]. Detroit: Detroit Diesel Corporation, 2004.
- [43] CLARK N, BORRELL E, MCKAIN D, et al. Evaluation of Emissions from New and In-use Transit Buses in Mexico City [C]//TRB 2006 Annual Meeting. Washington DC, 2006.
- [44] 赵云达. 电控柴油机整车高原适应性评价方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
- ZHAO Yun-da. Study on the Evaluation of Electronic Controlling Diesel Engine Adaptability on Altiplano[D]. Jilin: Jilin University, 2007.

- [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [9] 田海静, 成坚, 高章平. 无线传感器网络的军事应用研究[J]. 重庆通信学院学报, 2011(5): 2—3.
TIAN Hai-jing, CHENG Jian, GAO Zhang-ping. The Military Applications Research of Wireless Sensor Network [J]. Journal of Chongqing Communication Institute Quarterly, 2011(5): 2—3.
- [10] 党月芳. 无线传感器网络在军事领域中的应用研究[J]. 信息通信, 2011(3): 153—154.
DANG Yue-fang. Research and Application of Wireless Sensor Network in Military Field [J]. Information & Communication, 2011(3): 153—154.
- [11] 王子龙, 袁慎芳, 胡步清, 等. 用于大规模实时连续监测的 WSN 多信道基站设计[J]. 振动·测试与诊断, 2013(3): 494—498.
WANG Zi-long, YUAN Shen-fang, HU Bu-qing, et al. Design of WSN Multi-channel Sink Node for Widespread Real-Time Continuous Monitoring [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013(3): 494—498.
- [12] 杨烜. 基于传感器网络的战场环境下目标识别技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
YANG Huan. Research on Target Recognition Technologies of Battlefield Based on Neutral Networks [D]. Xi'an: Xidian University, 2006.
- [13] 崔逊学, 赵湛, 王成. 无线传感器网络的领域应用与设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
CUI Xun-xue, ZHAO Zhan, WANG Cheng. Field Applications and Design Technologies of Wireless Sensor Networks [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [14] PAOLO M, GIANLUIGI F, VINCENT G, et al. Cross-layer Design and Analysis of WSN-based Mobile Target Detection Systems [J]. Ad Hoc Networks, 2013 (11): 712—732.
- [15] 李洋伟, 谭敏生, 屈国普, 等. 基于 WSN 的核辐射监测系统路由算法研究[J]. 网络安全技术与应用, 2013(4): 10—13.
LI Yang-wei, TAN Min-sheng, QU Guo-pu, et al. The Route Algorithm for Nuclear Radiation Monitoring System Based on Wireless Sensor Network [J]. Network Security, 2013(4): 10—13.
- [16] 孟器宇. 战场环境下的移动自组织网络拓扑控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
MENG Qi-yu. Research on Topology Control in Mobile Ad Hoc Networks under the Battle Environment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- ~~~~~
- (上接第 51 页)
- [45] 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(自然科学版), 2009, 37(9): 90—93.
LI Yi, LI Yuan-cai, LIU Jing-ping. Calculating Heat Transfer of Radiators for Plateau Vehicles [J]. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2009, 37(9): 90—93.
- [46] 安相璧, 刘瑞林, 孙武全, 等. 海拔高度对电磁风扇离合器工作特性影响的试验研究[J]. 汽车技术, 2007(1): 28—30.
AN Xiang-bi, LIU Rui-lin, SUN Wu-quan, et al. Research for Effects of Altitude on Working Characteristic of Electromagnetic Fan Clutch [J]. Vehicle Technology, 2007(1): 28—3040.
- [47] 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—853.
WANG Mao-hai, CHEN Tao, ZHANG Yang-jun, et al. A Research on the Performances Analyses of Engine Thermal Management System at Plateau [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(10): 851—853.
- [48] PEREZ P L, BOEHMAN A L. Performance of a Single-cylinder Diesel Engine Using Oxygen-enriched Intake Air at Simulated High-altitude Conditions [J]. Aerospace Science and Technology, 2010, 14: 83—94.
- [49] 张永虎, 熊云, 刘晓, 等. 富氧进气改善高原汽车发动机动力性和经济性研究[J]. 汽车技术, 2011(3): 24—27.
ZHANG Yong-hu, XIONG Yun, LIU Xiao, et al. Research on Dynamic Property and Fuel Economy Improvement of Automotive Engine with Oxygen-enriched Intake Air in Highland [J]. Vehicle Technology, 2011(3): 24—27.
- [50] 肖广飞, 乔信起, 黄震, 等. 膜法富氧技术在内燃机上应用的研究进展[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 183—188.
XIAO Guang-fei, QIAO Xin-qi, HUANG Zhen, et al. Research Process on the Application of Membrane-based Oxygen-enrichment Technology to IC Engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2007, 38(2): 183—188.