

高原运行柴油机进气系统改进技术应用研究

刘国浩, 刘建敏, 郭猛超

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘 要: 针对高原运行柴油机出现的功率下降、油耗上升、热负荷升高等性能恶化问题, 从进气系统方面分析原因; 并通过空气滤清器、涡轮增压器、中冷器等进气系统的相关组成部分的技术改进来解决上述问题。研究为高原运行柴油机环境适应性改造提供了可行的技术参考。

关键词: 柴油机; 高原; 进气系统; 改进

中图分类号: TK423.4⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)03-0010-04

Research of Improvement Technologies on Air Supply System for Diesel Engine in Plateau Area

Liu Guohao, Liu Jianmin, Guo Mengchao

(Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: In order to solve the problems caused by the special environment factors in plateau areas, including the decrease of engine power, the increase of brake specific fuel consumption, and the aggravation of thermal load, the improvements of air cleaner, turbocharging system, inter-cooler are proposed with the analysis on intake system. It provides a research reference for environmental adaptation of diesel engine in plateau area.

Keywords: diesel engine; plateau area; air supply system; improvement

0 引 言

随着国家西部大开发战略的持续进行, 以及青藏铁路、西电东输、西气东送等工程的开展, 给高原环境下运行的汽车、工程机械及配套动力系统的发展带来难得机遇。我国西部地区面积广阔, 海拔从 1 000 m 到 4 500 m, 变化范围大, 局部地区海拔达到 5 000 m 以上。高原环境适应性柴油机的研发和改造越来越受重视, 且应用前景广阔。通过对现阶段高原运行柴油机的分析发现, 高原环境对柴油机性能带来的影响主要有^[1]: (1) 进入柴油机缸内的空气量减小, 压缩终了气缸内混合气的压力、温度降低, 使得喷入缸内的柴油不能及时着火燃烧, 造成燃烧拖后, 功率下降, 热负荷加重; (2) 由于循环供油量基本保持不变, 使得缸内部分燃料

由于缺氧而不能完全燃烧做功, 也导致发动机功率下降, 油耗上升; (3) 过量空气系数下降, 可燃混合气过浓, 着火延迟期变长, 后燃现象严重, 热负荷增大, 影响车辆的可靠性和使用寿命。可见, 高原环境对增压柴油机性能的影响主要是由进气质量流量、流速、进气氧含量等因素综合作用造成的, 而这些因素都和柴油机进气系统紧密相关。

1 进气系统存在问题分析

根据对某型特种车辆高原(海拔 3 700 m)实车试验情况和数据的分析, 认为柴油机进气系统主要存在以下问题: (1) 空气滤清器进气阻力上升快, 储尘能力降低, 滤清效率显著下降, 甚至发生滤芯击穿, 导致发动机进土, 造成发动机拉缸和早期磨损等故障。 (2) 增压器与内燃机的联合运行线发生

偏移，压气机效率降低，增压器超速、低速喘振的趋势增加，导致最大扭矩点和经济运行区向高速段漂移，稳定工作转速范围变窄，发动机扭矩特性变差，特别是低速性能严重恶化，如图 1。(3) 进气质量流量降低，进气密度下降，压缩终点气缸内混合气的压力、温度降低。

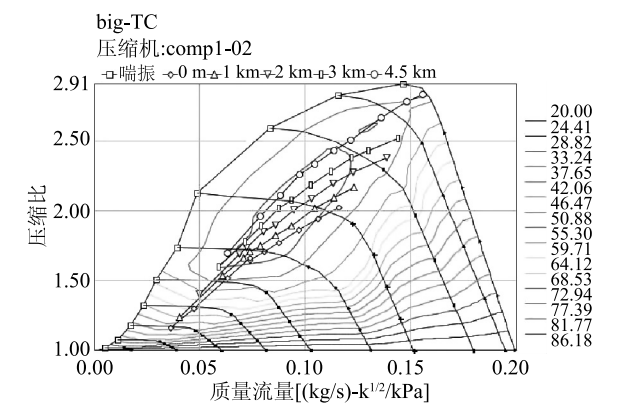


图 1 不同海拔下增压器与柴油机联合运行线

高原环境往往植被少、大气湿度小，灰尘含量大大高于平原地区(如表 1)，原有空气滤清器性能无法满足滤清需求，随着空气滤清器二级细滤处理尘土量的增加，粘附的颗粒物增多，细滤的进气阻力将逐渐增大，这将引起柴油机进气量减少，燃烧不完全和功率较低，最严重的是导致滤芯被击穿。图 2 为某型柴油机转速-涡前温度-空滤器阻力 MAP，从图中可以看出，随进气阻力的增加，涡前排气温度升高明显，缸内燃烧恶化。

表 1 青藏高原地区空气含沙量			
时间	11 月~4 月	5 月~10 月	平均
沙尘浓度(μg·m ⁻³)	153	36	92

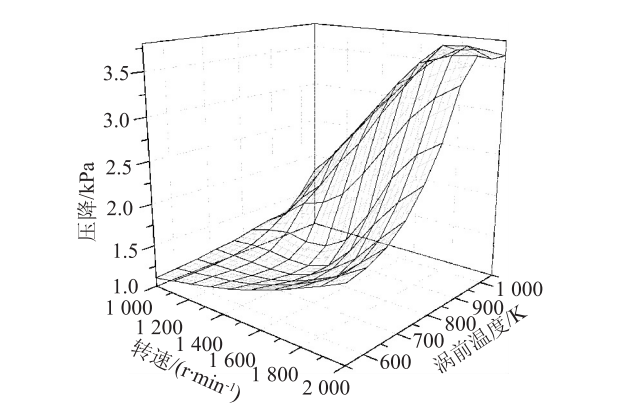


图 2 转速-涡前温度-空滤器压降 MAP

高原运行柴油机增压器出现以上问题，一方面是由于回旋式涡轮增压器与往复式机械柴油机匹配的固有问題；另一方面是由于燃烧拖后，后燃严重，废气能量过高，涡轮超速造成的。

根据增压器效率计算有关公式：

$$\eta_{TC} = \eta_{cad} \eta_{Tad} \eta_{mc} \eta_{mT} = \frac{T_1 R_A \frac{K_A}{K_A - 1} \left[\left(\frac{p_R}{p_1} \right)^{\frac{k_A - 1}{k_A}} - 1 \right] m_c}{T_3 R_g \frac{K_g}{K_g - 1} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}}} \right] m_T} = \frac{c_p T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_A - 1}{k_A}} - 1 \right]}{(1 + \frac{q_{mf}}{q_{mc}}) c_{pA} T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} \right]}$$

式中： η 为效率，下标 cad 为绝热效率；下标 m 指机械效率； c_p 、 c_{pA} 分别为空气和燃气的定压热容； k_A 、 k_g 分别为空气和燃气的热容比(c_p/c_v)； q_{mc} 为压气机中的空气质量流量； q_{mf} 为供入内燃机中的燃料质量流量； P 表示压力，下标 R 表示扫气压力， T 表示温度，下标 1、2、3、4 分别表示压气机前后和涡轮前后； K_A 和 K_g 分别为空气和燃气的绝热指数； R 指气体常数； m_c 和 m_l 分别为压气机进气流量和涡轮燃气流量。

高原环境对增压器总效率的影响实质是对压气机前后温度、压比与膨胀比的影响；对压气机的影响是通过雷诺数 Re 的下降来体现的；从增压器匹配的角度讲，柴油机运行线与压气机特性曲线的匹配点偏移是增压效率变化的直接原因。由于大气压力低，氧气含量低，恶化的进气条件直接导致了进气空气质量流量的降低。从图 3 可以看出，海拔越高，进气质量流量越低；转速越低，下降幅度越大。

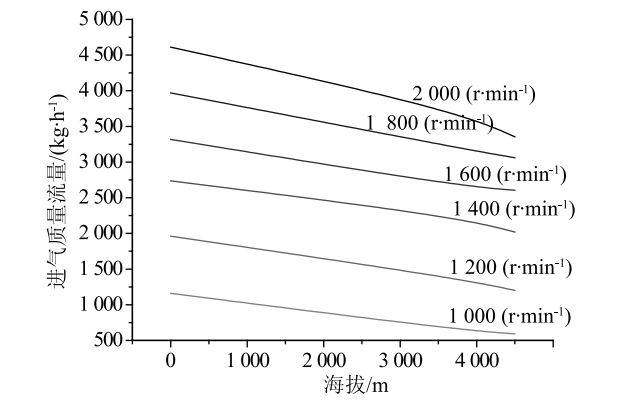


图 3 不同海拔外特性工况下进气流量

2 高原运行柴油机进气系统改进技术分析

2.1 空气预先滤清技术

空气预先滤清装置(以下简称空气预滤器)的

除尘原理主要是离心分离技术,含尘空气经过空气预滤器导流叶片高速旋转,空气密度大的灰尘被抛向四周。空气预滤器形式、结构、大小、布置和材质各有不同,各有特点,适用于不同用途的结构配置。现阶段空气预滤器按照分离尘土原理不同,可分为:离心式预滤器、油浴式预滤器、静电-旋风管式预滤器、新型空气预滤器等。

离心式预滤器利用沙尘的密度比空气大的特点,使空气在通道中产生旋转或改变方向,在离心力或惯性力的作用下,将沙尘甩到外围而与空气分离。该种预滤器对清除空气中较大颗粒沙尘特别有效,常用于在多沙尘地区作业的机械车辆,其滤清效率约为 70% ~ 75%。

油浴式空滤器(图 4)的基本原理是通过把含尘空气引向油池,利用惯性力使一部分灰尘被机油粘附,同时夹带着油雾的含尘空气再通过滤芯时,被进一步过滤,而被滤芯粘附的灰尘又随机油滴回到油池。

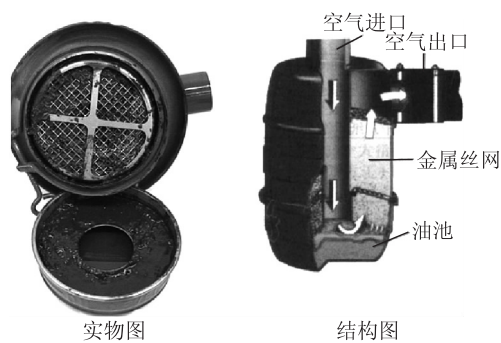


图 4 油浴式预滤器

静电除尘是一种公认的最洁净的除尘技术,具备过滤效率高、阻力小的优点。静电-旋风空气滤清器是在旋流管式空气滤清器内加入电极以引入高压静电场,实现离心滤清和静电滤清相结合的多机理空气滤清器。闫为革、刘淑艳等针对多尘或沙漠

地区工作的工程车辆,研究了一种高速旋转自清洁式空气预滤器;李宇等研究了一种新型脉冲喷射空气滤清器,集旋风分离和过滤分离为一体^[2]。以上两种尚处于研究阶段,且存在一些须要解决的技术问题,因此还没有在实际中得到应用。

2.2 增压技术

增压系统的改进技术主要有:重新匹配高效率、大流量增压系统;对涡轮增压器进行结构及材料的优化,提高效率;采用补齐增压、二级增压、可变增压、电动增压等新型增压技术。

重新选配增压器是最简捷的措施,对 WD615 型柴油机重新匹配大流量、高压比的增压器,并辅以进排气系统、供油系统适当的改进,使柴油机功率、扭矩、排温、油耗、烟度等指标都达到出厂要求^[3]。采用钛合金叶轮,缩小涡轮直径,采用无叶扩压器和喷嘴环,可以使叶轮圆周速度达到 500 (m·s⁻¹),并拓宽工作范围,以适应高原环境变化。新型增压技术的发展与应用,丰富了解决高原环境进气问题的手段,然而无论电动涡轮增压还是可变增压,由于成本高,可靠性低,在实际应用中尚难以得到推广。

2.3 中冷技术

中冷器的作用是降低增压空气的温度,以进一步提高增压空气的密度,进而提高柴油机的功率和降低柴油机的热负荷、排气温度。中冷器带走了一部分热量,从热平衡观点看,中冷后循环平均温度降低,散给冷却介质的热量将减少;同时进气压力的增加可使过量空气系数和平均有效压力增大,前者提高了指示热效率,后者提高了机械效率,因此中冷后有效热效率有所提高。有试验表明:增压空气温度每降低 10 ℃,柴油机功率可提高 2% ~ 3%;如保持柴油机功率不变,燃油消耗率下降 1.5%,最高燃烧温度或平均工作温度下降 3 ℃^[4]。中冷对增压器柴油机性能的影响具体可参见表 2。

表 2 中冷对增压柴油机性能的影响

发动机转速 /(r·min ⁻¹)	平均有效压力 /MPa	压比	中冷器进口温度 /℃	进气密度比	空气流量 /(m ³ ·min ⁻¹)	耗油率 /(g·(kW·h) ⁻¹)	有无中冷
1 500	1.270	1.98	125	1.50 : 1	9.45	209.1	无
2 300	1.133	2.75	175	1.85 : 1	17.05	210.2	无
1 500	1.270	1.68	70	1.48 : 1	9.29	206.8	有
2 300	1.133	2.21	70	1.96 : 1	17.90	199.3	有

根据冷却介质的不同,目前主流中冷器可以分为两种形式:空-空中冷器和水冷中冷器。传统中冷器出于安装、成本等因素的考虑,主要采用列管式冷却元件。近年来随着强化传热的迅速发展,许

多新技术、新结构形式应用于工程实践^[5],例如板翅式中冷器、螺旋槽管中冷器、波纹管中冷器、PT 管中冷器等。

板翅式冷却器(图 5)采用先进的真空钎焊制造

工艺、牢固可靠。由于板间流体在金属板上的沟槽中不断转折流动，形成湍流，比传统的元件式冷却器传热系数高。由于结构紧凑，安装使用方便，近年来逐渐在小型水冷压缩机上得到广泛应用。螺旋槽管中冷器(图6)是一种以螺旋槽管代替光管的冷却器。螺旋槽管是在光管外轧制螺旋槽，使管内形成凸筋，增加了管的换热面积，使管内外流体具有沿管壁做螺旋运动的趋势。

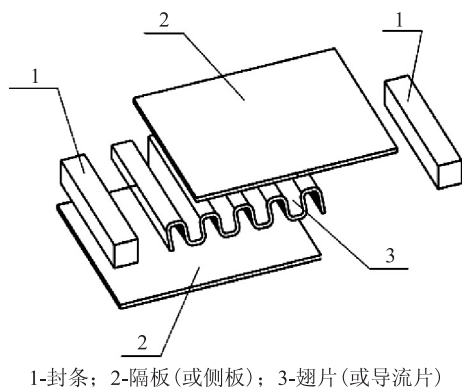


图5 板翅式冷却体简图

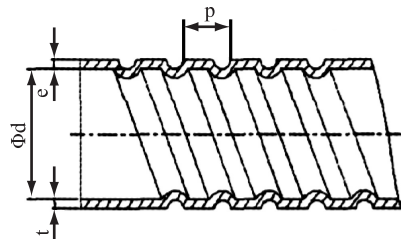


图6 螺旋槽管简图

花瓣状翅片管(PT管)中冷器是我国华南理工大学化工所自行研制的高效强化传热管冷却器。它的管形适于用铜、铝等坯管材进行加工，在管外壁轧制出尖齿状的整体翅片，很大程度地增大了换热面积，可以大幅减少金属的用量。流体流经花瓣翅片时形成三维流动，湍动程度高，减薄了流体的边界层厚度和过渡区域，降低了流体的传热热阻，传热及流阻性能均优于绕片管、翅片管。在设计工况及冷却水温、水量相同的条件下，总传热系数较一般管片中冷器高24%~29%。目前已在D-100/7型空压机上得到应用^[6]。

针对某型特种车辆，在不改变其动力舱结构和布局的前提下，为达到增加进气流量的目的，基于板翅式中冷器的原理，介绍一种高效紧凑型“增压中冷一体化”装置(图7)。

通过压气机蜗壳改型，将环形中冷器卡入，柴油机机体冷却水从中冷器上部进入，底部流出，并采取逆流取水形式。环形中冷器采用翅片包裹水道

的多层紧凑型高效换热方式，翅片间隙供气体流动。采用翅片结构，使得换热面积大幅度增加，结构更加紧凑，且流体在通道内形成较强的扰动，使边界层不断地破裂和再生，从而有效降低热阻，提高了传热效率。同时由于翅片的支撑和加固，使中冷器芯体形成牢固的整体，因此尽管隔板与翅片都很薄，却能承受一定的压力。本方案可以使水-气换热面积达到2.5 m²，总换热系数达到0.9 (kW·(m²·K)⁻¹)。通过对环形中冷器内传热和阻力的计算，可以得到结构参数、进水参数对装置热流性能的影响，为装置结构参数、取水参数的确定提供指导；并通过性能台架试验进行验证。

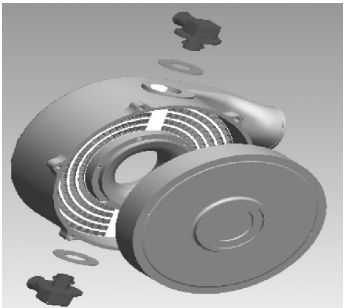


图7 一体化装置三维分解图

由于该新技术是将增压器与中冷器进行结合，须要进行很多探索性的工作，如一体化装置增压匹配、冷却水匹配、柴油机性能影响分析等。利用数值仿真手段，改变原有模型的相关参数，模拟高原工作环境，研究该装置应用后对柴油机性能的影响，是一种方便高效的研究手段。

图8为海拔3 700 m，采用一体化装置前后，柴油机性能的对比：进气质量流量最大增加3.1%；功率最高提升4.5%，油耗最大降低4.3%。涡前排气温度最多降低101.5℃。

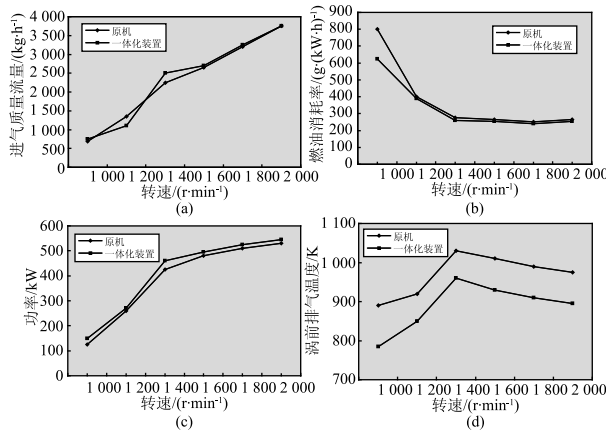


图8 柴油机进气流量和性能对比

每个方案到负理想解的距离是

$$d_1^- = 0.0159, d_2^- = 0.0176, d_3^- = 0.0154, d_4^- = 0.0169, d_5^- = 0.0181, d_6^- = 0.0197$$

(6) 计算每个方案对理想解的相对接近度

$$C_1 = 0.4735, C_2 = 0.4341, C_3 = 0.4815, C_4 = 0.5729, C_5 = 0.4254, C_6 = 0.4371。$$

(7) 排序

按照相对接近度 C_i 从小到大排序 (C_i 越小则其方案越优) 为:

$$C_5, C_2, C_6, C_1, C_3, C_4$$

即六个小组的排序为:

$$f_5, f_2, f_6, f_1, f_3, f_4$$

即从优到劣排名为:

小组 5、小组 2、小组 6、小组 1、小组 3、小组 4。

根据评价结果初步决定, 小组 5 和小组 2 装配的柴油机直接进入试车阶段, 小组 6 和小组 1 装配的柴油机进行检查, 小组 3 和小组 4 装配的柴油机则进行彻查。

实际结果表明, 直接进行试验的两台机器均顺利交机; 进行检查的两台机器有个别零件清洁度不符合要求; 且有螺钉刻线未扳到位现象; 而进行彻查的机器某型螺栓伸长量未按要求全部测量, 且有主轴瓦装错现象。

对照加权的规范化决策矩阵可以看出, 小组 5 和小组 2 在权重较高的第一、第四和第六个评价指标上的数值是很高的, 实际表现即装配工人技术精湛, 能严格按工艺操作, 同时检验完全符合程序要求; 而小组 3 和小组 4 在第一、第四和第六个评价指标上的数值是较低的, 而且在其他指标上的数值

均偏低, 甚至有最低值出现, 实际表现为装配工操作不熟练, 有违反工艺现象, 且检验中有漏检项。综上所述, 可见 TOPSIS 方法真实地反映了装配的实际状况。

针对检查和分析结果, 对出现的问题及时采取了纠正措施, 之后再试验, 均顺利完成了各项试验项目。

3 结束语

(1) 将多属性决策方法 TOPSIS 用于柴油机装配质量评价, 体现了评价过程及其结果的科学性;

(2) 在评价过程中, 注意综合生产管理者的意见, 同时由质量管理专家对评价因素的重要性予以定量, 做到了定性定量相结合;

(3) 通过排序, 装配工人及管理者都可以对自己及其他小组的各方面情况有所了解, 从而取长补短, 提高装配水平;

(4) 在具体应用中, 可以根据柴油机的不同、装配工序的差异等实际情况设立不同的评价指标; 综合专家意见给出适宜权重。

参考文献

- [1] 贾锡印. 船用内燃机结构[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
- [2] Hwang CL, Yoon K S. Multiple attribute decision making—methods and applications, a state-of-the-art survey[M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [3] 魏世孝, 周献中. 多属性决策理论方法及其在 C3I 系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 陕西柴油机重工有限公司. 质量管理体系支持文件[R], 2012.

(上接第 13 页)

3 结 语

综上所述, 高原运行柴油机进气系统的改进可主要从滤清器、增压器、中冷器等方面入手, 对于具体型号, 应综合考虑燃烧、喷油、冷却、润滑等各个系统之间的影响, 并结合车辆动力装置的结构、空间等限制条件, 从而设计出最优改进方案。

参考文献

- [1] 郭猛超, 张晶, 孙志新, 等. 高原运行柴油机增压技术应

用综述[J]. 机械设计与制造, 2011(12): 264–266.

- [2] 王涛, 崔岗. 空气滤清器与空气预滤器的匹配[J]. 工程机械, 2011, 6(4): 45–47.
- [3] 孙少军, 李昌信, 王敏. 斯太尔 WD615 系列柴油机水冷进气中冷系统的开发应用[J]. 山东内燃机, 1997(4): 21–24.
- [4] 冯德明. 国产内燃机车柴油机中冷器的基本现状[J]. 内燃机车, 1997, 276(2): 16–21.
- [5] 朱玉峰. 活塞式压缩机中冷器应用研究[J]. 矿山机械, 2005, 33(11): 90–92.
- [6] 林培森, 王世平, 邓先和. 气体压缩机冷却器现状及研究进展[J]. 压缩机技术, 1998, 149(3): 17–20.