

专题——动力装备高原环境适应性研究

柴油机增压系统变海拔自适应技术研究现状与发展趋势

张众杰¹, 刘瑞林¹, 梁志峰¹, 夏南龙¹, 周广猛¹, 杨春浩²

(1.军事交通学院, 天津 300161; 2.海军工程大学, 武汉 430000)

摘要: 分析了高原环境条件下柴油机功率下降、油耗增加、增压器效率下降、涡轮超温超速等问题, 考虑采用自适应增压系统改进柴油机和增压器高原运行存在的问题。介绍了可变截面涡轮增压系统(VGT)、普通二级可调增压系统(TST)、复合增压系统(C2T)、基于VGT二级可调增压系统(R2T)几种典型的可调增压系统的结构原理和高原应用现状。最后, 结合柴油机变海拔和变工况的运行特点, 从增压系统结构布置、智能优化算法、控制理论、多系统协同控制和增压器内部流场优化控制五个方面提出了增压系统高海拔自适应技术的发展趋势。

关键词: 变海拔; 柴油机; 增压系统; 自适应技术

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.10.001

中图分类号: TJ07; TK421⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)10-0001-07

Research Status and Development of Self-adaptive Technology for Diesel Engine with Turbocharging System at Varying Altitudes

ZHANG Zhong-jie¹, LIU Rui-lin¹, LIANG Zhi-feng¹, XIA Nan-long¹, ZHOU Guang-meng¹, YANG Chun-hao²
(1.Military Transportation University, Tianjin 300161, China; 2.Naval University of Engineering, Wuhan 430000, China)

ABSTRACT: Problems of power declining, fuel consumption increasing, and efficiency of turbocharger dropping, over temperature and over-speed of turbine of diesel engine were analyzed. Various regulated turbocharging systems were taken into consideration to improve the diesel engine and turbocharger running at high altitude. Variable geometry turbocharging (VGT), classical two-stage regulated turbocharging (TST), compound turbocharging (C2T) and two-stage regulated turbocharging based on VGT (R2T) were introduced, including structure principle and application of the systems at plateau. At last, the development trend of self-adaptive turbocharging technologies were put forward from five aspects: structural arrangement of turbocharging system, intelligent optimization algorithms, control theories, multi-system cooperative control, optimizing inner flow field of turbocharger, and combined with the characteristics of diesel engine working at varying operations and altitudes..

KEY WORDS: varying altitudes; diesel engine; turbocharging system; self-adaptive technology

高原环境条件对柴油机各子系统和整机性能都有较大影响。据统计, 海拔每升高 1000 m 柴油机动力性下降 4.0%~13.0%, 经济性下降 2.7%~12.9%, HC, CO 和烟度的排放量平均增加 30%, 35%, 34%。这

是因为大气压力降低, 进入气缸内的空气量减小, 压缩终点气缸内混合气压力和温度降低, 使得喷入缸内的燃油不能及时着火, 造成燃烧滞后, 等容度下降, 燃烧放热率重心后移, 导致柴油机功率下降, 燃油消

耗率上升,排气温度增加,排放性能恶化。同时,随着海拔上升,压气机进入低雷诺区,涡轮进入跨声速区,增压器工作范围变窄、效率降低,易出现压气机喘振、涡轮超速现象^[1-2]。

车辆在高原公路(如青藏线、川藏线和滇藏线等)行驶时,具有海拔高、落差大、环境恶劣、工况复杂等特点,这对柴油机变海拔适应能力提出极高要求。同时,随着电控技术逐步在柴油机各子系统的广泛应用,加之越来越严格的排放法规,柴油机变海拔工作中的可控参数和优化目标将越来越多,开展基于多参数控制和多目标优化的柴油机增压系统变海拔自适应技术研究将具有重要意义^[3-4]。

1 高原环境对柴油机及增压系统性能影响

1.1 柴油机性能下降

根据某六缸高压共轨柴油机不同海拔(0~5500 m)性能仿真和试验数据分析,认为柴油机高原性能存在如下问题:功率和油耗下降较大;低速转矩下降严重;最大扭矩转速向高速区偏移;热负荷增加;排放性能恶化(HC, CO, NO_x和碳烟排放增加);启动、加速性能差,瞬态响应性迟缓。在高原环境条件下,由于柴油机进气压力较低,进气量不足,这些问题更加突出^[5-8]。如图1所示,相对0 m海拔,海拔5500 m标定功率下降达33.7%,在800~1000 r/min时,柴油机有效功率下降42.1%~62.4%,燃油消耗率最大增加18.6%^[1]。

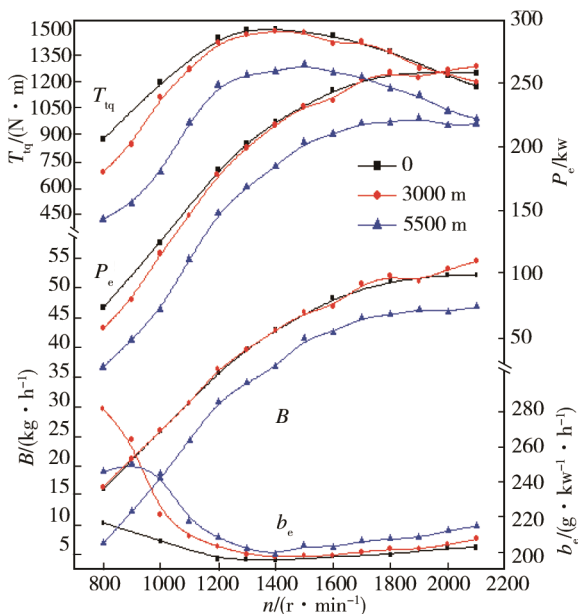


图1 不同海拔高压共轨柴油机全负荷速度特性曲线

1.2 增压器特性下降

随着海拔升高,排气背压降低,排气温度升高,压气机进口雷诺数下降,涡轮入口相对马赫数增大。这些因素共同作用导致^[9-11]:压气机进入低雷诺区域,工作范围变窄;压气机喘振倾向增加;涡轮进入跨声速区,涡轮堵塞和超速可能性增大;增压器可靠性下降。随着海拔增加,压气机入口雷诺数降低,压气机与柴油机联合运行线逐渐偏离压气机高效率区,喘振倾向增加,在海拔4000 m,出现涡轮超速问题,如图2和图3所示。

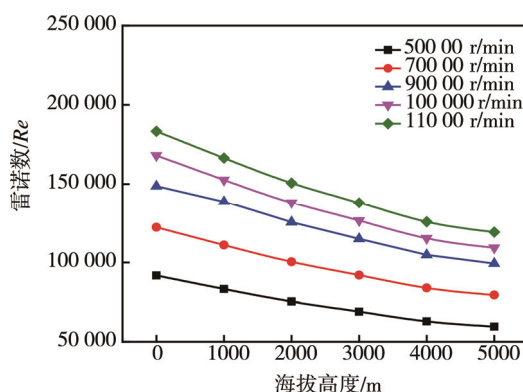


图2 不同海拔下压气机入口雷诺数的变化曲线

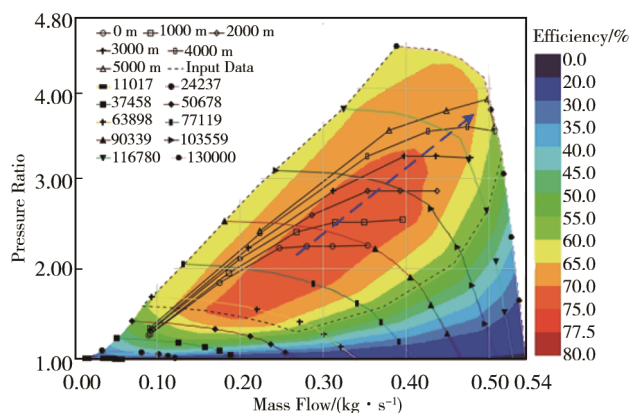


图3 不同海拔下压气机和柴油机联合运行线

2 高海拔增压系统自适应技术研究现状

为了提升柴油机及增压系统高原性能,从增压系统改进方向考虑,主要有两种方式:(1)为现有柴油机重新匹配大流量高压比的增压器^[12-13];(2)采用变海拔自适应增压系统,将可调增压系统与电控技术结合,实现增压系统变海拔、变工况的自调整 and 自适应功能。方案(1)涡轮增压器与柴油机匹配针对固定海拔和工况,存在平原增压压力过高、高原低速

小负荷功率恢复不足、瞬态响应迟缓和涡轮超温超速等问题^[14]。

2.1 几种先进的涡轮增压系统

方案（1）中的变海拔自适应增压系统能够根据海拔和柴油机工况的变化自行调节增压压力和进气流量，显著提高高原环境下柴油机动力性、经济性和排放等性能指标，提升增压器与柴油机高原匹配特性^[15-18]。目前面向高原的自适应增压系统主要有 VGT, TST, C2T, R2T 等四类。其中 TST 包括串联式 TST 和并联式 TST 两种控制模式，C2T 包括机械+涡轮增压（MC2T）、电辅助+涡轮增压（EC2T）两种型式。

欧美国国家研究车用涡轮增压技术较早，先进的自适应增压系统已实现商业化^[19-21]。由于西方发达国家大多平原地区，针对高原环境下柴油机与增压系统性能研究不多，有代表性的研究机构包括：美国陆军研究室^[22]、IEVCO 公司^[23]、VE 商用车公司^[24]、意大利萨兰托大学^[25]、西班牙瓦伦西亚理工大学^[26]等。在 0~3000 m 海拔范围内，为减少油耗和控制排放，将 VGT, TST, C2T 三种自适应增压系统应用于高原柴油机。鉴于国内特有的高原

型地理特点和恢复柴油机高原功率的客观需求，近年来，自适应增压系统研究逐步受到国内一些科研机构的重视。主要研究机构包括：清华大学^[27-28]、北方发动机研究所^[29]、北京理工大学^[20-31]、上海交通大学^[32-35]和军事交通学院^[36-38]等单位。清华大学和北方发动机研究所针对 VGT 高原匹配、增压压力 MAP 标定、VGT 不同工况的控制策略以及流场优化等方面开展了大量的研究工作。北京理工大学和上海交通大学针对 TST 和 C2T 系统高原选型匹配、涡轮旁通阀变海拔调节特性和增压压力 MAP 标定、涡轮旁通阀瞬态工况控制策略等方面开展了大量的仿真和台架试验研究。军事交通学院针对现有 VGT 和 TST 系统变海拔和变工况能力不足、低速转矩提高不足、瞬态响应慢等问题，提出一种 R2T 系统，设计了 R2T 高海拔控制系统和相应的控制策略，并通过仿真和台架试验验证了 R2T 可以有效提高 0~5500 m 海拔下柴油机和增压器的各项性能指标。

2.2 高海拔下先进的增压系统比较分析

现有变海拔自适应增压系统提升柴油机性能参数比较分析见表 1。

表 1 高海拔条件下不同自适应增压技术比较

柴油机性能	增压技术				
	VGT	TST	MC2T	EC2T	R2T
增压比	<3.5	>5	>4	>5	>5
高效区流量范围	++	++	++	+++	+++
中低转速时部分负荷转矩	++	+	+++	+++	+++
低速燃油消耗率	++	++	+	+++	+++
瞬态加速特性	++	++	+++	++	+++
压气机喘振和涡轮超速解 决能力	+	++	++	+	+++
寿命及可靠性	++	+++	+++	+	++
高原应用潜力	+	++	++	+++	+++

注：“+”的多少分别表示改善或恶化的程度。

从表 1 中可以看出，VGT 系统能够实现柴油机变工况自适应增压，但是受增压比限制，VGT 变海拔适应能力较差，若匹配大流量的 VGT 系统，必然导致柴油机中低转速转矩提高不足，车辆的瞬态响应迟缓。TST 能够提供高压比、宽流量，有效提高柴油机高原进气压力，但匹配工况固定，变工况适应能力不足，低速转矩和瞬态工况响应性较差。MC2T 不存在涡轮迟滞，瞬态响应性最好，但是在增压过程中会损失柴油机一部分功率，不利于柴油机高原功率恢复。EC2T 能够消除涡轮迟滞问题，可根据柴油机工况和海拔的变化精确控制增压压力，是较有潜力的变海拔自适应增压系统^[39]，但存在电机转速不足、增压器轴承剧烈振动、电机受高排温可

靠性差和电机变工况加速潜力不足等问题。R2T 能够在海拔 5500 m 全工况条件下，使得柴油机功率恢复至平原水平的 90%以上，大幅提高低速转矩，有效避免了增压器效率降低、压气机喘振、涡轮超温和超速等问题。在柴油机低速时，低压级涡轮做功能力较弱，起不到增压作用。同时 R2T 不能根据海拔和工况和变化合理分配涡轮功，在高原环境下排气能量不能够得到最大化利用。

3 高海拔增压系统自适应技术发展
趋势

针对目前变海拔自适应增压系统研究现有问题

和缺陷,笔者从五个方面提出未来高原型自适应增压系统的发展趋势。

3.1 新型多级增压系统

在变海拔、变工况下,为实现柴油机多目标优化控制,将不同增压系统的优势相结合,采用多级、多控制阀的增压系统是未来高原自适应增压系统的发展方向^[40]。图4为2014年宝马和博格华纳^[41]联合开发的三级可调增压系统(R3T)。该增压系统高压级采用双VGT并联布置,低压级采用普通涡轮增压系统,在不同工况条件下,系统中五个控制阀协同控制执行五种不同的控制策略。与R2T相比,R3T可以大幅度提高中低转矩,最大转矩点提前至低转速区,扩大了压气机高效率区工作范围。图5为日本橘本宗昌^[42]利用仿真和试验两种方式比较双VGT串联布置和并联布置两种控制方案,结果表明,与并联方案相比,双VGT串联方案能够合理调节高、低压级涡轮功分配,燃油消耗率、NO_x排放和碳烟明显降低,高压级涡轮转速响应时间明显缩短。

3.2 多目标智能优化算法

随着电控技术的快速发展和排放法规的越发严格,在高原环境下,为了实现多目标优化,柴油机及增压系统控制参数逐渐增多,喷油压力、喷油提前角、喷油量、增压系统旁通阀及VGT叶片开度、EGR率、可变气门正时和几何压缩比等,各控制参数之间互相影响。柴油机需要优化的性能指标有多个:转矩、燃油消耗率、NO_x、碳烟、CO、HC、瞬态工况响应时间等,不同优化目标之间互相影响,如何折中各优化目标,实现柴油机高海拔下的性能最优,将是今后研究的重点。在高原环境下,柴油机各子系统之间属于气动连接,目标函数无法用解析表达式写出,传统优化方法要求的连续可微或局部极小值等并不适用。目前新发展的智能优化方法^[43-49]如:遗传算法(Genetic Algorithm)、模拟退火(Simulated Annealing)、粒子

群算法(Particle Swarm Algorithm)等智能算法具有较好的鲁棒性、全局性,在柴油机变海拔非线性多目标优化方面问题具有巨大优势,表2列出了多参数智能优化方法。

由表2可以看出,不同的智能优化算法有各自的优缺点,将多种智能优化算法结合^[50-53],形成智能混合优化算法将更加有助于解决高海拔柴油机非线性多目标优化问题。

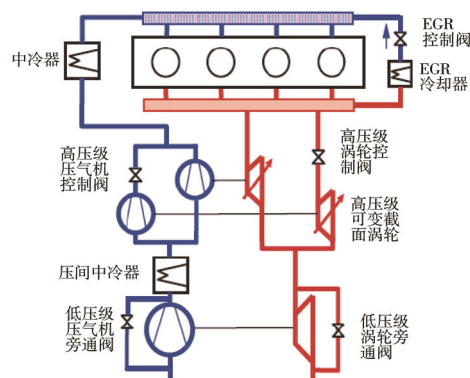


图4 BWM 可调两级增压系统

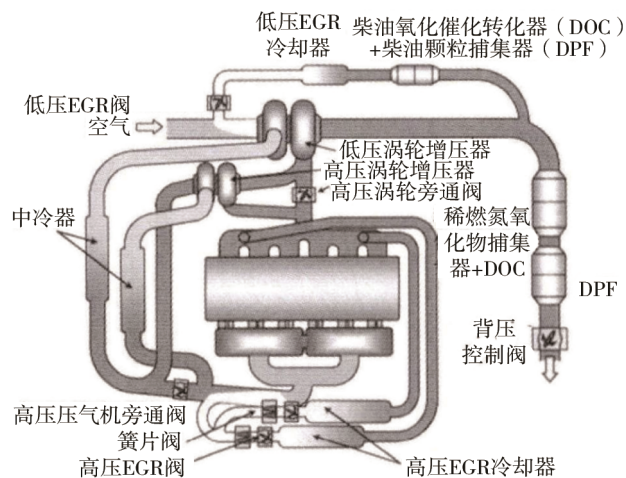


图5 双VGT 二级可调增压系统

表2 不同优化算法比较

评价指标	算法						
	罚函数法	共轭梯度	模拟退火	遗传算法及改进型	粒子群算法及改进型	蚁群算法	禁忌搜索算法
全局寻优能力	+	+	++	+++	+++	+++	++
计算精度	+	+	++	+++	+++	+++	+++
收敛速度	++	++	++	+	+++	+	++
非线性处理能力	+	+	++	+++	+++	+++	++
初始解质量	+	+	+	+++	+++	++	+
并行计算能力	+	+	++	+++	+++	+++	++

注:“+”的多少分别表示改善或恶化的程度

3.3 先进的控制理论

在变海拔和变工况下，柴油机热力过程是以燃烧过程、流体流动、热量传递为基础，设计柴油机机构参数、气体动力学参数和热力学参数，可变因数多、非线性、时变性和随机性大，是可变互耦系统的控制优化问题。传统的 PID（包括 PID 改进型）的控制理论在调节范围、控制精度、自适应能力方面均有限，难以满足柴油机变海拔运行时工况较多，变化范围广

的工作特点。先进的控制理论，如模糊控制、神经网络预测控制、模型预测控制（MPC）、自适应控制、滑膜控制等因其良好的响应性、极佳的鲁棒性和较强的控干扰能力将具有更加明显的优势^[53-57]。代表性的有 2015 年德国亚琛工业大学^[58]针对某汽油机二级可调增压系统采用非线性模型预测控制（Nonlinear Model-based Predictive Controllers），该控制理论能够耦合多系统输入，并在约束条件下取得较高的控制质量。

表 3 不同控制理论比较

评价指标	控制理论						
	PID 控制及改进型	自适应控制	模糊控制	滑膜控制	神经网络	模型预测控制及改进型	H _∞ 控制
自适应能力	+	+++	++	++	+++	+++	+++
鲁棒性	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++
控制精度	+	+++	++	++	++	+++	++
收敛速度	+	+	++	+++	+	++	++
多目标控制能力	+	+	+	+++	+++	+++	+++
非线性特性	0	+	+++	+++	+++	+++	+++

注：“+”的多少分别表示改善或恶化的程度。

为进一步提高增压系统变海拔自适应能力，将两种或两种以上的智能控制理论结合起来，提出扩展型控制理论逐渐成为研究热点^[60-61]。

3.4 多系统协同控制

柴油机变海拔、变工况条件下，将柴油机增压系统、气门升程、喷油系统、气缸压缩比、EGR 阀等多系统、多执行器协同控制，能够实现柴油机在不同海拔下多目标的优化控制，全面提升柴油机各项性能指标^[62-65]。目前，关于柴油机变海拔多系统协同控制的相关刚刚起步。北京理工大学李长江和上海交通大学李华雷对喷油和增压策略对柴油机变海拔的影响规律做了初步的研究。李长江针^[65]对增压系统在过渡工况中存在增压压力突降的问题，采用压气机旁通阀晚关和延迟喷油两种策略。李华雷^[66]针对 TST 系统存在高海拔特定工况下增压器效率下降和泵气损失增加问题，提出燃油补偿控制于涡轮旁通阀控制相结合，达到增压压力的恢复目标。

3.5 高海拔下增压器内部流场的优化控制

现有自适应增压系统研究面临的共同难点是，叶片通道内部的流动非线性和非定常性及旋涡结构的复杂性。旋涡分离流动对增压器的效率、失速裕度、级性能和内燃机的整机性能有影响，导致自适应增压系统气动设计与流场匹配难度大为增加^[38]。在高原环境条件下，压气机进入低雷诺数区域，涡轮进入超临界区域，同时，增压比提高导致离心压气机稳定工作范围急剧降低，压气机内部产生畸变流场^[68]。有必要

研究压气机和涡轮机变海拔、全工况内部流动规律及性能影响机理，探讨增压器主要几何参数（如：压气机叶轮进口相对直径、压气机进口叶尖叶片角、压气机出口相对宽度、压气机出口后弯角、蜗壳喉口面积、涡轮入口叶轮半径、涡轮出口叶尖半径等）对增压器变海拔全工况性能的影响。建立以高海拔柴油机全工况性能为设计目标，增压器关键几何参数为设计变量的增压器变海拔多工况流通设计的新方法^[10,69-70]。

4 结语

- 1) 简要分析高原环境对柴油机动力性、经济性、热负荷和增压器与柴油机匹配特性影响，提出了两种增压系统改进方案。
- 2) 比较了现有几种高原自适应增压系统的性能指标参数，分析了各增压系统提升柴油机高原性能的潜力。
- 3) 针对目前变海拔自适应增压系统中存在的不足，从增压系统结构布置、智能优化算法、先进控制理论、多系统协同控制和增压器流场优化控制等五个方面，提出了未来高海拔自适应增压系统的研究的重点。

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] 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,

- 10(2): 67-70.
- [3] 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.
- [4] 朱振夏, 张付军, 马朝臣, 等. 柴油机增压技术在高原环境下的应用[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2014(4): 73-80.
- [5] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [6] 王建昕, 帅石金. 汽车发动机原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘莹, 葛炜, 张继忠, 等. 兼顾平原与高原性能的二级增压系统性能试验研究[J]. 内燃机工程, 2017(2): 123-127.
- [10] 汪陈芳. 内燃机增压离心压气机变海拔工况流场控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [11] 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.
- [12] 郝健, 刘天清. 车用柴油机高原恢复功率问题的研究[J]. 车用发动机, 1996 (3): 25-32.
- [13] 冀丽琴. GJ90B 增压器匹配斯太尔发动机高原功率恢复试验研究[J]. 山东内燃机, 2003(3): 28-32.
- [14] 韩恺. 动力装置集成设计体系与环境的理论研究与开发[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
- [15] 张众杰. 二级可调增压系统设计及与共轨柴油机高海拔匹配仿真研究[D]. 天津: 军事交通学院, 2013.
- [16] 韩恺, 朱振夏, 张付军, 等. 可调复合增压柴油机高原功率恢复方案研究[J]. 兵工学报, 2013(2): 129-136.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] WARTHA J, WESTIN F, MARCO D M, 等. Opel 公司采用两级增压空气冷却的 2.0L 双涡轮增压柴油机[J]. 国外内燃机, 2013(5): 7-11.
- [20] LANGEN P, HALL W, NEFISCHER P, et al. The New Two-stage Turbocharged Six-cylinder Diesel Engine of the BMW 740d[J]. MTZ worldwide, 2010, 71(4): 4-11.
- [21] STURM W L, KRUIHOF J. Development of a Heavy-duty Diesel Engine with Two-stage Turbocharging[J]. Auto Technology, 2001, 1(5): 50-53.
- [22] SZEDLMAYER M, KWEON C. Effect of Altitude Conditions on Combustion and Performance of a Multi-Cylinder Turbocharged Direct-Injection Diesel Engine[J]. Sae World Congress & Exhibition, 2016, 31(3): 23-40.
- [23] BIAGGINI G, KNECHT W. The Advanced Iveco Cursor 10 Heavy Duty Truck Diesel Engine[J]. Fisita Congress, 2000.
- [24] RAWAT S, PATCHAPPALAM K, SAHARE A. TCV-A Unique Solution for HD Commercial BSIV Diesel Engine for Range of Altitude Operation[J]. SAE Paper 2017- 26-0053, 2017.
- [25] CARLUCCI A P, FICARELLA A, LAFORGIA D, et al. Supercharging System Behavior for High Altitude Operation of an Aircraft 2-stroke Diesel Engine[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 470-480.
- [26] GALINDO J, LUJÁN J M, CLIMENT H, et al. Turbocharging System Design of a Sequentially Turbocharged Diesel Engine by Means of a Wave Action Model[J]. SAE Paper, 2007-01-1564.
- [27] ZHANG H, ZHUGE W, ZHANG Y, et al. Study of the Control Strategy of the Plateau Self-adapted Turbocharging System for Diesel Engine[J]. SAE paper, 2008-01-1636.
- [28] 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(S1): 90-95.
- [29] 靳嵘, 张俊跃, 胡力峰, 等. 高原自适应柴油机涡轮增压技术研究[J]. 内燃机工程, 2011(4): 27-31.
- [30] 刘系嵩, 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(5): 447-452.
- [31] 朱振夏. 增压柴油机高原环境下的供油与进气调节研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [32] 李华雷, 石磊, 邓康耀, 等. 两级可调增压系统变海拔适应性研究[J]. 内燃机工程, 2015(3): 1-5.
- [33] 李华雷, 利奇, 石磊, 等. 柴油机可调两级增压系统高原自适应控制策略[J]. 农业机械学报, 2015(9): 335-342.
- [34] 利奇. 柴油机可调两级增压系统变海拔自适应控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [35] 钱跃华, 崔毅, 邓康耀, 等. 不同进气条件相继增压控制策略的仿真研究[J]. 内燃机工程, 2011(4): 32-38.
- [36] LIU R, ZHANG Z, DONG S, et al. High-Altitude Matching Characteristic of Regulated Two-Stage Turbocharger With Diesel Engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(9): 094501-094501-9.
- [37] 刘瑞林, 林春城, 董素荣, 等. 柴油机二级可调增压系统高海拔标定试验[J]. 内燃机学报, 2016(6): 543-548.
- [38] 刘瑞林, 董素荣, 孟军, 等. 二级可调增压控制系统及其控制方法: 中国, 201310117646.3[P].
- [39] 赵永生, 张虹, 王绍卿, 等. 车用电辅助涡轮增压技术发展[J]. 车辆与动力技术, 2010(2): 54-57.
- [40] 钱跃华. 双涡轮增压系统匹配方法和优化控制的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [41] SCHMITT F. Powerful Turbocharging System for Passenger Car Diesel Engines[J]. MTZ Worldwide, 2014,

- 75(3): 12-19.
- [42] 橋本宗昌, など. 燃料消費と排出を目的とする 2 級の過給によるシステム研究[J]. 自動車技術会論文集, 2013,44(2): 23-27.
- [43] 黄豪中, 苏万华, 裴毅强, 等. 微种群遗传算法在电控柴油机控制参数优化中的应用[J]. 燃烧科学与技术, 2009(5): 423-428.
- [44] MIYATA S, KUDO K, KATO T, et al. Mass Simulations Based Design Approach and Its Environment: Multi-objective Optimization of Diesel Engine with Distributed Genetic Algorithm using iSIGHT MOGADES and HIDECS[C]// Parallel Computational Fluid Dynamics 2002. Amsterdam: North-Holland, 2003.
- [45] 李长江, 赵长禄, 韩恺, 等. 柴油机高原喷油策略遗传算法优化及罚参数研究[J]. 内燃机学报, 2015(3): 250-256.
- [46] 包子阳, 余继周. 智能优化算法及其 MATLAB 实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [47] SAKAWAKI A, KAJI H, YAMAMOTO M, et al. Real-time Engine Control Parameters Optimization Method for Small Diesel Engine by Multi Objective Genetic Algorithm[J]. SAE Paper, 2009-01-0241.
- [48] TANNER F X, SRINIVASAN S. Optimization of an Asynchronous Fuel Injection System in Diesel Engines by Means of a Micro-genetic Algorithm and an Adaptive Gradient Method[J]. SAE Paper, 2008-01-0925.
- [49] TANNER F X, SRINIVASAN S. Global Optimization of a Two-pulse Fuel Injection Strategy for a Diesel Engine Using Interpolation and a Gradient-based Method[J]. SAE Paper SAE Paper, 2007-01-0248.
- [50] 李建勋, 文海玉. 一类模拟退火算法与遗传算法混合优化策略[J]. 黑龙江工程学院学报, 2010, 24(2): 69-71.
- [51] 徐敏, 陈州尧, 李俊蒂. 基于模拟退火算法的码垛机器人码垛路径规划[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 95-98.
- [52] 袁澎, 艾芊, 赵媛媛. 基于改进的遗传-模拟退火算法和误差度分析原理的 PMU 多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2178-2185.
- [53] 彭宏伟. VNT 与 EGR 对高压共轨柴油机高原性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [54] PHILIPPE M, OLIVIER G. Control Design for a Second Order Dynamic System: Two-Stage Turbocharger[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 470-476.
- [55] 黄铁雄, 高世伦. 柴油机高压共轨系统自适应模糊滑模控制[J]. 车用发动机, 2008(4): 57-60.
- [56] 潘慕绚, 黄金泉. 航空发动机模型参考自适应控制综述[J]. 航空发动机, 2003(2): 51-54.
- [57] 蒋衍君, 黄金泉. 航空发动机自适应神经网络 PID 控制[J]. 航空动力学报, 2000(3): 334-336.
- [58] 赵金星. 基于神经网络和遗传算法的 Atkinson 循环发动机全负荷范围性能优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [59] ALBIN T, RITTER D, ABEL D, et al. Nonlinear MPC for a Two-stage Turbocharged Gasoline Engine Air-path[J]. IEEE Conference on Decision & Control, 2015: 849-856.
- [60] 许昌, 吕剑虹, 程明, 等. 一种神经网络 PID 自适应控制及其应用研究[J]. 控制工程, 2007, 14(3): 284-286.
- [61] 傅春, 谢剑英. 模糊滑膜控制研究综述[J]. 信息与控制, 2001, 30(5): 434-439.
- [62] 郭斌扬, 朴有哲, 余浩, 等. 基于两级增压与进气门晚关协同作用对柴油机热效率和排放的影响[J]. 内燃机学报, 2013(6): 481-488.
- [63] 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.
- [64] 童号, 尹琪, 韩娜, 等. 基于遗传算法的柴油机配气与供油正时参数优化[J]. 农业机械学报, 2006(9): 44-46.
- [65] CHANNAPATTANA S V, PAWAR A A, KAMBLE P G. Optimisation of Operating Parameters of DI-CI Engine Fueled with Second Generation Bio-fuel and Development of ANN Based Prediction Model[J]. Applied Energy, 2017, 187: 84-95.
- [66] 李长江. 柴油机高原可调二级增压系统的匹配与调节[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [67] LI H, SHI L, DENG K. Development of Turbocharging System for Diesel Engines of Power Generation Application at Different Altitudes[J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89: 755-765.
- [68] 杨名洋. 内燃机高压比离心压气机扩稳非对称流动控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [69] 陈涛. 内燃机增压离心压气机多工况通流设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [70] 谢磊, 张扬军, 诸葛伟林, 等. 两级增压涡轮几何参数对发动机性能的影响研究[J]. 车用发动机, 2011(6): 33-37.