

高海拔柴油机两级增压控制研究 现状与发展趋势

刘大川, 张众杰, 刘瑞林, 李浩, 夏南龙

(陆军军事交通学院, 天津 300161)

摘要: 总结了我国高原气候环境特点, 分析了传统废气涡轮增压器存在的弊端与高海拔柴油机两级增压控制研究需求。综述了国内外平原与高原条件下柴油机增压系统及多系统协同控制研究现状, 并讨论了其下一步控制系统发展方向。最后, 针对柴油机高海拔、全工况的运行特点, 指出二级可调增压系统先进控制算法与多系统、多参数协同控制研究为下一步重要发展方向。

关键词: 高海拔; 柴油机; 两级增压; 协同控制; 多系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.01.016

中图分类号: TJ07; TK421+.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)01-0082-07

Research Status and Development Trend of Two Stage Turbocharging Control for High Altitude Diesel Engine

LIU Da-chuan, ZHANG Zhong-jie, LIU Rui-lin, LI Hao, XIA Nan-long
(Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

ABSTRACT: The characteristics of domestic plateau environment were summarized and the disadvantages of the traditional exhaust gas turbocharger and requirements for control strategy for diesel engine of high altitude were analyzed. Then the development process and further prospects of control and cooperative control strategy on plains and plateaus for diesel engine were summarized and discussed. Finally, aiming at the operating characteristics of diesel engine at high altitude and full working condition, it was pointed out that the advanced control algorithm of two-stage adjustable boosting system and the research of multi-system and multi-parameter collaborative control are the next important development directions.

KEY WORDS: high altitude; diesel engine; two stage turbocharging; cooperative control; multi-system

我国高原具有海拔高, 面积广的特点, 有“世界屋脊”之称的青藏高原平均海拔在 4000 m 以上, 占我国陆地面积 24%^[1]。与平原地区相比, 高原地区大气压力减小, 柴油机在高原工作进气流量减少, 导致空燃比减小, 燃烧恶化, 进而造成柴油机动力性、经济性下降, 排放增加等问题, 严重影响柴油机性能^[2]。随着我国一带一路战略的实施以及西部地区日趋严峻的周边环境, 开展柴油机高原性能提升方面研究对

我国具有十分重要的意义^[3], 而增压技术是提升柴油机高原性能的重要手段之一。

普通废气涡轮增压器不能满足更高海拔范围内柴油机各项性能要求, 其与柴油机的匹配针对固定海拔, 不能满足柴油机变海拔、全工况的需求^[4-5]。可变截面涡轮增压(VGT)可实现增压比的连续可控调节, 提高柴油机的高原环境适应性。同样受限于自身流量和压比限制, 在更高的海拔范围内, 单级 VGT

收稿日期: 2018-09-01; 修订日期: 2018-10-11

作者简介: 刘大川(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为内燃机高原增压控制。

通讯作者: 刘瑞林(1963—), 男, 教授, 主要研究方向为动力机械高原环境适应性。

无法满足柴油机性能要求。二级可调增压通过对进气连续两次增压，能够达到更高的增压压力，且高压级转动惯量小，瞬态响应速度快^[6]，但二级可调增压系统结构的复杂性对控制系统提出了更高的要求。

增压器结构确定情况下，其性能优劣取决于控制系统好坏。传统 PID 控制已实现了应用，并在平原能够控制增压器使发动机稳态工作正常，但发动机大部分工作时间都是处于变化的环境与工况当中，这就对控制系统提出更复杂的要求。通过改进柴油机二级可调增压控制可以改善燃烧，提高柴油机经济性、动力性，降低碳烟、NO_x 的排放。针对两级增压控制系统研究主要有控制策略研究及多系统协调控制研究两个方面。

1 高海拔增压系统控制策略研究现状

随海拔的升高，环境大气压力降低，导致涡轮排气背压降低，进而导致涡轮膨胀比增加，涡轮做功增加，压气机压比上升^[7]，柴油机在不同转速下，达到目标增压压力所需能量变化值与涡轮端由于排气背

压降低所带来的膨胀功变化关系不确定。此外，发动机工况时刻变化，由于增压器本身的迟滞性，都对增压控制提出更高的要求，国内外学者针对控制策略与控制算法进行了深入的研究。

1.1 平原增压系统控制策略

国外平均海拔在 2000 m 以下，增压器控制策略研究主要集中在平原条件下提升柴油机动力性、经济性和排放特性，控制参数主要包括 VGT 叶片开度、涡轮旁通阀开度及增压压力等。不同单位针对各类型二级可调增压系统、控制目标提出多种控制策略，见表 1。国内外学者的研究以传统 PID 及其改进型控制方法为主，较为有代表性的如 Buratti R^[8]提出了一种基于模型的增压压力控制策略，针对不同工况分别采用不同控制策略，稳态工况采用 PI 控制，瞬态工况采用 PD 控制，明显改善了发动机性能。上海交通大学刘博^[9-10]针对带放气阀的两级固定截面涡轮增压（WGT+WGT）系统，提出基于响应速度开环前馈与基于增压压力的 PID 闭环反馈结合的控制方法。

表 1 二级增压可调增压系统不同控制策略（0 海拔）

研究单位（人员）	增压系统	控制目标	控制策略
林雪平大学 ^[11-12]	WGT+WGT	增压器效率、泵气损失	PID 闭环反馈+前馈；将面工况划分为四个区域
上海交通大学 ^[9-10]	WGT+WGT	增压压力、响应速度	增压压力 PI 闭环反馈+前馈控制；将面工况分为四个调节区域
IFP ^[13]	WGT+WGT	减小燃油消耗率和排放性能	闭环 PID 和开环两种控制策略
俄亥俄州立大学 Canova ^[14]	VGT+WGT	增压压力和进气流量最大	增压压力 PID 闭环反馈控制面工况分为三个区域
BWM ^[15]	WGT+WGT		面工况分为四个调节区域
BWM ^[16]	VGT+WGT	Trade-off 低速动态响应和高速功率输出	增压压力闭环反馈控制；面工况分为五个调节区域
BWM ^[17]	双 VGT+WGT	经济性	面工况分为五个调节区域
沃尔沃汽车公司 ^[18]	WGT+WGT	Trade-off 燃油消耗率和 NOx/smoke	将面工况分为五个调节区域
P. Kotman ^[19]	WGT+FGT	增压压力	基于平整度的前馈控制
A. Plianos ^[20]	WGT+FGT	增压压力	线性二次高斯法（LQG）
D. Schwarzmenn ^[21]	WGT+FGT	增压压力	内膜控制（IMC）
亚琛工业大学 ^[22]	WGT+WGT	Trade-off 泵气损失和瞬态响应时间	增压压力 MPC 闭环控制
橘本宗昌 ^[23]	VGT+VGT	经济性	面工况分为四个调节区域

从表 1 中可以看出，针对平原增压系统控制策略研究主要采取 PID 控制，随着排放法规日趋严格，智能控制算法逐渐应用于平原增压系统控制，如线性二次型高斯法控制（LQG）、内模控制和模型预测控制（MPC）等算法都开始增压控制方面有所应用。Paul Dickinson^[24]提出了实施模型预测控制，针对 VGT 瞬态工况控制算法进行了研究，瞬态工况下实时模型预测控制相比 PID 升压时间减少 45%。

综上所述，PID 控制在平原增压系统控制策略中

已经较为成熟，为进一步提高增压系统响应速度、经济性及降低排放，智能控制算法将会更多应用于平原增压系统控制。

1.2 高原增压系统控制策略

进气流量不降低是柴油机高原环境性能不下降的前提。试验发现，海拔低于 3000 m 时，海拔的影响基本可以通过增压器本身补偿能力弥补。国内针对 0~5500 m 海拔不同类型增压系统进行了研究。相对

于平原增压系统控制策略,高原条件下更加复杂,是一个综合考虑进气压力、进气温度、发动机转速、负

荷的多输入多输出的非线性控制问题,国内外高海拔二级增压可调增压系统不同控制策略研究见表 2。

表 2 高海拔二级增压可调增压系统不同控制策略

研究单位(人员)	海拔/m	增压系统	控制目标	控制策略
瓦伦西亚大学	0~2000	并联式 WGT	平稳过渡	面工况分为五个区,不同海拔分区不同增压压力 PID 闭环反馈;涡轮旁通阀随海拔增加逐渐关闭
北京理工大学	0~5500	WGT+WGT	空燃比不变	增压压力 PID 闭环反馈控制+开环控制;标定不同海拔面工况涡轮旁通阀开度 MAP
上海交通大学	0~4500	WGT+WGT	4500m 功率恢复至平原 85%	比较了瞬态工况下三种 VGT 叶片开度调节策略
陆军军事交通学院	0~5500	VGT+WGT	增压压力瞬态响应时间最短	

瓦伦西亚大学 J. Galindo^[25]针对 0~2000 m 海拔发动机工况波动,设计了对应的一维波动模型,通过预测函数,实现不同工况平稳过渡。北京理工大学刘系嵩^[26]设计了两级 WGT 增压系统,针对稳态工况进行了研究,提出了针对 0~5500 m 旁通阀调节策略。上海交通大学李华雷^[27]为提高不同海拔下二级可调增压系统增压压力的瞬态响应特性,采用增量式闭环 PID 控制,以防止积分饱和,运用归一化参数整定法对 PID 参数整定。仿真表明,相比开环控制策略,该增量式闭环 PID 控制策略使柴油机的瞬态响应时间少,超调量减小,海拔 4500 m 响应时间减少 32.6%,柴油机与压气机联合运行线处于压气机 MAP 图效率较高区,且远离喘振线。利奇^[28]将海拔因素考虑进 PI 参数整定中,有效防止积分饱和。从稳态工况抗干扰能力(脉冲信号和阶跃信号)、瞬态工况下响应时间和超调量等角度,分析比较了三种控制策略(开环控制、PI+前馈的闭环控制、增压压力 PI 反馈控制)的鲁棒性、准确性和快速性。张宝川^[29-30]通过耦合仿真研究了 PID 控制参数对系统的响应特性与稳定性的影响。张慧龔^[31]研究了变海拔条件下可变喷嘴开度控制策略,在全工况范围内,随海拔的升高,柴油机对应工况点的喷嘴环开度逐渐减小。

针对现有 VGT+WGT 和 WGT+WGT 两级增压系统,分别存在调节范围窄和控制过于复杂的问题。刘瑞林^[32-34]提出了高原型 VGT+WGT 两级可调增压方案,以增压压力瞬态响应时间最短为控制目标,比较了瞬态工况下三种 VGT 叶片开度调节策略优劣。

由表 2 可以看出,针对高原增压系统控制策略的研究主要集中在 PID 控制及稳态开度 MAP 标定,传统 PID 控制比例、积分和微分系数都是固定的,不能根据柴油机工况进行自整定。改进型 PID 是为实现 PID 可调而设计出的控制方法。试验与仿真结果表明,参数可调 PID 在不同海拔增压系统控制中能改善发动机性能。先进控制算法已经逐渐应用到平原条件下柴油机二级可调增压控制中,与平原条件相比高原变量个数增加,变化幅值增大,PID 控制本身的局限性将不能满足消费者要求与日益严格

排放法规。借鉴平原条件下柴油机先进增压控制方法,进一步改善柴油机高海拔性能是下一步重要发展方向。

2 高海拔多系统协同控制策略研究

柴油机控制属于多系统、多参数高度耦合控制问题。柴油机主要子系统包括:增压系统、喷油系统、废气再循环(EGR)系统等,这些系统之间存在强烈耦合。单独考虑任何系统显然无法实现精确控制,国内外主要针对与增压系统耦合关系最明显的喷油、EGR 系统进行了深入的研究。

2.1 平原多系统协同控制策略

传统控制方法忽略了各系统的耦合特性而通过独立回路分别控制,这种方法显然难以获得理想控制效果。具有可行性的控制算法或者控制器需要保证稳态工况控制参数尽量趋近于其目标值,并能够抵御各种干扰。瞬态工况中可以减少变化的过渡时长,尽量减少超调、发散和不稳定情况出现。传统 PID 控制具有算法简单、易于移植、技术成熟可靠等优点,作为增压压力的控制算法,在 WGT、VGT 和 VGT-EGR 耦合系统^[35-36]中应用广泛。

近年来,柴油机多系统协同控制受到国内外科研机构的重视,最具代表性的如博格华纳公司^[37]针对双 EGR 耦合 VGT 系统采用进气压力与 EGR 率反馈控制策略,以降低泵气损失,并提高压气机效率。国内北京理工大学杜巍^[38]以最佳燃油经济性为目标,计算了外特性条件下废气旁通阀开度与喷油提前角对柴油机性能的影响规律,得到两者的优化匹配规律。各单位的研究内容见表 3。

从表 3 可以看出,多系统协同控制主要采取多种控制策略相结合或某种较为先进的控制算法,控制目标主要集中在降低排放、提高经济性及响应速度。基于上述任一多变量控制方法所构建的控制器,都可以实现对多输入、输出系统的控制,两级可调增压系统本身所具有的延迟性、非线性等特点使之更容易接受

表 3 柴油机多系统、多参数协同控制比较（0 海拔）

研究单位(人员)	控制策略	控制系统和参数	效果
Shutty J. [39]	前馈+PI	VGT、EGR	解耦增压压力与 EGR 率
俄亥俄州立大学 Haber [40]	H_{∞}	VGT、EGR	进气歧管温度、压力和氧浓度的控制
Johan [41]	以 EGR 率和泵气损失反 馈的 MPC	VGT、EGR	控制精度和响应速度较好
Stobart R. [42]	EMPC	VGT、EGR	提高进气压力和涡轮功率
Yuxing Liu [43]	MPC	VGT、EGR、高压级旁通阀	提高燃油经济性、减少 CO2 排放
Yan F. [44]	基于 Lyapunov 函数的 控制器	双回路 EGR、	减小泵气损失提高 EGR 控制精度
博格华纳公司 [37]	进气压力和 EGR 率反馈	双 EGR、VGT、进气节流阀	降低泵气损失、提高增压器效率
瓦锡兰集团 [45]	PID	TST、Miller、EGR	减少 NOx 排放
Maria K. [46]	MPC	VGT、EGR、喷油始点、喷油时刻	Trade-off 性能与排放
Dickinson P. [47,48]	MPC	双 VGT、EGR	减少 BSFC 和 CO2
Malikopoulos [49]	瞬态多变量分散学习	喷油提前角+VGT	BSFC、NOx
北京理工大学 [38]	开环控制	VGT+EGR+喷油提前角	提高燃油经济性
天津大学 [50]	ADRC	VGT、EGR	提高进气响应速度
合肥工业大学 [51]	前馈+PID 闭环反馈	EGR、VGT、增压压力、进气流量	响应速度较快

MPC 控制。除此之外，MPC 控制方法可以结合其他算法或理论，如神经网络、模糊控制等，在柴油机多系统协同控制方面具有很大的发展空间。

2.2 高原多系统协同控制策略

随海拔的升高，大气压力降低，进气环境发生改变，多系统协同控制更为复杂。目前针对高海拔柴油机多系统协同控制研究较少，针对增压与喷油，增压与 EGR 都有待进一步研究。

上海交通大学李华雷 [52] 针对带旁通阀的两级 WGT 存在高海拔个别工况下增压器效率下降和泵气损失增加的问题，提出喷油补偿与涡轮旁通阀控制相结合的控制策略控制增压压力。张立夫 [53] 基于二级可调增压柴油机仿真模型，开展不同过量空气系数和喷油量工况下柴油机高原性能仿真计算。结果表明，在海拔 4500 m 条件下，采用两级可调增压系统，并结合油气协同控制，柴油机扭矩和功率可达到 100% 恢复。

北京理工大学刘系嵩 [26] 在海拔 0~5500 m 范围内，建立以增压压力为反馈量的 PID 控制器，动态调节涡轮旁通阀开度与循环喷油量。李长江 [54] 针对不同海拔下转矩突降问题，通过研究增压系统旁通阀和喷油提前角调节特性，设计了瞬态工况压气机旁通阀晚关和延迟喷油两种控制策略。朱振夏 [55] 提出了“边界适应度归零”的惩罚参数取值方法，搭建了遗传算法与柴油机性能仿真耦合优化模型，并对喷油参数和压气机转速分别进行优化。

昆明理工大学陈贵升 [56] 为提升二级可调增压柴油机高原适应性，并降低排放，采用高压级涡轮 VGT 叶片开度与 EGR 率协同控制，并耦合后喷策略。王俊 [57] 通过遗传算法优化不同海拔条件下 VNT/EGR 耦

合控制，改善柴油机在高海拔、全工况范围内的经济性与排放性。狄磊 [58] 基于柴油机热力学模型，在 0~4000 m 海拔，分别研究了 VGT 叶片开度和后喷策略（后喷量、主后喷间隔）对柴油机进气特性、燃烧过程、能量流向和排放的影响规律。

以上几篇文献均是基于二级可调增压控制参数优化基础上，对固定海拔下喷油参数进行优化。随着供油参数的改变，压气机联合运行线必然发生变化，以上研究并未真正实现高海拔下增压控制参数与喷油参数的协同优化。陆军军事交通学院梁志峰 [59] 进行了变海拔柴油机增压与喷油系统控制参数协同标定仿真研究，分析 VGT 叶片开度、喷油提前角与喷油量三者协同调节对空燃比、最高燃烧压力和转矩的影响。结果发现，一定程度上增加 VGT 叶片开度与喷油量，同时减小喷油提前角，可有效避免最高燃烧压力过高同时提升转矩。

3 高海拔柴油机两级增压控制发展趋势

上述研究反映了国内外柴油机二级可调增压及其与其他系统协同控制策略与控制方法方面的研究状况。西方发达国家的地理特点，使其对增压控制方面研究集中在 3000 m 以下，而我国特殊高原环境及国家安全与发展战略决定必须开展 3000 m 海拔以上的研究。结合现阶段研究情况，高海拔二级可调增压控制还需在以下几个方面深入研究。

3.1 两级可调增压系统高海拔先进控制方法研究

目前针对高海拔下柴油机及增压系统瞬态工况

控制算法一般采用开环控制、闭环控制、PID 等传统的控制算法,但随着海拔的升高,大气压力和大气温度对控制过程的影响是必须考虑的因素,PI 控制易出现积分饱和问题,达不到高海拔柴油机瞬态过程控制效果。因此,在未来高海拔柴油机及增压系统瞬态控制算法开发中,应借鉴当今航空发动机、人工智能领域先进的控制思想和控制算法,提升控制精度和鲁棒性,减少瞬态过程增压压力响应时间和转矩的波动性。对不同先进控制算法的比较分析见表 4^[60]。

由表 4 可以看出,传统 PID 控制及改进型只具有较高鲁棒性,其他控制理论也存在收敛速度、多目标控制能力、非线性特性一项或多项水平较低的问题。国内外学者为了改善控制系统的跟踪和抗扰等特性,将自适应技术、滑模变结构控制、智能控制(模糊控制、神经网络控制)等一系列先进的控制算法融入到传统的控制技术中,将是未来高海拔二级可调增压系

统控制算法的发展趋势。

3.2 高海拔多系统、多参数协同控制

瞬态优化控制更强调操纵灵活性,更重视排放及燃油经济性。柴油机瞬态工况下,进气-喷油-燃烧相互影响,为了同时优化瞬态工况下柴油机的多个目标参数,需要协同控制二级可调增压系统、喷油系统、进排气门和 EGR 等多个子系统,实现瞬态工况下多变量控制,多目标优化。因此柴油机高海拔多系统、多参数协同控制是增压系统控制的重点研究方向。张众杰^[61]针对高海拔条件车用柴油机提出的多系统、多参数协同控制方案如图 1 所示。其中采用的二级可调增压系统高、低压级增压器均为 VGT,实现柴油机变海拔瞬态过程中增压压力自适应控制,与喷油系统、EGR 系统、排气门协同控制,全面优化柴油机高海拔各项性能指标。

表 4 先进控制算法比较分析

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	MPC 控制	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

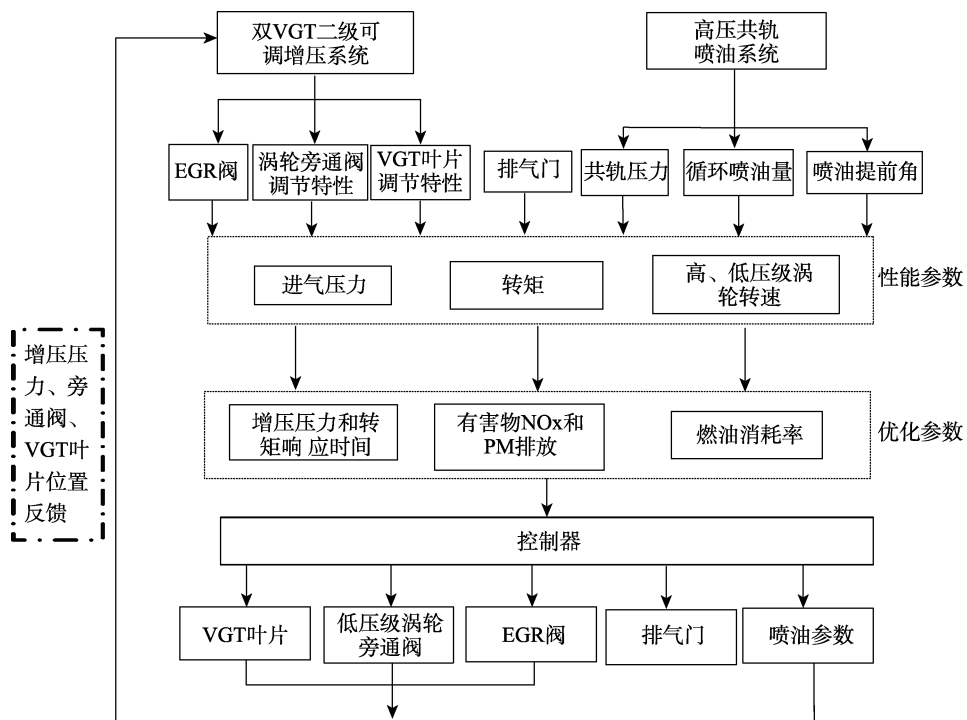


图 1 变海拔柴油机瞬态工况下多系统、多参数协同控制路线

4 结语

文中总结了高海拔增压系统策略和多系统协同控制策略的研究现状,最后分析了高海拔二级可调增压控制发展趋势。

1) 借鉴平原条件下柴油机先进增压控制方法进一步改善柴油机高海拔性能是高海拔增压系统控制策略下一步重要发展方向。

2) 高海拔柴油机多系统协同控制方面具有很大的发展空间。

3) 将先进控制算法融入到传统的控制技术中,将是未来高海拔二级可调增压系统控制算法的发展趋势。

4) 柴油机高海拔多系统、多参数协同控制是增压系统控制的重点研究方向。

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] 刘刚, 刘瑞林, 张恒超, 等. SOFIM8142.43 柴油机增压器高原匹配模拟试验研究[J]. 军事交通学院学报, 2010, 12(4): 52-55.
- [5] 杨春浩, 刘瑞林, 陈陆洋, 等. 车用发动机热平衡研究进展与展望[J]. 装备环境工程, 2017, 14(10): 63-68.
- [6] 刘洋, 马朝臣, 王鹏. 燃气涡轮增压系统恢复柴油机高原功率研究[J]. 内燃机学报, 2017, 35(1): 67-74.
- [7] 史乃晨. 车用柴油机增压器与 EGR 系统的协调控制策略[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2016.
- [8] BURATTI R, CARLO A, LANFRANCO E, et al. Di Diesel Engine with Variable Geometry Turbocharger (VGT): A Model Based Boost Pressure Control Strategy[J]. Meccanica, 1997, 32(5): 418-420.
- [9] 刘博, 李华雷, 胡志龙, 等. 可调二级增压柴油机瞬态加载性能的试验[J]. 内燃机学报, 2012, 30(2): 107-112.
- [10] 刘博, 邓康耀, 张哲, 等. 可调二级增压柴油机增压压力控制策略计算研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(4): 17-22.
- [11] THOMASSON A, LEUFVEN O, CRISCUOLO I, et al. Modeling and Validation of a Boost Pressure Actuation System, for a Series Sequentially Turbocharged SI Engine[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(12): 1860-1870.
- [12] THOMASSON A. Model-Based Control of Two-stage Turbochargers for Heavy-duty Diesel Engines[D]. Linköping: Linköping University, 2014.
- [13] PHILIPPE M, OLIVIER G. Control Design for a Second Order Dynamic System: Two-Stage Turbocharger[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 470-476.
- [14] CANOVA M, CHIARA F, RIZZONI, G, et al. Design and Validation of a Control-Oriented Model of a Diesel Engine with Two-Stage Turbocharger[C]. SAE Paper, 2009-24-0122.
- [15] STEINPARZER F, STÜTZ W, KRATOCHWILL H, et al. BMW's New Six-cylinder Diesel Engine with Two-stage Turbocharging[J]. MTZ worldwide, 2005, 66(5): 2-5.
- [16] 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.
- [17] SCHMITT F. Powerful Turbocharging System for Passenger Car Diesel Engine[J]. MTZ worldwide, 2014, 75(3): 12-19.
- [18] MOHAMED S K, ALEC S, JOHN K. Study of EGR and Turbocharger Combinations and Their Influence on Diesel Engine's Efficiency and Emissions[C]. SAE Paper, 2016-01-0676.
- [19] KOTMAN P, BITZER M, KUGI A, et al. Flatness-based Feed Forward Control of a Two-stage Turbocharged Diesel Air System with EGR[J]. Automatica, 1995, 31(12): 1835-1851.
- [20] MOULIN P, GRONDIN O, FONTVIEILLE L. Control of a Two Stage Turbocharger on a Diesel Engine[C]// Proc IEEE Conf Decision Control, 2009.
- [21] DIETER S, RAINER N, JAN L, et al. Pressure Control of a Two-stage Turbocharged Diesel Engine Using a Novel Nonlinear Imc Approach[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications. Munich Germany, IEEE, 2006: 2399-2404.
- [22] THIVAHARAN A, DENNIS R, NORMAN L, et al. Boost Pressure Control Strategy to Account for Transient Behavior and Pumping Losses in a Two-Stage Turbocharged Air Path Concept[J]. Energies, 2016, 9(7): 530.
- [23] 橘本宗昌, 小林雅行, 村山哲也, 等. 以同时降低燃油消耗和排放为目的的两级增压系统研究[J]. 国外内燃机, 2014(3): 32-37.
- [24] PAUL D, KEITH G, NICK C, et al. Real-time Control of a Two-stage Serial VGT Diesel Engine Using MPC[C]// IFAC-Papers On Line 2015(): 48-15.
- [25] GALINDO J, LUJÁN JM, CLIMENT H, et al. Turbocharging System Design of a Sequentially Turbocharged Diesel Engine by Means of a Wave Action Model[C]. SAE Paper, 2007-01-1564.
- [26] 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, 28(5): 447-452.
- [27] 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, 46(9): 335-342.
- [28] 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.
- [29] 张宝川. 可调两级增压系统的动态特性及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

- [30] 沈笠, 崔毅, 邓康耀, 等. 基于空燃比控制的可调两级增压动态性能研究[J]. 柴油机, 2016, 38(3): 1-5.
- [31] 张慧龔, 李华雷, 刘胜, 等. 变海拔柴油机可变喷嘴增压系统控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 356-364.
- [32] 董素荣, 刘瑞林, 周广猛, 等. VGT 叶片开度对二级增压柴油机高海拔燃烧特性与性能的影响[J]. 内燃机学报, 2017, 35(3): 231-237.
- [33] 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, 34(6): 543-548.
- [34] 林春城. 共轨柴油机二级可调增压系统高海拔标定研究[D]. 天津: 军事交通学院, 2015.
- [35] VAN N M J, KOLMANOVSKY I V, MORAAL P E, et al. EGR-VGT Control Schemes: Experimental Comparison for a High-speed diesel Engine[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2000, 20(3): 63-79.
- [36] GISSINGER G L, FRANK P M. Model-Based Electronic Diesel Engine and Turbocharger Control[C]. SAE paper 900595, Warrendale, PA: SAE International, 1990.
- [37] SHUTTY J, CZARNOWSKI R. Control Strategy for a Dual Loop EGR System to Meet Euro 6 and Beyond[C]. USA: 2009.
- [38] 杜巍, 赵永, 樊丰, 等. 二级可调增压器旁通阀与喷油参数调节规律的仿真分析[J]. 车用发动机, 2013, 204(1): 66-74.
- [39] SHUTTY J, BENALI H, DAEUBLER L, et al. Air System Control for Advanced Diesel Engines[C]. SAE Paper 2007-01-0970. Warrendale, PA: SAE International, 2007.
- [40] HABER B, WANG J. Robust Control Approach on Diesel Engines with Dual-loop Exhaust Gas Recirculation Systems[C]. ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference. [s. l.]: [s. n.], 2010.
- [41] WAHLSTRÖM J, ERIKSSON L. Output Selection and Its Implications for MPC of EGR and VGT in Diesel Engines[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 932-940.
- [42] ZHAO De-zong, STOBART R. Systematic Control on Energy Recovery of Electrified Turbocharged Diesel Engines[C]. 54th IEEE Conference on Decision and Control. [s. l.]: [s. n.], 2015.
- [43] LIU Y. Systematic Optimization and Control Design for Downsized Boosted Engines with Advanced Turbocharger[D]. Ohio: The Ohio State University, 2014.
- [44] YAN F, WANG J. Control of Dual Loop egr air-path Systems for Advanced Combustion Diesel Engines by a Singular Perturbation Methodology[C]. American Control Conference. [s. l.]: [s. n.], 2011.
- [45] FEDERICO M, MARCO G B, DIEGO D. Computational Analysis of Internal and External EGR Strategies Combined with Miller Cycle Concept for a Two-Stage Turbocharged Medium Speed Marine Diesel Engine[C]. SAE Paper 2011-01-1142. Warrendale, PA: SAE International, 2011.
- [46] KARLSSON M, EKHOLM K, STRANDH P, et al. Multiple-input Multiple-output Model Predictive Control of a Diesel Engine[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43: 131-136.
- [47] CHRISTER W, BJORN H. Reducing Emissions Using two-stage Turbocharging[J]. Wartsila Technical Journal, 2008(1): 35-41.
- [48] GEORG T, PETER H, HANNES B, et al. Potential of Two-stage Turbocharging on MAN Diesel's 32/44 CR[J]. MTZ worldwide Edition, 2008, 69(10): 14-21.
- [49] ANDREAS A M. Real Time Self-learning Optimization of Diesel Engine Calibration[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131: 1-7.
- [50] HUI Xie, KANG Song, SHENG Yang. On Decoupling Control of the VGT-EGR System in Diesel Engines: A New Framework [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24 (5): 1788-1796.
- [51] 于峰. 高压共轨柴油机EGR-VGT协调控制与仿真研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [52] LI Hua-lei, SHI Lei, DENG Kang-yao. Research on the Power Recovery of Diesel Engines with Regulated Two-Stage Turbocharging System at Different Altitudes[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2014: 1-10.
- [53] 张立夫, 刘胜, 张慧龔, 等. 高海拔可调两级增压柴油机油气协同控制研究[J]. 柴油机, 2017(03): 1-4+9.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 陈贵升, 狄磊, 苏娜, 等. 基于不同增压系统共轨柴油机变海拔工作特性模拟[J]. 内燃机学报, 2016(6): 504-512.
- [57] 王俊. VNT 与 EGR 耦合对不同大气压力下车用柴油机性能与排放的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [58] 狄磊. 高原环境下柴油机两级增压系统优化及性能提升研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [59] 梁志峰, 陈陆洋, 张众杰, 等. 柴油机增压与喷油系统控制参数协同调节特性研究[J]. 内燃机与配件, 2017, 11(21): 23-25.
- [60] 张众杰, 刘瑞林, 梁志峰, 等. 柴油机增压系统变海拔自适应技术研究现状与发展趋势[J]. 装备环境工程, 2017, 14(10): 1-7.
- [61] 张众杰, 刘瑞林, 夏南龙, 等. 车用柴油机瞬态特性劣变机理及优化[J]. 军事交通学院学报, 2018, 20(8): 34-39.