

基于轨压特征的高压共轨 喷油流量诊断方法研究

主讲人：仇滔

北京工业大学环境与能源学院

目录

CONTENTS

- 1 前言
- 2 喷油引起的轨压变动理论分析
- 3 数据采集与处理
- 4 油泵试验台实验结果与分析
- 5 验证
- 6 结论
- 7 参考文献

前言

高压共轨燃油系统已成为高效低排放柴油机的标准配置。柴油机电控单元通过控制喷油器的加电时间和喷油流量来保证循环油量。喷嘴几何参数不变保证了喷嘴流通能力（流量系数）在整个使用寿命内不变，进而保证在轨压不变的情况下单位时间内喷出的燃油体积即喷油流量不变。但实际中，由于喷孔磨损、老化、积碳等问题导致喷油器喷嘴的流量发生变化，如果喷射持续期不变，循环喷油量会发生变动，导致缸内燃烧做功发生变化，影响发动机工作性能^[1]，因此寻找一种快速诊断出喷油器喷嘴的喷油流量的方法将能够准确控制进入气缸的循环油量，从而提高柴油机的工作性能。

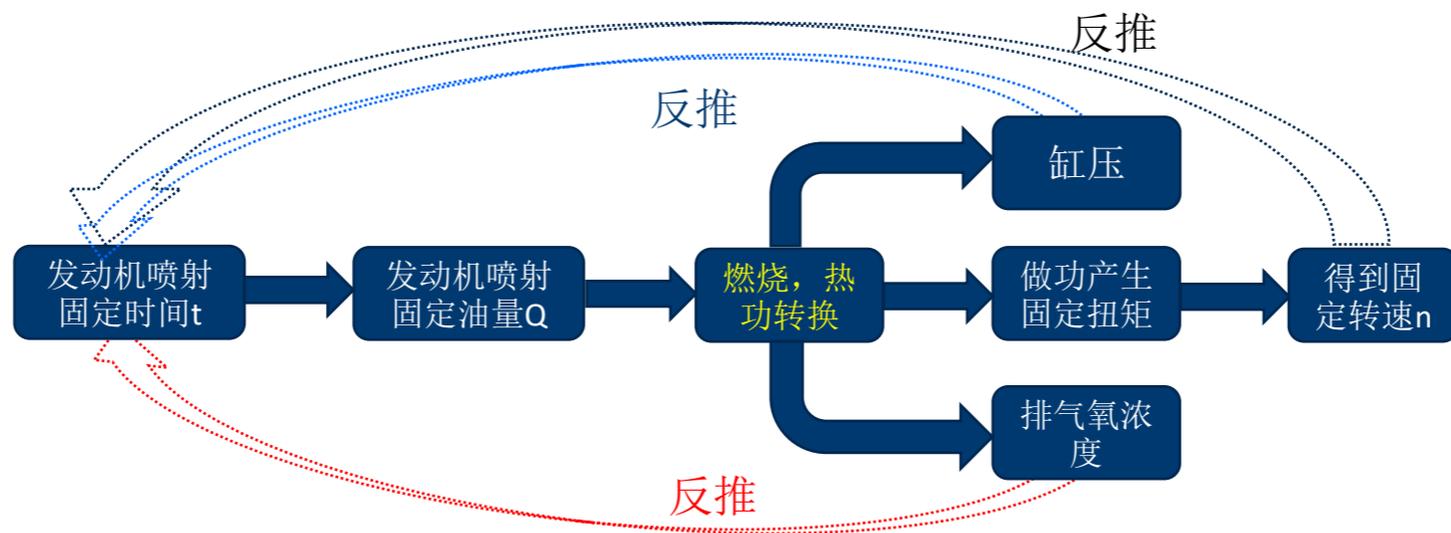
- 现阶段对于喷油量通过开环的方式直接控制，假设喷油器流通能力不变；
- 实际中喷油器流通能力会发生变化，如磨损、积碳；因此对喷油器的流通能力进行闭环诊断非常重要（国六已经进行规定）



(a) 新喷油器 (b) 积碳喷油器 1 (c) 积碳喷油器 2

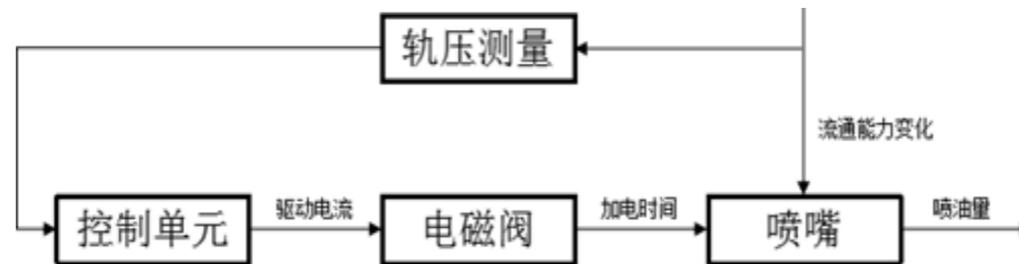
前言

- 目前的方法都是通过燃油变动引起燃烧变动，识别燃烧变动响应。
- 存在响应速度、不能加装瞬态缸压传感器和曲轴转动惯量变化等问题，影响在批量应用。

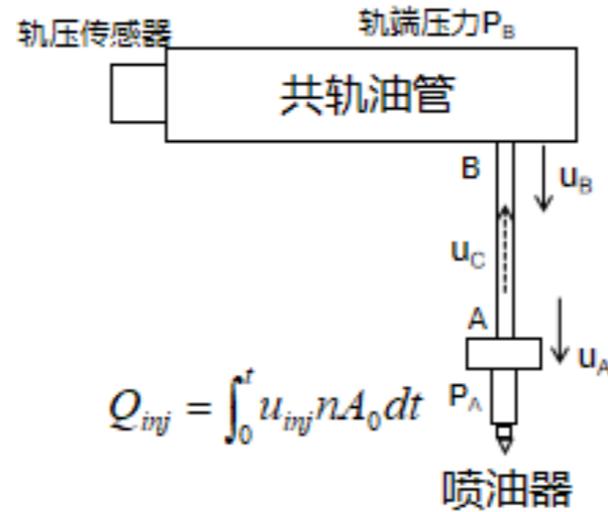


前言

基于喷油产生的直接压力影响，理论上分析了高压共轨喷油器喷油引起的轨压波动的规律，并提出了采用10kHz采样频率结合小波分析的数据处理方法可有效的获得该规律，同时在实验台上开展实验，分析了单次和多次喷射、初始轨压、喷油脉宽、不同喷油流量的喷油器喷油引起轨压波动与油量的关系。结合上述分析提出基于轨压下降历程来识别喷油流量的方法，以现有精度的轨压传感器，实现了对循环油量变动的快速诊断。



喷油引起的轨压变动理论分析



油轨中高压燃油压力的波动主要由油泵泵油和喷油器喷油导致。文献^[13]研究表明，油泵泵油形成的主要和燃油泵转速有关，与喷油引起的高频压力波动不同，因此本文着重分析喷油引起的油轨内压力波动。

如图所示，将油轨简化为集总容积，轨端压力传感器压力等效为高压油管和油轨连接点B的压力。假设喷油器与高压油管连接点为A。由于喷油引起的轨端压力变动时间很短，因此忽略燃油系统的温度变化。

1.1 燃油喷射流量变化引起的压力变动

$$\Delta P_1 = \int_0^t \frac{Bn\mu A_0}{V} \sqrt{\frac{2(P_A - P_r)}{\rho}} dt$$

式中， V 表示共轨容积， B 表示燃油弹性系数， μ 为流量系数， P_A 为喷射压力， P_r 为出口压力， A_0 表示喷孔的截面积， ρ 为燃油密度，喷油器喷孔数为 n 。

1.2 喷油针阀运动引起的压力波

$$u_c = \frac{\sqrt{B/\rho}}{\sqrt{1 + BD/E\delta}}$$

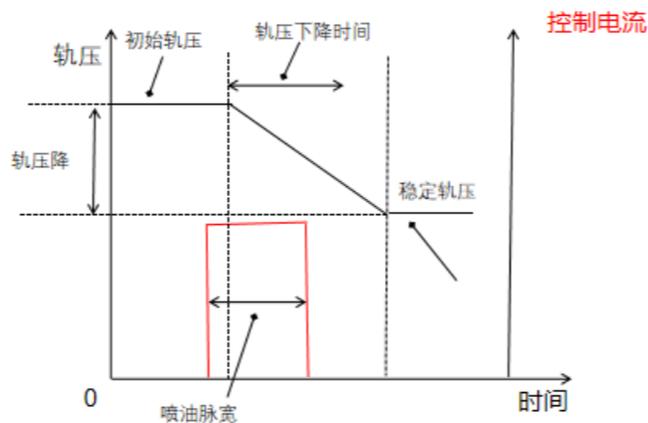
$$\Delta P_2 = \rho u_c (u_0 - u_A)$$

式中， E 为管壁材料的弹性系数； D 为管径； δ 为管壁厚度； u_c 为波速（燃油音速）。 u_0 为开启或关闭喷油器针阀前高压油管中的稳定燃油流速。

1.3 喷油引起的轨压变动参数定义

上述分析表明，由喷油引起轨压变化包括燃油流量变化和针阀运动引起的压力波两方面，轨端压力变动量可以表达为：

$$\Delta P_{\text{总}} = \Delta P_1 + \Delta P_2$$



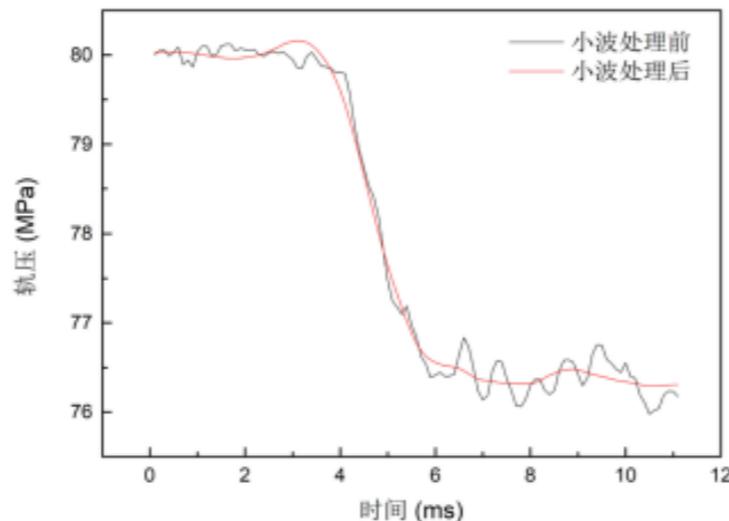
喷油引起的轨压变化示意图

基于上述理论分析得到如下结论：由于水击压力波的存在以及燃油流速的弹性变化，轨压变化过程与喷油过程存在不一致性，具体表现为，轨压开始变动时刻滞后于喷油开始时刻，轨压下降过程的总时间长于喷油脉宽。

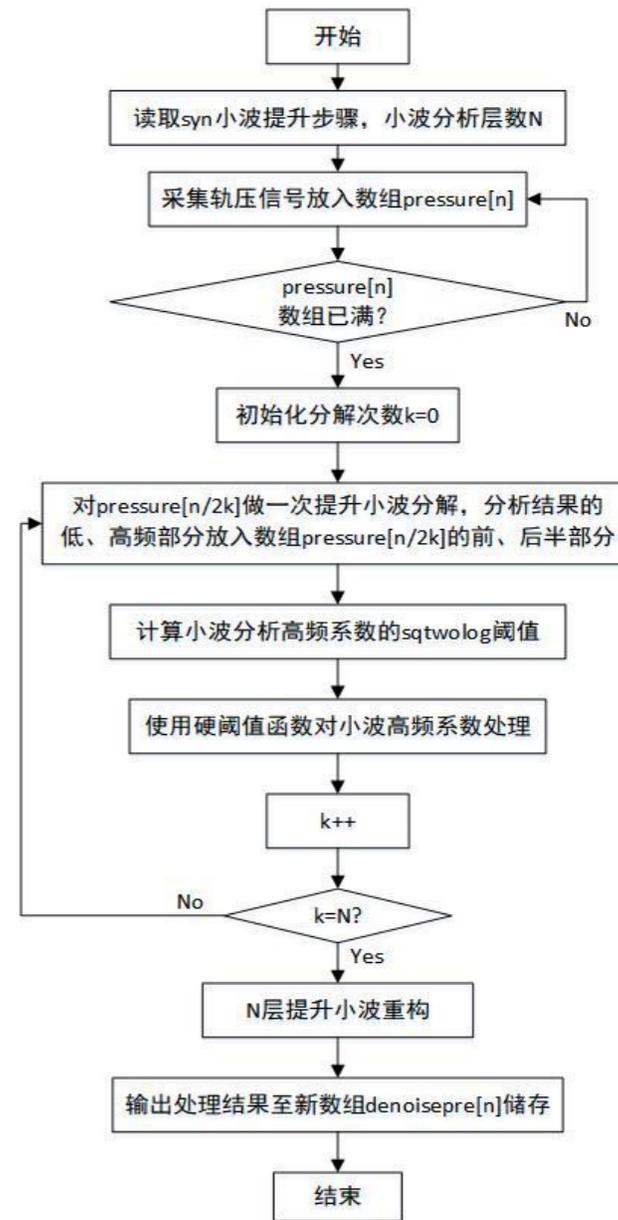
数据采集与处理

基于发动机电控单元的采集频率和计算资源有限，轨压数据采集使用自制采集分析板卡，其核心为型号为tms320f2812的单片机，采用10kHz的采样频率，对轨压数据进行采集处理和分析。

采用codewarrior编写了软件，实现小波分析对轨压数据进行处理和降噪，将程序进行编译后下入采集分析板卡中实现对轨压数据的平滑降噪处理该分析处理程序流程图如下所示，处理前后的轨压数据如图所示。



小波分析处理前后的轨压对比



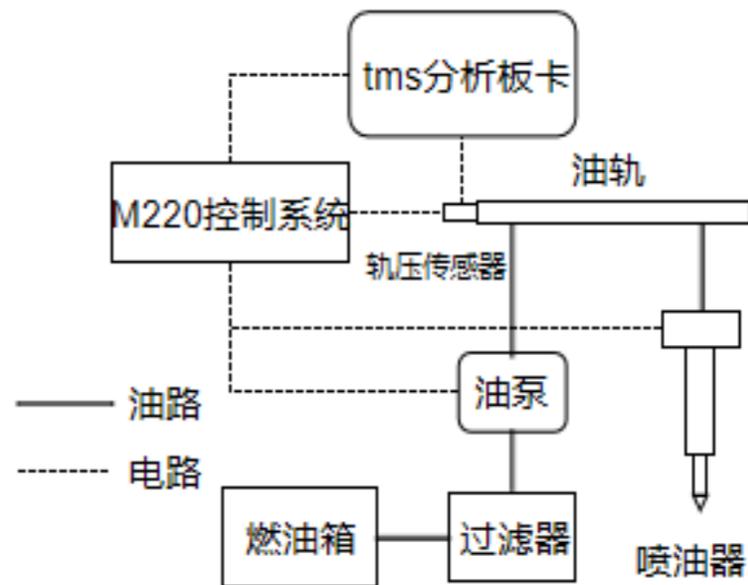
小波分析处理数据流程图

油泵试验台实验结果与分析

实验设备与装置

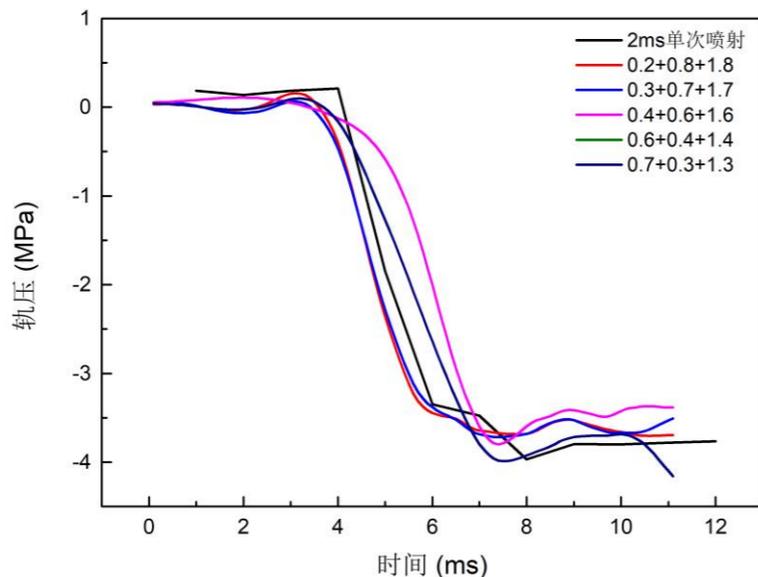
实验设备及油料统计表

设备及油料名称	型号	厂家
油泵试验台	CRB-607	北京因极
快速开发控制系统	M220	北京北汇
采集分析板卡	tms320f2812	德州仪器
高压油泵	BOSCHCP4.2	BOSCH
高压油轨		BOSCH
I号喷油器	440ml/30s	BOSCH
II号喷油器	640ml/30s	BOSCH
数据采集器	DEWE 43 A	DEWEsoft
燃油GB17691	国四柴油	

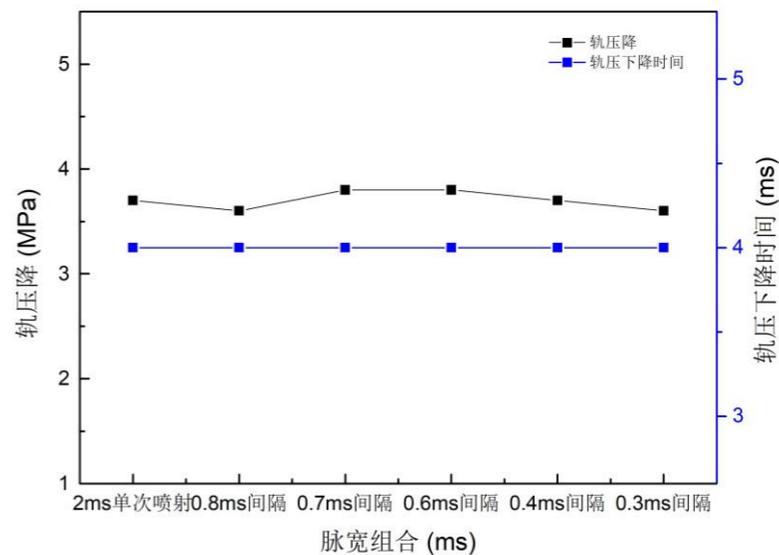


实验装置简图

喷射方式对轨压降的影响影响



单次和多次喷射不同脉宽组合轨压变化

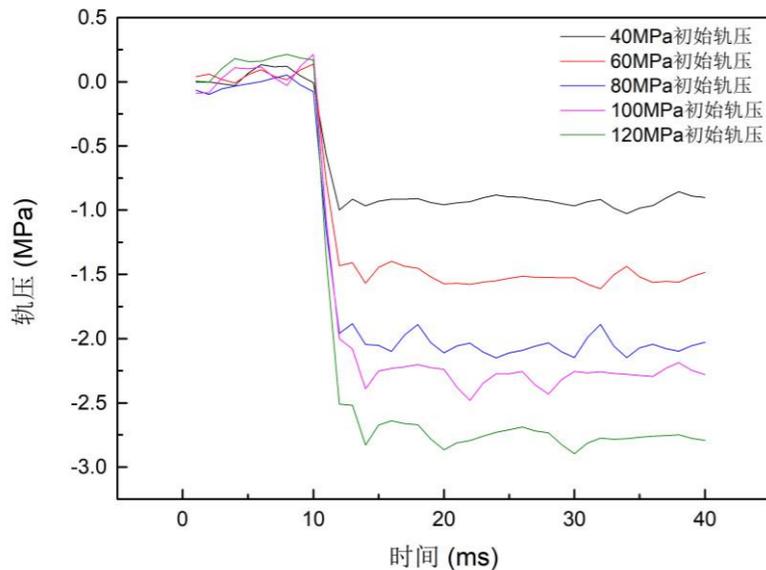


单次与多次喷射轨压降变化与下降时间对比

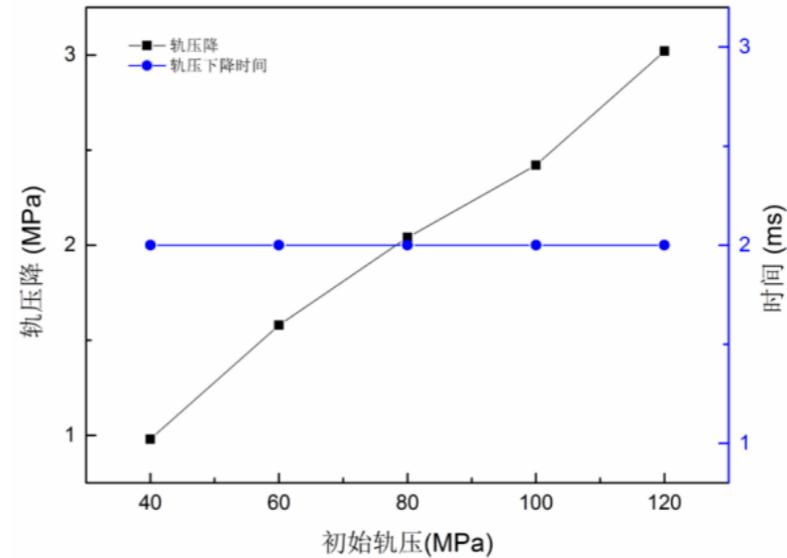
由图可得单次喷射和多次喷射总加电时间一致时，喷油产生的轨压降和下降时间大致相同，对于多次喷射不同脉宽组合轨压变化大致相同。不受多次喷射中间隔时间的影响，对于相同总加电时间，单次喷射和多次喷射轨压受喷油影响规律相同。

实验结果分析

不同初始轨压影响



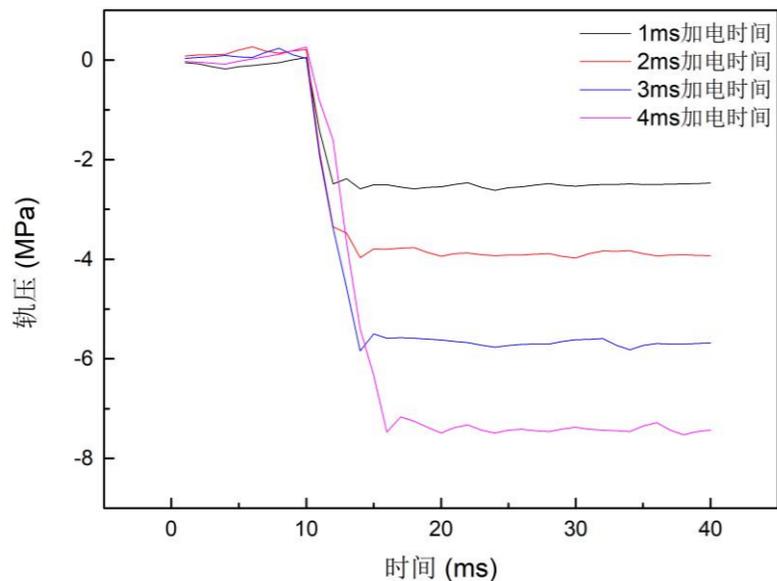
不同初始轨压，1ms喷油脉宽轨压变化



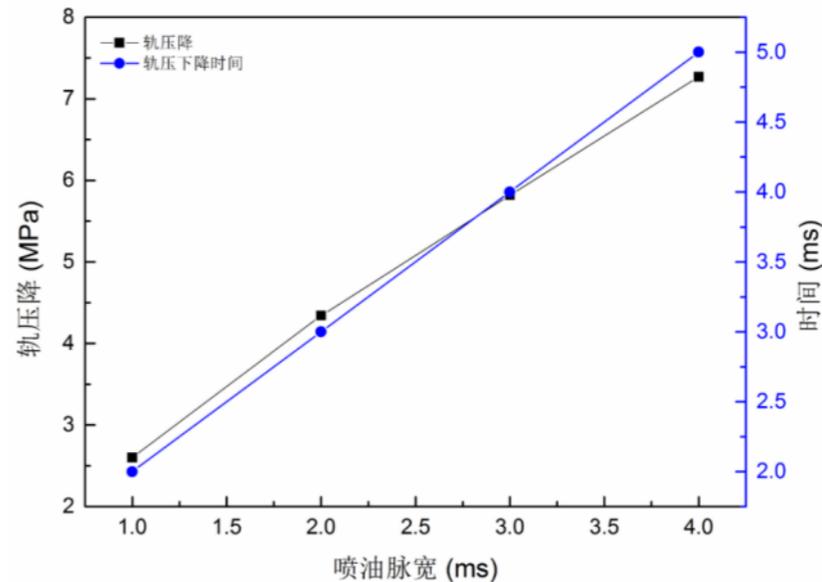
不同初始轨压，1ms喷油脉宽轨压降和轨压下降时间变化

从图可以看出，进行处理后随着初始轨压升高，轨压降也单调增加。这是因为初始轨压越高，相同喷嘴流通能力条件下，流速越大，喷油量变化越大，导致相同喷油脉宽的喷油量越多，轨压降也越大。而且，因为喷油压力波的作用，轨压下降过程均为2ms，都大于喷油脉宽1ms。

喷油脉宽的影响



初始轨压100MPa，不同喷油脉宽轨压变化

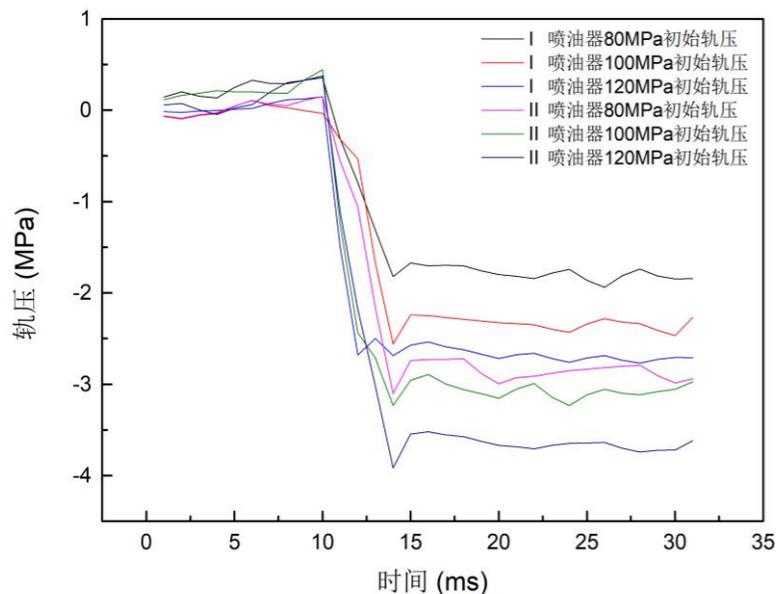


初始轨压100MPa，不同喷油脉宽轨压降和轨压下降时间变化

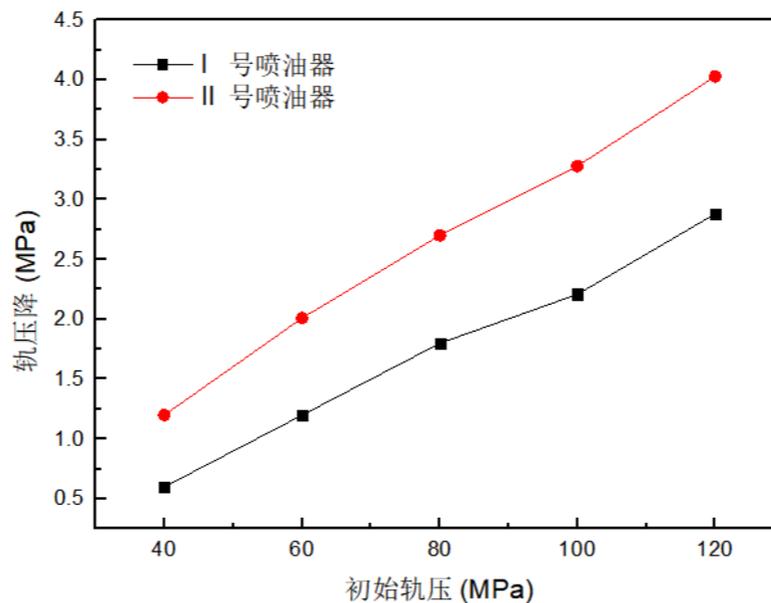
从图可以看出，进行数据处理后随着喷油脉宽增加，轨压降和轨压下降时间都是线性增加。这说明轨压下降延时与喷油脉宽无关。随着喷油脉宽延长，轨压降也增加，这是因为喷油脉宽越长，喷油量越多，轨压下降总量增加。。

实验结果分析

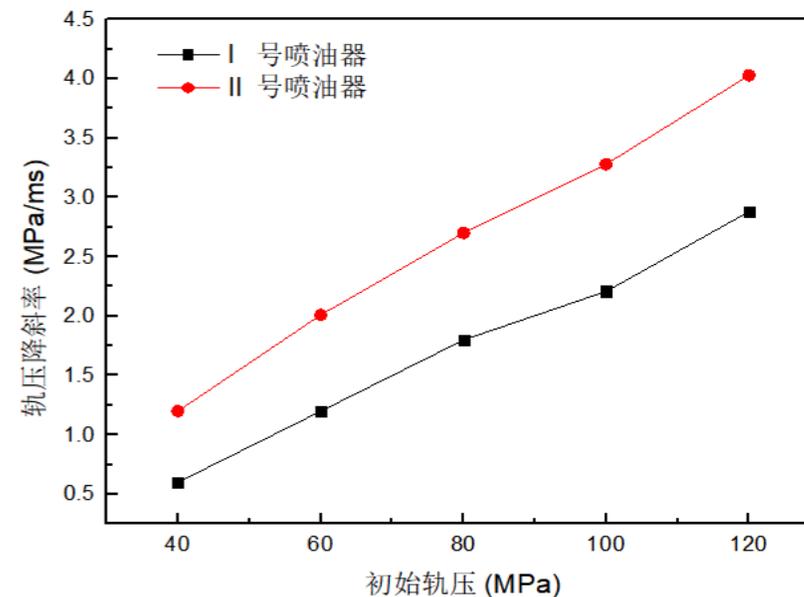
不同喷油器的影响



不同初始轨压，1ms喷油脉宽，
不同喷油器轨压变化



不同初始轨压，1ms喷油脉宽，
不同喷油器轨压降变化



不同初始轨压，1ms喷油脉宽，
不同喷油器轨压降斜率变化

可以看出，进行数据处理后随着初始轨压升高，轨压降都是增加的，这是由于轨压升高导致燃油流速增大，使得喷油量增加导致压降变大。而且II号喷油器的轨压降大于I号喷油器轨压降。这是由于喷油速率大的喷油器喷孔面积大，流量系数也大，导致轨压降斜率（对应于喷油流量）也大，相同喷油脉宽内的喷油量大，所以喷油速率大的喷油器轨压下降量大于喷油速率小的喷油器。

通过上述分析得到结论,进入气缸总油量与轨压下降总量具有线性关系,于是提出基于轨压降相等为目标,通过修正喷油脉宽对于发生喷孔变动喷油器的循环油量进行修正的方法。具体修正方式如下:选择2支 I 号1支 II 号喷油器,两种喷油器喷油流量不同,用 II 号喷油器模拟喷孔变动进行100MPa初始轨压的喷油实验,分别统计喷油脉宽相等和保持轨压降相等两种条件下的喷油量如右表。

实验结果表面,当采用相同的喷油脉宽,由于两种喷油器喷油流量系数不同,相同的喷油脉宽内产生的喷油量明显不同,而通过以喷油产生的轨压降相同为目标修正喷油脉宽后,大流通能力的喷油器缩短了喷油脉宽,使最后两种喷油器喷油量达到一致。

100MPa初始轨压2、3ms喷油脉宽
轨压降及喷油量统计表

	I 号喷油器 440ml/30s	I 号喷油器 440ml/30s	II 号喷油器 640ml/30s
喷油脉宽相等			
喷油脉宽	2ms	2ms	2ms
初始轨压	100MPa	100MPa	100MPa
喷油量	92.8mm ³	92.8mm ³	134.9mm ³
轨压降	4.3MPa	4.3MPa	6.2MPa
调整后轨压降一致			
喷油脉宽	2ms	2ms	1.4ms
初始轨压	100MPa	100MPa	100MPa
喷油量	92.8mm ³	92.8mm ³	93mm ³
轨压降	4.3MPa	4.3MPa	4.3MPa
喷油脉宽相等			
喷油脉宽	3ms	3ms	3ms
轨端压力	100MPa	100MPa	100MPa
喷油量	139.1mm ³	139.1mm ³	202.4mm ³
轨压降	5.8MPa	5.8MPa	8.4MPa
调整后轨压降一致			
喷油脉宽	3ms	3ms	2.1ms
轨端压力	100MPa	100MPa	100MPa
喷油量	139.1mm ³	139.1mm ³	139mm ³
轨压降	5.8MPa	5.8MPa	5.8MPa

结论

本文分析了高压共轨燃油系统中喷油器喷油对轨压的影响，并根据喷油引起的轨压变动，采用系统标配的轨压传感器，提出了循环油量变动的识别修正方法。得到以下结论：

(1) 喷油会引起油轨轨压变化。针对现有轨压传感器，采用10KHz的采样频率结合小波分析的处理方法，可以有效获得喷油导致的轨压变动过程，验证喷油引起的轨压变动规律。

(2) 根据理论分析与实验验证所得到的喷油量-轨压降的变动规律，提出了以轨压降一致为目标，通过调整喷油脉宽来修正循环油量的修正思路，并在误差允许范围内得到理想结果，以轨压降变动诊断循环油量的方法存在可行性。

参考文献

- [1] Krogerus, T. R., Hyvönen, M. P., & Huhtala, K. J. A survey of analysis, modeling, and diagnostics of diesel fuel injection systems[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(8). 0815011-081501-11.
- [2] 白霖. 基于转速波动的高压共轨柴油机各缸不均匀性修正的控制策略[D]. 吉林大学, 2018.
- [3] Taraza D, Henein N A, Bryzik W. The Frequency Analysis of the Crankshaft's Speed Variation: A Reliable Tool for Diesel Engine Diagnosis[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2001.
- [4] 李旭初. 柴油机SCR系统温度控制及喷油量诊断策略研究[D]. 北京工业大学, 2015.
- [5] Leonhardt S. Methods for Engine Supervision and Control Based on Cylinder Pressure Information[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1999, 4(3):235-245.
- [6] Oliver H, Rixen D J. Aging tolerant control of direct injection engines[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 77:201-212.
- [7] 仇滔, 冯祥, 雷艳, 代贺飞, 徐慧, 张传霞. 出口压力对柴油喷油器流量特性影响的试验研究[J]. *兵工学报*, 2015, 36(05):777-780.
- [8] He, Y., and Feng, L., Diesel Fuel Injection System Faults Diagnosis Based on Fuzzy Injection Pressure Pattern Recognition[C], 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004, June 15–19, pp. 1654–1657.
- [9] Mahmoud, O. E., An Intelligent Engine Condition Monitoring System[D], Ph.D. dissertation, School of Mechanical and System Engineering, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK, 2009.
- [10] 李丕茂, 张幽彤, 谢立哲, 胡林峰. 共轨系统多次喷射油量波动与轨压的关系[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(10):112-120.
- [11] Herfatmanesh M.R., Peng Z., Ihracska A., Lin Y., Lu L., Zhang C., et al. Characteristics of pressure wave in common rail fuel injection system of high-speed direct injection diesel engines[J]. *Advanced Mechanical Engineering*, 2016, 8(5), 1-8
- [12] 胡建功. 基于瞬态轨压下喷孔流量变化的控制策略[J]. *内燃机与动力装置*, 2017, 34(05):53-59.
- [13] 刘兴华, 樊志强, 高琢. 高压共轨燃油系统轨压波动特性实验研究[D]. 2010中国汽车工程学会年会论文集, 2010.

THANKS

报告人：仇滔

报告人联系方式

姓名	仇滔
通讯地址	北京市朝阳区平乐园100号北京工业大学环能学院汽车系
邮编	100124
单位	北京工业大学
院系科室	环能学院汽车系
电话	移动电话18618323651
电子邮件	qiutao@bjut.edu.cn