

结构与可靠性

船用柴油机共轨系统高压油管压力波动
优化改进研究石磊¹, 董晓露^{2,3}, 王作群^{2,3}, 郭鑫^{2,3}, 刘帅帅^{2,3}(1. 驻上海地区第四军事代表室, 上海 201108; 2. 七一一研究所, 上海 201108;
3. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

摘要: 针对某型船用高速柴油机高压共轨燃油系统轨-器连接高压油管压力波动大的现象, 利用AMESim液力仿真平台搭建共轨系统模型, 开展压力波动峰值影响因素研究。在此基础上提出降低压力波动峰值的结构改进方案, 并对优化方案进行试验验证。结果表明: 在共轨管出口设置阻尼孔并优化油管内径, 可有效降低轨-器油管压力波动峰值。

关键词: 共轨系统; 轨-器高压油管; 压力波动; 结构

中图分类号: TK421⁺.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)06-0018-05

Investigation and Optimization of Pressure Fluctuation in the High Pressure
Fuel Pipe of the Common Rail System of a Marine Diesel EngineShi Lei¹, Dong Xiaolu^{2,3}, Wang Zuqun^{2,3}, Guo Xin^{2,3}, Liu Shuaishuai^{2,3}(1. Forth Military Representative Office in Shanghai, Shanghai 201108;
2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;
3. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

Abstract: Aiming at the phenomenon of high pressure fluctuation in the rail-injector connecting fuel pipe of the high pressure common rail system of a marine diesel engine, a simulation model of the common rail was built with the AMESim hydraulic simulation platform to study the influence factors of the pressure fluctuation peak. Based on the analysis results, the structural improvement scheme to reduce the pressure fluctuation peak was proposed, and the optimized scheme was tested and verified. The results show that the pressure fluctuation peak can be effectively reduced by arranging a throttling hole at the common rail outlet and optimize the inner diameter of pipe.

Key words: common rail system; rail-injector connecting high pressure fuel pipe; pressure fluctuation; structure

0 引言

由于高压共轨系统能够实现对喷油正时与喷油压力的灵活控制与调节, 被认为是解决柴油机环保和节能双重压力的最有效手段之一^[1-3]。为了提高燃油经济性并降低排放, 某型船用高速柴油机采用了高压共轨系统。高压共轨系统主要由高压油泵、共轨管、限流阀、限压阀及喷油器等部件组成。在

系统布置中高压油泵与喷油器均通过高压油管与共轨管相连接。一方面, 高压管路中的压力波动直接影响各缸喷油一致性及喷油稳定性; 另一方面, 如果高压管路长期在高于其设计压力的环境下工作, 寿命会大大降低, 甚至存在爆裂的风险。因此高压共轨系统正常工作时高压管路中的压力波动峰值不宜过大^[4-8]。

某型船用高速柴油机, 额定工况轨压为 160

收稿日期: 2020-04-16; 修回日期: 2020-06-10

作者简介: 石磊(1982—), 工程师, 主要研究方向为船舶机电设备, sparkle9454@163.com。

MPa, 在平台试验阶段发现: 轨-器油管压力波动较大, 压力波动峰值达到 198.5 MPa, 已超出高压油管压力许用范围。本文针对这一现象进行了仿真分析, 以高压管路中压力波动峰值作为衡量管路压力波动的指标, 分析轨端阻尼孔直径、滤芯等效流通面积及高压油管内径对压力波动峰值的影响规律; 提出了结构优化方案, 并通过试验验证了优化方案的有效性, 为系统匹配及压力波动性能优化提供了支撑与指导。

1 仿真模型建立及标定

1.1 仿真模型建立

共轨系统试验平台如图 1 所示。按照共轨系统平台布置方式, 建立了仿真模型, 如图 2 所示。

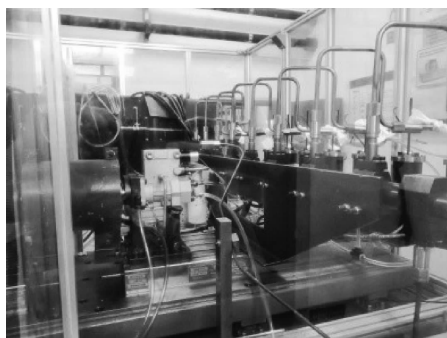


图 1 共轨系统试验平台

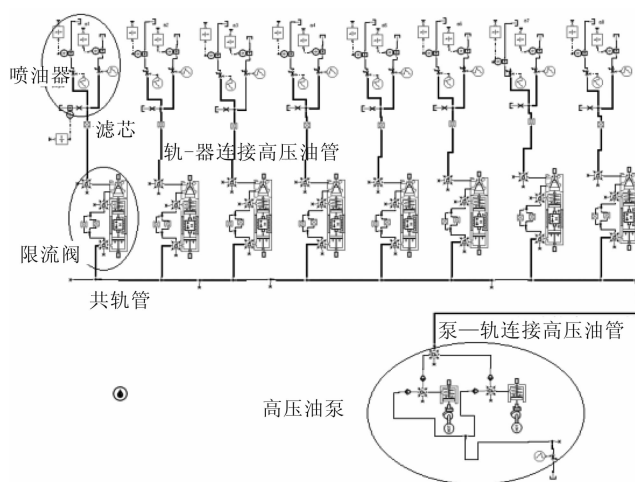


图 2 共轨系统仿真模型

1.2 仿真模型标定

在系统轨-器连接油管上安装 Kistler 高压传感器 (300 MPa, $\leq 0.11\%$ FSO), 采用 DEWETRON 采集模块 (100 kHz, $\leq 0.3\%$) 对轨-器油管压力信号进行监测。传感器安装位置如图 3 所示, 分别为近轨端测点 A、中间测点 B、近喷油器端测点 C。

基于仿真模型计算得到额定工况下轨-器油管

A、B、C 三处的压力, 与试验测得压力对比如图 4~6 所示。可见: B、C 两处仿真压力波动峰值与试验值偏差不超过 2 MPa, A 处仿真压力波动峰值与试验值最大偏差为 4~4.5 MPa。主要原因是, 在一维仿真计算模型中容积腔作为集中容积考虑, 导致计算压力峰值较试验值略低; 此外测点 A 距离高压油泵最近, 受油泵泵油压力影响更显著, 泵油产生的压力波经共轨管容积腔后衰减更快, 故测点 A 压力计算值相对更低。测点 A 压力峰值最大偏差约为 2.3%, 在计算精度可接受范围内, 可用该模型对油管压力波动开展仿真研究。

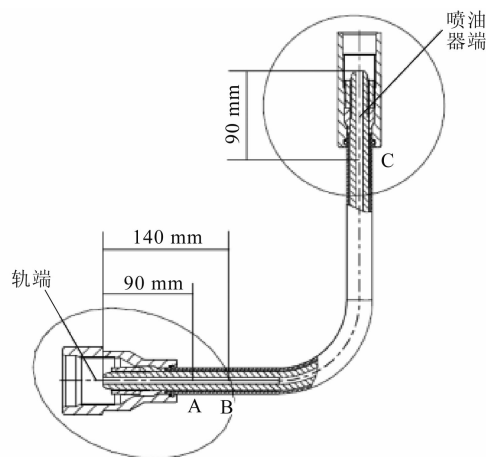


图 3 传感器布置示意图

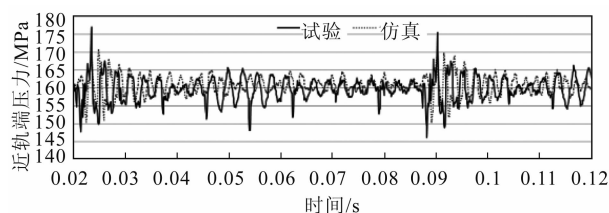


图 4 近轨端压力

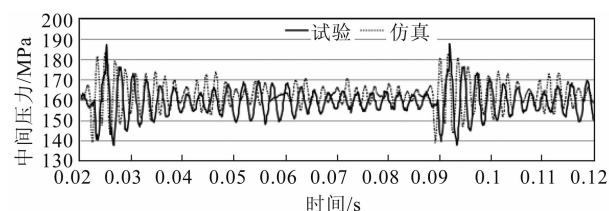


图 5 中间压力

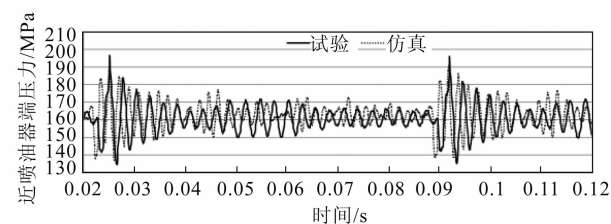


图 6 近喷油器端压力

2 压力波动峰值影响因素分析

高压油泵的脉动供油及喷油器的顺序喷油是引起高压管路内压力波动的主要原因。压力波主要包括油泵供油、针阀落座产生的压缩波及喷油器喷油产生的膨胀波^[9-11]。压缩波所到之处燃油速度降低,压力升高;膨胀波所到之处燃油压力降低^[12-13]。轨-器油管一端连接共轨管,一端连接喷油器,近轨端测点离高压油泵近,近喷油器端测点离喷油器更近。油泵供油产生的压缩波经共轨管、轨-器油管传递到喷油器,压缩波到达共轨管时由于此处燃油体积较大,其压力升高程度较小;压缩波经共轨管到达轨-器油管近喷油器端时,由于周围燃油体积小,压力升高明显。同理,针阀落座产生的压缩波在系统中反向传播,距离越远,压力波衰减越快,在高压油管近喷油器端与供油压缩波碰撞、叠加,此处高压容积小,且距离喷油压力源更近,引起的压力升高比近共轨管端更明显,故三个测点中近喷油器端压力波动峰值最大,近轨端压力波动峰值最小,与试验现象一致。

为降低轨-器油管内压力波动峰值,一方面可增大高压容积,另一方面可设置阻尼孔来削弱供油压缩波的影响。以下仿真分析在限流阀前端及后端设置阻尼孔、降低滤芯流通能力及增大高压油管内径等措施对轨-器油管压力波动的影响。仿真计算均为基于当前共轨系统结构布置(限流阀前后端无阻尼孔、滤芯等效流通直径 d_f mm、轨-器油管内径 d mm)下的单因素分析。

2.1 限流阀前端加阻尼孔

首先考虑在共轨管出口布置阻尼孔以削弱压力波动,同时保证阻尼孔不会显著影响额定持续期下的循环喷油量。在限流阀前端布置阻尼孔,轨-器油管压力波动峰值、循环喷油量随阻尼孔直径的变化曲线如图7、图8所示。可见:在限流阀前端加阻尼孔可有效降低压力波峰值,阻尼孔直径越小压力波动峰值降低效果越显著,且油管内不同部位压力越接近。但阻尼孔直径过小会导致喷油量减小,阻尼孔直径为1.5 mm时,喷油量和无阻尼孔时相比减小10 mm³;阻尼孔直径不小于2 mm时,相同脉宽下喷油器循环喷油量减小不超过3 mm³,因此限流阀前端阻尼孔直径取2.0~3 mm较合适。

2.2 限流阀后端加阻尼孔

图9、图10分别为在限流阀后端设置阻尼孔,轨-器油管压力波动峰值、循环喷油量随阻尼孔直径的变化曲线。可见:在限流阀后端加阻尼孔与在前端加阻尼孔效果基本相同。考虑到共轨系统油路

结构,在限流阀前端布置阻尼孔更容易实现。

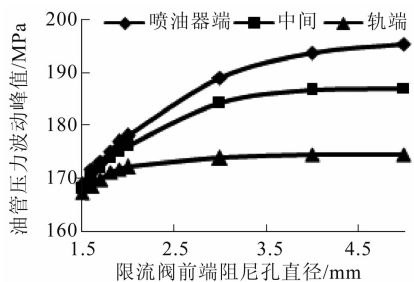


图7 限流阀前端阻尼孔直径对油管压力波动峰值的影响

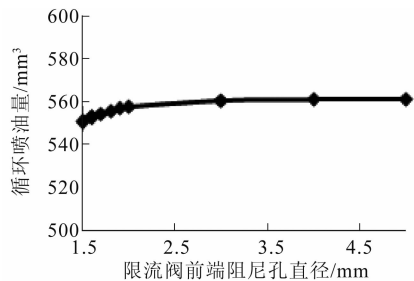


图8 限流阀前端阻尼孔直径对循环喷油量的影响

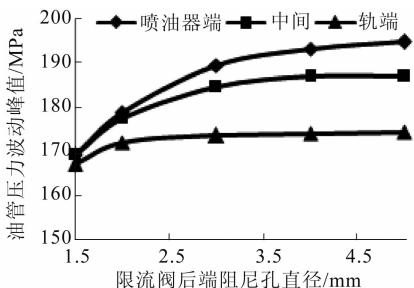


图9 限流阀后端阻尼孔直径对油管压力波动峰值的影响

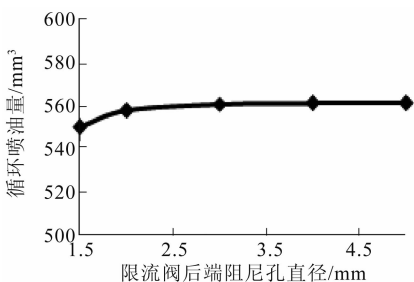


图10 限流阀后端阻尼孔直径对循环喷油量的影响

2.3 减小滤芯等效流通面积

图11、图12分别为轨-器油管压力波动峰值、循环喷油量随滤芯等效流通直径变化曲线。可见:减小滤芯等效直径对油管压力波动改善不显著,当滤芯等效流通直径小于 d_f mm后,喷油器在额定持续期下的循环喷油量有所下降。

2.4 高压油管内径

图13、图14分别为轨-器油管压力波动峰值、循环喷油量随轨-器油管内径变化曲线。可见:在

一定范围内增大高压油管内径可有效降低压力波峰值，高压油管内径越大压力波动峰值降低效果越显著；油管内径不会影响喷油器循环喷油量。

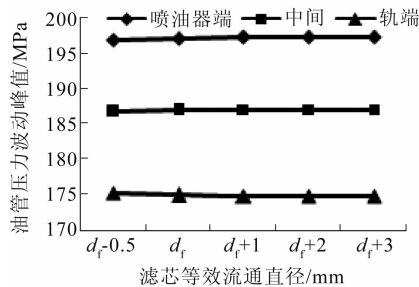


图 11 滤芯等效流通面积对油管压力波动峰值的影响

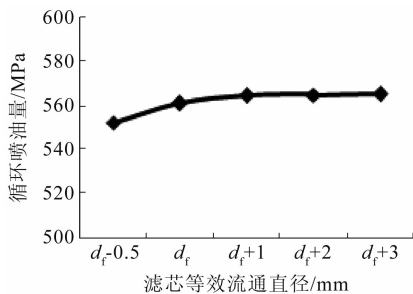


图 12 滤芯等效流通面积对循环喷油量的影响

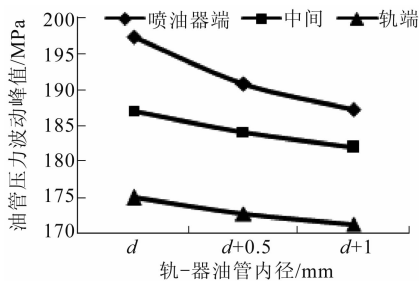


图 13 轨-器油管内径对油管压力波动峰值的影响

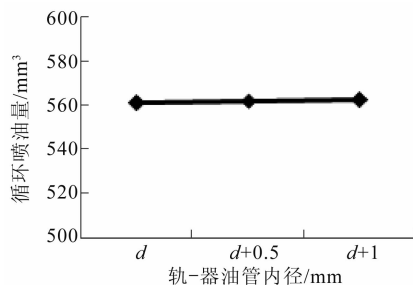


图 14 轨-器油管内径对循环喷油量的影响

3 压力波动试验验证

3.1 测试方案

通过仿真分析可知：限流阀前端阻尼孔直径、高压油管内径对压力波动影响显著。根据计算结果制定试验方案如下：

方案一：油管内径 d mm、限流阀前端阻尼孔 4 mm；

方案二：油管内径 d mm、限流阀前端阻尼孔 2 mm；

方案三：油管内径 $(d+1)$ mm、限流阀前端阻尼孔 4 mm；

方案四：油管内径 $(d+1)$ mm、限流阀前端阻尼孔 2 mm。

根据以上方案，在额定工况（轨压 160 MPa、油泵转速 2 862 r/min、喷油量 560 mm³）下，记录高压油管 A、B、C 三处压力曲线。

3.2 试验结果分析

3.2.1 限流阀前端阻尼孔

方案一、方案二，即限流阀前端阻尼孔直径分别为 4 mm、2 mm 时，轨-器油管 A、B、C 三处压力如图 15 所示；各采集点压力峰值如图 16 所示。可见：减小限流阀前端阻尼孔直径可有效改善轨-器油管内压力波动峰值，其中：B、C 两处压力波动峰值下降更显著。限流阀前端阻尼孔直径从 4 mm 减小到 2 mm，A 处压力波动峰值基本不变化，B 处压力波动峰值降低 10.94 MPa，C 处压力波动峰值降低 14.05 MPa。

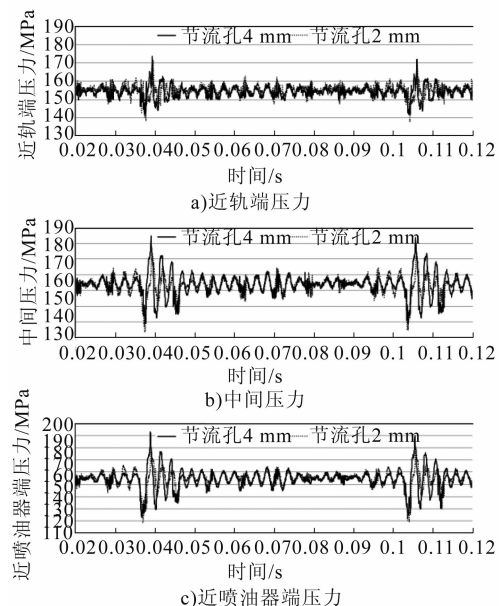


图 15 不同阻尼孔下轨-器油管压力对比

3.2.2 油管内径

方案一和方案三，即油管内径分别为 d mm、 $(d+1)$ mm 时，轨-器油管 A、B、C 三处压力峰值如图 17 所示。可见：增大油管内径有利于降低轨-器油管压力波动幅值。高压油管内径从 d mm 增大到 $(d+1)$ mm，A 处压力波动峰值降低 2.99

MPa, B处压力波动峰值降低6.66 MPa, C处压力波动峰值降低7.92 MPa, 因此, 增大高压油管内径可有效改善轨-器油管内压力波动, 但效果不如在限流阀前端设置阻尼孔明显。

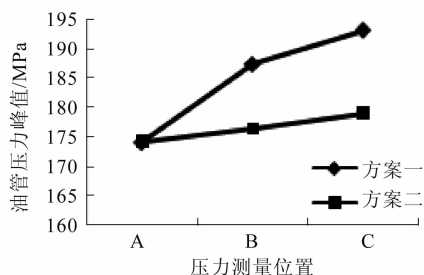


图16 不同阻尼孔直径下压力波动峰值

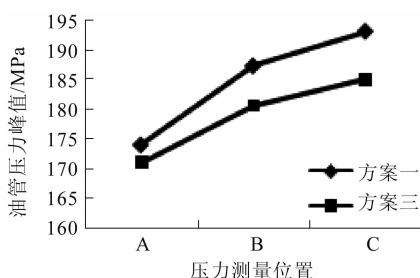


图17 不同油管内径下压力波动峰值

3.2.3 限流阀前端阻尼孔、油管内径

方案一、方案四, 即限流阀前端阻尼孔直径4 mm、油管内径 d mm, 和限流阀前端阻尼孔直径2 mm、油管内径 $(d+1)$ mm时, 轨-器油管A、B、C三处压力峰值如图18所示。可见: 增大油管内径并降低限流阀前端阻尼孔直径可显著降低轨-器油管压力波动幅值。限流阀前端阻尼孔直径4 mm、油管内径 d mm方案下, 油管内A、B、C三处压力波动峰值分别为174.08 MPa、187.29 MPa、193.05 MPa。将限流阀前端阻尼孔直径改为2 mm, 油管内径改为 $(d+1)$ mm后, 油管内A、B、C三处压力波动峰值分别为172.59 MPa、169.31 MPa、172.46 MPa, 最大压力波动峰值下降幅度超过20 MPa。

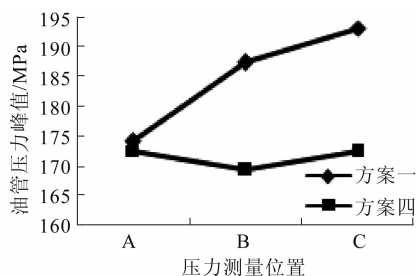


图18 不同阻尼孔直径、油管内径下压力波动峰值

四种试验方案油管压力波动的试验结果与仿真结果一致: 减小限流阀前端阻尼孔直径, 增大高压油管内径均可有效降低轨-器油管内压力波动幅值。

4 性能对比

优化方案不仅要降低轨-器油管压力峰值, 还须保证不影响共轨系统喷油特性、限流阀关闭油量等性能指标。仿真校核四种方案下高压共轨系统的喷油持续期、限流阀关闭油量, 如表1所示。从表1可看出: 四种方案下额定工况喷油持续期变化量不超过0.03 ms, 可见适当减小限流阀前端阻尼孔直径, 增大油管内径对喷油持续期影响不显著。而限流阀前端阻尼孔直径从4 mm减小到2 mm, 导致限流阀关闭油量增大约50 mm³; 油管内径从 d mm增大到 $(d+1)$ mm, 导致限流阀关闭油量增大约10 mm³。总体来看四种方案下限流阀关闭油量均在使用要求范围内, 可满足性能要求。

表1 不同方案下性能指标

序号	额定工况压力峰值/MPa	额定工况喷油量/mm ³	额定工况喷油持续期/ms	限流阀关闭油量/mm ³
方案一	193.0	561	2.76	894
方案二	179.0	558	2.79	943
方案三	185.1	560	2.75	904
方案四	172.5	559	2.78	958

综合考虑油管压力波动峰值、限流阀关闭油量及喷油持续期等性能, 优化方案定为: 限流阀前端布置直径为2 mm的阻尼孔、油管内径为 $(d+1)$ mm。

5 结论

(1) 轨-器连接高压油管中靠近喷油器端压力波动峰值压力最大。

(2) 在共轨管与喷油器之间布置阻尼孔, 选择内径较大的高压油管可显著降低轨器连接高压油管内的压力波动峰值。

(3) 在额定工况下, 优化前轨-器连接油管压力波动峰值为198.51 MPa, 在限流阀前端布置直径为2 mm的阻尼孔, 及将油管内径增大到 $(d+1)$ mm后, 轨-器油管压力波动峰值为172.46 MPa, 压力波动峰值降低了26.05 MPa, 循环喷油量和喷油持续期无明显变化, 限流阀关闭油量增大65 mm³, 满足性能要求。

(下转第28页)

科技, 2015, 32 (3): 219-223.

- [9] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computation Piscataway. NJ. IEEE, 1998: 69-73.
- [10] 王东风, 孟丽. 粒子群优化算法的性能分析和参数选择 [J]. 自动化学报, 2016, 42 (10): 1552-1561.
- [11] 汪杰, 刘丹, 何梦珂, 等. 基于 AGA-RBF 算法的柴油机故障诊断研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018 (6): 132-134.

(上接第 22 页)

参考文献

- [1] 王钧效, 陆家祥, 谭丕强, 等. 柴油机高压共轨喷油系统的发展动态 [J]. 柴油机, 2001, 23 (5): 1-11.
- [2] PAYRI R, GARCIA A, DOMENECH V, et al. An experimental study of gasoline effects on injection rate, momentum flux and spray characteristics using a common rail diesel injection system [J]. Fuel, 2012, 97: 390-399.
- [3] SUH H K, ROH H G, LEE C S. Spray and combustion characteristics of biodiesel/diesel blended fuel in a direct injection common rail diesel engine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 130 (3): 460-466.
- [4] 周磊, 杨昆, 欧阳光耀, 等. 超高压共轨系统特性及其压力波动消除研究 [J]. 海军工程大学学报, 2018, 30 (1): 36-39.
- [5] 苏海峰, 李龙, 冯国胜. 高压共轨系统水击压力波动 T 型谐振型滤波器 [J]. 柴油机, 2019, 41 (1): 36-39.
- [6] ANDREA E C, EZIO S, MICHELE M, et al. Experimental investigation of dynamics effects on multiple-injection common rail system performance [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130 (3): 235-247.
- [7] BARATTA M, ANDREA E C, FERRARI A. Hydraulic circuit design rules to remove the dependence of the injected fuel amount on dwell time in multiple-injection CR systems [J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130 (12): 320-327.
- [8] 孟育博, 李丕茂, 张幽彤, 等. 共轨系统压力波动和多次喷射油量偏差的抑制 [J]. 吉林大学学报, 2018, 48 (3): 760-766.
- [9] 周晓君, 刘高, 乔春德, 等. 压力波在粘性流体中的传播 [J]. 机械设计与制造, 2013 (11): 50-52.
- [10] 廉红珍. 液压波动激振机理及实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [11] 范立云, 王昊, 马修真, 等. 高压共轨系统预喷射对主喷射循环喷油量的影响研究 [J]. 内燃机工程, 2015, 36 (4): 90-98.
- [12] 吕晓辰. 高压共轨系统高压管路压力波动特性仿真研究及结构优化 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [13] PRINZ K, KEMMATMUELLER W, KUGI A. Mathematical modeling of a diesel common-rail system [J]. Mathematical and Computer Modeling of Dynamical System, 2015, 21 (4): 311-335.