

高压共轨系统水击压力波动 T 型谐振型滤波器

苏海峰¹, 李 龙², 冯国胜²

(1. 石家庄职业技术学院, 河北 石家庄 050081;

2. 石家庄铁道大学机械与车辆工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 针对柴油机高压共轨系统水击压力波动影响多次喷射喷油量的精确控制, 设计了适用于高压共轨系统的 T 型谐振型滤波器。台架试验结果表明: T 型谐振型滤波器对共轨系统水击压力波动和油量波动有明显的消振和滤波作用。水击压力波动最大衰减率达 17, 最大油量波动率降低 19%。同时, T 型谐振型滤波器具有结构简单、容积小、效率高的特点。

关键词: 高压共轨; 多次喷射; 水击压力波; T 型谐振型滤波器

中图分类号: TK423.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)01-0036-04

The T Resonance Filter for the Water Hammer Pressure Wave in High Pressure Common Rail Systems

Su Haifeng¹, Li Long², Feng Guosheng²

(1. Shijiazhuang Vocational Technology Institute, Hebei Shijiazhuang 050081;

2. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Hebei Shijiazhuang 050043)

Abstract: Water hammer pressure wave occurring in the high pressure common rail system would influence the accurate control of fuel volume of multi-injection. The T resonance filter for high pressure common rail systems were designed to solve this problem. Test results show that with the T resonance filter, the amplitude of water hammer pressure wave, as well as the fluctuation of injected fuel are significantly reduced, the maximum attenuation rate of water hammer pressure wave has reached 17, meanwhile, the maximum fluctuation rate is reduced by 19%. Besides these favorable results, the T resonance filter features simple structure, small size and high efficiency.

Key words: high pressure common rail; multi-injection; water hammer pressure wave; T resonance filter

0 引 言

柴油机高压共轨系统多次喷射中, 由于连续喷射的间歇时间短, 喷油器前次喷射针阀关闭产生的水击压力波会显著影响后次喷射的喷射过程, 造成后次喷射油量随两次喷射间歇时间波动。水击压力波动影响多次喷射喷油量的精确控制, 从而影响共轨柴油机的燃烧和排放性能^[1~3]。

孔板式消振器安装在共轨和高压管的连接处,

对压力波动起到了阻尼作用, 使主、预喷射的最大油量波动率降低, 但同时降低了喷射系统的流动效率, 使喷油量减小^[4]。容腔型滤波器的滤波效果随容腔的增大而增大, 但降低了发动机瞬态过程的动态特性, 且由于高压共轨柴油机的结构, 其安装布置具有一定难度^[5]。

T 型谐振型滤波器具有结构简单、容积小、压力损失小、衰减效果好的优点。本文根据高压共轨系统的结构特点设计了管式 T 型谐振型滤波器,

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-05-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51076014); 河北省自然科学基金 (E2016106018); 河北省工程机械动力与传动控制重点实验室资助项目 PTC1501。

作者简介: 苏海峰 (1971-), 男, 教授, 主要研究方向为高压共轨系统开发, 13503213275@163.com。

并进行滤波效果研究。

1 共轨系统 T 型谐振型滤波器设计

1.1 谐振型滤波器的阻抗

谐振型滤波器又称振荡型滤波器, 利用滤波器中流体的谐振来吸收管道系统中流体的流量波动和压力波动^[6]。根据液电模拟法, 谐振型滤波器加入管路后的等效电路如图 1 所示, 其中 Z_a 为滤波器阻抗, Z_s 为原管路系统的源阻抗。

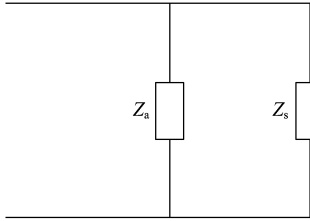


图 1 谐振型滤波器系统等效电路

由于谐振型滤波器一般为容性的, 因此, 无论将其串联或并联至管路中, 系统的阻抗为:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_s} \quad (1)$$

如果将滤波器设计成 $Z_a \ll Z_s$, 则有

$$Z \approx Z_a \quad (2)$$

在加入谐振型滤波器后, 系统阻抗将显著减小, 有利于抑制压力波动。从振动源来的流量和压力波能几乎全部透射入滤波器, 然后反射给振动源; 而在后续管路中, 振动源的波能没有透射进去, 因此不再出现波动波, 这就是谐振型滤波器的消振滤波原理。

1.2 T 型谐振型滤波器的谐振频率

透射系数 a_t 又称为传输系数。 a_t 越小, 表示波能向管路系统透射越少; $a_t = 0$, 表明波能全部进入滤波器, 没有向管路系统透射。由于平面波的强度与波动压力的平方成正比, 则加滤波器后的管道系统的透射系数 a_t 可表示为:

$$a_t = \frac{X^2 + Y^2}{\left(\frac{\rho_0 a}{2A} + X\right)^2 + Y^2} \quad (3)$$

式中: ρ_0 为流体密度; a 为声速; A 为管道的截面积; X 为滤波器阻抗 Z_a 的实部; Y 为滤波器阻抗 Z_a 的虚部。

根据消振和滤波元件在管路中的连接方式, 谐振型滤波器可分为串联式谐振型滤波器和分支式谐振型滤波器。本文根据共轨系统结构紧凑的特点, 采用了分支式谐振型滤波器中的 T 型滤波器。

当一个末端封闭的管道连接于主管道 (图 2a))

时, 其等效电路如图 2b), 称之为 T 型滤波器。

T 型滤波器的阻抗为:

$$Z_{aT} (j\omega) \approx -j \frac{\rho_0 a}{A_3} \cot \frac{\omega l_3}{a} \quad (4)$$

代入式 (3), 得 T 型滤波器透射系数 a_t

$$a_t = \frac{1}{1 + \left[\frac{A_3 \tan \frac{\omega l_3}{a}}{2A} \right]^2} \quad (5)$$

当分支管道 l_3 满足闭端管道的谐振条件时, 滤波效果最好, 即 $\tan \frac{\omega l_3}{a} \rightarrow \infty$,

$$l_3 = \frac{\pi a}{2\omega}, \frac{3\pi a}{2\omega}, \frac{5\pi a}{2\omega}, \frac{7\pi a}{2\omega} \dots \text{时}, a_t \rightarrow 0。$$

因为高压共轨系统中水击压力波动的周期 T , 在忽略喷油器内高压油道时, 可近似为:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{4l}{a} \quad (6)$$

式中: l 为喷油器和共轨之间的高压油管长度。由此计算出: 分支管道的长度应为原高压油管长度的单数倍。本文试验选取的分支管道与原高压油管相同。分支管道与原高压油管和喷油器用三通连接, 分支管道的另一端在排空气体后封闭。

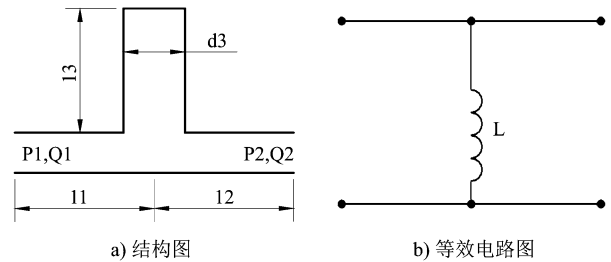


图 2 T 型滤波器

2 试验研究

在高压共轨喷油系统试验台上进行多次喷射油量波动试验研究, 如图 3 所示。试验台装备了 EFS IFR8420 单次喷射仪, 用于测量喷油率 Q ; Kistler4067 瞬态压力传感器测量喷油器入口压力 p 。喷油系统采用 Bosch 电磁式第二代共轨系统。喷油器高压供油管长 30 cm, 内径 1.8 mm。

2.1 单次喷射的油量

如图 4 所示为轨压 100 MPa 时加入 T 型滤波器前后单次喷射油量对比。可见: 加入 T 型滤波器后单次喷射油量与原系统单次喷射油量相比油量稍有降低, 降低幅度小于 5%。表明: 加入 T 型滤波器后对单次喷射油量的影响不大。

2.2 单次喷射的压力波动

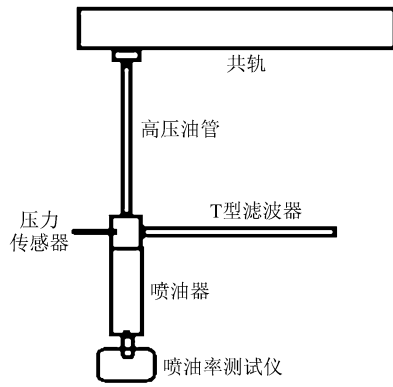


图3 高压共轨系统滤波器试验台

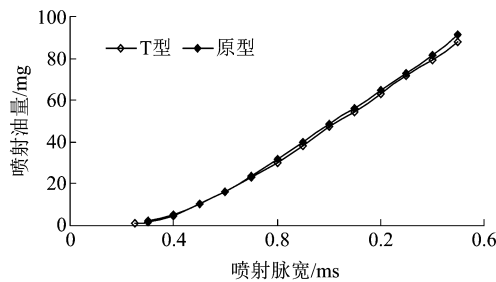


图4 单次喷射油量对比

图5显示了轨压100 MPa下，喷油脉宽ET分别为0.4、0.7、1.0、1.4 ms下加入T型滤波器后的单次喷射压力波动过程曲线和喷油率曲线，并与原系统单次喷射压力波动曲线的对比。可以发现以下特点：压力波动的振幅和周期都发生了明显的改变。由于加入T型滤波器改变了系统的结构，使得压力波动的周期由原系统的1.5 ms增大至2.1 ms。在加入T型滤波器后，除ET=1.0 ms（图5c）外，其他三种喷油脉宽时的单次喷射压力波动的振幅峰值明显降低。由于压力波动周期变大，针阀关闭发生压力波动共振现象的喷油脉宽由原来的0.7 ms增大到1.0 ms。因此，原系统的最大峰-峰值为43.2 MPa，发生在ET=0.7 ms时；加入T型滤波器后系统的最大峰-峰值为25.5 MPa，发生在ET=1.0 ms时。

图6显示了加入T型滤波器前后单次喷射压力波动峰-峰值随喷油脉宽的变化。在主要喷油脉宽范围，加入T型滤波器后的压力波动峰-峰值均明显低于原系统的压力波动的峰-峰值。

在高压共轨系统中管道系统的消振效果，即消除或抑制压力波动效果的评价，可以采用压力波动衰减率 K_a 来表示：

$$K_a = 201g \left| \frac{\Delta p_b}{\Delta p_a} \right| \quad (7)$$

式中： Δp_b 为采取消振措施前管内最大压力波动峰

-峰值； Δp_a 为采取消振措施后管内最大的压力波动峰-峰值。峰-峰值是压力波最高波峰和最低波谷的绝对值之和。

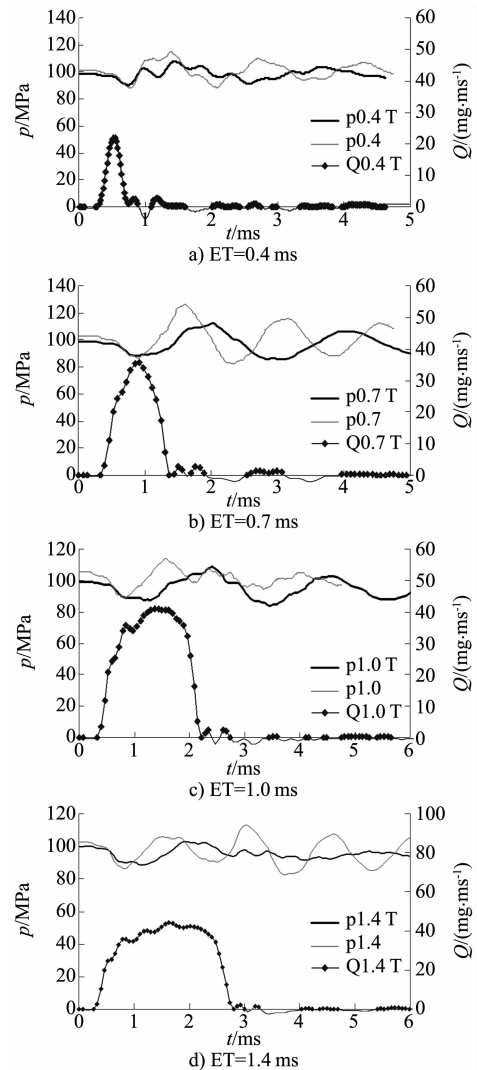


图5 单次喷射特性对比

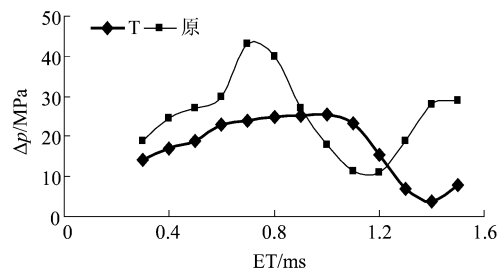


图6 加入T型滤波器前后的压力波动峰-峰值

图7显示了加入T型滤波器后的压力波动衰减率。可见：加入T型滤波器后，在脉宽0.3~0.8 ms内压力波动衰减率达到3~5；在脉宽1.3~1.5 ms内压力波动衰减率达到8~17，消振和滤波效果较好。在较窄的脉宽范围1.0~1.2 ms内的衰减率为负值，消振和滤波效果较差，但这种负面影

响可以通过与实际工况匹配, 优化油管长度来消除。

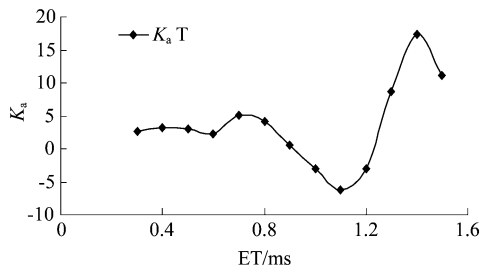


图 7 加入 T 型滤波器后的压力波动衰减率

2.3 多次喷射的油量波动

轨压 100 MPa 下, 主、预喷射 0.4 ms + 0.6 ms 油量波动试验结果如图 8a) 所示。可见: 加入 T 型滤波器后预喷油量基本不变, 主喷油量的平均值基本不变, 主喷油量波动周期变大, 波动振幅减小。图 8b) 显示了加入 T 型滤波器后主喷油量波动率 σ 从 -44% 降低至 -25.5%。可见加入 T 型滤波器后, 对主、预喷射油量波动有明显的减振作用。

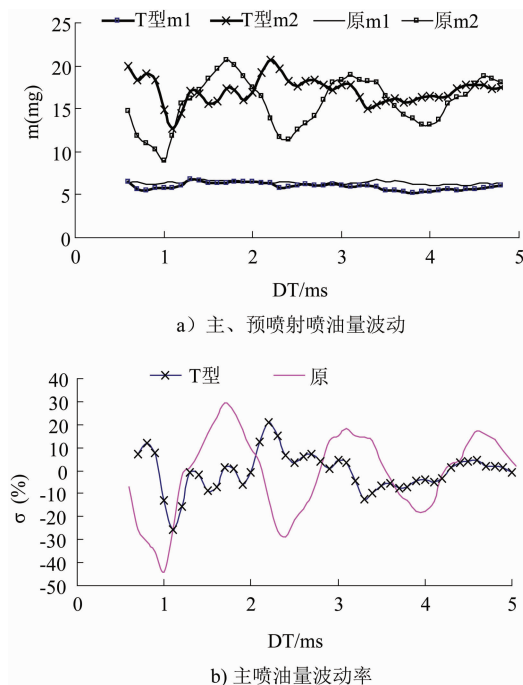


图 8 加入 T 型滤波器前后的主喷射油量波动率

3 结 论

(1) 加入 T 型谐振型滤波器后对单次喷射过程中的压力传播和喷油器特性产生影响, 单次喷射的喷油量变化微小。

(2) 加入 T 型谐振型滤波器对单次喷射的水击压力波动有明显的消振和滤波作用, 波动周期加大, 水击压力波动最大衰减率达 17。

(3) 加入 T 型谐振型滤波器后, 试验工况的最大油量波动率降低了 19%。可见 T 型谐振型滤波器对多次喷射油量波动有显著的减振作用, 有利于多次喷射油量的精确控制。

(4) T 型谐振型滤波器属于管型滤波器, 结构简单、容积小, 安装方便, 不须要对原共轨系统结构进行较大改动。因此, T 型谐振型滤波器是一种实用性较强的高压共轨系统滤波器。

参考文献

- [1] CATANIA A E, FERRARI A, MANNO M. Experimental Investigation of dynamic effects on multiple-injection common rail system performance [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2005, 130 (3): 460-466.
- [2] CATANIA A E, FERRARI A, MANNO M. Development and application of a complete multijet common-rail injection system mathematical model for hydrodynamics analysis and diagnostics [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2005, 130 (6): 181-192.
- [3] LEONHARD R, WARGA J, PAUER T, et al. Bosch 2000-bar common rail system for passenger cars and light duty vehicles [C]. 29. Internationales Wiener Motoren-symposium, 2008.
- [4] BARATTA M, CATANIA A E, FERRARI A. Hydraulic circuit design rules to remove the dependence of the injected fuel amount on dwell time in multijet CR systems [J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130 (12): 320-327.
- [5] 苏海峰, 张幽彤, 罗旭, 等. 高压共轨水击压力波动现象研究 [J]. 内燃机学报, 2011, 29 (2): 163-168.
- [6] 蔡亦钢. 流体传输管道动力学 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.