

柴油机电控喷油器瞬态响应分析及结构优化

张耀飞¹,李国祥¹,白书战^{1*},王会军²,刘本学²

1. 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 龙口龙泵柴油喷射高科有限公司, 山东 龙口 265018

摘要:为提高电控喷油器瞬态响应性能,应用BOOST Hydsim软件,基于结构动力学和流体力学建立某柴油机喷油器一维仿真模型,分析喷油器出油孔流通面积、控制活塞直径等结构参数对针阀响应速度的影响,提出喷油器的结构优化方案。仿真结果表明:增大喷油器出油孔流通面积、减小控制活塞直径,可以显著提高针阀升起和下落速度,改善喷油器瞬态响应特性;优化结构的喷油器瞬态响应时间缩短约17.5%。该研究可以为针阀结构动力学和喷孔内流体动力学耦合分析提供参考。

关键词:高压共轨;电控喷油器;针阀;仿真分析;结构优化

中图分类号:TK423.8

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)05-0008-08

引用格式:张耀飞,李国祥,白书战,等.柴油机电控喷油器瞬态响应分析及结构优化[J].内燃机与动力装置,2022,39(5):8-15.

ZHANG Yaofei, LI Guoxiang, BAI Shuzhan, et al. Transient response analysis and structural optimization of diesel electronically controlled injectors[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(5): 8-15.

0 引言

现阶段我国对发动机排放的要求越来越高,国六排放标准对排放的要求已经达到甚至超过欧洲排放标准。柴油机技术发展过程中两次重大的技术革新都与燃油系统有关,电控技术的应用被认为是柴油机技术发展的一大里程碑^[1]。高压共轨喷射为第3代时间-压力式柴油机电控燃油喷射系统,是实现柴油机国六排放标准的2条技术路线中不可或缺的关键一环。共轨系统的执行部件——电子喷油器的响应特性对提升燃油雾化性能有重要意义,随着对柴油机动力性和排放性能要求的不断提高,对喷油器在工作过程中的稳定性和可靠性也有更加严格的要求。喷油器主要由电磁阀的通电时间控制针阀升起调整喷油规律,因此可以通过改善针阀的响应速度提高喷油器的性能^[2]。

电子喷油器的响应特性受到多种因素的影响,通过改进喷油器结构可以有效缩短针阀启、闭时间,提高喷油器响应和动力学特性。同时,喷嘴几何参数应保证喷嘴流通能力在整个使用过程中不变,实现在轨压不变时喷油量不变^[3]。国内外学者针对电控喷油器结构参数对性能的影响开展了大量研究。林铁坚等^[4]设计了一种新型的液力平衡式电磁阀,研究了控制室结构参数对喷油器液力响应特性和喷油规律形状的影响,实现了对喷油规律形状的灵活控制;Luo等^[5]研究了多孔喷油器孔间燃油喷射率对柴油机性能的影响,结果表明,喷孔横截面积减小5%,燃料喷射率和循环燃料喷射量会增加3%~15%。

本文中在分析不同参数对针阀响应速度影响的基础上,优化喷油器结构参数以减小针阀在打开和落座的时间延迟,提高喷油器的动态响应特性,保证发动机工作稳定性和可靠性。

收稿日期:2022-07-06

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021CXGC010207)

第一作者简介:张耀飞(1998—),男,兰州人,硕士研究生,主要研究方向为柴油机燃油系统,E-mail:202014478@mail.sdu.edu.cn。

***通信作者简介:**白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发与可靠性技术及新能源汽车技术,E-mail:baishuzhan@sdu.edu.cn。

1 电控喷油器结构

喷油器的主要部件有电磁阀、控制阀、活塞以及针阀偶件等,喷油器结构如图1所示。高压燃油由共轨管输送,在喷油器内有2条燃油输送路线,一条通入控制活塞上方的控制室,另一条通入针阀顶部的蓄压腔内。电磁阀不通电时,控制室内的出油孔关闭,由于控制活塞的横截面积大于针阀锥形承压面的面积,再加上活塞弹簧的预紧力,针阀被紧紧地压在阀座面上;当电磁阀接收到控制信号而接通,出油孔逐渐开启,此时控制室内燃油的流量差逐渐减小,作用在活塞上的液压力减弱,针阀逐渐升起,燃油流入喷嘴压力室后经喷嘴喷出,形成燃油喷雾。当电磁阀断电后,电磁力减小,液压力不足以克服弹簧预紧力而使针阀重新落座,喷油结束。

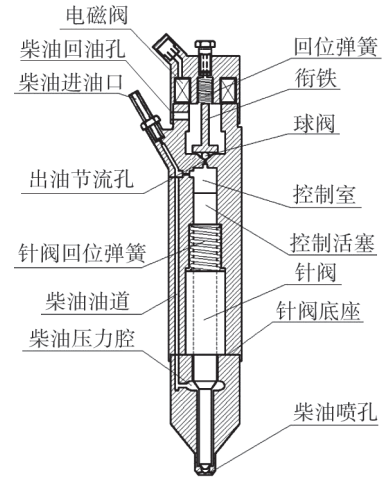


图1 喷油器结构

2 喷油器数学模型

2.1 流动模型

模拟计算中,假设燃油在高压油管内的流动是沿管路的一维非定常流动,流动的连续方程、动量方程和能量方程^[6-7]可以表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{fu|u|}{2D}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0, \quad (3)$$

式中: ρ 为燃油的密度, kg/m^3 ; x 为燃油在流动方向所处位置; u 为燃油沿流动方向的速度, m/s ; $|u|$ 为燃油流速的绝对值, m/s ; t 为时间, s ; c 为音速, m/s ; p 为管路压力, Pa ; f 为阻力因数; D 为管道液力直径, m 。

2.2 针阀的运动方程

针阀在启、闭过程中受到来自燃油的液压力以及针阀弹簧的弹簧力综合作用,分析针阀的受力情况(忽略摩擦力),可以得到针阀的运动方程^[8]:

$$m_N \frac{d^2 H_N}{dt^2} = (A_{Na} - A_{Nb}) p_{NV} + A_{Nb} p_{NI} - A_p p_{CV} - k_N (H_{N0} + H_N) - C_N \frac{dH_N}{dt}, \quad (4)$$

式中: m_N 为针阀运动质量, kg ; H_N 为针阀升程, m ; A_{Na} 为针阀体横截面积, mm^2 ; A_{Nb} 为针阀座面以下的投影面积, mm^2 ; p_{NV} 为喷油嘴盛油槽内的压力, Pa ; p_{NI} 为喷油器压力室内压力, Pa ; A_p 为控制活塞横截面积, mm^2 ; p_{CV} 为控制室内压力, Pa ; k_N 为针阀弹簧刚度, N/m ; H_{N0} 为针阀弹簧预变形量, m ; C_N 为针阀阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 。

2.3 控制腔临界压力

出油孔打开后,控制室内的压力发生改变,由于多个力的作用,针阀会开启或关闭,此时控制室内的压力称为控制室内的临界压力。喷油器针阀完全升起后,控制室内压力下降至某一稳定压力,称为稳定压力 p_s ,此时进油孔和出油孔流量差为0^[9],即:

$$A_i \sqrt{\frac{2(p_{cr} - p_s)}{\rho}} = A_o \sqrt{\frac{2p_s}{\rho}}, \quad (5)$$

式中: A_i 为进油孔有效流通面积, mm^2 ; A_o 为出油孔有效流通面积, mm^2 ; p_{cr} 为共轨压力, Pa 。

整理可得:

$$p_s = p_{cr} / (1 + (A_o/A_i)^2) \quad (6)$$

喷油器针阀弹簧预紧力一般为 30~50 N, 与较大的腔内压力相比可以忽略不计, 此时针阀开启时控制腔的临界压力

$$p_{e0} = \frac{(A_{Na} - A_{Nb}) p_{cr}}{A_p} \quad (7)$$

针阀开启时的临界条件是 $p_s < p_{e0}$, 代入式(6) (7)可得:

$$\left(\frac{A_o}{A_i}\right)^2 > \frac{A_p}{A_{Na} - A_{Nb}} - 1 \quad (8)$$

针阀关闭时控制腔内的临界压力

$$p_{cc} = \frac{A_{Na} p_s}{A_p} \quad (9)$$

针阀关闭时的临界条件为 $p_s > p_{cc}$, 代入式(6) (9)可得:

$$A_p > A_{Na} \quad (10)$$

综合以上分析可知, 影响喷油器响应特性的主要结构参数包括进、出油孔有效流通面积, 控制活塞横截面积, 针阀导向体横截面积。

3 喷油器响应特性分析

电控喷油器是高压共轨燃油系统中控制喷射规律的执行部件, 其响应速度直接影响柴油机的综合性能。一方面, 针阀迅速开启有利于前期多喷油; 另一方面, 针阀快速关闭有利于快速断油, 改善喷射后期因温度降低燃油过多造成的燃烧恶化^[10-11]。

3.1 仿真分析

利用 Hydsim 软件建立某二通阀电控喷油器的一维仿真模型, 如图 2 所示。

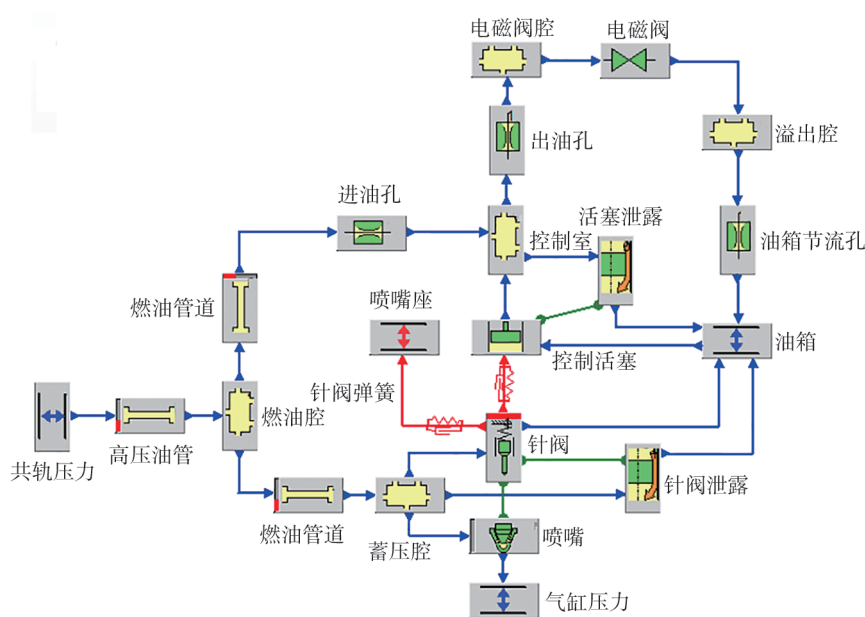


图 2 喷油器仿真模型

为了研究喷油器的响应特性, 定义描述针阀运动的 4 个响应时间如表 1 所示, 喷油器的主要参数如表 2 所示。

表1 喷油器针阀运动响应时间及定义

响应时间符号	含义
t_1	开启延迟,电磁阀开始打开到针阀开始打开所需要的时间
t_2	开启时间,针阀开始上升到针阀上升到最大升程所需要的时间
t_3	关闭延迟,电磁阀开始关闭到针阀开始关闭所需要的时间
t_4	关闭时间,针阀开始下降到针阀完全落座所需要的时间

表2 原型机喷油器主要仿真参数

针阀直径/mm	针阀密封长度/mm	针阀座圈直径/mm	针阀集中质量/g	针阀弹簧刚度/($N \cdot m^{-1}$)	进油孔直径/mm	出油孔直径/mm
4.00	11.00	1.70	2.6	34 900	0.24	0.27
高压油管直径/mm	针阀弹簧预紧力/N	针阀升程/mm	控制活塞质量/g	t_1 /ms	t_2 /ms	t_3 /ms
2.40	34	0.30	10.7	0.136	1.000	0.138
t_4 /ms	A_i/mm^2	A_o/mm^2	A_p/mm^2	A_{Ni}/mm^2		
1.800	0.046	0.057	14.52	12.57		

柴油机转速为 2000 r/min、轨压为 160 MPa 得到的针阀升程曲线仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知:经过 1.189 ms,喷油器针阀开始升起;经过 1.741 ms,针阀升程到达最大;经过 2.045 ms,针阀升程开始下降;经过 2.505 ms,喷油器针阀完全落座,喷油结束。

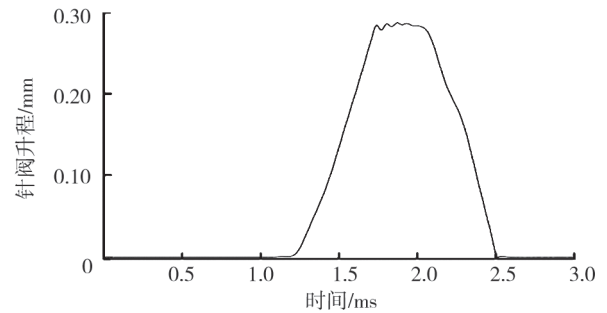
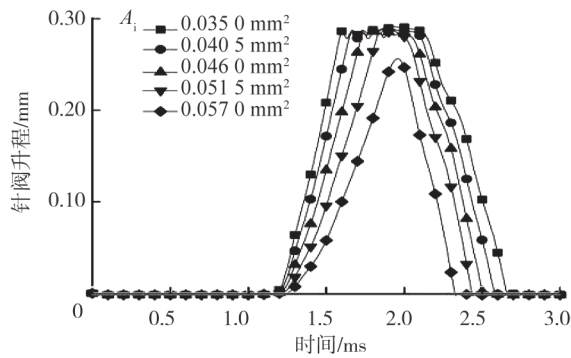


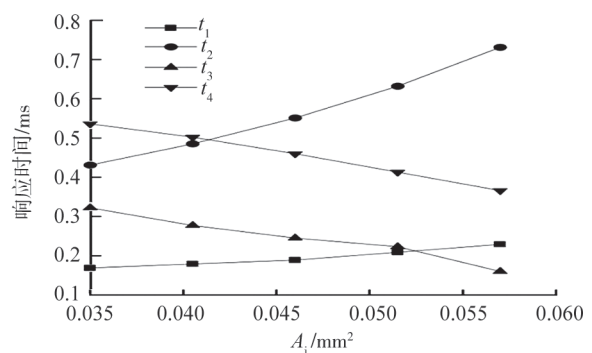
图3 柴油机转速为 2000 r/min、轨压为 160 MPa 时的针阀升程曲线

3.2 A_i 对电控喷油器响应特性的影响

为了确保针阀能够正常开启和关闭,进油孔直径应小于出油孔。其他参数不变,进油孔直径 d_i 分别为 0.211、0.227、0.240、0.256、0.269 mm,对应的 A_i 分别为 0.035 0、0.040 5、0.046 0、0.051 5、0.057 0 mm^2 。不同 A_i 时针阀升程曲线和响应时间如图 4 所示。



a) A_i 对针阀升程的影响



b) A_i 对喷油器响应时间的影响

图4 A_i 对针阀升程和喷油器响应时间的影响

由图 4a)可知:其他参数不变, A_i 增大,针阀开启速度变慢,开启时间推迟,落座时间提前,针阀在相同电流信号下开启持续期减小;当 A_i 增大到 0.057 0 mm^2 时,针阀已经无法升起。

由图 4b)可知: A_i 增加, t_1 、 t_2 增加, t_3 、 t_4 减小, A_i 对 t_2 的影响最大。因为当 A_i 增大时,控制室内进、出

油孔的流量差变小,压力下降变慢,针阀开启时间增加,但是压力建立速度加快,针阀落座速度加快^[12]。

3.3 A_o 对电控喷油器响应特性的影响

其他参数不变,出油孔的直径分别为 0.256、0.270、0.282、0.294、0.306 mm,对应的 A_o 分别为 0.051 5、0.057 0、0.062 5、0.068 0、0.073 5 mm^2 ,不同 A_o 时针阀升程曲线和响应时间如图 5 所示。

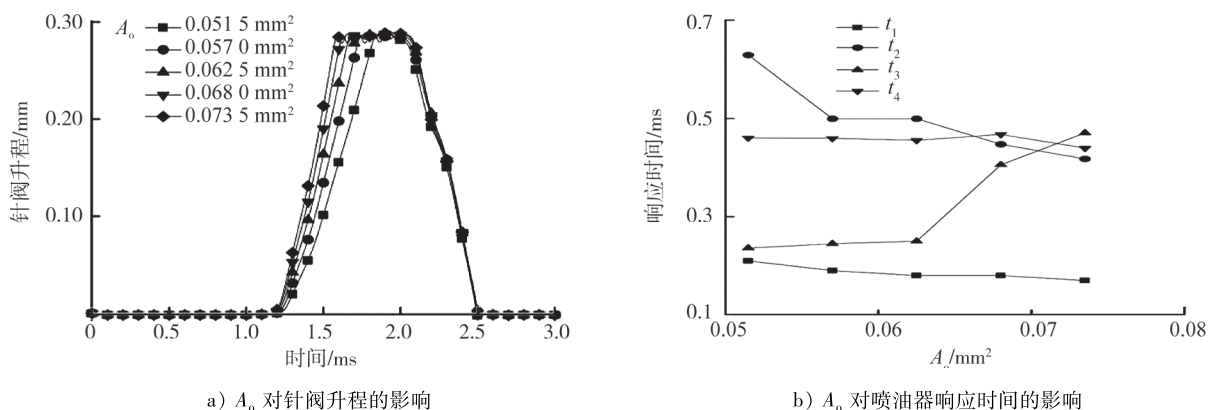


图 5 A_o 对针阀升程和响应时间的影响

由图 5a)可知: A_o 对针阀落座过程几乎没有影响; A_o 增加,针阀开启速度加快。这是因为出油孔增大,针阀升起时控制室内进、出油孔的流量差增大,压力下降加快,针阀升起速度加快,电磁阀在相同的开启时间内喷油持续期变长。由图 5b)可知: A_o 增大, t_1 和 t_4 改变很小, t_2 呈下降趋势, t_3 起初变化不大,但是当 A_o 增加到 0.068 0 mm^2 时, t_3 明显增大。原因是出油孔面积增加,流出的燃油流量增加,控制室压力下降变快, t_2 减小。 t_3 增大,针阀落座所需时间增加,因此 A_o 不能太大,否则会造成针阀落座过晚。由于电磁阀响应时间不超过 0.2 ms,电磁阀一旦关闭,不再经出油孔泄油,针阀的关闭过程不受影响,因此 A_o 对喷油器关闭没有影响。

3.4 A_p 对电控喷油器响应特性的影响

其他参数不变, A_p 分别为 13.20、13.85、14.52、15.21、15.90 mm^2 ,针阀升程曲线和响应时间如图 6 所示。

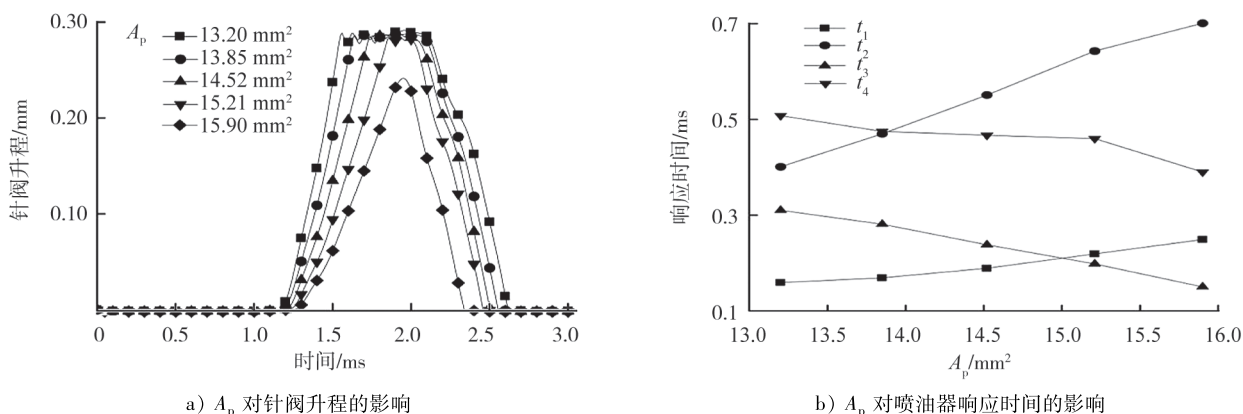


图 6 A_p 对针阀升程和喷油器响应时间的影响

由图 6a)可知: A_p 增加,针阀升起变慢,开启时间推迟,落座时间提前,当 $A_p = 15.90$ mm^2 时,针阀无法达到最大升程。这是由于 A_p 增大,活塞受力面积增加,控制室对活塞的液压力增大,导致针阀开启速度减小;在关闭过程中,由于控制室压力较蓄压腔更大,所以针阀落座速度加快。总体来说, A_p 增大,使针阀在相同的控制电流下开启持续期缩短,喷油量减少。

由图 6b)可知: t_2 受 A_p 的影响更大,增大 A_p 会延缓针阀升起,但是会使针阀落座提前; A_p 增大,控制腔需要经过更长时间才能降低到开启压力, t_1 增大; A_p 增大,活塞质量增大,针阀上升速度减小, t_2 增大;根据式(9), A_p 增大,针阀的临界关闭压力减小,控制室达到针阀关闭压力速度加快, t_3 减小; A_p 增大,针阀受到来自控制室的液压力增大,落座加快。总得来看, A_p 增大会导致针阀响应时间的增加^[13]。

3.5 A_{Na} 对喷油器响应特性的影响

其他参数不变, A_{Na} 分别为 11.34、11.95、12.57、13.20、13.85 mm^2 ,针阀升程曲线和响应时间如图 7 所示。

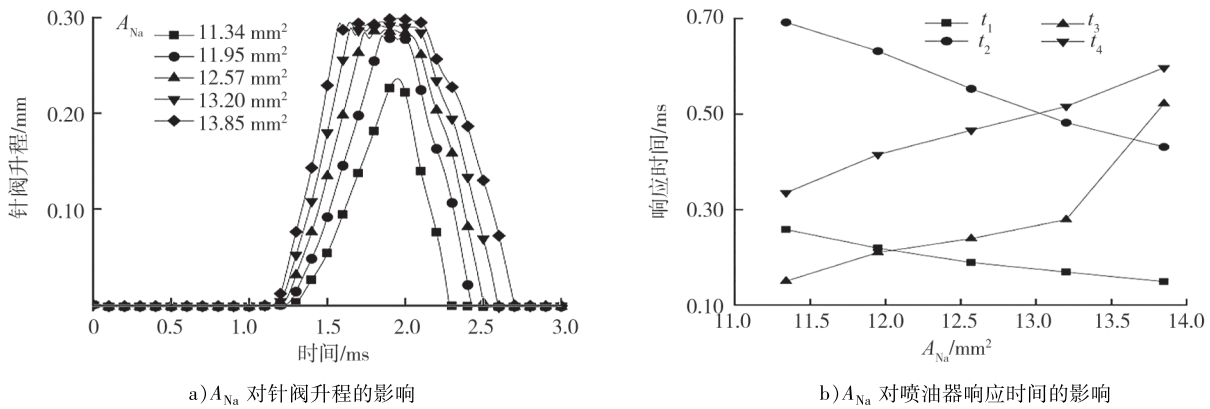


图 7 A_{Na} 对针阀升程和喷油器响应时间的影响

由图 7a)可知:保持喷油器其他参数不变, A_{Na} 增大,针阀开启时间提前,开启速度增加,关闭时间推迟,针阀在相同控制电流下开启持续期延长;当 $A_{Na} = 11.34 \text{ mm}^2$ 时,针阀不能达到最大升程,这是因为 A_{Na} 太小,作用在针阀下部的受力面积减小,针阀在开启过程中无法克服控制室内的燃油压力。

由图 7b)可知: A_{Na} 增大,针阀临界启、闭压力增加, t_1 减小;针阀完全升起过程中,针阀受到来自下部的液压力增加,开启加速度增大, t_2 减小;在关闭过程中,针阀落座需要经过更长时间, t_3 增加;在针阀落座过程中,由于 A_{Na} 增大,针阀受到来自下部液压力增加,针阀加速度减小, t_4 增加。

3.6 m_N 对喷油器响应特性的影响

其他参数不变, m_N 分别为 1.8、2.2、2.6、3.0、3.4 g,针阀升程曲线和响应时间如图 8 所示。

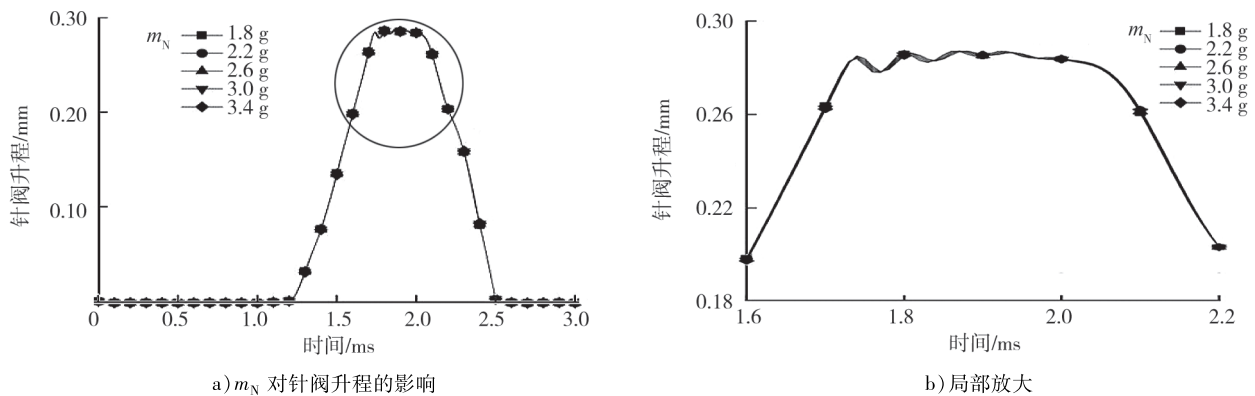


图 8 m_N 对喷油器响应特性的影响

由图 8 可知: m_N 增大,针阀开启和落座时间几乎不受影响,在最大升程处的振幅有微小变化,说明喷油器响应特性不随针阀体运动质量的改变而变化;针阀质量增大,针阀在完全升起后的升程振幅有较小的增大,但是最大升程的相对变化不超过 0.01%,这是由于针阀体质量增加,针阀在开启过程中的惯性增加^[14]。

4 结构优化

4.1 喷油器结构优化方案

选取针阀结构参数时,应保证使喷油器正常工作,而且能够使针阀迅速开启和快速落座。进油孔与出油孔间的横截面积决定控制室内的流量差,而流量差决定针阀的启、闭速度。

出油孔有效流通面积越大,燃油流出的流量越大,控制室压力下降越快,针阀开启越迅速,但会导致针阀落座速度减小;进油孔有效流通面积越大,针阀落座越迅速。因此为了提高针阀的关闭速度,应选择较大的进油孔径;为了提高针阀的开启速度,应提高 A_o/A_i [15]。对 A_o 、 A_i 的组合进行了 25 次仿真比较,仿真方案如表 3 所示。最终确定 $A_i = 0.046 \text{ mm}^2$, $A_o/A_i = 1.598$ 。

表 3 仿真方案

A_i/mm^2	0.035 0	0.040 5	0.046 0	0.051 5	0.057 0
A_o/mm^2	0.051 5	0.057 0	0.062 5	0.068 0	0.073 5

控制活塞直径增加导致喷油器压力响应时间增加,优化时应保证喷射中不会出现 2 次喷射,同时保证针阀的开启速度,控制活塞直径应为 4.0~4.5 mm。对喷油器进行轻量化处理,应保证喷油器使用可靠性的前提下使 A_{Na} 较小, $A_p/A_{Na} = 1.07 \sim 1.17$ 。经过对 A_p 和 A_{Na} 的匹配选择,最终确定针阀直径为 3.8 mm, $A_{Na} = 11.34 \text{ mm}^2$, 控制活塞直径为 4.1 mm, $A_p = 13.2 \text{ mm}^2$, $A_p/A_{Na} = 1.164$ 。

因此优化方案为:适当增大 A_o , 有效流通面积由 $0.057 0 \text{ mm}^2$ 增大到 $0.073 5 \text{ mm}^2$; 减小 A_p , 控制活塞的直径由 4.3 mm 减小为 4.1 mm; 减小 A_{Na} , 针阀直径由 4.0 mm 减小为 3.8 mm。

4.2 优化后的喷油器响应特性

综合改进前、后的针阀升程曲线如图 9 所示。由图 9 可知:针阀的开启速度大幅加快,经过 1.179 ms,针阀开始升起;经过 1.571 ms,针阀完全升起;针阀落座速度也有所提高,经过 2.064 ms,针阀开始关闭;经过 2.438 ms,针阀完全落座。实现了针阀迅速开启,改善了燃油混合质量;同时缩短了关闭时间,减少了喷射后期因为针阀关闭不及时造成的燃油雾化不良。

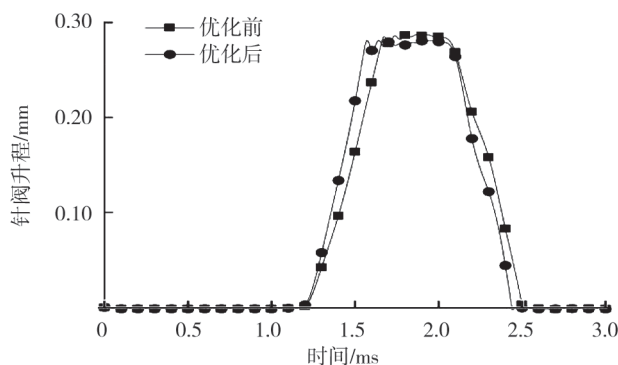


图 9 改进前、后针阀升程曲线

综合改进前、后喷油器针阀响应时间如表 4 所示。由表 4 可知,改进后的喷油器开启和关闭响应特性均有了显著改善,响应时间缩短约 17.5%。

表 4 改进前、后喷油器响应特性

状态	t_1	t_2	t_3	t_4	总时间
优化前	0.189	0.552	0.245	0.460	1.466
优化后	0.179	0.392	0.220	0.418	1.209

5 结论

1) 使用 Hydsim 软件建立了某电控喷油器一维仿真模型,对喷油器喷油特性进行了研究分析,提出了影响响应特性的结构参数。

2) 进油节流孔有效流通面积主要影响针阀的关闭速度,增大进油孔有效流通面积可以提高电控喷油器针阀关闭速度,有效改善喷射后期燃烧恶化;出油孔有效流通面积主要影响针阀的开启速度,增大出油

孔有效流通面积可以有效提高针阀的开启速度,提高喷射前期燃油雾化质量。

3)控制活塞直径对针阀的开启时间影响更大,增大活塞直径可以加快针阀开启速度、减慢针阀关闭速度,应合理匹配控制活塞横截面积和针阀导向体横截面积,活塞横截面积和针阀导向体横截面积的比为1.09~1.17时更加合适。

4)该电控喷油器结构参数优化后,其响应特性有了明显改善,响应时间比优化前缩短了17.5%,对改善燃油雾化性能和共轨系统喷射特性、提高发动机的动力和经济性有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘斌彬,李国岫,郑亚银. 柴油机高压共轨燃油喷射系统现状与发展趋势[J]. 内燃机,2006(2):1-3.
- [2] 孔令飞. 柴油机电控喷油器性能研究与响应优化[D]. 天津:天津理工大学,2019.
- [3] 李云强,王裕鹏,陈文森,等. 柴油机喷油的轨压降规律及一致性方法[J]. 内燃机学报,2022,40(3):263-269.
- [4] 林铁坚,汪洋,苏万华,等. 高压共轨喷油器设计参数对性能影响的研究[J]. 内燃机学报,2001,19(4):289-294.
- [5] LUO T, JIN T Y, SUN Y, et al. Numerical research on influence of structural parameters of common-rail injector on injection rate of each nozzle hole[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2022, 85: 102158.
- [6] 张锦杨,王钧效,陆家祥. 柴油机喷油系统工作过程模拟计算研究进展[J]. 山东内燃机,2003(1):17-22.
- [7] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [8] 杨威. 数值模拟在柴油机电控高压共轨喷射系统设计中的应用[D]. 上海:上海交通大学,2006.
- [9] 金江善. 柴油机高压共轨燃油喷射系统仿真研究[D]. 上海:中国舰船研究院(上海船用柴油机研究所),2004.
- [10] 陈川. 共轨喷油器响应特性的仿真分析及结构优化[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [11] 宫婷婷. WP12 高压共轨燃油系统的喷油特性研究[D]. 济南:山东大学,2015.
- [12] 王建平. 基于 HYDSIM 的高压共轨喷油系统的仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- [13] 何建元. 柴油机共轨式燃油系统及电控喷油器的仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [14] 孔祥栋,张振东,王小燕,等. GDI 喷油器针阀动力学特性研究[J]. 中国机械工程,2016,27(3):365-369.
- [15] 张明阳. 基于 HYDSIM 的高压共轨喷油器设计的仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.

Transient response analysis and structural optimization of diesel electronically controlled injectors

ZHANG Yaofei¹, LI Guoxiang¹, BAI Shuzhan^{1*}, WANG Huijun², LIU Benxue²

1. College of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Longkou Longbeng Diesel Injection High Technology Equipment Co., Ltd., Longkou 265018, China

Abstract: In order to improve the transient response performance of the electronically controlled injector, a one-dimensional simulation model of a diesel engine injector is established based on structural dynamics and fluid dynamics using BOOST Hydsim software, and the effects of structural parameters such as injector outlet hole flow area and control piston diameter on the needle valve response are analyzed, the structural optimization scheme of the injector is proposed. The simulation results show that increasing the flow area of the injector outlet hole and reducing the diameter of the control piston can significantly increase the lifting and dropping speed of the needle valve and improve the transient response characteristics of the injector. The transient response time of the injector with optimized structure is reduced by about 17.5%. This study can provide a reference for the coupling analysis of needle valve structural dynamics and fluid dynamics in the injector hole.

Keywords: high pressure common rail; electronically controlled injector; needle valve; simulation analysis; structural optimization

(责任编辑:刘丽君)