

大流量压电式喷油器设计与试验^{*}

王 军¹ 熊庆辉² 张幽彤²

(1. 装甲兵工程学院机械工程系, 北京 100072;

2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

【摘要】 分析了大功率柴油机喷油流量要求,提出了压电喷油器主要部件的设计参数。结合实际发动机,确定了大流量压电式喷油器的设计方案,计算了两种压电堆和液力放大机构的输出参数,确定了双排不同喷孔直径的布置方案;通过试验分析压电执行器的响应速度,确定了喷油器最小喷射间隔时间为 0.6 ms,经喷油器喷油效果验证表明:压电执行器、液力放大机构和双排喷孔的方案能满足大流量喷油的要求。

关键词: 柴油机 喷油器 压电晶体 设计 试验

中图分类号: TK421.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0010-05

Large Flow Injector Equipped with Piezoelectric Crystal

Wang Jun¹ Xiong Qinghui² Zhang Youtong²

(1. Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract

Demand on fuel injection quantity in heavy duty diesel engine was analyzed, and design method and sketch for piezoelectric injector were presented. Based on the structural size requirement of fuel injector, output character of two piezoelectricity was calculated and compared, response time of piezoelectricity was measured in given displacement, response character of hydraulic driven mechanism was measured by the experiment, dual row orifice arrange was made in nozzle couple. Combined the experimental data, injection fuel quantity for designed injector was measured and it showed that linearity of fuel injection quantity was good in some scope, minimal dwell time 0.6 ms of main injection and pre-injection was measured, and injection fuel effect for this injector was observed. Results show that this sketch of piezoelectric actuator, hydraulic amplifying driven and dual row orifice can meet the demand on large flow rate injection.

Key words Diesel engine, Fuel injector, Piezoelectric crystal, Design, Experiment

引言

高压共轨喷油系统以其控制自由度大,喷油参数调节灵活,易于多次喷射而有效地降低了柴油机排放,已被广泛应用在小功率柴油机上。随着大功率柴油机对电控喷油系统的需求增加,大流量、高响应的电控喷油器成为影响喷油系统应用的关键因素之一,电控喷油器涉及到电气执行器、液力放大转换

机构和针阀偶件等部件,现有的电控喷油器的结构参数已经不能满足大流量喷油要求。已有文献大部分是研究小功率柴油机小流量喷油器喷油特性以及快速性影响效果^[1~2],对大流量电控喷油器设计和确保快速性研究不多,本文针对大功率柴油机喷油需求,提出满足大流量和快速性要求的方案,进行压电执行器、位移放大机构和喷嘴喷孔设计,为后期电控喷油器的研制提供参考。

收稿日期: 2010-12-29 修回日期: 2011-07-04

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51076014)

作者简介: 王军,副教授,博士,主要从事柴油机电控研究, E-mail: joe4126@163.com

1 喷油要求

高速大功率车用柴油机缸径为 150 ~ 200 mm, 额定转速大于 1 500 r/min, 单缸输出功率在 35 kW 以上, 典型的大功率柴油机参数如表 1 所示, 其额定工况的循环喷油量在 180 ~ 400 mm³/cycle 之间, 大功率车用柴油机正朝高功率密度方向发展, 升功率从目前 20 kW/L 提高到 50 ~ 60 kW/L, 喷油目标要求是: 精确计算所需的喷油量, 以增加功率; 提高较高且适宜的喷油压力, 以改善燃烧, 降低油耗; 灵活准确地控制喷油定时, 降低排放; 优化喷油规律, 降低噪声。喷油过程是由电控喷油器完成的, 大喷油量和高速响应是电控喷油器满足大功率柴油机喷油需求的关键指标。

表 1 典型的大功率柴油机参数

Tab. 1 Parameters of typical large power diesel engine

参数	发动机型号		
	12V150ZL	6X170ZC	A12V190Z
额定转速/r·min ⁻¹	2 000	1 500	1 500
额定功率/kW	883	456	800
排量/L	38. 3	27. 24	73. 15
升功率/kW·L ⁻¹	22. 73	16. 74	10. 94
循环喷油量/mm ³ ·cycle ⁻¹	331. 98	199. 80	365. 30

不同用途柴油机, 喷油要求各不相同, 150 系列柴油机提高功率密度, 核心技术要求采用高压共轨喷油系统, 喷油压力为 135 MPa, 并实现多次喷射。由于 150 系列柴油机不组织进气涡流, 可燃混合气形成主要由喷油系统提供能量, 循环喷油量取决于喷射压力差、喷射持续时间和喷孔面积。当引入电控高压共轨喷油系统后, 可从两个方面提高循环喷油量: ①在喷油压力和喷油持续时间期一定的条件下, 增加喷孔面积, 为了获得良好的喷油雾化质量, 可减小喷孔直径而增加喷孔数以减小油滴尺寸, 使油束分布均匀, 形成均匀的油气混合气。大功率柴油机喷油器喷孔直径应在 0. 18 ~ 0. 25 mm 之间, 喷孔数可增加到 10 以上^[3]。②在喷油嘴结构和喷油持续时间一定的条件下, 通过提高喷油压力来提高喷油压力差。当喷油压力为 135 MPa 时, 150 系列柴油机额定工况循环喷油量为 421. 68 mm³/cycle, 当喷油压力为 145 MPa 时, 额定工况的喷循环油量为 542. 17 mm³/cycle^[4]。

大功率柴油机多次喷射可有效改善柴油机燃烧状况, 降低柴油机噪声和排放。多次喷射要求电控喷油器具有高速响应能力、较小的喷油间隔时间。目前电磁式喷油器响应时间为 1. 2 ~ 1. 8 ms^[5], 在满

足柴油机大喷油量需求的同时, 这一响应时间不能保证大功率柴油机持续喷油时间的要求。大功率柴油机最佳喷油持续时间在其额定转速下只有 2 ~ 3 ms, 电控喷油器喷油响应时间必须小于 1 ms, 才能保证合适的实际喷油时间和喷油时刻, 并在一个喷油持续时间内实现 3 ~ 5 次喷油。电执行器的高速响应是决定电控喷油器喷油动作快慢的关键因素, 压电执行器是目前提高喷油器响应速度的有效途径。

2 设计计算

压电式电控喷油器由多个部件组成, 其中执行器、液力机构和喷油嘴是喷油器的主要部件, 其型式和结构方案直接决定着喷油器的性能。

2.1 压电执行器

喷油器的压电执行器是利用压电陶瓷的逆压电效应, 在施加电压后, 压电执行器输出应变为

$$S = d_{33}E \tag{1}$$

式中 S ——压电晶体应变
 E ——电场强度, V/m
 d_{33} ——压电应变常数, m/V

压电晶体的应变 S 与电场强度呈线性关系, 压电执行器的压电陶瓷材料应变常数 d_{33} 为 (500 ~ 600) × 10⁻¹² m/V, 要产生 20 μm 位移, 需加 4 × 10⁴ V 的电压, 如采用多层结构的压电执行器, 可降低供电电压。压电执行器的位移量为多层小晶体应变量的叠加。

$$\Delta L = nd_{33}V \tag{2}$$

式中 ΔL ——位移 n ——层数
 V ——施加压电晶体上的电压

在无负载的情况下, 压电执行器的输出力 F 与位移 Δl 的关系为

$$F = K_T(\Delta l_0 - \Delta l) \tag{3}$$

式中 K_T ——压电晶体刚度, N/m
 Δl_0 ——压电晶体最大位移

在刚度为 K_s 的负载作用下, 压电执行器的输出位移 Δl_p 和输出力 F 分别为^[6]

$$\begin{cases} \Delta l_p = \frac{K_T \Delta l_0}{K_T + K_s} \\ F = K_s \Delta l_p = K_s \frac{K_T \Delta l_0}{K_T + K_s} \end{cases} \tag{4}$$

2.2 液力耦合位移放大机构

由于压电执行器的应变只有微米级, 而喷油器的针阀升程为毫米级, 所以需要通过放大驱动机构将应变放大, 常见的放大机构有液压直动式、杠杆间接式和多层晶体等型式^[7], 不同放大机构型式对应

的响应时间不同,采用直动式转换机构可以缩短液力机械迟滞时间。液压放大机构是通过封闭液压腔体两端活塞不同横截面积实现的,压电堆执行器驱动液压放大机构大活塞一端,在小活塞一端便形成放大的位移,液力放大机构的放大倍数 i 为

$$i = \frac{S_0}{S_1} = \frac{D_1^2}{d_1^2} \quad (5)$$

式中 S_0 ——大活塞面积 S_1 ——小活塞面积

D_1 ——大活塞直径 d_1 ——小活塞直径

由于压电执行器的输出力与有效横断面积成正比,空行程大小取决于压电执行器的有效长度,在小活塞端作用力 F_v 为^[6]

$$F_v = \left(\frac{X_0}{i} - \frac{X_v}{i^2} \right) \frac{K_T K_c}{K_T + K_c} \quad (6)$$

式中 X_0 ——执行器空行程

X_v ——阀行程 K_c ——放大机构刚度

控制阀端闭锁力 F_s 为^[6]

$$F_s = \frac{F_v}{i} \frac{K_c}{K_c + K_T} \quad (7)$$

2.3 喷嘴结构参数

当柴油机采用电控高压喷射系统后,所要求的进气涡流降低,可燃混合气的形成主要靠喷油嘴的雾化作用。在喷孔面积一定的条件下,采用小喷孔、多喷孔数,喷孔总面积及喷孔直径分别为

$$S_A = \frac{6 \times 10^{-3} n V_b}{\mu w \varphi} \quad (8)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 S_A}{N \pi}} \quad (9)$$

$$\text{其中 } w = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{1000 \rho_f}} \quad (10)$$

式中 w ——喷孔处平均流速, m/s

Δp ——喷孔前油压及气缸内气体压力差, Pa

ρ_f ——柴油密度, kg/m³

S_A ——喷油器总的喷孔面积, mm²

n ——转速, r/min μ ——流量系数

V_b ——每循环喷油量, mm³/cycle

φ ——喷油持续角, °CA N ——喷孔数目

3 设计实例

以某车用大功率柴油机为样机,技术参数为 12 缸水冷增压柴油机,缸径 150 mm,冲程 180 mm,单缸排量 3.23 L,额定转速 2000 r/min,目标升功率 55 kW/L,额定工况燃油消耗率 216 g/(kW·h)。

采用压电执行器、直动式转换机构、双排喷孔油嘴方案,要求满足大流量和高速响应。设计的压电式喷油器如图 1a 所示,由压电晶体堆、位移放大机

构、回位弹簧、节流孔、针阀偶件组成,其中位移放大机构如图 1b 所示,由大活塞、小活塞,复位弹簧、控制阀组成。

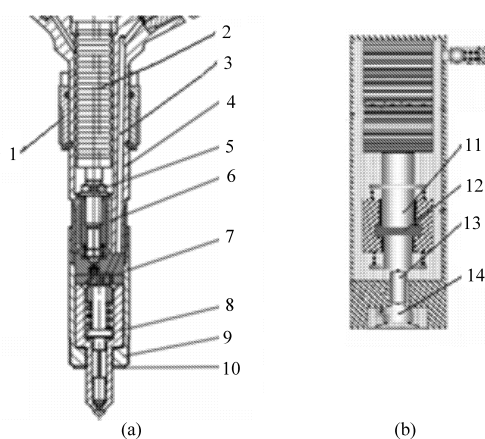


图 1 大流量压电式喷油器结构简图

Fig.1 Structure of large flow injector with piezoelectric crystal

(a) 喷油器组成 (b) 位移放大机构结构

1. 固定螺母 2. 压电堆 3. 进油道 4. 喷油器体 5. 压块

6. 位移放大机构 7. 控制阀 8. 针阀体 9. 锁紧螺母 10. 垫片

11. 大活塞 12. 耦合腔 13. 小活塞 14. 控制阀

当压电堆未充电时,控制阀关闭,由于作用在针阀上表面和下部锥面处的燃油压力相同,但上表面的有效作用面积大,所以此时针阀落座,处于关闭状态。当给压电堆充电时,压电堆变形,向下垂直伸长推动控制阀,使控制阀打开,控制室与低压部分相通从而导致其中的燃油压力下降,针阀在压力室中高压燃油的作用下克服针阀弹簧预紧力继而被抬起,开始喷射过程。当压电堆放电时,压电堆缩短,控制阀关闭,控制室压力升高,针阀落座,喷油过程结束。

当压电堆执行器输出位移 $\Delta L = 36 \mu\text{m}$,外加电压 $V = 150 \text{ V}$ 时,按式(2)、(3)计算,压电堆层数为 400、输出力为 450 N。根据压电喷油器安装要求和现有压电堆产品,遴选出两种压电堆, I 型、II 型结构尺寸(边长×边长×长度)分别为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 56 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$,标称位移 $58 \mu\text{m}$ 、 $38 \mu\text{m}$,标称输出力分别为 1500 N、950 N。

两种压电堆执行器在最大位移为 $40 \mu\text{m}$ 时的输出力: I 型为 475 N, II 型为 383 N。当输出位移相同时,输出力较大的压电执行器有利于提高放大机构的响应速度,所以选择 I 型压电堆作为研制喷油器的执行器。

液力耦合位移放大机构是压电喷油器关键部件之一,它不仅放大压电堆执行器输出位移,而且能补偿执行器磨损和由于压电材料温度变化以及迟滞特性而产生的非正常变形。当大、小活塞直径 D_1 、 d_1 分别为 6 mm、4.9 mm,放大倍数为 1.5 时, I 型压电

堆执行器输出位移为 40 μm , 输出力为 475 N, 耦合腔内柴油压缩后形成的压力达到 14 MPa 左右, 经转换作用于小活塞处的压力为 260 N 左右, 执行器及其放大机构参数如表 2 所示。

表 2 执行器及其放大机构结构参数

Tab.2 Structure parameters of actuator and amplifier mechanism

压电堆参数	数值	位移放大器参数	数值
层数	400	大活塞直径/mm	6.0
长×宽/mm×mm	7×7	小活塞直径/mm	4.9
总高度/mm	60	大活塞弹簧刚度/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$	1 080
驱动电压/V	150	小活塞弹簧刚度/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$	1.2
质量/g	4	耦合腔容积/ mm^3	30
刚度/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$	36 000	放大倍数	1.5

压电式喷油器喷油压力为 145 MPa, 针阀升程为 0.3 mm, 针阀直径为 5.0 mm, 按式 (8)、(9) 计算, 喷孔总面积为 0.642 mm^2 , 当喷油器喷孔数目取 16, 喷孔直径为 0.226 mm。

在喷油器针阀体圆周方向布置 16 个喷孔会使阀体喷孔轴线锥体强度显著下降, 故采用两排喷孔交错布置设计, 分成 8× ϕ 0.25 mm 和 8× ϕ 0.2 mm 两种喷孔方案, 分别布置在上、下两层, 上、下两层喷孔交错角度为 45°, 喷口轴线倾角为 80°。

4 喷油器试验

在完成电控喷油器设计和样件试制后, 需要测试喷油器的性能以检验设计效果, 为此, 通过测试电控喷油器的快速响应性、油量特性和油束状态, 评价喷油器设计^[8]。电控喷油器喷油特性测试在高压共轨喷油系统试验台上进行, 采用 Agilent 公司示波器, 采样频率为 500 MHz 和英国 Inov8 公司 Akribis II 单次喷射仪, 精确测量每次喷油量和喷油速率, 喷射压力、喷射次数、喷油脉宽等控制参数由高压共轨电控系统标定软件确定。

4.1 响应时间

在动态加载驱动电压时, 压电堆执行器的快速响应要求其输出位移与控制信号间的延迟时间尽量短。当峰值电压为 150 V, 充电峰值电流为 7 A, 控制脉宽 1.5 ms 时, I 型压电堆执行器在预紧状态下, 其输出位移信号不容易检测, 故采用直接检测耦合腔内压力代替输出位移信号, 将压力变化转换成位移信号, 压电执行器的输出位移与施加电流曲线如图 2 所示。从图中看出, 输出位移达到最大 53 μm , 响应时间在 0.15 ms 左右。

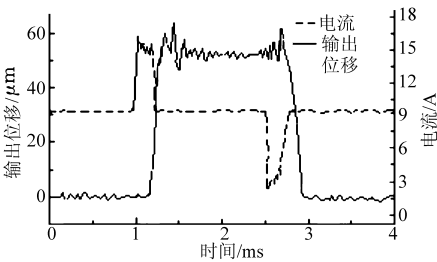


图 2 输出位移和电流随时间变化曲线

Fig.2 Curve change of output displacement and current with time

4.2 最小间隔时间

最小喷油间隔时间是衡量两次喷射的指标, 若前一次喷油过程结束, 针阀还没有完全落座的情况下, 后一次喷油就已开始喷射, 两次喷射就会形成连续喷射, 从而变成一次喷射^[9]。由于喷油器存在制造误差, 压电喷油器的喷射最小间隔, 以试验测量结果为准。以主预喷射为例, 主喷脉宽为 1 ms, 预喷脉宽为 0.2 ms, 喷油压力为 60 MPa, 当主预喷油控制信号取不同的间隔时间时, 预喷和主喷的喷油速率如图 3 所示。当压电喷油器主预喷油控制信号间隔为 0.8 ms 时, 实测主预喷油间隔为 0.6 ms; 当主预喷油间隔时间小于 0.6 ms 时, 预喷射和主喷已经合并成为一次喷射, 因此研制的压电喷油器最小喷油间隔时间为 0.6 ms。

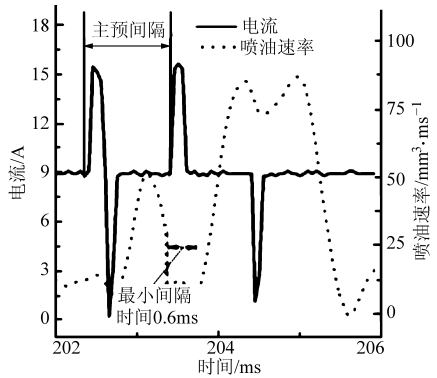


图 3 最小喷射间隔时间

Fig.3 Minimum injection interval time

4.3 喷油量特性

在共轨压力 40 ~ 140 MPa、步长 20 MPa 和喷油脉宽 0.3 ~ 2.5 ms 条件下, 压电式喷油器的油量特性如图 4 所示。从图中看出, 当共轨压力 140 MPa、喷油脉宽 2.5 ms 时, 喷油器最大喷油量达 360 mm^3 , 基本满足电控柴油机喷油量需求^[10]。从不同共轨压力下的喷油量曲线间隔程度来看, 共轨压力 80 ~ 140 MPa 的喷油量均匀性较好, 并且在喷油脉宽 1.0 ~ 2.0 ms 内喷油器喷油量的线性度较好。在共轨压力 40 ~ 80 MPa 下, 喷油器的喷油量变化幅度不一样, 油量线性度较差。

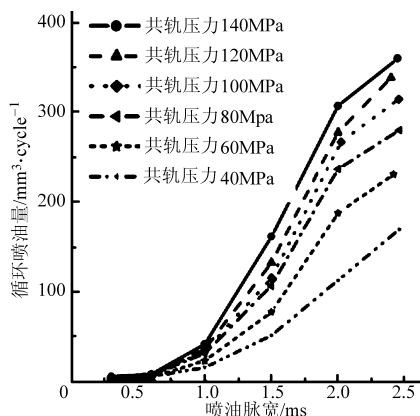


图4 压电式喷油器油量特性

Fig.4 Fuel quantity character of injector with piezoelectricity

4.4 喷雾试验

在喷油嘴座面上布置 $8 \times \phi 0.25 \text{ mm}$ 和 $8 \times \phi 0.2 \text{ mm}$ 两排喷孔,最大限度地利用了针阀体头部空间,达到了匹配的大功率柴油机油量需求,为验证两排喷孔喷出的油束分布和贯穿效果。在试验台架上进行了无背压条件下的喷油器双排喷孔喷雾效果试验,如图5所示。从图中看出两排喷孔油束中间有较清晰的界限,在圆周方向上相互之间没有干涉,在轴向方向上相邻油束碰撞效果不明显。如果在缸

内配以相应的气流,油束在缸内与压缩空气混合下,碰撞效果将会明显,起到油雾破碎的作用。

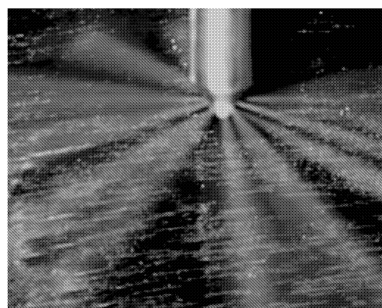


图5 双排喷孔初步喷雾效果

Fig.5 Preliminary spray effect of dual lines orifices

5 结束语

根据车用大功率柴油机喷油要求,提出了压电执行器、直动式转换机构、双排不同喷孔油嘴方案,使电控喷油器满足大喷油量和高速响应的要求。结合实际柴油机,计算了压电式喷油器基本参数,喷油器试验结果表明所设计的电控喷油器的喷油量局部线性度较好,最小喷射间隔时间为 0.6 ms 以及双排喷孔初步喷雾效果明显。

参考文献

- Bianchi G M, Falfar S. Numerical investigation of critical issues in multiple-injection strategy operated by a new C. R. fast-actuation solenoid injector [C]. SAE Paper 2005-01-1236, 2005.
- Barbeau B. Pilot injection timing effect on the main injection development and combustion in a DI diesel engine [C]. SAE Paper 2002-01-0501, 2002.
- 高宗英,朱建明. 柴油机燃料供给与调节 [M]. 北京:机械工业出版社, 2010:260~263.
- 张红光,刘兴华,杨青. 军用大功率柴油机电控高压喷油系统开发研究 [J]. 兵工学报, 2000, 21(1):64~67.
Zhang Hongguang, Liu Xinghua, Yang Qing. Development of electronic controlled injection system with high pressure common rail in army large power diesel engine [J]. Acta Armentarii, 2000, 21(1):64~67. (in Chinese)
- Gavin Dober. The impact of injection strategies on emissions reduction and power output of future diesel engines [C]. SAE Paper 2008-01-0941, 2008.
- Hummel K, Boecking F, Gro B J. Bosch 第三代轿车用压电直接控制式喷油器共轨喷油系统 [J]. 范明强,黄保康,译. 国外内燃机, 2005(1):25~29.
Hummel K, Boecking F, Gro B J. The third generation Bosch common rail injection system with direct controlled injector of piezoelectricity for car [J]. Foreign Internal Combustion Engine, 2005(1):25~29. (in Chinese)
- Mamoru Oki. 180 MPa piezo common rail system [C]. SAE Paper 2006-01-0274, 2006.
- Ganser M A. Common rail injector for 2000bar and beyond [C]. SAE Paper 2000-01-0706, 2000.
- 祝轲卿,王俊席. GD-1 电控柴油机主预喷时间间隔的影响 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(1):52~58.
Zhu Keqing, Wang Junxi. Study of time gap between pilot and main injections of GD-1 electronic controlled diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):52~58. (in Chinese)
- 苏海峰,张幽彤,王尚勇,等. 高压共轨喷油器喷射特性实验与仿真 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(1):22~27.
Su Haifeng, Zhang Youtong, Wang Shangyong, et al. Numerical-experimental investigation of injection characteristics of common rail high pressure injector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):22~27. (in Chinese)