

# 基于正交试验设计的柴油机爆发压力影响因素敏感性分析

赵强<sup>1,2</sup>, 孙楠楠<sup>1,2</sup>, 王晓艳<sup>1,2</sup>, 贾德民<sup>1,2</sup>, 石磊<sup>1,2</sup>, 王国华<sup>1,2</sup>

1. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为提高柴油机的可靠性和标定工作效率,以某柴油机为试验对象,基于正交试验设计方法,研究最低油耗工况下喷油压力、喷油时刻、废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)阀开度3个因素对发动机爆发压力的影响,并通过计算极差与方差分析影响因素的敏感性。结果表明:喷油压力由120 MPa增大到140 MPa,爆发压力增大1.04 MPa;提前角由上止点前曲轴转角 $8^{\circ}$ 增加到 $10^{\circ}$ ,爆发压力增大1.68 MPa;EGR阀开度由50%降低到30%,爆发压力增大0.55 MPa。3个因素对爆发压力的影响敏感性顺序为:喷油时刻、喷油压力、EGR阀开度。

**关键词:**正交试验设计方法;喷油压力;喷油时刻;EGR阀开度;爆发压力;因素敏感性

中图分类号:TK421

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)05-0039-05

**引用格式:**赵强,孙楠楠,王晓艳,等.基于正交试验设计的柴油机爆发压力影响因素敏感性分析[J].内燃机与动力装置,2024,41(5):39-43.

ZHAO Qiang, SUN Nannan, WANG Xiaoyan, et al. Analysis of the sensitivity of factors affecting the peak pressure of a diesel engine based on orthogonal experiment design method[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(5): 39-43.

## 0 引言

节能减排是当前内燃机研究的重要任务,热效率高、排放低是广大内燃机科研工作者和柴油机企业追求的目标<sup>[1]</sup>。爆发压力是表征柴油机性能的重要参数,提高柴油机设计爆发压力可以降低发动机油耗,近年来通过优化设计,中重型柴油机的设计爆发压力持续增大。目前,废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)技术、高压共轨技术、喷油规律优化等成熟技术已经应用于柴油机,这些技术影响发动机工质的混合和燃烧过程,决定发动机缸内压力变化,进而决定柴油机燃油经济性、排放性等。

针对影响柴油机缸内压力变化因素的研究较多。在喷油压力方面,仿真与试验研究表明,不同喷油压力导致发动机燃烧持续期不同,喷油压力过高导致发动机出现爆震<sup>[2-6]</sup>。在喷油规律方面,Roy<sup>[7]</sup>研究发现,喷油时刻推迟,发动机缸内压力降低,缸内温度随之降低;王站成等<sup>[8]</sup>研究了喷油时刻对喷雾着壁及雾化空间的影响,结果表明,喷油时刻影响喷雾相对于燃烧室空间位置的均匀性;陈晖等<sup>[9]</sup>基于试验研究了燃油喷射参数对柴油机燃烧特性的影响规律。在EGR技术方面,田径<sup>[10]</sup>通过研究EGR对缸内燃烧的影响,发现EGR能有效降低发动机新鲜进气量,降低缸内燃料的燃烧速度,减小爆发压力。

当前研究主要集中于不同供油、供气参数对发动机缸内燃烧的影响,爆发压力随喷油压力、喷油时刻、EGR率等参数变化的敏感性研究较少。本文中基于正交试验设计方法,以某柴油机为试验对象,研究喷油压力、喷油时刻、EGR阀开度3个因素对发动机爆发压力的敏感性规律,研究结果对保障发动机运行可靠性、提高发动机标定的工作效率有重要意义。

收稿日期:2023-11-24

基金项目:山东省重点研发计划项目(2021CXGC010812)

第一作者简介:赵强(1992—),男,山东潍坊人,工学硕士,工程师,主要研究方向为内燃机性能开发,E-mail:zhaoqiang03@weichai.com。

## 1 试验设计

### 1.1 试验发动机

某直喷柴油机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 发动机主要技术参数

| 缸径/mm | 缸数 | 行程/mm | 排量/L | 压缩比 | 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) |
|-------|----|-------|------|-----|-----------------------------|
| 130   | 6  | 162   | 12.9 | 22  | 1 600                       |

发动机运行工况为最低油耗工况(转速为 1 200 r/min、转矩为 2 200 N·m),测量位置为第 5 缸,气缸压力信号由缸压传感器获取,通过燃烧分析仪采集并发送至标定电脑,再通过标定电脑与测控电脑通信实现实时显示。试验发动机台架结构示意图如图 1 所示。

### 1.2 正交试验设计方法

正交试验设计方法是通过正交表设计影响目标参数的不同因素及该因素的不同水平值的组合进行研究,该方法可以有效地降低试验次数,节约成本,同时能有效保证影响参数及设计值的设计分散性、均衡性和正交性<sup>[11]</sup>。

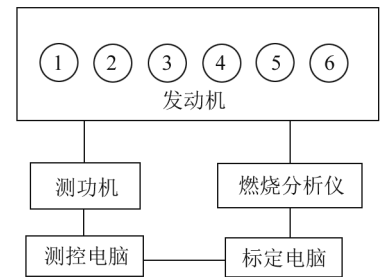


图 1 试验发动机台架结构示意图

## 2 爆发压力影响参数的敏感性分析

### 2.1 正交试验设计与结果统计

本次试验中选择喷油压力  $p$ 、喷油时刻  $\theta$ 、EGR 阀开度  $\alpha$  3 个因素,分析研究这 3 个因素对爆发压力的影响,每个因素选取 3 个水平设计值:1)喷油压力分别为 120、130、140 MPa;2)喷油时刻以主喷提前角表示,分别为上止点前(before top dead center, BTDC)曲轴转角 8°、9°、10°;3)试验过程中,通过调整 EGR 阀开度实现 EGR 率的变化,因此本文将 EGR 阀开度作为影响因素之一,选取 EGR 阀开度分别为 30%、40%、50%。

依照正交试验设计表将喷油压力、喷油时刻、EGR 阀开度的 3 个影响因素的不同设计值进行搭配组合,并据此进行试验,试验统计结果如表 2 所示。

表 2 正交试验统计结果

| 试验编号 | 喷油压力/MPa | 喷油时刻/(°) | EGR 阀开度/% | 爆发压力/MPa |
|------|----------|----------|-----------|----------|
| 1    | 120      | 8        | 30        | 25.46    |
| 2    | 120      | 9        | 40        | 26.02    |
| 3    | 120      | 10       | 50        | 26.59    |
| 4    | 130      | 8        | 50        | 25.46    |
| 5    | 130      | 9        | 30        | 26.86    |
| 6    | 130      | 10       | 40        | 27.35    |
| 7    | 140      | 8        | 40        | 26.19    |
| 8    | 140      | 9        | 50        | 26.81    |
| 9    | 140      | 10       | 30        | 28.19    |

## 2.2 正交试验结果分析

将表2统计结果中每一影响因素在同一水平设计值的试验结果的算术平均值称为该影响因素在该水平下的最终结果,每个影响因素对爆发压力的影响结果如表3所示。

表3 各影响因素对爆发压力的影响

| 爆发压力/MPa           |                    |                    |                  |                  |                   |               |               |               |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| $p=120\text{ MPa}$ | $p=130\text{ MPa}$ | $p=140\text{ MPa}$ | $\theta=8^\circ$ | $\theta=9^\circ$ | $\theta=10^\circ$ | $\alpha=30\%$ | $\alpha=40\%$ | $\alpha=50\%$ |
| 26.02              | 26.56              | 27.06              | 25.70            | 26.56            | 27.38             | 26.84         | 26.52         | 26.29         |

### 2.2.1 喷油压力对爆发压力的影响

喷油压力由120 MPa增大到140 MPa,爆发压力由26.02 MPa增大到27.06 MPa。主要原因为:喷油压力增大,减少了预混合燃烧的比例,缩短了燃烧持续期,热量释放更加集中,缸内压力增加。但爆发压力越大,发动机运行越粗暴,可靠性风险增大。

### 2.2.2 喷油时刻对爆发压力的影响

喷油提前角由BTDC曲轴转角 $8^\circ$ 增大到 $10^\circ$ ,爆发压力由25.70 MPa增加到27.38 MPa。这主要是由于随着喷油时刻提前,发动机缸内燃烧相位随之提前,缸内燃烧更接近等容燃烧,放热更加集中,燃烧放热率加快,缸内温度和缸内压力升高。爆发压力增大,发动机运行越粗暴,可靠性风险越高。

### 2.2.3 EGR 阀开度对爆发压力的影响

EGR 阀开度由50%减小到30%,爆发压力由26.29 MPa增加到26.84 MPa,这主要是由于随着EGR 阀开度减小,EGR 率降低,发动机新鲜进气量增加,缸内混合气燃烧速率增加,缸内压力增加。爆发压力越高,发动机运行越粗暴,发动机可靠性风险提高。

## 2.3 极差方法分析影响因素敏感性

极差分析方法是表征不同影响因素的设计值变化时目标参数的变化幅度,极差值越大表明该影响因素对试验指标的影响越明显,敏感性越强<sup>[9]</sup>。计算得到的3个因素对爆发压力影响的极差分析如表4所示,表中 $r_i$ 为不同影响因素在同一水平下的爆发压力的平均值, $i=1,2,3$ ;极差为同一因素 $r_i$ 最大值与最小值的差。

表4 3个影响因素对爆发压力影响的极差分析

| 影响因素    | $r_1/\text{MPa}$ | $r_2/\text{MPa}$ | $r_3/\text{MPa}$ | 极差/MPa  |
|---------|------------------|------------------|------------------|---------|
| 喷油压力    | 26.023 3         | 26.556 7         | 27.063 3         | 1.040 0 |
| 喷油时刻    | 25.703 3         | 26.563 3         | 27.376 7         | 1.673 3 |
| EGR 阀开度 | 26.836 7         | 26.520 0         | 26.286 7         | 0.550 0 |

由表4可知:喷油压力、喷油时刻、EGR 阀开度的极差分别为1.040 0、1.673 3、0.550 0,即这3个因素对爆发压力影响程度由大到小的顺序为:喷油时刻、喷油压力、EGR 阀开度。

## 2.4 方差方法分析影响因素敏感性

方差分析方法通过构建 $F$ 统计量及进行 $F$ 检验,表征不同影响因素对目标参数影响的显著性程度<sup>[12]</sup>。 $F$ 统计量是统计学中用于比较2个或更多样本方差之间差异是否显著的统计量; $F$ 检验是在零假设之下,统计值服从 $F$ 分布的检验,通常用来分析使用超过1个参数的统计模型,判断该模型中的全部或部分参数是否适合用来估计母体。方差分析法的具体分析步骤如下。

1) 计算正交设计结果的总偏差平方和。总偏差平方和

$$S_T = Q_T - p, \quad (1)$$

式中: $Q_T$ 为 $n$ 次正交试验的爆发压力二次方的和, $Q_T = \sum_{k=1}^n X_k^2$ ,其中, $k$ 为试验编号, $X_k$ 为第 $k$ 次试验的

结果,本文中爆发压力; $p$ 为 $n$ 次试验爆发压力和的二次方的均值, $p = \frac{1}{n} \left( \sum_{k=1}^n X_k \right)^2$ 。

将 $S_T$ 分解成各因素的偏差平方和与误差的偏差平方和两类,

$$S_T = S_{ele} + S_{err} = S_{inj} + S_{inj} + S_{EGR} + S_{err}, \quad (2)$$

式中: $S_{ele}$ 为每个因素的偏差平方和, $S_{err}$ 为误差的偏差平方和, $S_{inj}$ 、 $S_{inj}$ 、 $S_{EGR}$ 分别为因素喷油压力、喷油时刻、EGR阀开度对应的爆发压力的偏差平方和。

喷油压力的偏差平方和

$$S_{inj} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{n_a} K_i^2 - p, \quad (3)$$

式中: $K_i$ 为不同影响因素在同一水平下的爆发压力之和, $a$ 为每个水平的试验次数, $n_a$ 为因数的水平数。

用同样的方法可以计算出喷油时刻、EGR阀开度的偏差平方和 $S_{inj}$ 、 $S_{EGR}$ 。

2)计算总自由度 $f_T$ 、各因素的自由度 $f_{ele}$ 以及试验误差的自由度 $f_{err}$ ,计算式为:

$$f_T = n - 1, \quad (4)$$

$$f_{ele} = n_a - 1, \quad (5)$$

$$f_{err} = f_T - f_{ele}. \quad (6)$$

3)计算各因素的均方 $S_{Mele}$ 与试验误差的均方 $S_{Merr}$ :

$$S_{Mele} = S_{ele} / f_{ele}, \quad (7)$$

$$S_{Merr} = S_{err} / f_{err}. \quad (8)$$

4)构造各因素统计量 $F_{ele}$ , $F_{ele}$ 反映各个因素对试验结果的影响程度,计算式为:

$$F_{ele} = S_{Mele} / S_{Merr}. \quad (9)$$

5)对各因素进行 $F_{ele}$ 检验,分析其显著性。根据检验水平,从 $F$ 分布表中查出临界值,将按照式(1)~(9)计算的各因素 $F_{ele}$ 与该临界值比较,若各因素的 $F_{ele}$ 大于临界值,说明该因素对试验结果的影响显著,两者差别越大说明显著性越大。

若 $F_{ele} \geq f_{0.01}(f_{ele}, f_{err})$ ,称该因素的影响是高度显著的;若 $F_{ele} < f_{0.01}(f_{ele}, f_{err})$ 但 $F_{ele} \geq f_{0.05}(f_{ele}, f_{err})$ ,称该因素的影响是显著的;若 $F_{ele} < f_{0.05}(f_{ele}, f_{err})$ ,称该因素的影响是不显著的;式中,0.01和0.05为 $F$ 分布的分布临界值。

综上,将上面方差分析数据与计算结果整理,结果如表5所示,表中自由度为每个因素样本数减1。

由表5可知:喷油压力、喷油时刻、EGR阀开度3个因素的偏差平方和分别是1.622 756、4.201 156、0.457 222;3个因素中喷油时刻的统计量最高,喷油压力的统计量次之,EGR阀开度的统计量最低。

查分布表可知, $f_{0.05}(2, 2) = 19$ , $f_{0.01}(2, 2) = 99$ 。三者统计量均远大于以上两个值,表明该3个因素对爆发压力的影响均非常显著。根据3个因素的统计量的大小顺序可以得出3个因素对爆发压力影响的主次顺序为:喷油时刻、喷油压力、EGR阀开度,这也验证了上一节极差法分析出的结论。

### 3 结论

基于正交试验设计方法,以某款柴油机为试验对象,研究了喷油压力、喷油时刻、EGR阀开度3个因素对发动机爆发压力的敏感性规律,得出以下结论。

1)喷油压力由120 MPa增加到140 MPa,爆发压力增加了1.04 MPa;提前角由上止点前曲轴转角 $8^\circ$

表5 方差分析结果

| 因素      | 偏差平方和     | 自由度 | F值        |
|---------|-----------|-----|-----------|
| 喷油压力    | 1.622 756 | 2   | 3 843.368 |
| 喷油时刻    | 4.201 156 | 2   | 9 950.105 |
| EGR 阀开度 | 0.457 222 | 2   | 1 082.895 |
| 误差      | 0.000 422 | 2   |           |
| 总和      | 6.281 556 | 8   |           |

增大到  $10^\circ$ , 爆发压力增加了 1.68 MPa; EGR 阀开度由 50% 减小到 30%, 爆发压力增加了 0.55 MPa。

2) 利用计算极差与方差的方法分析目标参数的影响因素敏感性, 得出喷油时刻、喷油压力、EGR 阀开度 3 个因素对爆发压力的影响敏感性由大到小的顺序为: 喷油时刻、喷油压力、EGR 阀开度。

3) 明确喷油时刻、喷油压力、EGR 阀开度 3 个因素对爆发压力的影响及敏感性后, 可以根据影响因素的主次顺序更有针对性地调整发动机燃烧参数, 提高发动机运行的经济性和可靠性, 同时对提高发动机标定工作效率具有重要价值。

#### 参考文献:

- [1] 孟庆宇, 孟繁臣, 刘东航, 等. 高爆发压力下中重型柴油机气缸密封性能研究[C]//中国汽车工程学会. 面向未来的汽车与交通: 中国汽车工程学会年会论文集精选, 2013-11-26. 长春: 中国第一汽车集团股份有限公司技术中心, 2013: 30-35.
- [2] 谭靖宇, 石秀勇, 陈泓, 等. 燃油喷射参数对高压共轨柴油机性能的影响[J]. 上海汽车, 2012(3): 20-25.
- [3] 马毅, 崔连波, 宫宝利, 等. 喷油压力对柴油机瞬变性能的影响研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(6): 37-39.
- [4] 杜宪峰, 闫鹏斌, 严伟, 等. 喷油压力对柴油机燃烧及排放的影响[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(9): 129-134.
- [5] 潘军如, 施祥. 轨压对高压共轨发动机性能影响的仿真与试验[J]. 内燃机与动力装置, 2011(2): 1-3.
- [6] 马勇, 解亮, 南出勇. 高轨压燃烧系统对车用柴油机性能及排放的影响研究[J]. 汽车技术, 2020(1): 44-47.
- [7] ROY M M. Effect of fuel injection timing and injection pressure on combustion and odorous emissions in DI diesel engines [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2009, 131(3): 790-796.
- [8] 王站成, 杜慧勇, 吴健, 等. 喷油时刻及压力对燃油喷雾碰壁影响的试验研究[J]. 车用发动机, 2014(1): 90-92.
- [9] 陈晖, 黄豪中, 黄荣, 等. PODE 掺混和喷油参数对柴油机燃烧排放特性影响[J]. 内燃机学报, 2019, 37(1): 9-16.
- [10] 田径. 基于 EGR 耦合多段喷射实现超低排放研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [11] 葛长景. 船用柴油机气缸盖多场耦合仿真及参数敏感性分析[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2020.
- [12] 杨树彬, 赵俊生, 张忠伟, 等. 基于正交试验的大功率柴油机凸轮型线设计[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 221-223.

## Analysis of the sensitivity of factors affecting the peak pressure of a diesel engine based on orthogonal experiment design method

ZHAO Qiang<sup>1,2</sup>, SUN Nannan<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoyan<sup>1,2</sup>, JIA Demin<sup>1,2</sup>,  
SHI Lei<sup>1,2</sup>, WANG Guohua<sup>1,2</sup>

1. National Key Laboratory of Internal Combustion Engines and Power Systems, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

**Abstract:** In order to improve the reliability and calibration efficiency of diesel engines, a certain diesel engine is taken as the experimental object, based on the orthogonal test design method, the effects of injection pressure, injection timing, and exhaust gas recirculation (EGR) valve opening on engine peak pressure under the lowest fuel consumption condition are studied, and the sensitivity of the influencing factors is calculated by range and variance analysis. The results shows that as the injection pressure increases from 120 MPa to 140 MPa, the peak pressure increases by 1.04 MPa. The advance angle increases from  $8^\circ$  to  $10^\circ$  before the top dead center, and the explosion pressure increases by 1.68 MPa. The opening of the EGR valve decreases from 50% to 30%, and the peak pressure increases by 0.55 MPa. The sensitivity order of the three factors affecting peak pressure is: injection timing, injection pressure, EGR valve opening.

**Keywords:** orthogonal test design method; injection pressure; injection time; EGR valve opening; peak pressure; factor sensitivity

(责任编辑: 刘丽君)