

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.04.007

# 柴油机燃烧噪声增压影响机理试验分析\*

李兆文 舒歌群 卫海桥 梁兴雨 张 祚

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室,天津 300072)

**【摘要】** 研究了直喷式柴油机增压对燃烧噪声的影响机理。通过测量稳态和恒转矩增速瞬态工况增压前后影响燃烧噪声的参数,得出增压前后柴油机燃烧噪声的变化规律。从燃烧室壁面温度、气体动力载荷和压力高频振荡等方面对试验结果进行分析。结果表明:增压后燃烧噪声降低,增压对稳态工况燃烧噪声的降低比对恒转矩增速瞬态工况更明显,增压在中速中负荷工况下,对燃烧噪声的控制效果较好。

**关键词:** 直喷式柴油机 燃烧 噪声 增压条件 试验

**中图分类号:** TK421.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0031-05

## Effect of Turbocharged Condition on Combustion Noise of Diesel Engine

Li Zhaowen Shu Gequn Wei Haiqiao Liang Xingyu Zhang Zuo

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

### Abstract

This paper studied the influencing mechanism on combustion noise in DI-diesel engines for turbocharged conditions. By measuring parameters of influencing combustion noise between natural aspirated and turbocharged diesel engine in constant torque and increasing speed transient and steady conditions, the change law of combustion noise in diesel engines was clarified. The testing result was thoroughly analyzed from the point of the combustion chamber's wall temperature, aerodynamic load and high-frequency oscillation of combustion pressure. The result showed that the combustion noise of DI-diesel with turbocharger is reduced, and the reduction under turbocharged condition in steady condition is more obvious than that in constant torque and increasing speed transient condition, the effect of turbocharged condition on combustion noise is better in intermediate speed and middle load.

**Key words** DI-diesel engine, Combustion, Noise, Turbocharged condition, Experiment

### 引言

在汽车的发动机中,柴油机的燃烧噪声在总噪声中占有很大的比例,因此,国内外对柴油机燃烧噪声从影响机理到实验分析等做了很多的工作。在以往的研究中<sup>[1-6]</sup>,人们已经总结出,气体动力载荷和缸内压力高频振荡是决定燃烧噪声的两个直接因素,控制气缸中的压力升高率( $dp/d\varphi$ )和缸内压力高频振荡可以显著降低燃烧噪声。增压可使进入气

缸的空气充量密度增加,使压缩终了时气缸内的温度和压力增高,改善混合气体的着火条件,使预混合燃烧压力升高率降低及缸内压力高频振荡减弱,从而使柴油机燃烧噪声减小<sup>[7]</sup>。本文在以往研究内燃机燃烧噪声的基础上,对直喷式柴油机在增压前后稳态和恒转矩增速瞬态工况下燃烧噪声的差异做进一步研究,总结出增压对直喷式柴油机燃烧噪声的影响规律。

收稿日期:2008-11-13 修回日期:2009-02-13

\* 国家自然科学基金资助项目(50706032)和天津市自然科学基金资助项目(07JCYBJC03700)

作者简介:李兆文,博士生,主要从事内燃机振动噪声控制研究,E-mail: lizhaowen1981@163.com

通讯作者:卫海桥,副教授,主要从事内燃机振动噪声控制研究,E-mail: whq@tju.edu.cn

## 1 燃烧噪声试验

### 1.1 试验对象和仪器设备

以四冲程、四缸直喷式柴油机(4100QBZL-2型)作为试验研究对象,拆除增压器和安装增压器进行增压对燃烧噪声影响的试验研究。试验在AVL动态测功机上进行,该电力动态测功机能满足试验对瞬态工况精确控制的要求。实验室墙壁进行了消声处理,发动机的进气管长约2.5 m,并安装有进气消声器,尽可能减少进气口噪声对近场测量的影响,同时不致于造成很大的进气阻力,将排气管道接出实验室,试验条件满足噪声测量要求。数据采集设备采用美国Iotek公司的WaveBook512高速数据采集仪,可扩展为16通道并行采集。采集分析软件为National Instrument公司的Dasylab7.03数据分析软件,以40 kHz的采样频率进行数据采集,足以保证数据采集和分析精度。

### 1.2 试验内容

针对发动机有、无增压器,分别从稳态和恒转矩增转速瞬态工况两个方面研究增压对燃烧噪声的影响规律,并对二者影响规律进行对比分析。

试验在同负荷、同转速的情况下进行,稳态工况设计为4种负荷工况,分别对各负荷工况不同转速的参数进行测量;恒转矩增转速瞬态工况设计为与稳态对应的4种负荷的恒转矩加速工况,4种负荷工况如表1所示。

表1 稳态与瞬态试验4种负荷工况

Tab.1 Four load conditions in transient and steady

转速/ r·min <sup>-1</sup>	转矩/N·m			
	负荷工况1	负荷工况2	负荷工况3	负荷工况4
1 200	70.15	120.25	170.28	221.42
1 500	72.20	123.05	172.35	225.67
1 800	75.65	128.25	179.15	230.29
2 100	73.25	126.35	180.25	236.36
2 400	70.04	122.36	175.65	233.29
2 700	70.06	121.25	172.64	221.09

恒转矩增转速瞬态的4种负荷工况,均在加速时间 $\Delta t$ (10 s)内,从初始转速1 000 r/min加速到3 000 r/min,并连续对气缸压力等参数进行测量。电力动态测功机可设计自动循环工况,对加速工况及加速时间进行精确控制,并能对加速过程的基本参数进行测量记录。通过角标仪的基准信号和转角信号,从1 000~3 000 r/min瞬态采样数据中获取相对于稳态工况的各测量参数的数据。稳态与恒转矩增转速瞬态工况试验方案中测量参数包括:缸内压力、壁面温度、油管压力、表面振动、噪声、进气压力

和温度。

燃烧室壁面温度是反映和影响燃烧过程的一个重要参数,不同工况下燃烧室壁面温度决定了不同燃烧状态,对分析滞燃期、气体动力载荷和缸内压力高频振荡具有重要的意义,因此,本文对燃烧室壁面温度进行准确测量。由于工况突变时,燃烧室表面温度梯度变化较大,试验采用了美国NANMAC公司的非接地式快速响应热电偶(E6-10-K-U),该薄膜热电偶响应时间达到 $\mu\text{s}$ 级,在测量过程中会受侵蚀或磨损,但它会在受侵蚀的情况下自动更新其热电偶结,配有专用补偿导线。该传感器制作为螺栓状,螺纹外径为4 mm,螺纹长度为20 mm,从冷却端安装至测温面与燃烧室壁面为同一平面,避免局部流场对温度测量的影响。

## 2 试验结果

内燃机的燃烧噪声和机械噪声的分离方法有很多种,如倒拖法、喷油(点火)提前角法、应用相关技术分析、气缸压力频谱计算法以及部分缸熄火法等,但是由于二者的关联性,要得到绝对准确的结果很难。匹辛格<sup>[8]</sup>提出的设置时间窗获取测量噪声中由燃烧而激励的噪声来表征燃烧噪声,对多缸柴油机不太适用。本文采取对柴油机进行单缸熄火,分离燃烧噪声和机械噪声,该方法较倒拖法考虑了燃烧对机械噪声的影响,结果更加准确,且无须为发动机额外提供动力进行倒拖。对于瞬态燃烧噪声的分离,采取机械噪声基于发动机速度不变的原则,瞬态工况内燃机的整机噪声声压值减去稳态工况内燃机整机噪声声压值即为瞬态工况与稳态工况的燃烧噪声差值,稳态工况燃烧噪声加上该差值即为瞬态工况下内燃机燃烧噪声声压值。

按照国标GB/T 1895—2000的要求进行测点布置和整机辐射噪声测量,然后使用单缸熄火进行燃烧噪声和机械噪声的分离,不同负荷稳态和恒转矩增转速瞬态工况下,增压前后燃烧噪声随转速的变化情况比较如图1~4所示。

负荷一定时,增压前后稳态和恒转矩增转速瞬态燃烧噪声随转速的上升,呈上升趋势,增压后燃烧噪声在稳态和恒转矩增转速瞬态工况均小于非增压柴油机燃烧噪声。

从图1~4可以看出:4种负荷工况下柴油机增压后的燃烧噪声低于非增压燃烧噪声,不同负荷工况增压对燃烧噪声的降低效果不同,随着负荷的增加,增压对燃烧噪声的效果呈增加趋势(如图2所示),稳态负荷工况1增压前后平均燃烧噪声差值为1.29 dB,负荷工况3为3.79 dB,但在负荷工况4

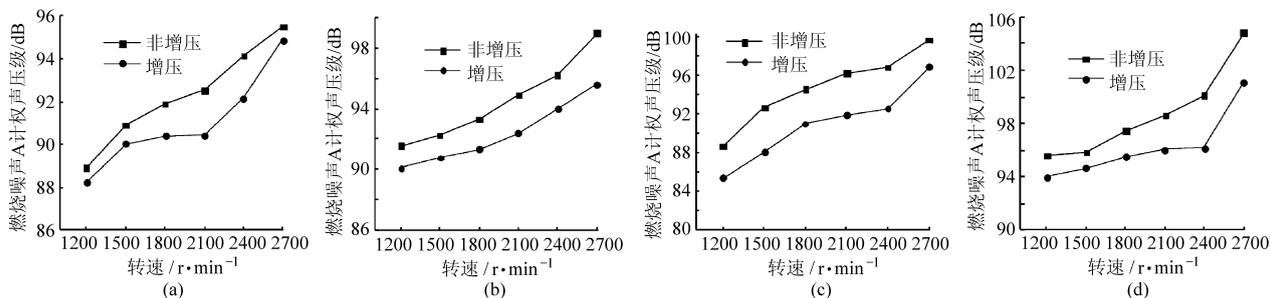


图 1 稳态工况增压前后燃烧噪声声压级比较

Fig. 1 Combustion noise before and after turbocharged in steady condition

(a) 负荷工况 1 (b) 负荷工况 2 (c) 负荷工况 3 (d) 负荷工况 4

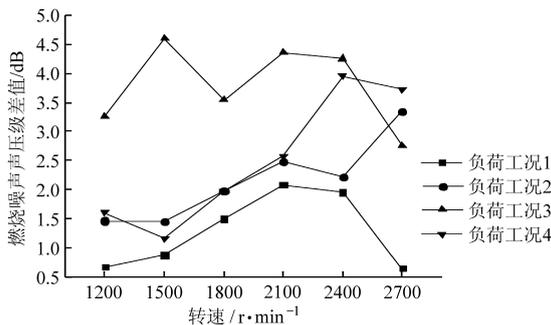


图 2 稳态工况增压前后燃烧噪声声压级差值比较

Fig. 2 Difference of combustion noise before and after turbocharged in steady condition

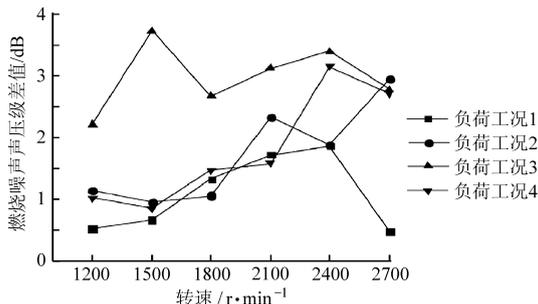


图 4 恒转矩增转速瞬态工况增压前后燃烧噪声声压级差值比较

Fig. 4 Difference of combustion noise before and after turbocharged in constant torque and increasing speed transient condition

transient condition

工况 3 在稳态工况平均燃烧噪声差值为 3.79 dB, 恒转矩增转速瞬态工况为 2.99 dB。

### 3 柴油机燃烧噪声增压影响机理分析

柴油机增压后进入气缸的空气充量密度增加, 使得压缩终了的气体温度和压力提高, 从而改善混合气的着火条件, 使滞燃期缩短, 降低预混合燃烧初期的压力升高率, 影响气体动力载荷, 改善缸内压力高频振荡, 降低柴油机燃烧噪声。

#### 3.1 燃烧室壁面温度对燃烧噪声的影响

燃烧室壁面温度是反映和影响燃烧过程的一个重要参数, 燃烧室壁面温度反映气体压缩和燃烧过程的温度。燃烧室壁面温度升高反映气体压缩终了温度也会增加, 改善混合气体的着火条件, 使着火延迟期缩短, 最终是燃烧噪声降低。不同负荷稳态和恒转矩增转速瞬态工况, 增压前后燃烧室壁面温度的比较如图 5~6 所示。

由图 5~6 所示, 稳态工况, 负荷工况 1 对应的 1 500 r/min 增压后比非增压的燃烧室壁面温度在对应的曲轴转角内高 10℃, 恒转矩增转速瞬态工况高 7℃; 负荷工况 3 对应的 2 100 r/min 增压后比非增压的燃烧室壁面温度在对应的曲轴转角内高 23℃, 恒转矩增转速瞬态工况下高 12℃。同负荷稳态和恒转矩增

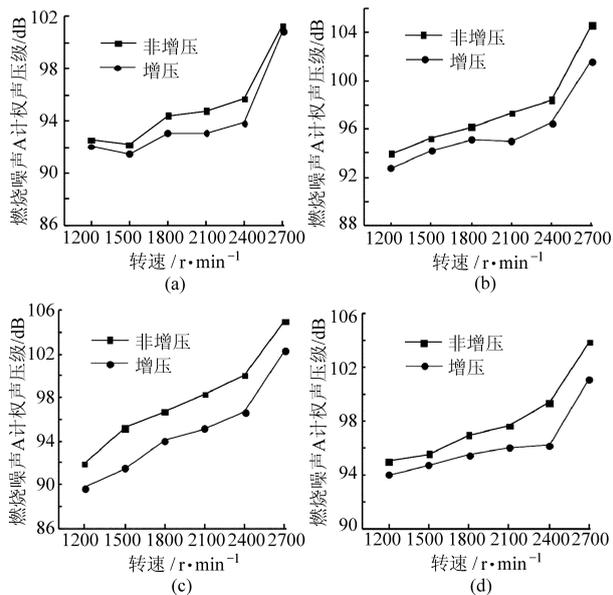


图 3 恒转矩增转速瞬态工况增压前后燃烧噪声声压级比较

Fig. 3 Combustion noise before and after turbocharged in constant torque and increasing speed transient condition

(a) 负荷工况 1 (b) 负荷工况 2 (c) 负荷工况 3 (d) 负荷工况 4

对燃烧噪声的影响小于负荷工况 3。当负荷一定时, 随着转速的上升, 增压对燃烧噪声的影响呈先增加最后降低的趋势, 这是因为对于转速上升到高转速时, 燃烧噪声对柴油机整机噪声的贡献随之降低。对比图 2 与图 4 可以得出, 增压对恒转矩增转速瞬态工况下燃烧噪声的影响小于稳态工况, 其中负荷

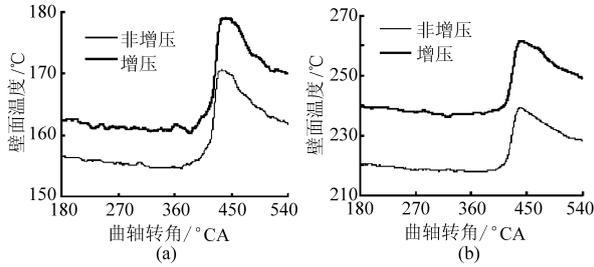


图5 稳态增压前后壁面温度比较

Fig. 5 Chamber's wall temperature before and after turbocharged in steady condition

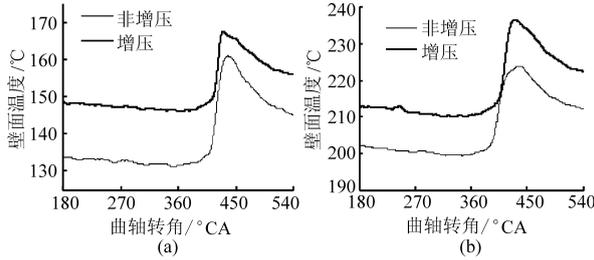
(a) 负荷工况 1,  $n = 1500$  r/min (b) 负荷工况 3,  $n = 2100$  r/min

图6 恒转矩增转速瞬态增压前后壁面温度比较

Fig. 6 Chamber's wall temperature before and after turbocharged in constant torque and increasing speed transient condition

(a) 负荷工况 1,  $n = 1500$  r/min (b) 负荷工况 3,  $n = 2100$  r/min

转速瞬态工况,增压后的燃烧壁面温度都高于非增压燃烧室壁面温度,且同工况下,增压使得燃烧室壁面温度的升高差值稳态高于恒转矩增转速瞬态工况。

### 3.2 气体动力载荷对燃烧噪声的影响

壁面温度的升高改善着火条件,使滞燃期缩短。本试验使用油管压力(喷油嘴端)确定喷油始点,4100QBZL-2型柴油机所用喷油器开启压力是 $(24.5 \pm 0.5)$  MPa,在油管压力(嘴端)曲线上,在开启压力附近有一个小的尖峰(放大图7油管压力曲线可以看到),那是由于针阀开启时,油管压力瞬时降低造成的,成为判断喷油针阀开启的标志。稳态工况,增压后负荷工况1对应的1500 r/min的滞燃期为 $8^\circ\text{CA}$ ,如图7所示,用同样的方法可以求得非增压负荷工况1对应的1500 r/min的滞燃期为 $10^\circ\text{CA}$ ;恒转矩增转速瞬态工况,增压后负荷工况3对应的2100 r/min的滞燃期为 $8^\circ\text{CA}$ ,非增压的滞燃期为 $14^\circ\text{CA}$ 。由此可以看出,增压使得滞燃期缩短。

稳态和恒转矩增转速瞬态工况下,增压前后压力升高率比较如图8和图9所示,增压对压力升高率的影响趋势和对燃烧噪声影响趋势一致,在低速低负荷工况引起的压力升高率变化不大,在中速中负荷工况引起的压力升高率变化较大,说明正是增压使得决定中高频燃烧噪声的压力升高率的降低,从而引起燃烧噪声的降低。

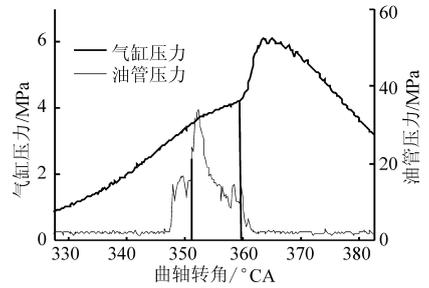


图7 稳态工况负荷工况1对应的1500 r/min滞燃期

Fig. 7 Ignition delays of 1500 r/min of the first load condition before and after turbocharged

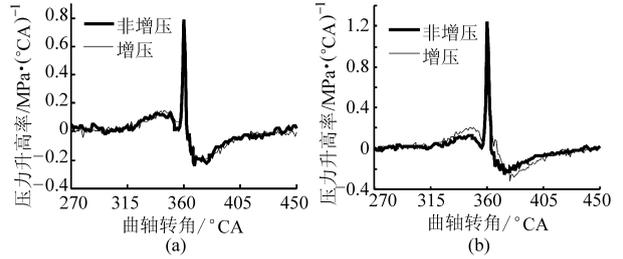


图8 稳态增压前后压力升高率比较

Fig. 8 Rate of pressure rise before and after turbocharged in steady condition

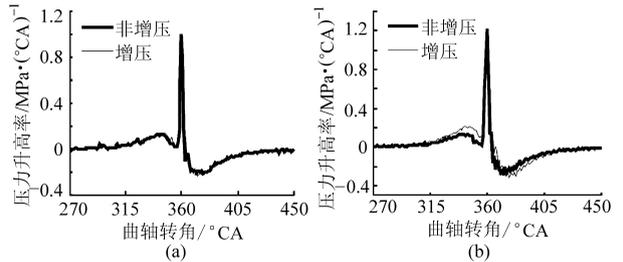
(a) 负荷工况 1,  $n = 1500$  r/min (b) 负荷工况 3,  $n = 2100$  r/min

图9 恒转矩增转速瞬态增压前后压力升高率比较

Fig. 9 Rate of pressure rise before and after turbocharged in constant torque and increasing speed transient condition

(a) 负荷工况 1,  $n = 1500$  r/min (b) 负荷工况 3,  $n = 2100$  r/min

### 3.3 压力高频振荡对燃烧噪声的影响

对上述负荷工况1对应的1500 r/min和负荷工况3对应的2100 r/min稳态和恒转矩增转速瞬态工况增压前后的缸内压力级比较,可以反应出两种工况下燃烧噪声的差异,如图10和图11所示。

从中看出,在稳态和恒转矩增转速瞬态工况下,增压使得缸内压力级曲线在低频段高于非增压,即增压使得缸内压力最大值增加。在低负荷工况(负荷工况1),低频段增压与非增压缸内压力级差别不大,高负荷工况(负荷工况3),低频段增压缸内压力级曲线高于非增压;而在整个中高频段,增压使得缸内压力级曲线都低于非增压缸内压力级曲线。由柴油机机体衰减特性可知,决定燃烧噪声大小的缸内压力级曲线主要是在中高频段,所以增压使得燃烧

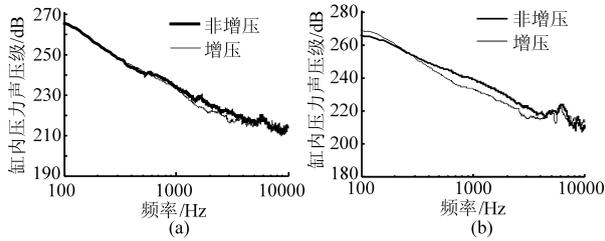


图10 稳态增压前后缸内压力级比较

Fig. 10 Cylinder pressure level before and after turbocharged in steady condition

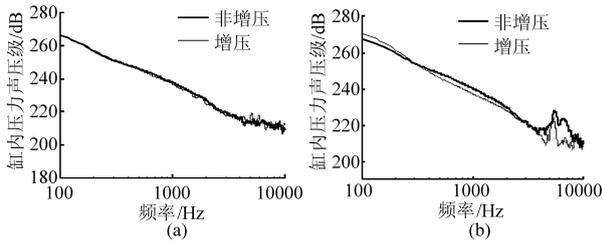
(a) 负荷工况1,  $n = 1500$  r/min (b) 负荷工况3,  $n = 2100$  r/min

图11 恒转矩增转速瞬态增压前后缸内压力级比较

Fig. 11 Cylinder pressure level before and after turbocharged in constant torque and increasing speed transient condition

(a) 负荷工况1,  $n = 1500$  r/min (b) 负荷工况3,  $n = 2100$  r/min

噪声有明显降低。

### 3.4 压气机压比对燃烧噪声的影响

压气机压比在稳态和恒转矩增转速瞬态工况下的比较如图12所示。从图12看出,在负荷工况1和负荷工况3下,随着转速的上升,恒转矩增转速瞬态压气机压比均小于稳态工况。稳态和恒转矩增转速瞬态工况下压气机压比的不同,导致增压对两种工况的影响不一样,从而也将影响增压对两种工况燃烧噪声的不同影响。

综合以上分析可知,增压引起压力升高率的降低和缸内压力高频振荡的减弱,使决定燃烧噪声大

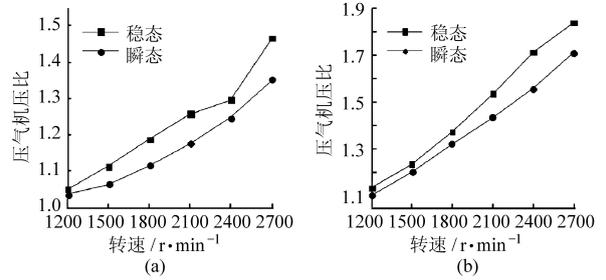


图12 稳态与恒转矩增转速瞬态工况压气机压比比较

Fig. 12 Compressor pressure ratio in transient and steady condition

(a) 负荷工况1 (b) 负荷工况3

小的气缸压力级中高频段降低,从而引起燃烧噪声的降低,增压对稳态和恒转矩增转速瞬态工况压力升高率和缸内压力高频振荡影响的差异决定了增压对稳态和恒转矩增转速瞬态工况燃烧噪声的不同影响程度。

## 4 结论

(1) 增压使得柴油机燃烧噪声在稳态和恒转矩增转速瞬态工况下都减小,在中转速和中负荷工况下增压对柴油机燃烧噪声的影响较好,且增压对稳态工况燃烧噪声的影响大于对恒转矩增转速瞬态工况下燃烧噪声的影响。

(2) 增压前后壁面温度的差异反映了增压对缸内气体压力和温度的不同影响程度,增压前后壁面温度的变化趋势和气体动力载荷及缸内压力高频振荡的变化趋势一致,从而反映增压对不同工况燃烧噪声的影响差异。

(3) 恒转矩增转速瞬态工况下,压气机压比随着转速的上升小于同工况下稳态工况压气机压比,压气机压比在稳态和恒转矩增转速瞬态工况下的不同影响增压对稳态和恒转矩增转速瞬态工况燃烧噪声的效果。

## 参 考 文 献

- Head H E, Wake J D. Noise of diesel engines under transient conditions[C]. SAE Paper 800404, 1980.
- Rust A, Thien G E. Effect of transient conditions on combustion noise of NA-DI-Diesel engines[C]. SAE Traverse, 1987.
- 卫海桥. 直喷式柴油机瞬态工况燃烧噪声激励机理研究[D]. 天津:天津大学,2004.  
Wei Haiqiao. Stimulation mechanism of combustion noise in transient condition of DI-diesel engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- Carlucci P. Preliminary study on the effects of injection rate modulation on the combustion noise of a common rail diesel engine [C]. SAE Paper 2004-01-1848, 2004.
- Mohamed Y E Selim. Combustion noise measurements and control from small diesel and dual fuel engines [C]. SAE Paper 20044359, 2004.
- Shu Gequn. Secondary influence factors of combustion noise mechanism under transient conditions of DI-diesel engine [C]. SAE Paper 2006-01-1530, 2006.
- 杨庆佛. 内燃机噪声控制[M]. 太原:陕西人民出版社,1985.
- 匹辛格. 柴油机燃烧噪声直接测量的新方法[J]. 噪声与振动控制,1984,4(5):34~38.  
Pschinger F. The naval method for measuring diesel combustion noise directly [J]. Noise and Oscillation Control, 1984, 4(5):34~38. (in Chinese)