

# 电动增压器减少柴油机加速烟度的试验\*

姚春德<sup>1</sup> 刘小平<sup>1</sup> 周红秀<sup>1,2</sup> 黄钰<sup>1</sup> 李帅<sup>1</sup>

(1. 天津大学内燃机国家重点实验室 天津 300072;

2. 大连理工大学能源与动力学院 大连 116023)

**摘要:** 柴油机在突然加速或加载过程中, 进入气缸中的空气量跟不上加油量的变化速率, 使瞬态过量空气系数以及混合气形成质量下降, 导致燃烧不良, 排放烟度恶化。通过在原进气管并联一电动增压器, 改变发动机由自然进气为电动增压进气, 从而增加加速时的进气量。试验结果表明, 按照车用柴油机加速工况, 选择恒转矩加速和恒转速加载两种瞬态工况在台架上进行进气增压试验, 电动增压器在两种加速工况能够实现快速补气, 改善柴油机燃烧质量, 降低排放烟度, 并提高其动力性, 尤其在低转速和大转矩工况下效果明显。

**关键词:** 电动增压器 柴油机 瞬态 排放烟度

**中图分类号:** TG156

## Using Electric Supercharger to Reduce Smoke Emission from Diesel Engine at Acceleration Process

YAO Chunde<sup>1</sup> LIU Xiaoping<sup>1</sup> ZHOU Hongxiu<sup>1,2</sup> HUANG Yu<sup>1</sup> LI Shuai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

**Abstract:** During quickly accelerating and sharply increasing load, the mass rate of air to engine doesn't consist with the variation of fuel flow, which results in air-fuel ratio decrease and makes the quality of mixture bad. As a result, the combustion of engine becomes worse and the smoke emission increases. To solve this problem, the air intake is modified by installing an electric supercharger (ES) in parallel with the original intake manifold, which makes the intake air be boosted to engine by the ES during the transient operations. Test results showed that ES injecting air to engine under transient operating conditions of increasing speed or torque improves the combustion quality of engine and reduces the smoke emission, as well as boost power output. The improvement is more remarkable especially under the low speed and high torque transient conditions.

**Key words:** Electric supercharger Diesel engine Transient state Emission smoke

## 0 前言

柴油车的起步和加速冒烟问题由来已久, 随着汽车柴油化进程的加快, 柴油机的数量越来越多, 尤其是市内公交汽车频繁的起动、加速产生的冒烟使这一问题日益突出。

柴油机碳烟形成的根本原因是, 在加速过程中进入气缸中的空气量跟不上喷油量的变化速率, 使瞬态过量空气系数以及混合气形成质量下降, 进而导致燃烧质量下降, 柴油机排放烟度恶化。所以改

善加速烟度必须缓解加速初期供油量和供气量的矛盾。

当前国内外从限制供油量和增加瞬时供气量两方面来研究降低碳烟问题, 从限制油量方面进行喷油泵调速特性进行调整, 减少加速时的供油量<sup>[1-2]</sup>。但是喷油量的调整不当会影响汽车的加速性。另一方面是增压系统研究, 增压系统的瞬态响应、流量特性及效率都会影响汽车的冒烟问题<sup>[3]</sup>。国内外集中在减少涡轮增压器的转动惯量, 缩小涡轮喷嘴面积, 采用复合增压器系统<sup>[4]</sup>和可变截面增压器<sup>[5]</sup>, 以及直接向压气机叶轮进行喷射高压空气的补气装置<sup>[6]</sup>, 在废气涡轮和压气机主轴上安装电动机<sup>[7-8]</sup>, 即电辅助增压系统等。但这些方案用于公交车柴油

\* 国家自然科学基金资助项目(20533040, 50376045, 50576064)。20070405 收到初稿, 20070929 收到修改稿

机上都存在诸如机构复杂、发动机成本大量增加等不足，难以得到实施。为此，本文研制了一种高速电动机独立驱动的进气增压器，并将其运用到自然吸气柴油机上。经在发动机台架上进行的瞬态试验结果表明，当柴油机在加速和加载过程中利用电动增压器实施瞬态快速补气时，其加速性能和烟度排放量都得到显著改善。

## 1 电动增压器试验装置和试验方案

### 1.1 试验装置

试验研究在 490QDI 自然吸气式柴油机上进行，

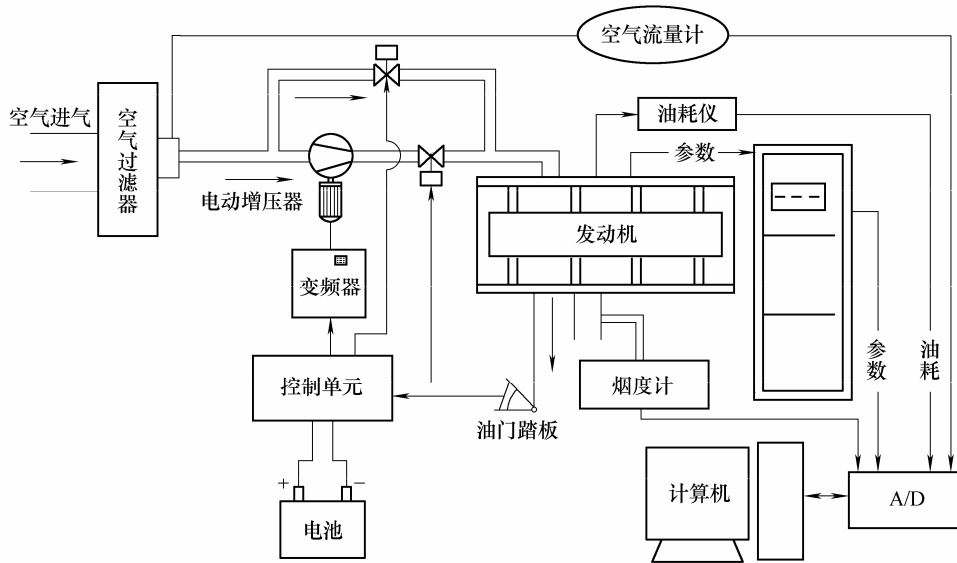


图 1 试验装置及测量系统总体示意图

表 490QDI 柴油机主要技术参数

| 技术参数                                                                                    | 参数值         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 发动机型号                                                                                   | 490QDI      |
| 形式                                                                                      | 直列四缸        |
| 缸径×冲程 $D \times s / (\text{mm} \times \text{mm})$                                       | 90 × 100    |
| 压缩比                                                                                     | 18:1        |
| 排量 V/L                                                                                  | 2.54        |
| 额定功率与转速比 $\frac{P}{n} / \frac{\text{kW}}{\text{r} \cdot \text{min}^{-1}}$               | 45.6/3 200  |
| 最大扭矩与转速比 $\frac{M}{n} / \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{r} \cdot \text{min}^{-1}}$ | 156.8/2 240 |
| 全负荷最低比油耗 $B / (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$                         | 228         |
| 烟度 BSU                                                                                  | ≤4.0        |

测控机是为洛阳南峰机电设备制造有限公司生产的 CW-160 型电涡流测功机。它具有恒转速、恒转矩控制功能，但是不能实时采集到瞬态的转速和转矩值，只能在控制板上显示，所以需用 A/D 采集卡通过电缆将测功机的转速和转矩输出端口与计算机相连，将发动机的输出转速和转矩模拟信号转换成数字信号，实时采集到计算机内。油耗仪为杭

州奕科公司生产的 FCM05 瞬态油耗测量仪，测量瞬态燃油消耗量；空气流量计为德国 BOSCH 公司的热膜式空气流量计，测量瞬态空气流量。测量烟度采用奥地利 AVL 公司的 AVL439 消光式烟度计。烟度值以消光度来衡量。

试验装置及瞬态测量系统如图 1，在从空气过滤器到发动机的进气管上并联一个由高速无刷电动机独立驱动的电动增压器。为了获得较好的补气效果，减少加速时的进气损失，将电动增压器放置在进气管直路上，自然进气管放置在旁路上。进气的切换分别根据工况要求，由支路上的常开电动蝶阀和常闭电动蝶阀控制，确保进气的相对独立。

电动增压器由控制单元通过变频器控制，额定转速为 24 kr/min，设定加速时间为 10 s，加速方式为直线型。电动增压器的工作特性见文献[9]。

试验发动机技术参数如下表所示。

试验中，按照测功机的控制功能，选择恒转矩加速和恒转速加载两种工作模式进行加速补气研究。在加速试验前，首先对油门执行器的起始位置进行标定，确保加速时原机和补气两次试验最大油门开度的一致。在进行原机试验时，空气通过常开电动蝶阀进入发动机，蝶阀是关闭的。而在补气试验时，为了消除电动增压器加速响应对柴油机加速时的影响，首先提前 10 s 打开电动增压器。当控制单元接收到油门传感器的加速信号时，快速打开常闭蝶阀，关闭蝶阀，空气经过蝶阀进入发动机。

### 1.2 试验方案

根据稳态试验，在外特性试验中发现电动增压器的转速越高补气效果越好，所以加速试验中都采

用额定转速 24 kr/min。

在恒转矩变转速时采用 30N·m、60N·m、90N·m 三种工况。转矩为 30 N·m 时转速从 1.2 kr/min 快速加速到 2.4 kr/min，转矩为 60 N·m 时转速从 1.6 kr/min 快速加速到 2.5 kr/min，转矩为 90N·m 时转速从 1.6 kr/min 快速加速到 2.4 kr/min。

在恒转速变转矩时，选择 1.4 kr/min、1.6 kr/min 低转速两种工况，转矩从 20N·m 突然加速到 110N·m。

## 2 电动增压器试验结果及分析

### 2.1 恒转矩加速工况

图 2 是转矩分别为 30N·m、60N·m、90N·m 三种工况下恒转矩原机和补气时的瞬态油耗对比。从图 2 可以看出，由于油门拉杆从起始位置突然加速到终止位置，燃油消耗量会有一个峰值，都高于每个工况的终止稳定转速的燃油消耗量，而且加速的快慢会影响峰值的高低。每个加速工况时由于原机和补气两次试验的油门的起始位置一致，所以瞬态燃油消耗量基本一致。

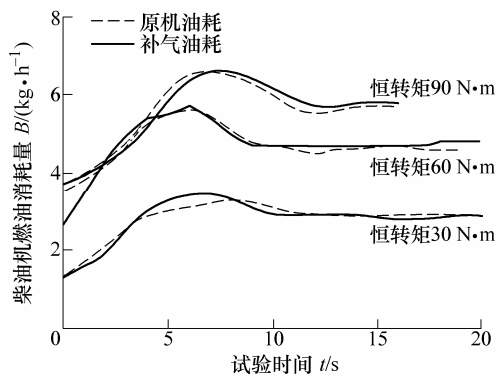


图 2 恒转矩原机和补气时的瞬态油耗对比

从图 3 可以看出，在转矩分别为 30N·m、60N·m、90N·m 三种工况下，过量空气系数都出现谷值。这是因为在加速时燃油消耗量的突然增大，而进气量要增加到最大值又需要一定时间，导致过量空气系数在加速初始阶段随着转速的上升而下降，而后再上升。空气进气质量流量通过电动增压器的增压补气作用后，比原机都有所提高，所以在瞬态加速到稳定状态的过量空气系数也比原机的明显增大，尤其是在转矩为 90N·m 工况下效果更明显。

由于在加速过程中过量空气系数的突然降低，致使烟度突然上升，出现峰值，在转速稳定后过量空气系数恢复到初始值，所以烟度也下降到一个平稳值，如图 4 所示。在转矩为 30 N·m、60 N·m

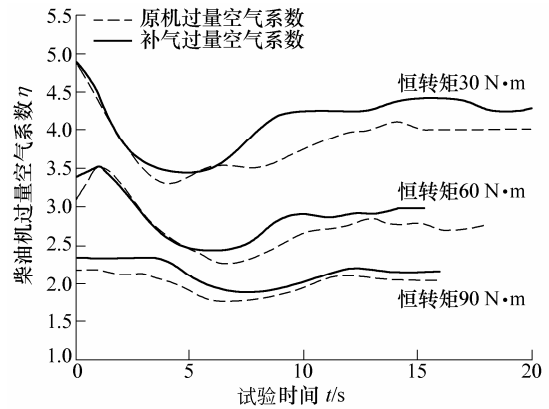


图 3 恒转矩原机和补气时的瞬态过量空气系数对比

时，虽然增压补气使进气质量流量比原机增加，从而使过量空气系数增加，但是由于过量空气系数本身比较高，超过了 2.0，使原机烟度就较低，所以补气效果不明显，烟度下降较低。而在转矩为 90N·m 工况下，原机的过量空气系数较低，最低达到 1.3 左右，使烟度值较大，所以补气效果也最明显，电动增压器补气后烟度峰值比原机烟度峰值下降了 20%。

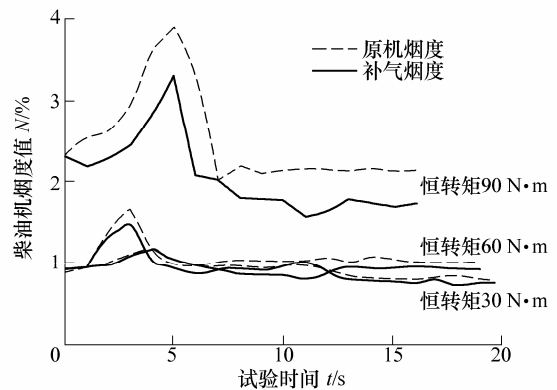


图 4 恒转矩原机和补气时的烟度对比

增压补气不仅改善发动机的烟度排放，而且也使柴油机输出功率有所增加，尤其是 90N·m 时，如图 5 所示。

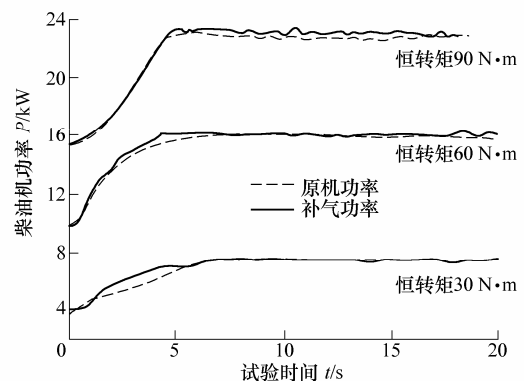


图 5 恒转矩原机和补气时的瞬态功率对比

### 2.2 恒转速加载工况

由于车用柴油机在起步加速前运行在低转速，选择转速 1.4 kr/min 和 1.6 kr/min 两种工况进行变转矩增压补气研究。

由图 6 可见，恒转速加载工况不像恒转矩加速工况一样，转速稳定不变，转矩单调上升，而是在达到稳定值前发生了很大的波动情况，主要由于油门位置突然变化，引起调速器对转速调节，而在测控机的恒转速控制下，转速又需要稳定在恒定值，所以在调速器和测控机综合作用，转矩和转速波动一段时间才能稳定。另外可以看出，原机和增压补气两次试验中转速基本保持一致，说明补气效果的可靠性。补气后的转矩比原机稍有增加。

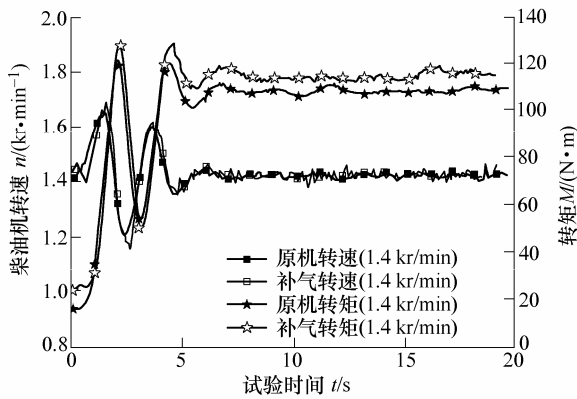


图 6 恒转速原机和补气时的瞬态转速、转矩对比

图 7 是恒转速分别为 1.4 kr/min 和 1.6 kr/min 工况下，突然从 20 N·m 加载到 110 N·m 时，恒转速原机和补气时的瞬态油耗对比图，从图 7 可以看出，由于油门拉杆从起始位置突然加速到终止位置，燃油消耗量也会有一个峰值，都高于每个工况的终止稳定转速的燃油消耗量，而且加速的快慢会影响峰值的高低。与恒转矩加速工况相同，在每个加载工况下由于原机和补气两次试验的油门的起始位置一致，所以瞬态燃油消耗量基本一致。

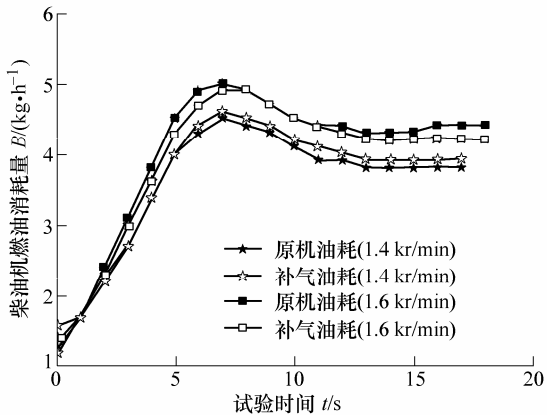


图 7 恒转速原机和补气时的瞬态油耗对比

图 8 是两种工况下突然加速时，恒转速原机和补气时的瞬态过量空气系数对比。从图 8 可以看出，在恒转速控制下突然增加发动机的转矩，与恒转矩情况不同，过量空气系数会突然下降，最后趋于一个稳定值。其原因是由于进气流量主要与发动机结构参数以及发动机转速有关，在恒转速下进气量基本保持不变，而燃油消耗量却突然增加，使得过量空气系数随着燃油消耗量的增加而降低，到燃油消耗量到达稳定状态，过量空气系数也随着稳定在一个平稳值。两种工况下增压补气都使得进气流量比原机明显增加，所以过量空气系数也比原机相应的增加。因此，如图 9 所示，在恒转速变转矩工况下，烟度值不是出现一个波峰，而是随空气过量系数的单调降低而单调增加，一直到稳定时达到一个基本稳定值。增压补气使瞬态时烟度下降程度呈递增趋势，一直达到稳定时，烟度下降最大。

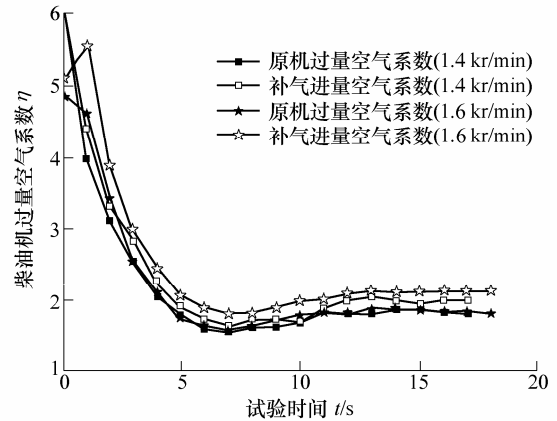


图 8 恒转速原机和补气时的瞬态过量空气系数对比

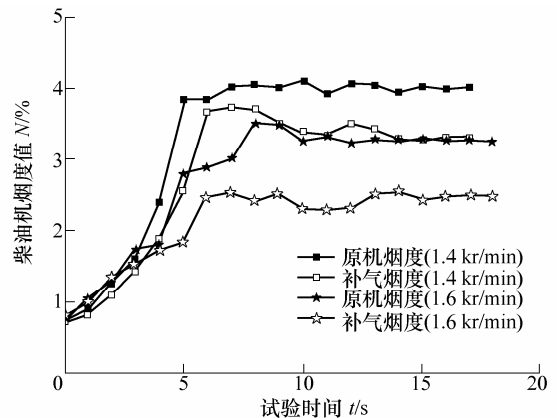


图 9 恒转速原机和补气时的烟度对比

图 10 所示，在恒转速加载工况下，补气在瞬态时使功率没有明显的增加。而在恒转速 1.4 kr/min 下，输出功率有所增加。一方面补气作用使空燃比增加，燃烧效率增加，从而使功率增加，另一方面也是由于补气使喷油量比原机略有增加使发动机功率增加。

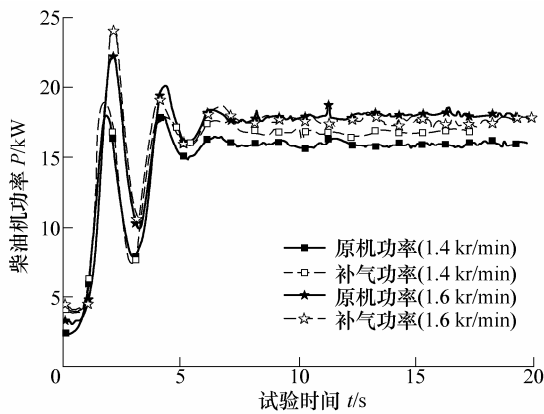


图 10 恒转速原机和补气时的瞬态功率对比

综上所述, 无论是从恒转矩加速试验还是从恒转速加载试验中都可以看出: 在大转矩加速和低转速加载工况下电动增压器对柴油机加速补气都能降低柴油机的烟度, 而且对于动力性也有一定的提高。但是, 由结果也可以看到, 无论是烟度减少, 还是动力性提高, 其幅度还不够大。其原因主要是电动机的转速还有待于提高。本电动增压器系一个涡轮增压器改制而成。该增压器在正常工作时最高转速超过 100 kr/min, 而我们试验中实际最高转速仅 24 kr/min。显然压气机没有发挥其真正效能。只有进一步提高电动增压器的转速, 使其进入高效工作区, 才能进一步提高进气压力和补气量, 使瞬态过量空气系数超过 2.0, 这样才能更有效的达到降低烟度, 并提高瞬态动力性的目标。

### 3 结论

(1) 在恒转矩加速工况下, 电动增压器在柴油机加速时进行补气, 独立工作, 增加进气量, 使得过量空气系数相对增大, 从而降低瞬态烟度峰值, 而且会提高柴油机的瞬态输出功率。这一效果, 在大转矩工况下更明显。

(2) 在恒转速加载工况下, 电动增压补气会使进气量增加, 从而提高瞬态过量空气系数, 使得瞬态烟度值有所下降, 烟度下降水平随转矩的增大而呈递增的, 达到稳定状态时烟度下降最大。

### 参 考 文 献

[1] 邹吉田, 白刚, 申庆颜, 等. 降低柴油机自由加速烟度的试验研究[J]. 内燃机, 1997(2): 28-30.  
ZOU Jitian, BAI Gang, SHEN Qingyan et al. Study on reduce smoke emission from diesel engine at free acceleration process[J]. Internal Combustion Engines, 1997(2): 28-30.

[2] 王军. 柴油机自由加速烟度和可调式烟雾限制器[J]. 内燃机燃油喷射和控制, 2001(3): 16-18.  
WANG Jun. Free acceleration smoke from diesel and adjustable smoke limiter[J]. Modern Vehicle Power, 2001(3): 16-18.

[3] BAZARI Z. The transient performance analysis of a turbocharged vehicle diesel engine with electronic fuelling control [G], SAE, 900236, 1990.

[4] 马捷, 顾宏中. 复合增压切换系统对柴油机瞬态特性的改善[J]. 内燃机学报, 1989, 7(2): 111-116.  
MA Jie, GU Hongzhong. Improvement on transient response of turbocharged diesel engine by the combined charging with changeover Ssystem[J]. Transactions of CSICE, 1989, 7(2): 111-116.

[5] 张雨松, 尹琪, 郭静川. 用补气改善公交车急加速烟度研究[J]. 内燃机工程, 2002, 23(1): 53-55.  
ZHANG Yusong, YIN Qi, WU Jingchuan. A study on reducing exhaust smoke of diesel bus engines in rapid acceleration by additional air injection[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2002, 23(1): 53-55.

[6] LORENZO D, GIUSEPPE P, BERNARDO F. VGT turbocharger controlled by an adaptive technique[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(4): 492-499.

[7] KOLMANOVSKY I, STEFANOPOULOU A G, POWELL B K. Improve turbocharged diesel engine operation with turbo power assist system[C]//International Conference on Control Applications, Hawaii. 1999, 6: 454-459.

[8] KATRASNİK T, RODMAN S, TRENC F. Improvement of the dynamic characteristic of an automotive engine by a turbocharger assisted by an electric motor[J]. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125: 590-595.

[9] 姚春德, 周红秀. 柴油机加速过程快速补气的电动增压器设计及其特性[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 184-187.  
YAO Chunde, ZHOU Hongxiu. Design and characteristics on electric supercharger for diesel engine acceleration by additional air rapid injection[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 184-187.

作者简介: 姚春德, 男, 1955 年出生, 教授。主要研究方向为内燃机燃烧及其废气净化。

E-mail: arcdyao@tju.edu.cn