

# 柴油机加速过程快速补气的电动增压器 设计及其特性

姚春德 周红秀

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室 天津 300072)

摘要：为解决增压柴油机因传统增压器在加速时反应迟滞所带来的冒烟问题，研制了一台由高速无刷电动机独立驱动的电动增压器，转速范围从 6.0~24.0 kr/min，最大流量达到 0.1 kg/s。针对电动机的结构特点对电动增压器进行新颖的结构设计，使安装方便，简化了传统增压器所需的润滑措施。利用热线风速仪测定了其出口处在不同的转速下稳态时速度分布，分析稳态质量流量与增压比在不同转速下的变化趋势，并在不同的起动时间内(10 s, 15 s, 20 s, 25 s)测定其瞬态响应，对其瞬态流量特性进行初步的研究，为柴油机在加速试验时与电动增压器匹配提供依据。研究表明，该电动增压器具有响应速度快、流量大、不受发动机工况所控制等特点，为降低其排放烟度、改善其加速性能提供一条可行的途径。

关键词：电动增压器 热线风速仪 流量特性 瞬态

中图分类号：TK42

## 0 前言

众所周知柴油机与汽油机相比，因其较高的经济性和热效性而具有较大的发展潜力，有着巨大的发展前景。增压技术强化发动机了工作过程，提高发动机的升功率，由此减少发动机的质量和汽车的滚动阻力，对于汽车节能来说具有积极意义；另外，增压使发动机气缸内的混合气空燃比大幅度上升，有利于提高发动机的热效率，从而提高发动机的负荷率。因而增压技术在内燃机上得到了广泛的应用。然而随着柴油机增压程度的提高，增压器响应滞后问题更加突出<sup>[1-2]</sup>。

涡轮增压器对于柴油机突然加速的响应滞后，进入气缸中的空气量跟不上加油量的变化速率，造成烟度排放增加，从而严重污染城市环境，进而限制了柴油机在频繁启动，频繁加速的应用场合。针对这一问题，国内外提出多种解决方案，如向压气机叶轮喷射压缩气体<sup>[3]</sup>，采用复合增压切换系统<sup>[4]</sup>，可变断面增压器<sup>[5]</sup>，在废气涡轮和压气机主轴上安装电动机<sup>[6]</sup>等，但这些方案用于公交车柴油机上都存在不足。为此，研制由高速电动机独立驱动的增压器对增压柴油机在加速过程中实施瞬态快速补气，改善其加速性能，降低烟度排放。

## 1 电动增压器结构特点

电动增压器是由高速无刷变频调速电动机和

离心式压气机通过联接凸缘组成，如图 1 所示。压气机叶轮转子和高速电动机主轴刚性联接，使高速电动机直接驱动压气机叶轮。在接收到柴油机加速信号时，电动增压器能够迅速响应，向柴油机进气管补气，减少因废气涡轮增压器响应迟滞产生的碳烟排放。

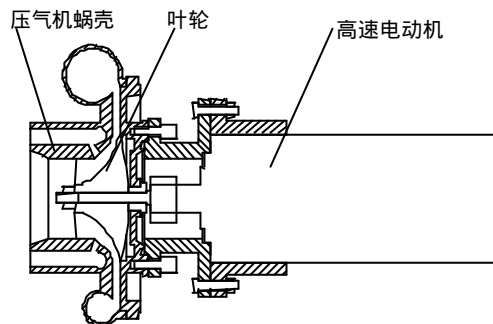


图 1 电动增压器的结构

在电动增压器上采用 J80 离心式压气机，叶轮直径为 82 mm，在进气口采用特性加宽装置，即导风轮旁通再循环结构。当阻塞发生时，气体从叶轮盖板上的环槽补充进来，加大阻塞流量；当发生喘振时，气体从环槽流出，并重新从进口吸入叶轮，推迟喘振，增大了流量范围。

高速无刷变频电动机主要具有两个特点：在结构上克服了有刷电动机在运转时存在的摩擦，以及易出现的打火花现象，使用寿命长，具有较高的启动性能和精度；高速电动机由变频器控制能够实现不同瞬态响应时间以及不同的转速工况。高速电动机的特点使电动增压器能够满足柴油机在不同加速

工况下时所需的进气量。

另外，高速电动机内的主轴轴承使用油脂润滑，而伸出轴是通过凸缘的联接定位，与压气机端盖无接触运转，所以电动增压器不需要采取外部的润滑措施。

## 2 电动增压器流量特性的测定

### 2.1 测定仪器及测定方法

电动压气机流量在天津大学流体力学实验室采用热线测速技术进行的测定的。测定仪器主要包括 IFA300 恒温热线风速仪、计算机和自动控制坐标架系统 CCTS-1193E。测定方法如图 2 所示。

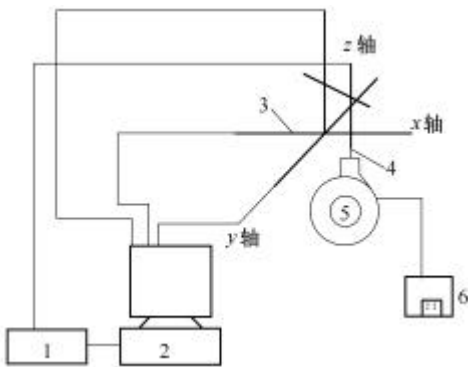


图 2 电动增压器流量特性测定示意图

- 1. IFA300 恒温热线风速仪
- 2. 计算机
- 3. 三维自动坐标架系统
- 4. TSI1210 热线探针
- 5. 电动增压器
- 6. LGSV015iG5-1 变频器

先将电动增压器在台架上固定好，使压气机出口气口竖直向上，调整端面水平。探针垂直于出口端面，在相互垂直的内直径上测量射流速度。将已经标定好的 TSI1210-T1.5 型单丝热线探针固定在三维自动坐标架系统。该坐标架系统是美国 TSI 公司生产的计算机自动控制坐标架系统 CCTS-1193E，配合 IFA300 以及 Thermalpro 软件，可以通过计算机在三个方向上的精确移动以及定位探针，实现试验远程控制及完成实时测量。

### 2.2 电动增压器稳态特性测定及分析

高速无刷电动机的转速范围为 6.0 ~ 24.0 kr/min，所以选择 9.6 kr/min(160 Hz)，12.0 kr/min(200 Hz)，14.4 kr/min(240 Hz)，16.8 kr/min(280 Hz)，19.2 kr/min(320 Hz)，21.6 kr/min(360 Hz)，24.0 kr/min(400 Hz) 7 种工况进行稳态速度的测量。同时由温度传感器和微压管测出出口处相应的温度和压力。高速电动机的转速通过变频器改变其频率进行控制，因为压气机本身的结构特点，所以在压气机蜗壳出口处流场速度不均匀。在每个工况下选定在两个相互垂直方向( $A_0 A_1$  轴向和  $B_0 B_1$  径向)的直径上分别测量流速，

测量时探针依  $A_0 A_1$ 、 $B_0 B_1$  的方向运动，如图 3 所示。压气机出口处内直径为 57 mm，在流速在梯度小的地方选取 1 mm 步长，梯度大的地方选取小步长 0.5 mm 进行测量，以提高测量精度。

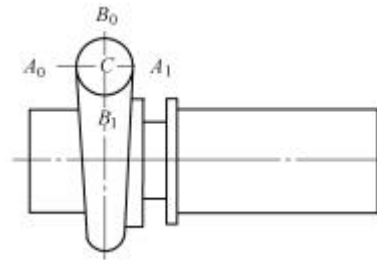


图 3 压气机出口速度测量位置

测量时发现速度的最高点出现在  $A_0 B_1 C$  区，而最低点出现在  $A_1 B_0 C$  区。测试结果如图 4 所示，图 4a 中以  $B_0$  为原点，图 4b 中以  $A_0$  为原点。比较图 4a 与图 4b，在相同转速下在压气机出口处径向和轴向速度断面对称，都成双驼峰形状。随着叶轮转速的增加，压气机出口处轴向和径向速度相应的增加。

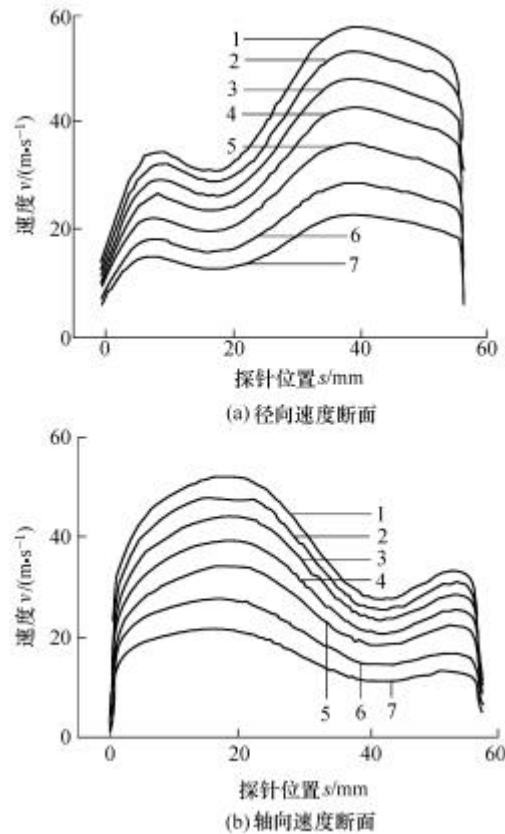


图 4 压气机出口速度断面图

- 1. 转速 24.0 kr/min
- 2. 转速 21.6 kr/min
- 3. 转速 19.2 kr/min
- 4. 转速 16.8 kr/min
- 5. 转速 14.4 kr/min
- 6. 转速 12.0 kr/min
- 7. 转速 9.6 kr/min

由质量流量公式

$$q_m = \int r_c v dA = \int (RT_c / p_c) v dA$$

式中  $r_c$  ——压气机出口处气体密度  
 $v$  ——气流速度  
 $A$  ——压气机出口断面积  
 $R$  ——气体常数  
 $T_c$  ——压气机出口气体温度  
 $p_c$  ——压气机出口气体压力

对速度断面进行积分，得到不同转速下压气机出口处的质量流量率。根据下式计算压气机增压比。如图 5 所示，电动增压器的质量流量、增压比都随转速的增加而增加。

$$p_c = p_c / p_0$$

式中  $p_0$  ——压气机进口压力，即环境压力

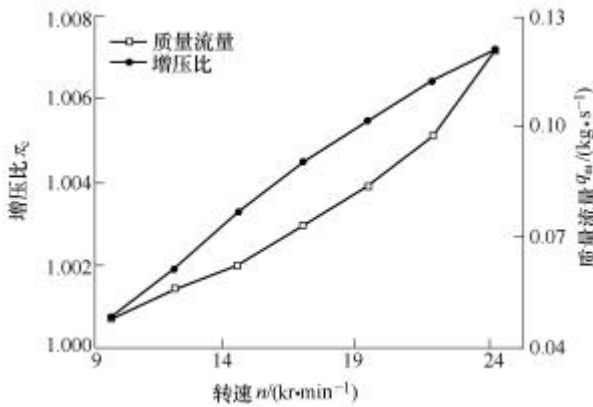


图 5 压气机质量流量及增压比特性图

### 2.3 电动增压瞬态响应特性测定及分析

由于电动增压器的高速电动机是异步电动机，所以电动增压器瞬态响应特性的研究也是很重要的。在前面的稳态特性测量中能够确定出代表流量的平均速度点，将热线探针移动到此处不动，进行瞬态流量的测定。选取 10 s、15 s、20 s、25 s 为起动时间，分别设定不同转速进行测量。

测量结果如图 6 所示，在电动机起动时间里流量成线性增长，起动时间越长，流量的增长斜率越小；在同一设定时间内，只有最高转速在设定时间达到稳态，其余转速下，流量会按比例提前达到稳态，如图 6a 所示，在设定转速为 9.6 kr/min 时，4 s 时就能达到稳态。增压柴油机所需的进气空气流量计算公式为

$$V_a = ZV_h n h_v (2/t) / 60$$

式中  $Z$  ——气缸数

$V_h$  ——气缸工作容积

$n$  ——柴油机转速

$h_v$  ——充气系数

$t$  ——冲程数

对于四冲程增压柴油机， $h_v=0.90 \sim 1.05$ ，它随着增压压力的升高而略有升高<sup>[7]</sup>。

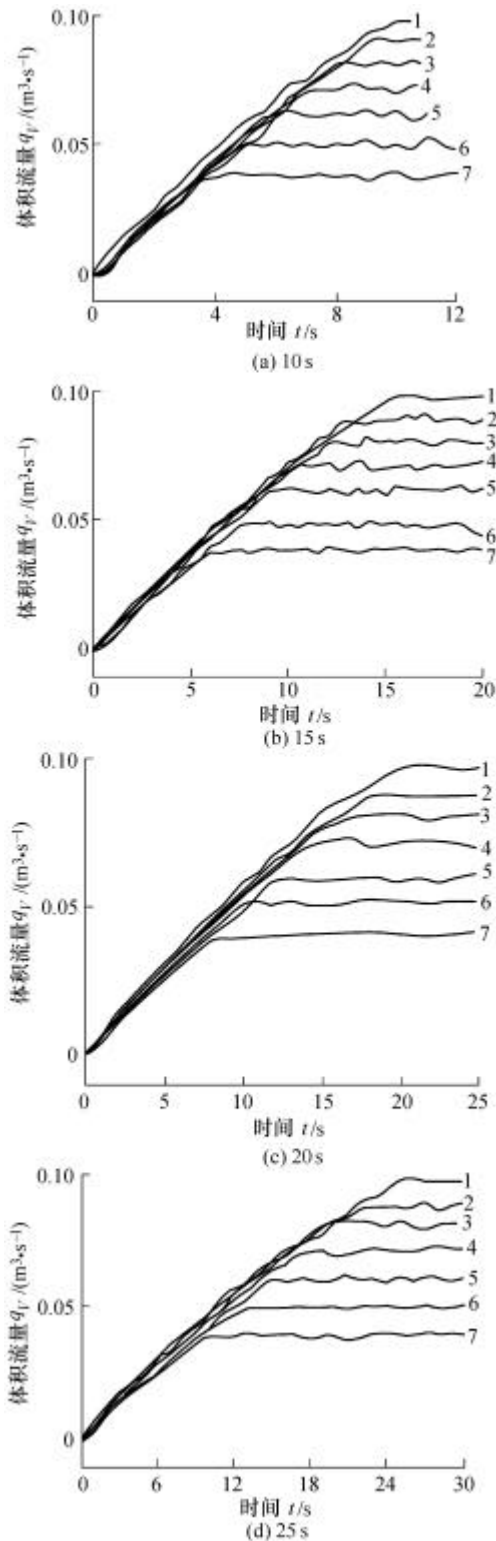


图 6 压气机瞬态流量特性

- 1. 转速 24.0 kr/min
- 2. 转速 21.6 kr/min
- 3. 转速 19.2 kr/min
- 4. 转速 16.8 kr/min
- 5. 转速 14.4 kr/min
- 6. 转速 12.0 kr/min
- 7. 转速 9.6 kr/min

以某型四缸，四冲程增压柴油机为例，其气缸直径 × 活塞行程为：114 mm × 130 mm， $h_v=0.92$ ，从转速为 0.9 kr/min 加速到 2.0 kr/min 所需的空气流量为从 0.037 m³/s 到 0.081 m³/s。从图 6 中可以看出，当压气机设定转速为 21.6 kr/min 时，在起动过程中，

从静止到达到该转速，在 10 s 之内便能完全能满足柴油机所需的空气流量。可见，城市公共交通汽车安装上此电动增压器，由于大量空气的迅速补进，便可解决其在道路交口处加速时排出大量黑烟的问题，并且提高其加速性。

### 3 结论

(1) 研制了一台由高速电动机独立驱动的电动增压器，具有结构简单，安装方便等特点，而且省略了传统增压器所需的润滑措施。这种结构设计可推广应用于各种流量范围的电动增压器。

(2) 在 9.6~24.0 kr/min 范围内选择了 7 个不同转速，利用热线风速仪测得压气机出口在稳态时两个垂直直径上的速度断面，进而测得了电动增压器的转速与增压比及流量之间的递增特性，为与柴油机的匹配提供依据。

(3) 选择 4 种起动时间，在不同的转速下测得了电动增压器的瞬态响应特性，为电动增压器对柴油机在加速过程中实施瞬时补气提供依据。

### 参 考 文 献

- [1] 张晋东, 李洪武. 车用柴油机涡轮增压技术的新发展[J]. 车用发动机, 2002, (2): 1-4.
- [2] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] CHANG S L, NAG J C Effect of air injection on the characteristics of transient response in a turbocharged diesel engine[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2002, 41: 63-71.
- [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. 内燃机学报, 1989, 7(2): 111-115.
- [5] 郭林福, 马朝臣, 施新, 等. 可变几何涡轮增压器与发动机稳态匹配模型的研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(2): 154-160.
- [6] KOLMANOVSKY I, STEFANOPOULOU A G, POWELL

B K. Improve turbocharged diesel engine operation with turbo power assist system[C]//International Conference on Control Applications, Hawai'i. 1999, 6: 454-459.

[7] 蒋德明. 内燃机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

## DESIGN AND CHARACTERISTICS ON ELECTRIC SUPERCHARGER FOR DIESEL ENGINE ACCELERATION BY ADDITIONAL AIR RAPID INJECTION

YAO Chunde ZHOU Hongxiu

(State Key Laboratory of Engine, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract**: The electric supercharger driven by a brushless motor with high-speed is developed to solve the problem of acceleration smoke caused by the turbocharger sluggish response. Its rotate speed is from 6.0 r/min to 24.0 kr/min, and the maximum flux is 0.1 kg/s. The structure design of the electric supercharger is novel, which makes it dispensable to set the lubricating installation and easy to assemble. The velocity distribution at the outlet of the electric supercharger is determined by hot-wire anemometry under various rotate speeds in steady state. Further more, the trends of the flux and charge rate with various speeds are analyzed. In addition, the transient response is detected from motor setup to smooth running within 10 s, 15 s, 20 s and 25 s respectively, and the characteristic of the transient flux is on pilot study. Research results indicate that the electric supercharger can respond rapidly with the great flux, and it is independent of the operating conditions of diesel engine. So it is a feasible way to reduce the smoke emission and improve the acceleration performance.

**Key words**: Electric supercharger Hot wire anemometry

Flux characteristic Transient state

作者简介: 姚春德, 男, 1955 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为内燃机工作过程、废气净化及代用燃料。

E-mail: arcdyao@tju.edu.cn