

# 涡轮增压器噪声控制技术

李伟<sup>1,2</sup>, 李国祥<sup>1\*</sup>, 王桂华<sup>1</sup>, 张健健<sup>2</sup>, 桑梧海<sup>2</sup>

1. 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 康跃科技(山东)有限公司, 山东 潍坊 262718

**摘要:**为研究涡轮增压器的噪声控制技术,分析涡轮增压器的工作原理,阐述 Whoosh 噪声、喘振噪声、叶片音调噪声、电锯噪声、叶顶间隙噪声等气动噪声以及轴承系统噪声与 Rattle 噪声等结构噪声的产生机理,详细阐述国内外涡轮增压器 Whoosh 噪声控制技术的现状,并对目前涡轮增压器的噪声控制技术进行综合分析,指出涡轮增压器噪声控制技术的发展趋势。

**关键词:**涡轮增压器;噪声;产生机理;控制;发展趋势

**中图分类号:**U464.135

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2022)02-0001-10

**引用格式:**李伟,李国祥,王桂华,等. 涡轮增压器噪声控制技术[J]. 山东交通学院学报,2022,30(1):1-10.

LI Wei, LI Guoxiang, WANG Guihua, et al. Noise control technology of turbocharger[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(2):1-10.

## 0 引言

现代汽车行业,几乎全部柴油机和绝大部分高性能汽油机都采用涡轮增压技术。发动机小型化及低速扭矩的提高导致增压器的运行点更接近喘振区域<sup>[1]</sup>,叶轮出口线速度随发动机强化程度的增加不断提升,而叶轮功率和升功率分别随叶轮出口线速度的3次方和5~6次方增加<sup>[2]</sup>。现代涡轮增压器压气机的设计具有较高的效率和流量<sup>[3]</sup>,气动优化的结果增加了叶片的平均应力,导致涡轮增压器气动噪声明显增加<sup>[4-5]</sup>。近年来增压器噪声问题愈加突出,成为发动机系统中最受关注的噪声之一。本文在分析涡轮增压器工作原理的基础上,详细阐述增压器各种噪声的产生机理及涡轮增压器噪声控制技术的现状,并指出涡轮增压器噪声控制技术的发展方向。

## 1 涡轮增压器工作原理及噪声

### 1.1 工作原理

涡轮增压器主要由压气机(压气机壳、叶轮)、涡轮机(涡轮、涡轮壳)、废气旁通阀等组成。工作原理示意图如图1所示,发动机排出的废气一部分通过废气旁通阀,另一部分驱动涡轮转动,涡轮驱动同轴的叶轮旋转,新鲜空气通过进气口被轴向吸入叶轮,气体在叶轮内压缩后再进入扩压器(位于压气机之后,有无叶扩压

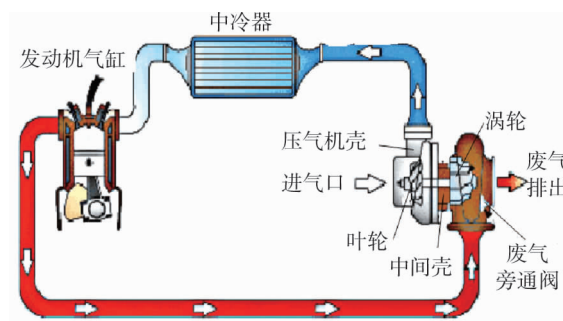


图1 涡轮增压器工作原理示意图

收稿日期:2021-03-20

基金项目:山东省技术创新项目(201810107068);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010909)

第一作者简介:李伟(1983—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为内燃机涡轮增压系统,E-mail:3045014884@qq.com。

\*通信作者简介:李国祥(1965—),男,山东蓬莱人,教授,工学博士,主要研究方向为内燃机排放控制与可靠性提升技术、混合动力新能源汽车技术,E-mail:liguox@sdu.edu.cn。

器与叶片扩压器2种),在扩压器中部分气体动能转化为压力能。为进一步提升增压系统的效率,一般在压气机壳下游安装中冷器,以降低压缩气体的温度,经过中冷器后的压缩气体最终进入发动机气缸。通过废气旁通阀和涡轮的废气汇总后经发动机排气管排至外界。

## 1.2 噪声产生机理

涡轮增压器工作时会产生气动噪声和结构噪声。气动噪声分为 Whoosh 噪声、喘振噪声、叶片音调噪声、电锯噪声、叶顶间隙噪声等。结构噪声分为轴承系统噪声与 Rattle 噪声等。

根据莱特希尔理论,在流体中产生声音有3种机理:1)波动的体积流量——单极子源;2)波动的表面压力——偶极子源;3)自由湍流——四极子源<sup>[6]</sup>。当叶片速度达到或超过声速时会产生单极子源。偶极子源是气动噪声的主要贡献者,尤其在流量小的情况下。四极子源对涡轮增压器而言作用不明显。由于叶片载荷不均匀,大多数噪声由叶轮产生。叶片载荷不均匀与流体运动不稳定密切相关,非定常仿真分析揭示了压气机在小流量下的流动不稳定与噪声之间的联系<sup>[7]</sup>,试验研究证实非设计工况下的不稳定流动产生噪声<sup>[8]</sup>。在设计工况点,流场基本均匀、稳定,当压气机流量减小时,流动变得不均匀和不稳定<sup>[9]</sup>。压气机内部存在2种不稳定:旋转失速和喘振。

### 1.2.1 旋转失速与 Whoosh 噪声

旋转失速是一种二维或三维局部失稳,其不仅引起气流紊乱和气动噪声增加,而且带来交替作用力和转子系统的径向跳动,严重影响增压器的安全运行。根据失速特性,失速可分为模态型和尖峰型<sup>[10-11]</sup>;根据发生位置,失速可分为叶轮失速和扩压器失速,扩压器失速又可分为无叶扩压器失速和叶片扩压器失速。

#### 1.2.1.1 无叶扩压器失速

无叶扩压器失速目前主要由边界层出现径向反向流动<sup>[12]</sup>与中心流动的不稳定性<sup>[13]</sup>引起。无叶扩压器失速有2种:一种是扩压器出口气流的反向流动,另一种是从叶轮轮毂侧和叶轮子午线(从进口到出口顶端的叶轮型线)侧产生的局部分离区域的生长,前者在相对较高的流量系数下可观察到,后者在较低的流量系数下能观察到<sup>[14]</sup>。大尺寸涡旋和反向流动<sup>[15-17]</sup>是无叶扩压器失速发生时流场的2个主要特征,二者互相影响。Sun 等<sup>[18]</sup>认为叶轮泄漏流动和叶轮通道出口的强压力变化是初始分离涡旋形成的原因。Marconcini 等<sup>[19]</sup>对失速时的流场特征进行了非定常仿真分析,失速团的旋转及反向流动清晰可见。

#### 1.2.1.2 叶片扩压器失速

由于受到扩压器叶片角度及形状等的影响,叶片扩压器失速更加复杂<sup>[20]</sup>。叶片扩压器气流分离开始后 1.00~1.26 s 时,叶片扩压器在距离轮毂 20% 的叶片高度上第 8~11 叶片通道内叶片轮毂侧的瞬时绝对速度分布<sup>[21]</sup>如图 2 所示。叶片扩压器失速是由扩压器通道喉口区域附近的堵塞演化引起的。失速首先在叶轮子午线侧附近,然后移动到叶轮轮毂侧,在叶轮轮毂侧附近产生龙卷风型涡旋,由于无叶空间中的边界层分离,导致叶轮轮毂侧附近的喉口区域堵塞,叶片扩压器通道内的堵塞扩展到叶轮通道并最终发展为整级失速。

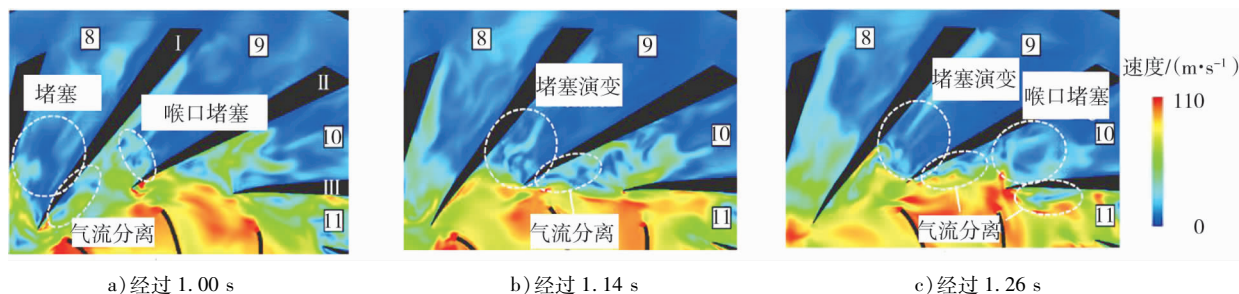


图2 叶片扩压器距轮毂20%叶片高度上第8~11叶片通道内叶片轮毂侧的瞬时绝对速度分布

#### 1.2.1.3 叶轮失速

旋转失速时叶轮通道的流动表现出明显的非均匀特性,反向流动、涡旋和部分通道堵塞是叶轮失速

时流场的主要特征。叶轮流量小于设计流量时,叶片压力侧产生明显大尺度涡旋,继续减小流量,叶轮出口区域反向流动涡旋开始发展,内部流场表现出明显不对称性。叶轮失速时,由于气流角(叶轮进口旋转方向与进入气流的夹角,一般为锐角)明显减小,导致每个叶片通道的出口区域产生大尺寸涡旋,部分叶片出现几乎占据整个通道的与旋转方向相反的涡旋,导致部分叶片通道部分堵塞,3种设计流量 $Q_N$ 下叶轮50%叶片高度位置处相对速度分布的演变<sup>[22]</sup>如图3所示。

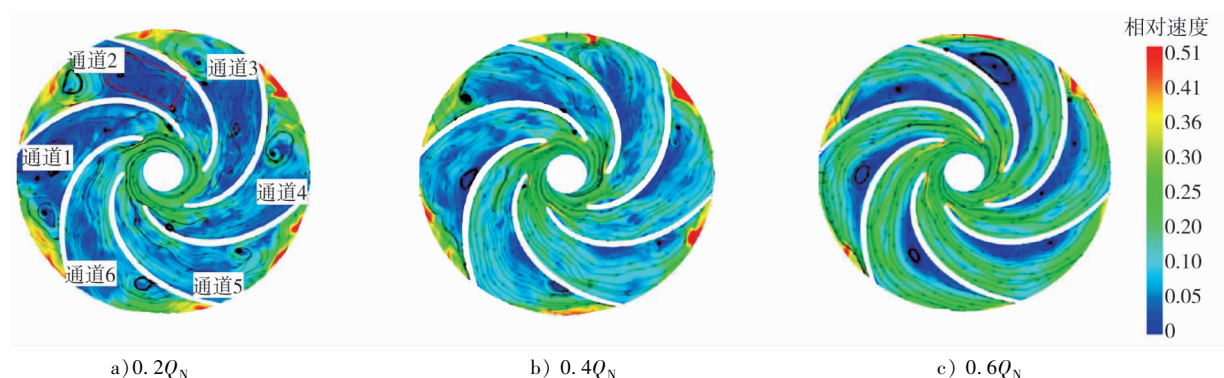


图3 3种流量下叶轮50%叶片高度位置处相对速度的演变

#### 1.2.1.4 开尔文-赫尔姆霍兹不稳定性

在接近叶轮失速时,存在开尔文-赫尔姆霍兹不稳定性,该不稳定现象与旋转失速及旋转不稳定性不同,此时增压器仍在稳定运行,该不稳定是局部的,可能是旋转失速的前兆。流量的减少导致在分离叶片前缘接近子午线位置积累低动量流体,低动量流体与主流流体形成强烈的剪切层区。在接近叶轮失速条件下,剪切层中的强速度梯度使开尔文-赫尔姆霍兹不稳定性发展并导致周期性的涡旋形成<sup>[23]</sup>。

#### 1.2.1.5 Whoosh 噪声

旋转失速是 Whoosh 噪声的来源。叶轮质量流量为 77 g/s 时 50% 叶片高度位置的叶轮子午线速度(子午速度)如图4所示,图4中黑色所示为标记叶轮叶片。当增压器转速不变时,子午线的型线及相对位置固定,故叶轮质量流量为 77 g/s 时,叶轮子午线速度恒定不变,但叶轮在旋转过程中会发生失速团的演化及传播。叶轮旋转 90° 过程中 2 个失速团(①②)的演化及传播如图4所示,其中  $\theta_0$  为叶轮旋转起始角度。2 个失速团导致大约 1.8 kHz 的气动噪声<sup>[24]</sup>。

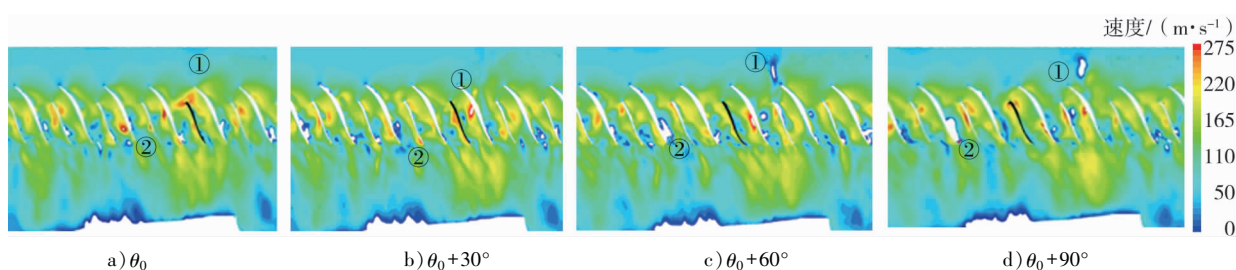


图4 叶轮质量流量为 77 g/s 时叶轮 50% 叶片高度位置失速团的演化

#### 1.2.2 喘振及喘振噪声

出现旋转失速后再减少流量到一定程度,开始出现喘振。喘振是一维不稳定,其特征是整个压气机系统周向平均质量流量的振荡。在较宽的频率范围内,喘振往往与旋转失速并存。在近喘振点,扩压器和叶轮流场明显不规则。失速发生在叶片顶端,反向流动由子午线侧进一步延伸到叶轮上游,叶片通道内轴向速度为负。在近喘振情况下存在流场与声学的耦合,在设计运行工况下没有流场与声学耦合现象的发生。

#### 1.2.3 流道喉舌及叶片音调噪声

叶片音调噪声中最主要是叶片通过频率(blade passing frequency, BPF)噪声,叶片通过频率

$$f = if_0 N,$$

式中: $i$ 为谐次, $f_0$ 为转子旋转频率, $N$ 为叶片数量。

增压器转速越高, $i$ 相同的情况下, $f$ 越高。压气机壳的流道喉舌对叶轮内流体流动及压气机壳流道内的压力分布产生重要影响,由于喉舌对上游气流的作用,叶轮扫过喉舌时,在喉舌附近产生强的湍流,形成涡旋,叶轮通道周期性经历阻塞、畅通的变化,再加上进入气流的扰动,导致叶片压力周期性变化,产生压气机 BPF 噪声。叶片扫过喉舌过程中,部分叶片通道经历典型的阻塞和畅通,如图 5 所示。随着叶片接近喉舌,多个涡旋在叶轮通道 4 内发展,几乎占据了部分叶片的整个通道 4,造成叶片通道 4 阻塞。叶片通过喉舌后,叶片通道 4 逐步畅通,相应流量恢复。涡轮进口流场圆周和轴向方向呈现明显不均匀性,尤其是在喉舌区域。此外,涡轮内部流场存在明显压力和速度梯度。当涡轮扫过喉舌时,涡轮应力周期性变化,再加上进入气流的扰动,产生涡轮机 BPF 噪声。压气机及涡轮机的 BPF 可至 20 kHz 以上。

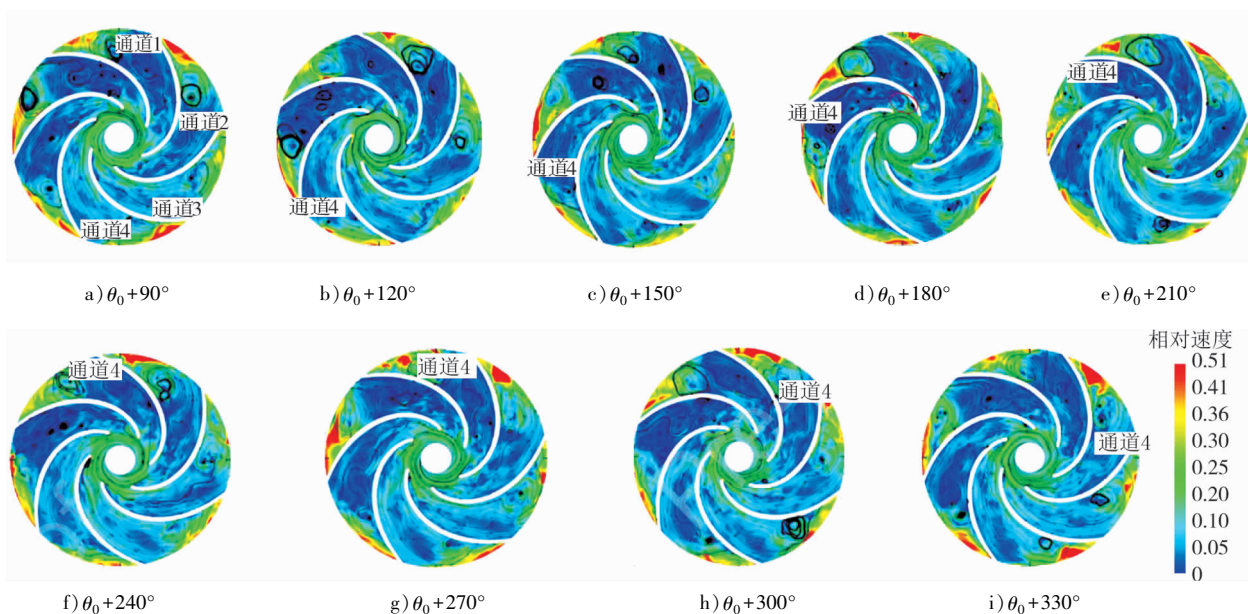


图 5 失速时叶片扫过喉舌不同位置时相对速度的演变

#### 1.2.4 电锯噪声

当叶片速度达到或超过声速时才会产生单极子源。在超声速情况下,旋转激波将会附着在叶片上,单极子源频率是旋转频率的谐波,此类旋转激波噪声称为电锯噪声。在超音速情况下,转子引起的压力场由在上游扩散的激波和膨胀波组成,激波一般位于叶片前缘附近,如果类似锯齿的压力波波形规则,且冲击强度不高,则所有冲击相对于迎面而来的流体以不受干扰的声速传播到叶轮的上游。轴流式涡扇叶片在超音速情况下产生的激波如图 6 所示<sup>[25]</sup>,图 6 中  $Ma$ 、 $Ma'$  分别为涡扇进气口和出气口的马赫数, $M_{rel}$  为  $Ma$  和  $Ma'$  平方和的算术平方根, $x$  方向为类似锯齿的压力波的传播方向。电锯噪声通常发生在发动机高功率工况下。由于附着在叶片上的激波在上游方向可以有效传播,在下游方向却不能,因此压气机壳出口的电锯噪声频率一般在叶片通过频率以下。

#### 1.2.5 旋转不稳定性与叶顶间隙噪声

旋转不稳定性与旋转失速有很大不同,在压气机的稳定范围内存在叶片旋转不稳定性,它不一定导

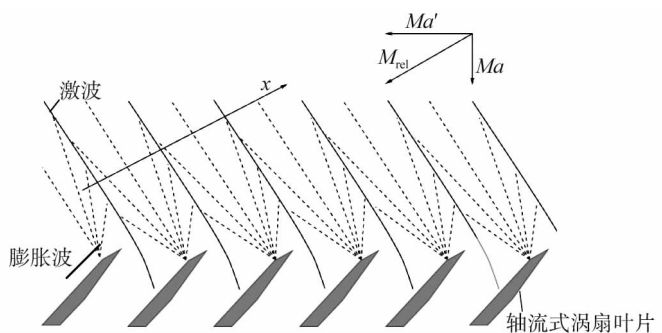


图 6 轴流式发动机涡扇在超音速下产生的激波

致全叶高的旋转失速,但会增加叶顶间隙噪声并激励叶片振动。叶片旋转不稳定沿周向传播,其周向速度一般为转子速度的50%~60%。发生旋转不稳定时,叶顶间隙内存在反向流动,造成叶片顶端区域堵塞,叶片压力面与吸力面之间压差驱动产生的叶顶间隙流动和相邻叶片流动周期性相互作用,在每个叶片顶端形成强烈波动的涡旋,波动的叶顶涡旋沿圆周方向传播<sup>[26]</sup>。在某些情况下不稳定的涡旋脱落,在声谱中产生一个峰值,该现象在叶顶间隙处最为明显,称为叶顶间隙噪声。产生叶顶间隙噪声的3个必要条件是旋转不稳定性、存在相对大的叶顶间隙和叶片压力面及吸力面间存在足够高的压差,这时叶轮的實際流量小于或等于设计流量。实际运行时绝大部分转速为亚音速,故叶顶间隙噪声成为不可忽视的重要噪声。

### 1.2.6 轴承系统噪声

增压器浮动轴承与涡轮转子、扩压器壳均为间隙配合,浮动轴承与涡轮转子、扩压器壳间的油膜分别称为内油膜、外油膜。在轴承间隙中润滑油流量差的推动下,油膜具有推动转子绕轴承中心涡动的固有特性。转子转速较低时,转子中心处在一个稳定的偏心距和偏位角下工作,该转子中心所在位置称为平衡位置。但当转子转速增加到某一数值后,转子中心不再维持在该平衡位置运转,而开始绕平衡位置涡动,即转子中心绕平衡位置作封闭轨迹的运动,因是内油膜驱动,因此该运动又称为内油膜涡动。同理,浮动轴承绕平衡位置的涡动又称为外油膜涡动。涡动的角频率(简称涡动频率)随着增压器转速的升高而升高。内油膜及外油膜涡动相互作用,轴承内油膜间隙明显小于外油膜间隙,内油膜摩擦力明显高于外油膜,导致内油膜温度明显高于外油膜,轴承系统噪声主要由内油膜涡动产生<sup>[27]</sup>。

油膜涡动试验发现<sup>[28]</sup>:转子刚开始旋转时,浮动轴承未旋转,内油膜开始出现涡动,其涡动频率为转子旋转频率的0.5倍;当转子转速约为25 000 r/min时,浮动轴承开始转动,内油膜涡动频率发生跳跃,为转子旋转频率与浮动轴承旋转频率之和的0.5倍;转子转速增加到约58 000 r/min,当内油膜涡动频率与转子固有频率一致时,转子及轴承系统发生强烈振动,出现油膜振荡,此时内油膜涡动频率再次发生跳跃;转子转速约为80 000 r/min时,开始有较明显的外油膜涡动,转子转速约为125 000 r/min时,外油膜涡动不再明显;转子转速约为136 000 r/min时,内油膜涡动频率随转子转速增加而快速下降。急加速及急减速工况容易出现油膜振荡。

### 1.2.7 Rattle 噪声

增压器采用通流能力小的涡轮机提升低速段的增压压力及进气流量。为保证增压器的可靠性,高速段通过废气旁通阀排掉部分废气,避免增压器超速。废气旁通阀普遍采用压气机出口压力驱动,虽然解决了增压器的可靠性问题,但带来了不可忽视的Rattle噪声。为保证废气旁通机构在高温下正常工作,各运动部件之间存在设计间隙,旁通阀开启时,由于缺少约束,零部件间发生振动敲击产生Rattle噪声。此外,进、排气脉冲,发动机标定时部分转速区域增压压力变化剧烈<sup>[29]</sup>,执行器设计、匹配不合理<sup>[30-31]</sup>等也可能产生Rattle噪声。Rattle噪声虽声压级不高,但处于人耳比较敏感的频率段,且由于处于高温环境一般难以设置降噪措施,该噪声容易被识别。

## 2 Whoosh 噪声研究现状

Whoosh噪声是增压器最常见的噪声,也是国内外学者研究较多的增压器噪声。Whoosh噪声是一种与空腔共振无关的空气动力学噪声,是斯特鲁哈尔效应导致的噪声<sup>[32]</sup>。Whoosh噪声与转速有很大关系,最容易出现在较低转速下,稳定运行<sup>[33]</sup>和急加速工况<sup>[34-36]</sup>都可能出现该噪声。旋转失速是Whoosh噪声的来源,在接近喘振工况时表现比较明显,此时改善该噪声最有效的方法是使运行工况远离喘振区域。Sundström等<sup>[37]</sup>研究发现,在压气机壳喉舌的低压区,失速团推进速度局部增大,旋转失速与喘振在很宽的频率范围内共存。Fontanesi等<sup>[38]</sup>分析了带机匣的离心压气机在设计和近喘振工况下的非定常流动,在压气机流量较小的运行点观察到50%旋转频率的音调噪声,在喘振条件下存在旋转失速现象。Mendonca等<sup>[39]</sup>声学模拟发现,叶轮前缘涡旋脱离和通道堵塞时,70%旋转频率的窄带噪声在叶轮低动量

区存在旋转失速,叶轮旋转失速的转速比转子转速低。Pietroniro 等<sup>[40]</sup>基于稳态雷诺平均 Navier Stokes 方程的声学模型分析噪声在较高转速下接近喘振线和堵塞线情况下相对较高。Ha 等<sup>[41]</sup>进行试验研究,当压气机的运行点从最佳效率点移动到失速点时,开始出现流动分离和反向流动,叶轮入口噪声突然增加。在叶轮失速条件下,噪声频率为旋转频率的 90%。随着叶轮质量流量的不断减小,低频范围内的振幅逐渐增大。Liśkiewicz 等<sup>[42]</sup>对离心鼓风机声学特征进行试验,在稳定点发现了次同步窄带扰动,在近喘振区域声学特征与设计工况相比有明显变化。Zhang 等<sup>[43]</sup>认为高转速下失速起始在叶轮入口,在较低转速下失速起始在叶轮出口和扩压器。Karim 等<sup>[44]</sup>认为叶片流道内的旋转流动引起 Whoosh 噪声。

### 3 噪声控制技术综合分析及发展方向

#### 3.1 噪声控制技术综合分析

由于现代消声器的良好阻尼特性及后处理措施,涡轮增压器涡轮机的噪声通常与进气侧和压气机有关。虽然空气滤清器会衰减压气机进口的噪声,但未衰减的高频噪声仍会通过压气机与空气滤清器和中冷器的联接管道传播。噪声问题具有固有的主观性,人类可感知的声音频率大约为 20~20 000 Hz,人最敏感的声音频率大约为 2000~4000 Hz。由于计算机能力的提升和仿真方法的改进,现在已可以采用大涡模拟或分离涡流模拟研究涡轮增压器内部的复杂流动及噪声源。目前主要采取主动降噪和被动降噪 2 种措施降低涡轮增压器的噪声。

##### 3.1.1 主动降噪

旋转失速是决定压气机稳定运转范围的主要限制因素之一,改善旋转失速有利于改善 Whoosh 噪声。旋转失速的研究一直集中在减少旋转失速的发生和扩大稳定工作范围上,空气喷射是扩大压气机稳定工作范围最有效的途径之一。在无叶扩压器中注入相对较高流速的空气,改善低流动区域的流动,阻止从无叶扩压器到叶轮的反向流动,Halawa 等<sup>[45]</sup>、Zhang 等<sup>[46]</sup>通过数值分析和试验讨论了空气注入位置、流量和方向等的变化对失速的影响。在叶轮前缘喷入空气使前缘顶端附近的吸入侧产生更高的压力,改变叶轮前缘顶端泄漏轨迹,改善顶端泄漏流动与吸力面分离流动之间的相互作用。压气机壳流道的非轴对称流场对失速和喘振有显著影响,并引起周向差异,可以建立和开发考虑非均匀流场和周向差异的新压气机壳设计方法,以提高压气机的稳定性<sup>[47]</sup>。可以通过设计带收缩壁的扩压器<sup>[48]</sup>和增加叶片出口角<sup>[49]</sup>来抑制失速团速度。叶片扩压器前缘轮毂侧设计锥形扩压叶片可抑制前缘涡旋的演化,有效防止叶片扩压器在低流量下失速,不仅能有效降低叶片通过频率噪声水平,而且能有效降低宽带噪声,同时能够提升压气机的性能<sup>[50]</sup>。实际应用中还可以通过选用更小的压气机,减小叶轮  $T_{in}$  值(压气机叶片的进气端直径平方和出气端直径平方之比,再乘以 100),增加机匣结构等方式改善 Whoosh 噪声。

改善压力分布不均匀性,以改善叶轮受力,是控制涡轮增压器噪声的有效措施之一。增加叶轮与喉舌的距离<sup>[51-53]</sup>、优化流道设计,可以改善压力分布。增加叶轮叶片数会使得单个叶片受力减小,减小噪声幅值,同时叶片音调频率增加,可能会降低人耳敏感度。采用周向不均匀设计的叶轮可以明显改善人耳听力范围内的噪声<sup>[54]</sup>。

调整轴承间隙或结构等改善油膜涡动是改善轴承系统噪声的最常见措施。合理设计轴承间隙<sup>[55]</sup>,轴承内、外表面开槽<sup>[56]</sup>,采用半浮动轴承<sup>[57]</sup>等可以改善油膜涡动。Kumah 等<sup>[58]</sup>研究发现涡轮端和压气机端浮动轴承采用不同内、外间隙更有利于改善油膜涡动,并设计出“不同轴承间隙”结构。

增压器执行器增加稳压腔结构,降低执行器入口的压力脉冲,有利于改善 Rattle 噪声。若空间排布允许,该稳压腔还可以单独排布在脉冲电磁阀与执行器之间<sup>[59-60]</sup>;如果空间排布受限,可以考虑将稳压腔与执行器集成在一起。采取减小旁通阀门机构零部件配合间隙或增加弹性垫片等方式消除传动片与套座、阀门盖与阀杆之间的间隙<sup>[61]</sup>,限制零部件运动自由度,调整发动机控制策略控制增压压力变化,优化执行器的控制也是常用降噪措施。Toussaint 等<sup>[62]</sup>将普通扁平式旁通阀门调整为新型整体式球形阀门结构,与扁平旁通阀门相比,在可控性、噪声、可靠性等方面存在显著优势,降低对噪声的敏感性,但新型

整体式球形阀门铸造及加工工艺复杂,成本增加。

### 3.1.2 被动降噪

消声器是有效控制增压器噪声的被动措施,在压气机进口<sup>[63-64]</sup>及出口安装合适的消声器可以改善特定频率段的噪声。有的增压器厂家还将压气机壳和消声器集成,这样可以部分解决空间排布问题。通过增加管道壁厚或将管道材料由塑料调整为金属等,在一定程度上改善噪声,但会增加成本。对管道或后处理进行被动声学包裹也会在一定程度上改善噪声<sup>[65]</sup>,但该方法除增加成本外,还需考虑空间排布问题,同时还要考虑包裹联接可靠性问题,该措施实际应用不多。对于海洋用的大型涡轮增压器,通用的措施是用隔音外壳封闭整个装置。除管道外,中冷器及后处理装置是与涡轮增压器相关的部件,中冷器及后处理装置可以作为消声器来控制进排气系统噪声。

进气管道形状影响叶轮周向压力分布,压气机前采用普通直管对喘振线的改善表现最差,锥形管不仅改善了喘振线,而且在大流量时还能适当增加压气机的压比,能适当提升压气机性能。压气机进口增加预旋装置有利于改善喘振,但预旋装置主要在研发阶段,实际应用较少。自循环套管处理是一种广泛应用的被动控制方法,可扩展高压比离心压缩机的工作范围。优化的非对称自循环套管处理比对称的自循环套管处理更能有效提高压气机的稳定性,可以减少主叶片入口处的周向流动畸变。

### 3.1.3 关系噪声的过程控制

除主动降噪和被动降噪外,关系噪声的过程控制容易被忽略。工程应用中需识别关系噪声的重要产品特性及过程特性,进行针对性过程控制。流道铸瘤、铸孔,铸造或加工过程的流道偏摆,流道毛刺及飞边等尖锐结构,贯穿流道的螺纹孔结构,叶轮和涡轮不合理的尖锐去重结构等都会对增压器噪声产生不利影响。改善压气机和涡轮机的流道粗糙度可以改善流场气流的均匀性,有利于改善噪声。

## 3.2 发展方向

过去10 a来计算机设备和仿真方法的发展提高了数值模拟方法合理预测气动噪声的能力。为更好地进行数值分析和试验研究,需高精度噪声测量设备,大学与产业的合作有待加强。由于没有完整描述流动不稳定性和固体表面非定常压力载荷的时空演化,同时缺乏声音产生机制的知识,限制了压气机及增压器在声学性能方面的优化。虽然对旋转失速及其相对不稳定性的研究已有多年,但在一种新的压气机系统中,仍无法有效预测失速。进排气脉冲有利于提高发动机性能,但进、排气脉冲对增压器噪声的影响还不清晰。增压器朝着小型化、更高压比和更高转速方向发展,必将进一步凸显增压器气动噪声控制的重要性。压气机气动噪声是涡轮增压器噪声控制的重点及难点,只有联合主动和被动降噪措施,才能有效控制该噪声。相比于压气机,对涡轮机的研究偏少,近几年涡轮机叶片音调噪声愈加突出。涡轮增压器与整个发动机系统乃至整车系统相结合,进行系统联合控制将是后续增压器噪声控制的方向。将来的工作旨在揭示流场不稳定性、噪声源和观测到的噪声之间的相关性。

## 参考文献:

- [1] TENG C, HOMCO S. Investigation of compressor Whoosh noise in automotive turbochargers[J]. SAE Int J Passeng Cars Mech Syst, 2009, 2(1): 1345-1351. doi:10.4271/2009-01-2053.
- [2] RAITOR T, NEISE W. Sound generation in centrifugal compressors[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 314(3): 738-756.
- [3] RODGERS C. High specific speed, high inducer tip mach number, centrifugal compressor[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003. Atlanta, Georgia, USA: Turbo Expo 2003, 6: 799-806.
- [4] FONTANESI S, PALTRINIERI S, CANTORE G. CFD analysis of the acoustic behavior of a centrifugal compressor for high performance engine application[J]. Energy Proced, 2014, 45: 759-768.
- [5] RÄMMAL H, ABOM M, HANS R, MATS A. Acoustics of turbochargers[C]. Illinois, USA: SAE 2007 Noise and Vibration Conference and Exhibition, 2007.
- [6] FLOWCS WILLIAMS J E, HAWKINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1969, 264(1151): 321-342.

- [7] GALINDO J, TISEIRA A, NAVARRO R, et al. Influence of tip clearance on flow behavior and noise generation of centrifugal compressors in near-surge conditions[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2015, 52: 129–139.
- [8] KABRAL R, ÅBOM M. Investigation of turbocharger compressor surge inception by means of an acoustic two-port model[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 412: 270–286.
- [9] YOON Y S, SONG S J. Analysis and measurement of the impact of diffuser width on rotating stall in centrifugal compressors[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(3): 895–905.
- [10] HAYNES J M, HENDRICKS G J, EPSTEIN A H. Active stabilization of rotating stall in a three-stage axial compressor[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1994, 116(2): 226–239.
- [11] VO H D, TAN C S, GREITZER E M. Criteria for spike initiated rotating stall[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2008, 130(1): 11–23.
- [12] DOU H S, MIZUKI S. Analysis of the flow in vaneless diffusers with large width-to-radius ratios[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(1): 193–201.
- [13] YOSHINOBU T, YOSHIKI Y, YASUMASA M. Study of vaneless diffuser rotating stall based on two-dimensional inviscid flow analysis[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1996, 118(1): 123–127.
- [14] ZHANG Lei, HE Ruiyang, WANG Songling, et al. A review of rotating stall in vaneless diffuser of centrifugal compressor[J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(2): 323–342.
- [15] OHUCHIDA S, KAWAKUBO T, TAMAKI H. Experimental study of rotating stall flow in vaneless diffuser of a centrifugal compressor[C]//14th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Hawaii, USA: Fluid System Technik, 2012: 161–167.
- [16] HU Chenxing, YANG Xiaojian, ZHU Xiaocheng, et al. Stability and structural sensitivity analysis of the turbulent flow in the narrow vaneless diffuser with mean flow method[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 177: 46–57.
- [17] YAMADA K, FURUKAWA M, ARAI H, et al. Evolution of reverse flow in a transonic centrifugal compressor at near-surge[C]. North Carolina, USA: ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2017.
- [18] SUN Yongrui, YANG Chuanlei, WANG Hechuan, et al. Numerical analysis of separate vortex in the diffuser[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials. Paris, France: ICIMM, 2016: 48–51.
- [19] MARCONCINI M, BIANCHINI A, CHECCUCCI M, et al. A three-dimensional time accurate computational fluid dynamics simulation of the flow field inside a vaneless diffuser during rotating stall conditions[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(2): 1–9.
- [20] XUE Xiang, WANG Tong, ZHANG Tongtong, et al. Mechanism of stall and surge in a centrifugal compressor with a variable vaned diffuser[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(6): 1222–1231.
- [21] NOBUMIICHI F, TETSUYA I, YUTAKA O. Evolution process of diffuser stall in a centrifugal compressor with vaned diffuser[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2019, 141(4): 1009–1018.
- [22] ZHANG Ning, JIANG Junxian, GAO Bo, et al. DDES analysis of unsteady flow evolution and pressure pulsation at off-design condition of a centrifugal pump[J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 193–204.
- [23] BOUSQUET Y, BINDER N, DUFOR G, et al. Numerical investigation of Kelvin-Helmholtz instability in a centrifugal compressor operating near stall[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2016, 138(7): 1007–1015.
- [24] BROATCH A, GALINDO J, NAVARRO R, et al. Numerical and experimental analysis of automotive turbocharger compressor aeroacoustics at different operating conditions[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016, 61: 245–255.
- [25] MCALPINE A, FISHER M J, TESTER B J. “Buzz-saw” noise: a comparison of measurement with prediction[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 290(3): 1202–1233.
- [26] KAMEIER F, NEISE W. Rotating blade flow instability as a source of noise in axial turbomachines[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 203(5): 833–853.
- [27] NGUYEN-SCHÄFER H. Aero and vibroacoustics of automotive turbochargers[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2013.
- [28] SCHWEIZER B. Dynamics and stability of turbocharger rotors[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2010, 80(9): 1017–1043.
- [29] 陈文婷, 雷本刚, 刘爽, 等. 涡轮增压器废气旁通阀噪声改善研究[C]//2014 中国汽车工程学会年会论文集. 上海: 2014 中国汽车工程学会年会, 2014: 1441–1443.

- CHEN Wenting, LEI Bengang, LIU Shuang, et al. Study of turbocharger wastegate noise improvement [C]//SAE-China Congress Selected Papers 2014. Shanghai:2014 SAECE,2014:1441-1443.
- [30] 杨景玲,李克俊,张东,等. 发动机增压器异响产生机理及解决方法研究[J]. 内燃机工程,2014,35(6):101-105.
- YANG Jingling, LI Kejun, ZHANG Dong, et al. Research on turbocharger abnormal noise generation mechanism and resolution method[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2014,35(6):101-105.
- [31] 谢正海,陈如彬,王应红. 涡轮增压器 Rattle 噪声分析和对策[J]. 上海汽车,2019(8):43-49.
- [32] GALINDO J, TISEIRA A, NAVARRO R, et al. Influence of tip clearance on flow behavior and noise generation of centrifugal compressors in near-surge conditions[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2015,52:129-139.
- [33] 王蒙蒙. 商用车 Hiss 噪声优化[J]. 内燃机与配件,2016(7):1-4.
- WANG Mengmeng. Hiss noise optimize of commercial vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Parts,2016(7):1-4.
- [34] ANDERSEN J, LINDSTRÖM F, WESTIN F. Surge definitions for radial compressors in automotive turbochargers[J]. SAE Int. J. Engines,2008,1(1):218-231.
- [35] 黄保科,李凯,胡必谦. 柴油机增压器 HISS 噪声分析及降噪措施研究[J]. 汽车实用技术,2017(21):126-128.
- HUANG Baoke, LI Kai, HU Biqian. HISS noise analyze and reducing measure research on turbocharger of diesel engine[J]. Automobile Technology,2017(21):126-128.
- [36] 高东东,陈玮,范习民,等. 降低增压汽油机 HISS 声的研究[J]. 内燃机与动力装置,2018,35(3):73-78.
- GAO Dongdong, CHEN Wei, FAN Ximin, et al. Hiss noise optimization for a turbocharged gasoline engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant,2018,35(3):73-78.
- [37] SUNDSTRÖM E, SEMLITSCH B, MIHĂESCU M. Acoustic signature of flow instabilities in radial compressors[J]. Journal of Sound and Vibration,2018,434:221-236.
- [38] FONTANESI S, PALTRINIERI S, CANTORE G. CFD analysis of the acoustic behavior of a centrifugal compressor for high performance engine application[J]. Energy Procedia,2014,45:759-768.
- [39] MENDONCA F, BARIS O, CAPON G. Simulation of radial compressor aeroacoustics using CFD [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2012. Glasgow, UK: ASME,2012:1823-1832. doi: 10.1115/GT2012-70028.
- [40] PIETRONIRO A G, MIHAESCU M, ABOM M, et al. A steady-state based investigation of automotive turbocharger compressor noise [C]. Sydney, Australia: 10th International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress; the European Automotive Noise Conference,2018.
- [41] HA K K, JEONG T B, KANG S H, et al. Experimental investigation on aero-acoustic characteristics of a centrifugal compressor for the fuel-cell vehicle[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2013,27(11):3287-3297.
- [42] LIŚKIEWICZ G, HORODKO L, STICKLAND M, et al. Identification of phenomena preceding blower surge by means of pressure spectral maps[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2014,54:267-278.
- [43] ZHANG Hanzhi, YANG Ce, WANG Wenli, et al. Investigation on the casing static pressure distribution and stall behaviors in a centrifugal compressor with volute[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019,160:318-331.
- [44] KARIM A, MIAZGOWICZ K, LIZOTTE B, et al. Computational aero-acoustics simulation of compressor whoosh noise in automotive turbochargers [C]//SAE 2013 Noise and Vibration Conference and Exhibition. Michigan, USA: Society of Automotive Engineers,2013:15272-15279.
- [45] HALAWA T, ALQARADAWI M, BADR O, et al. Numerical investigation of rotating stall characteristics and active stall control in centrifugal compressors [C]//ASME Power Conference 2014, Vol. 2. Simple and Combined Cycles: ASME (American Society of Mechanical Engineers) 2013 Power Conference. Baltimore, Maryland, USA: ASME Power Conference, 2014,2.
- [46] ZHANG Lei, WANG Rui, YUAN Wei, et al. Simulation of air jets for controlling stall in a centrifugal fan[J]. Journal of Mechanical Engineering Science,2015,229(11):2045-2055.
- [47] ZHENG Xinqing, SUN Zhenzhong, KAWAKUBO T, et al. Experimental investigation of surge and stall in a turbocharger centrifugal compressor with a vaned diffuser[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2017,82: 493-506.
- [48] SHENG Feng, CHEN Hua, ZHU Xiaocheng, et al. A three-dimensional compressible flow model for rotating waves in vaneless diffusers with unparallel walls[J]. Journal of Mechanical Engineering Science,2012,226(9): 2230-2249.
- [49] HE Yang, CHEN Haisheng, XU Yujie, et al. Compression performance optimization considering variable charge pressure in an

- adiabatic compressed air energy storage system[J]. Energy, 2018, 165: 349–359.
- [50] FUJISAWA N, HARA S, OHTA Y. Unsteady behavior of leading-edge vortex and diffuser stall inception in a centrifugal compressor with vaned diffuser[J]. Journal of Thermal Science, 2016, 25(1): 13–21.
- [51] 付大伟, 任家潮, 樊士贡. 柴油机增压器 BPF 噪声控制试验研究[J]. 内燃机, 2019(1): 33–34.  
FU Dawei, REN Jiachao, FAN Shigong. The experiment of turbocharger BPF (blade passing frequency) noise on diesel engine [J]. Internal Combustion Engines, 2019(1): 33–34.
- [52] 郑光清, 楼狄明. 车用柴油机涡轮增压器涡轮 BPF 噪声的试验研究[J]. 柴油机, 2008, 30(1): 42–44.  
ZHENG Guangqing, LOU Diming. Experiment on turbocharger turbine BPF (blade passing frequency) noise on automotive diesel engine[J]. Diesel Engine, 2008, 30(1): 42–44.
- [53] 雷淋森, 陆荣荣, 周涛, 等. 某发动机增压器噪音控制及应用[J]. 汽车实用技术, 2018(24): 187–188.  
LEI Linsen, LU Rongrong, ZHOU Tao, et al. The control and application of some engine's turbo charger noise[J]. Automobile Technology, 2018(24): 187–188.
- [54] WU Xianjun, CAO Jianhua. Optimization of a-weighted discrete noise using unequally spaced blades[C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, And Air; Vol. 6 Pt. B: Turbomachinery: Radial Turbomachinery Aerodynamics. Barcelona, Spain: ASME Turbo Expo 2006, 2006: 1625–1628.
- [55] 和法贵, 叶文婷, 牟汉宗, 等. 车辆加速过程中增压器哨声异响的研究[J]. 内燃机与动力装置, 2015, 32(4): 5–9.  
HE Fagui, YE Wenting, MU Hanzong, et al. Research on abnormal noise from a turbocharger in the process of vehicle acceleration[J]. Internal Combustion Engine & PowerPlant, 2015, 32(4): 5–9.
- [56] 张良良. 增压器引起的车内哨声产生机理及控制研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(4): 613–617.  
ZHANG Liangliang. Investigation on generating mechanism and controlling of vehicle inner whistler noise from engine turbocharger[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(4): 613–617.
- [57] 刘伟. 小型涡轮增压器一体式半浮动轴承系统设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
LIU Wei. System design of integrated semi floating bearing for small size turbocharger[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [58] KUMAH H, INOUE T, ISOGAI T, et al. Development of reduction method for whirl noise on turbocharger[C]//2007 Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition Papers. Warrendale, USA: Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition, 2007: 31714–31723.
- [59] 张霖, 曹权佐, 王剑锋, 等. 涡轮增压器废气旁通阀异响的分析研究[J]. 汽车实用技术, 2019(11): 46–48.  
ZHANG Lin, CAO Quanzuo, WANG Jianfeng, et al. Analysis and research on abnormal noise of turbocharger wastegate[J]. Automobile Technology, 2019(11): 46–48.
- [60] 郑福维, 王晖, 施长宏, 等. 汽车涡轮增压器旁通阀敲击涡轮壳噪声优化研究[J]. 汽车实用技术, 2018(14): 45–47.  
ZHENG Fuwei, WANG Hui, SHI Changhong, et al. Study on optimization of the shell of the turbocharger beaten by boost pressure control valve noise[J]. Automobile Technology, 2018(14): 45–47.
- [61] 侯亦波, 许涛, 陆荣荣, 等. 某汽油机涡轮增压器废气旁通阀噪声优化[J]. 汽车实用技术, 2018(24): 61–62.  
HOU Yibo, XU Tao, LU Rongrong, et al. Optimization of exhaust gas bypass valve of turbo charger of some gasoline engine [J]. Automobile Technology, 2018(24): 61–62.
- [62] TOUSSAINT L, MARQUES M, MORAND N, et al. Improvement of a turbocharger by-pass valve and impact on performance, controllability, noise and durability science direct[C]//11th International Conference on Turbochargers and Turbocharging Papers. London, UK: 11th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, 2014: 137–146.
- [63] 温华兵, 徐文江, 鲍苏宁, 等. 柴油机废气涡轮增压器噪声机理及性能试验研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(1): 76–80.  
WEN Huabing, XU Wenjiang, BAO Suning, et al. Experimental research on noise characteristics and mechanism of marine diesel engine turbocharger[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(1): 76–80.
- [64] LIU Chen, CAO Yipeng, LIU Yang, et al. Numerical and experimental analyses of intake silencer and its effects on turbocharger compressor performance[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(3): 1–15.
- [65] 周景航, 田大洋. 某 1.4 T 汽油发动机涡轮增压器 BPF 噪声问题试验研究[J]. 内燃机与配件, 2017(5): 60–62.  
ZHOU Jinghang, TIAN Dayang. Experiment on turbocharger BPF (blade passing frequency) noise on 1.4 T gasoline engine [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2017(5): 60–62.