

# 船用柴油机振动噪声控制技术研究现状及发展趋势

景国辉<sup>1</sup>, 沈建平<sup>2</sup>

(1. 海军驻七一一研究所军事代表室, 上海 200090; 2. 七一一研究所, 上海 200090)

**摘要:** 船用柴油机的振动噪声水平对船舶的舒适性有着重要影响, 振动噪声指标已和功率密度、尺寸重量等性能指标一起, 成为衡量船用柴油机性能的重要指标。从声源识别技术、进排气噪声控制设计技术、低噪声设计预报技术、有源消声技术等方面入手, 介绍了船用柴油机振动噪声控制技术的研究现状; 并提出了未来振动噪声控制技术研究方向和发展趋势。可为相关技术研究、产品开发、系统设计分析提供指导。

**关键词:** 船用柴油机; 振动; 噪声; 控制

**中图分类号:** TK421      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4357(2015)04-0001-05

## The Development and Trend of Vibration and Noise Control Technology of Marine Diesel Engines

Jing Guohui<sup>1</sup>, Shen Jianping<sup>2</sup>

(1. Naval Deputy Office of Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090;  
2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

**Abstract:** The vibration and noise level of marine diesels has big influence on the comfort property of ships, which has been the important index of engine performance as well as power density, volume and weight and so on. The development of identification and separation of noise source, the intake and exhaust noise control technique, the modern prediction method of low noise and new findings of noise control method are presented. Moreover, the status and development trend of noise control technology of internal combustion engines is proposed, which provides reference for technology investigations, product development and system design.

**Key words:** marine diesel; vibration; noise; control

## 0 引言

柴油机为船舶的主要动力源之一。不同型号的柴油机辐射噪声级不同, 但一般都高达 105 ~ 110dBA 及以上。近几年, 随着柴油机不断向高功率、高转速、轻量化发展, 其振动和噪声问题变得更为突出。高强度的辐射噪声会直接激励船体结构, 引起结构噪声向水中辐射或向其它舱室辐射,

影响船舶的声隐身性能和舱室的舒适性能; 后者导致船员工作时沟通困难、注意力难以集中。

国外多家权威机构在对柴油机发展做预测时, 都将降低振动噪声作为关键课题。英国 RICARDO 公司在预测柴油机工业所面临的未来挑战中, 将环境压力放在第一位。减少柴油机对环境影响的压力主要表现在对柴油机排放和噪声法规的制定和严格执行上<sup>[1]</sup>。奥地利 AVL 公司在讨论柴油机发展的总趋势时认为: 在柴油机的发展问题上, 最具有挑

战性的是控制排放污染、噪声、振动和行驶平顺性以及为取得满意性能所耗的成本与所需技术间的协调关系<sup>[2]</sup>。德国 FEV 公司在探讨柴油机技术的发展时认为：降低噪声，满足法规要求是近年来发展的明显特点，并且这种发展还会进一步加强<sup>[3]</sup>。由此可见，对于柴油机领域的研究和技术开发而言，柴油机减振降噪技术在相当长的时间里仍将是一个重要课题。

本文将从声源识别技术、进排气噪声控制设计技术、低噪声设计预报技术、有源消声技术等方面入手，介绍柴油机振动噪声控制技术的研究现状和发展趋势。

## 1 柴油机振动噪声控制的需求和必要性

与发达国家相比，我国在柴油机振动噪声控制技术方面的研究起步较晚，基础薄弱，缺乏相应的噪声特性数据库、噪声源识别方法、精确的噪声预报方法和规范的设计研发体系，导致设计的产品声学性能偏低，设计和预估误差偏大，急需在现有基础上开展相关技术的研究。

(1) 柴油机噪声控制设计技术薄弱，急需突破关键技术，形成设计规范

从国内外柴油机噪声控制设计技术比较可以看出，国内主要是局部控制，虽然在外围噪声控制中取得了一定成果，但未能掌握该领域的最新成果和核心技术，缺乏系统全面的噪声控制理念和流程，自主创新能力低。急需突破柴油机噪声源识别、本机燃烧噪声机理研究、进排气噪声控制及箱体隔声设计等关键技术的研究，并结合现有的外部噪声控制设计手段，形成我国自主的柴油机噪声控制设计方法或规范。

(2) 未来对船舶声隐身性能要求越来越高，急需低噪声柴油机动力及其装置

随着大型船舶的规划和建造，对大功率轻量化柴油机的需求急剧增加。目前只能选择二代柴油机产品，但该类柴油机的噪声水平相对较高，难于满足船舶声隐身性能和舒适性能的要求，因此急需对柴油机振动噪声控制进行研究，降低其振动噪声水平。

(3) 船舶法规日趋严格，要求进一步降低噪声

近年来，船舶节能环保的国际新规范、新公约不断提出，特别是对船舶舒适性和安全性的要求，避免因船上噪声引起的船员疲劳等健康问题导致船舶航行安全。国际海事组织和各国船级社陆续修订

船舶噪声、振动指标，旨在提高船舶舒适性和保护船员身心健康。CCS、DNV 等船级社近年来相继修订的规范对船舶振动噪声做出了限制要求，按舒适度等级划分。国际海事组织近期修改了船舶噪声等级规则，工作和生活舱室噪声限值普降 5dB (A)，新规范于 2014 年 7 月 1 日对新船强制执行。由于柴油机是船舶主要的噪声源，新规范对于柴油机的噪声控制要求也相应提高。新的噪声规范与标准对我国船舶企业和柴油机等配套企业提出了较为严苛的要求，提升了入级的技术门槛，如果不能有效控制柴油机等动力设备的振动噪声，将严重制约我国由造船大国向造船强国发展。

近几年来，国内柴油机科研机构、高校、生产厂家通过源控制、传播路径控制等方法，开展了一些柴油机噪声控制技术的研究，也取得了一定的研究结果。但这些研究多为局部的和机理性的，没有系统性，没有形成规范的设计和试验验证方法，很难明显提升柴油机的噪声控制水平。可见，系统地开展柴油机噪声控制设计与试验验证研究对我国船舶工业的发展和整体技术水平的提升是一项必要而急需的任务。

## 2 国内外研究现状

### 2.1 国外研究现状

#### (1) 柴油机声源识别技术

为控制柴油机噪声，必须深入研究各类噪声产生的机理及其识别技术、预报方法和相应的控制方法。工业发达国家一直非常重视低噪声柴油机的设计开发，投入了大量的人力、物力和财力，建立了较为精确的噪声识别方法、噪声预报方法，开发了先进的噪声控制技术。如美国佐治亚理工学院、宾西法尼亚州立大学，英国南安普顿大学、利物浦大学，加拿大舍布鲁克大学，日本东京大学，韩国高等理工学院等国际著名高校早在 20 世纪 60 年代就已经开展噪声源识别方法及其特性测量方法的研究，经过半个世纪的发展，在噪声源识别与分离方法、噪声特性测量和分析方法等方面取得了长足进步，并且几乎掌握了目前该领域内全部最新技术和成果，在今后几十年内，柴油机噪声源及特性识别技术仍将是工业发达国家的一项重要研究课题，并将对产品的质量提升和更新换代起到积极的促进作用。

#### (2) 柴油机进排气噪声控制设计技术

柴油机的进排气噪声是柴油机的主要噪声源之一，在进排气噪声预报和消声器设计研究方面，国

外一直走在前列。英国南安普顿大学声振研究所 (ISVR) 的 Davies 一直致力于发动机进排气系统的声学设计研究。他指出：合理的设计过程是基于采用可预测声学模拟技术，即任何一个复杂的几何模型都可以分解为一系列简单的单元或腔体来模拟。美国的 Universal Silencer 公司研制的火星熄灭消声器，其火星熄灭率可达 98% 以上，且消声量也高达 30dBA。美国的肯塔基大学与 Universal Silencer 公司及 Cummins 公司合作开发出基于边界元法的消声器声学预测程序；俄亥俄州立大学与欧文斯-康宁公司合作开发出消声器三维声学计算程序；英国的拉夫堡大学在多家公司的资助下开发出基于有限元法的消声器声学预测程序；英国的南安普顿大学、瑞典的皇家理工学院、韩国的国立高等科技大学等也相继开发出各具特色的进排气系统声学计算程序。

### (3) 柴油机低噪声设计预报技术

国外科研机构十分重视低噪声柴油机的设计开发，尤其是船用低噪声柴油机。从 20 世纪 80 年代初到现在，舰船柴油机的发展基本经历了三个技术发展时期，如表 1。从中可以看出，从二代机开始，国外就十分关注柴油机低噪声设计的要求，但控制技术主要集中在柴油机的外围，采取的是被动的手段，噪声控制水平有限；而在三代机的设计开发过程中，已从设计阶段就开始进行振动噪声指标的控制，使柴油机性能设计与低噪声设计并行开展。

表 1 国外舰船柴油机发展历程

时间	20 世纪 80 年代	20 世纪 90 年代	21 世纪
强化指标	20 ~ 24	24 ~ 28	28 ~ 32
新机研发时间	10 年左右		3 ~ 4 年
关键技术	高效率增压器技术、单级增压技术	高压增压技术、机械式高压燃油喷射技术、减振降噪及抗冲击技	超高压增压技术、智能化技术
典型柴油机	TBD234 等	MTU956、MTU396、20VPA6B 等	MTU8000、MAN28/33D 等
简称	一代机	二代机	三代机

针对二代和三代柴油机，国外凭借其先进的设计手段和现代化工艺，使船用柴油机的噪声已达到了较低水平，如卡特彼勒、MTU、SEMT、AVL、FEV 等公司凭借其先进的设计手段和方法，已经形成了比较成熟的、实用的低噪声大功率柴油机设计方法，并已实现从“试验 + 经验设计”为主向

“预测设计”为主的设计方式的转变。例如 FEV 开发了高性能的数值分析软件；AVL 开发的柴油机工作过程预测软件涉及柴油机燃烧、活塞运动、振动噪声等多个方面；Wartsila 公司在柴油机设计中，将振动噪声和抗冲击性能作为柴油机的重要指标之一，运用了噪声预测技术来指导柴油机的设计，形成了柴油机动力装置的声学预测、冲击评估、优化设计及试验验证为一体的低噪声设计方法，并与柴油机的设计、试验及应用的整个过程紧密结合（如图 1）。在低噪声设计过程中，通过新型的消声装置、燃烧室结构和燃油喷射方式、耐高温高分子阻尼材料等技术的研究及应用，使柴油机本机噪声控制已达到较高的水平，其中船用中低速柴油机噪声已降低了 5dBA 以上。

### (4) 柴油机有源消声技术

近年来，有源消声控制技术发展甚为迅速，该技术具有针对性强、效果好的特点，能够有效弥补被动隔声技术在低频段的劣势。由于噪声有源控制技术与传统的被动控制技术相比有明显的优势，大多数发达和发展中国家均投入大量的人力、物力开展研究。总体而言，国外的研究水平大大领先国内，主要体现在基础理论、模拟分析、控制技术和设计水平等方面。比较著名的如英国南安普顿大学声与振动研究所、美国弗吉尼亚理工大学、澳大利亚阿德莱德大学等的研究团队，一直在噪声有源控制的基础理论和应用技术方面进行着孜孜不倦的研究。美、欧、日、韩等国针对汽车的排气噪声已经开发出有源消声器。目前，有源消声技术主要集中在管道消声和小封闭空间的声学控制，而将其应用在柴油机箱装体消声中较少<sup>[4]</sup>。英国伯明翰青年大学对柴电机箱装体开展了有源噪声控制技术研究，该研究通过控制柴油机辐射噪声的能量密度，将柴油机箱装体总辐射噪声降低了 2dBA 以上，部分特征频率可降低 15dB 以上，如图 2 所示。

## 2.2 国内研究现状

国内的船用柴油机研究主要经历了引进仿制、消化吸收、技术创新的发展历程，国家也投入一些经费用于引进柴油机的反设计研究，包括振动噪声的反设计，取得了一定成果。

### (1) 柴油机声源识别技术

20 世纪 80 年代，一些高校，如清华大学、合肥工业大学、北京航空航天大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、天津大学、同济大学等先后开展了噪声源识别研究，并取得了一些研究成果。如哈尔滨工程大学在柴油机噪声源识别、预报和控制

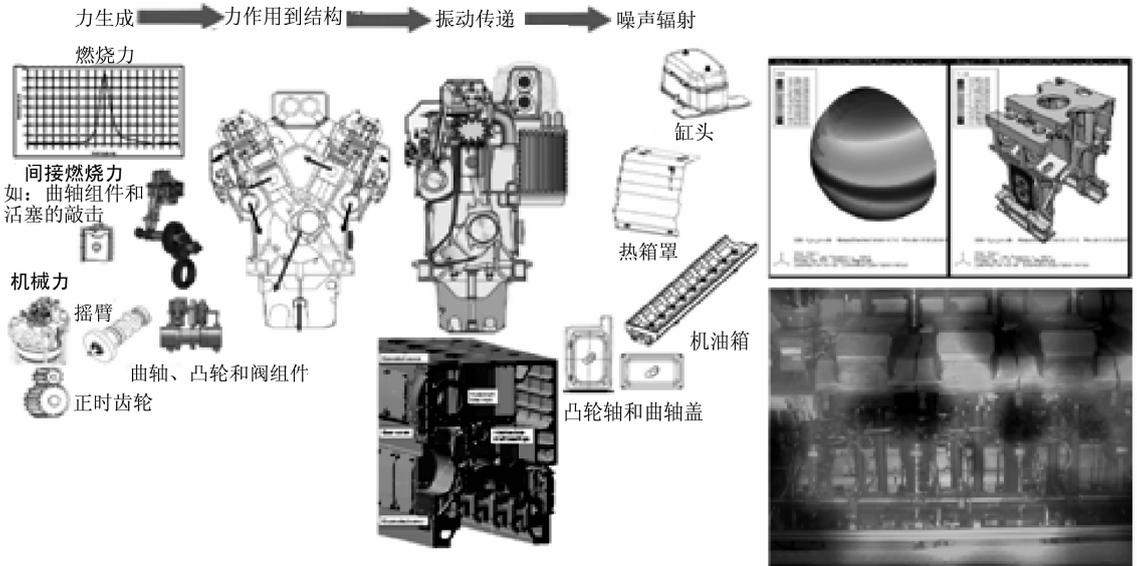


图 1 Wartsila 公司低噪声柴油机设计流程

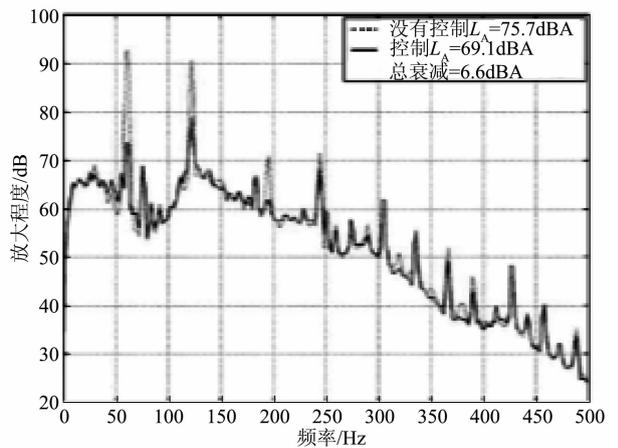


图 2 柴电机组有源消声控制

等方面做过较为深入的研究，具有良好的研究基础和丰富的实践经验。天津大学开展了基于逆边界元法的柴油机噪声源识别方法研究。但是迄今为止，还没有一个单位对柴油机各类主要噪声源及特性的识别做过系统的研究。总之，我国在柴油机主要噪声源及特性识别技术方面的研究还不够全面和深入，处于国际领先水平的成果很少，人才队伍和水平还不够理想，基础设施较差，研究经费投入不多。因此，若能较好地整合国内人力和物力资源，加大研究投入，并进行系统深入的研究，将对我国柴油机主要噪声源及特性识别技术起到积极作用，缩短与发达国家间的差距，在较短的时间内达到或接近国际先进水平。

### (2) 柴油机进排气消声系统设计技术

国内开展柴油机进排气消声系统设计技术的单位主要有哈尔滨工程大学、清华大学、吉林大学、

浙江大学、北京理工大学、中船重工七一一研究所等单位。哈尔滨工程大学从 20 世纪 80 年代开始致力于进排气消声器研究，在消声器性能预报、测试和设计等方面取得了大量研究成果，是国际上该领域内最具影响力的一个研究团体，先后承担了多项船用柴油机进排气消声器的设计开发和型号生产任务。中船重工七一一研究所开发了不同系列等级的消声器和火星熄灭消声器，并分别应用于 MAN、Wartsila、Caterpillar 等柴油机组，取得了非常理想的声学效果。

但从结构和性能的比较显示：国内开发的柴油机进排气消声器仍然存在结构尺寸过大、阻力高、个别频率消声量低、动态消声性能不稳定等缺点，尤其是火星熄灭消声器在相同背压下的火星捕捉和收集率远低于国外水平。究其根源还是预报方法不够精确、设计思想不够先进，对内部结构和元件对

声场和流场的影响研究不透。

### (3) 柴油机低噪声设计技术

当前我国大型船舶的柴油机技术基本处于二代机水平，噪声级均高于105dBA。国内有单位开展了柴油机低噪声设计技术研究，如哈尔滨工程大学、武汉理工大学、中船重工七一一研究所，以及一些生产厂家如407、408、616、沪东重机等，所开展的工作主要针对引进机的消化吸收，侧重于柴油机外围振动噪声控制，柴油机重要零部件的结构动态分析，激励力的经典分析等，没有从根本上解决柴油机振动噪声控制问题。

### (4) 柴油机有源消声技术

国内开展有源噪声控制的单位主要有南京大学、中科院声学所西北工业大学、哈尔滨工程大学、海军工程大学等。哈尔滨工程大学从1985年开始从事振动噪声主动控制技术的研究，是国内最早开展振动噪声主动控制技术研究的单位之一，多年来在封闭空间主动消声、结构声的传输与辐射控制等方面进行了长期持续的研究工作。1992年其“管内气动噪声有源（主动）声学控制研究”获得部级科技进步三等奖，2008年其“舰船柴油机结构噪声预测与振动有源控制技术研究”获省部级科技进步二等奖。

然而，目前国内外对柴油机有源噪声控制的研究一般均局限于柴油机的进排气系统的有源消声，以柴油机作为噪声源的空间有源消声、主动隔声技术的研究相对比较少见。

## 3 技术发展趋势

从柴油机振动噪声控制技术的发展趋势来看，在未来发展中下面几方面将会得到足够的重视：

### (1) 柴油机噪声源产生机理

开展柴油机噪声源产生机理的研究，提高对柴油机噪声本质的认识。如：当前对燃烧噪声机理研究是建立在试验基础上的，从燃烧学和声学理论入手，研究影响燃烧噪声的特征因素，有助于提高对燃烧噪声机理的认识；探索柴油机进气噪声的来源和形成机理，为合理降噪提供技术支持。

### (2) 柴油机声源识别技术

现场条件下柴油机各类机械噪声和燃烧噪声及其特性的识别的准确性和精度，将成为直接影响柴油机噪声控制设计和低噪声设计以及测量结果能否用于检验噪声预报的关键。近年来，声阵列测试技术、频谱测量分析方法、声源分离方法、声场重

建、波束形成、小波分析等方法的发展为轻度混响环境下的机械噪声源识别与分离提供了可能。建立比较精确的柴油机各类机械噪声和燃烧噪声及其特性的识别方法是技术发展的趋势所在。

研究和推广更有效的噪声测量方法，掌握柴油机噪声在空间的分布情况及流动方向，更准确地定位噪声源；研究柴油机燃烧噪声和机械噪声的识别原理和快速分离技术，更清晰地认识噪声的特征是未来发展的重点之一。

### (3) 柴油机进排气消声系统设计技术

声学性能、阻力损失和火星熄灭效率的计算方法和试验测量方法的研究是柴油机进排气消声器和火星熄灭消声器设计的基础，全面考虑各种因素的影响（三维气体流动效应、穿孔元件、吸声材料、净化载体、降阻元件、火星熄灭元件等），建立高效精确的计算方法和和试验测量手段是关键技术，也是极具挑战性的研究内容。设计出结构紧凑、流动阻力低、消声量高、动态插入损失稳定的进排气消声器是发展趋势。为预测消声器的插入损失，必须获得柴油机进排气噪声源阻抗，采用多负载法提取声源阻抗是一种可行的方法，合理的负载匹配成为获取精确的柴油机进排气声源阻抗的关键技术。

### (4) 柴油机低噪声设计预报技术

开展柴油机噪声预报技术的研究，解决目前噪声预报技术面临的困难，提高预测结果的精度。如：在特征波数处解的非唯一性问题是边界元方法研究在全波数范围内准确计算振动声辐射需要解决的关键性技术难题；柴油机工作过程中存在各种随机激励力，合理地模型加载是噪声预测中的重要因素；在整机预测方面，采用子结构法，考虑机体、曲轴、连杆、气缸盖、气缸套、主轴承盖、主轴瓦和各主要螺栓的联合作用，同时更加精确地模拟外力的传递也是提高预测精度的关键。通过研究声辐射模态方法在柴油机噪声控制中的应用，确定影响柴油机辐射噪声的主要模态，达到有的放矢地控制柴油机噪声。

### (5) 柴油机有源消声技术

有源消声技术是噪声控制领域一个新的研究方向，目前的首要任务是将其工程化应用。

### (6) 材料方面

在材料科学迅速发展的前提下，探索新的隔声材料，研制开发新的隔声部件，以减少柴油机噪声的传播。

(下转第10页)

2.5%，动态调速率 $\leq 4.5\%$ ，恢复时间 $\leq 4$  s。基本与纯柴油模式下的调速率接近。

在 $\text{NO}_x$ 排放方面，进行了 $\text{NO}_x$ 排放检测，台架测得双燃料模式下的 $\text{NO}_x$ 排放量约为 IMO Tier II 限值的 70%，低于纯柴油模式下的 $\text{NO}_x$ 排放量。在整个功率范围内无可视烟色，排气管中未检测出可燃成分。

在扭振方面，进行了扭振测试。结果表明：该发动机台架轴系在发动机转速 698.48 ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) (即 2 阶 4.5 谐次)、561.52 ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) (即 2 阶 5.5 谐次)、493.74 ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) (即 2 阶 6.5 谐次) 左右存在明显的共振点，但在共振转速处，曲轴的最大扭振应力满足 CCS 的有关规定要求。在所测得的发动机工作转速范围内，无转速禁区。

在经济性方面，按试验情况：基本上 1 t 天然气替代 1 t 柴油。目前柴油价格有所下降，大约 7000 元/t，LNG 价格大约为 6500 元/t，在目前情况下使用 LNG 替代柴油的经济性不是非常明显。

(上接第 5 页)

## 4 结论

本文从声源识别技术、进排气噪声控制设计技术、低噪声设计预报技术、有源消声技术等方面入手，总结了柴油机振动噪声控制技术的研究现状和发展趋势。

须要指出的是，柴油机的振动噪声控制应该在柴油机研制时的顶层设计阶段考虑。在柴油机整机设计过程中进行振动噪声设计，是为了尽早提供全面的包含各部套、零件或各专业、各阶段设计方案的分析结果。柴油机的振动噪声控制需要各个部件质量、刚度、阻尼系数以及连接方式和相关载荷等相关数据，这些都需要非常细节的设计，并协调各参数之间的匹配。但是很多时候在整机设计过程中等待这样的细节设计是不现实的，因此在设计的不同阶段只能使用不同细节程度的结构、性能结果，

但长期而言，天然气存量远远大于柴油的存量，使用天然气/柴油双燃料发动机是较好的一个选择。而在国内及国外部分地区，管道天然气价格大大低于柴油价格，每立方天然气价格为 0.1 ~ 0.2 元，在以双燃料机作为陆用发电机组时，使用天然气运行成本将远低于使用柴油及重油的运行成本。

## 5 结论

柴油/天然气电控双燃料技术能做到较高的燃气替代率，燃料使用灵活，经济性好，比纯柴油运行成本低；排放性能比纯柴油有较大的改善；同时发动机的排温、最高燃烧压力及调速性能与柴油机相近。表明柴油/天然气电控双燃料技术有较好的发展前景。

### 参考文献

- [1] 陈永义, 张幽彤, 刘兴华. 压缩天然气发动机电控系统开发 [J]. 内燃机, 2003 (1): 9-14.

因此需要多次反复和验证，这种反复和验证显然不是单纯的计算或试验所能承担的，需要相互交叉，从而使得研究更加复杂，也更显得协同设计的重要性。

### 参考文献

- [1] Yamazaki Tatsuo, Maeda Ryouiehi, Yamashita Kikuo. Noise and vibration reduction techniques adopted for the new V6 Twin-Cam VQ engine [J]. JSAE Review, 1995, 16 (1): 96-97.
- [2] French C. Advanced techniques for engine research and design [J]. Proc Instn Mechs Engrs 2009, 203 (2): 169-183.
- [3] 舒歌群, 梁兴雨. 降低柴油机噪声的措施及评价 [J]. 天津大学学报, 2006, 39 (4).
- [4] T Dawn. Active noise control on the brink [J]. Noise & Vibration Worldwide, 1994, 25 (12).