

内燃机排放

与

张志华 周松 黎苏 编著

噪声控制



哈尔滨工程大学出版社

内燃机排放与噪声控制

张志华 周 松 黎 苏 编著

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

内燃机排放与噪声控制/张志华等编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 1999

ISBN 7-81007-974-3

I. 内… II. 张… III. ①内燃机-污染防治②内燃机-噪声控制
IV. X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 37979 号

内容简介

本书主要介绍对社会环境造成污染的内燃机排放和噪声两部分内容。第一部分内容有:内燃机有害排放物生成机理、排放污染物的净化措施、各国的排放标准和试验规范、有害排放物测试仪器、使用其他燃料内燃机的排放等;第二部分内容有:声学理论基础、噪声测试仪器、内燃机噪声机理及特性、噪声源辨识、内燃机噪声控制方法等。

本书是针对内燃机而编写的,一些内容对于其他热力发动机也是可借鉴的。本书除可作为研究生及本科生的教材或教学参考书外,亦可供从事热力发动机生产、研究的科技人员参考使用。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
黑龙江省教委印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 14 字数 341 千字
1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷
印数:1~1 000 册
定价:18.00 元

地址:哈尔滨市南岗区和兴路 147 号 邮编:150080
如发现印、装质量问题,请与本厂质量科联系调换。

前 言

内燃机在国民经济建设中发挥了重要作用,但内燃机工作时产生的振动、辐射的噪声和排出的废气无疑对环境也产生了不良影响。内燃机振动虽然也直接为人们所感受到,使人的情绪烦躁,恶化了工作条件,但更主要的还是危害到内燃机及其载体设备的工作性能、安全可靠性和寿命。内燃机的噪声和排气污染则是对人体和环境产生直接损害,并已成为社会关注的公害。我国和世界各国均已制定出相应的内燃机噪声和排放标准法规。因此,低噪声和低排放污染已成为衡量内燃机性能的重要指标。

为了使轮机工程专业和热力发动机专业的研究生和大学生们能对内燃机的噪声和排放污染有较系统深入的了解,特编写本书作为教学之用,亦可供有关工程技术人员使用。

限于篇幅,本书从工程应用出发,在内燃机排气污染部分介绍了各种排放有害物产生的机理、减低各种排放污染物所应采取的对策、排放标准和试验规范;噪声部分介绍了声学基础、内燃机噪声产生的机理及控制措施、噪声测量及噪声源识别等。

本书编写分工为:第一章由张志华编写;第二章至五章由周松编写;第六章至九章由黎苏编写,全书由张志华教授统编定稿,由张文平教授主审。本书存在的错误和不妥之处敬请读者指正。

作 者

1999 年 4 月

目 录

1	内燃机与环境污染	1
1.1	内燃机排气污染	2
1.2	内燃机振动	5
1.3	内燃机噪声	6
2	大气污染和内燃机的有害排放物	12
2.1	大气的品质及其污染	12
2.2	碳氢燃料不完全氧化物的生成	14
2.3	未燃烃(HC)的生成	19
2.4	氮氧化物(NO_x)的生成	25
2.5	碳烟的生成	35
2.6	用准维燃烧模型预测直喷式柴油机的 NO 和碳烟排放量	40
3	内燃机排放污染物的净化措施	44
3.1	内燃机的机内净化措施	44
3.2	电子控制排气净化措施	54
3.3	内燃机有害排放物的机外处理净化	58
4	内燃机的排放标准和试验规范	68
4.1	世界各国的汽车排放标准	68
4.2	各国工况试验方法和试验数据整理	73
4.3	有害排放物的测量原理和测量系统	86
4.4	微粒子测量系统和工况试验方法	93
5	内燃机使用代用燃料时的排放污染与净化途径	100
5.1	液化石油气发动机	100
5.2	氢发动机	102
5.3	汽油、氢气混合燃烧的系统	104
5.4	醇类发动机	104
5.5	燃气轮机	106
6	声学基础与噪声测量	108
6.1	声波的产生和传播	108
6.2	噪声的度量	115
6.3	噪声的主观评价	121
6.4	声源的指向特性	125
6.5	噪声测量	126
7	内燃机的主要噪声源及其控制	140

7.1	内燃机各类噪声的比较	140
7.2	内燃机燃烧噪声	141
7.3	内燃机机械噪声	149
7.4	内燃机机体部件的结构响应和辐射噪声	157
7.5	内燃机空气动力噪声	162
8	内燃机噪声源识别技术	172
8.1	噪声源识别的基本要求	172
8.2	常用的噪声源识别方法	172
8.3	噪声源识别的信号分析法	175
8.4	新发展的几种噪声源识别方法	181
9	内燃机整机噪声的防治	187
9.1	内燃机噪声的等级划分及其许可标准	187
9.2	内燃机噪声控制中的隔声技术	189
9.3	内燃机气动力噪声的降低与消声器	198
参考文献		216

1 内燃机与环境污染

由日光、空气、水、土壤、岩石、矿物、动植物等构成的自然界所固有的环境称为自然环境。它是一切生物赖以生存和发展的物质基础。人类在自然界中生存,与自然环境是密切相关的。为了生存和发展,人类需要消耗自然界中的物质并改造自然环境使之更有利于生存和发展,而生存和生产的新陈代谢产物也要排放到环境中去。这种由于人类生活和生产而改变了的环境称为人为环境。随着社会进步、人口增长和生产力的发展,利用自然环境的深度和广度越来越扩大越深化,从自然环境中索取的能源和资源越来越多越广泛,同时向环境排放的废弃物也增多。这种以废的液体、气体和固体物,余热、噪声和电磁波等形式把物质交还给环境的后果,就会造成环境污染,甚至引起自然环境的变化。人类与环境是相辅相成、互相适应和制约的。自然环境对于某些污染具有一定的调节和自净化能力,通过物理的、理化的和生物的净化作用,降低其浓度或使其完全消除。但自然界的调节与净化功能是有限的,过量的污染和人类对自然资源的过度开发利用所引发的自然环境污染恶化,就会造成对人类和动植物的危害,而成为所谓的公害。

当今世界的三大公害是大气污染、水质污染和噪声污染。大气污染是指空气固有的正常成分中,增加了新的或增多了原有的有害成分,从而造成对人类活动、动植物及对环境的危害。大气污染与热能资源的利用和工业发展密切相关,工业发展早期主要是煤炭燃烧造成大气污染,以后污染源又增加了石油产品燃料及汽车尾气排放。据报导,美国 80 年代大气污染源 37% 为工业生产过程,36% 为燃料燃烧,27% 为交通运输排放结果。城市中,由于人口集中、工厂多、能源消耗量大及汽车行驶量大等原因,造成的大气污染最为严重。

噪声污染是指人类在生产和生活的活动中向环境辐射的有害于人们身心健康的声波,它通过人的听觉器官起干扰和破坏作用。在城市中环境噪声主要来源于交通噪声、生产噪声(工厂、建筑施工等)和生活噪声(社会活动和家庭生活),环境噪声主要作用于距地表的数十米的近地层。

水质污染是指人类将生产和生活中的废弃物或对生物有危害的物质排放或渗漏到自然水源(江河、湖海和地下水)中。水质污染给生物的生存带来一定的危害,所以保证水源不被污染和净化水质是件极为重要的事情。

除以上几种公害外,还有人类对森林资源的过度采伐、绿地减少、水土流失等因素导致气候异常,威胁到地球上生物的生存,以致某些种属的生物遭到灭绝,生态平衡受到影响。这些自然环境受到破坏所产生的不良后果,已受到世界人们的关注。

在人类和自然环境的关系中,人类是占据主导和支配地位的,当人们在认识到环境污染的危害和破坏作用以后,就可以通过各种方式限制有害于环境的活动或采取一定措施减轻对环境的污染,开展对生态环境的保护和污染环境的治理。

我国在《中华人民共和国宪法》中明确列出了关于“国家保护环境和自然资源,防治污染和其它公害”的条款。颁发了《中华人民共和国环境保护法》、《大气环境质量标准》、《地面水

环境质量标准》、《城市区域环境噪声标准》和《机动车容许噪声标准》等,并制定了汽车排放标准,对汽车内燃机的排放污染物进行严格控制,改善对环境的污染状况。

在我国,内燃机作为一种能源动力已广泛应用于生产和生活的各个领域。在航空上,某些民用飞机还在采用内燃机作为推进动力。在船舶运输中,除军用舰船有的采用蒸汽动力、燃气轮机或核动力装置外,绝大多数均是使用内燃机。在铁路运输方面,内燃机车、电力机车现正逐渐取代蒸汽机车。在城乡交通运输中,汽车几乎全部采用内燃机。此外还有军用战斗车辆、农用拖拉机、内燃发电机和工程机械等也都使用内燃机。因此可以说,内燃机对国民经济和科学技术的发展起到了相当大的作用。然而内燃机工作时产生的振动、噪声和排出的有害废气也对其周围环境产生了恶劣的影响。其对环境污染的主要表现形式是排气污染和噪声污染。前者是大气污染的主要来源之一,后者是城市环境噪声的重要组成部分。随着内燃机使用范围的不断扩大,保有台数迅速增长,尤其是汽车的世界年产量每年均达千万辆的数量级,总的汽车保有量是在继续增长。汽车排出的尾气中含有 CO 、 CO_2 、 NO_x 、 HC 及碳粒,对人体和生态环境造成危害,城市空气被严重污染。我国已严格地制定了内燃机及汽车尾气排放法规,限制排放有害物对环境的严重污染。另外,对内燃机的振动与噪声辐射也制定了相应的国家标准,将内燃机的振动量和辐射噪声限制在一定的水平。

内燃机根据其所用燃料的不同可区分为柴油机、汽油机、煤气机等类型。视其是否利用排出废气的能量而提高进入气缸的气体压力,可分为增压机及非增压机(又称自然吸气式)。现在使用的内燃机主要是以曲柄连杆机构组成的以活塞往复运动为特点的热力发动机,其工作特点是循环工作的周期性,曲轴每回转一周(二冲程)或两周(四冲程)完成一次工作循环,一个工作循环需经过进气过程、空气或可燃混合气压缩后的着火过程,做功过程和排气过程。内燃机周期性的曲柄连杆机构运动和燃料燃烧,激发起内燃机的振动和辐射出噪声,并排出含有有害污染物的废气(尾气)。

本章将介绍内燃机对环境造成污染的尾气排放、振动、噪声三方面的简要情况及其对环境的危害,以使读者对它们有个初步的了解。

1.1 内燃机排气污染

在世界上,水污染和空气污染是两大主要公害,而城市空气污染中,内燃机排气是主要的污染源之一。60年代以后,世界各国相继制定了汽车排放限制标准,以减少汽车排气对人体和环境造成的日益严重的危害。为了达到国家有关标准,企业和研究所都在大力开展研究,采取降低排气中有害排放污染物的控制对策。在内燃机排气中,对环境和人体有害的成分主要是燃料不完全燃烧产物和有害的氧化物,如一氧化碳(CO)、未燃碳氢(HC)、氮氧化物(NO_x)、二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)、微粒子(碳烟、高沸点可溶碳氢、铅化物)、臭气(甲醛、丙烯醛、未燃醇)等。

直接从内燃机排出的有害排放物称为一次有害排放物,如 CO 、 HC 、 NO_x 和微粒子。有些成分如 CO 和 HC 、 NO_x 类中的某些物质,在一定环境条件下,会发生复杂的化学反应生成新的有害物质,可称之为二次有害排放物。有害排放物对人体和生物有一定刺激性,易造成毒性反应或损害。

1.1.1 一氧化碳(CO)

一氧化碳是一种无色、无味的有毒气体,碳在缺氧不完全燃烧的情况下,就生成 CO。一氧化碳中毒是人们所熟悉的,一氧化碳通过呼吸进入人体后极易与血红蛋白结合,一氧化碳与血红蛋白的亲合力是氧气和血红蛋白亲合力的 210 倍。一氧化碳-血红蛋白一经形成,离解很慢,使血液供氧能力降低,造成低氧血症,使人头昏、呼吸困难、窒息导致组织缺氧,甚至死亡。

碳的氧化、分解是双向进行的,因此 CO 的生成量与温度、氧浓度及反应作用时间有关。内燃机的结构因素及使用情况很多都影响到 CO 的生成量。城市大气中的一氧化碳大部分都来自汽车内燃机排气。

1.1.2 未燃碳氢(HC)

内燃机排气中,未燃烧和部分燃烧的碳氢化合物(约有 200 种以上)称为未燃碳氢或未燃烃。饱和碳氢对人体基本无害,甲醛、丙烯醛等低分子量碳氢和不饱和碳氢对鼻、眼和呼吸道粘膜有刺激作用,多环芳香烃被认为是一种致癌物质。而排气中的乙烯类化学物质,经阳光照射可形成一种毒性较大的光化学烟雾。

燃料的氧化与温度、压力、燃料空气当量比(燃空比)及燃料种类有关。一般情况下,当温度逐渐升高时,燃料的氧化经历四个阶段,即稳定反应→冷焰→稳定反应→热焰。在稳定反应阶段,燃料的氧化速度极慢,燃料发生裂解。冷焰阶段进行快速反应,但产生的稳定产物不多,只有热焰阶段产生燃烧放热,生成稳定的最终产物。燃料的氧化可认为是不可逆的,因此,如果燃料不经过高温燃烧阶段,排气中总会有未燃烃排出资缸。

1.1.3 氮氧化物(NO_x)

氮氧化物包括许多种,但统一写成 NO_x 。其中排出量最大的是 NO,而 NO 进一步氧化成 NO_2 。对环境危害性最大的是 NO_2 。

NO 对人体没有刺激性,但进入人体后与血红蛋白的结合(结合能力是 CO 的 1 000 倍)使人感到缺氧并对中枢神经造成伤害。此外,NO 也会生成光化学过氧化物的烟雾,对人体有所损伤。 NO_2 对粘膜刺激性很强,导致气管和肺部的功能障碍,咳嗽、呼吸紧促最终形成肺气肿。短时间接触 100 ppm(ppm 为百万分率 parts per million 的缩写)的 NO_2 即出现中毒症状。燃油是含有氮化物盐基物质的,但由于其含量低,故在燃烧后不会产生大量的氮氧化物。而在高温燃烧过程中,空气中的氮和氧会进行反应从而生成氮氧化物,生成速度与氮、氧浓度及温度有关。温度升高,NO 的生成率呈指数函数规律上升。当燃烧温度在 1 700 K 以下时,NO 的生成速率明显降低。

1.1.4 微粒子和碳烟

所谓“微粒子”是指由内燃机排出的废气在干大气条件下,除去凝聚水分以外,全部呈固体状和液体状的微小颗粒。它们主要来源于燃油和窜入气缸内的机油。微粒子又可分为可溶性有机成分(溶于二氯甲烷)和非可溶性有机成分两类。非可溶性有机物即为干碳烟(燃

料不完全燃烧裂解而形成的固态碳氢化合物和游离碳)。微粒子和碳烟可用烟度值表示,是内燃机的一个重要性能指标。

无论是可溶性的有机成分物质还是非可溶性的碳烟,排入大气后都将以颗粒状悬浮于空气中,颗粒直径越小沉降时间越长。粒径在 $10\ \mu\text{m}$ 以下的微粒子称为飘尘,粒径在 $100\ \mu\text{m}$ 以下的微粒子称为总悬浮颗粒。一般来说 $2\sim 10\ \mu\text{m}$ 的微粒吸入人的气管后,有可能被再次排出体外;而小于 $2\ \mu\text{m}$ 的微粒吸入人的肺部后会沉积起来,逐步引发慢性病变,如肺气肿或癌变。

微粒子是由于碳氢燃料不完全燃烧而生成的,汽油机排气中微粒子的排出总量要比柴油机少得多,基本上不含碳烟,所以危害性不如柴油机大。

1.1.5 二氧化碳(CO_2)

CO_2 对环境不会造成直接危害,但地球植被如已受到大量破坏, CO_2 浓度持续增大,对地球环境就会造成危害。太阳光照射到地球表面的能量,由于 CO_2 层的阻隔很难再次散发到大气层外,热量长年积累将使地球气候变暖,土地盐碱化、沙漠化,极地冰层融化,海平面上升,造成沿海城市被淹等,形成“地球温室效应”。

1.1.6 光化学烟雾

光化学烟雾是由大气中的 NO_x 和 HC 受太阳光能的照射,在特定的自然条件下形成的。若大气中 HC 浓度比 NO_x 大三倍以上,气温高于 $24\ ^\circ\text{C}$,湿度低,没有强烈的气流,日照充足,就会产生浅蓝色光化学烟雾。这种二次污染大多发生在夏秋之间,在废气排出量大、大气对流不畅通的大城市或河谷、盆地等有天然屏障的地区,午后 $1\sim 2$ 时烟雾的浓度达到最高。它不但降低大气的能见度,且对人眼有刺激,使呼吸发生障碍和慢性中毒。

1.1.7 二氧化硫(SO_2)

汽油和柴油的含硫量很低,由汽油和柴油燃烧释放到大气中的 SO_2 不到煤燃烧放出量的 2% ,只占人为污染排放总量的 1.34% 。由内燃机排出的 SO_2 对环境的污染影响不大。

由此可见,内燃机排放污染物对环境和生物会造成极大的危害,应当进行控制。柴油机和汽油机的治理重点是不同的。柴油机排气中的有害排放物主要是 NO_x 和微粒子(碳烟和可溶性碳氢)。CO 和 HC 排出量较少,对大气污染不严重,而且可通过改变燃烧系统参数予以解决。柴油机排出的 NO_x 和微粒子之间存在矛盾关系,采用某些措施时可能降低 NO_x 排出量,但微粒子生成量增大;或反之。所以,必须采用同时降低各种有害排放物的措施,例如增压、进气中间冷却、高压喷射和电子控制等。在汽油机排气有害成分中,微粒子排出量极少,因为燃料是由低碳原子数的烷烃组成,不易产生碳烟。采用稀薄可燃混合气燃烧技术和提高热效率,可降低 CO 和 HC 的排出量。因此,汽油机控制有害物的关键是降低 NO_x 。

控制内燃机排放污染物的净化措施有两大类,一是改变内燃机燃烧过程的结构参数或运行参数,或采取新的技术措施;另一类是在内燃机排气系统中加设后处理装置。后一类措施是在使用机内措施达不到国家法规的限制要求时所采取的办法。对于排气中的 NO_x 、

HC 和 CO 气相有害排放物,使用氧化、还原方法以催化剂将有害气体转化为氮气、二氧化碳和水。对于固态的碳烟和可溶碳氢化合物组成的微粒子,则进行过滤收集,以后再将微粒子烧掉。

我国对内燃机排气净化的要求日益严格,并制定了相应的法规。内燃机生产厂应将低排放污染作为内燃机高性能的重要指标,研究降低有害排放物的有效措施,以满足国家法规的要求。

1.2 内燃机振动

内燃机发生的各种振动,主要来源于气缸内周期变化的气体压力和曲柄机构运动产生的惯性力。内燃机的振动不但影响内燃机装置本身结构及整个系统的工作性能和寿命,同时也使其载体及与之相连接或邻近的设备产生振动而降低工作效能。内燃机产生的振动有以下几种类型。

1.2.1 内燃机的整机振动

在内燃机曲柄连杆机构中,活塞的往复运动将产生往复惯性力;曲柄回转运动时将产生离心惯性力。在多缸发动机中,由于要使各缸均匀发火,因此曲柄大多是均匀排列的,一次、二次惯性力均自相平衡(除四冲程四缸机有二次惯性力不平衡外);多缸机产生的往复惯性力矩及离心力矩是否达到平衡,视曲柄排列情况而定。此外,由于气体压力及往复惯性力的周期变化,致使曲轴输出的扭矩和机体所受的倾覆力矩(二者是作用及反作用的关系)也是周期变化的。这些力或力矩将使内燃机产生整机振动。振动可能包括上下、前后、左右的跳动,以及绕三个轴的摇摆。内燃机安装于载体(船舶、运输车辆或厂房)上时,安装基础总是有弹性的,内燃机将力或力矩传给载体,使得载体受力而发生振动。

载体振动和内燃机整机振动将产生以下不良后果。

①剧烈的振动使内燃机本身零部件间发生冲击,可导致机件损坏、工作不正常或影响寿命。

②内燃机整机振动使得安装在其上的部件或仪表受到激励而产生局部振动,也将造成部件或连接件的损坏。

③剧烈的振动将产生噪声。

④使人员的工作条件恶化,产生疲劳,减弱注意力,影响工作效率。

为了减小内燃机向载体传输力,消减其不良影响,可以在内燃机与基础间安装弹性隔振器,构成隔振装置系统。它实际上既可减小内燃机的力向载体传递,同时也可减小载体的振动或所受到的冲击向内燃机的传递。

1.2.2 内燃机轴系扭转振动

在 19 世纪末,横跨大西洋的邮轮上的推进轴系多次发生故障。当时,由于动力机功率较小,轴系结构尺寸比较大,扭转振动引起的事故并不多见,大都被看作是偶然性故障。20 世纪初随着内燃机功率逐渐增大,事故不断出现。人们这才开始对扭转振动进行研究,并研

制出了扭转振动测试仪。最终认定轴系的扭转振动是产生事故的主要原因。

内燃机与从动机械(如船舶螺旋桨、发电机、水泵、压缩机、车辆的传动轮系等)共同组成的轴系是具有弹性的,构成一个扭转动力系统。它在内燃机周期变化的输出扭矩作用下,将引起内燃机曲轴系统的扭转振动。

内燃机轴系的扭转振动是轴系在旋转过程中,于平均扭转变形之上所叠加的一种交变扭转变形。扭转振动总是存在的,但不像整机振动那样能直接为人们所感触到。它是在扭转振动剧烈时,通过内燃机或轴系件的损坏才能发觉。进行扭转振动测试后,经过分析可以对危险程度有所估计。

现在世界上多数国家的船舶检验机构规定,110.33 kW(150 马力)以上的新型内燃机船舶在设计制造时,必须交验轴系扭转振动的计算资料和实船轴系测试数据。二者结果必须相符,其误差不得超过规定的允许值。质量扭振幅值和轴段扭振附加应力应小于规范允许的数值。

如果内燃机的简谐激振力矩频率与轴系扭振固有频率相等,就形成共振。严重的扭转共振,将会产生破坏性的后果。

①轴系上的某些轴段和与之相联的联接件(如联轴节、凸轮轴、油水泵轴等),由于过大的扭振附加应力而发生扭转疲劳,以至断裂。

②较强的扭转振动使内燃机工作不正常,如发电机电压不稳定、调速器工作不稳等,从而导致产生飞车现象,内燃机的辐射噪声也会增强。

③由于内燃机燃油、配气系统工作不正常和曲轴扭转振动变形,从而导致整机平衡性被破坏,机组整体振动也加剧。

④严重的共振消耗了内燃机的对外做功能量,使输出功率下降。

⑤内燃机齿轮传动及有减速齿轮箱的系统,由于扭转振动使齿轮产生交变冲击,加大齿面的磨损,甚至损坏,并增大了齿轮噪声。

危险的严重扭转共振必须予以消除。改变轴系中部件的转动惯量或轴段的刚度,可以使轴系的扭振固有频率变化而避开共振;安装合适的扭振减振器和阻尼弹性联轴节来消除扭转共振的危险性,使轴系的扭振附加应力满足规范的要求。在船舶轴系中有时也可划出转速禁区,不准许内燃机在此具有共振的转速范围内长时间持续运转。这是一简单的回避方法,但在转速比是 $0.8 \leq n/n_0 \leq 1.0$ (n_0 为额定转速)的范围内不得划转速禁区。

关于内燃机轴系振动、隔振技术已有较多的专门书籍详细论述,本书不作为讲述内容,读者可参考有关书籍。

1.3 内燃机噪声

1.3.1 声音和噪声

1) 声的特性

声音是一种物理现象。人的一生都是在声音环境中生活的,如果环境绝对寂静无声,人的精神就会感到压抑,有恐怖感。人类靠说话表达情感,传递信息。笑声和悦耳动听的乐

声,会使人心情愉快,给人以美的享受;而震耳欲聋的噪声则使人烦躁不安,在这种环境中会影响生活和工作的质量,甚至损害人的健康。从生理学的观点来看,凡是使人烦躁不安,为人们所不需要的声音都属于噪声。悦耳的音乐声对于专心工作或入睡的人也是不需要的,是干扰噪声。

声音是由物体振动而产生的,不仅固体振动产生声音,气体和液体振动也会发出声音。海水的波涛声就是液体振动的结果,管路中液体流经阀门时也会因液体振动而产生声音。爆炸声则是气体振动的结果,高压气体向空气中排放时,高速气流膨胀及与环境空气的相互作用,也会引起空气振动而产生声音。

发出声音的物体称为声源。声音必须经过弹性介质才能传到入耳,具有一定压力的声音压迫耳膜,使耳膜振动,让人感到声音的存在。这种弹性介质通常是空气,此外固体和液体也能够传播声音。将耳朵贴近铁轨就能听到远处驶来的火车声。军用潜艇就是靠声呐设备(发射和接收水声信号的设备)探知敌舰的存在及其运动特性。

声音在空气中传播时,空气质点在其原平衡位置处作振动,以疏密的波动形式进行声能传播,质点并不随疏密波传播出去,只是质点振动以声波形式向外传播。这正像把石子投入水中形成水波,水上的漂浮物只是上下振动并不移走,这说明水并不流动,传走的只是水的波动。

描述声波的三个重要物理量是波长 λ (m)、频率 f (Hz) 和声速 c (m/s)。在不同介质中,声速是不一样的,而且还与温度有关。三个参数间的关系是 $c = \lambda \cdot f$ 。人耳能听到的声音在 20~20 000 Hz 之间,低于 20 Hz 的声音称为次声,鼠类可以感觉到次声;高于 20 000 Hz 的声音称为超声,蝙蝠能感觉到超声。对于声音而言,低于 300 Hz 的称为低频声,1 000 Hz 以上的为高频声,300~1 000 Hz 的为中频声。

评价声波强弱程度的主要参量是声压、声强和声功率。

(1) 声压 由声波引起的介质压力变化称为声压,单位为帕(Pa)。声压 p 与介质密度 ρ 、声速 c 及质点振动速度 u 有关,即 $p = \rho c u$ 。存在声压的空间称为声场,声场中某一瞬时的声压值称为瞬时声压,在一段时间内最大的声压称为峰值声压,瞬时声压对时间取均方根值称为有效声压,一般声学仪表测得的往往就是有效声压。如果不专门注明为瞬时声压,习惯上一般提到的声压就是指有效声压。

对于 1 000 Hz 的纯音,人耳刚刚能够感觉到的声压为 2×10^{-5} Pa,称为“听阈声压”,人耳难以忍受的声压为 20 Pa,称为“痛阈声压”,两者相差一百万倍。显然,用声压来表示声音的强弱很不方便。同时人耳对声音的感觉不是与声压的绝对值成线性关系,而是与其对数近似成正比。因此,将两个声压的比值用对数的标度来表示,称为声压级 L_p ,单位为分贝(dB)。即

$$L_p = 20 \lg(p/p_0)$$

式中, p_0 为参考声压,取 2×10^{-5} Pa。

一台内燃机在某一工况下运转时,如测量出的声压级为 90 dB,则当两台同样的内燃机在此工况下同时运转,总声压级应为 93 dB。这也就是说噪声能量加倍,声压级只增大了三分贝,总合成声压增大 $\sqrt{2}$ 倍。

(2)声强 单位时间内,通过垂直于声波传播方向的单位面积的声能称为声强,单位是瓦/米²(W/m²)。声强是一个矢量,只有规定了方向才有意义。声强的大小与离开声源的距离有关,因为声源从一点向四周辐射,声源单位时间内辐射出来的声能是一定的,离开声源越远辐射声波的面积越大,通过单位面积的声能就越少,因此声强越小。声强大小与声压平方成正比,“痛阈”声强与“听阈”声强相差 10¹²倍。因此也可用声强级 L_I 来表示,即

$$L_I = 10\lg(I/I_0)$$

式中, I_0 为参考声强,取为 10⁻¹² W/m²。它相当于“听阈”声强。

当声波以平面波形式传播时,声强与声压的关系为

$$I = \frac{p^2}{\rho c} = \rho c u^2 = \rho u$$

ρc 称为介质特性阻抗。此时

$$L_I = 10\lg(I/I_0) = 10\lg \frac{p^2/(\rho c)}{p_0^2/(\rho_0 c_0)} = L_p + 10\lg \frac{400}{\rho c}$$

ρc 随介质温度和压力而变化,在 20 ℃ 及标准大气压下 $\rho c = 415$ 瑞利(kg/m²·s), 10lg(400/ ρc) = -0.16 dB。亦即在一般情况下,声强级比声压级大 0.16 dB,但经常可认为它们相等。

(3)声功率 声功率指声源在单位时间内辐射出去的总声能量,它是表示声源特性的物理量。同样,声功率级为

$$L_w = 10\lg(W/W_0)$$

W_0 是参考声功率,取为 10⁻¹² W。

在实际对声音测量时,声压测量比较简便,但在进行声源测量时,声压测量受到距离的影响。因此,国际标准化组织推荐采用声功率级,并制定出了测量方法。

在噪声测定仪器(声级计)中,为使测得的声压值接近人耳的主观感觉,采用了电气计权网络对不同信号进行不同程度的衰减。A 声级(L_A)特性在低中频有较大衰减;B 声级(L_B)特性在低频有较大修正;C 声级(L_C)特性对整个可听频率有近似平坦的响应。不修正则称为线性声级。由于 A 声级与人耳对噪声的感觉相同,所以国际标准化组织推荐使用 A 声级测量来评价噪声。在日常生活和工程实际中,噪声一般都具有较大的声压级和多种频率成分。测量 L_A 、 L_B 和 L_C 可以粗略估计噪声的频率特性。如声压级 $L_A = L_B = L_C$,则说明该噪声有较多的高频成分;若 $L_C > L_B > L_A$,说明该噪声以低频为主;如果 $L_C = L_B > L_A$,即可确定该噪声以中频占优势。

2)噪声的危害

噪声是对环境造成污染的公害之一,如果噪声超过人们生活和生产活动所允许的程度时,就必须加以治理和控制,使之满足国家对噪声控制的法规所限定的允许值。噪声的危害有以下几个方面:

(1)对听力的损害

当人开始进入强烈噪声环境时,会感到双耳难受,有压迫感,甚至头痛。过一段时间才有所适应;当离开此噪声环境时,双耳仍然嗡嗡作响,如果做听力检查,可发现听力下降约 15 dB,即听阈提高了 15 dB 左右。原来能够听到 10 dB 小声时,现在只有提高到 25 dB 才能

听到。由于噪声影响的时间不长,休息一段时间后,听力可以得到恢复。这种现象叫暂时性听阈偏移或听觉疲劳,听觉器官未受到损害。

如果长时间在强烈噪声环境下生活劳动,日积月累,内耳发生了器质性损害,听觉疲劳不能恢复原状,就成为永久性听阈偏移,这就是噪声性耳聋。国际标准化组织规定在 500、1 000、2 000 三个倍频程内听阈提高的平均值在 25 dB 以上时即认为听力受到损伤,又叫轻度噪声性耳聋。噪声性耳聋与噪声的强度、频率,以及噪声作用时间的长短有关。一般说来,在 80 dB(A)以下才能保证长期工作不致耳聋。处在 90 dB(A)噪声条件下 10 年,约有 10% 的人患噪声性耳聋;30 年,约有 20% 的人患耳聋。当人突然暴露在极其强烈的噪声环境中,可能会引起突发性耳外伤,导致鼓膜破裂出血,双耳突然失听造成耳聋。

(2)对精神和身体的影响

噪声通过听觉器官作用于大脑中枢神经系统,使大脑皮层的兴奋与抑制平衡失调,导致条件反射异常,使脑血管张力受到损害,产生神经不安、情绪不稳定、头痛、脑胀、耳鸣、失眠、疲乏无力等神经官能性症状。噪声作用时间短,这些生理上的变化可以恢复。如果长期受噪声困扰,就会在中枢神经形成固定兴奋点,波及植物性神经。

噪声还使交感神经紧张,增加肾上腺素的分泌,引起心率加快和血压升高。同时还刺激脑下垂体和副肾质而产生内分泌失调,引起肠胃功能紊乱,消化液分泌异常,胃酸度下降,导致消化不良食欲不振,恶心呕吐等,致使肠胃病和溃疡病发病率升高。

噪声对视觉器官也会造成不良影响,眼花、眼痛、视力减退、反应迟钝并导致色觉敏感性发生变化,对绿色、天蓝色特别敏感,对红色感觉减弱。

(3)对人们正常生活和工作的影响

在噪声环境下,人的睡眠受到严重影响,难以入睡和熟睡,处在半睡眠状态,易做梦,极易被惊醒,因此睡眠效率不高。理想入睡是在 35 dB 以下,70 dB 可使 70% 的人睡眠受到影响。噪声也干扰人的谈话、开会和学习。噪声在 65 dB 以下时就必须大声交谈,达到 90 dB 以上就无法谈话了。

噪声分散人的注意力,使人反应迟钝、易疲劳。在强噪声条件下工作的人容易出现差错,工作效率降低。

(4)特别强烈的噪声能损害仪器设备和建筑物

当噪声级超过 135 dB 后,强烈的噪声能损坏电子仪器及器件,使其发生故障而失效。当噪声级超过 140 dB 后,强烈的噪声对轻型建筑物开始起破坏作用。例如,当超声速飞机低空掠过时,发动机和尾管的气流喷射噪声会使建筑物玻璃破碎,墙壁出现裂缝而受到破坏。

3)噪声控制的基本途径

噪声是由声源发出,经过中间介质传播,而后到达接收者。因此对噪声进行控制的方法也可从这三个环节出发。

(1)声源控制

声源控制是降低噪声的最直接有效的方法。首先应当知道噪声源的大小及其频率特性,研究声源产生噪声的原因,辨识出影响噪声级的主要因素,有针对性地采取有效措施。

噪声主要是由固体机件振动或流体的流动特性(例如紊流)所形成的。减小激振力,增

加阻尼,增大振动体以改变机件固有频率可避开共振发生。高速流动的流体避免与机件发生冲击,避免高压气体的急速排放膨胀等均可达到对噪声源的控制。对于机械设备而言,采用低噪声的结构形式和传动形式,提高加工精度和装配质量,振动表面加贴粘弹性材料吸收振动能量,均可控制噪声。负荷较小的机件采用高分子材料或高阻尼合金等措施也能收到良好效果。

(2) 噪声传播路径中的控制

控制声源发出的声功率有时是困难的或难以做到的,沿着噪声的传播路径控制噪声也是有效的方法。声源噪声可以是以结构振动形式由空气传出,或是随着排出的流体对外界辐射,也可能是通过结构由其所处的基础传出(即结构噪声)。采取的措施有:用隔声罩或隔声房间将声源隔离起来;在气道管路中采用消声器;设备与其基础间加装隔振器;在壳体外边贴上粘弹材料;在金属部件间加入吸振材料或吸声材料等。

(3) 接收者的噪声控制

如果通过各种努力均无法减低噪声,或采用的措施难度和经济损失太大,就只有使人离开高噪声级区域而使用具有观察窗的隔声控制室来操纵机器。如果长期在 95~105 dB 的噪声环境下工作,或在 120 dB 的强噪声中短期工作,可直接在人耳上用耳塞、耳罩甚至是卫生棉来减低刺激耳膜的声能量,隔声量可达 15~27 dB,这是最简便、经济而有效的实用方法。但也有其不卫生、易于将污物或细菌带入耳中的缺点。另外,也可能听不到警报信号和谈话声。

1.3.2 内燃机产生的噪声

内燃机由于其热力过程的周期性及部分受力机件的往复运动,从而使得内燃机必然成为一个振动噪声源。内燃机总噪声级与内燃机的类型、转速、功率、缸径等参数有关。一些文献发表的经验公式是根据作者对一定缸径范围和转速范围的某种类型内燃机的统计结果得出的,只能作为同种类型内燃机的近似参考。

国际内燃机会议曾介绍以下公式:

距内燃机 1 m 处的四冲程柴油机的声压级为

$$L_A = 10 \lg n_H + 5.5 \lg (1.36 N_{dH}) - 30 \lg (n_H/n) + 55$$

式中 n_H —— 标定转速(r/min);

n —— 工作转速(r/min);

N_{dH} —— 标定功率(kW)。

一般说来,二冲程柴油机总噪声级比四冲程机高。采取增压可使直喷式四冲程机噪声降低2~3 dB。汽油机由于其功率、缸径较小,转速高(标定转速 4 000~8 000 r/min),故往复运动质量小,热力工作过程较为柔和平稳,最高爆发压力低,因此汽油机的噪声较同样功率的柴油机可低 10 dB 左右。

内燃机发出的噪声主要有三种类型:

(1) 空气动力性噪声

其是气体流动(如周期性进、排气)或物体在空气中运动,空气与物体的撞击,从而引起空气产生的涡流;或者由于空气发生压力突变形空气扰动与膨胀(如高压气体向空气中喷

射)等而产生的噪声。一般说来,这种空气动力性噪声是直接向大气辐射的,在内燃机噪声的组成当中,如果不安装消声器,排气噪声的声压级是最大的,其次是风扇和进气噪声。内燃机排气噪声中包含了多种气动力噪声成分。当排气阀开启时,气缸内燃烧的废气以较高的压力喷出,排气流速很大,紊流所产生的声功率按流速的8次方比例增大,频率成分主要是高频;当气流通过狭窄部位或转弯时与管壁相碰撞就产生涡流而发出噪声。当气流经过排气支管、总管和尾管时引起管腔的共鸣,对于一端开放管,噪声频率为 $f_0 = c/(2l)$ (c 为声速, l 为管长),两端开放管的频率加倍。气缸排气是间歇的,它的基频为气缸数与每秒排气次数的乘积,同时也出现其二三倍数的高次谐波,更高次谐波则不显著。由于排气噪声是内燃机的强噪声,故一般内燃机均装有排气消声器。

(2)机械噪声

一台内燃机大约有600对运动副,当内燃机工作时,由于冲击、摩擦、旋转不均匀、不平衡力作用等原因,激起零部件的机械振动而发出噪声,特别当与机件的固有频率相一致时,会引起激烈的共振和噪声。内燃机曲柄机构活塞往复运动,当经过上下止点时,横向作用力改变方向,使活塞与缸套的接触面由一侧转向另一侧而产生冲击,并造成缸套振动;曲柄机构各运动副间均有一定间隙,机件受力亦具有冲击性质;气阀开闭运动,阀座处基本不存在润滑状态,在落座时产生冲击发出噪声,其频率与气阀每秒开启次数有关。齿轮传动系统也是机械噪声的重要组成部分,但其成分较复杂,轮齿啮合时齿面接触有冲击,齿面发生滑移,激起轮及齿的固有振动。此外,齿轮轴的振动,轴承振动及支承体的振动等均导致齿轮传动噪声增大。内燃机喷油泵也是强噪声源,油泵柱塞上部及高压油管中燃油压力达 10^8 Pa以上,其压力周期变化激发泵体产生振动,柱塞往复运动惯性力和出油阀落座、凸轮对挺杆的作用力等均是产生振动及噪声的激励源。除此之外还有水泵、输油泵、增压器等也产生噪声。若这些部件的支承体弹性较大,也会导致局部振动而辐射出噪声。

(3)燃烧噪声

内燃机的燃烧噪声是在气缸中产生的。柴油机的燃油向高压空气中喷射,汽油机火花塞点火,气缸中局部的可燃气体燃烧,压力温度急剧上升,燃烧由已着火部分向其他区域传播蔓延,缸内温度压力继续升高,与此同时缸内的可燃气体继续进行旋流运动。气缸中的压力波冲击燃烧室壁,使之产生固有频率的振动,气缸内部件的刚性通常很大,其自振频率很高,这种振动及辐射噪声呈高频特性。气缸内压力在一个工作循环内呈周期变化,它激起气缸内部件的低频振动,其频率与内燃机转速有关,通过内燃机机体向外辐射噪声。

由此可见,内燃机工作时的噪声是多方面的,其声功率较大,必须予以控制。在设计阶段选择合适的工作参数和合理的结构形式以达到低噪声内燃机的设计目标。