



舰 | 船 | 现 | 代 | 化

舰船声隐身技术

李天宝 王明辛 王学武 主编



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



舰船现代化

舰船声隐身技术

主 编 李天宝 王明辛 王学武

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

舰船在航行时所发出的噪声对其安全性造成了严重的威胁,随着科技的发展,舰船的声隐身性能被提到了极其重要的地位,这就迫切要求解决噪声与振动的影响控制问题。

本书一方面从噪声与振动控制技术的基本理论着手,按照总装厂内部的实际分工,全面系统地阐述了舰船机械振动学、船体振动学、管系振动学、空气噪声学、水声学等基本原理,并重点地介绍了各种机械设备和管系、螺旋桨、艇体辐射噪声产生的原因及机理;另一方面从工程实际的角度,提出了全面的、丰富的、具体的、科学的减振降噪的施工实用技术及舰船噪声的航行测试方法。本书不仅使读者对现代舰船的声隐身技术有了全面地了解,而且还注重理论及工程应用。

本书可供部队、院校、厂所等从事舰船声隐身技术工作的有关人员使用、参考。

图书在版编目(CIP)数据

舰船声隐身技术/李天宝,王明辛,王学武主编.

—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2012.12

ISBN 978-7-5661-0497-7

I. ①舰… II. ①李…②王…③王… III. ①船舶减振—减振降噪 IV. ①U661.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 298581 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 14.25
字 数 340 千字
版 次 2012 年 12 月第 1 版
印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷
定 价 80.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

随着世界各国新型武器的研制和发展,隐身技术得到长足进步,它主要分为以下分支学科:雷达隐身、声隐身、红外隐身、磁场隐身、水压场隐身、尾流场隐身等。舰船隐身是各国海军普遍关注的问题,隐身(stealthy)的含义为:以安静、谨慎和秘密为特征(的行动),意在避免注意。即:躲避探测和攻击。

现代声呐设备探测距离远,定位精度高,发展日趋完善。性能优良的探测声呐(如拖曳声呐等)投入使用并不断更新,使得舰艇暴露的可能性大幅度提高,其生存力和战斗力受到严重威胁。

声隐身技术的应用,可以大大改变舰艇的真实态势,提高舰艇的隐蔽性,达到“保存自己”、“克敌制胜”的目的。舰船声隐身就是通过系统地应用多种技术来控制舰船声场,改变舰船声目标特征,降低对方声呐探测设备的发现概率和距离,降低对方声呐制导的水中兵器攻击能力,同时也提高了本舰对目标的发现、跟踪和打击力,还能够增加我舰发现对方来袭鱼雷的距离,达到提高舰艇综合作战能力,即达到“先敌发现”、“先敌攻击”、“连续攻击”及“攻击有效”的目的。研制声隐身性能优良的舰艇,需要综合利用多学科的基础理论知识和应用技术,首先要控制舰船辐射噪声,需要研究解决总体声学设计技术、低噪声推进器设计技术、机械与结构噪声控制技术、水动力噪声控制技术、多频谱声学覆盖层技术、舰船声特性测试及声源识别技术等多项关键技术;其次要降低舰船声目标强度等反射特征信息,需要研究解决型线优化设计技术、消声瓦设计和应用技术等,以此实现舰艇声隐身的目的。

在声隐身性能要求严格的舰艇建造过程中,也是要以提高各工序的建造技术水平为前提的,如:在艇体建造过程中,就要从每一张外板的线型光顺性,每一道焊缝余高的均匀、光顺程度,每一个小结构焊接的可靠性,各个细节都要完善,各环节都要严格控制。每一台设备基座的加工质量,每一套设备的对中精度,都要达到技术要求。在设备安装过程中,对减振器要进行刚度测量与合理布置、排序,对每一个减振装置都要调整到技术要求所规定的状态,每一个挠性减振接管安装的初始变形都要满足技术要求,每个阀门和管支架都要有符合要求的减振衬垫,并且,要达到任意两刚体间不能造成声短路。减振浮筏和双层隔振装置的安装技术状态都要与配机试验时一致。消声瓦、吸声尖劈、阻尼材料以及管路包覆层的敷设都要严格按照要求敷设到位,且不能在后续施工中损坏。

总之,作为舰艇总装厂,在产品建造过程中,也要从减振降噪基础科研、设备设计与制造技术研究、总体设计与减振降噪技术研究成果的实船应用、总体建造工艺研究、设备安装工艺研究等方面入手,认识振动与噪声产生的机理,严格执行安装工艺,保证设备安装技术状态。对装艇设备与系统的振动与噪声情况分别进行系统的检测,并在服役后定期检测,确保舰艇处于良好的运行状态。这样才能使建造的舰艇达到声隐身的效果。

本书从声隐身技术的基本概念到声隐身设计与建造都作了较为实用的介绍,目的是为提高舰艇建造工程技术人员和施工人员在设计与施工中的减振降噪意识和技术水平,以期通过对基本知识和施工要领的学习,使建造水平有所提高。

本书是在业内相关领导和专家的直接关心支持下编撰完成的,在第二代首制产品辐射

噪声测量结束并形成明确结论时,总装厂领导就提出军工战线要打一场减振降噪的人民战争,使军品的建造质量上台阶、上水平。在编写过程中,得到了 719 所的大力支持。希望本书能成为提高军品建造队伍素质的一部好的学习材料。

本书由以下同志编写:

李天宝 王明辛 李树国 王学武 王东光 刘晓一
李启明 芦颖 刘伟 白光道 李思恒 高杰
周涛 刘晓春 周冰 李韶伟 王东义 徐明
陈庆丰 王瑶 刘洪来 杜继党 明少航 刘涛
蒋德民 焦东成 齐朔 康利生

此前,为参加本书的编写,编者进一步参阅了大量声隐身专业技术资料,结合自身的专业实践和思考,认真细致地编写好自己所承担的章节。由于时间仓促,水平尚待提高,文中定有诸多不妥之处,恳请读者不吝批评指正。

编者

2012 年 1 月

目 录

第 1 章 声隐身技术概述	1
1.1 舰船声隐身技术的发展	1
1.2 作战能力的提高与低噪声建造	3
1.3 声隐身技术研究中常用的名词术语介绍	3
第 2 章 舰船噪声学基础	6
振动系统部分	6
2.1 振动系统的分类	6
2.2 单自由度系统振动	7
2.3 多自由度系统振动	15
2.4 单自由度减振器隔振原理	19
2.5 两自由度减振器(双层隔振)原理	20
2.6 浮筏减振原理	21
2.7 动力吸振器原理	22
2.8 主动减振装置减振原理	24
2.9 阻尼减振降噪原理	29
机械振动部分	33
2.10 汽轮机振动	33
2.11 电机振动	38
2.12 螺旋桨及轴系振动	39
2.13 泵(液体)的振动	43
2.14 风机振动及空气噪声	45
2.15 机械振动的检测及控制	45
2.16 机械振动的度量方法	51
2.17 机械噪声源	52
船体振动部分	59
2.18 弹性体振动	59
2.19 船体振动	67
2.20 潜艇结构振动与声辐射	75
2.21 船体水动力噪声	81
2.22 舰船振动评价及控制标准	82
管系振动与噪声	84
2.23 管系振动理论发展历程	84
2.24 管路系统噪声特征分析	85
2.25 管路系统的噪声传递特征	86

2.26	管路光洁度对管路摩擦噪声的影响	86
2.27	液压泵与管路系统的噪声	87
	空气噪声	89
2.28	舰船空气噪声概念	89
2.29	舰船空气噪声源	92
2.30	舰船空气噪声计量	94
2.31	空气噪声传播特性	94
2.32	吸隔声材料及原理	97
	水声原理	100
2.33	声呐系统的组成及构造	100
2.34	声呐方程	105
2.35	辐射噪声及自噪声理论	109
2.36	目标强度理论	112
2.37	海洋中的声传播理论	117
2.38	声呐测向、测距原理	118
2.39	噪声的频谱分析	121
	机械阻抗分析	123
2.40	机械阻抗基本概念	123
2.41	并联、并串联系统机械阻抗分析	127
第3章	舰船减振降噪实用技术	132
	机械设备部分	132
3.1	主机安装	132
3.2	辅机安装	133
3.3	轴系及螺旋桨安装	135
3.4	浮筏减振器安装	137
3.5	双层减振器安装	138
3.6	减振器、减振管	139
	电气设备部分	148
3.7	电气安装	148
3.8	声呐系统安装	153
3.9	声呐腔声学材料安装	158
	管系部分	160
3.10	管系生产设计	160
3.11	管件的制作	162
3.12	管路安装	165
3.13	管路支吊架安装	166
3.14	通海管路消音器	168
	通风管路部分	169
3.15	通风管路生产设计	169
3.16	通风管路制作	173

3.17	通风管路安装	173
3.18	通风管路消声器安装	174
3.19	通风管路阻尼包敷	176
船体部分		177
3.20	船体外板线型控制	177
3.21	船体外板开孔	180
3.22	船体附体安装	180
3.23	船体基座设计安装	182
3.24	内部围壁弹性安装	185
3.25	阻振质量块安装	186
3.26	隔声罩安装	186
3.27	生活区吸声材料(泡沫铝板)	187
3.28	主机控制室吸声材料	188
化工部分		189
3.29	消声瓦敷设	189
3.30	基座、铺板、壳板阻尼敷设	192
3.31	动力舱段耐压体壳板阻尼敷设	195
第4章 舰船噪声测量		197
4.1	机械振动测量	197
4.2	结构振动测量	200
4.3	辐射噪声测量	202
4.4	自噪声测量	205
4.5	空气噪声测量	206
4.6	声目标强度测量	207
4.7	辅机振动烈度测量	210
4.8	减振器机械阻抗的测定	213
参考文献		217

第 1 章 声隐身技术概述

1.1 舰船声隐身技术的发展

1.1.1 声隐身的由来

舰船作为移动的海上钢铁建筑,周围存在着电磁场、声场、红外场、磁场、水压场及尾流场等各种复杂物理场,在海上执行任务时,极易受到敌方空中、海上、水下多方面的探测及攻击。

在众多的舰船自身物理场中,电磁场、红外场、磁场、温度场、水压场及尾流场等非声场在海水中表现出强烈的衰减特性(如电磁波在海水中的能量损失高达 $1\ 400\ f^{0.5}\text{ dB/km}$, f 以 kHz 计),传播距离仅 100 m 量级,而声场在海水中则表现出良好的传播特性(在海水中的能量损失仅为 $20\lg R\text{ dB}$, R 以 m 计),高分贝的舰船辐射噪声甚至可以传播 200 km,因此,在水下利用声波作为目标探测的手段(即声呐)就成了唯一选择。

舰船的声隐身,主要就是为了躲避敌声呐的探测和声响水中兵器的攻击。随着现代声呐的日趋完善,性能优良的先进探测声呐投入使用并不断更新,被动声呐探测距离从二战时的几千米发展到现在的近二百千米,测向精度亦较二战时提高十倍以上,舰艇的暴露率大幅度提高,生存力和战斗力受到严重威胁,因此,近年来各国海军对舰艇(尤其是潜艇)的声隐身性能提出了迫切的要求。

1.1.2 声隐身设计水平的发展现状

以往,在舰船研究设计中存在追求高速性还是安静性的争论,现代战例表明,舰艇的安静性在战斗中发挥至关重要的作用,因此,在现代舰船研究设计中开始突出声隐身性能,并把舰船尤其是潜艇的安静性(如辐射噪声、自噪声指标、目标强度、舱室空气噪声指标等)作为重要的战术技术指标,甚至为了达到安静性指标,可以适当降低其他一些性能指标。

美国 1989 年开工建造、1997 年服役的“海狼”级核潜艇首艇,其安静性比现役“洛杉矶”级核潜艇有飞跃性的提高,多年来获得的降噪技术研究成果在“海狼”上得到全面展现。它的 S6W 反应堆装置经过了严格的降噪设计,它的动力设备均采用了浮筏减振技术,它还使用了泵喷推进器及敷设了 7.2 万块消声瓦,据称该艇的辐射噪声比以前降低了 50 分贝。而俄罗斯同样非常重视减振降噪,据称其“阿库拉”级攻击核潜艇(水下全排水量 9 100 吨)巡航辐射噪声亦非常低;俄罗斯 2007 年 4 月 15 日建成出厂的“尤里多尔格鲁基”号核潜艇比前一代在隐身方面还有很大进步。

现阶段,以控制舰船声场(降低辐射噪声和自噪声)和降低舰船声目标特性为研究内容的声隐身技术已进入全面、系统和深入的阶段,研究的内容大致如下:

1. 合理确定舰船噪声指标:首先根据舰船作战使命,确定舰船合理的辐射噪声指标、自噪声指标、舱室空气噪声指标和目标强度,再通过总指标分配,确定舰船系统和单机设备的

噪声振动指标,指标的论证与分配工作已从原来的定性分析阶段发展为定性分析与定量估算相结合的阶段;

2. 通过舰船声学设计得到舰船声场控制的优化方案,建立噪声预报模型和效果的评估模型;

3. 解决舰船声场控制和降低舰船目标特性的关键技术,如低噪声螺旋桨(甚至泵喷推进器)、阻尼技术(解决中高频振动控制)、浮筏技术(解决多机组强振动的隔振)、管路噪声振动的控制、消声瓦技术等。

1.1.3 潜艇声隐身等级的划分及各国大致的发展水平

由于潜艇水下隐蔽性的重要性,世界各国海军都在不遗余力地开展潜艇声隐身工作,现就目前了解到的各国发展情况介绍如下:

1. 美国核潜艇在 20 世纪 60 年代初期将噪声最大的推进系统安装在浮筏上,使艇体结构噪声明显降低,其降噪量增加了 15 ~ 20 dB。多年来噪声总声级下降了 40 多分贝。20 世纪 80 年代中期“洛杉矶”级攻击型核潜艇的噪声已降低到 118 分贝,“海狼”级攻击型核潜艇噪声级达到了 90 ~ 100 dB,已低于三级海况海洋背景噪声(110 ~ 120 dB)。

2. 前苏联潜艇的安静性技术发展也较快,成果十分显著,尤其是到了 80 年代初期,前苏联又加工出了低噪声螺旋桨,使得新型的 S、M 和“鲨鱼”攻击型核潜艇以及 K 级常规潜艇的噪声均达到了 125 ~ 130 dB。前苏联在 1975 ~ 1985 年间使潜艇的噪声降低了 30 dB,潜艇的总噪声可低于海洋背景噪声。

3. 英国“特拉法尔加”级潜艇是英国第 4 代攻击型核潜艇,也是英国海军最新一代攻击型核潜艇,于 1979 年至 1991 年间共建造 7 艘,现全部服役。该级艇是在原“快速”级的基础上改进而成的。艇型基本保持“快速”级的艇型和布置方式,但在武器和电子设备方面有重大改进,并在 1998 年起改装“战斧”导弹,以提高对舰攻击力。该级艇采用浮筏减振,第一艘仍采用传统的螺旋桨推进,但从第二艘开始采用喷水推进,并敷设消声瓦,从而大大地降低了潜艇噪音,使其隐蔽性更强。

4. 表 1-1 说明各国潜艇目前的噪声水平。

表 1-1 各国潜艇目前的噪声水平

	L_p (水下,3 kn)/dB	L_p (水下,6 kn)/dB	美国 (1960)	俄罗斯 (1960)	日本	中国
高噪声潜艇	150 以上	160 以上				
普通潜艇	140 ~ 150	150 ~ 160				
低噪声潜艇	130 ~ 140	140 ~ 150				✓
准安静型潜艇	120 ~ 130	130 ~ 140			✓	
安静型潜艇	110 ~ 120	120 ~ 130	✓	✓		
极安静型潜艇	110 以下	120 以下				

基准声压:1 μ Pa,“✓”表示该国最先进潜艇噪声水平

1.2 作战能力的提高与低噪声建造

第二次世界大战后,国外军事专家在分析未来海战时认为:在潜-潜、潜-舰对抗中,航速不是决定性的因素,起决定作用的是谁能先敌发现、谁先使用武器和武器系统的优劣,即“先敌发现”、“先敌攻击”、“连续攻击”及“攻击有效”。谁能先敌发现又主要取决于噪声的高低、隐蔽性的优劣和声呐设备的性能水平。降低潜艇噪声的益处有以下五个方面:

1. 大大提高潜艇隐蔽性,模拟对抗计算表明,我艇噪声降低 6 dB,则敌方声呐探测我艇的距离可减少一半左右,对敌核潜艇和水面舰艇的作战效能可提高 20%~67%;
2. 大大增加我艇声呐探测距离:如我艇声呐平台区噪声降低 5 dB,探测敌核潜艇的距离可增加 30%~60%;
3. 减小敌水中兵器的命中概率;
4. 提高本艇水声对抗器材的作用效果;
5. 降低舱室空气噪声,可以改善艇员的生活居住条件,从而提高战斗力。

由此可见,潜艇的声隐身性能在作战中是极其重要的。

要实现潜艇的声隐身,就必须要有先进的声学设计,还要有低噪声总体建造工艺作为保障。实践证明,潜艇的声隐身设计目标的实现与建造质量、施工工艺密切相关。法国“凯旋”号核潜艇的建造,几乎在围绕“安静”这一概念上花费了建造总工作量的 80%,才达到“安静”的目标,如消声敷盖层、泵喷推进装置、浮筏安装和大型机械设备的安装等,全都围绕着“安静”的要求来开展工作,同时管道的安装连接、电缆的安装连接等都体现了“安静”这一主题,因此,必须充分注意潜艇建造的质量及采用合理科学的施工工艺。

低噪声总体建造工艺是在潜艇建造中实现各项隐身技术的关键,它是将声学设计理念完全分解成可实现的工程技术手段,并运用于实际建造的潜艇中去。

1.3 声隐身技术研究中常用的名词术语介绍

1.3.1 分贝

在振动噪声测量与分析时,为了研究方便往往将一些量(如声压、质点振速、声强、增益、灵敏度等)取对数,用“分贝”表示。当一个量与同类基准量之比取对数后所得的量称为该量级,如:声压级、质点振速级、声强级、声功率级等。当取以 10 为底的常用对数时,量级的单位是贝尔,贝尔的十分之一是分贝,单位符号是 dB。它是一个相对单位,没有量纲,它的物理意义是表示一个量超过另一个量(基准值)的程度。

表达式(如声压级):
$$L_p = 20 \lg(P/P_0) \text{ dB} \quad (1-1)$$

L_p : 某点的声压级;

P : 某点的声压值;

P_0 : 声压基准值(水声学中为 $1 \mu\text{Pa}$)

分贝的相加与相减:两个分贝数相同的声音叠加,则合成声音等于一个声音的分贝数加上 3 分贝,实际上声能量增加了一倍;一个弱的声音和一个强的声音相比,弱的声音可以

忽略。所以在噪声控制中,必须抓住主要矛盾,先要把主要声源的噪声降下来,才能取得明显降噪效果。

1.3.2 声压

通常在介质中,任何一点均存在压力(压强),这种压力叫静压力,如空气中一般就是一个大气压,在水中,深度每增加 10 米,压力就增加一个大气压;在没有扰动情况下,静压力一般不变,但声波会对介质中的质点施加压缩和伸张的作用,使压力发生微弱的、时大时小的变化,这种变化的超过静压力的逾量压力就是声压,单位是帕(Pa)。

声压级:表示某处的声压值超过基准声压值的程度,用分贝 dB 表示(见前述)。

频程:用来表示两个声音频率之间的间隔或频带宽度,它以上限频率 f_h 和下限频率 f_l 之比的对数来表示,此对数通常以 2 为底。单位倍频程(Octave)数学表达式为:

$$(\text{倍频程数 } Oct) \quad n = \log_2(f_h/f_l), \text{ 则: } f_h/f_l = 2^n \quad (1-2)$$

倍频程:两个基频相比为 2 的频程,即: $f_h/f_l = 2$

1/3 倍频程:即: $f_h/f_l = 2^{1/3} = 1.26$

$$\text{中心频率:} \quad f_{\text{中}} = (f_h \times f_l)^{1/2} \quad (1-3)$$

频带声压级:指有限频带内的声压级,频带宽度必须指明,如频带宽度为 1 倍频程时称为倍频带声压级。

声压谱级:是将声压信号通过带宽 1Hz 的理想滤波器得到的声压级,就是带宽等于 1Hz 的频带声压级。

总声级:整个宽频带的带宽声压级称为总声级。

声源级:定义为距声源等效中心 1 米处的声压级。等效声中心就是声源发出声波的位置。

频带声源级:是指定频带宽度内的声源级。

声音频率范围:20 Hz ~ 20 kHz。

基准值:参考距离 1 m(50),参考声压 1 μPa (20)等条件下确定辐射噪声指标。

由于基准值不同,同样的分贝数辐射噪声是不一样的。

1.3.3 声强

定义:单位时间内流经单位面积的声能量(单位面积功率)称为声强,用字母 I 表示。对于平面波来说,声强与声压的关系是:

$$I = P^2 / \rho c \quad (1-4)$$

式中 ρ 、 c 分别为水或空气的密度与对应声速, ρc 被称为介质的特征阻抗。

声强级(声功率)的数学表达式为

$$L_I = 10 \lg(I/I_0) \quad (1-5)$$

对于平面波来说, $10 \lg(I/I_0) = 20 \lg(P/P_0)$,即声压级与声功率级相等。

声级的叠加:

设几个不同噪声声压级分别为 L_{pi} ,则它们叠加后总声压级 L_p 为

$$L_p = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}/10} \right) \quad (1-6)$$

1.3.4 噪声测量中的几个名词解释

1. 辐射噪声:是指用噪声测量船布放水听器测量的产品辐射噪声声源级和密度谱级,它直接关系到产品航行的隐蔽性;又可划分为机械噪声、水动力噪声、螺旋桨噪声等;

2. 自噪声:安装在产品上某部位的水听器接收到的水噪声称为自噪声,它直接影响产品声呐的作用距离;

3. 空气噪声:舰船空气中存在的噪声(主要是机械噪声);

4. 声目标强度:是指产品对声源的反射能力,它只与艇的外部声学特征有关,主要表征抗主动声呐的发现能力。

1.3.5 声隐身建造要求

1. 影响舰船辐射噪声的主要因素:

主要噪声源设备:汽轮发电机组、推进电机、(主机)、辅循环水泵、主凝水泵、主循环水泵、主滑油泵等主要设备。

主要声传递路线:设备减振器、浮筏减振、管路减振。

2. 船舶建造要求:

(1)研究与设计:基础研究、专项科研、总体设计、设备布置、管系风道布置与设计及建造工艺研究;

(2)船体制造:外板必须严格按型线加工,型线放样必须符合图纸要求,确保表面光滑,门窗盖均应安装隔振橡胶垫,其锁紧装置应可靠;

(3)机组的安装:主汽轮齿轮机组、汽轮发电机组、反应堆冷却剂泵和推进电机、桨、轴安装、大功率弹性离合器安装、浮筏减振装置安装、声呐声腔内吸声尖劈安装、声呐导流罩等安装;

(4)管系安装:管系不得强制安装,同时避免管系共振、增加管路系统的阻尼、减少结构噪声传递(如挠性接管与液压弹簧吊架减少弯头、弹性支吊架)和流动噪声;

(5)通风空调管路应按要求安装减振元件,减少弯管和空气流阻,降低空气噪声。电缆支承件与艇体结构、发电机等大设备联结用的主要电缆也要采用弹性支吊架。

详细要求见本书的其他部分。

第2章 舰船噪声学基础

日常生活中,振动现象无处不在,有些振动现象是对人类有益的,但对于大多数机械和结构而言,振动往往是有害的。在舰船中,振动的危害尤其突出,它不仅降低了机械设备本身的精度和性能,增加了附加动应力,缩短了构件的寿命,还会产生在空气中、水中传播的辐射噪声,影响舰船的隐蔽性。

本节将主要介绍机械振动原理、船体振动原理、管系振动原理、空气噪声原理及水声原理。

振动系统部分

2.1 振动系统的分类

振动系统主要由广义的激励力、质量元件、弹簧元件和阻尼元件组成。

从不同的角度看,振动系统可有不同的分类,下面进行具体介绍。

1. 按振动系统的自由度数分类:

(1) 单自由度系统振动——确定系统在振动过程中任何瞬时几何位置只需要一个独立坐标的振动;

(2) 多自由度系统振动——确定系统在振动过程中任何瞬时几何位置需要多个独立坐标的振动;

(3) 弹性体振动——确定系统在振动过程中任何瞬时几何位置需要无穷多个独立坐标的振动。

2. 按振动系统所受的激励类型分类:

(1) 自由振动——系统受初始干扰或原有外激励取消后产生的振动;

(2) 强迫振动——系统在外激励力作用下产生的振动;

(3) 自激振动——系统在输入和输出之间具有反馈特性并有能源补充而产生的振动。

3. 按系统的响应(振动规律)分类:

(1) 简谐振动——能用时间的正弦或余弦函数表示系统响应的振动;

(2) 周期振动——能用时间的周期函数表示系统响应的振动;

(3) 瞬态振动——只能用时间的非周期衰减函数表示系统响应的振动;

(4) 随机振动——不能用简单函数或函数的组合表达运动规律,而只能用统计方法表示系统响应的振动。

4. 按描述系统的微分方程分类:

(1) 线性振动——能用常系数线性微分方程描述的振动;

(2) 非线性振动——只能用非线性微分方程描述的振动。

5. 从噪声源与噪声传递的媒质分类:

(1) 按声源所属设备的种类, 可以分为机床噪声、汽轮机噪声、空压机噪声、通风机噪声、泵噪声等;

(2) 从声源形成的机理出发, 机械噪声主要分为两大类: 一类是机械结构振动性噪声; 另一类是流体动力性噪声;

(3) 按声波传递的媒质, 噪声可以分为空气噪声和结构噪声。

2.2 单自由度系统振动

工程中大量存在单自由度系统的振动问题。许多相当复杂的系统在作振动或动力分析时也往往可简化成单自由度系统的振动问题, 即可等效成“质量—弹簧”系统。故研究单自由度系统的振动有很大的实际意义。另一方面, 单自由度系统的振动揭示了振动现象的本质, 是多自由度系统振动、弹性体振动以及其他各种振动的基础。因此, 掌握其振动理论是十分必要的。

定义:

如果一个系统在空间的位置于任何瞬时均可由一个数量 q 单值地予以确定, 则此系统称为单自由度系统。此 q 称为系统的广义坐标, 或简单地称为坐标。单自由度振动系统最简单的例子是悬挂在无质量的 (其质量很轻, 可不予考虑) 弹簧上并仅作垂向运动的质量, 即所谓“质量—弹簧”系统 (见图 2-1)。确定此系统在空间位置上只需一个参数——质量 m 的垂向位移 x 。

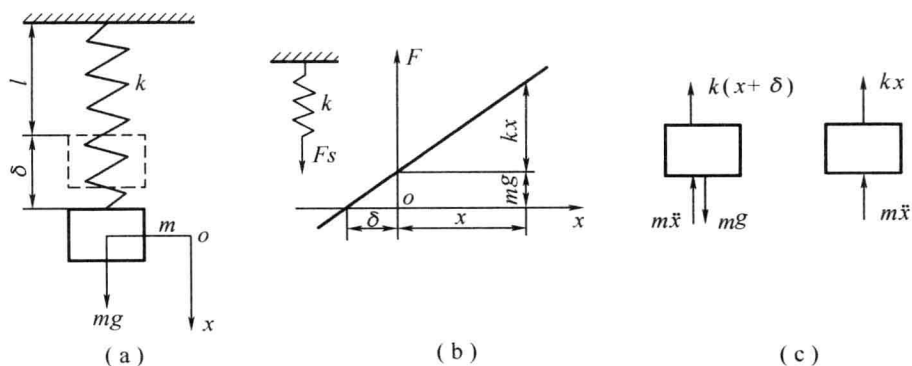


图 2-1 “质量—弹簧”系统示意图

2.2.1 单自由度系统无阻尼自由振动

如上图所示“质量—弹簧”系统, 设系统受到一个干扰, 使质量偏离其原来的静力平衡位置而有一初始位移或初始速度, 则当此干扰去除后质量将在其静力平衡位置附近振动。此时系统除了受常值力作用外, 只受到弹簧恢复力作用而不受任何其他外力作用, 故这种振动称为自由振动, 亦称为自然振动或固有振动。实际上系统在振动时会受到气体、液体等介质的阻尼作用以及材料的内阻尼作用和摩擦力等的作用, 在此先不予考虑。

由于我们限于研究线性振动问题,故这里所述的弹簧是“线性弹簧”。弹簧服从虎克定律,即 $F_s = kx$ (其中 k 称为弹簧的刚性系数,有时亦简称为弹簧刚度或弹簧常数, x 为弹簧变形量)。

设上图弹簧原来的长度为 l ,悬挂质量后伸长了 δ ,达到上图所示的静力平衡位置。此时弹簧仅受质量 m 的重力作用。由此不难求得弹簧的静伸长

$$\delta = m_g/k \quad (2-1)$$

设振动时质量 m 偏离其静力平衡位置的垂向位移为 x ,即把 x 坐标的原点取在系统的静力平衡处,且设位移 x 向下为正,速度 x' 和加速度 x'' 的方向亦向下为正。对质量 m 取分离体后,按达朗贝尔原理列出自由振动的微分方程式:

$$mg - k(\delta + x) = m\ddot{x} \quad (2-2)$$

$$\text{即} \quad m\ddot{x} + kx = 0 \quad (\text{或} \quad \ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0) \quad (2-3)$$

从上式可见,重力等常值力的作用只影响系统的静力平衡位置而与系统在其静力平衡位置附近的振动没有任何关系。故对线性系统,只要注意到振动位移 x 的坐标原点取在系统的静力平衡位置,在建立振动微分方程式时可不考虑重力等常值力的作用。因此,今后在建立振动微分方程式时均不计重力等常值力的作用。对所讨论的“质量—弹簧”系统的无阻尼自由振动可认为分离体 m 上只受弹簧恢复力 kx 和惯性力 $m\ddot{x}$ 的作用。

令 $\lambda^2 = k/m$,则上式可变为常系数两阶齐次常微分方程:

$$\ddot{x} + \lambda^2 x = 0 \quad (2-4)$$

此方程通解为 $x(t) = A_1 \cos(\lambda t) + A_2 \sin(\lambda t)$

$$\text{进一步简化为} \quad x(t) = A \sin(\lambda t + \beta) \quad (2-5)$$

此解说明无阻尼自由振动是简谐振动。

式中: A 称为振动的振幅;

$$\lambda \text{ 称为圆频率,亦称固有频率,} \quad \lambda = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\delta}} \quad (2-6)$$

振幅 A 和初相位 β 由初始干扰幅度确定;

由于在振动计算中经常用圆频率 λ ,故圆频率亦简称为频率。只要注意到符号和因次的不同就可避免圆频率与频率的混淆。由于 $\lambda = \sqrt{\frac{g}{\delta}}$,因此可通过测量系统的静变形来计算固有频率。

自由振动的频率是振动系统极为重要的参数,它仅取决于系统固有的性质(弹簧刚度和质量)而与初始条件等无关。故自由振动频率亦称为系统的固有频率或自然频率。

2.2.2 单自由度系统有阻尼强迫振动

上面所述的无阻尼自由振动,主要是想介绍固有频率的概念,下面介绍工业中最常见的、最一般的振动:有阻尼强迫振动。

所谓阻尼,一般是指阻碍系统运动的力,它的方向始终与系统中质点的运动方向相反。在工程中,引起阻尼的因素很多。通常可分为外阻尼和内阻尼两类。外阻尼是指振动系统在周围介质中运动或与系统以外的物体相摩擦所产生的阻尼力。内阻尼是指振动系统内部由于材料的非弹性性质或结构的非弹性变形而产生的阻尼力。

外阻尼力取决于振动的速度。当系统在黏性介质中振动且速度较小时,阻尼力与速度成线性关系。此时阻尼力可写成

$$R = -C\dot{x} \quad (2-7)$$

式中, C 是黏阻系数,它与介质的黏性系数、振动体的大小、形状、表面光洁度等有关,通常用实验的方法确定。

所谓强迫振动,即在“质量”振动的过程中总是受到外界的干扰作用。外界干扰可分为两种,一种是外界直接的干扰力,另一种是基座的运动,如图 2-2 所示。

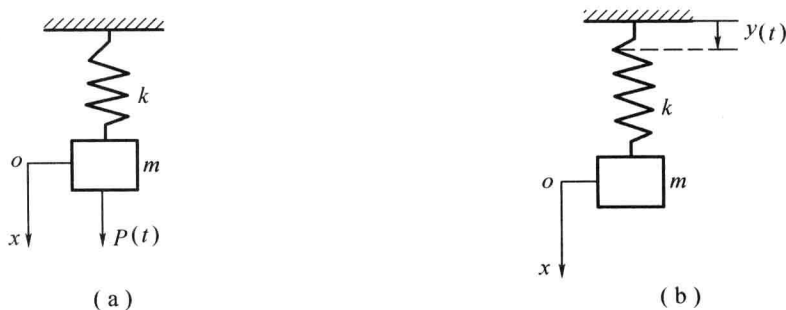


图 2-2 外界干扰示意图

计算强迫振动的基本目的在于寻求系统在外界干扰作用下的动力响应,即它的振动位移、速度、加速度以及由此所确定的构件动应力等的参数。

下面介绍外干扰为干扰力时的有阻尼强迫振动,如图 2-3 所示。

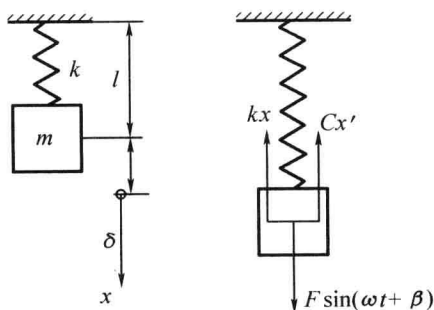


图 2-3 “质量—弹簧”系统有阻尼强迫振动

如上图,设在有黏性阻尼的“质量—弹簧”系统上作用一简谐干扰力 $F\sin(\omega t + \beta)$,则质量 m 的运动微分方程式为

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + kx = F\sin(\omega t + \beta) \quad (2-8)$$

或

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \lambda^2 x = \frac{F}{m}\sin(\omega t + \beta) \quad (2-9)$$

式中

$$2n = \frac{c}{m} \quad \lambda^2 = \frac{k}{m}$$

此方程式的解由通解和特解两部分组成。对于我们通常所遇到的小阻尼的情况 (n