

现代汽车实用技术

内燃机振动 控制及应用

余成波
何怀波 编著
石晓辉



国防工业出版社

396210

内燃机振动控制及应用

余成波 何怀波 石晓辉 编著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

内燃机振动控制及应用/余成波等编著. —北京:国防工业出版社, 1997.4

ISBN 7-118-01658-6

I. 内… II. 余… III. 内燃机-机械振动-振动控制
IV. TK407

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第14047号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码·100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10¹/₂ 267千字

1997年4月第1版 1997年4月北京第1次印刷

印数:1—5000册 定价:13.20元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

《内燃机振动控制及应用》是近年来在大学内燃机专业开设的一门新课,是《内燃机动力学》的后续课程。近二三十年来,国内外在此方面取得了巨大的进展,随着内燃机的高速、大功率、轻型化,其振动噪声问题愈加严重;而国际社会对振动噪声控制的要求却日益严格,为了适应这种矛盾和市场商品的激烈竞争,满足人才培养的需要,推广现有的科研成果,并促进其发展,亟需将目前分散在各种技术期刊和少数相关学科专著中的上述研究成果及其新进展,进行归纳和整理,使之成为反映本学科近代水平的教材。本书是编者在这方面的一次尝试,它包含有编者多年教学、科研的一些体会。

内燃机是一种多激振源、多振动类型的复杂振动系统。本书在对其激振源进行详细分析(第二章)的基础上,着重论述了整机振动(第三章)、结构振动(第四章)和扭转振动(第五章)等三种振动类型;并介绍了它们的基本理论、影响因素、控制方法和性能预测;在本书最后一章还专门介绍了利用振动信号对内燃机的工况监测和故障诊断。

在编写过程中,编者参阅了国内外许多作者文献,在此致以深切的谢意!同时得到了重庆工业管理学院的领导、教职员工的全力支持,编者一并表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中缺点错误在所难免,期待着来自各方面的建议和批评指正。

编者

1996年5月

于重庆工业管理学院

目 录

第一章 基本概念	1
第一节 内燃机振动的类型	1
一、整机振动	1
二、结构振动	3
三、轴系扭转振动	4
四、部件振动	4
第二节 振动的度量参数和评价标准	5
一、物理度量参数	5
二、振动烈度及其评级	7
三、振动的主观评价和标准	8
第三节 振动测试系统	11
一、振动测量仪器的分类及系统组成	11
二、振动测量仪器的主要性能指标	12
三、常用振动传感器及其系统特点	13
第四节 振动控制的一般方法	18
一、振动的危害及利用	18
二、内燃机振动控制的途径	19
第二章 内燃机激振源	22
第一节 激振力分类	22
一、直接激振力	22
二、间接激振力	22
第二节 燃气力	23
一、气体压力级频谱图	23
二、影响因素	26

第三节 曲柄连杆机构惯性激振力	34
一、连杆双质量换算系统的精确度	35
二、机构参数偏差的影响	43
三、转速波动的影响	51
四、曲轴扭转振动的影响	56
五、曲柄连杆机构的改进和传力机构的发展	63
第三章 内燃机整机振动及其隔离	66
第一节 整机振动的运动分析	66
一、整机自由振动的微分方程	66
二、固有频率和振型的矩阵迭代解法	79
三、整机振动的耦合度和振动形态	88
四、斜置式支承系统	96
第二节 整机的强迫振动	101
第三节 内燃机整机激振力的实验确定	105
第四节 内燃机隔振装置	109
一、多自由度隔振装置效能的评价	110
二、隔振器在柔性结构上的性能	114
三、橡胶隔振器	116
四、隔振的设计步骤	117
五、内燃机隔振装置参数的选择	118
第五节 动力消振器	121
一、动力消振器原理	121
二、无阻尼动力消振器	123
三、阻尼动力消振器	124
四、动力消振器的使用	125
第六节 阻尼处理	126
一、交界面阻尼法	126
二、喷涂阻尼层法	127
三、采用夹芯结构	128
第七节 冲击隔离	129
一、冲击隔离	129

二、阻尼对冲击隔离的影响	133
第八节 宽频带振动的隔离	134
一、经典单层隔振理论的局限性	134
二、宽频带隔振和减振的一些措施	136
第九节 非刚性基础的振动隔离	140
一、非刚性基础的力传递率公式	140
二、非刚性基础隔振效果的评价	143
第十节 内燃机整机振动和隔振的主动控制	145
一、整机振动的主动控制	146
二、动力隔离的主动控制	148
第四章 内燃机结构振动	153
第一节 内燃机结构中振动传播途径	153
第二节 燃烧激振	155
一、燃烧激振的传播机理	156
二、机体燃烧激振响应特性和控制	159
第三节 活塞敲击激振	165
一、活塞敲击激振的传播及其特性	167
二、桶形活塞横动的计算和试验研究	169
三、活塞敲击激振的影响因素及控制	175
第四节 配气机构振动控制	182
一、气门系统的振动现象	182
二、抑制振动的措施	186
三、合理设计凸轮的型线	189
四、合理设计气门弹簧	190
第五节 气门运动实测	191
一、实验装置	191
二、气门位移测量	191
三、速度和加速度测量	192
第六节 内燃机结构振动特性的试验研究	193
一、内燃机结构振动	193
二、实机运转分析法	201

第五章 内燃机曲轴系统的扭转振动	212
第一节 曲轴扭振的计算模型	213
一、简化模型	213
二、等效圆盘	215
三、等效轴	219
四、扭转固有振动频率的计算	224
五、共振时最大的扭转振幅	225
第二节 内燃机扭振控制	227
一、扭振减振器	227
二、最佳扭振阻尼	233
第三节 扭振测量和分析	236
一、盖格尔(Geiger)扭振仪	237
二、电感式扭振仪原理	239
三、非接触式扭振仪	240
四、测量过程及测点选择	242
五、扭振波形分析	246
第四节 内燃机轴系扭转振动的新问题	254
一、V型机凸轮轴的偏振	254
二、变惯量扭振系统	258
第六章 内燃机故障的振动诊断	262
第一节 振动信号的频域诊断	262
一、气门故障诊断	264
二、连杆组件故障诊断	268
三、活塞缸套间隙状态的诊断	269
四、柴油机工作过程的故障诊断	271
第二节 通频全息谱分析	276
一、通频全息谱的建立	277
二、曲轴主轴承故障诊断	280
第三节 主分量分析诊断	283
一、主分量分析的建立	283

二、内燃机故障诊断	286
第四节 灰色关联度诊断	287
一、A型关联度分析	288
二、B型和ABO型关联度分析	289
三、柴油机工作过程故障的灰色诊断	290
第五节 时序模型诊断	294
一、AR(n)模型的参数估计和阶次确定	296
二、模型的时域识别	300
三、自回归谱分析	303
第六节 内燃机动态监测系统	307
一、船用柴油机的动态监测系统	307
二、飞机发动机的动态监测系统	311
参考文献	315

第一章 基本概念

内燃机是一种用途广泛的热动力机械,在船舶、汽车、拖拉机、工程机械和机车等领域中,用作主要原动力。随着内燃机朝高速、轻型、大功率方向发展,其振动噪声问题日趋严重;而人们对振动噪声控制的要求,却日益严格,促使人们对内燃机振动问题的研究给予更多的关注。因此,广大工程技术人员有必要掌握一定的内燃机振动控制理论方面知识,它已成为从事内燃机设计、研制人员的重要工具。为此本书将首先介绍内燃机振动控制的基本知识。

第一节 内燃机振动的类型

自内燃机诞生以来,改善其动力学性能、降低其振动强度,一直是从事内燃机设计人员努力的目标。但是,采用曲柄连杆机构的内燃机,由于结构复杂、气缸的作功过程不连续,其惯性力和气缸气体力都具有强烈的冲击和宽频带激振作用;此外,内燃机还有各种系统和部件,它们都存在各式各样的作用力。所以,由此产生的内燃机振动,其特点是多振源、宽频频带、形态复杂、不可能用一种振动类型加以概括,通常按照研究重点的不同,内燃机振动可划分为下述四种类型。

一、整机振动

研究整机振动的目的是为了了解它的振动规律和振动的大小,考察弹性支承或隔振器的性能,研究环境对内燃机振动的影响。研究整机振动时,假设内燃机为绝对刚体,将内燃机及其支承简化为单质量多弹性支承系统(见图 1-1),在激振力作用下,作六

自由度 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 的刚体运动(称为整机刚体振动)。其激振力为各曲柄连杆机构产生的惯性力和力矩,以及由往复惯性力和气体力引起的倾倒地矩。

显而易见,严重的整机振动会降低内燃机的使用寿命、工作效率和可靠性,损坏各种连接管道,并对周围环境产生振动噪声污染。由此而引起的环境振动,不但恶化其它设备、仪表的工作条件,并且对工作人员和乘客产生不良影响。在表 1-1 所指的频段,人体内的共振引起组织变形,产生不舒服,振幅大时感到痛苦。因此,要采取隔振措施,以减少内燃机振动噪声向四周的传播。

表 1-1 人体在不同频率、振幅的振动中的主观感觉

主观感觉	振动频率 (Hz)	双振幅 (mm)	主观感觉	振动频率 (Hz)	双振幅 (mm)
腹痛	6 ~ 12	2.39 ~ 4.14	背痛、臀痛	40	1.6
	4 ~ 14	1.27 ~ 15.54		70	0.81
	10	3.61 ~ 4.80	鼻痒	10	3.6 ~ 4.8
	40	1.6 ~ 3.2		40	1.6 ~ 4.1
	70	0.81		70	0.81
胸痛	5 ~ 7	15.2 ~ 38.1	背痒、臀	10	3.6 ~ 4.8
	8	10.2	痒、大腿痒	40	3.2
	6 ~ 12	2.39 ~ 4.14	尿急感	10 ~ 20	0.61 ~ 2.49
	4 ~ 11	2.08 ~ 15.54	粪急感	9 ~ 20	0.61 ~ 3.05
	3 ~ 10	10.16 ~ 55.37	头部症状	10	3.6 ~ 4.8
睾丸痛	7 ~ 10	1.01 ~ 101.6		40	3.2
腰骶痛	6.5 ~ 20	0.61 ~ 5.84		70	0.81
面部刺痛	16 ~ 100	0.036 ~ 0.58	呼吸困难	3 ~ 10	10.61 ~ 55.37
头皮刺痛	16 ~ 100	0.036 ~ 0.58		1 ~ 3	25.4 ~ 236.2
				4 ~ 9	64.5 ~ 497.8

整机振动强度是内燃机总体振动品质的反映,它包含有关于内燃机设计性能(动力平衡)好坏、制造水平高低、机器状况及其

变化等丰富的信息。人们一般所说的内燃机振动实际上是指整机振动。

二、结构振动

结构振动主要是指实际上具有弹性的内部结构部件,如活塞、连杆、曲轴、机体等,在燃烧气体力和惯性力作用下所激起的多种形式的弹性振动。它是诱发内燃机燃烧噪声和活塞敲击噪声的根源,是近二十余年来得到重视的一种振动类型。根据结构振动形成的特征,将内燃机单个气缸的结构划分为由工作的间隙 δ_i 隔离的两部分,如图1-2所示。

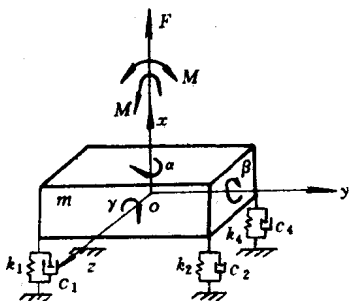


图 1-1 整机振动模型

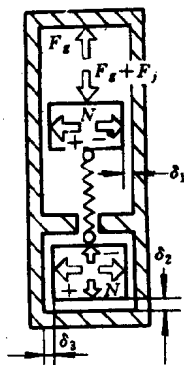


图 1-2 结构振动模型

1. **内部传力结构**:包括活塞、连杆和曲轴。在模型中,这些结构用两个弹簧连接的质量表示。

2. **外部承载结构**:包括由缸盖、机体、曲轴箱,它们构成封闭的弹性结构。

急速燃烧的气体力 P_g ,对缸盖、活塞顶部作用以冲击载荷;此外,由于存在工作间隙 δ_1 ,活塞运动过程中侧压力方向的改变,也会导致活塞、缸套的撞击,这种冲击力含有较高频率范围的谐振成分,在它们的激振下,内燃机结构各零部件将按各自的固有频率进

行振动。最终的结果导致外部结构表面的高频振动，诱发 800 ~ 3000Hz 的噪声。

另外，在内燃机上还有许多板壳结构如油底壳、齿轮罩壳等，也有一些悬臂安装的部件如进排气管、水泵等，它们均固定在外部承载结构上，必然受到后者结构振动的激振。当激振频率与这些零件的固有频率相吻合时，将产生剧烈的颤动（局部振动）。它们并不能代表内燃机的整体振动品质，主要是影响内燃机的噪声水平，但受到外部承载结构振动特性制约。故可将局部振动列入结构振动范畴。

三、轴系扭转振动

多缸内燃机轴系包括曲轴、凸轮轴、传动轴等。它们的扭转刚度较小，在周期性曲轴扭矩（包括从动机械的不均匀阻力矩）、凸轮轴阻力矩等的激振下，出现扭转振动。严重的扭转振动除引起轴段的断裂外，同时破坏各缸工作的相位关系，恶化内燃机的工作状况和平衡性能；导致内燃机功率下降、振动噪声加剧。图 1-3 是其计算模型，除轴段外，其它部件都被认为是刚性的。

虽然轴系扭转振动是人们研究最早、最多的内燃机振动类型，但随着生产特别是高速、强载、大功率内燃机的发展，新的问题（例如对称分支系中的偏振等）仍不断出现，新的研究领域（如非线性扭振、扭转与轴向的耦合振动）也不断扩展，因此，扭转振动的研究仍然值得重视。

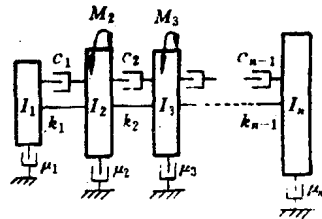


图 1-3 轴系扭转振动模型

四、部件振动

内燃机的部件很多，它们的振动形式更是多种多样，最常见的是配气系统振动和缸套振动。前者会破坏气门的正常工作，后者将

引起缸套的穴蚀。

进排气管的气流振荡是部件振动的另一种形式,它对进排气过程乃至内燃机的整个工作性能都有较大的影响。

此外,还有燃料系统、增压器等部件的振动。

部件振动的内容在内燃机原理和结构设计的教材中均有介绍,本书不再涉及。

第二节 振动的度量参数和评价标准

一、物理度量参数

振动测量的三个物理量为位移、速度、加速度,究竟用哪些物理量来表示振动的状况和评价振动的影响,是振动研究首先要考虑的问题。不管所测量的是振动物体的位移、速度或加速度,振动信号的形式和频率成分都是相同的。但是这三者之间有时间移位(相位差)。速度信号是把位移信号乘以 $i\omega$ 得到,加速度是把速度乘以 $i\omega$ 得到。由于振动现象十分复杂,研究目的又各不相同,因此,不可能用一个统一的物理量来描述振动和评价它所产生的各种影响,而要根据具体情况,即振动的特征和研究目的来选定。

因为位移、速度和加速度之间相互关系的性质,在进行振动测量时,特别是当其包括宽频带时,参数的选择非常重要。大部分机械系统的性质是仅在低频时产生大的位移,因此测量位移给出低频分量的计权将最大。同时,高频时产生大的加速度,所以加速度测量朝着高频振动分量方面加权;中频振动严重的则最好采用速度来测量。

所选择振动测量参数最好能便于精确测量需测量的最小值和最大值。可测量的最小和最大参数间的差别为动态范围,但电子仪器系统的动态范围均受到限制,这就需要尽量缩小所希望测量的最小和最大参数之间的差别。因此,如要求大的频率范围,选择速度为振动测量参数是恰当的。位移、速度和加速度动态范围特性用图解表示于图 1-4 中。对于低频(400Hz),位移测量是恰当的;对于

中频(500 ~ 2000Hz),速度测量是恰当的;对于高频(> 2000Hz),加速度测量是恰当的。

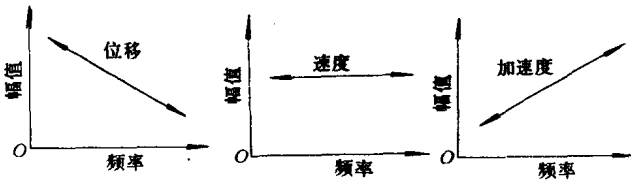


图 1-4 位移、速度和加速度动态范围特性

就内燃机整机振动而言,测量频率范围为 10 ~ 1000Hz;而对滚动轴承、齿轮啮合、叶片共振等情况,其频率上限要扩大到 2000Hz、甚至更高(故障诊断)。实践证明,在内部损伤还未到影响机器实际工作能力之前,振动的高频分量就已包含有损伤的信息,待到在低频分量也有所反映,则损伤已发展到较大的程度。因此,高频分量的测量对机械设备的故障诊断是十分重要的。

目前,一般看法是:评价机械产品、机器结构的质量,用位移或速度;状态监测、故障诊断和评价对人体的影响,倾向于采用加速度。对内燃机而言,整机振动多采用速度;结构振动采用速度或加速度;扭转振动则采用位移(扭角)。

除了上述物理度量参数外,在振动测试分析中,常取用对数单位、分贝(dB)来描述振动的大小,称之为振动级。其中最常用的是速度级和加速度级,它们的定义为:

振动位移级

$$L_d = 20 \lg \frac{d}{d_0} \quad (\text{dB}) \quad (1-1)$$

振动速度级

$$L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0} \quad (\text{dB}) \quad (1-2)$$

振动加速度级

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{a_0} \quad (\text{dB}) \quad (1-3)$$

式中, d, v, a 为振动位移(mm)、速度(mm/s)和加速度(m/s^2); d_0, v_0, a_0 为其基准值(零级值), 分别为 $10^{-9}mm, 10^{-6}mm/s$ 和 $10^{-6}mm/s^2$ 。值得注意的是, 分贝仅仅是相对值; 当对比不同的振动级 dB 时, 永远要保证它们是相对于同一参考值。

二、振动烈度及其评级

目前, 我国及国际标准 ISO 都采用当量振动烈度作为评价机械产品总体(整机) 振动强度的参数。其定义为: 在相互垂直的三个方向上, 测量机械多个测点振动速度均方根值(取三次以上读数的平均值), 三个方向速度均方根值平均值的向量和, 便是该设备的当量振动烈度 V_s , 即

$$V_s = \sqrt{\left[\frac{\sum V_x}{N_x}\right]^2 + \left[\frac{\sum V_y}{N_y}\right]^2 + \left[\frac{\sum V_z}{N_z}\right]^2} \quad (\text{mm/s}) \quad (1-4)$$

式中 V_x, V_y, V_z —— x, y, z 三个方向上各规定测点振动速度均方根值, mm/s;

N_x, N_y, N_z —— x, y, z 三个方向上测点数。

在式(1-4)中, 三个方向振动的影响是相同的, 这是最常见的情况。但有些机械可能对三个方向的振动有不同要求, 此时可对某方向的振动烈度提出一些限制, 或在式(1-4)中, 对该方向的速度平均值加权后再求向量和。

求出振动烈度之后, 还需要对其振动状况进行评级。通常是根据对机械工作性能、运转安全可靠、人体和精神感觉、周围环境污染程度等几方面的影响, 将振动烈度进行分级。表 1-2 是国标 GB5913—86“柴油机车车内设备机械振动烈度评定方法”中对机车牵引用柴油机振动等级的规定。表中取 4dB 作为级差(相应的振动烈度差为 1.6 倍), 因为它是人类所能感觉到的振动变化的最小量值, 同时也能反映出振动烈度的明显变化。表中, A—良好工作

表 1-2 柴油机振动烈度评级表

振动烈度 (mm/s)	分贝 (dB)	柴油机无 隔振装置	柴油机有 隔振装置
0.28 ~ 0.45		A	A
0.45 ~ 0.71	93		
0.71 ~ 1.12	97		
1.12 ~ 1.80	101		
1.80 ~ 2.80	105		
2.80 ~ 4.50	109		
4.50 ~ 7.10	113	B	B
7.10 ~ 11.20	117		
11.20 ~ 18.0	121	C	C
18.0 ~ 28.0	125		
28.0 ~ 45.0	129		
45.0 ~ 71.0	133	D	D
71.0 ~ 112.0	137		
	141		

状态;B— 正常工作状态;C— 容忍工作状态;D— 不容许工作状态。

三、振动的主观评价和标准

内燃机、汽车、拖拉机等机械的操作人员经常在振动环境中工作。这就提出了诸如人体对振动的感觉如何?多大的振动使人体开始感到不愉快?多大的振动使人体不能忍受等一系列问题。因此还要研究振动的主观(人体感觉)评价。只有在此基础上,才能制定环境振动标准,对工作环境的振动状况作必要的限制。

与机械设备不同,在振动环境中的人体,其本身不单是一个振动系统,同时也是个生物系统。人体在力学上是一个非常复杂的结构,而且它的特性随环境和意志而变化。此外,每个人之间的差别也比较大。从力学观点研究振动对人们的影响时,可以认为,人体