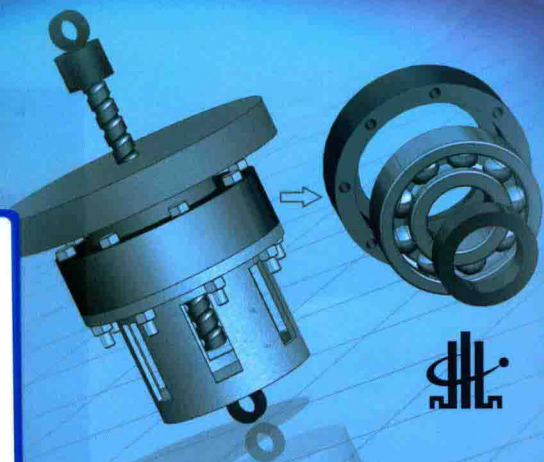


惯容隔振系统性能分析及在船海领域的应用探索

温华兵 郭俊华 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

惯容隔振系统性能分析及 在船海领域的应用探索

温华兵 郭俊华 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书紧密结合工程应用,系统介绍了含惯容器的隔振系统动力学特性分析方法及惯容器的具体应用与探索。首先,分别介绍了隔振器技术、传统隔振技术及ISD隔振技术的研究概况;其次,开展了惯容器动力学特性及模型探索,揭示了惯容器的本质;第三,基于惯容器的动力学特性,从理论上推导了含惯容器的单层隔振系统的动力学特性,并且结合试验验证了理论推导的正确性;第四,推导了含惯容器的双层及多层隔振系统的动力学特性,并且结合工程实际,以某柴油发电机组为对象,给出了双层及多层隔振系统的计算算例;第五,基于某柴油发电机组,详细设计、校核及优化了惯容—橡胶复合隔振器结构,并且将其应用于柴油发电机组隔振,分析了柴油发电机组的动力学特性;第六,探索了惯容器在船海领域的其他应用,设计了几种应用于船海领域的减摇、减振设备。

本书可作为从事船舶与海洋工程、动力工程领域隔振设计及振动控制、含惯容器系统设计与分析的科研人员和技术人员的参考资料,也可以作为船舶与海洋工程等专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

惯容隔振系统性能分析及在船海领域的应用探索/

温华兵,郭俊华著. —北京:国防工业出版社,

2019. 1

ISBN 978-7-118-11730-1

I. ①惯… II. ①温… ②郭… III. ①船舶减振-减振降噪-研究 IV. ①U661.44

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第257186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100048)

涿州宏轩印刷服务有限公司

新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张10½ 字数232千字

2019年1月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价38.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

振动问题广泛存在于机械工业和其他工业部门中,这些问题不仅会导致机器和仪表工作效率低下,而且会引起机械结构的辐射噪声。噪声主要的来源是交通噪声,如汽车、飞机和火车等产生的噪声,工业噪声也是一种主要污染。此外,像建筑施工机械,娱乐扩音设施,甚至一些办公设备,人们大声喧哗吵闹,都是噪声污染源。机械设备的振动和噪声不但会导致机械设备的疲劳损坏,也会危害人们的身体健康。

进入 20 世纪以来,随着世界贸易的增长以及当今航运技术的发展,对船舶振动噪声的要求越来越高,振动噪声也成为衡量舰船、车辆等交通工具的重要性能指标之一。动力机械噪声和螺旋桨噪声是船舶的振动噪声源,而动力机械的振动是引起船舶振动的主因。船舶动力装置将振动传递给船体结构,再通过船体结构传播到各层舱室结构,在舱室内部产生的振动噪声会影响船员的健康、生活及工作效率。近年来,随着海运事业的发展,船舶吨位、航速及动力装置功率的不断提高,使船舶动力装置噪声污染日趋严重,也使船舶动力装置噪声日益受到人们的关注。因此,国际海事组织不断推行新的国际公约,要求将船舶动力装置噪声控制在越来越低的水平。

剑桥大学学者 Smith 于 2001 年发明了惯容器,大量的相关理论研究和应用实践表明,惯容器可以上百倍地增加参振系统的虚拟质量,具有优异的减振性能,尤其是能有效抑制低频振动。针对国内船舶与海工领域存在的大量船用大功率动力设备及海洋平台低频摇摆问题,积极开展惯容理论与技术研究,并在现有基础上进一步研究隔振技术及其新产品,是解决船舶与海工领域减振共性关键技术的迫切需要和有效途径;同时也有助于提高我国在高技术船舶、海洋工程装备领域的关键设备自主配套能力,并推动相关产品的开发和产业化。

全书共分为 9 章。第 1 章概述了隔振器技术、传统隔振技术以及 ISD 隔振技术的现状与发展,为后续研究提供了基础;第 2 章推导了惯容器的动力学特性,介绍了机械式平动惯容器、流体式平动惯容器以及扭转式惯容器的几种模型,并且给出了一些典型惯容器模型的惯质系数及其发展模型,最后通过总结各种惯容器模型的相同点,揭示了惯容器的本质属性;第 3 章分析了几种单层 ISD 隔振系统阻抗特性,并且分析了惯容器对几种 ISD 隔振系统的影响,为了验证惯容器对隔振系统的影响,通过试验分析了惯容器的惯质系数、隔振系统的加速度及传递率;第 4 章分析了双层及多层 ISD 隔振系统的动力学特性,基于某柴油发电机组,给出了双层及多层 ISD 隔振系统的应用算例;第 5 章以某柴油发电机组为应用对象,将惯容器与橡胶并联设计了惯容-橡胶复合隔振器,给出了隔振器的相应参数,并且基于 ANSYS Workbench 对整体惯容-橡胶复合隔振器进行了力学性能校核分析;第 6 章首先分析了考虑摩擦因素的滚珠丝杠式惯容器惯质系数,将惯容器的一些几何参数与惯质系数建立联系,通过建立惯容-橡胶复合隔振器的优化数学模型,利用遗传

算法,对其进行了结构优化;第7章加工了惯容-橡胶复合隔振器,通过试验分析了其静态、动态性能,探讨了惯容-橡胶复合隔振器传递率的一种计算方法;第8章将惯容-橡胶复合隔振器应用于柴油发电机组的隔振,建立了整体隔振系统的动力学模型并且通过 Matlab/Simulink 进行了仿真,分析了整体隔振系统的模态、隔振器的响应及传递特性、整体机组的响应等;第9章开展了惯容器在船海领域的其他应用探索,设计了含惯容结构的半主动减摇鳍模型、几种含耦合惯容结构的减摇减振设备模型以及含惯容结构的发电式动力吸振器模型。

全书编写以江苏科技大学振动噪声研究所多年来在惯容器方面的研究成果为基础,并且借鉴了香港大学陈志强教授团队和江苏大学陈龙教授团队的研究成果。夏兆旺副教授参与了第1章的撰写工作,彭子龙博士参与了第2章的撰写工作,咎浩博士研究生参与了第3~4章的撰写工作,唐立博士研究生参与了部分试验工作,李阳、刘悦硕士研究生参与了文献整理、试验以及书稿的校对工作。本书得到了2017年省重点研发计划项目(BE2017120)资助和江苏铁科新材料股份有限公司对试验工作的支持,感谢吕珏、谭飞、沈超明、毛南敏等人的参与。本书撰写还得到了周云祥、方开翔研究员,杨兴林、陈宁教授等人的支持,香港大学黄立锡、陈志强教授在作者香港大学访问学者期间给予了指导,在此表示感谢!

由于笔者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

笔者

2018年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 隔振器技术概述	2
1.3 传统隔振技术概述	2
1.3.1 单层隔振技术	3
1.3.2 双层隔振技术	3
1.3.3 浮筏隔振技术	4
1.4 惯容器及 ISD 隔振技术概述	5
参考文献	6
第 2 章 惯容器动力学特性与模型探索	9
2.1 惯容器动力学特性	9
2.1.1 含惯容器的机电类比关系	9
2.1.2 含惯容器的机械阻抗理论	9
2.2 机械式平动惯容器	11
2.2.1 齿轮齿条惯容器	11
2.2.2 滚珠丝杠式惯容器	12
2.2.3 位移放大式惯容器	14
2.3 流体式平动惯容器	15
2.3.1 液压马达式惯容器	15
2.3.2 液力发生器式惯容器	15
2.3.3 液力式惯容器	16
2.4 扭转式惯容器	16
2.4.1 扭转式惯容器的定义与原理	16
2.4.2 两种典型扭转式惯容器	17
2.5 惯容器的本质	17
2.6 本章小结	18
参考文献	18
第 3 章 含惯容器的单层隔振系统动态性能分析	20
3.1 ISD 隔振系统的阻抗特性	20
3.2 惯容器对隔振系统动态特性的影响	21
3.2.1 惯容器并联系统	21
3.2.2 惯容器串联系统	24

3.3	单层 ISD 隔振系统试验方法	26
3.3.1	振动试验系统与设备	26
3.3.2	试验工况及步骤	27
3.4	单层 ISD 隔振系统试验结果分析	28
3.4.1	惯容器非线性动力学分析	28
3.4.2	惯质系数分析	29
3.4.3	加速度分析	30
3.4.4	传递率分析	32
3.5	本章小结	33
	参考文献	33
第 4 章	含惯容器的多层隔振系统动态性能分析	35
4.1	惯容器对双层隔振系统动态特性的影响	35
4.1.1	双层 ISD 隔振系统固有频率分析	35
4.1.2	双层 ISD 隔振系统强迫振动分析	39
4.2	惯容器对多层隔振系统动态性能的影响	41
4.2.1	多层 ISD 隔振系统固有频率分析	41
4.2.2	多层 ISD 隔振系统强迫振动分析	43
4.3	双层 ISD 隔振系统计算实例	44
4.3.1	不同刚度条件下惯容器对双层隔振系统的影响	45
4.3.2	接地惯容器对双层隔振系统的影响	52
4.4	三层 ISD 隔振系统算例分析	52
4.5	本章小结	55
	参考文献	55
第 5 章	惯容-橡胶复合隔振器产品设计与校核分析	56
5.1	惯容-橡胶复合隔振器设计基础与对象	56
5.1.1	II-ISD 隔振系统分析	56
5.1.2	惯容-橡胶复合隔振器设计对象	57
5.2	惯容器中滚珠丝杠副选型设计	57
5.2.1	滚珠丝杠副的滚道选型	58
5.2.2	滚珠丝杠副的循环方式选型	58
5.3	惯容器中滚珠丝杠副尺寸设计	59
5.3.1	惯容器公称直径设计	59
5.3.2	惯容器导程设计	59
5.3.3	惯容器其他几何参数计算	59
5.4	滚珠丝杠式惯容器承载能力计算	60
5.4.1	惯容器轴向额定静、动载荷计算	60
5.4.2	惯容器使用寿命计算	63
5.4.3	惯容器轴向刚度计算	64
5.5	复合隔振器其他部件的设计计算	66

5.5.1	飞轮的设计	66
5.5.2	轴承的选用	67
5.5.3	顶盖和底座的设计	68
5.5.4	橡胶金属复合件的设计	68
5.5.5	贯穿螺栓的设计	70
5.6	惯容-橡胶复合隔振器的建模与有限元前处理	71
5.6.1	惯容-橡胶复合隔振器的三维建模	71
5.6.2	惯容-橡胶复合隔振器有限元建模	74
5.7	惯容-橡胶复合隔振器模态分析	75
5.8	惯容-橡胶复合隔振器力学性能仿真分析	77
5.8.1	惯容结构仿真分析	77
5.8.2	橡胶部分仿真分析	82
5.9	本章小结	84
	参考文献	85
第6章	惯容-橡胶复合隔振器摩擦惯质系数研究及其结构优化设计	86
6.1	滚珠-滚道接触点的滑动差动速度	86
6.1.1	滚珠与滚道之间坐标系的建立	86
6.1.2	滚珠上接触点的运动	88
6.1.3	螺母侧接触点的运动	89
6.1.4	丝杠侧接触点的运动	89
6.1.5	接触点的相对滑动速度	89
6.2	惯容器滚珠与滚道之间的摩擦效率	90
6.2.1	滚珠与滚道接触面应力	90
6.2.2	滚珠与滚道接触面摩擦力矩	92
6.2.3	滚珠与滚道的滑动摩擦效率	93
6.2.4	滚珠与滚道的滚动摩擦效率	93
6.3	摩擦惯质系数导出及试验分析	93
6.3.1	摩擦惯质系数导出	93
6.3.2	考虑摩擦的惯质系数试验验证	93
6.3.3	滚珠丝杠副几何参数评估	95
6.4	惯容-橡胶复合隔振器的优化数学模型	97
6.4.1	设计变量	97
6.4.2	约束条件	97
6.4.3	目标函数	99
6.5	综合优化分析	100
6.5.1	隔振效果之间的权重分析	100
6.5.2	两类目标函数之间的权重分析	101
6.6	本章小结	102
	参考文献	103

第7章 惯容-橡胶复合隔振器静、动态性能试验分析	104
7.1 试验样机及测试设备介绍	104
7.1.1 惯容-橡胶复合隔振器的零部件	104
7.1.2 静动态试验测试仪器	105
7.2 惯容-橡胶复合隔振器静态试验	106
7.2.1 静态试验方案	106
7.2.2 静态试验结果分析	107
7.3 惯容-橡胶复合隔振器动态试验	109
7.3.1 动态试验方案	109
7.3.2 动态试验结果分析	110
7.4 惯容-橡胶复合隔振器传递率探索	113
7.4.1 惯容-橡胶复合隔振器传递率推导	113
7.4.2 传递率对比分析	114
7.5 本章小结	115
参考文献	116
第8章 惯容-橡胶复合隔振器在柴油发电机组的应用分析	117
8.1 柴油发电机组隔振系统简介	117
8.2 柴油发电机组隔振系统动力学建模	119
8.3 隔振系统模态分析	122
8.3.1 固有频率分析	122
8.3.2 临界转速分析	123
8.4 隔振系统隔振性能分析	124
8.4.1 隔振器安装支点处速度响应幅值分析	124
8.4.2 传递力分析	125
8.5 柴油发电机组响应分析	127
8.5.1 位移响应分析	127
8.5.2 加速度响应分析	128
8.5.3 振动烈度分析	130
8.6 本章小结	131
参考文献	131
第9章 惯容器在船海领域应用的其他探索	133
9.1 含惯容结构的半主动减摇鳍	133
9.1.1 含惯容结构的半主动减摇鳍结构设计	133
9.1.2 含惯容结构的半主动减摇鳍的装配与工作原理	137
9.2 含耦合惯容结构的减摇减振设备	138
9.2.1 减摇减振的主机基座	138
9.2.2 减摇减振的发电式舱室地板	142
9.2.3 减摇减振的辅机基座	146
9.3 含惯容结构的发电式动力吸振器	152

9.3.1 含惯容结构的动力吸振器结构设计 152

9.3.2 含惯容结构的动力吸振器的装配及工作原理 154

9.4 本章小结..... 155

参考文献 155

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

船舶工业“十三五”发展规划提出,到 2020 年我国要力争在高技术船舶、海洋工程装备及关键配套设备方面的制造能力明显增强,并进入世界海洋工程装备制造先进国家的行列,成为世界上该领域主要的配套设备制造国。

船舶与海洋工程领域存在大量的大功率动力装备,如船舶主机、柴油发电机组、大型海上平台等,这些大型动力设备的扰动力基频通常小于 15Hz,而现有的橡胶隔振器通常在上述低频范围内的减振效果较差,使得这类大功率动力装备的振动得不到有效抑制,其寿命、工作稳定性大大降低,不仅使维护成本大幅增加,而且会导致安全隐患。此外,振动还会辐射较大的噪声,这对于大型邮轮及水下舰艇等高技术船舶来说更是致命缺陷。因此,世界各国针对上述问题进行了大量研究,而通过在动力装备底部安装隔振装置来控制振动是公认最有效的措施,即隔振装置已经成为高技术船舶、高端海工装备关键的配套部件之一。

目前在国外,特别是欧美隔振装置的各项技术几乎均处于领先地位,在隔振系统特别是大功率动力装备所用的高端隔振产品的研发设计、生产工艺等方面具有比较完善的设计理论和丰富的设计经验,技术相对成熟且自成体系,产品已广泛应用于国际及国内市场,处于明显的优势和主导地位。除了常规的隔振装置,对金属丝网隔振装置、聚氨酯隔振装置、磁流变阻尼器、半主动及主动隔振装置等也开展了较多的研究,并针对大功率动力装备的低频特性研发出了多种新型隔振装置。

由于我国的船舶及海洋工程装备制造产业起步较晚,基础相对薄弱,国内针对该领域的大功率动力装备的配套隔振产品的研发也较为滞后。国内研究院所针对船舶及海工大功率动力装备的减振理论研究不足,相关企业在基础研究、产品设计、材料研发、制造工艺和产品质量控制上与国外企业存在差距。目前国产隔振装置主要以面向中小功率动力设备的低端产品为主,高端产品市场仍依赖进口。除了欧美国家对我国技术封锁的因素外,我们在该领域落后的主要原因是国内企业缺乏基础理论与先进技术的支持,未能完全掌握船舶与海工大功率动力装备的振动特征基础参数,缺乏科学、统一的产品性能评价标准和检验方法,从而难以真正掌握大功率动力装备隔振系统及其隔振产品的设计技术。

2001 年,剑桥大学学者 Smith 基于机电相似理论发明了一种两端点装置——惯容器,大量的相关理论研究和应用实践表明,惯容器可以上百倍地增加参振系统的虚拟质量,具有优异的隔振性能,尤其是能有效抑制低频振动。

针对国内船舶与海工领域隔振系统中普遍运用橡胶隔振器及其低频减振效果不佳的现状,积极开展惯容器相关理论与应用技术研究,既是对新型减振技术的发展与丰富,更

是解决船舶与海工大功率动力装备隔振共性关键技术的迫切需要和有效途径;同时也有助于提高我国在高技术船舶、海洋工程装备领域的关键自主配套能力,并推动相关产品的开发和产业化。

1.2 隔振器技术概述

隔振器是连接设备和基础的弹性元件,用以减少和消除由设备传递到基础或者由基础传递到设备的振动。隔振器类型可以分为橡胶隔振器、钢弹簧隔振器、隔振垫、气垫隔振器。近些年也出现了一些新型隔振器,如钢丝绳隔振器、主动控制隔振器等。设计和应用隔振器时,须考虑下列因素:①能提供所需的隔振量;②能承受规定的负载;③能承受温度和其他环境条件(湿度、腐蚀性流体等)的变化;④具有一定的隔振特性;⑤满足应用隔振器的设备对隔振器重量和体积的要求。激励频率低于质量(设备)弹簧系统的固有频率时,隔振器不起隔振作用;激励频率与固有频率相近时,振动就会放大;只有当激励频率大于固有频率的 $\sqrt{2}$ 倍时,隔振器才有隔振效果。通常要求激励频率大于固有频率的2~3倍,以便获得良好的隔振效果。

在国外,船海用隔振器的研制技术及生产工艺较为领先,荷兰 Loggers 公司研制的固有频率仅为5~9Hz的球形橡胶隔振器,能应对较大的冲击和大变形振动;美国全球橡胶制品公司研制的高性能增强聚氨酯隔振器,等频承载范围宽,使用寿命更长;美国智能自动控制公司研发的磁流变阻尼器,可以改变阻尼比使隔振性能随工况而改变,适用性更强。此外,美国和俄罗斯均在潜艇上研发并使用了新型气囊式隔振器,能在10~200Hz频率范围内有效隔离振动,隔振频带宽且低频特性良好。

在国内,船海用隔振器产品已经系列化生产,其研究领域主要集中于隔振器的隔振效果以及寿命的提高。方开翔等基于 I_DEAS 及 VC++编程计算分析程序,探讨了剪切型隔振器在潜艇动力舱段的隔振效果^[1]。上官文斌等研究了不同损伤参量对橡胶隔振器疲劳寿命预测结果的影响,结果表明以 Luo 应力、Saintitser 应力为损伤参量建立的寿命预测模型预测效果更好^[2]。杨丹建立了橡胶隔振器的本构模型,利用有限元仿真分析了各种载荷下隔振器的疲劳寿命^[3]。丁家松等采用加速等效疲劳试验的方法校验了某船用隔振器的使用寿命,并通过热空气加速老化试验研究了隔振器的老化随时间变化规律^[4]。程荣利用 ABIQUS 仿真分析了海上风机用橡胶隔振器的性能,并且通过试验验证了隔振器的隔振效果^[5]。徐挺等采用有限元和试验方法建立了某舰船橡胶隔振器静、动刚度与橡胶硬度之间的关系,根据隔振器刚度失效准则确定了隔振器的失效硬度^[6]。

虽然国内的隔振器研制与生产处于发展阶段,但是相信经过一代又一代的科研工作者的不懈努力,终究会赶上甚至超过国外的隔振器技术水平。

1.3 传统隔振技术概述

传统隔振技术分为单层隔振技术、双层隔振技术以及浮筏隔振技术,现有的船舶动力设备中以单层隔振最为常见。

1.3.1 单层隔振技术

如图 1.3.1(a) 所示,被动隔振系统的隔振效果是由设备质量、刚度元件和阻尼元件的关系决定。闫振华等^[7]对非线性隔振系统进行了系统的研究,并在实际应用中取得了一定的成效。陈安华等^[8]研究了基础振动对隔振器的非线性动力响应,并通过数学方法得出了其响应特性。对于单层隔振系统,随着刚度的减小,隔振系统的隔振效果越好^[9],随着阻尼值的增大,对隔振系统的固有频率的抑制效果越好^[10]。

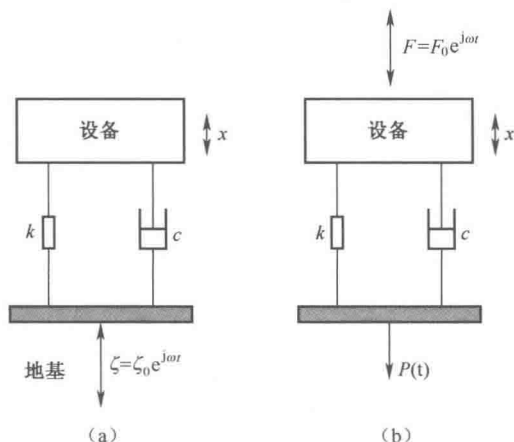


图 1.3.1 单层隔振系统
(a) 被动隔振; (b) 主动隔振。

如图 1.3.1(b) 所示,系统通过主动隔振,设备振动对环境的影响大大降低,有效改善了设备的噪声问题。孙红灵等^[11]通过单层隔振系统临界频率的研究,发现了阻尼值对隔振效果的影响。张春良等^[12]通过研究主动控制力,改善了隔振器的性能。关欣等^[13]通过总结国内外学者对飞轮在隔振措施中的研究,改进了飞轮在主动控制系统中的应用。陈绍青等^[14]通过磁悬浮主动隔振系统的研究,构建了隔振试验平台。

振动传递率是描述隔振效果的重要指标之一,传递率越小,减振效果越明显。通过振动传递率的比较,主动隔振在中低频的隔振效果比被动隔振好,这是由于主动隔振能够克服被动隔振低频放大与高频抑制的矛盾以及基座隔振和载荷扰动抑制的矛盾。盛美萍等^[15]通过机电类比的方法建立了单层隔振系统的导纳分析模型,研究了弹性基座的振动功率流与基座辐射功率流。魏强等^[16]通过单层隔振系统功率流的计算方法,优化了隔振器的设计工作。单层隔振措施虽然简单易行,但也有明显缺点:①单层隔振器在实际应用中对刚度的限制较大;②在中高频域中,隔振装置受到驻波效应的影响。

1.3.2 双层隔振技术

由于单层隔振技术不能满足动力设备的减振要求,因此近年来舰船动力机械设备往往采用双层隔振装置来减少和降低舰船的辐射噪声(图 1.3.2)。最初在基座和基础之间通过隔振器连接所构成的单层隔振系统,其高频衰减一般为 20~25dB,对于振动噪声指标要求较高的船舶,如测量船、舰船等,单层隔振系统已经不能满足日益增长的需

求^[17-19],而双层隔振系统能有效地改善这一问题。在双层隔振系统中,中间质量和动力设备质量的比值一般为0.25~1,为了使垂向的两个共振峰靠近,甚至使中间质量略大于动力设备质量。然而,较大的中间质量虽然可提高系统的隔振性能,但会带来各种弊端,如增大装置的结构尺寸、装置笨重不易移动搬运、受制于空间位置的影响不易安装等^[20]。传统的双层隔振系统通过附加一个大的中间质量进行人为增加参振质量,以实现系统较低的固有频率及抑制高频振动的传递,但是这增加了减振系统的附加质量和振动控制的成本,由于舰船等对总体质量有严格的限制,在工程应用中受到了限制。

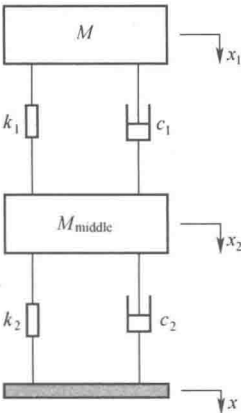


图 1.3.2 双层隔振系统

1.3.3 浮筏隔振技术

如图 1.3.3 所示,浮筏隔振是舰船上常用的一种隔振措施,它将多种机械设备放置在同一个中间质量上,通过中间质量和上、下层的弹簧元件及阻尼器来减少不同频率的振动,使浮筏隔振系统在宽频域的范围达到良好的减振效果。张鲲等通过动力吸振器的研究,优化了传统浮法隔振系统^[21-24]。研究表明,浮筏隔振的优点虽然明显,但和双层隔振装置一样,浮筏隔振装置也存在装置质量尺寸较大,不易搬运安装等缺陷。近年来,越来越多的研究转向主动、半主动控制浮筏或者周期浮筏,以提高其隔振效果。

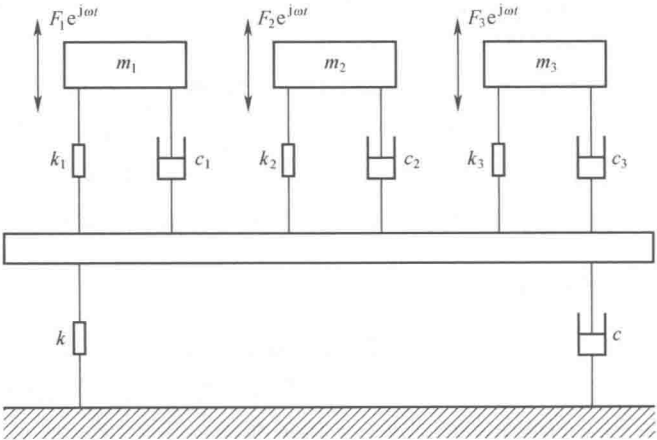


图 1.3.3 浮筏隔振系统

1.4 惯容器及 ISD 隔振技术概述

ISD 隔振技术^[25]是指一种通过惯容器 (inertor)、弹簧 (spring) 和阻尼 (damper) 组成的隔振系统,这种技术使机械网络和电力网络完全对应起来,提供了一种提高机械振动网络性能的新途径。这种系统已经有了一些实际应用,主要应用是车辆的悬架,通过惯容器、弹簧和阻尼的不同组合构建出不同的 ISD 隔振系统来改善不同场合的机械网络的性能。与传统弹簧阻尼隔振系统相比,ISD 隔振系统因惯容器的应用更有效地控制两个端点之间的力,具有研究价值和发展潜力。ISD 隔振系统极大地拓展了隔振系统的应用范围,将成为国内外研究的前沿课题。

机电相似理论的提出是不同学科交叉研究的结果,机电相似理论也为惯容减振器提供了良好的理论基础,并且促进了机械振动理论的发展^[26]。2001 年,剑桥大学学者 Smith 基于机电相似理论创造性地提出了惯容器的概念,并且给出了滚珠丝杠式惯容器和齿轮齿条式惯容器两种最基本的实现形式,开展了将惯容器应用于车辆悬架系统的研究,从而探索出一条改善悬架性能的新途径^[27]。2004 年,Smith 首次将惯容器应用于车辆悬架系统,构建了几种简单的被动 ISD 悬架结构,在此基础上分析研究了应用惯容器后悬架的性能,研究表明,在悬架中加入惯容器,能使车辆的乘坐舒适性及行驶安全性得到改善^[28]。同年,Smith 将惯容器应用于高性能摩托车的操控系统上,提高了其稳定性,实现了惯容器的首次应用。2005 年,惯容器在西班牙大奖赛莱科宁的赛车上现身,并为迈凯轮车队取得了胜利。随着惯容器研究的不断深入,Smith 将滚珠丝杠式惯容器和齿轮齿条式惯容器进行台架实验,提出了惯容器的背隙问题,并且分析了其对惯容器和 ISD 悬架的影响^[29,30]。从 2006 年开始,Smith 在机械振动综合网络分析方面做了一系列研究,提出了含惯容器的被动机械振动网络和设计方法^[31-36]。2013 年,Smith 设计出液力式惯容器及其样机,相比于机械式惯容器,液力式惯容器结构更加简单,性能更加可靠^[37]。

2006 年,台湾大学王富正等开始研究如何将惯容器应用于工程中,首次将惯容器用于火车悬架,改善了火车的乘坐舒适性、系统动态性能及稳定性^[38-41]。2007 年,王富正将惯容器用于建筑物的隔振,并且取得了较好的效果^[42,43]。2008 年,王富正探讨了惯容器的非线性,包括其摩擦、反弹和弹性变形,以及其对汽车悬架的影响,并建立了一个测试平台去研究惯容器的非线性^[44]。2011 年,王富正设计了一种新型的液压式惯容器,利用液压推动马达转动,推动飞轮转动,实现了飞轮的惯性封装^[45]。

2014 年,香港大学陈志强等研究了惯容器对隔振系统固有频率的影响,结果表明惯容器能降低固有频率^[46]。同年,陈志强等研究了含惯容器的汽车悬架包含乘坐舒适性、悬架偏转和轮胎抓地力在内的多个性能要求的综合性能,结果表明惯容器能明显改善汽车的综合性能^[47]。2015 年,陈志强等研究了基于惯容器的隔振系统的 H_{∞} 和 H_2 优化问题,结果表明,在隔振系统中添加惯容器可以抑制共振峰^[48]。同年,他们还研究了含惯容器的单向隔振系统的分析和优化问题,结果表明在隔振系统中添加惯容器相当于添加了一个很大的参振质量,能明显改善隔振系统的隔振特性^[49]。2016 年,陈志强等研究了半主动控制式惯容器在车辆悬架、动力吸振器中的运用^[50,51]。同年,他们又研究了惯容器在梁式结构中的运用^[52]。

2007年,江苏大学陈龙等开展了应用齿轮齿条惯容器的车辆悬架研究,证实应用惯容器能够使悬架的隔振性能得到改善^[53]。2008年,陈龙等验证了惯容器可以通过高频振动、阻止低频振动的特性^[54]。2012年,陈龙等提出了一种2级串联型ISD车辆悬架,结果表明,2级串联型ISD车辆悬架具有良好的低频频响特性^[55]。同年,陈龙等又将电路网络的综合和分析方法运用于悬架机械振动网络中,研究车辆悬架系统应用惯容器后车辆悬架的性能提升潜力^[56]。同年,陈龙等为了解决I型ISD悬架存在的惯容器“击穿”现象,提出II型ISD悬架,以提高ISD悬架实用性能,结果表明,提出的II型ISD悬架可以有效降低车身垂直振动加速度^[57]。同年,陈龙等还提出了杠杆式惯容器、扭转惯容器及液压式惯容器的概念,并且给出了相应模型^[58]。2013年,陈龙等研究了惯容器以及ISD悬架设计的若干理论问题和关键技术,揭示了ISD悬架的工作机理、本质特性以及优于传统被动悬架的显著特点^[59]。同年,陈龙等利用惯容器实现了车辆悬架理想天棚和地棚阻尼,并且申请了国际PCT专利^[60,61]。2014年,陈龙等建立了考虑摩擦以及丝杠弹性效应的惯容器非线性力学模型,进行了惯容器实际力学性能试验,根据试验数据对惯容器非线性力学模型中的参数进行了识别^[62]。同年,陈龙等针对机械式惯容器力学性能受非线性因素影响较为严重的问题,研制了一种液压式惯容器,阐述了液压式惯容器的基本结构及工作原理^[63]。2015年,陈龙等滚珠丝杠式惯容器试验台架,研究摩擦因素对惯容器的影响^[64,65]。2016年,陈龙等针对5元件ISD悬架的各种问题,设计了一种3元件ISD悬架组成的装置,并将该装置安装于某型军用越野车的前、后悬架上^[66]。

在国内,自江苏大学之后,陆续有单位的科研团队开始研究惯容器及ISD隔振技术,如江苏科技大学、国防科技大学、浙江大学、北方车辆研究所、石家庄铁道大学、华中科技大学以及中国舰船研究设计中心等,这里不再一一列举分析,有兴趣的读者可以参考借鉴。

参考文献

- [1] 章艺,方开翔,江国和,等.剪切型隔振器在动力装置隔振中的研究[J].华东船舶工业学院学报,2002,16(2): 68-73.
- [2] 上官文斌,段小成,刘泰凯,等.不同损伤参量对橡胶隔振器疲劳寿命预测结果影响的研究[J].机械工程学报, 2016, 52(2): 116-126.
- [3] 杨丹.船舶柴油机橡胶隔振器疲劳分析及寿命研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [4] Ding J S, Zhang H T, Zhang Z P, et al. Lifetime evaluation of rubber isolator for warship application[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010(29).
- [5] 程荣.风力发电机隔振技术研究[D].镇江:江苏科技大学,2014.
- [6] 徐挺,张欢童,宗鹏.船舶橡胶隔振器失效评估方法研究[J].系统仿真学报,2008,30(2): 116-126.
- [7] 闫振华,王国强,苏丽达,等.非线性被动隔振器刚度特性研究[J].振动与冲击,2013, 19:139-143.
- [8] 陈安华,刘德顺,朱萍玉.被动隔振体的非线性振动分析[J].机械工程学报,2001(6):99-101.
- [9] DeBra D. Vibration Isolation of Precision Machine Tools and Instruments[J]. Annals of the CIRP, 1992, 41(2): 711-718.
- [10] Zuo L. Element and System Design for Active and Passive Vibration Isolation[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005:8-12.
- [11] 孙红灵,张培强,张鲲.主动隔振与动力吸振器的联合减振研究[J].机械强度,2005(4): 432-435.
- [12] 张春良,陈子辰,梅德庆.双层主动隔振系统的动力学研究[J].中国机械工程,2003, 14: 68-71.

- [13] 关新, 王全武, 郑钢铁. 飞轮拟主动隔振方法[J]. 宇航学报, 2010(7):1870-1876.
- [14] 陈绍青, 王永. 基于磁悬浮隔振器的主动隔振控制实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40:61-66.
- [15] 盛美萍, 王敏庆, 邢文华, 等. 单层隔振系统中弹性基座的振动与声辐射特性[J]. 机械科学与技术, 2000, S1: 94-96.
- [16] 魏强, 朱英富, 张国良. 舰船基座上单层隔振装置能量流数值分析[J]. 船舶工程, 2004(3):37-40.
- [17] 严济宽. 机械振动隔离技术[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1998.
- [18] Pan J, Pan J Q, Hansench. Total Power flow from a vibrating rigid body to a thin Panel through multiple elastic mounts [J]. Journal of Acoustic Society of America, 1992, 92(2):895-900.
- [19] 段小帅, 梁青, 陈绍青, 等. 双层隔振系统隔振效果评价与试验[J]. 振动测试与诊断, 2010(6):694-697.
- [20] 王光, 董邦宜. 小中间质量双层隔振试验研究[J]. 噪声与振动控制, 1989(4):28-43.
- [21] 张鲲, 孙红灵, 陈海波, 等. 带有动力吸振器的浮筏隔振系统的功率流传递特性分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2007(1):13-19.
- [22] 沈荣瀛. 船舶轮机振动噪声控制综述[J]. 机电设备, 1999(3):22-25.
- [23] 崔维成, 刘水庚, 顾继红, 等. 国外潜艇设计和性能研究的一些新动态[J]. 船舶力学, 2000, 4(2):65-80.
- [24] 温华兵, 王国治. 带有浮筏隔振系统的船舶结构冲击响应的数值模拟[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2003(5):1-5.
- [25] 陈国涛. “惯容器—弹簧—阻尼”悬架系统网络综合与分析研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- [26] 左鹤声. 机械阻抗方法和应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1987.
- [27] Smith M C. Synthesis of mechanical networks: The inerter[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2002, 47(10):1648-1662.
- [28] Smith M C, Wang F C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(4):235-257.
- [29] Christakis P, Smith M C. Laboratory experimental testing of inerter[C]. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Seville, Spain; IEEE, 2005:3351-3356.
- [30] Christos P, Houghton N E, Smith M C. Experimental testing and analysis of inerter devices[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2009, 131(1):011001-1-011001-11.
- [31] Christakis P, Smith M C. Positive real synthesis using matrix inequalities for mechanical networks: application to vehicle suspension[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2006, 14(3):423-434.
- [32] Jiang J Z, Matamoros-Sanchez A Z, Goodall R M, et al. Passive suspensions incorporating inerters for railway vehicle [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(S1):263-276.
- [33] Chen M Z Q, Smith M C. Restricted complexity network realizations for passive mechanical control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(10):2290-2301.
- [34] Jiang J Z, Smith M C. Regular positive-real functions and five-element network synthesis for electrical and mechanical networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(6):1275-1290.
- [35] Jiang J Z, Smith M C. Synthesis of positive-real functions with low-complexity series-parallel networks[C]. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference. Shanghai, China, IEEE, 2009:7086-7091.
- [36] Jiang J Z, Smith M C. On the classification of series-parallel electrical and mechanical networks[C]. Proceedings of the 2010 American Control Conference. Baltimore, MD, US; American Automatic Control Council, 2010:1416-1421.
- [37] Swift S J, Smith M C, Glover A R, et al. Design and modelling of a fluid inerter[J]. International Journal of Control, 2013, 86(11):2035-2051.
- [38] Wang F C, Yu C H, Chang M L, et al. The performance improvements of train suspension systems with inerters[C]. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, CA, US; IEEE Control Systems Society, 2006:1472-1477.
- [39] Wang F C, Liao M K, Liao B H, et al. The improvements of train suspension systems with mechanical networks[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(7):805-830.