

新型谐振式传感器 优化设计及应用

何高法 孟杰◎著

RESONANT SENSOR

重庆大学出版社


作者简介




何高法（1972年11—），教授，博士，硕士研究生导师，现任重庆科技学院机械与动力工程学院副院长，重庆市实验教学示范中心机械工程实验与实训教学中心主任，重庆市一流专业“机械设计制造及其自动化”专业负责人、重庆高校金工教学研究会理事长、教育部工程教育专业认证专家。长期从事机械制造和精密测量等领域的教学和科研工作，研究方向为纳米测量、微机械电子技术、智能制造。



孟杰（1981年1月—），博士，教授，硕士研究生导师，重庆科技学院机械与动力工程学院教师。2003年6月毕业于重庆大学机械设计制造及其自动化专业，2008年6月获得重庆大学机械设计及理论博士学位，2013年美国普渡大学访问学者，2018年加拿大康考迪亚大学访问学者。长期从事机械制造和高速加工等领域的教学和科研工作，研究方向为高速加工技术、智能制造、先进制造技术。



本书是在重庆市基础与前沿研究计划重点项目“绝缘体表面扫描探针静电力产生机理研究”（项目编号：cstc2015jcyjBX0105）、重庆市基础及前沿计划一般项目“高端数控机床无轴承电主轴的振动机理及其主动控制研究”（项目编号：cstc2018jcyjAX0690）和重庆科技学院机械工程重庆市重点学科建设项目共同资助下完成的，在此一并致谢。



前 言

随着人工智能不断发展和普及,智慧家居、智慧工厂、智慧社区、智慧中国等概念被广泛提出,在这些“智慧”工程中,信息或信号的获取必不可少,传感器则是信号获取的最前端设备,在各种“智慧”工程中扮演着非常重要的角色。传感器技术需要多学科交叉融合,涉及机械、电子、信号处理等多学科内容,一直是科技界重点关注的技术领域之一。

谐振式传感器是利用谐振元件把被测参量转换为频率信号的一种传感器,被用于各种物理量的检测。因其输出量为频率信号,易于数字化,便于传输、处理和存储等,是一种性能优异、应用广泛的传感器。本书首先介绍了谐振式传感器的发展现状、基本工作原理和设计方法,分析了其理论基础和敏感元件特性;总结归纳了各种敏感元件,并分析了它们的特点;对梁式和板式谐振子的振动特性进行了理论分析,为其优化设计提供了理论基础;举例介绍了有限元分析方法在梁式和板式谐振器设计中的应用。针对静电激励和电容检测式谐振器给出了一种检测和激励电路设计方法,并对所设计的电路进行了实验验证。应用谐振原理设计了谐振式微加速度计,对其进行了详细的结构设计和优化。最后,本书还讨论了利用谐振检测原理而实现的扫描静电力显微镜设计,并将其应用于试件表面微观形貌测量,开拓了谐振式传感器和静电力显微镜的应用领域。通过阅读本书,可以使读者系统地掌握谐振式传感器的设计方法和设计工具,为从事设计和应用传感器提供参考。

本书分为六章,前四章为谐振式传感器的共性基础知识和设计方法,后两章为结合实例分析了谐振式传感器的两种特殊应用。在成书过程中,钟鹏、张子函等为完成部分实验和文字材料作出了贡献。另外本书也参考了很多研究者的研究成果,在此对他们一并表示感谢。

由于本书内容涉及多个学科加上作者水平有限,书中难免有错漏和不足之处,敬请读者批评指正。

著 者

2019年10月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 谐振式传感器的发展、特点及类型	1
1.1.1 谐振式传感器的发展	1
1.1.2 谐振式传感器的特点	4
1.1.3 谐振式传感器的类型	5
1.2 谐振式传感器的设计方法	7
1.2.1 谐振式传感器的设计基础	7
1.2.2 谐振式传感器的建模方法概述	12
1.2.3 谐振式传感器的设计步骤	12
第 2 章 谐振式传感器的基础理论	14
2.1 谐振式传感器工作原理	14
2.1.1 谐振原理	14
2.1.2 谐振式传感器测量系统	18
2.2 敏感元件的谐振特性分析	19
2.2.1 谐振及其阻尼特性分析	19
2.2.2 谐振状态下的动力学特性	21
2.2.3 谐振状态下的能量关系	23
2.3 谐振敏感元件的类型	29
2.3.1 振弦式敏感元件	29

2.3.2	振筒式敏感元件	31
2.3.3	振梁式敏感元件	32
2.3.4	振膜式敏感元件	33
2.3.5	石英晶体敏感元件	34
第3章	谐振子结构设计和优化方法	37
3.1	梁式谐振子的设计分析	37
3.1.1	弹性梁的振动方程	37
3.1.2	轴向力作用下梁的横向弯曲振动	41
3.1.3	双端固定边界条件下轴向力对梁固有频率的影响	43
3.1.4	梁横向弯曲振动的 Rayleigh-Ritz 法求解	44
3.1.5	附有集中质量的双端固定梁	46
3.1.6	轴向力对附有集中质量梁的影响	48
3.2	板(膜)式谐振子的设计分析	48
3.2.1	矩形薄板的横向振动	49
3.2.2	圆形薄板的自由振动	57
3.3	谐振子结构的有限元分析方法	59
3.3.1	有限元分析方法介绍	59
3.3.2	梁式谐振子的有限元分析	71
3.3.3	带梳齿结构音叉谐振子预应力模态的有限元分析	75
3.3.4	石英晶体(板式)谐振子的有限元分析	79
第4章	谐振式传感器驱动和检测电路设计	83
4.1	谐振元件的驱动和检测方法分析	83
4.1.1	驱动方式分析	83

4.1.2	谐振频率检测方法	85
4.2	驱动和检测电路原理	86
4.3	锁相环驱动电路设计和调试	87
4.3.1	锁相环电路设计	88
4.3.2	解锁电路	90
4.3.3	驱动信号发生电路	91
4.3.4	锁相环电路调试	92
4.4	频率检测及 C/V 转换	92
4.4.1	频率检测原理	92
4.4.2	C/V 转换电路的设计	93
4.5	自动增益控制电路	95
4.5.1	自动控制增益电路设计	95
4.5.2	AGC 增益的分配及计算	96
4.5.3	AGC 起控点、饱和点的选取和计算	97
4.5.4	AGC 控制电路调试	97
4.6	带通滤波及移相电路	98
4.6.1	MAX274 带通滤波	98
4.6.2	移相电路	99
4.6.3	移相电路调试	100
第 5 章 谐振式微加速度计		101
5.1	谐振式微加速度计概述及测量原理	101
5.1.1	微加速度计概述	101
5.1.2	谐振式微加速度计的发展现状	106
5.1.3	谐振式微加速度计的测量原理	114

5.2 基于柔性微杠杆机构的加速度计结构设计	115
5.2.1 柔性机构概述	115
5.2.2 柔性微杠杆机构分析	117
5.2.3 两级柔性微杠杆机构研究	123
5.2.4 基于柔性微杠杆机构的加速度计结构设计	134
5.3 梳齿结构阻尼特性研究	137
5.3.1 微机械系统空气阻尼模型	137
5.3.2 滑膜气体阻尼分析	138
5.3.3 压膜气体阻尼分析	142
5.3.4 梳齿式谐振器结构	146
5.4 微加速度计的制作工艺	147
5.4.1 关键工艺技术	147
5.4.2 工艺流程设计	149
5.4.3 版图设计	151
第6章 基于音叉谐振器的静电力显微镜	153
6.1 扫描探针显微镜的类型和工作原理	153
6.1.1 扫描探针显微镜概述	153
6.1.2 扫描隧道显微镜的工作原理	154
6.1.3 原子力显微镜工作原理	159
6.1.4 静电力显微镜工作原理	162
6.2 音叉谐振探针单元	163
6.2.1 石英音叉谐振器及其谐振特性	164
6.2.2 基于石英音叉谐振器的探针单元	165
6.3 探针受力分析	171

6.3.1 导体试件与探针之间的静电力	171
6.3.2 绝缘体试件与探针之间静电力理论分析	175
6.3.3 绝缘体试件与探针之间静电力的有限元仿真	178
6.4 静电力扫描显微镜设计	179
6.4.1 测量原理	179
6.4.2 探针频率变化量	180
6.4.3 扫描测量系统搭建	181
6.5 静电力扫描探针显微测量实验	183
6.5.1 静电力检测实验	183
6.5.2 试件扫描测量实验	190

参考文献	193
------------	-----

谐振式传感器是一种性能优异的传感器,目前广泛应用于各种物理量的检测。本章主要介绍谐振式传感器的类型、特点及其发展趋势,讨论谐振式传感器的设计基础和通用设计方法。

★ 1.1 谐振式传感器的发展、特点及类型

1.1.1 谐振式传感器的发展

1. 传感器及其发展

传感器(transducer/sensor)是一种将被测物理量按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求的装置。传感器的使用已有相当悠久的历史,它既是科技产品的先驱,也是目前高新科技发展中的翘楚,其技术发展前景远大,与当下的计算机技术、通信技术共同构成了信息产业的三大支柱技术,深受世界各发达国家的高度重视。

如今,传感器的主要发展方向可大概归纳为以下几类:

(1) 新材料的开发与应用

传感器材料是传感器技术的重要研究基础,其材料特性能够严重地影响传感器的性能,因此,对新型材料的开发与应用是发展传感器技术的关键之一。近年来,传感器领域应用的材料主要包括:

半导体材料:具有优良的电学特性、机械特性、光敏特性以及整流特性,可以用来研制各种硅微结构传感器,具有广泛的用途。

石英晶体材料:具有极高的机械品质因数、良好的温度稳定性和压电特性,可用于制作高精度传感器,具有温度特性好、制作容易、小型化和成本低等优点。

压电陶瓷材料:具有稳定的化学特性、优异的物理特性、易于制作各种形状和任意极化方向的材料特性,广泛应用于各类传感器,拓宽了传感器的应用领域范围。

(2) 新工艺的使用

在传感器的发展中,离不开新工艺的采用。发展新工艺,可以满足社会对其提出的更高、更快、更好的要求,例如,检测速度更快、检测灵敏度更高、稳定性更好、检测微损、使用方便等要求。此外,通过发展新工艺,如微机械加工工艺,可以满足在各种控制设备的功能逐渐增加的情况下,使其部件体积达到微型化的目的,如在芯片上构造一维、二维等多维阵列式传感器组。在减小体积、重量的同时,亦有利于减小器件损耗。

(3) 集成化与多功能化

微机械加工工艺的出现,为传感器的集成化提供了条件,使传感器从原来的单一元件、单一功能向集成化多功能方向发展。传感器的集成化包括了两种含义:第一,将传感器和其后的放大电路、运算电路等集成在一个组件上,实现传感器检测的一体化操作;第二,将同一类传感器集成

于同一块电路板上,构造一维、二维等多维阵列式传感器组,实现传感器的集成化工作。传感器的多功能化与其集成化是相对应的,是指传感器能够感知或者转化两种及其以上的不同物理量,实现多参数检测的功能。

(4) 智能化

智能化是将传感器和微处理器结合,使其不仅具有检测不同参量的功能,还有信息处理、逻辑判断、自诊断以及自适应等功能。简言之,就是借助于半导体的集成技术,将传感器和信号处理电路、输入输出接口、微处理器等电子电路焊接在同一块芯片上。智能化传感器是传感器技术和集成电路技术相结合的产物,其实现取决于传感技术和集成技术的发展。因此,智能传感器具有多功能、高性能、体积小以及适合大批量生产的优点,是传感器发展的重要方向之一。

2. 谐振式传感器及其发展

自从人类创造音乐开始,谐振技术就已经出现在人们的生活中。比如远古时代的人们利用石器制作各种乐器来发出不同的声音,从而进行一种特殊的信息交流,此中原理就是利用谐振频率的不同奏出不同的音调。后来发展的弦乐器和乐鼓,也是通过改变弦的直径和长度,或者改变鼓的张紧度和厚度,进而改变其谐振频率,从而发出不同音调的声音。但真正将谐振技术应用在传感器中却是从20世纪70年代才开始的。

谐振式传感器,亦可称为频率式传感器,是通过测量谐振器频率变化量来检测被测量变化值的一种传感器。其频率的周期测量信号可通过简单的数字电路直接地转换成数字信号输出,且其输出信号极易与微处理器进行对接,是一种应用十分广泛的数字传感器。谐振式传感器是基于机械谐振技术,以敏感元件固有的谐振特性随被测量变化而实现的传感

器,是属于物理型传感器的一种,其发展经历了从结构型传感器到物性型传感器的阶段,其技术也经历了从常规仪表检测、信号检测到信号处理和电路集于一体的智能化检测的发展。随着数字电路技术的发展应用,谐振式传感器已经成为传感技术中重要的研究方向之一。

1.1.2 谐振式传感器的特点

谐振式传感器的机理源自敏感元件的谐振特性,当传感器工作于谐振状态时,此时的工作系统能量损耗最低,对环境参数的变化也可起到很好的调节作用。因此,谐振式传感器具有如下特点:

①输出为数字量信号,与数字控制器直接进行对接,不用 A/D 或 V/F 数字电路转换,在性能上较其他传感器有较大的提升;

②输出的频率型信号是周期的,不会因传输而失真,适合长距离传送,抗干扰性强;

③谐振式传感器的系统是一个闭环系统,当处于谐振状态时,可实现传感器信号的自动跟踪;

④传感器机械结构为整体式,无活动元件,可靠性高、稳定性好,电路结构简单,易于实现;

⑤谐振敏感元件的固有谐振特性,使其具有精度高、分辨率高的优点;

⑥功耗低、误差小。谐振式传感器的机械振动系统特有的高机械品质因数 Q 值,使得维持系统振动的能量大大降低,从而降低了热损耗和由此产生的测量误差。

谐振式传感器的谐振子是实现被测量变化和频率变化的关键元件,对材料的质量要求较高,且设计要求也不同,从而导致加工工艺变得更加复杂,使生产周期变长,成本变高;另外,传感器输出频率与被测量往往是

非线性关系,需要对转换电路进行校正处理,减小非线性误差,如此才能保证良好的精度。

1.1.3 谐振式传感器的类型

按照敏感元件的结构原理可以将谐振式传感器分为物性传感器和结构传感器。所谓物性型传感器就是利用材料本身所具有的内在特性,将被测量转换为电量的传感器。例如利用石英晶体作为谐振元件的石英谐振式传感器,就是利用石英材料所特有的压电效应而实现测量的。所谓结构型传感器就是以结构为基础,通过改变某些参数,从而将被测量转换为电量的传感器。例如通过改变简支梁的压力参数,实现将被测量的变化转换为频率量变化的谐振梁式传感器。

按照被测物理量的不同将谐振式传感器分为位移、加速度、压力、流量、密度以及黏度等传感器。

图 1.1 为某型号谐振弦式位移传感器,其工作原理为:以振动弦为敏感元件,振弦的两端固定在被测对象上,当位移发生变化时,振动弦被拉伸,其谐振频率会发生变化,根据谐振频率的变化量检测位移的大小。

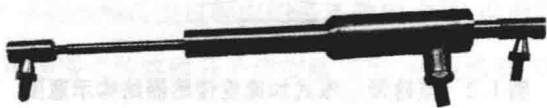


图 1.1 某型号谐振弦式位移传感器

图 1.2 为一种硅微谐振式加速度传感器结构,其表芯主要由两端固定音叉梁、驱动梳齿电容、检测平行板电容、质量块及弹簧等组成。传感器工作时,驱动梳齿电容极板间施加带有直流偏置的交变电压,使音叉梁在静电力驱动下作简谐振动,使用平行板电容检测音叉梁振动的频率变化。检测平行板电容之间存在直流偏压,当音叉梁振动时,平行板电容作

用在音叉梁上的静电力与振动位移近似成正比,相当于给音叉梁引入了一个附加的静电刚度。当加速度作用时,质量块在惯性力作用下发生位移,检测平行板电容极板间距发生的变化,作用在音叉梁上的附加静电刚度发生变化,从而改变音叉梁的谐振频率。其中一个振梁的谐振频率增加,另一个振梁的谐振频率减小,通过检测平行板电容检测两个振梁的频率差,即可实现加速度的测量。

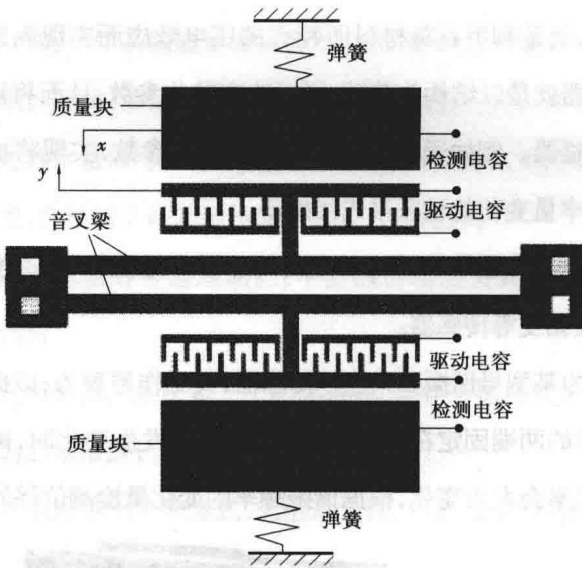


图 1.2 某硅微谐振式加速度传感器结构示意图

谐振式压力传感器是利用外界压力变化导致谐振子谐振频率变化这一机理,通过测量频率来间接测量压力的传感器。以硅谐振式压力传感器为例,其工作原理是将外界压力直接作用在硅膜上,引起硅膜形变,带动支撑产生一定转动,使梁的应力发生改变,从而引起谐振频率发生改变。通过检测梁频率的变化,间接测量外界压力。

谐振式密度传感器的谐振元件在工作过程中,可以等效为一个单自由度系统,以系统的固有频率振动,系统的固有频率只与系统中的等效质

量和等效弹性系数有关。以谐振式液体密度传感器为例,其测量原理是通过系统中的弹性敏感元件和液体相接触,从而改变了系统的等效质量,使得系统的谐振频率发生变化。通过测量系统的固定频率变化,即可确定待测液体的密度。

谐振式黏度传感器,以石英晶体黏度传感器为例,其敏感元件为石英晶片,首先根据弹性力学方程,可求得石英晶片在空气中的振荡频率。然后将石英晶片置于液相介质中振荡时,根据牛顿流体定律,得出由流体引起的频率偏移,由此得到石英晶片在液体中频率变化、密度和黏度的平方根呈线性关系,当测出液体的密度,即可得到液体的黏度值。

按照谐振原理,谐振式传感器可分为电子式谐振传感器和机电式谐振传感器。电子式谐振传感器的谐振敏感元件是电子元件,根据电子元件的不同,又可分为电容谐振传感器、电感谐振传感器和电涡流谐振传感器。机电式谐振传感器可分为机械式谐振传感器和压电式谐振传感器。机械式谐振传感器根据谐振敏感元件的不同形状,可分为振弦式谐振传感器、振筒式谐振传感器、振梁式谐振传感器、振膜式谐振传感器。压电谐振式传感器按照转换过程中的基本效应,即压电谐振参数的调制方式,可将压电谐振式传感器分为应变敏感型、热敏感型、质量敏感型和回转敏感型五种类型的谐振式传感器。

★ 1.2 谐振式传感器的设计方法

1.2.1 谐振式传感器的设计基础

1. 传感器技术指标解读

进行产品设计必须要理解清楚设计目标的特点和要求等,传感器设