

清华大学学术专著

Resonant Sensing Theory and Devices

谐振传感理论及器件

冯冠平 著

Feng Guanping



清华大学出版社

清华大学学术专著

Resonant Sensing Theory and Devices

谐振传感理论及器件

冯冠平 著

Feng Guanping



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

谐振式传感器是传感技术中非常重要的一个研究方向,在压力、湿度、温度、加速度、质量流量、气体浓度、生物分子识别(如免疫传感器)、力(如原子力显微镜中的悬臂梁)的测量以及磁场检测等方面都有应用。本书系统地总结了谐振式传感器的基本原理、设计实现方法以及工程应用技术,包括谐振传感理论、谐振器的激励及检测方式、电子式与机电式谐振传感器的工作原理及实现技术等,并对谐振式传感器的信号获取技术进行了全面的总结概括与深入分析。

本书可供从事传感器及测试系统研究开发工作的专业技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业读者的参考用书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

谐振传感理论及器件/冯冠平著. —北京:清华大学出版社,2008.3
(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-16971-0

I. 谐… II. 冯… III. 传感器 IV. TP212.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 014882 号

责任编辑:张秋玲

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京铭成印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153×235 印张:29.75 插 页:1 字数:500 千字

版 次:2008 年 3 月第 1 版 印 次:2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:79.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:024884-01



作者简介



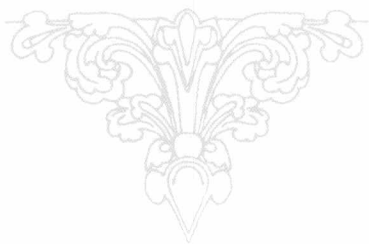
冯冠平，研究员，博士生导师。生于1946年，江苏武进人。1970年毕业于清华大学精密仪器与机械学系，1981年获得清华大学工学硕士学位。历任清华大学精密仪器与机械学系主任、清华大学科技处处长、清华大学校长助理。现任清华大学校务委员会副主任，深圳清华大学研究院院长。

1978年开始，由电涡流传感器入手，开始从事谐振式传感器的研究。1982年，所承担的“QH-5非接触式电涡流调频式位移、振动测量仪”获得国家技术发明三等奖。1986年负责国家“七五”攻关项目“监视仪表与数据采集”的研究工作，先后主持了国家“八五”、“九五”攻关项目，国家发展计划委员会重大专项，国家科技部重大专项等多项科研课题。2003年，所主持研究的“石英数字式力传感器及系列全数字化电子衡器的研究与产业化”获国家技术发明二等奖。“非典”期间，发明了适用于大流量人群的红外温度测量仪，广泛用于中国及东南亚各国，获国家科技进步二等奖。

2004年以来，主要从事我国无线数字电视应用及产业化方面的研究。

历年来，共获得国家级奖励5项，并获得全国高等学校先进科技工作者称号、留学回国人员突出贡献奖、国务院特殊津贴等荣誉。

目前的研究领域为传感器与精密仪器。任全国高校传感技术研究会副理事长、仪器仪表学会电磁测量及信号处理分会副理事长、中国仪器仪表学会传感技术分会副理事长。在谐振式传感器的研究方向上，发表学术论文150余篇，获得发明专利多项。



前 言

谐振是一种广泛存在的现象,不仅在单纯的机械、化学、光、磁、电系统中存在,而且在各种涉及上述多个能量域之间相互能量转换过程的系统中,也可以观察到谐振现象。谐振式传感器工作于系统的谐振状态,此时系统以最低的损耗维持输入能量,而对于工作于谐振状态的敏感系统,环境参数的微量变化对系统特性参数的调制作用得到增强,因此,谐振式传感器具有功耗低、输出信号的信噪比高、抗干扰性强等诸多优点。随着数字电路技术的快速发展及广泛应用,谐振式传感器成为传感技术中非常重要的一个研究方向。

谐振式传感器大致可分为电子式与机电式两类。电子式谐振传感器包括电容谐振传感器、电感谐振传感器、电涡流谐振传感器。机电式谐振传感器包括机械式谐振传感器、压电谐振传感器以及近年来迅速发展起来的微型谐振式传感器。机械式谐振传感器相对比较成熟,如振弦、振筒、振膜式传感器等已经有了悠久的历史与应用历史。压电谐振传感器采用具有压电特性的材料制成压电谐振器作为敏感元件,这类传感器的工作频率较高,可以得到具有很高 Q 值的谐振式传感器,应用范围广泛。微型谐振式传感器利用微加工工艺制作谐振器,并进而形成谐振式微传感器,已经成为微传感器的主要实现形式之一。

从应用角度来看,谐振式传感器的种类非常多,在压力、湿度、温度、加速度、质量流量、气体浓度、生物分子识别(如免疫传感器)、力(如原子力显微镜中的悬臂梁)的测量以及磁场检测等方面都有应用。谐振式传感器中的谐振器一般制成尺寸比较大的器件,利用各种物理或化学效应,被测参量被转换为谐振器的质量、弹性系数或其他参量的变化。常见的谐振器形状如悬臂梁、单端或双端音叉等。振动式陀螺工作于匹配良好的谐振驱动状态,因此也被归为谐振式传感器。

本书系统地总结了谐振式传感器的基本原理、设计实现方法以及工程应用技术,包括谐振传感理论、谐振器的激励及检测方式、电子式与机电式

谐振传感器的工作原理及实现技术等,并对谐振式传感器的信号获取技术进行了全面的总结概括与深入分析。书中在总结著者多年从事谐振式传感器研究的工作经验与科研成果的同时,尽可能全地收录了国内外文献报道中关于谐振式传感器的理论和成果,着力反映这一研究方向的当代发展水平,为读者全面了解谐振式传感器提供尽可能全面的资料。

由于作者水平所限,书中难免存在不当之处,恳请读者不吝赐教。

作 者

2007 年 10 月于清华园

Preface

Resonance is a widely existing phenomenon. It can be observed in mechanical, chemical, optical, magnetical, as well as electrical systems. Moreover, in those systems, where the energy interconversion happened within the above mentioned energy domains, we can also observe the resonant phenomena. A resonant sensor works at the resonant state of the system. At such a state, the input energy of the system is maintained at the least energy losses. When a sensing system is operating at its resonant state, the modulation effect, from the minute change of the environmental parameters to the specific parameters of the system, is enhanced. Therefore, the resonant sensor performs many advantages such as low power consumption, high signal-to-noise ratio of the output signal, robust to outside disturbances, etc. With the fast progress and spreading applications of digital electronics, the resonant sensor has become one important research area of sensing technology.

The resonant sensor can be approximately classified into two catalogues. The electrical resonant sensor involves capacitive resonant sensor, inductive resonant sensor, and eddy-current resonant sensor. The mechanic-electrical resonant sensor includes mechanical resonant sensor, piezoelectric resonant sensor, and the resonant microsensor that progressed at a rapid rate within the recent years. The mechanical resonant sensor is relatively mature. Resonant sensors based on vibrating wire, vibrating cylinder, and vibrating membrane, have long been developed and applied. The piezoelectric resonant sensor uses the piezoelectric resonator, fabricated by piezoelectric materials, as the sensing element. Its operation frequency is relatively higher. Such resonant sensors can obtain extremely high Q -values and have found applications in many areas. The resonator of

the resonant microsensors, as well as the whole microsensor, is fabricated by microfabrication technology. Resonant microsensor have become one of the main prototypes of microsensors.

On an application view, there are many types of the resonant sensor. We can find their applications in measurement of pressure, humidity, temperature, acceleration, mass flow, gas concentration, biological molecular identification (such as immuno-sensor), force (such as the cantilever of the atom force microscope), and detection of magnetic fields. The resonator of the resonant sensor is generally fabricated as a device with relatively large size. By physical or chemical effect, the measurand is transduced into the change of the mass, elasticity, or other parameters of the resonator. The shape of commonly used resonator include cantilever, single-ended or double-ended tuning forks. The vibration gyro works on resonant driving state with good matching, and is therefore classified as one kind of resonant sensor.

The basic principle, methods of design and implementation, as well as practical application technologies of the resonant sensor, are summarized in this book, including the resonant sensing theory, the excitation and measurement methods for the resonator, the working principle and the implementation technology of the electrical and mechanic-electrical resonant sensors. Moreover, the data acquisition technology of signals from the resonant sensor are analyzed and overviewed. The working experiences and research results on resonant sensors of the author during these years are collected in this book. In the meanwhile, theories and research works focused on resonant sensor of other researchers appeared in academic documents are also collected to reflect the progress in this area. The aim of this book is to provide information as more as possible to benefit the readers interested in resonant sensor.

Feng Guanping

Tsinghua University

2007. 10

目 录

1 系统的谐振与谐振式传感器	1
1.1 谐振系统对外界参量的敏感特性	1
1.1.1 谐振式传感器的能量转换	1
1.1.2 机械系统的谐振	4
1.1.3 谐振传感系统的检测参数	12
1.2 谐振传感系统的组成	18
1.2.1 二阶系统的串联谐振与并联谐振	18
1.2.2 基于闭环振荡电路的谐振式传感器	24
1.2.3 谐振式传感器的其他检测方式	29
1.3 几种常见的谐振式传感器	32
1.3.1 振弦式传感器	32
1.3.2 谐振筒式传感器	34
1.3.3 科里奥利质量流量传感器	36
1.3.4 压电谐振式传感器	38
1.3.5 声表面波传感器	40
参考文献	42
2 谐振传感系统的激励与检测	45
2.1 谐振器的振动激励	45
2.1.1 电磁激励	46
2.1.2 静电激励	49
2.1.3 压电激励	55
2.1.4 电热激励	60
2.2 谐振器的振动检测	61

2.2.1	电容检测	61
2.2.2	压电检测	65
2.2.3	压阻检测	67
2.3	谐振式传感器的激励与检测	69
2.3.1	振动的激励与检测	71
2.3.2	谐振器的设计参数	73
	参考文献	77
3	电子式谐振传感器	81
3.1	电容谐振传感器	81
3.1.1	电容测量原理	82
3.1.2	电容检测电路	85
3.1.3	电容谐振传感器的电路实现	89
3.2	电感谐振传感器	101
3.2.1	自感式电感传感器	101
3.2.2	互感式电感传感器	105
3.2.3	电涡流传感器	109
3.3	电涡流谐振传感器	114
3.3.1	电涡流位移传感器	114
3.3.2	电涡流无损检测传感器	129
3.3.3	几种新型电涡流传感器	137
	参考文献	142
4	石英晶体谐振器及其敏感特性	144
4.1	石英晶体的物理性质	144
4.2	石英晶体谐振器	149
4.2.1	石英晶体谐振器的等效电路	149
4.2.2	体声波石英晶体谐振器	150
4.2.3	声表面波延迟线及声表面波谐振器	155
4.3	石英晶体谐振器的敏感特性	157
4.3.1	压电谐振式传感器的类型	157

4.3.2	体声波谐振器的表面敏感特性	159
4.3.3	声表面波谐振器的表面敏感特性	161
4.3.4	石英谐振式传感器的参数检测	162
4.4	石英谐振式传感器的典型应用	165
4.4.1	温度传感器	167
4.4.2	力、应力及压力传感器	169
4.4.3	石英角速度传感器	173
4.4.4	薄膜厚度及沉积速率检测	174
	参考文献	177
5	厚度剪切应变敏感型传感器	179
5.1	厚度剪切石英晶体谐振器的力频特性	179
5.1.1	石英晶体谐振器的力频特性	179
5.1.2	压电薄板的运动微分方程	181
5.1.3	带有电极石英晶片的运动方程	188
5.1.4	厚度剪切振动石英晶体谐振器的力频系数	193
5.2	石英谐振式力敏元件的设计	196
5.2.1	加载力对谐振器能陷效应的影响	198
5.2.2	力敏谐振器的参数设计	201
5.2.3	非理想加载下的力敏谐振器	204
5.3	组合结构的石英谐振式力传感器	209
5.3.1	石英晶体谐振器的基本加载结构	209
5.3.2	直接加载的石英谐振式力传感器	211
5.3.3	间接加载的石英谐振式力传感器	219
5.4	传感器的温度特性	223
5.4.1	加力方向角与传感器的温度特性	224
5.4.2	谐振器的双模式温度自测	226
	参考文献	238
6	石英谐振式质量敏传感器	241
6.1	石英晶体谐振器的表面声负载敏感特性	241

6.1.1	石英晶体微天平	242
6.1.2	表面流体对谐振器参数的影响	243
6.1.3	表面敏感膜对谐振器参数的影响	250
6.1.4	谐振公式在传感器研制中的应用	254
6.2	石英晶体谐振器在流体环境中的振荡行为	257
6.2.1	石英晶体谐振器的检测电路	257
6.2.2	石英晶体谐振器的特征阻尼	262
6.3	石英晶体谐振器在气相检测中的应用	269
6.3.1	表面敏感膜对气体分子的吸附	269
6.3.2	气体检测装置	273
6.3.3	用于气相检测的石英谐振式传感器	275
6.4	石英晶体谐振器在液相检测中的应用	284
6.4.1	液相检测时的频率偏移	284
6.4.2	液相检测的典型应用	286
6.4.3	电化学石英晶体微天平	293
	参考文献	298
7	声表面波传感器	301
7.1	固体中的声表面波	301
7.1.1	固体的应力、应变与压电效应	302
7.1.2	压电材料中声波的传播	305
7.1.3	声表面波的基本类型	308
7.2	声表面波传感器的基本原理	315
7.2.1	叉指换能器	315
7.2.2	声表面波谐振器的等效电路	318
7.2.3	石英晶体声表面波谐振器的设计	327
7.2.4	声表面波谐振器的设计与制作实例	335
7.3	声表面波传感器及其应用	337
7.3.1	振荡电路	337
7.3.2	声表面波物理量传感器	340
7.3.3	声表面波化学量传感器	343

7.4 无源无线声表面波传感器	347
7.4.1 声表面波谐振器的无线访问	348
7.4.2 声表面波延迟线的无线访问	356
参考文献	363
8 谐振式微传感器	365
8.1 微型谐振器	365
8.1.1 谐振器材料	365
8.1.2 谐振器的设计	366
8.1.3 传感器中应用的谐振器	371
8.2 硅谐振式压力传感器	374
8.2.1 压力的测量	375
8.2.2 基于单谐振梁的压力传感器	376
8.2.3 基于谐振平板的压力传感器	380
8.3 硅谐振式惯性传感器	385
8.3.1 加速度微传感器的基本原理	386
8.3.2 谐振式加速度微传感器	391
8.3.3 微陀螺	397
8.4 硅谐振式化学生物量微传感器	408
8.4.1 微悬臂梁传感器	408
8.4.2 微悬臂梁传感器的特性参数	412
8.4.3 基于微悬臂梁的化学生物量传感器	414
参考文献	419
9 谐振式传感器的数据获取	423
9.1 传感器中的准数字信号	423
9.1.1 数字传感器中输出信号的类型	424
9.1.2 准数字信号的基本形式	425
9.1.3 被测参量到准数字信号的转换	426
9.2 准数字信号的频率与周期测量方法	428
9.2.1 频率测量法	428

9.2.2	周期测量法	431
9.2.3	频率的混合测量方法	433
9.2.4	相位的测量	435
9.3	准数字信号的软硬件协同测量	437
9.3.1	基于傅里叶变换的频率测量系统	437
9.3.2	基于现场可编程门阵列的频率测量方法	439
9.3.3	高频率传感器信号的低速测量方法	443
9.4	谐振式传感器的测量系统	446
9.4.1	传感器的信号输入通道	446
9.4.2	准数字信号的多通道数据获取系统	449
9.4.3	多通道数据获取系统的主要误差	451
	参考文献	453

Contents

1	System resonance and resonant sensors	1
1.1	Sensing characteristics of resonant system to environmental parameters	1
1.1.1	Energy transduction of resonant sensors	1
1.1.2	The resonance of mechanical systems	4
1.1.3	The detection parameters of resonant sensing system	12
1.2	The construction of resonant sensing system	18
1.2.1	Series and parallel resonance of second-order systems	18
1.2.2	Resonant sensor based on closed-loop oscillator	24
1.2.3	Other measurement methods for resonant sensors	29
1.3	Some conventional resonant sensors	32
1.3.1	Vibrating wire sensors	32
1.3.2	Vibrating cylinder sensors	34
1.3.3	Coriolis flow meters	36
1.3.4	Piezoelectric resonant sensors	38
1.3.5	Surface acoustic wave sensors	40
	References	42
2	Excitation and detection of resonant sensing system	45
2.1	Vibration excitation of resonators	45
2.1.1	Magnetic excitation	46

2.1.2	Electrostatic excitation	49
2.1.3	Piezoelectric excitation	55
2.1.4	Electro-thermal excitation	60
2.2	Vibration detection of resonators	61
2.2.1	Capacitive detection	61
2.2.2	Piezoelectric detection	65
2.2.3	Piezoresistive detection	67
2.3	Excitation and detection of resonant sensors	69
2.3.1	Excitation and detection of Vibration	71
2.3.2	Design parameters of resonators	73
	References	77
3	Electrical resonant sensors	81
3.1	Capacitive resonant sensors	81
3.1.1	Principles of capacitive measurement	82
3.1.2	Measurement circuits for capacitance	85
3.1.3	Electrical implementation of capacitive resonant sensors	89
3.2	Inductive resonant sensors	101
3.2.1	Self-induction-type inductive sensors	101
3.2.2	Mutual-induction-type inductive sensors	105
3.2.3	Eddy-current sensors	109
3.3	Eddy-current resonant sensors	114
3.3.1	Eddy-current displacement sensors	114
3.3.2	Eddy-current sensors in non-destructive detection	129
3.3.3	Some novel eddy-current sensors	137
	References	142
4	Quartz crystal resonator and its sensing characteristics	144
4.1	Physical characteristics of quartz crystal	144

4.2	Quartz crystal resonators	149
4.2.1	Equivalent circuits of quartz crystal resonators	149
4.2.2	Bulk acoustic wave quartz crystal resonators	150
4.2.3	Surface acoustic wave delay-line and Surface acoustic wave resonators	155
4.3	Sensing characteristics of quartz crystal resonators	157
4.3.1	Type of piezoelectric resonant sensors	157
4.3.2	Surface sensing characteristics of bulk acoustic wave resonators	159
4.3.3	Surface sensing characteristics of surface acoustic wave resonators	161
4.3.4	Parameter measurement for quartz resonant sensors	162
4.4	Typical application of quartz resonant sensors	165
4.4.1	Temperature sensors	167
4.4.2	Force, stress and pressure sensors	169
4.4.3	Quart angular velocity sensors	173
4.4.4	Measurement of film thickness and deposition rate	174
	References	177
5	Thickness shear stress-sensitive sensors	179
5.1	Force-frequency characters of thickness shear quartz crystal resonators	179
5.1.1	Force-frequency characters of quartz crystal resonators	179
5.1.2	Movement differential equations of piezoelectric thin plates	181
5.1.3	Movement equations of quartz crystal plate with electrodes	188