



国防特色学术专著·仪器科学与技术

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

谐振式传感器

XIE ZHEN SHI CHUAN GAN QI

樊尚春 著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色学术专著·仪器科学与技术

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

谐振式传感器

樊尚春 著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书讨论了谐振式传感器所涉及的共性基础理论和几种有代表性的谐振式传感器:谐振式压力传感器、谐振式加速度传感器、谐振式角速率传感器、谐振式直接质量流量传感器和声表面波谐振式传感器等。

本书可供仪器科学与技术、控制科学与工程、机械工程等学科领域的研究生、高年级本科生,以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

谐振式传感器 / 樊尚春著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-5124-1321-4

I. ①谐… II. ①樊… III. ①传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 284143 号

版权所有, 侵权必究。



谐振式传感器

樊尚春 著

责任编辑 张少扬 孟博

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpess@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×1 092 1/16 印张: 11.5 字数: 294 千字

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷 印数: 1 500 册

ISBN 978-7-5124-1321-4 定价: 29.00 元

前言

传感器是信息技术的前端,是信息获取的核心,在当前科学技术进步中发挥着重要作用。基于自然界普遍存在的谐振现象,以敏感元件固有的谐振特性随被测量变化规律实现的谐振式传感器,与模拟式传感器相比,具有直接数字式输出、迟滞小、重复性好、稳定性好等优点,被公认为高性能传感器。谐振式传感器是当前传感器技术领域研究的重点与热点,更是以微处理器为核心的自动化与智能化测控系统中的首选,在航空、航天、石油、化工、冶金、食品、气象、计量等领域具有重要应用价值。

以自主研制高性能谐振式传感器为重点,把握谐振式传感器发展趋势,紧密围绕国防现代化与国民经济建设中的急需,作者近 30 年来一直致力于谐振式传感器的理论研究、实验研究与工程实践,取得了一些成果,也积累了一定的教学经验。本书便是这些成果与经验的总结。

在开展谐振式传感器的研究过程中,作者渐渐地感悟到科学研究工作的基石是“源于自然”,其灵魂是“创新”与“和谐”。而“和谐”正是谐振式传感器工作机理的本质。同时,伴随着研究过程中的不断思考与升华,逐渐形成了以“自然现象→科学问题→关键技术→工程应用→完善提高”为主线,五个重要环节相互依存、循环往复、不断优化的科学研究思路,如图 0.1 所示。

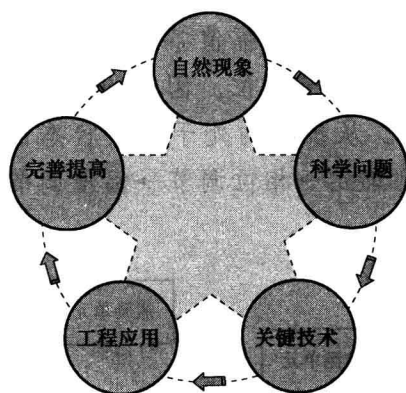


图 0.1 科学研究中的五个重要环节示意图

科学研究工作源于自然。第一步是观察自然,感悟自然之妙,沿着正确方向认识自然现象、发现规律;第二步是总结规律,凝练科学问题,遵循普适原则揭示自然现象、建立模型;第三步是突破关键,提出实现途径,掌握核心技术,奠定理论

跃迁、研制样机；第四步是实际应用，形成具体成果，实现批量生产用于工程实践、服务社会；第五步是日臻完善，针对实际应用，发现存在不足加以完善提高，追求第一。

而“完善提高”的要领仍然是要进一步仔细观察“自然现象”，进一步深入认识“自然现象”，审视“科学问题”的凝练是否准确？“关键技术”的突破是否准确？“工程应用”的方式是否恰当？因此上述五个重要环节应当是相互依存、循环往复、不断优化、逼近最佳的永续过程。需要指出，对于上述五个重要环节，既要准确定位、把握其内涵，更要广义理解、拓展其外延。

传感器技术的研究以基础器件、硬件为主，突出应用，突破“关键技术”的第三个环节是核心，样机研制的成功也应伴随着高层次技术创新与高水平发明专利；而要有实质性价值的创新与发明，必须要有重要规律的发现以及基础研究、应用基础研究等工作强有力的支持，即在第一个环节“自然现象”、第二个环节“科学问题”中形成有价值的成果，其表现形式主要为高水平的学术论文。第四个环节“工程应用”形成的成果应是整体性的，可以理解为科学研究成果及其成功转化，实现工程化与产业化，传感器技术稳定、可靠的批量应用，同时推动相关技术与产业的进步。第五个环节的“完善提高”更是不断追求完美、冲击世界一流水平的不竭动力。

对于谐振式传感器，最典型的技术特征是其工作于闭环系统状态，也称闭环自激状态，经典理解如图 0.2 所示。包括四个环节：用于敏感被测量 M 处于谐振状态的敏感元件、用于获取敏感元件谐振状态的检测单元、用于调节闭环系统中信号的放大单元、用于保证敏感元件始终处于谐振状态的激励单元。事实上，放大单元的重要作用是满足闭环系统的幅值条件和相位条件，在闭环系统对信号进行调节幅值（或放大幅值）和调节相位。因此，谐振式传感器闭环系统的原理结构可以理解 and 表述为图 0.3。从核心的处于谐振状态的敏感元件算起，包括五个基本要素：“敏感元件→检测单元→相位调节→幅值调节→激励单元”。

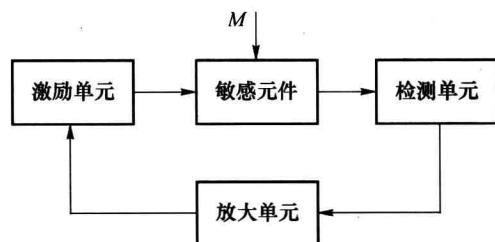


图 0.2 谐振式传感器闭环系统经典原理结构示意图

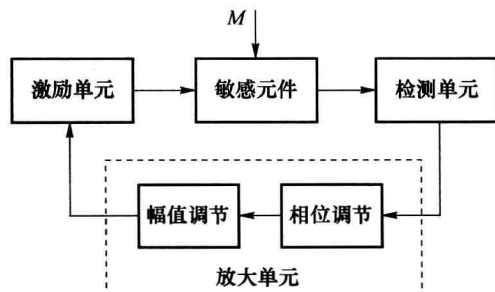


图 0.3 谐振式传感器闭环系统原理结构图的一种理解

处于谐振状态的敏感元件也称谐振敏感元件,基于自然界普遍存在的谐振现象感受被测量 M ,实现测量机理,可以映射为“自然现象”;检测单元提取敏感元件谐振状态的有关信息(信号),通过解算得到被测量,可以映射为“科学问题”;相位调节是实现闭环系统的核心与关键技术,通过优化相位条件,让谐振敏感元件在全测量范围工作于最佳谐振状态,即尽可能始终工作于敏感元件的固有频率处,以减小测量误差、提高传感器性能,可以映射为“关键技术”;幅值调节就是放大闭环系统中信号的幅值与能量,关键是“放大”,可以映射为“工程应用”;激励单元是给谐振敏感元件不断补充所需要的谐振能量,使实用中有一定阻尼的敏感元件处于持续谐振状态,可以映射为“完善提高”。可见,谐振式传感器闭环系统的五个基本要素,与科学研究中的五个重要环节具有一一映射关系。

基于此,谐振式传感器闭环系统原理结构图可以表述为图 0.4。

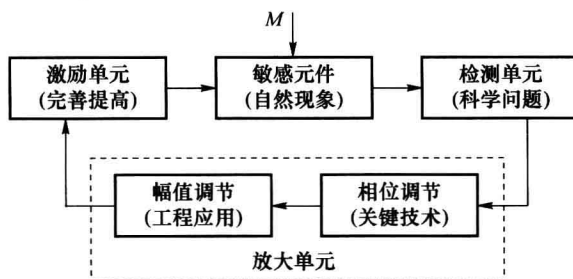


图 0.4 谐振式传感器闭环系统原理结构图的一种表述

作者试图以上述思路审视在谐振式传感器方面所开展的科学研究工作,并系统讨论、总结谐振式传感器所涉及的共性基础理论和几种典型的谐振式传感器。第 1 章的共性基础理论包括:谐振现象及其评估、谐振式传感器的敏感机理、基本结构、闭环系统、动态特性、输出信号的检测方法、设计要点、应用特点以及谐振弹性敏感元件结构的材料等。第 2 章~第 5 章深入研究、重点讨论的几种典型的谐振式传感器包括:谐振弦式压力传感器、谐振膜式压力传感器、谐振筒压力传感器、石英振梁压力传感器、谐振式硅微结构压力传感器、石英振梁式加速度传感器、硅微机械谐振式加速度传感器、谐振式圆柱壳角速率传感器、半球谐振式角速率传感器、硅微机械谐振式角速率传感器、谐振式科氏直接质量流量传感器和声表面波谐振式传感器等。

在研究、讨论每一种谐振式传感器时,既重视基础理论分析,凝练科学问题开展共性研究,又重视工程实际应用,梳理核心技术开展共性研究。结合理论分析与实际应用,给出较为深入、系统的研究结果,总结一般的规律性结论,以指导谐振式传感器更深入、更系统的理论研究与工程应用。同时在每一章配有适量思考

题,以便于读者掌握有关知识和开展深入研究。

在作者开展谐振式传感器研究过程中,先后承担、完成了 20 多项有关谐振式传感器的科研项目,包括国家自然科学基金、国家“863 计划”、国防基础科研、航空科学基金、航天创新基金等。在相关研究和本书总结过程中,参考并引用了一些专家、学者论著的有关内容。清华大学丁天怀教授、中国科学院电子学研究所夏善红研究员审阅了书稿并提出了许多宝贵意见与建议,在此一并表示衷心感谢。

谐振式传感器内容广泛且发展迅速,由于作者学识、水平有限,书中错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 1 月

联系方式:shangcfan@buaa.edu.cn;010-82338323

目 录

第 1 章 谐振式传感器的基础理论	1
1.1 概 述	1
1.2 谐振现象	2
1.3 谐振式传感器的基本结构及闭环系统实现	4
1.3.1 传感器的基本结构	4
1.3.2 闭环系统的时域分析	5
1.3.3 闭环系统的复频域分析	5
1.4 谐振式传感器的敏感机理	6
1.4.1 传感器的输出方式	6
1.4.2 测量机理的讨论	6
1.5 谐振敏感元件的机械品质因数	7
1.5.1 机械品质因数定义及内涵	7
1.5.2 对传感器闭环系统的影响	8
1.5.3 提高机械品质因数的措施	9
1.6 谐振式传感器的动态特性	10
1.6.1 阶跃特性	10
1.6.2 正弦周期特性	11
1.7 谐振式传感器输出信号的检测方法	12
1.7.1 频率输出	12
1.7.2 相位差输出	14
1.7.3 幅值比输出	17
1.8 谐振式传感器的设计要点	20
1.9 谐振式传感器的特征与优势	20
1.10 谐振弹性敏感元件的材料	20
1.10.1 精密恒弹合金	21
1.10.2 单晶硅	21
1.10.3 熔凝石英	21
1.10.4 压电石英晶体	22
思考题	22
第 2 章 谐振式压力传感器	23
2.1 概 述	23
2.2 基本工作原理	23
2.3 谐振弦式压力传感器	24

2.3.1	结构与原理	24
2.3.2	频率特性方程	25
2.3.3	激励方式	26
2.4	谐振膜式压力传感器	27
2.4.1	结构与原理	27
2.4.2	频率特性方程	28
2.5	电磁激励谐振筒压力传感器	33
2.5.1	结构与原理	33
2.5.2	频率特性方程	34
2.5.3	激励方式	42
2.5.4	特性线性化与误差补偿	43
2.6	压电激励谐振筒压力传感器	45
2.6.1	结构与原理	45
2.6.2	压电激励特性	46
2.6.3	检测信号的转换	47
2.6.4	稳定的单模态自激系统的实现	48
2.6.5	双重模态的有关问题	49
2.7	石英振梁压力传感器	53
2.7.1	结构与原理	53
2.7.2	频率特性方程	54
2.8	谐振式硅微结构压力传感器	58
2.8.1	结构与原理	58
2.8.2	频率特性方程	58
2.8.3	信号转换过程	62
2.8.4	梁谐振敏感元件的温度场模型与热特性分析	63
2.8.5	闭环系统	64
2.9	具有差动输出的谐振式硅微结构压力传感器	65
2.9.1	结构与原理	65
2.9.2	频率特性方程	66
2.9.3	算例与分析	70
	思考题	71
第3章	谐振式惯性传感器	73
3.1	概 述	73
3.2	基本工作原理	73
3.3	石英振梁式加速度传感器	74
3.4	谐振式硅微结构加速度传感器	75
3.5	压电激励谐振式圆柱壳角速率传感器	76
3.5.1	传感器的结构	76

3.5.2	顶端开口圆柱壳的固有振动	77
3.5.3	圆柱壳谐振敏感元件底端约束的特征	78
3.5.4	传感器的输出信号	80
3.6	静电激励半球谐振式角速率传感器	84
3.6.1	传感器的结构	84
3.6.2	顶端开口半球壳的固有振动	85
3.6.3	半球壳谐振敏感元件的耦合振动	89
3.6.4	半球壳谐振子环线方向振型的进动特性	96
3.6.5	旋转对半球壳谐振子频率特性和进动特性的影响	99
3.6.6	传感器的系统实现与输出信号	100
3.7	谐振式硅微结构角速率传感器	103
3.7.1	硅电容式表面微结构陀螺	103
3.7.2	直接输出频率的谐振式硅微结构陀螺	104
	思考题	105
第4章	谐振式直接质量流量传感器	106
4.1	概 述	106
4.2	基本工作原理	107
4.3	弹性测量管的固有振动	108
4.3.1	基本单元方程	108
4.3.2	流体速度的影响	112
4.3.3	流体内部压力的影响	113
4.3.4	弹性测量管系统固有振动的有限元方程	114
4.3.5	弹性直管固有振动的近似解析解	115
4.3.6	固有频率的计算与分析	116
4.4	测量的数学模型	124
4.4.1	质量流量的测量	124
4.4.2	科氏效应的有限元分析	127
4.4.3	密度的测量	130
4.4.4	双组分流体的测量	131
4.5	信号检测方案及其传感器系统实现方式	132
4.5.1	质量流量的信号检测	132
4.5.2	传感器系统的实现方式	133
4.5.3	传感器的分类	135
4.6	主要应用领域及其特点	138
4.6.1	应用概况	138
4.6.2	特 点	138
4.7	干扰因素及其抑止	139
4.7.1	压力损失	139

4.7.2	测量气体流量	140
4.7.3	含有气体的液体	141
4.7.4	含有固体的液体	141
4.7.5	流体工况或物性参量对测量的影响	141
4.7.6	非线性振动与工频干扰的影响	143
	思考题	143
第5章	声表面波谐振式传感器	144
5.1	概 述	144
5.2	声表面波叉指换能器	145
5.2.1	基本特性	145
5.2.2	基本分析模型	147
5.3	声表面波谐振敏感元件	150
5.3.1	结构与原理	150
5.3.2	频率的温度稳定性	152
5.4	SAW 谐振式应变传感器	152
5.5	SAW 谐振式压力传感器	154
5.5.1	结构与原理	154
5.5.2	差动检测模式的特性方程	155
5.6	SAW 谐振式加速度传感器	160
5.6.1	结构与原理	160
5.6.2	频率特性方程	160
5.6.3	动态特性分析	162
5.7	SAW 谐振式气体传感器	164
5.7.1	传感器的工作原理	164
5.7.2	薄膜与传感器特性之间的关系	166
5.8	SAW 谐振式流量传感器	167
5.8.1	结构与原理	167
5.8.2	频率特性方程	167
5.9	SAW 谐振式湿度传感器	169
	思考题	170
	主要参考文献	171

第 1 章 谐振式传感器的基础理论

基本内容:

谐振、谐振现象

谐振敏感元件、谐振敏感单元、谐振敏感结构、谐振子

固有频率与谐振频率

谐振式传感器的基本结构

激励单元与检测单元

周期信号的频率、幅值、相位

开环特性及其测试

闭环自激系统

闭环系统的幅值与相位条件

机械品质因数 Q 值

谐振式传感器的动态特性

谐振式传感器与 Mathieu 方程

谐振式传感器输出信号的检测方法

频率输出的谐振式传感器

相位差输出的谐振式传感器

幅值比输出的谐振式传感器

调谐频率

谐振敏感元件的材料

精密恒弹合金材料

单晶硅

熔融石英

压电石英晶体

1.1 概 述

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规律而实现的传感器称为谐振式传感器(resonator transducers/sensors)。通常谐振式传感器的敏感元件可称为谐振敏感元件、谐振敏感单元、谐振敏感结构或谐振子。谐振式传感器自身为周期信号输出(准数字信号),只用简单的数字电路(不是 A/D 或 V/F)即可转换为易与微处理器接口的数字信号;同时由于谐振敏感元件的重复性、分辨力和稳定性等非常优良,因此谐振式测量原理自然成为当今人们研究的重点。

过去,在发展模拟控制系统时,相继发展了许多传感器。它们通过位移、应变、应力等的变化改变电阻、电容或电感等测量诸如压力、温度与位移等参数,并以电压和电流信号输出。这些传感器自身不适合于数字式测量、控制系统,因而在传感器与控制电路之间需增加 A/D 或

V/F 变换器。这不仅降低系统的可靠性和响应速度,而且增加了成本。

发展自身具有数字输出的传感器,适应以微处理器为中心的 digital 控制系统是许多技术领域的共同要求。严格地说,在现实中除了检测线位移和角位移的编码器外,几乎没有直接数字式传感器。另外,基于周期性触发机理的一族传感器正在相继出现和发展,如触发型传感器、CCDs 等一些光传感器。

基于机械谐振敏感元件的谐振式传感器可以利用振动频率、相位和幅值作为敏感信息的参数。由于谐振式传感器有许多优点,也适用于多种参数测量,如压力、力、加速度、角速度、转角、流量、温度、湿度、液位、密度和气体成分的测量等。这类传感器已发展成为一个新的传感器家族。

现已实用的谐振式传感器主要是基于机械谐振敏感结构的固有振动特性实现的。按谐振敏感结构的特点可分为两类:一类是利用传统工艺实现的结构参数比较大的金属谐振式传感器,常用的谐振敏感元件如谐振筒、谐振梁、谐振膜和谐振测量等。它们都是以精密合金用精密机械加工制成,性能优良,已在许多行业获得成功应用。另一类是利用微机械加工工艺实现的新型硅或石英谐振式传感器。微型谐振敏感元件种类多样,其特征尺寸一般为微米级甚至纳米级。研究成果已证明,微机构谐振式传感器除了具有结构微小、功耗低、响应快等特点外,还有很好的重复性、稳定性和可靠性,因此引起了人们的特别兴趣,已经成为谐振式传感器中的重要分支。

本章首先阐述基于机械谐振敏感结构的谐振式传感器所涉及的共性基础理论。

1.2 谐振现象

谐振式测量原理是通过谐振敏感元件的固有振动特性实现的。谐振敏感元件工作时,可以等效为一个单自由度系统(如图 1.1(a)所示),其动力学方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx - F(t) = 0 \quad (1.1)$$

式中: m ——振动系统的等效质量(kg);

c ——振动系统的等效阻尼系数($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$);

k ——振动系统的等效刚度(N/m);

$F(t)$ ——作用外力(N)。

$m\ddot{x}$ 、 $c\dot{x}$ 和 kx 分别反映了振动系统的惯性力、阻尼力和弹性力。它们的方向如图 1.1(b)所示。

根据谐振状态应具有的特性,当上述振动系统处于谐振状态时,作用外力应当与系统的阻尼力相平衡;惯性力应当与弹性力相平衡,系统以其固有频率振动,即

$$\left. \begin{aligned} c\dot{x} - F(t) &= 0 \\ m\ddot{x} + kx &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

这时振动系统的外力超前位移矢量 90° ,与速度矢量同相位。惯性力与弹性力之和为零。系统的固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.3)$$

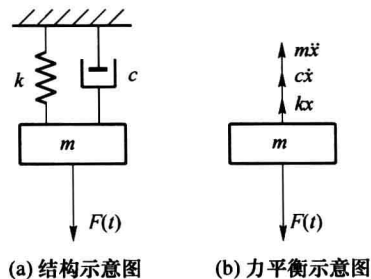


图 1.1 二阶单自由度振动系统

式中： ω_n ——系统的固有角频率(rad/s)。

这是一种理想的情况，在实际应用中很难实现，原因是实际振动系统的阻尼力很难确定。因此，可以从系统的频谱特性来认识谐振现象。

当式(1.1)中的外力 $F(t)$ 是周期信号时，即

$$F(t) = F_m \sin \omega t \quad (1.4)$$

则系统的归一化幅值响应和相位响应分别为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-P^2)^2 + (2\zeta_n P)^2}} \quad (1.5)$$

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\arctan \frac{2\zeta_n P}{1-P^2} & P \leq 1 \\ -\pi + \arctan \frac{2\zeta_n P}{P^2-1} & P > 1 \end{cases} \quad (1.6)$$

$$P = \frac{\omega}{\omega_n}$$

式中： ζ_n ——系统的阻尼比系数， $\zeta_n = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ ，对谐振敏感元件而言， $\zeta_n \ll 1$ ，为弱阻尼系统；

P ——相对于系统固有角频率的归一化频率。

图 1.2 为系统的幅频特性曲线和相频特性曲线。

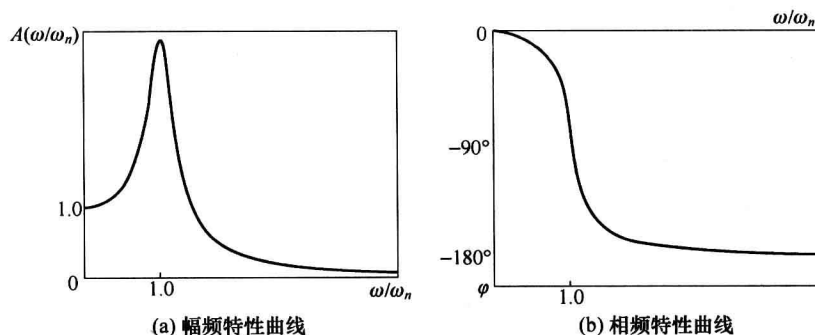


图 1.2 系统的幅频特性曲线和相频特性曲线

当 $P = \sqrt{1-2\zeta_n^2}$ 时， $A(\omega)$ 达到最大值，有

$$A_{\max} = \frac{1}{2\zeta_n \sqrt{1-\zeta_n^2}} \approx \frac{1}{2\zeta_n} \quad (1.7)$$

这时系统的相位为

$$\varphi = -\arctan \frac{2\zeta_n P}{2\zeta_n^2} \approx -\arctan \frac{1}{\zeta_n} \approx -\frac{\pi}{2} \quad (1.8)$$

通常，工程上将系统的幅值增益达到最大值时的工作情况定义为谐振状态，相应的激励角频率($\omega_r = \omega_n \sqrt{1-2\zeta_n^2}$)定义为系统的谐振角频率。

1.3 谐振式传感器的基本结构及闭环系统实现

1.3.1 传感器的基本结构

图 1.3 从功能上给出了谐振式传感器的基本结构原理示意图。

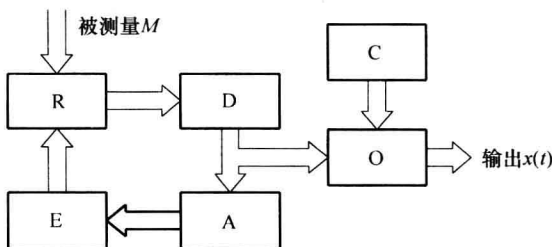


图 1.3 谐振式传感器基本功能原理示意图

图中 R 为谐振敏感元件，是谐振式传感器的核心，工作时以其自身固有的振动模态持续振动，其振动特性直接影响着谐振式传感器的性能。目前使用的谐振敏感元件有多种形式，如谐振梁、调谐音叉、谐振筒、谐振膜片、谐振半球壳和弹性弯管等。

D、E 分别为检测单元和激励单元，是实现机电、电机转换的必要部件，为组成谐振式传感器的闭环自激系统提供条件。检测单元实现对谐振敏感元件振动信号的检测，又称信号检测器、拾振单元或拾振器；激励单元给出激励力信号，保证谐振敏感元件工作于固有谐振状态，又称激励单元或激励器。常用的检测手段有磁电效应、电容效应、正压电效应、光电效应等；常用的激励方式有电磁效应、静电效应、逆压电效应、电热效应、光热效应等。

A 为放大单元。它与激励、检测手段密不可分，在闭环系统中包括两个功能：调节信号的相位和幅值，从而保证谐振敏感元件可靠稳定地持续工作于闭环自激状态。放大单元有模拟式和数字式两类，模拟式放大单元较为简单。早期模拟式放大单元多采用分离元件或集成运算放大器实现，近来主要以设计专用的多功能集成电路为主。随着微电子技术的发展，设计实现数字式放大单元成为可能。数字式放大单元的核心是微处理器，通过恰当的软件设计更容易实现闭环系统需要的信号幅值和相位的调节。

O 为系统检测输出装置，是实现周期信号检测（有时也是解算被测量）的部件，用于检测周期信号的频率（或周期）、幅值（幅值比）或相位（相位差）。

C 为补偿装置，用来补偿干扰因素的影响，主要对温度误差进行补偿，有时系统也对零位和测量环境的外界干扰因素进行补偿。

以上六个主要部件构成了谐振式传感器的三个重要环节。

① 由 E、R、D 组成的电-机-电一体化谐振子环节，是谐振式传感器的关键环节。适当地选择激励手段和检测手段，构成一个理想的 ERD，对设计谐振式传感器至关重要。

② 由 E、R、D、A 组成的闭环自激环节或闭环系统，是构成谐振式传感器的重要条件。

③ 由 R、D、O(C) 组成的信号检测、输出环节，是准确获得被测量的重要手段。

1.3.2 闭环系统的时域分析

如图 1.4 所示,从信号激励单元考虑,某一瞬时作用于激励单元的输入电信号为

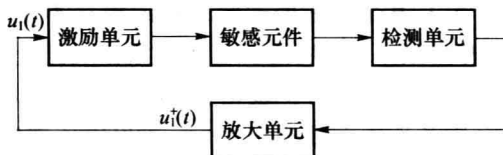


图 1.4 闭环自激条件的时域分析

$$u_1(t) = A_1 \sin \omega_v t \quad (1.9)$$

式中： A_1 ——激励信号的幅值， $A_1 > 0$ ；

ω_v ——激励信号的角频率（即谐振敏感元件的振动角频率，非常接近于谐振敏感元件的固有角频率 ω_n ）。

$u_1(t)$ 经谐振敏感元件、检测单元和放大单元后，输出为 $u_1^+(t)$ ，可写为

$$u_1^+(t) = A_2 \sin(\omega_v t + \varphi_T) \quad (1.10)$$

式中： A_2 ——输出电压信号 $u_1^+(t)$ 的幅值， $A_2 > 0$ 。

满足以下条件时，系统以角频率 ω_v 产生闭环自激，即

$$A_2 \geq A_1 \quad (1.11)$$

$$\varphi_T = 2n\pi \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.12)$$

式(1.11)和式(1.12)称为系统可自激的时域幅值条件和相位条件。

1.3.3 闭环系统的复频域分析

如图 1.5 所示， $R(s)$ 、 $E(s)$ 、 $A(s)$ 、 $D(s)$ 分别为谐振敏感元件、激励单元、放大单元和检测单元的传递函数， s 为拉普拉斯变换复变量。闭环系统的等效开环传递函数为

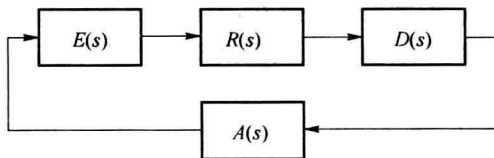


图 1.5 闭环自激条件的复频域分析

$$G(s) = R(s)E(s)A(s)D(s) \quad (1.13)$$

显然，满足以下条件时，系统将以角频率 ω_v 产生闭环自激，即

$$|G(j\omega_v)| \geq 1 \quad (1.14)$$

$$\angle G(j\omega_v) = 2n\pi \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.15)$$

式(1.14)和式(1.15)称为系统可自激的复频域幅值条件和相位条件。

以上考虑的是在一点处的闭环自激条件。对于谐振式传感器，应在其整个工作频率范围 $[f_L, f_H]$ (f_L 、 f_H 分别为谐振式传感器测量范围内的最低工作频率和最高工作频率)均满足闭

环自激条件,这就给传感器,特别是放大单元的设计、调试提出了特殊要求。

事实上,由于模拟式放大单元的幅值频率特性和相位频率特性的连续性,在谐振式传感器的整个工作频率范围 $[f_L, f_H]$,只有一个或少数几个离散频率点能够在敏感元件 $-\pi/2$ 相移处满足闭环自激条件,谐振式传感器的工作角频率为谐振敏感元件的固有角频率 ω_n (可称为最佳谐振点,有关讨论见 1.5 节),其余频率处敏感元件的相移不 $-\pi/2$,即谐振式传感器不会工作于谐振敏感元件的固有角频率 ω_n ,从而引起随机漂移或测量误差。

而对于数字式放大单元,由于软件设计的灵活性,可以在谐振式传感器的整个工作频率范围 $[f_L, f_H]$,传感器的闭环自激条件均在敏感元件 $-\pi/2$ 相移处满足,即谐振敏感元件都工作于其固有角频率 ω_n ,从而尽可能减小随机漂移或测量误差。

1.4 谐振式传感器的敏感机理

1.4.1 传感器的输出方式

基于上述分析,从检测信号的角度,谐振式传感器的输出可以写为

$$x(t) = Af(\omega t + \varphi) \quad (1.16)$$

式中: A ——检测信号的幅值(V);

ω ——检测信号的角频率(rad/s);

φ ——检测信号的相位($^\circ$)。

$f(\cdot)$ 为归一化周期函数。当 $(n+1)T \geq t \geq nT$ 时, $|f(\cdot)|_{\max} = 1$; $T = 2\pi/\omega$,为周期; A 、 ω 、 φ 称为谐振式传感器检测信号 $x(t)$ 的特性参数; φ 具有 $360^\circ(2\pi)$ 同余。

显然,只要被测量能较显著地改变谐振敏感元件的谐振状态,即检测信号 $x(t)$ 的某一特征参数,谐振式传感器就能通过检测上述特征参数获得被测量。

在谐振式传感器中,目前国内外使用最多的是检测角频率 ω 的传感器,如谐振筒压力传感器、谐振膜压力传感器等。

对于敏感幅值 A 或相位 φ 的谐振式传感器,为提高测量精度,通常采用相对(参数)测量,即通过测量幅值比或相位差来实现,如谐振式直接质量流量传感器。

1.4.2 测量机理的讨论

基于上述讨论,谐振式传感器利用机械谐振敏感元件自身的谐振状态的固有特性实现对被测量的测量。考虑利用谐振频率实现测量的理想情况,结合式(1.3)和图 1.6,当谐振式传感器感受缓变被测量时,谐振敏感元件的固有角频率可以描述为

$$\omega_n(M) = \sqrt{\frac{k_{eq}(M)}{m_{eq}(M)}} \quad (1.17)$$

式中: M ——谐振敏感元件感受的被测量;

$\omega_n(M)$ ——谐振敏感元件的等效固有角频率(rad/s);

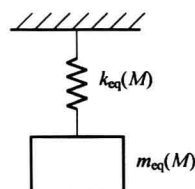


图 1.6 敏感频率的谐振式传感器的等效模型