

刘迎春 编著



传感器原理设计

国防科技

传感器原理设计与应用

刘迎春 编著

---

# 传感器原理 设计与应用

---

○ 刘迎春 编著

---

○ 国防科技大学出版社

---

## 内 容 提 要

本书是一本关于传感器技术的教材，是作者在总结自己教学科研经验的基础上，参考国内外有关资料编写而成的。

全书共分十三章。第一至三章介绍传感器的一般理论和分析方法；第四至十一章介绍几种应用较广泛的传感器，如电位计式、应变式、电容式、电感式、压电式、磁电式、光电式和霍尔式传感器等，详细分析了它们的基本原理、静、动态特性和信号调节电路，对它们的用途用法及有关设计知识也作了较详尽的介绍；第十二章介绍光纤、气敏、湿敏和智能等新型传感器；第十三章介绍传感器的标定方法。

本书可作为仪器仪表及测试专业本科生教材，亦可供有关专业工程技术人员参考。

ZR30/37  
64

### 传感器原理、设计与应用

刘迎春 编 著

责任编辑 谢小伟

国防科技大学出版社 出版

湖南省新华书店发行

国防科技大学印刷厂印装

开本787×1092 1/16 印张：15<sup>7</sup>/<sub>8</sub> 字数：368千字

1989年2月第1版第1次印刷 1989年8月第2次印刷 印数6001—11000册

ISBN 7-81024-050-1

T H·1 定价：4.25元

## 前 言

传感器技术在当代科技领域中占有十分重要的地位。随着计算机技术的不断发展,信息处理技术也在不断发展完善。但作为提供信息的传感器,它的发展相对于计算机的信息处理功能来说就落后了。这使得自动检测技术受到影响,也直接影响到多种技术的进一步发展。基于上述原因,愈来愈多的科技工作者对传感器技术予以了高度的重视,促使传感器技术加速发展,以适应信息处理技术的需要。

在我国出版的有关传感器技术的书籍中,能较全面反映近年来传感器技术新成就的为数不多。作者编写本书的目的就是在于向广大读者提供一本全面介绍传感器技术的书籍。

本书是按照国防科技大学仪表与测试系统专业的《传感器原理与非电量测试》课程教学大纲的要求,集作者多年来教学科研之经验,参考国内外有关资料编写而成的。原书名为《传感器原理与非电量测试》,分上、下两册,曾油印使用多次,反应较好。现经修订充实,予以公开出版。考虑到原书上、下两册虽有联系,但亦相互独立,故分成两本书出版。本书即为原书上册。原书下册更名为《非电量电测技术》,不久也将出版。

本书对当前使用较多的几类传感器,如电位计式、应变式、电容式、电感式、压电式、磁电式、光敏式、霍尔式传感器的基本原理,静、动态特性,信号调节电路及其应用都作了较为详细的分析,还介绍了有关这些传感器的设计知识。对光纤、气敏、湿敏,和智能等新型传感器也作了介绍。本书内容新颖、丰富、全面、具有一定的深度和广度。叙述简明,深入浅出。可作为高等院校仪器、仪表和测试专业本科生教材,亦可供有关专业的工程技术人员参考。

限于作者的水平,书中疏漏不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

华中理工大学卢文祥副教授对本书进行了仔细审阅,提出了不少宝贵意见,在此深表谢意。

作者

1988年5月

# 目 录

## 第一章 概论

1.1 传感器的定义及其在科技发展中的作用	1
1.2 传感器的组成和分类	1
1.2.1 传感器的组成	1
1.2.2 传感器的分类	2
1.3 传感器的发展趋势	3
1.4 机电模拟及双向传感器的统一理论	3
1.4.1 变量的分类	4
1.4.2 机电模拟	5
1.4.3 双向传感器的统一理论	8

## 第二章 传感器的一般特性

2.1 传感器的静态特性	20
2.1.1 线性度	20
2.1.2 灵敏度	22
2.1.3 迟滞(迟环)	22
2.1.4 重复性	23
2.2 传感器的动态特性	23
2.2.1 动态参数测试的特殊问题	23
2.2.2 研究传感器动态特性的方法及其指标	24
2.2.3 传感器的数学模型	25
2.2.4 传递函数	26
2.2.5 频率响应函数	27
2.2.6 脉冲响应函数	27
2.3 传感器动态特性分析	28
2.3.1 传感器的频率响应	28
2.3.2 传感器的瞬态响应	32
2.4 传感器的无失真测试条件	34

## 第三章 传感器的弹性敏感元件

3.1 引言	36
3.2 弹性敏感元件的基本特性	36
3.2.1 弹性特性	36
3.2.2 弹性滞后	37
3.2.3 弹性后效	37
3.2.4 固有振动频率	38
3.3 弹性元件的材料	38
3.4 弹性敏感元件的特性参数计算	39
3.4.1 弹性圆柱(实心或空心)	39

3.4.2	悬臂梁	40
3.4.3	扭转棒	42
3.4.4	圆形膜片和膜盒	43
3.4.5	弹簧管	44
3.4.6	波纹管	46
3.4.7	薄壁圆筒	48
<b>第四章 电位计(器)式传感器</b>		
4.1	线绕电位计的结构和工作原理	50
4.2	线绕电位计的输出特性	51
4.2.1	阶梯特性、阶梯误差和分辨力	51
4.2.2	电位计的负载特性及负载误差	53
4.3	电位计式传感器的结构与参数计算	55
4.3.1	结构设计要考虑的问题	55
4.3.2	参数计算	58
4.4	非线性绕电位计	60
4.4.1	合成膜电位计	60
4.4.2	金属膜电位计	60
4.4.3	导电塑料电位计	61
4.4.4	光电电位计	61
4.5	电位计式传感器	61
<b>第五章 电阻应变式传感器</b>		
5.1	电阻应变片(计)的工作原理	63
5.1.1	金属的应变效应	63
5.1.2	电阻应变片的结构和工作原理	63
5.1.3	电阻应变片的横向效应	66
5.2	电阻应变片的种类、材料和参数	67
5.2.1	电阻应变片的种类	67
5.2.2	电阻应变片的材料	69
5.2.3	应变片的主要参数	70
5.3	电阻应变片的动态响应特性	72
5.3.1	应变波的传播过程	72
5.3.2	应变计的可测频率的估算	73
5.4	粘合剂和应变片粘贴技术	75
5.4.1	粘合剂	75
5.4.2	应变计粘贴工艺	76
5.5	电阻应变片的温度误差及其补偿	77
5.5.1	温度误差及其产生原因	77
5.5.2	温度补偿的方法	78
5.6	电阻应变片的信号调节电路及电阻应变仪	80
5.6.1	测量电桥的工作原理	80
5.6.2	电阻应变仪	84
5.7	电阻应变式力传感器	85

6.7.1	应变式力传感器	85
6.7.2	应变式压力传感器	91
5.7.3	应变式加速度传感器	94
5.8	固态压阻式传感器	94
5.8.1	概述	94
5.8.2	压阻式压力传感器	95
5.8.3	压阻式加速度传感器	97
<b>第六章 电容式传感器</b>		
6.1	电容式传感器的工作原理及结构形式	98
6.1.1	变间隙的电容式传感器	99
6.1.2	变面积的电容式传感器	103
6.1.3	变介电常数的电容式传感器	103
6.2	电容式传感器的等效电路	105
6.3	电容式传感器的信号调节电路	106
6.3.1	运算放大器式电路	106
6.3.2	电桥电路	107
6.3.3	调频电路	108
6.3.4	谐振电路	108
6.3.5	二极管T型网络	109
6.3.6	脉冲宽度调制电路	110
6.4	影响电容传感器精度的因素及提高精度的措施	111
6.4.1	温度对结构尺寸的影响	111
6.4.2	温度对介质介电常数的影响	112
6.4.3	漏电阻的影响	112
6.4.4	边缘效应与寄生参量的影响	112
6.4.5	增加原始电容值, 减少寄生电容和漏电的影响	113
6.5	电容传感器的应用	113
6.5.1	膜片电极式压力传感器	113
6.5.2	电容式加速度传感器	116
6.5.3	电容式应变计	116
6.5.4	荷重传感器	116
6.5.5	振动、位移测量仪	116
6.5.6	电容测厚仪	117
<b>第七章 电感式传感器</b>		
7.1	变磁阻式传感器	118
7.1.1	工作原理	118
7.1.2	等效电路	120
7.1.3	具有铁芯和小气隙的电感线圈的设计	122
7.1.4	输出特性分析	123
7.1.5	结构	126
7.1.6	传感器的信号调节电路	128
7.1.7	影响传感器精度的因素分析	129



7.1.8 电感式传感器的应用	130
7.2 差动变压器	131
7.2.1 螺管形差动变压器	131
7.2.2 差动变压的信号调节电路	137
7.2.3 差动变压器的应用	141
7.3 涡流式传感器	141
7.3.1 高频反射式涡流传感器	142
7.3.2 低频透射式涡流传感器	144
7.3.3 涡流式传感器的应用	145
<b>第八章 压电式传感器</b>	
8.1 压电式传感器的工作原理	147
8.1.1 压电效应	147
8.1.2 压电常数和表面电荷的计算	149
8.2 压电材料	151
8.2.1 压电晶体	151
8.2.2 压电陶瓷	151
8.3 压电式传感器的等效电路	154
8.4 压电式传感器的信号调节电路	155
8.4.1 电压放大器(阻抗变换器)	156
8.4.2 电荷放大器	159
8.5 压电式加速度传感器	160
8.5.1 工作原理	160
8.5.2 灵敏度	161
8.5.3 频率特性	162
8.5.4 压电式加速度传感器的结构	163
8.5 压电式测力传感器	165
8.6 压电式传感器的误差	166
8.7.1 横向灵敏度和它所引起的误差	166
8.7.2 环境影响	166
8.7.3 电缆噪声	167
8.7.4 接地回路噪声	167
<b>第九章 磁电式传感器</b>	
9.1 磁电式传感器的工作原理	168
9.2 动圈式磁电传感器	168
9.2.1 动圈式磁电传感器工作原理	168
9.2.2 动圈式磁电传感器结构	169
9.2.3 信号调节电路和记录仪器	170
9.3 磁阻式磁电传感器	171
9.4 磁电式传感器设计要点	172
9.4.1 灵敏度 $S_n$	172
9.4.2 线圈电阻与负载电阻匹配问题	173
9.4.3 线圈发热检查	173



9.4.4	线圈的磁场效应	173
9.4.5	温度影响	174
9.5	磁电式传感器的误差	175
9.5.1	温度误差	175
9.5.2	永久磁铁的不稳定性误差	175
9.5.3	磁电式传感器的非线性误差	176
9.6	磁电式传感器的频率响应特性	177
<b>第十章 光电式传感器</b>		
10.1	光电管	179
10.2	光电倍增管	180
10.3	光敏电阻	180
10.3.1	光敏电阻的工作原理	180
10.3.2	光敏电阻的结构	181
10.3.3	光敏电阻的主要参数	181
10.3.4	光敏电阻基本特性	182
10.4	光敏二极管和光敏晶体管	184
10.4.1	工作原理	184
10.4.2	基本特性	185
10.5	光电池	187
10.5.1	工作原理	187
10.5.2	基本特性	188
10.6	光电式传感器的应用	190
10.6.1	模拟式光电传感器的应用	190
10.6.2	脉冲式光电传感器的应用	192
<b>第十一章 霍尔式传感器</b>		
11.1	霍尔元件的工作原理	193
11.1.1	霍尔效应	193
11.1.2	霍尔系数及灵敏度	194
11.1.3	霍尔元件的基本电路	194
11.2	零位误差及补偿	194
11.2.1	不等位电势 $U_0$	195
11.2.2	寄生直流电势	196
11.2.3	感应零电势 $V_{i0}$	196
11.2.4	自激场零电势	196
11.3	霍尔元件的温度特性及补偿方法	197
11.3.1	温度对内阻的影响	197
11.3.2	温度对霍尔输出的影响	197
11.3.3	温态补偿	198
11.4	霍尔式传感器的应用	200
11.4.1	微位移的测量	200
11.4.2	霍尔式转速传感器	203
<b>第十二章 新型传感器</b>		

12.1	光导纤维传感器	205
12.1.1	有关光导纤维的基本知识	205
12.1.2	光导纤维传感器	206
12.1.3	光导纤维传感器的应用	206
12.2	气体传感器	212
12.2.1	半导体气体传感器	212
12.2.2	表面控制型电阻式传感器	212
12.2.3	体控制型电阻式传感器	217
12.2.4	非电阻式半导体气体传感器	218
12.3	湿度传感器	220
12.3.1	电阻式湿度传感器的原理、结构和性能	220
12.3.2	湿度传感器的应用及发展方向	227
12.4	智能式传感器	228
12.4.1	概述	228
12.4.2	智能式传感器的构成	229
12.4.3	智能式传感器发展的几个问题	229
<b>第十三章 传感器的标定</b>		
13.1	传感器的静态特性标定	231
13.1.1	静态标准条件	231
13.1.2	标定仪器设备的精度等级的确定	231
13.1.3	静态特性标定的方法	231
13.2	传感器的动态特性标定	232
13.3	测振传感器(振动测量仪器)的标定	234
13.3.1	绝对标定法	234
13.3.2	比较标定法	234
13.3.3	互易法	235
13.4	压力传感器的标定和校准	236
13.4.1	动态标定压力源	236
13.4.2	激波管标定法	236
<b>参考文献</b>		244

# 第一章 概 论

## 1.1 传感器的定义及其在科技发展中的作用

人们通常将能把被测物理量或化学量转换为与之有确定对应关系的电量输出的装置称为传感器。传感器也叫做变换器、换能器或探测器。传感器输出的信号有不同形式，如电压、电流、频率、脉冲等，以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制等要求。

传感器是测量装置和控制系统的首要环节。如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量，那么，无论是信号转换或信息处理，或者最佳数据的显示和控制，都将成为一句空话。可以说，没有精确可靠的传感器，就没有精确可靠的自动检测和控制。现代电子技术和电子计算机为信息转换与处理提供了极其完善的手段，使检测与控制技术发展到了崭新阶段。但是如果没有各种精确可靠的传感器去检测各种原始数据并提供真实的信息，那么，电子计算机也无法发挥其应有的作用。如果把计算机比喻为人的大脑，则传感器为人的五官。

在各种航天器上，装备着多种检测与控制系统，传感器测量出航天器的飞行参数、姿态和发动机工作状态的各个物理量，输送给各种自动控制系统，并进行自调节，使航天器按人们预先设计的轨道正常运行。

在生产中，尤其是自动化生产过程中，用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，以便使设备工作在最佳状态，产品达到最好的质量。

在机器制造工业中，对于机床，以前只是测量一些静态下的性能参数，而现在要进行动态特性测量。如在切削状态下的动态稳定性、自激现象、加工精度等，因此要利用有关的传感器测量刀架、床身等有关部位的振动、机械阻抗等参数来检验其动态特性。在超精加工中，要求对零件尺寸精度进行“在线”检测与控制，只有具有“耳目”作用的传感器才能提供出有关的信息。

## 1.2 传感器的组成和分类

### 1.2.1 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、传感元件和其它辅助件组成，有时也将信号调节与转换电路、辅助电源做为传感器的组成部分。如方框图1-1所示。

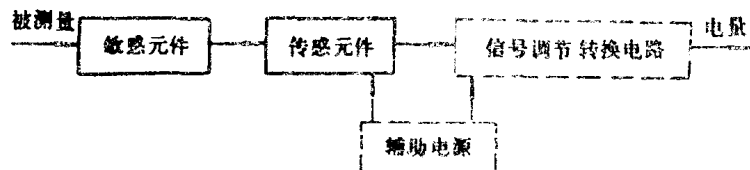


图 1-1 传感器组成方块图

敏感元件——直接感受被测量（一般为非电量），并输出与被测量成确定关系的其它量（一般为电量）的元件。如应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件，它的作用是将压力转换为弹性膜片的变形。敏感元件如果直接输出电量（热电偶），它就同时兼为传感元件了。还有些传感器的敏感元件和传感元件合为一体，如压阻式压力传感器。

传感元件——又称变换器，一般情况它不直接感受被测量，而是将敏感元件的输出量转换为电量输出的元件。如应变式压力传感器中的应变片就是传感元件，它的作用是将弹性膜片的变形转换成电阻值的变化。传感元件有时也直接感受被测量而输出与被测量成确定关系的电量，如热电偶和热敏电阻。

信号调节与转换电路——能把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理和控制的有用电信号的电路。信号调节与转换电路的种类要视传感元件的类型而定，常用的电路有电桥、放大器、振荡器、阻抗变换器等等。

### 1.2.2 传感器的分类

在非电量测试中，应用的传感器种类繁多，不胜枚举。有的传感器可以同时测量多种参数，而有时对于一种物理量又可用多种不同类型的传感器测量。因此，对传感器分类就有很多方法。如表 1-1 所示。

表 1-1 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说 明
按输入量分类	位移传感器、速度传感器、温度传感器、压力传感器等	传感器以被测物量命名。
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式等。	传感器以工作原理命名。
按物理现象分类	结构型传感器	传感器依赖其结构参数变化实现信息转换
	物性型传感器	传感器依赖其敏感元件物理特性的变化实现信息转换
按能量关系分类	能量转换型传感器	传感器直接将测量的能量转换为输出量的能量
	能量控制型传感器	由外部供给传感器能量，而由被测量来控制输出的能量
按输出信号分类	模拟式传感器 数字式传感器	输出为模拟量 输出为数字量

### 1.3 传感器的发展趋势

随着科学技术发展的需要，传感器的研制和生产已经提到日程上来了，“头脑（计算机）发达，感觉（传感器）迟钝”的情况再也不允许存在下去了。因此近年来传感器的地位受到广泛重视，被普遍的认为是八十年代科学研究和技术发展的一个重要方面。

传感器技术所涉及的知识非常广泛，渗透到各个学科领域。但是它们的共性是利用物理定律和物质的物理特性，将非电量转换成电量。所以如何采用新技术、新工艺、新材料以及探索新理论，以达到高质量的转换效能，是总的发展途径。

由于科学技术迅猛发展，工艺过程自动化程度越来越高，因此对测控系统的精度提出更高的要求。近年来，微型计算机组成的测控系统已经在许多领域得到应用，而传感器作为微型机的接口必须解决相容技术，根据这样一些时代特点，传感器将向以下几个方面发展：

#### 1. 高精度

为了提高测控精度，必须使传感器的精度尽可能地高，例如对于火箭发动机燃烧室的压力测量，希望测试精度能优于0.1%，对超精加工“在线”检测精度高于0.1微米，因此需要研制出高精度的传感器，以满足测量的需要。我国已研制出精度优于0.05%的传感器。

#### 2. 小型化

很多测试场合要求传感器具有尽可能小的尺寸。例如生物医学工程中颅压的测量，风洞中压力场分布的测量等等。压阻传感器的出现，使压力传感器的小型化取得重大进展。我国已有外径为2.8mm的压阻式压力传感器。

#### 3. 集成化

集成化传感器有两种类型。一种是将传感器与放大器、温度补偿电路等集成在同一芯片上，既减小体积，又增加抗干扰能力。另一种是将同一类的传感器集成在同一芯片上构成二维阵列式传感器，或称面型固态图象传感器，它可以测量物体的表面状况。

#### 4. 数字化

为了使传感器与计算机直接联机，致力于数字式传感器研究是很重要的。

#### 5. 智能化

智能传感器是传感器与微计算机结合的产物，它兼有检测与信息处理功能。与传统传感器相比它有很多特点，它的出现是传感器技术发展中一次飞跃。国外已经有商品化的智能传感器，我国也开始了智能传感器的研究工作。

### 1.4 机电模拟及双向传感器的统一理论

在非电测量中，位移，速度，加速度、力等机械量的测量占有重要地位。为了测量机械量必须采用能把机械量变换为电量的机电变换器。这不仅需要研究机和电两个方

面,而且要从机电耦合的角度去研究传感器。就是说不仅研究传感器电系统的输出特性和机械系统的输入特性,而且还要研究机和电之间的变换特性。

在线性电路中用数学描述电参量间的关系,输出对输入的响应也是用微分方程来描述的。同样,在线性机械系统中也是用同样的数学方法。具有相同类型的微分方程的不同物理系统,尽管微分方程的解所代表的物理含义不同,但其解的数学形式不依赖于方程代表的是什么物理系统。因此,任何物理系统对给定激励的响应,只要系统是用同一微分方程来描述,则它们对相同激励函数的响应特性也是相同的。能用同一类型的微分方程描述的不同系统称为相似系统。一个由电阻、电容、电感组成的电系统可以和一个由阻尼器,质量、弹簧组成的机械系统相似。

在研究机械系统时,可以充分利用相似特性进行机电模拟,这样将带来许多好处,首先可以将复杂的机械系统变成便于分析系统状态的电路图和符号。只要确定了相似的电系统的电路图和参数,就可以充分利用电路的理论,利用阻抗概念及网络理论来分析计算实际的机械系统。再者,由于电系统的电路元件易于更换,测量电压,电流都较容易,这将为模拟和试验提供很大的方便。

建立线性机械系统和电系统之间的相似性,对于处理电和机相互联系的机电系统就显得更有价值。

#### 1.4.1 变量的分类

通常变量的分类可按物理特性区分为机械量、电学量、热学量、声学量等。这种分类方法只便于区分变量的物理属性,但看不出不同种类的物理量所表现出来的共同特性。因此,研究不同种类的变量的相似特性并进行分类,对于研究机电模拟是必要的。

各类基本物理量间可以按它们在“路”中表现的形式分为通过变量和跨越变量。

只由空间或路上的一个点来确定的变量称为通过变量。例如力,电流。必须由空间和路上的两个点来确定的变量称为跨越变量。如位移、电压。一般把这两个点中的一个

表 1-2 变量的分类

系统 \ 变量	通过变量		跨越变量	
	状态变量	速率变量	状态变量	速率变量
基本关系	$y$	$\dot{y} = \frac{dy}{dt}$	$x$	$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$
平移	动量 $p$	力 $F$	位移 $x$	速度 $v = \frac{dx}{dt}$
转动	角动量 $p_r$	转矩 $M$	角位移 $\varphi$	角速度 $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
电学	电荷 $Q$	电流 $i = \frac{dQ}{dt}$	磁链 $\psi$	电势 $e = \frac{d\psi}{dt}$

点作为基准点或参考点。

还可根据变量与时间的关系划分为状态变量和速率变量，状态变量是与时间无关的变量，它可以用空间和路上的某一点或某两点间的状态来说明，如电荷，位移。速率变量是指用状态变量对时间的变化率表示的变量，如速度  $v$ ，电流  $i$ 。

按以上分类方法，机械系统和电系统各变量的分类如表1-2所示。

#### 1.4.2 机电模拟

机电模拟是建立在所研究的机械系统的微分方程和等效电路的微分方程相似的基础之上的。在线性机械系统中，能与电系统参量相对应的模拟方案可有多种，目前经常采用的两种模拟是力—电压模拟和力—电流模拟。

##### 1. 力—电压模拟

在图1-2所示的机械系统中，除激励力  $f$  外，作用在质量  $m$  上的力还有

##### (1) 惯性力

$$f_m = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

##### (2) 阻尼力（粘性阻尼）

$$f_c = cv = c \frac{dx}{dt} = c \int a dt$$

##### (3) 弹簧力

$$f_k = kx = k \int v dt = k \iint a dt dt$$

式中  $m$  —— 质量块的质量；  $c$  —— 阻尼器的阻尼系数；  
 $k$  —— 弹簧的刚度；  $x$  —— 质量块的位移；  
 $v$  —— 质量块的速度；  $a$  —— 质量块的加速度。

根据力学原理，作用在质量块上的合力为零。由于图1-2为单自由度系统，且外力与上述三个力的方向相反，合力为其代数和。

则

$$f_m + f_c + f_k - f = 0$$

这样可列出此机械系统的二阶微分方程为

$$m \frac{dv}{dt} + cv + k \int v dt = f \quad (1-1)$$

如果对图1-3的串联  $R$ 、 $L$ 、 $C$  电路列微分方程可有

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = u \quad (1-2)$$

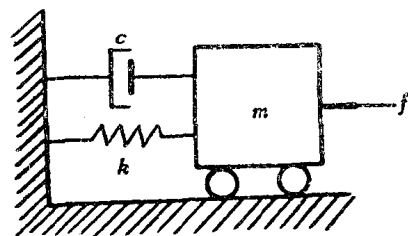


图 1-2

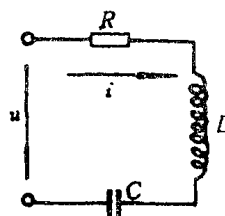


图 1-3



比较上面两个微分方程可以很容易发现二者类型相同。这说明两个系统的物理性质虽然不同，但它们具有相同的数学模型，其运动规律是相似的。相同的数学模型是模拟的基础。根据所列的微分方程很容易找出机和电相似系统中的对应项来，可列出表1-3。

表 1-3 力—电压相似系统中参量对应关系

机械系统	力 $f$	速度 $v$	位移 $x$	质量 $m$	阻尼系数 $c$	弹性系数 $\frac{1}{k}$
电系统	电压 $u$	电流 $i$	电荷 $Q$	电感 $L$	电阻 $R$	电容 $C$

因为这种相似方法是以机械系统的激励力和电路的激励电压  $u$  相似为基础的，所以称为力-电压相似。这种相似方法的特点是：

(1) 机械系统的一个质点用一个串联电回路去模拟。

(2) 机械系统质点上的激励力和串联电路的激励电压相模拟。所有与机械系统一个质点连接的机械元件 ( $m, c, k$ ) 与串联回路中的各电气元件 ( $L, R, C$ ) 相模拟。

例如，为了测量结构物的振动速度  $v_x$  (相对于大地)，常将磁电式传感器固定在结构物上，见图1-4(a)，由于传感器的外壳 (质量为  $m_2$ ) 与结构物之间具有一定的连接刚度  $k_2$  和阻尼  $c_2$ ，而传感器内部又是由惯性质量块  $m_1$  通过弹簧  $k_1$  和阻尼器  $c_1$  与外壳  $m_2$  相连的。这样的机械系统具有两部分质量  $m_1$  和  $m_2$ ，因此具有两个质点，而结构物的速度作为传感器的输入量将不必考虑结构物这个质点，其对应的相似电路就应具有两个回路，如图1-4(b)所示。机械系统的输入速度  $v_x$  对应于该模拟电路的输入电流，弹簧  $k_2$  (或

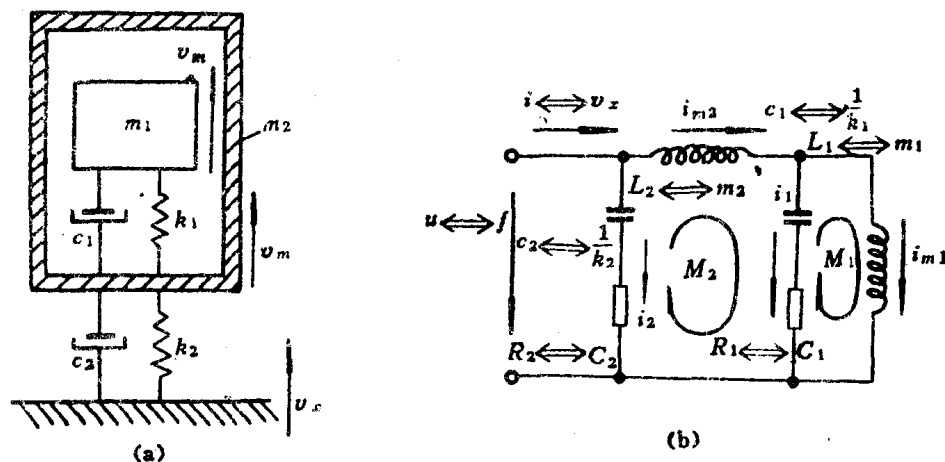


图 1-4

阻尼器  $c_2$ ) 两端的相对速度  $v_2$  是输入速度  $v_x$  与质量  $m_2$  相对于大地的速度  $v_{m_2}$  之差  $v_2 = v_x - v_{m_2}$ 。由质量  $m_2$  所决定的电回路  $M_2$  中的模拟元件应包括与质量  $m_2$  相接的所有  $k_1, c_1, k_2, c_2, m_2$  五个元件。同样在弹簧  $k_1$  (或阻尼器  $c_1$ ) 两端，即  $m_2$  相对  $m_1$  的相对速度

$v_1$  为  $v_1 = v_{m_2} - v_{m_1}$ ，为质量  $m_1$  相对于大地的速度。模拟质量  $m_1$  这一质点的串联回路元件应包括  $k_1$ 、 $c_1$ 、 $m_1$  三个元件。则可画出另一个回路  $M_1$ 。由于  $k_1$ 、 $c_1$  同时与  $m_1$ 、 $m_2$  相连，则  $c_1$ 、 $k_1$  应是两个回路的公共部分。这样很容易画出模拟电路来。为了便于计算，在模拟电路中的电阻，电容，电感可直接用机械参数来表示，质量  $m_1$ 、 $m_2$  上相对于大地的速度将由相应的电感元件  $L_1$ 、 $L_2$  中的电流  $i_{m_1}$ 、 $i_{m_2}$  来模拟。当关心的输出是质量  $m_1$  对质量  $m_2$  的相对速度  $v_0$  时，则应取  $v_0 = v_{m_1} - v_{m_2} = -v_1$  作为输出。显然它是模拟电路中  $C_1 R_1$  中的电流  $i_1$  的负值。当研究输出速度  $v_0$  的响应特性时，只需研究  $C_1 R_1$  中的响应电流  $i_1$  即可。

上面的分析说明，力-电压相似系统是将电系统的跨越变量（电压  $u$ ）模拟了机械系统的通过变量（力  $f$ ）。电系统的通过变量（电流  $i$ ）模拟了机械系统的跨越变量（速度  $v$ ），因而形成了机械系统的一个质点需用电系统一个回路来模拟。虽然它们具有同样的微分方程，但从形式上这种模拟不直观，破坏了结构上的一致性。在测试时，为了得到速度值需要在模拟电路中串入电流表测电流，这给模拟实验带来不便，当采用下面的相似系统时则不同了。不过，由于机械系统经常是以力激励，而电系统是以电压激励，所以经常采用力-电压相似系统。

## 2. 力-电流模拟

同样的机械系统可以采用图 1-5 所示的电流激励并联电路来模拟。该模拟电路的微分方程为

$$C \frac{du}{dt} + Gu + \frac{1}{L} \int u dt = i \quad (1-3)$$

与机械的二阶系统的微分方程式 (1-1) 比较，它们也是具有相同类型的微分方程。

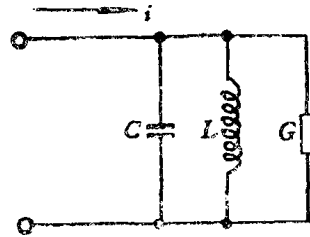


图 1-5

此相似系统是以机械系统的激励力  $f$  和模拟电路的激励电流  $i$  相似为基础的。所以称为力-电流相似系统。在这种模拟方法中，两个系统的对应相似参量如表 1-4 所示。

表 1-4 力-电流相似系统中参量对应关系

机械系统	力 $f$	速度 $v$	位移 $x$	质量 $m$	阻尼系数 $c$	弹性系数 $\frac{1}{k}$
电系统	电流 $i$	电压 $u$	磁链 $\psi$	电容 $C$	电导 $G$	电感 $L$

可从表中见机械系统的跨越变量（速度  $v$ ）与电系统的跨越变量（电压  $u$ ）相模拟，机械系统的通过变量（力  $f$ ）与电系统的通过变量（电流  $i$ ）相模拟。

机械系统中作用在一个质点上的所有通过变量的和为零，即  $\sum f = 0$ ；在电路中流入一个结点的所有通过变量电流  $i$  的和为零，即  $\sum i = 0$ 。采用力-电流模拟方法，可以将电系统的一个结点模拟机械系统的一个质点。从物理观点上看这种模拟方法比较直观，在