

刘迎春 编著



传感器原理 设计与应用

国防科技大学出版社

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检测技术与仪器专业的《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

再版前言

《传感器原理、设计与应用》一书自1989年出版以来，深受高等院校师生和广大工程技术人员的欢迎。据不完全统计有20余所院校有关专业以本书为教材或参考书，先后印刷三次，一直畅销，获得了良好社会效益。

考虑到本书已出版五年了，而近年来传感器技术又飞速发展，现利用重印的机会，对本书内容进行一次修订，以满足教学与科学研究的需要。根据近几年教学、科研的体会和广大读者的建议，作者本着更新内容，反映现代的宗旨，在此次修订中，传统传感器部分删去了内容比较陈旧和应用不广泛的章节，增加了应用较为广泛的热电式传感器一章；新型传感器部分由原来一章扩充为六章，力图全面而系统地介绍当代传感器技术的新发展与新成就，使本书有与传感器技术学科发展相适应的水平，使本书成为全面而深入地论述传感器技术的图书，奉献给广大读者。

由于水平所限，书中疏漏之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作者

1993年6月于国防科技大学

目 录

第一章 传感器概论	
1.1 传感器及其在科技发展中的重要性	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 传感器技术的发展动向	2
1.4 机电模拟及双向传感器的统一理论	4
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	19
2.1.1 线性度	19
2.1.2 灵敏度	21
2.1.3 迟滞 (迟环)	21
2.1.4 重复性	22
2.2 传感器的动态特性	22
2.2.1 动态参数测试的特殊问题	22
2.2.2 研究传感器动态特性的方法及其指标	23
2.2.3 传感器的数学模型	24
2.2.4 传递函数	25
2.2.5 频率响应函数	26
2.2.6 脉冲响应函数	26
2.3 传感器动态特性分析	27
2.3.1 传感器的频率响应	27
2.3.2 传感器的瞬态响应	31
2.4 传感器的无失真测试条件	33
第三章 传感器中的弹性敏感元件	
3.1 引 言	35
3.2 弹性敏感元件的基本特性	35
3.2.1 弹性特性	35
3.2.2 弹性滞后	36
3.2.3 弹性后效	36
3.2.4 固有振动频率	37
3.3 弹性敏感元件的材料	37
3.4 弹性敏感元件的特性参数计算	38
3.4.1 弹性圆柱 (实心或空心)	38
3.4.2 悬臂梁	39

3.4.3	扭转棒	41
3.4.4	圆形膜片和膜盒	42
3.4.5	弹簧管	43
3.4.6	波纹管	45
3.4.7	薄壁圆筒	46
第四章 电阻应变式传感器		
4.1	电阻应变片(计)的工作原理	48
4.1.1	金属的应变效应	48
4.1.2	电阻应变片的结构和工作原理	48
4.1.3	电阻应变片的横向效应	50
4.2	电阻应变片的种类、材料和参数	52
4.2.1	电阻应变片的种类	52
4.2.2	电阻应变片的材料	54
4.2.3	电阻应变片的主要参数	55
4.3	电阻应变片的动态响应特性	56
4.3.1	应变波的传播过程	56
4.3.2	应变计的可测频率的估算	57
4.4	粘合剂和应变片的粘贴技术	59
4.4.1	粘合剂	59
4.4.2	应变片粘贴工艺	60
4.5	电阻应变片的温度误差及其补偿	61
4.5.1	温度误差及其产生原因	61
4.5.2	温度补偿方法	62
4.6	电阻应变片的信号调节电路及电阻应变仪	64
4.6.1	测量电桥的工作原理	64
4.6.2	电阻应变仪	68
4.7	电阻应变式传感器	69
4.7.1	电阻应变式力传感器	69
4.7.2	应变式压力传感器	75
4.7.3	应变式加速度传感器	77
4.8	固态压阻式传感器	78
4.8.1	概述	78
4.8.2	压阻式压力传感器	78
4.8.3	压阻式加速度传感器	80
第五章 电容式传感器		
5.1	电容式传感器的工作原理及结构形式	81
5.1.1	变间隙的电容式传感器	82
5.1.2	变面积的电容式传感器	86
5.1.3	变介电常数的电容式传感器	87
5.2	电容式传感器的等效电路	88

5.3 电容式传感器的信号调节电路	89
5.3.1 运算放大器式电路	89
5.3.2 电桥电路	90
5.3.3 调频电路	91
5.3.4 谐振电路	91
5.3.5 二极管T型网络	92
5.3.6 脉冲宽度调制电路	93
5.4 影响电容传感器精度的因素及提高精度的措施	94
5.4.1 温度对结构尺寸的影响	94
5.4.2 温度对介质介电常数的影响	94
5.4.3 漏电阻的影响	94
5.4.4 边缘效应与寄生参数的影响	95
5.4.5 增加原始电容值、减少寄生电容和漏电的影响	95
5.5 电容传感器的应用	96
5.5.1 膜片电极式压力传感器	96
5.5.2 电容式加速度传感器	98
5.5.3 电容式应变计	98
5.5.4 荷重传感器	99
5.5.5 振动、位移测量仪	99
5.5.6 电容测厚仪	100
第六章 电感式传感器	
6.1 变磁阻式传感器	101
6.1.1 工作原理	101
6.1.2 等效电路	102
6.1.3 具有铁芯和小气隙的电感线圈的设计	105
6.1.4 输出特性分析	106
6.1.5 结构	109
6.1.6 传感器的信号调节电路	110
6.1.7 影响传感器精度的因素分析	112
6.1.8 电感式传感器的应用	113
6.2 差动变压器	113
6.2.1 螺管形差动变压器	113
6.2.2 差动变压的信号调节电路	120
6.2.3 差动变压器的应用	122
6.3 涡流式传感器	123
6.3.1 高频反射式涡流传感器	124
6.3.2 低频透射式涡流传感器	126
6.3.3 涡流式传感器的应用	128
第七章 压电式传感器	
7.1 压电式传感器的工作原理	129
7.1.1 压电效应	129

7.1.2	压电常数和表面电荷的计算	131
7.2	压电材料	133
7.2.1	压电晶体	133
7.2.2	压电陶瓷	133
7.3	压电式传感器的等效电路	136
7.4	压电式传感器的信号调节电路	137
7.4.1	电压放大器 (阻抗变换器)	138
7.4.2	电荷放大器	141
7.5	压电式加速度传感器	142
7.5.1	工作原理	142
7.5.2	灵敏度	143
7.5.3	频率特性	143
7.5.4	压电式加速度传感器的结构	145
7.6	压电式测力传感器	146
7.7	压电式传感器的误差	147
7.7.1	横向灵敏度和它所引起的误差	148
7.7.2	环境影响	148
7.7.3	电缆噪声	148
7.7.4	接地回路噪声	149
第八章 磁电式传感器		
8.1	磁电式传感器的工作原理	150
8.2	动圈式磁电传感器	150
8.2.1	动圈式磁电传感器工作原理	150
8.2.2	动圈式磁电传感器结构	151
8.2.3	信号调节电路和记录仪器	152
8.3	磁阻式磁电传感器	152
8.4	磁电式传感器设计要点	154
8.4.1	灵敏度 S_v	154
8.4.2	线圈电阻与负载电阻匹配问题	154
8.4.3	线圈发热检查	155
8.4.4	线圈的磁场效应	155
8.4.5	温度影响	155
8.5	磁电式传感器的误差	156
8.5.1	温度误差	157
8.5.2	永久磁铁的不稳定性误差	157
8.5.3	磁电式传感器的非线性误差	158
8.6	磁电式传感器的频率响应特性	158
第九章 热电式传感器		
9.1	热电偶	160
9.1.1	热电偶的基本原理	160

9.1.2	热电偶的类型及结构	168
9.1.3	热电势的测量及热电偶的标定	173
9.1.4	热电偶的传热误差和动态误差	176
9.2	热电阻	179
9.2.1	金属热电阻	179
9.2.2	半导体热敏电阻	183
9.3	晶体管和集成温度传感器	185
9.3.1	工作原理	185
9.3.2	集成温度传感器的典型应用	188
附录1	铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	190
附录2	镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表	192
附录3	镍铬-考铜热电偶分度表	195
附录4	铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆ 热电偶分度表	197
附录5	铂热电阻分度表($R_0=46\Omega$)	201
附录6	铂热电阻分度表($R_0=100\Omega$)	203
附录7	铜热电阻分度表($R_0=50\Omega$)	205
附录8	铜热电阻分度表($R_0=100\Omega$)	206
第十章 光电式传感器		
10.1	光电管	207
10.2	光电倍增管	208
10.3	光敏电阻	208
10.3.1	光敏电阻的工作原理	208
10.3.2	光敏电阻的结构	209
10.3.3	光敏电阻的主要参数	209
10.3.4	光敏电阻的基本特性	210
10.4	光敏二极管和光敏晶体管	212
10.4.1	工作原理	212
10.4.2	基本特性	213
10.5	光电池	215
10.5.1	工作原理	215
10.5.2	基本特性	216
10.6	光电式传感器的应用	218
10.6.1	模拟式光电传感器的应用	218
10.6.2	脉冲式光电传感器的应用	220
第十一章 智能式传感器		
11.1	概述	221
11.2	智能式传感器的构成	221
11.3	压阻式压力传感器智能化	222
11.3.1	智能式压阻压力传感器硬件结构	222
11.3.2	智能式压阻压力传感器的软件设计	222

11.3.3	非线性与温度误差的修正	222
11.3.4	实验结果与结论	224
11.4	智能式传感器的发展方向与途径	225
11.4.1	集成智能式传感器	225
11.4.2	我国研究与开发智能式传感器的途径	226

第十二章 光导纤维传感器

12.1	概论	227
12.1.1	光纤传感技术的形成及其特点	227
12.1.2	光纤传感器的光源	227
12.1.3	光纤传感器的光探测器	227
12.1.4	光纤传感器的分类	228
12.2	光导纤维以及光在其中的传输	228
12.2.1	光导纤维及其传光原理	228
12.2.2	光在普通光导纤维内的传输	229
12.2.3	光在特殊光导纤维内的传输	231
12.3	光调制技术	232
12.3.1	相位调制与干涉测量	232
12.3.2	频率调制	233
12.4	光纤位移传感器	235
12.4.1	光纤开关与定位装置	235
12.4.2	传光型光纤位移传感器	238
12.4.3	受抑全内反射光纤位移传感器	239
12.4.4	光纤微弯位移传感器	241
12.4.5	光纤干涉型位移传感器	243
12.5	光纤速度、加速度传感器	244
12.5.1	光纤激光渡越速度计	244
12.5.2	利用马赫-泽德干涉仪的光纤加速度计	245
12.5.3	倾斜镜式光纤加速度计	246
12.6	光纤振动传感器	248
12.6.1	相位调制光纤振动传感器	248
12.6.2	利用光弹效应的光纤振动传感器	251
12.7	光纤温度传感器	252
12.7.1	相位调制型光纤温度传感器	252
12.7.2	热辐射光纤温度传感器	255
12.7.3	传光型光纤温度传感器	258
12.8	光纤流量、流速传感器	260
12.8.1	光纤旋涡流量计	260
12.8.2	光纤激光多普勒测速计	262
12.9	光纤压力传感器	263

12.9.1	利用马赫-泽德干涉仪制作的光纤压力传感器	263
12.9.2	倏逝型光纤压力传感器	264
第十三章 固态图像传感器		
13.1	引言	268
13.2	固态图像传感器的敏感器件	269
13.2.1	电荷耦合器件(CCD)	269
13.2.2	电荷注入器件(CID)	272
13.2.3	电荷链式器件(BBD)	273
13.2.4	MOS式光电变换器件	273
13.3	固态图像传感器	274
13.3.1	固态图像传感器的分类	274
13.3.2	线型固态图像传感器	274
13.3.3	面型固态图像传感器	276
13.3.4	固态图像传感器的主要特性	281
13.3.5	固态图像传感器的应用	285
第十四章 气体传感器		
14.1	概述	291
14.1.1	气体传感器及气体检测方法	291
14.1.2	气体传感器的分类	291
14.2	半导体气体传感器	293
14.2.1	半导体气体传感器及其分类	293
14.2.2	主要特性及其改善	293
14.2.3	表面控制型电阻式传感器	296
14.2.4	体控制型电阻式传感器	299
14.2.5	非电阻式半导体气体传感器	301
14.2.6	半导体气体传感器的应用	302
14.3	红外吸收式气敏传感器	305
14.4	接触燃烧式气敏传感器	305
14.5	热导率变化式气体传感器	307
14.6	湿式气敏传感器	308
第十五章 湿度传感器		
15.1	引言	309
15.1.1	湿敏元件的特性参数	309
15.1.2	湿度传感器的分类	301
15.2	电解质系湿度传感器	311
15.2.1	无机电解质湿度传感器	311
15.2.2	高分子电解质湿度传感器	313
15.2.3	有机季铵盐高分子电解质湿敏元件	315
15.2.4	聚苯乙烯磺酸铵湿敏元件	315
15.3	半导体及陶瓷湿度传感器	316

15.3.1	涂覆膜型	316
15.3.2	烧结体型	317
15.3.3	薄膜型	318
15.4	有机物及高分子聚合物湿度传感器	319
15.4.1	胀缩性有机物湿敏元件	319
15.4.2	高分子聚合物薄膜湿敏元件	320
15.5	湿度传感器的应用及发展动向	321
第十六章 红外探测技术		
16.1	红外辐射的基本知识	323
16.1.1	红外辐射	323
16.1.2	红外辐射术语	323
16.1.3	红外辐射源	324
16.2	红外探测器	325
16.2.1	常见红外探测器	326
16.2.2	红外探测器的性能参数	328
16.2.3	红外探测器使用中应注意的问题	329
16.3	红外测温	329
16.3.1	红外测温的特点	329
16.3.2	红外测温原理	330
16.4	红外成像	331
16.4.1	红外成像原理	331
16.4.2	红外成像仪	332
16.5	红外分析仪	333
16.6	红外无损检测	334
16.6.1	焊接缺陷的无损检测	334
16.6.2	铸件内部缺陷探测	334
16.6.3	疲劳裂纹探测	335
第十七章 传感器的标定		
17.1	传感器的静态特性标定	336
17.1.1	静态标准条件	336
17.1.2	标定仪器设备的精度等级的确定	336
17.1.3	静态特性标定的方法	336
17.2	传感器的动态特性标定	336
17.3	测振传感器(振动测量仪器)的标定	339
17.3.1	绝对标定法	339
17.3.2	比较标定法	339
17.4	压力传感器的标定和校准	340
17.4.1	动态标定压力源	340
17.4.2	激波管标定法	341
参考文献		347

第一章 传感器概论

1.1 传感器及其在科技发展中的重要性

传感器是能感受规定的被测量（物理量、化学量、生物量等）并按照一定的规律转换成可用输出信号（一般为电量）的器件或装置。传感器有时也称为探测器或变换器。输出信号有不同形式，如电压、电流、频率、脉冲等，以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制的要求。

在自动检测与自动控制系统中，传感器处于系统之首，其作用相当于人的五官，直接敏感外界信息。因此传感器能否正确感受信息并将其按相应规律转换为所需信号，对系统质量起决定性作用，自动化的程度愈高，系统对传感器依赖性就愈大。所以国内外都将传感器列为高技术，在美、日等发达国家传感器倍受重视。

80年代人类社会由高度工业化社会进入信息社会以来，传感器地位的重要性更为突出。现代信息技术的三大基础是信息采集、传输与处理技术，即传感器技术、通讯技术和计算机技术，它们分别构成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”。形象的说，如果“感官”出了毛病，它给出的信息产生失真，那么“神经”中传送的信息本身就是错误信息，再聪明的“大脑”也是无能为力的。因此，最近十年，发达国家对传感器在信息社会中的作用有新的认识与评价。美国把80年代看作传感器时代，日本把传感器技术列为十大技术之首，原苏联的《军事航天》计划也将传感器技术列为重点发展技术。

传感器的重要性还体现在它已广泛的应用于各个学科领域。如工业自动化、农业现代化、航天技术、军事工程、机器人技术、资源探测、海洋开发、环境监控、安全保卫、医疗诊断、家用电器等。而且传感器技术对上述各领域的发展还有促进作用。

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。

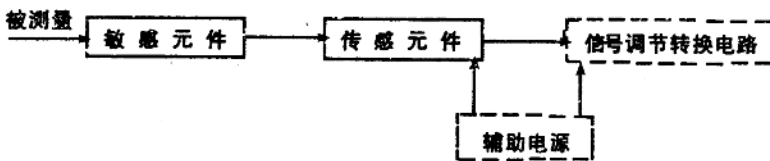


图 1-1 传感器组成方块图

敏感元件——直接感受被测量（非电量），并输出与被测量成确定关系的其它量（一般为非电量）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——又称转换元件，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。

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

测试中，应用的传感器种类繁多，不胜枚举。有的传感器可以用于测量多种参数，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	传感器以被测物理量命名
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	传感器直接将被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	输出为模拟量
	数字式传感器	输出为数字量

1.3 传感器技术的发展动向

随着科学技术发展的需要，传感器的研制与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作用受到重视。

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、化学和生物特性,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,以达高质量的转换效能,是总的发展途径。

当前,传感器技术的主要发展动向,一是开展基础研究,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺,二是实现传感器的集成化与智能化。

1. 发现新现象

利用物理现象、化学反应和生物效应是各种传感器工作的基本原理,所以发现新现象与新效应是发展传感技术的最重要的工作,是研制新型传感器的重要基础,其意义极为深远。例如日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔器件高,仅次于超导量子干涉器件,而其制造工艺远比超导量子干涉器件简单,它可用于磁成像技术,具有广泛推广价值。

2. 开发新材料

传感器材料是传感器技术的重要基础,由于材料科学的进步,人们在制造时,可任意控制它们的成分,从而可以设计制造出用于各种传感器的功能材料,例如半导体氧化物可以制造各种气体传感器,而陶瓷传感器工作温度远高于半导体,光导纤维的应用是传感器材料的重大突破,用它研制的传感器与传统的相比有突出的特点。有机材料做为传感器材料的研究,引起国内外学者极大兴趣。

3. 采用微细加工技术

半导体技术中的加工方法如氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀以及蒸镀、溅射薄膜工艺都可引进用于传感器制造,因而产生了各式各样新型传感器。例如,利用半导体技术制造出压阻式传感器,利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏、湿敏传感器,日本横河公司利用各向异性腐蚀技术进行高精三维加工,在硅片上构成孔、沟、棱、锥、半球等各种形状,制作出全硅谐振式压力传感器。

4. 研究多功能集成传感器

1989年第五届国际固态传感器会议上,日本丰田研究所开发实验室报导了同时检测 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 的多离子传感器。这种传感器的芯片尺寸为 $2.5 \times 0.5 \text{mm}^2$,仅用一滴液体,如一滴血液即可同时快速检测出其中 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 的浓度,对医院监护非常适用与方便。

催化金属栅与MOSFEI相结合的气体传感器已广泛用于检测氧、氨、乙醇、乙烯和一氧化碳等。

国内晶体管厂传感器研究所研制的硅压阻式复合传感器可以同时测量压力与温度。

5. 智能化传感器

智能传感器是一种带微处理器的传感器,它兼有检测、判断和信息处理功能。其典型产品如美国霍尼尔公司的ST-3000型智能传感器,其芯片尺寸为 $3 \times 4 \times 2 \text{mm}^3$,采用半导体工艺,在同一芯片上制作CFU、EPPOM和静压、压差、温度等三种敏感元件。

1.4 机电模拟及双向传感器的统一理论

在非电量测量中，位移、速度、加速度、力等机械量占有重要地位。为了测量这些机械量必须采用能将机械量转换为电量的传感器。这不仅需要研究机和电两个方面，而且要从机电耦合角度去研究传感器。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表达式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，但其解的数学形式并不依赖于方程所代表的物理系统。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。

表 1-2 变量的分类

系 统	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 φ	角速度 $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
电 学	电荷 Q	电流 $i = \frac{dQ}{dt}$	磁链 ψ	电势 $e = \frac{d\psi}{dt}$

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。

一、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

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

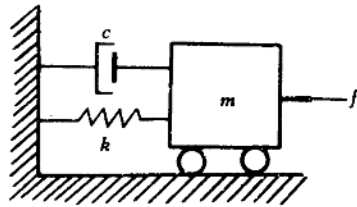


图 1-2

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

$$f_m + f_c + f_k - f = 0 \quad (1-1)$$

这样可列出此机械系统的二阶微分方程为

$$m \frac{dv}{dt} + cv + k \int v dt = f$$

如果对图 1-3 的串联 R 、 L 、 C 电路列微分方程，可有

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

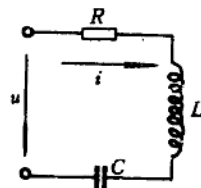


图 1-3

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，如表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 $v_1 = v_{m_2} - v_{m_1}$ ， 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。