



 AR 超媒体教材

普通高等院校电子科学技术类“十四五”重点建设教材

# 传感器技术

## (第三版)

高晓蓉 李金龙 彭朝勇 王楠 编



西南交通大学出版社



普通高等院校电子科学技术类“十四五”重点建设教材

# 传感器技术

(第三版)

高晓蓉 李金龙 彭朝勇 王楠 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书以介绍传感器应用中所必需的基本技术和技能为目标,系统讲解了传感器技术的基本理论,详细阐述了各类传感器的工作原理、结构特点和测量电路,并给出了具体应用实例。全书共分11章,第1章介绍传感器的基本概念、数学模型、提高性能的措施和标定技术;第2章至第4章介绍传统的电阻、电容和电感式传感器;第5章至第7章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器;第8章和第9章介绍光电式传感器和光纤传感器;第10章介绍生物传感器、微传感器、智能传感器等新型传感器及多传感器系统中的数据融合技术;第11章为实验。

作者2003年及2013年分别编写的《传感器技术》第一版及第二版出版后,深受广大师生的欢迎,并获得西南交通大学优秀教材奖,在全国一直畅销不衰。随着传感器技术的发展以及作者近年在传感器及检测技术方面的科研经历和教学经验的丰富,作者对本书的内容进行了大量更新和补充,使得该书内容更加新颖和实用。

本书适合作为普通高等院校电子、电气及机械类专业学生的教材以及教学参考书,也可供传感器专业的相关技术人员阅读和参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术 / 高晓蓉等编. —3版. 成都: 西南交通大学出版社, 2021.8  
ISBN 978-7-5643-8099-1

I. ①传… II. ①高… III. ①传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第131262号

---

Chuangganqi Jishu  
传感器技术  
(第三版)

高晓蓉 李金龙 彭朝勇 王楠 / 编 责任编辑 / 李华宇  
封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行  
(四川省成都市金牛区二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼 610031)  
发行部电话: 028-87600564 028-87600533  
网址: <http://www.xnjdcbs.com>  
印刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm  
印张 22 字数 549 千  
版次 2003年9月第1版 2013年2月第2版 2021年8月第3版  
印次 2021年8月第9次

书号 ISBN 978-7-5643-8099-1  
定价 49.80 元

课件咨询电话: 028-81435775  
图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 第三版前言

在信息化和数字化时代背景下，随着对传感器技术新原理、新材料和新技术研究的不断深入，新品种、新结构、新应用不断涌现，智能化、可移动化、微型化、集成化、多样化已成为其重要发展趋势。

智能传感器实现多种传感功能的集成，完成信号探测、变换处理、逻辑判断、功能计算、双向通信以及自校准、自补偿、自诊断等功能。同时，通过与人工智能技术相结合，各种基于模糊推理、神经网络、专家系统的高度智能传感器成为研究热点。在克服了节点资源限制，满足网络扩展性、容错性的要求后，无线传感网络方兴未艾。特别是随着集成微电子机械加工技术的日趋成熟，更为传感器微型化发展提供了重要技术支撑。新材料技术的突破加快了新型传感器的涌现，除半导体材料、光导纤维外，有机敏感材料、陶瓷材料、超导材料、纳米材料和生物材料推陈出新，促进了生物传感器、光纤传感器、气敏传感器、数字传感器的发展。

在 2003 年第一版、2013 年第二版的基础上，第三版教材在完善原有传统传感器知识的同时，重点补充了对新型和智能化传感器的介绍。在第 2 章电阻式传感器中增加了气敏传感器、湿敏传感器；在第 5 章压电式传感器中补充了声表面波传感器和超声传感器；在第 8 章光电式传感器中涵盖了红外传感器的内容。新增加的第 10 章新型传感器，主要介绍了生物传感器、微传感器、智能传感器的原理、应用和发展趋势，同时补充了多传感器系统中的数据融合技术。

传感器技术是一门理论性和实践性都很强的学科，为此，结合编者 20 多年的“传感器技术”教学实践经验，在第三版教材中重新梳理和补充了实验内容，包括 4 个基础演示实验、4 个半自拟实验和 4 个小组课程设计实验。在团队协作的课程设计实验中，采取了基于 PBL（基于问题/项目的学习）和 TBL（基于团队的学习）的专业课教学模式，完成从“以教师为中心”到“以学生为中心”的转变，使学生成为知识的发现者。

作为一门理工科高年级的专业课程，深度挖掘和提炼“传感器技术”课程体系中所蕴含的思想价值和精神内涵是非常有必要的。为此，新版教材中融入中国高速铁路发展中的智能检测技术，列举中国高铁名片、中国基建等大国利器实例，以“润物细无声”的方式在课程中融入课程思政的内容，在潜移默化中坚定学生理想信念、厚植爱国主义情怀。

第三版教材中另一个突出特点是采用了 AR（增强现实）技术，实现了将真实世界信息和虚拟世界信息“无缝”集成，将教材内容科学直观地以视、音、图、文等电子方式展示出来，多角度、多维度地呈现教材内容，增强了学习的互动性和趣味性。结合教材内容设计制作的 60 个 AR 超媒体数字资源（42 个动画及模型、18 个微课及视频），在采用智能终端扫描教材相应位置的图片或二维码后，会呈现出传感器模型、工作原理动画及实际应用场景，让学习者身临其境地感受教材中描述的内容，激发学习兴趣，提升学习效果。

结合新工科专业人才培养要求，教材在编排上考虑了从知识维度和认知维度满足课程教学目标要求。知识技能方面，在各类传统传感器和新型传感器学习的基础上，建立传感器的基本概念，了解传感器在机器控制系统中的重要作用，理解传感器的检测原理和结构特点，掌握传感器的测量电路和典型应用。能力培养方面，针对具体检测目标需求，能够完成对传感器的选型及检测系统设计，利用掌握的传感器知识技能实现对实际场景物理量的检测和信号处理。情操培养方面，通过学习和实践，培养学生对传感器技术的兴趣、对自然科学的热爱；在团队合作的课程设计中锻炼学生的领导力，使其领会团队协作的重要性。

本书在编写过程中参阅、借鉴了有关书籍和文献，在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢在本书编写和出版过程中给予帮助的同事。

由于编者的水平和经验有限，书中难免存在不足之处，敬请广大专家、读者批评指正。

编者

2021 年 7 月

## 第二版前言

传感器技术、计算机应用技术和通信技术是电子信息技术的三大主要组成部分。传感器技术是电子技术类、检测技术类和信息科学类的一门主要专业技术课，是现代科学技术中的一个重要领域。在当今的信息时代中，随着自动测控系统的发展，传感器作为信息捕捉的必要手段，对其依赖程度越来越大。传感器技术的发展推动了科学技术的进步，可以说，没有传感器也就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器将没有现代科学技术的迅速发展。

目前，传感器的重要性正日益为人们所认识，国内外都已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内外高校许多专业都开设了相应课程，传感器方面的教材和专著陆续问世，这些书籍在原理性与实用性、传统性与新型性，以及广度与深度上各有侧重。为适应传感器应用和发展的需要，同时达到拓宽专业面的目的，作者在多年传感器技术本科教学的基础上，结合自身的科研体会，于2003年编写和出版了这本教材。

针对近年来传感器新技术飞速发展的现状，本书在再版过程中精选内容，在不削弱传统的较为成熟的传感器基本内容的前提下，以较大篇幅充实了新型传感器的内容，特别是增加了各章节中关于传感器具体应用的实例，同时补充了两个半自拟试验的内容，要求学生独立设计和完成，以锻炼学生分析问题和解决问题的实践能力。

鉴于传感器种类繁多，涉及的学科广泛，本书的重点放在原理阐述和实际应用的介绍上，既保证必要的、简明的数学推导，详细地给出物理概念，同时结合较多的应用实例，引导学生在学习本课程后，能收到举一反三、触类旁通的效果。

本书共分10章，除绪论和第1章外，传感器各章均具有一定的独立性。第1章概述有关传感器的基本概念；第2章至第4章介绍传统的电阻、电容和电感式传感器；第5章至第7章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器的结构、工作原理及其应用等；第8章和第9章介绍光电式传感器和光纤传感器的原理、特点、应用和发展前景；第10章为实验。

本书是作者结合多年来从事传感器技术教学和科研的实践体会编写而成的。在编写过程中参阅了一些国内公开发表的有关文献，在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢在本书编写和出版过程中给予帮助的同事。

由于编者的水平和经验有限，对书中的不妥之处，敬请批评指正。

编 者

2012年12月

## 第一版前言

传感器技术（非电量测量技术）是电子技术类、检测技术类和信息科学类的一门主要的专业技术课，是现代科学技术中的一个重要领域。在当今的信息时代中，随着自动测控系统的发展，传感器作为信息捕捉的必要手段，对其依赖程度越来越大。传感器技术的发展推动了科学技术的巨大进步，可以说，没有传感器也就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器将没有现代科学技术的迅速发展。

目前，传感器的重要性正日益为人们所认识，国内外都已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内高校许多专业都开设了相应课程，传感器方面的教材和专著陆续问世，这些书籍在原理性与实用性、传统性与新型性，以及广度与深度上各有侧重。为适应传感器应用和发展的需要，同时达到拓宽专业面的目的，作者在多年传感器本科教学的基础上，结合自身的科研体会，编写了这本教材。

针对近年来传感器新技术飞速发展的现状，本书通过精选内容，在不削弱传统的较为成熟的传感器基本内容的前提下，以较大篇幅充实了新型传感器的内容。鉴于传感器种类繁多，涉及的学科广泛，不可能也没有必要对各种具体传感器逐一剖析，本书的重点放在原理阐述和实际应用的介绍上，既保证必要的、简明的数学推导，详细地给出物理概念，同时结合较多的应用实例，引导学生在学习本课程后，能收到举一反三、触类旁通的效果。

为培养、锻炼学生的实践能力，在教材中还引入了实验环节，通过实验加深对基本概念的理解，进一步掌握传感器的检测方法，提高学生分析问题和解决问题的能力。本书共编排了六个实验。为达到开拓学生视野、启发思维的目的，本书设计的实验结合了科研成果（实验二、实验五），有一定的先进性和实用性，同时突出了铁路特色（实验一、实验二）和光电技术的特点（实验五、实验六）。为锻炼学生综合运用所学知识的能力，本书设计了两个半自拟实验（实验四、实验六），要求学生独立设计和完成，最大限度地锻炼学生的实践能力。

本书共分十章，除绪论和第一章外，传感器各章均具有一定的独立性。第一章概述有关传感器的基本概念；第二章至第四章介绍了传统的电阻、电容和电感类的传感器；第五章至第七章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器的结构、工作原理及其应用等；第八章和第九章介绍光电式传感器和光纤传感器的原理、特点、应用和发展前景；第十章为实验。

本书编写过程中参阅了一些国内公开发表的有关文献，在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢在本书编写和出版过程中给予帮助的领导、教师和同学。

由于传感器是多学科知识的综合，涉及内容多、面广，而编者的水平和经验有限，书中的疏漏及不妥之处在所难免，敬请批评指正。

编 者

2003年5月

## AR 超媒体数字资源索引

序号	资源名称	资源类型	页码
1	人机系统机能对应关系	微课	1
2	电气化铁路升降弓压力特性检测原理	AR 动画	3
3	电力机车受电弓升降弓时间检测原理	AR 动画	4
4	传感器的定义	微课	7
5	结构型和物性型传感器的比较	微课	9
6	大吨位电容称重传感器	AR 动画	11
7	加速度传感器模型	AR 模型	24
8	超声波流速计	AR 动画	34
9	容栅传感器	AR 动画	36
10	闭环技术	微课	39
11	应变计的横向效应	微课	58
12	电阻应变仪	微课	75
13	环形相敏检波器工作原理	AR 动画	78
14	膜片式应变压力计	AR 动画	83
15	筒形称重传感器	微课	84
16	筒形结构的称重传感器	AR 动画	85
17	应变式扭矩传感器	AR 动画	86
18	差动式变间隙型电容传感器	AR 动画	105
19	扇形平板结构差动变面积型电容传感器	AR 动画	109
20	柱面形结构差动变面积型电容传感器	AR 动画	109
21	变介质型电容传感器	AR 动画	110
22	变压器电桥电路	微课	115
23	运算放大器式电路	微课	118
24	差动式电容压差传感器	AR 动画	125
25	电容式加速度传感器	AR 模型	125
26	变气隙式自感传感器	AR 动画	130
27	差动式 E 形结构自感传感器	AR 动画	132
28	$\pi$ 形差动变压器结构原理	AR 动画	138
29	二极管相敏检波电路	微课	142
30	电涡流传感器工作原理	微课	144

续表

序号	资源名称	资源类型	页码
31	高频反射式电涡流传感器	AR 动画	144
32	电涡流传感器测量转速	AR 动画	149
33	电涡流阵列传感器单元线圈触发方式	AR 动画	151
34	压电陶瓷的压电机理	AR 动画	160
35	压电晶片的连接方式	微课	160
36	相控阵超声传感器的结构	AR 模型	172
37	相控阵超声传感器的波阵面形成	AR 动画	173
38	相控阵超声传感器的聚焦法则	AR 动画	173
39	采用相控阵超声探伤技术的中国高速列车轮对检测设备	AR 视频	174
40	热电偶传感器接触电势形成原理	AR 动画	193
41	热电偶冷端补偿方法	微课	199
42	热电偶冷端电桥补偿法	AR 动画	200
43	霍尔传感器测量转速	AR 动画	215
44	磁敏电阻工作原理	AR 动画	216
45	磁敏二极管工作原理	AR 动画	218
46	光生伏特效应原理	AR 动画	223
47	光位置传感器工作原理	AR 动画	233
48	色敏光电传感器	微课	235
49	光电数字转速表	AR 动画	237
50	CCD 图像传感器电荷定向转移输出	微课	243
51	CCD 图像传感器定向转移过程	AR 动画	243
52	线型 CCD 图像传感器工作过程	AR 动画	245
53	CCD 图像传感器尺寸测量基本原理	AR 动画	247
54	铁路轮对外形尺寸动态检测原理	AR 视频	250
55	铁路受电弓滑板磨损动态检测原理	AR 动画	250
56	红外热成像原理检测钢轨缺陷	AR 动画	256
57	光纤微弯损耗光强调制原理	AR 动画	266
58	光纤波长调制与解调	微课	267
59	光纤位移传感器的光反射原理	AR 动画	270
60	无人驾驶概念车环境感知原理	AR 动画	303

# 目 录

绪 论	1
习题及思考题	6
第 1 章 传感器技术基础	7
1.1 传感器的基本概念	7
1.2 传感器的静态数学模型及其基本特性指标	15
1.3 传感器的动态数学模型及其动态特性指标	23
1.4 改善传感器性能的技术途径	32
1.5 传感器的标定与校准	42
习题及思考题	45
第 2 章 电阻式传感器	47
2.1 电位器式传感器	47
2.2 电阻应变计的原理及特性	55
2.3 测量电路及电阻应变仪	64
2.4 电阻应变式传感器的应用	80
2.5 气敏电阻传感器的原理及应用	87
2.6 湿敏电阻传感器的原理及应用	93
习题及思考题	100
第 3 章 电容式传感器	102
3.1 电容式传感器的工作原理和结构	102
3.2 电容式传感器的测量电路	111
3.3 电容式传感器的应用	121
习题及思考题	128
第 4 章 电感式传感器	129
4.1 自感式传感器	129
4.2 互感式传感器	137
4.3 电涡流式传感器	144
4.4 电感式接近传感器	152
习题及思考题	154

<b>第 5 章 压电式传感器</b>	157
5.1 压电效应和压电材料	157
5.2 压电式传感器的等效电路和测量电路	160
5.3 压电式传感器的应用	166
5.4 超声波传感器	168
5.5 声表面波传感器	174
习题及思考题	182
<b>第 6 章 热电式传感器</b>	184
6.1 热电阻	184
6.2 热敏电阻	188
6.3 热电偶	192
6.4 PN 结型温度传感器	202
习题及思考题	204
<b>第 7 章 磁敏式传感器</b>	206
7.1 霍尔传感器	206
7.2 磁敏电阻器	215
7.3 磁敏二极管和磁敏三极管	217
习题及思考题	220
<b>第 8 章 光电式传感器</b>	221
8.1 光电效应	222
8.2 基于外光电效应的光电器件	224
8.3 基于内光电效应的光电器件	226
8.4 新型光电传感器	233
8.5 光电式传感器的应用	235
8.6 光固态图像传感器	242
8.7 红外传感器	250
习题及思考题	257
<b>第 9 章 光纤传感器</b>	258
9.1 光纤传感器基础	258
9.2 光纤传感器的调制技术	263
9.3 光纤传感器应用举例	268
习题及思考题	271

第 10 章 新型传感器	272
10.1 生物传感器	272
10.2 微传感器	279
10.3 智能传感器	288
10.4 多传感器系统中的数据融合技术	297
习题及思考题	304
第 11 章 实验	305
11.1 基础演示实验	305
实验 1-1 电位器式传感器及对接触线抬升量的测量	305
实验 1-2 电阻应变式传感器及电阻应变仪的原理和使用	309
实验 1-3 电涡流位移传感器的原理及其静态标定方法	313
实验 1-4 光纤高低电压隔离信号传输实验	317
11.2 半自拟实验	320
实验 2-1 热电式传感器的温度自动控制实验	320
实验 2-2 光电报警实验	325
实验 2-3 热释电红外传感器探测人体	330
实验 2-4 光电式传感器测速实验	332
11.3 小组课程设计实验	334
实验 3-1 基于红外热释电传感器的人体遥感装置设计	334
实验 3-2 基于光电对射开关的列车测速装置设计	335
实验 3-3 基于温度传感器的环境智能温控设计	335
实验 3-4 基于超声传感器的智能小车避障设计	336
参考文献	337

传感器的英文是 Sensor 或 Transducer, Sensor 直译为“感觉”。

## 1. 人与机器系统的机能对应关系

我们知道,人类有五大感觉器官,即眼、耳、鼻、舌、皮肤,人类是通过这些感觉器官感知外界信息的。人脑对这些信息进行分析、处理,最后作出判断和反应,控制人类肢体的动作,这就是人体系统的组成。

对于机器系统而言,它包括传感器、计算机和执行器三部分。传感器是各种机械和电子设备的感觉器官,称为“机电五官”,用于感知外界信息。电子计算机对这些信息进行处理后,作出反应,控制各类执行器(如自动化机械及智能机器人等)。由此可以看到人与机器的机能对应关系,如图 0.1 所示,称为“机电五官”的传感器对应人类的五官,用于感知外界信息;计算机对应人类的大脑,用于分析和处理信息;而各种执行器则对应人类的肢体,完成各种操作和动作。

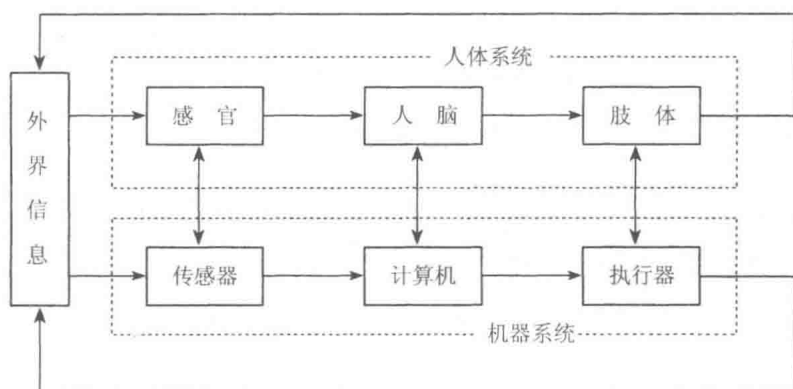


图 0.1 人与机器系统的机能对应关系



微课：人机系统  
机能对应关系

传感器作为“机电五官”,同人类的五官一样,能感觉到各种信息,诸如光、色、温度、压力、声音、湿度、气味及辐射等。而且,在很多方面,传感器的性能已经凌驾于人类五官之上。例如:它可以在人类无法忍受的高温、剧毒和放射性等恶劣环境下工作,还可以感知到人类五官所不能感知的量,如紫外线、红外线、超声波、磁场等。从这个意义上说,传感器具有人类梦寐以求的特异功能。其次,有些量虽然人的感官可以感受到,但是传感器的测量范围更宽、精度更高、可靠性更好。例如:在检测可见光方面,人眼的视觉残留约为 0.1 s,而光敏晶体管的响应时间可短到纳秒量级;人眼的角分辨率为 1',而光栅测距的精确度可达

1”；激光定位的精度在月球与地球距离（ $3.8 \times 10^5$  km）范围内可达 10 cm 以内，这些都是人类五官所远远不能及的。最后，传感器可以把人所不能看到的物体通过数据处理变为视觉图像，CT（计算机断层扫描）就是一个典型的例子，它能把人体的内部组织形貌用断层图像显示出来。

## 2. 传感器的主要应用

图 0.2 给出了传感器的主要应用领域及相对需要量。其中，横轴列出的是传感器主要应用领域，纵轴是传感器的相对需要量。相对需要量大于 70 的应用领域有：信息处理、科技测试、设备控制、机器人、汽车、环境污染、医疗、防火、光能利用等。

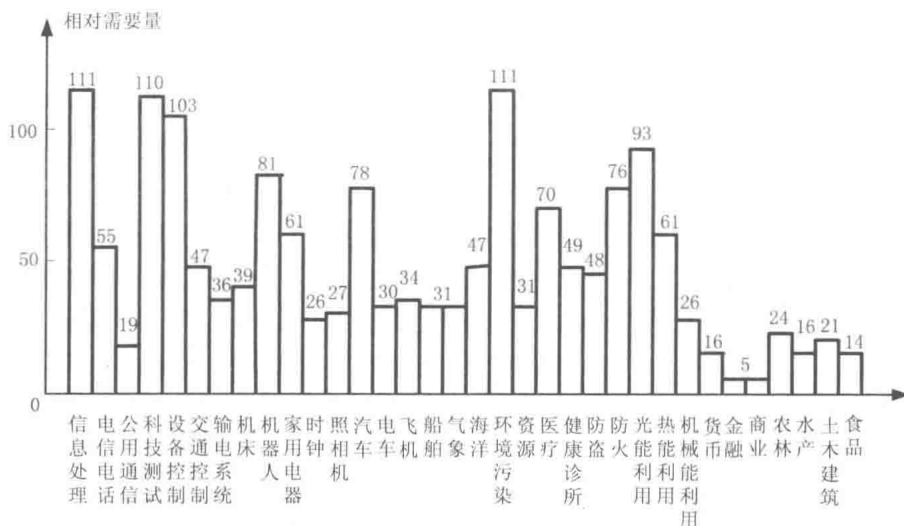


图 0.2 传感器的主要应用领域及相对需要量

由此可见，从太空探测到海洋开发，从各种复杂的工程系统到日常生活的衣食住行，几乎每一个现代化的项目，都离不开各种各样的传感器。可以这样说，没有传感器就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器就没有现代科学技术的迅速发展。

### 【例 0.1】 化工产品自动化生产过程。

如图 0.3 所示，在化工产品自动化生产过程中，首先在进料时要对大吨位的原料进行自

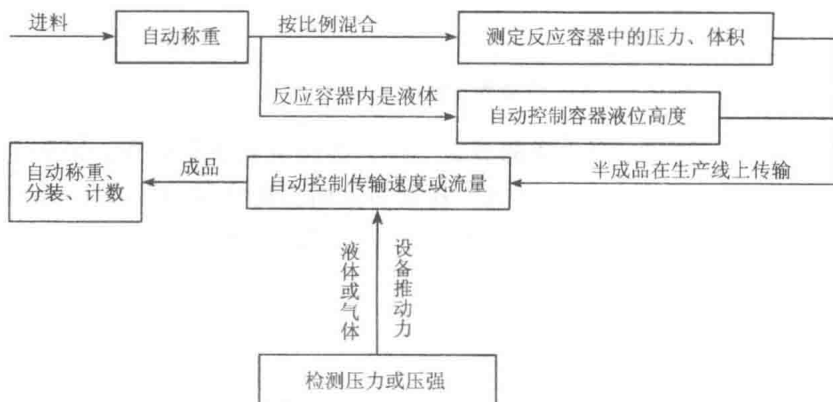


图 0.3 化工产品自动化生产过程

动称重,分析原料成分或浓度,使它们按比例混合。混合后,在反应容器中自动反应,又必须测定反应容器中的压力或体积,以保证和监测反应的顺利和正常进行。如果是液体,则需要自动控制容器液位高度。然后,半成品在生产线(管道)中传输,需要自动控制传输速度或流量,则必须使用液动或气动设备以产生推动力,因而要检测压力或压强……最后,成品进行自动分装、称重、计数等。

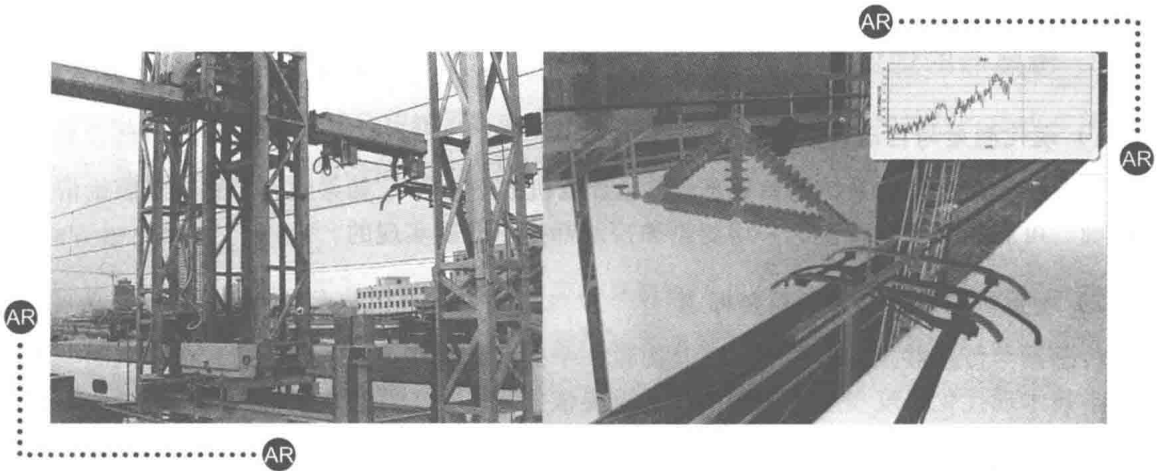
所有这些环节,都需要使用各种传感器对相应的参数进行检测和控制,使设备或系统自动、正常地运行在最佳状态,保证生产的高效率 and 高质量。

**【例 0.2】 电力机车入库受电弓状态自动检测。**

电气化铁路电力机车的牵引方式是非自给性的,电能是通过电力机车车顶受电弓滑板与接触网导线的滑动接触而取得的。因此,弓网关系是电气化铁路的主要特点之一,受电弓的性能直接影响电力机车的受流特性,因此对受电弓的检测非常必要。

图 0.4 是受电弓压力特性的检测原理。图 0.4 (a) 中,机车入库后,检测设备自动定位到受电弓的位置,通过安装在装置前端的应变式压力传感器,在匀速升弓和降弓过程中检测压力的变化,并给出随高度位置变化的升弓、降弓压力曲线和压差变化。而图 0.4 (b) 是列车通过式受电弓压力检测原理。

扫描下图可浏览 AR 资源——电气化铁路升降弓压力特性检测原理。



(a) 定点式升降弓压力特性检测原理

(b) 通过式受电弓压力检测原理

图 0.4 受电弓压力特性的检测原理

图 0.5 是受电弓升降弓时间的检测原理。系统采用反射式光电传感器,自动检测受电弓从升弓位置到降弓位置的降弓时间以及从降弓位置到升弓位置的升弓时间。

**【例 0.3】 航天器。**

为使航天器按预先设计好的轨道正常运行,需控制航天器的飞行参数和姿态,并监测发动机的工作状态,这就需要利用多种传感器进行检测,将传感器获取的各种信号送到各类测量仪表和自动控制系统进行自动调节,使航天器正常运行。