



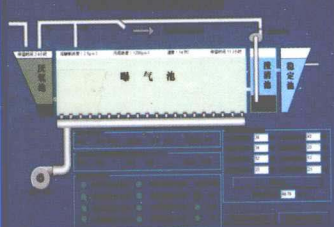
SHUIGONGYE YIBIAO ZIDONGHUA

水工业仪表自动化

中国仪器仪表学会 组织编写 ●

吕武轩 主 编 ●

燕泽程 程 立 于广平 副主编 ●



化学工业出版社

水工业仪表自动化

中国仪器仪表学会 组织编写

吕武轩 主 编

燕泽程 程 立 于广平 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书首先介绍了水质监测的基础知识, 详尽介绍了各种水质监测仪器的原理、结构、使用经验与维护要点, 之后阐述了经典与现代自动控制论基础知识、各种控制系统构成规则以及水处理典型工艺流程常用自动控制系统分析与设计要点, 尤其侧重介绍了在现有水处理工程中大量采用的 PID 控制器特性及参数整定技巧, 同时介绍了近年来发展的模糊控制、神经网络控制、无模型自适应控制、智能控制等先进控制算法的基本原理及其在水处理工艺过程优化控制中的应用, 为实现将水污染防治工程与设施同测控技术装备融为一体、以信息化带动工业化的“两化合一”奠定技术基础。

本书将水质监测仪器和自动控制理论与水处理工艺过程有机结合, 有助于提高该行业技术人员的专业知识和技术水平。

图书在版编目 (CIP) 数据

水工业仪表自动化/吕武轩主编. —北京: 化学工业出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-122-11185-2

I. 水… II. 吕… III. 水质监测-环境监测仪器
IV. X853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 077112 号

责任编辑: 徐 娟

装帧设计: 史利平



出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 32 $\frac{1}{4}$ 字数 892 千字 2011 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

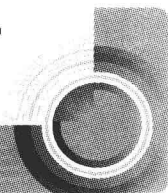
购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 148.00 元

版权所有 违者必究



工欲善其事，必先利其器。我国著名科学家钱学森指出：“发展高新技术，信息技术是关键；信息技术包括测量技术、计算机技术和通讯技术，测量技术是关键和基础。”

我国是缺水国家，以水资源综合利用及污染防治与工程修复为核心形成的水工业正在兴起。建设现代化水工业，实现工艺过程仪表化、自动化是重要的技术保障体系之一。欲达此目的，需要一大批既通晓水质监测技术装备和自动化理论基础与实践技术、又谙熟水处理工艺机理的两栖人才。然而，迄今为止尚无正规院校设置此类专业。目前我国从事该行业技术工作的人员均由其他专业改行，不同程度地需要增补相关专业知识，改变现有知识结构，以适应水工业今后必然呈现的高速发展的形势。因此，编写一部将经典控制和现代控制基本知识与水质监测仪器原理及应用技术有机结合、构成水工业自动化系统的实用性图书，作为已经从事和有志从事水工业过程仪表自动化技术工作者提高专业水平的引导性读物，实属迫在眉睫之社会义务。

本书由中国仪器仪表学会组织，邀请从事现代水质监测仪器应用与维修工作的资深工程师编写。书中详尽介绍了水质监测仪器原理、结构、使用经验与维护要点，阐述了经典与现代自动控制论基础知识、各种控制系统构成规则以及水处理典型工艺流程常用自动控制系统分析与设计要点，尤其侧重介绍了在现有水处理工程中大量采用的 PID 控制器特性及参数整定技巧，同时介绍了近年来发展的模糊控制、神经网络控制、无模型自适应控制、智能控制等先进控制算法的基本原理及其在水处理工艺过程优化控制中的应用，为实现将水污染防治工程与设施同测控技术装备融为一体、以信息化带动工业化的“两化合一”奠定技术基础。

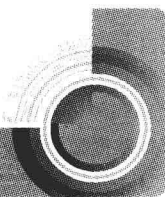
本书尝试将水质监测仪器和自动控制理论与水处理工艺过程有机结合，对仪器科学与技术 and 自动化两大学科向新兴领域拓展、促进水工业技术进步有着积极的推动作用；对培养水工业仪表自动化专业人才、提高从业人员学识和技术水平有一定的现实意义。

由于本书侧重反映目前水处理工程中应用测控技术设备的现状和需求，所以涉及非线性控制系统、线性离散控制理论、状态空间法等比较深奥和抽象的内容，以及流程工业常用的温度、压力、流量、液位测量仪表，过程控制广泛采用的变频调速器、可编程控制器、调节阀一类工具性设备均未介绍，有兴趣的读者可参阅相关专著。

本书编写人员如下：第 1 篇，程立、杨家建、田丽茹、肖玮、邹舒觅、付伟业、黄伟明、顾涟琦、勾博、冉新宇、武云志、范宝峰、许祎、瞿国栋、陈长龙、陈锦新、魏建海、胡诞康、刘跃、侯传佳、吕武轩；第 2 篇，吕武轩、张晓辉、白志刚、郝栓菊 Uwe Karg、李俊英、程立、方闻、勾博；第 3 篇，于广平、苑明哲、滕琳琳、王景杨。本书的主要参编单位有美国 HACH（哈希）公司北京代表处和中国科学院沈阳自动化研究所。

在编写过程中，承蒙张钟华院士、中国仪器仪表学会副理事长兼秘书长吴幼华研究员、夏德海教授的热心关注与大力支持，中国仪器仪表学会科学仪器学术工作委员会副主任燕泽程研究员在本书组编过程中予以各方面的帮助和指导，北京电子科技职业学院教师张晓辉博士及环境测控技术服务中心的李松、李达飞、王晓凡为本书的资料收集和水处理典型工艺模型控制系统的设计、制作以及实验研究做了大量工作，在此一并致谢！

限于编者学识水平和实践经验，书中难免出现不当之处，还望广大读者不吝赐正。



第 1 篇 水质监测仪器及水处理工程用仪器设备

第 1 章 检测技术基本知识

1

1.1 水处理过程中的监测仪器	1	1.5.1 电磁法	6
1.2 检测仪器性能与技术指标	2	1.5.2 光学法	9
1.3 检测仪器的分类	4	1.5.3 微波法	16
1.4 检测仪表的组成	5	1.5.4 超声法	17
1.5 常用检测仪器的原理	6		

第 2 章 在线式水质监测仪器

19

2.1 引言	19	2.3.8 磷酸盐在线分析仪	141
2.1.1 概述	19	2.3.9 钠离子在线分析仪	147
2.1.2 在线水质分析仪的发展	20	2.3.10 在线硅分析仪	151
2.1.3 在线水质分析仪器在水处理工业中 的应用	20	2.3.11 六价铬在线分析仪	154
2.2 在线式水质常规参数检测仪	21	2.3.12 离子在线分析仪	158
2.2.1 pH 检测仪	21	2.3.13 余氯/总氯在线分析仪和二氧化氯 在线分析仪	168
2.2.2 ORP 检测仪	42	2.3.14 联氨在线分析仪	180
2.2.3 电导率检测仪	46	2.3.15 碱度在线分析仪	183
2.2.4 在线式溶解氧检测仪	53	2.3.16 电极法臭氧在线分析仪	190
2.2.5 浊度/悬浮物浓度检测仪	64	2.3.17 硬度在线分析仪	193
2.2.6 多参数水质分析仪	86	2.3.18 水中油在线分析仪	201
2.3 在线式水质分析仪	91	2.3.19 水质自动采样器	207
2.3.1 化学需氧量在线分析仪	91	2.4 水质自动监测站	210
2.3.2 生化需氧量在线分析仪	105	2.4.1 水质自动监测站的组成	210
2.3.3 总有机碳在线分析仪	110	2.4.2 水质自动监测站建设的技术 要求	212
2.3.4 氨氮在线分析仪	117	2.4.3 方案设计	213
2.3.5 硝酸盐氮/亚硝酸盐氮在线分 析仪	131	2.4.4 数据采集-处理-控制-显示-通讯 系统	218
2.3.6 总氮在线分析仪	133		
2.3.7 总磷在线分析仪	137		

第 3 章 水处理工程专用仪器和设备

220

3.1 水处理工程专用仪器	220	3.1.1 液位(水位)测量仪表	220
---------------------	-----	------------------------	-----

3.1.2	流速/流量测量仪表	224	3.1.7	沉降速度-上清液浊度检测器	251
3.1.3	流动电流检测器	242	3.2	执行机构	252
3.1.4	污泥界面仪	244	3.2.1	计量泵	252
3.1.5	污染指数 SDI 测试仪	248	3.2.2	蠕动泵	257
3.1.6	荧光示踪剂浓度监测仪	250			

第 2 篇 自动控制系统及其在水处理典型工艺中的应用

第 4 章 自动控制系统基本知识

259

4.1	概述	259	4.3.2	判定方法	270
4.2	基本知识	260	4.3.3	稳定性判据	271
4.2.1	自动控制系统的组成	260	4.3.4	稳定余量	273
4.2.2	反馈控制系统的分类	263	4.3.5	稳态偏差	274
4.2.3	反馈控制系统性能评价	264	4.4	动态品质分析	276
4.2.4	微分方程	264	4.4.1	品质指标	276
4.2.5	传递函数	264	4.4.2	分析方法	277
4.2.6	频率特性	265	4.5	系统的校正	280
4.2.7	单位阶跃响应	269	4.5.1	串联校正	280
4.3	稳定性	270	4.5.2	局部反馈校正	282
4.3.1	定义	270			

第 5 章 自动控制系统

284

5.1	概述	284	5.6.2	PID 控制器参数整定	305
5.2	自动控制系统的分类	285	5.7	PID 性能改善	307
5.3	自动控制系统的品质评价	286	5.7.1	概述	307
5.3.1	静态特性与动态特性	286	5.7.2	自整定或自调谐	308
5.3.2	自动控制系统的过渡过程和品质指标	288	5.8	常规控制系统	309
5.4	控制对象的数学模型	290	5.8.1	简单控制系统	309
5.4.1	静态(或稳态)数学模型	290	5.8.2	复杂控制系统	310
5.4.2	动态数学模型	291	5.9	先进控制	320
5.4.3	软测量技术及软测量模型	296	5.9.1	概述	320
5.5	控制器的控制规律	300	5.9.2	预测控制	321
5.5.1	开关式控制	300	5.9.3	推断控制	323
5.5.2	比例(P)控制	300	5.9.4	双重控制	325
5.5.3	积分(I)作用和比例+积分(PID)	302	5.9.5	解耦控制	326
5.5.4	微分(D)作用和比例+微分(PD)	302	5.9.6	自适应控制	328
5.5.5	比例+积分+微分(PID)	304	5.9.7	滞后补偿控制	330
5.5.6	离散比例积分微分控制	304	5.9.8	智能控制	332
5.6	控制器参数的经验整定	305	5.10	其他类型控制模式	335
5.6.1	PID 控制系统动态品质评价	305	5.10.1	无模型自适应控制技术	335
			5.10.2	通用模型控制	341
			5.10.3	内模控制	341
			5.10.4	模型差动极值调节系统	343

6.1 概述	347	6.7.2 空调循环冷却水系统平衡计算	382
6.2 pH 控制	351	6.7.3 循环冷却水质测控技术要求	383
6.2.1 概述	351	6.7.4 循环冷却水系统现行水质测控方案 比较	384
6.2.2 工业废水中和处理过程 pH 模糊 控制	352	6.7.5 中央空调循环冷却水水质测控成套 设备	384
6.2.3 污水处理中和反应过程 pH 控制	353	6.7.6 工业循环冷却水水质测控系统	386
6.2.4 湿法烟气脱硫装置中的 pH 控制	353	6.8 次氯酸钠/二氧化氯自动加药及余氯 控制	386
6.2.5 阴阳床再生污水 pH 控制	356	6.8.1 次氯酸钠消毒	387
6.2.6 乙烯装置急冷水 pH 先进控制	357	6.8.2 二氧化氯消毒	387
6.2.7 油田污水处理 pH 模糊控制	358	6.8.3 常用加药方式	388
6.2.8 酸性工业废水中和处理 pH 控制	360	6.8.4 自动加药应用实例	388
6.2.9 工业废水电絮凝一体化装置 pH 控制	362	6.9 锅炉炉水协调磷酸盐-pH 值控制	392
6.3 ORP 控制	364	6.9.1 工艺要求	392
6.3.1 ORP 控制 SBR 曝气风量	364	6.9.2 数学模型	392
6.3.2 泳池水处理自动加药	364	6.9.3 投加药剂原则	393
6.3.3 含氰、铬电镀废水处理 ORP 控制	365	6.9.4 自动加药方案	393
6.4 电导率(电阻率)控制	365	6.10 多参数控制及先进控制	394
6.4.1 循环冷却水水质监测与浓缩倍数 自动保持系统	365	6.10.1 废水处理工艺过程神经网络智能 控制	394
6.4.2 锅炉供水化学净化过程极值 控制	366	6.10.2 生物电极脱氮工艺模糊控制	396
6.5 混凝投药控制技术及应用	368	6.10.3 用化学法强化生物除磷的优化控制	398
6.5.1 现有技术	368	6.10.4 氨氮与硝酸盐氮控制	400
6.5.2 定量分析絮体形状及混凝剂加注量 自动调节	370	6.10.5 由磷酸盐和总磷分析仪构成的 优化控制系统	405
6.5.3 沉降速度-澄清液浊度检测器与 絮凝剂优化投加系统	372	6.10.6 污泥龄自动控制系统	405
6.5.4 絮凝剂投加量最佳控制	373	6.10.7 污泥回流控制	407
6.6 溶解氧自动控制系统	375	6.10.8 分段曝气溶解氧控制	408
6.6.1 锅炉供水除氧剂自动投加与溶解氧 控制系统	375	6.10.9 碳源投加控制	408
6.6.2 曝气过程溶解氧自动控制系统	375	6.11 反渗透装置控制	409
6.7 循环冷却水自动加药系统	382	6.11.1 概述	409
6.7.1 概述	382	6.11.2 反渗透电控系统技术要求	410
		6.12 PLC、DCS、FCS、SCADA、WSN	411
		6.12.1 PLC、DCS、FCS	411
		6.12.2 SCADA	413
		6.12.3 现场总线在污水处理厂控制系统中 的应用	418
		6.12.4 无线传感器网络的现状与趋势	419

第3篇 工程应用

7.1 污水处理过程建模	423	7.1.1 基于机理模型的出水水质指标	423
--------------------	-----	---------------------------	-----

7.1.2 基于软测量模型的出水水质指标	429	7.2.3 溶解氧仿人智能控制应用	437
7.1.3 入水水量及水质预测模型	432	7.2.4 污泥浓度回路控制	438
7.2 污水处理过程优化控制	433	7.3 污水处理过程异常工况诊断	439
7.2.1 入水流量优化控制	433	7.3.1 污泥膨胀预测	439
7.2.2 溶解氧浓度优化控制	434	7.3.2 工业毒水诊断	441

第8章 水工业仪表自动化技术发展趋势

443

8.1 污水处理厂综合自动化系统	443	8.3.1 故障诊断技术应用的必要性	452
8.1.1 城市污水处理厂存在的问题	443	8.3.2 故障诊断技术简介	453
8.1.2 综合自动化系统的体系结构	444	8.3.3 污水处理工艺流程故障诊断方法	454
8.1.3 综合自动化系统功能描述	444	8.3.4 故障诊断专家系统	455
8.2 无线技术在污水处理行业的应用	447	8.4 智能仪表在污水处理厂的应用	457
8.2.1 污水处理厂有线通讯方式存在的问题	447	8.4.1 智能仪表的特点	458
8.2.2 无线技术在污水处理厂的应用	448	8.4.2 智能仪表的结构	458
8.2.3 无线技术在城市污水处理系统的应用	451	8.4.3 智能仪表的发展趋势	459
8.3 污水处理过程故障诊断	452	8.4.4 智能仪表在污水处理厂的使用	459

附录 部分在线式水质监测仪器

461

参考文献

504

第 1 篇

水质监测仪器及水处理 工程用仪器设备

第1章 检测技术基本知识

检测是涵义更为广泛的测量。检测技术及仪器设备是实现过程自动化的基础，也是进行现代化管理的技术保障体系之一，没有检测就谈不上科学管理。本篇侧重介绍水质监测仪器和水污染防治与工程修复工程专用测控设备。

1.1 水处理过程中的监测仪器

检测的任务在于将自然界或人造系统中的有用信息转换为与之存在确切对应关系的、易于观测的物理量，继而用传感元件将物理量转变为易于处理、显示、传输和进一步利用的电量，即实施传统概念上的非电量电测技术，完成这种非电量电测过程的所有部件的集成体称为仪器仪表。

水处理工程属于流程工业，流程工业通用的检测仪器，如温度、压力/压差、流量/流速、液位/水位等测量仪表几乎都适用于水处理工程。除此之外，水处理工程还需要很多专用的监测仪器仪表，特别是在线式水质监测与分析仪表，不仅水环境监测和污水排放监控需用，水污染防治与工程修复也同样需要，例如：水常规五参数（pH/ORP、溶解氧 DO、浊度/颗粒物浓度 SS、电导率和水温）检测仪，在线式化学需氧量 COD、生化需氧量 BOD、氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、硝酸盐氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、总磷 TP、总氮 TN、总有机碳 TOC 等分析仪，还有更多品种的专用检测仪器专门服务于水处理工程，如污水流量计、污泥参数（浓度、流量、界面、沉降）检测仪、混凝/絮凝效果检测仪等。各类仪器所采用的测量原理也涉及诸多学科，包括物理、化学（含电化学、生物化学）、物理化学、数学、微生物学、植物学、土壤学、生态学、仿生学、毒理学等。制作成功、形成产品的仪器仪表也是微电子、微机械、网络技术、信息技术、控制技术等多种现代高新技术的缜合成就。一言以蔽之，从事水处理专用测控技术装备的研发、生产、使用、维修等各项工作的工程师们需要掌握相当多的专业知识，才能适应日新月异的水工业现代化发展需求。



1.2 检测仪器性能与技术指标

关于仪器仪表名词术语很多,这里只介绍常用参数的基本含义。

仪表的性能指标是评价仪表性能与质量优劣的主要依据,也是正确选择和使用仪表,实现准确测量所必须具备的知识和应该掌握的内容。众所周知,如若仪表选型和使用不当,即使选用了性能好、质量高的仪表,也不一定能得到准确的测量结果。因此,了解仪表的性能指标对于测量工作者来说是十分重要的。

仪表的性能指标从技术、经济和使用三个方面考虑。

① 技术层面的指标。如测量范围(量程、跨度)、分辨率、精度、重复性、稳定性、可靠性、外形尺寸、重量、使用寿命等。

② 经济层面的指标。如功耗、价格、寿命周期等。

③ 使用层面的指标。如人-机界面,环境(温度、湿度、气压、振动、冲击、电磁场)适应性,免维护性、安全防护性能、智能化程度等。

显然,上述性能指标的划分也是相对的。在未加说明的情况下,性能指标一般指仪表在规定的工作条件(如参比条件)下而言。仪表正常工作时,对于电源电压、频率,温度、湿度,振动、冲击,外界电磁场,安装位置等条件,按照仪表的出厂规定,有一定的要求。下面对仪表的一些重要性能指标分别介绍。

(1) 测量范围与量程。在正常工作条件下,将待测量的被测参数变化范围称为测量范围,其最低值和最高值分别叫做测量范围的下限和上限。测量范围是用下限值至上限值来表示的,例如,某种粉尘浓度仪的测量范围是 $0\sim 20\text{mg}/\text{m}^3$,某温度计的测量范围是 $-20\sim +200^\circ\text{C}$ 。

量程是指测量范围的上限与下限的代数差,记为 L ,如上述温度计的量程 L 为 220°C 。

给出测量范围便知上、下限及量程。若只给出量程,则无法判断仪表的测量范围。

(2) 基本误差。基本误差是指仪表在规定的工作条件(参比工作条件)下产生的误差。仪表的基本误差有如下四种形式。

① 绝对误差。仪表的指示值 x 与被测量的真值 x_0 之间的代数差值称为仪表显示值的绝对误差,用符号 δ 表示。

$$\delta = x - x_0 \quad (1-1)$$

式中,真值 x_0 可以是被测量公认的约定真值,也可由标准仪表所测得的结果。 δ 说明了仪表的显示值偏离真值的程度,可表征仪表测量的精确度。

在校准或检定仪表时,常采用比较法对被检仪表进行校准,即对于同一被测量,将标准表的示值 x_0 (真值)与被校表的示值 x 进行比较,二者之差就是被检表显示值的绝对误差。如果该误差是一恒定值,则属于系统误差,可能是仪表在非正常工作条件下使用而产生的,或其他原因所造成的附加误差。此时,仪表的显示值应加以修正,修正后的显示值才可视为被测量的实际值 x_0 。

$$x_0 = x - \delta = x + c \quad (1-2)$$

式中, c 称为修正值或校正量。修正值与显示值的绝对误差的数值相等,但符号相反,即

$$c = -\delta = x_0 - x \quad (1-3)$$

标准表经计量器具检定机构由高一级的标准表校准,检定结果附带有显示值修正表,或修正曲线。

$$c = f(x)$$

② 相对误差。仪表显示值的绝对误差 δ 与被测量真值 x_0 的比值称为仪表显示值的相对



误差 r , r 常用百分数表示。

$$r = \delta / x_0 \times 100\% = (x - x_0) / x_0 \times 100\% \quad (1-4)$$

显示值的相对误差比其绝对误差能更好地说明测量的精确程度。如：有两组测量值，第一组 $x_0 = 1000^\circ\text{C}$, $x = 1005^\circ\text{C}$, $\delta = +5^\circ\text{C}$, $r = 0.5\%$ ；第二组 $x_0 = 100^\circ\text{C}$, $x = 105^\circ\text{C}$, $\delta = +5^\circ\text{C}$, $r = 5\%$ 。由此可见，两组的绝对误差虽然都为 $+5^\circ\text{C}$ ，但第一组的相对误差小得多，显然第一组测量比第二组精确。但在评价仪表质量时，利用相对误差作为衡量标准也很不便，因为使用仪表时，一般不应测量过小的量（如靠近测量范围下限的量），而多用在 $2/3$ 量程范围，故用下面的引用误差来评价仪表质量更为方便。

③ 引用误差。仪表显示值的绝对误差 δ 与仪表量程 L 的比值称为仪表显示值的引用误差 q ，常以百分数表示。

$$q = \delta / L \times 100\% \quad (1-5)$$

比较式(1-5)及式(1-4)可知，在式(1-5)中，虽然分母用量程 L 代替了真值 x_0 ，但分子为绝对误差 δ ，仍与仪表的显示值 x 有关。为此取引用误差的最大值，既能克服上述不足，又可表征仪表的测量精度。

④ 引用误差的最大值（或称最大引用误差）。在规定的工作条件下，当被测量平稳增加和减少时，在仪表全量程所取得的诸显示值的引用误差中，其绝对值最大者；或诸显示值的绝对误差中，绝对值最大者与量程的比值的百分数称为仪表的最大引用误差，符号为 $q_{\max}$ ，可表示为

$$q_{\max} = (|\delta|_{\max} / L) \times 100\% = (|x - x_0| / L) \times 100\% \quad (1-6)$$

最大引用误差是仪表基本误差的主要形式，故也常称为仪表的基本误差。它是仪表的主要质量指标。

(3) 允许引用误差与精度等级

① 允许引用误差。简称允许误差，符号为 Q ，表明仪表在出厂时所规定的引用误差的允许值，即在出厂检验时，诸显示值的最大引用误差不能超过该允许值，记为

$$q_{\max} \leq Q \quad (1-7)$$

必须指出的是： q 、 $q_{\max}$ 及 Q 均是以百分数来表示的，而且比较时往往取误差绝对值。

② 精度等级。工业仪表常以允许的引用误差作为判断精度等级的尺度。人为规定：取允许引用误差百分数的分子作为精度等级的标志，即用允许引用误差去掉百分号（%）后的数字来表示精度等级，其符号是 G , $G = Q \times 100$ 或 $Q = G\%$ 。

各种仪表的精度等级的数字是有规定的，工业仪表常见精度等级如表 1-1 所列。

表 1-1 工业仪表常见精度等级

精度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
允许引用误差 Q	0.1%	0.2%	0.5%	1%	1.5%	2%	2.5%	5%
引用误差 $ P $	$\leq 0.1\%$	$\leq 0.2\%$	$\leq 0.5\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1.5\%$	$\leq 2\%$	$\leq 2.5\%$	$\leq 5\%$

一般情况下，1 级精度表示仪表的允许误差的绝对值 $|Q| = |\pm 1\%| = 1\%$ ，也可省去绝对值符号，简记为 $Q = 1\%$ ；当记为 $Q = \pm 1\%$ 时，表示允许误差的变化范围为 $-1\% \sim +1\%$ ，以此类推。尤需指出的是：精度等级的标志只说明引用误差允许值的大小，并不意味着该仪表在实际测量时就一定出现这么大的误差。换言之，1.0 级仪表所显示的测量值不一定包含着 $\pm 1\%$ 的误差，应该说在规定的条件下使用该仪表时，其绝对误差最大值超过量程的 $\pm 1\%$ ，在实际测量过程中，单次测量值的误差就是用仪表的精度等级来估计的（一般取 3δ 作为极限误差）。由此可见，仪表的精度等级是反映仪表性能的最主要的质量指标。

(4) 灵敏度与分辨率



① 灵敏度。由仪表的输入变化所引起的输出变化 Δy 与输入变化量 Δx 的比值定义为仪表的灵敏度。换言之, 仪表的灵敏度是单位输入量的变化所引起的输出量的变化。上述定义中, 输入与输出的变化量均指两者在两个稳态值之间的变化量而言。灵敏度用符号 S 表示, 则可记为

$$S = \Delta y / \Delta x \quad (1-8)$$

由于输入和输出变化量 Δx 和 Δy 都是有量纲的, 所以 S 也是有量纲的。如果输入与输出是同类量, 则 S 可理解为放大倍数。因此, 仪表的灵敏度比放大倍数的含义要广得多。

线性刻度仪表的灵敏度为一常数, 非线性刻度仪表的灵敏度为一变量。在全刻度范围内各处 S 值不同。

仪表的灵敏度与仪表的精度等级相适应, 且灵敏度略高于精度。然而, 过高的灵敏度不仅不能提高测量精度, 反而会使显示值不稳定。

② 分辨率。分辨率为仪表显示值能够响应与分辨的最小输入变化量, 又称为灵敏度限或鉴别阈。

灵敏度与分辨率都是仪表性能的重要指标。灵敏度越高, 分辨率也越高。

(5) 变差(回差)。仪表处在正常工作条件时, 令被测量逐渐增加(上行)和逐渐减少(下行), 对于仪表的同一显示值, 上述两次测量值的代数差的绝对值, 即上行读数与下行读数代数差的绝对值称为变差。设上行读数为 x_{Up} , 下行读数为 x_{Dn} , 则变差 v 记为

$$v = |x_{Up} - x_{Dn}| \quad (1-9)$$

根据定义, 若上行误差为 δ_{Up} , 下行误差为 δ_{Dn} , 则变差又可表示为

$$v = |\delta_{Up} - \delta_{Dn}| \quad (1-10)$$

如果仪表的变差除以量程的结果在允许误差范围之内, 则此仪表合格。

变差又称回差, 反映了在仪表检验时记录的上行曲线和下行曲线呈现的不重合的现象。形成原因可能是仪表内某些元件有能量的吸收, 例如弹性变形的滞后现象、磁性元件的磁滞现象; 化学反应不完全或不对称; 活动部件相互之间的摩擦、间隙等。

(6) 漂移。在正常工作条件下, 保持输入信号不变时, 输出信号随时间或温度的缓慢变化称为漂移。随着时间的漂移简称为时漂; 随着环境温度变化而产生的漂移简称为温漂。漂移的程度直接反映仪表的稳定性能。

(7) 可靠性。衡量仪表可靠性的综合指标是有效度, 定义为

$$\text{有效度} = \text{平均无故障工作时间} / (\text{平均无故障工作时间} + \text{平均修复时间})$$

有效度越接近 1, 仪表工作越可靠。

(8) 响应时间。仪表的响应时间定义为当输入阶跃变化(从一种稳态跳变到另一稳态)时, 仪表输出(显示值)也从一个稳态过渡到另一稳态值历经的时间。理论上, 输出完全到达新稳态值需要历经很长的时间, 不便于工程应用。所以只考查到达 90% 稳态值所历经的时间即可, 记做 T_{90} 。

1.3 检测仪器的分类

仪器仪表是多种科学技术的综合产物, 品种繁多, 使用广泛, 而且不断更新。按使用目的和用途来分, 主要有量具量仪、车船仪表、航空仪表、导航仪器、驾驶仪器、无线电测试仪器、载波微波测试仪器、地质勘探测试仪器、建材测试仪器、地震测试仪器、测绘仪器、水文仪器、计时仪器、农业与生态仪器、教学仪器、医疗仪器、环保仪器、化工仪表、热工仪表、石油仪表等。

属于机械工业产品的仪器仪表有工业自动化仪表、电工仪表、光学仪器, 分析仪器、实验室仪器、气象仪器、海洋仪器、机械量测量仪表等。

按功能、检测控制对象、结构、原理等仪器仪表还可再分为若干子类。如工业自动化仪



表按功能可分为检测仪表、显示仪表、调节仪表和执行器等，其中，检测仪表按被测物理量又分为温度、压力、流速/流量、液位/物位、黏度、重度、聚合度测量仪表以及成分分析仪表（见表 1-2）；温度测量仪表按测量方式又分为接触式测温仪表和非接触式测温仪表，接触式测温仪表又可分为热电式、膨胀式、电阻式、半导体式，非接触式温度检测仪又分为红

外式温度计和热像仪。

表 1-2 被测量分类

分类		示 例		分类		示 例			
电 量	电 参 量	电流、电荷、电压(电动势、静电电位)、电功率、频率、相位等		物性和成分量	酸碱度、盐度、浓度、黏度、密度、粒度、浊度、纯度、离子浓度、湿度、水分等				
	电路参量	电阻、电感、电容、品质因数、增益等			状态量	颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量(表面粗糙度、白度等)			
非 电 量	热 工 量	温度、热量、比热容、热分布		非 电 量		磁学量	磁通、磁密、磁场强度、磁导率等		
		压力、压差、真空度			声学量		声压、声波、噪声、声阻抗等		
		流量、流速、风速					光学量	照度、光强、光通量、亮度等	
		物位、液位、界面						射线	辐射能、吸收剂量、剂量当量、照射量等
	机 械 量	尺寸(长度、厚度、角度)、位移、形状力、应力、力矩				生理医学			心血管参数、呼吸道参数、血液参数、神经系统参数
		重量、质量							
转速、线速度									
		加速度、振动							

从宏观上可分为两大类：过程测控仪表和实验室分析测试仪器。前者指需要固定安装在现场的仪表；后者指大型精密分析测试仪器、实验室台式仪器以及便携式仪器。

过程测控仪表可分为两类：一次仪表和二次仪表。一次仪表指传感器、探测器和变送器一类直接感测非电量信息的部分；二次仪表指信号放大-调理、显示、记录、计算、控制以及数据通讯部分。

1.4 检测仪表的组成

一台仪表需要由完整的检测系统构成。检测系统由若干具有一定功能的环节组成，原理如图 1-1 所示。各环节的功能如表 1-3 所列。

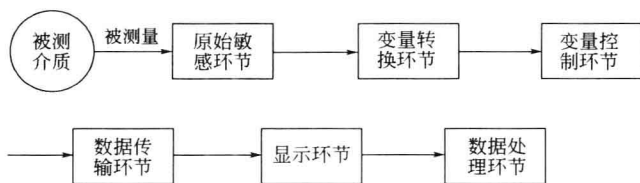


图 1-1 检测系统原理

表 1-3 检测系统组成环节的功能

环节	功 能
原始敏感环节	直接从被测介质获取有关被测量的信息,同时产生一个与被测量成一定函数关系并适于测量的输出量
变量转换环节	将原始敏感环节的输出做进一步变换
变量控制环节	保持变量物理性质不变的前提下,改变量的数值
数据传输环节	将信号由一处传输至另一处
显示环节	将经变换的被测量显示出来,供观察
数据处理环节	对信号进行运算和加工处理

1.5 常用检测仪器的原理

1.5.1 电磁法

由于电量便于检测、转换、处理、传输和显示,所以大多数检测仪器仪表把被测的非电量信息转换为电磁信号(电势、电荷、电流、电容、电阻、电感、磁通密度、磁场强度、导磁率等),再进一步转换成易于利用的电动势或电流。

(1) 电阻法检测。随被检测非电量参数而变化的常用电阻的规律和特征见表 1-4。

表 1-4 几类常用电阻随非电量变化的规律

类别	基本公式	说 明
导体电阻	$R = \rho \frac{l}{S}$ 式中,R 为电阻,Ω;ρ 为电阻率,$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;$l$ 为导体长度,m;S 为导体截面积,mm^2	(1) 随长度 l 变化:变阻器 (2) 随截面积 S 变化:碳堆电阻 (3) 随 ρ 、 l 、 S 变化:应变电阻 (4) 由温度引起 ρ 变化:热电阻
半导体电阻	$\rho = \frac{1}{en\mu}$ 式中,ρ 为半导体电阻率,$\Omega \cdot \text{cm}$;e 为电子电量,C;n 为载流子浓度,$1/\text{cm}^3$;μ 为迁移率,$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	(1) 热敏电阻: $R = ae^{-b/T}$ (2) 压敏电阻: $\Delta R/R = C_1 \epsilon + C_2 \epsilon^2 + C_3 \epsilon^3 + \dots$ (3) 磁敏电阻: $\Delta \rho/\rho = A^2 B^2 \mu^2$ (4) 光敏电阻:与光通量、波长有关 (5) 气敏电阻:与气体成分、浓度有关 (6) 湿敏电阻:与湿度有关
电解质溶液电阻	$R = \frac{\delta L}{\lambda_t CS}$ 式中,R 为溶液电阻,Ω;L 为电极间距离,cm;S 为极板面积,cm^2;λ_t 为温度为 t 时的电导,$\text{cm}^2/(\Omega \cdot \text{mol})$;$C$ 为溶液浓度,mg/L;δ 为电解质质量,g/mol	浓度稍高的溶液有各自不同的规律曲线

注: ϵ —应变变量; $\Delta R/R$ —电阻相对变化; $\Delta \rho/\rho$ —电导率相对变化; a 、 b 、 A 、 C_1 、 C_2 、 C_3 —与材料有关的常数; B —磁通密度。

利用导体电阻随温度而变化的特性可以制成温度传感器,最常用的铂电阻(Pt100/Pt1000)和铜电阻是传统的测温元件,导体的电阻随着温度的升高而增加,具有正温度系数,需要一定的响应时间,电阻变化与温度基本呈线性关系;半导体(PN结)也可利用来测量温度,其阻值随着温度的升高而降低,具有负温度系数,响应时间短,但呈非线性特征。常用金属热电阻的温度特性见表 1-5。

表 1-5 铂、铜、镍热电阻的温度特性

材料	铂	铜	镍
温度特性	$0 \sim 660^\circ\text{C}$ $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ $-190 \sim 0^\circ\text{C}$ $R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3]$	$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3)$	非线性

注: R_0 为 0°C 时电阻值; R_t 为 $t(^\circ\text{C})$ 时电阻值; t 为温度; A 、 B 、 C 为常数,不同材料在不同温度范围内不同。

向热电阻通以电流,使之发热,或以间接加热的方式使电阻体的温度高于周围温度,此时若周围参数(周围介质的流动速度、导热状态)的变化能引起温度的变化,则可构成测量相关参数的仪器,如热线风速计、热式质量流量计、热导式气体分析仪等。

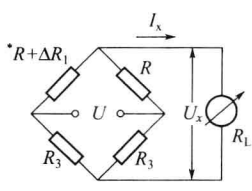
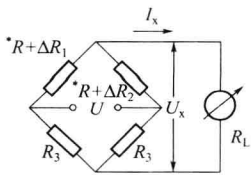
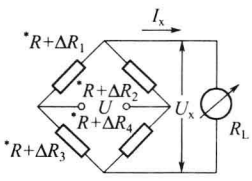


利用电阻值的变化来检测其他参数的仪器在原理和结构上都比较简单,且受电磁场类的干扰较小。对于一些可引起电阻值有较大变化范围的检测对象,可以获得相对大的输出量,但会存在不灵敏区和噪声信号;对于那些引起电阻值变化范围较小的检测对象,传感器的测量精度和灵敏度较高、线性好,但易受温度等环境条件影响,需要有补偿措施。

电阻型传感器在工业上获得了广泛的应用,如测量温度、压力、流量/流速、物位、位移、力、加速度以及气体化学成分分析。

将与各种非电量对应的电阻变化转换成更便于利用的电信号(电压、电流),需要应用适合的测量电路。最常用的是桥式电路。典型桥式电路见表1-6。

表1-6 常用桥式电路

型 式	计 算 公 式
单 臂 变 化 	$I_x = \frac{U \Delta R_1}{2R_L(2R + \Delta R_1) + 2R(R + \Delta R_1) + R_3(2R + \Delta R_1)}$ 当 $\Delta R_1 \ll R$ 时 $I_x = \frac{\Delta R_1 / R}{4R_L + 2R + 2R_2} U$ (1) $I_x = f(\Delta R_1)$ 为线性 (2) 灵敏度 $\frac{dI_x}{dR} = \frac{U/R}{4R_L + 2R + 2R_3}$
半 桥 	当 $\Delta R_1, \Delta R_2$ 均 $\ll R$ 时: $I_x = \frac{U \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} \right)}{4R_L + 2R + 2R_3}$ 若 $\Delta R_2 = -\Delta R_1$ 时 (1) $I_x = f(\Delta R_1)$ 为线性 (2) 输出量和灵敏度均为单臂的2倍
全 桥 	当 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ 均 $\ll R$ 时: $I_x = \frac{U \left(\frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4}{R} \right)}{4(R_L + R)}$ 若 $-\Delta R_2 = -\Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R_1$ 时 (1) $I_x = f(\Delta R_1)$ 为线性 (2) 输出量和灵敏度均为单臂的4倍(当单臂的 $R_3 = R$ 时)

注:1.表中计算 I_x 的公式乘上 R_L 即得输出电压 U_x 的公式。

2.桥路供电电压可以是直流,也可以是交流。直流供电时,电路简单,响应速度快,显示仪器简单易得,但易受交流干扰;交流供电时,放大电路简单,无零漂,输出为交流调制信号,不易受工频干扰,但反应速度慢,要用专门的测量仪表,对传输线和平衡电路要求严格。

(2) 电容法。电容器由两块极板和电介质夹层构成,电容量 C 与极板面积 S 、极板间距 d 、电介质的介电常数 ϵ 之间的关系为

$$C \propto \frac{\epsilon S}{d} \quad (1-11)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

式中, ϵ_r 为相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 1/(3.6\pi) = 0.0885 \text{ pF/cm}$ 。

被测非电量可通过改变式(1-11)中 ϵ 、 S 、 d 三个参数之一,即可用测量电容的线路来检测。

测量电容的常用电路包括不平衡电桥电路、脉冲电路、频率转换电路等。

电容式差压变送器和电容式液位/物位计在水处理工程中常被采用。

(3) 电感法。当线圈的导磁介质的磁导率 μ 不随电流而变化的前提下。线圈的自感 L 是其中流过单位电流时所产生的全部磁链数。两个线圈之间的互感 M 是线圈2中所匝链到



的由线圈 1 的单位电流所产生的磁链数。

$$L_1 = \frac{\psi_{11}}{I_1} \quad (1-12)$$

$$L_2 = \frac{\psi_{22}}{I_2} \quad (1-13)$$

$$M = \frac{\psi_{21}}{I_1} = \frac{\psi_{12}}{I_2} \quad (1-14)$$

式中, I_1 和 I_2 分别为线圈 1 和线圈 2 中流过的电流; ψ_{11} 和 ψ_{22} 分别为线圈 1 和线圈 2 中所产生的全部磁链数; ψ_{21} 为线圈 2 匝链到的由线圈 1 的电流产生的磁链, ψ_{12} 为线圈 1 匝链到的由线圈 2 的电流产生的磁链。

利用电感法检测非电量时的测量电路与电容法所用测量电路类似, 包括各种类型的交流电桥和利用 L 影响频率的谐振回路。

(4) 电势法。电势法检测是通过某些物理效应将被测非电量直接变换为电动势, 再由相应的测量电路进一步处理, 从而实现对非电量的检测。

将被测非电量直接变换为电动势的方法很多, 常用的方法如下。

① 利用电磁感应效应产生交流电动势。由电磁感应定律可知, 下述情况将产生电动势。

a. 与回路交链的磁通发生变化时, 回路内将产生感应电动势 (变压器工作原理)。

b. 处于磁场中的线圈或导体与磁场发生相对运动而切割磁力线时, 则在线圈或到体内产生感应电动势 (发电机工作原理)。

② 利用热电效应产生电动势 (热电势)。两种不同材料的导体或半导体连接成闭合回路, 若两个接点处于不同的温度环境, 回路内将产生电动势, 称为热电势。此两种材料组成的联合体称为热电偶, 两种材料分别称为热电偶的正极和负极。热电偶置于基准温度 t_0 (如 0°C) 的场所的一端称为冷端或参比端; 置于温度为 t 的场所的一端称为热端或测量端。当冷端和热端存在温度差时, 热电偶便产生热电势, 热电势的大小与两端的温差成正比。

③ 利用晶体的压电效应产生电动势。某些由离子或离子团构成的不导电或半导电晶体在外加机械压力作用下会在晶体表面产生束缚电荷, 这种现象称为压电效应。当外力去除后, 电荷自然消失; 与此现象相应, 在外加电场的作用下, 压电晶体会产生形变, 此现象称为逆压电效应。在弹性限度内, 形变与外加电场强度呈线性关系, 变形的符号 (拉伸或压缩) 由外加电场方向确定。

具有压电特性的晶体除石英、酒石酸钠等单晶外, 还有人工制造的多晶材料——压电陶瓷, 它在高温烧结后, 经高压电场进行极化处理, 内部由细微单晶整齐排列而成。

利用晶体的压电效应可以将晶体表面所受的压力或重力变化转换成静电位或振荡频率等电量的变化, 如将非电量转变成引起微弱的压力或重力的变化, 压电晶体便成为检测该非电量的传感元件。微量天平、粉尘仪、某些气体组分分析仪等的传感部分就是压电晶体及辅助部分。

逆压电效应则用来作为超声波换能器, 将由电子电路产生的超声频率转换成机械能而在不同介质中传播, 实现超声检测, 如超声波流量计、超声波液位/物位计、超声波污泥界面计、超声波厚度计等。

④ 利用晶体的热释电效应产生电动势。某些晶体 (如具有唯一极轴的晶体) 在均匀受热 (或冷却) 时, 晶体两端会出现电荷, 此现象称为晶体的热释电效应。常用热释电晶体为硫酸三甘肽 (TGS), 主要用于红外探测, 其特点是能在室温下工作, 能探测室温或低于室温的黑体辐射的大于 $10\mu\text{m}$ 的红外辐射。

(5) 磁性检测

① 物质的磁性。从物质结构来看, 磁性的产生是由于有些原子核的正电荷旋转会产生



磁矩-核磁矩；核外电子在轨道上不停运动产生轨道磁矩；电子自身旋转产生自旋磁矩。根据这些磁矩对外磁场的影响，可把物质分成抗磁体（磁矩相互抵消，对外呈现微弱磁性）、顺磁体（磁矩不完全互相抵消）和铁磁体（由于相邻原子间的交换力，一定范围内的自旋方向趋于一致，形成原子团-磁畴）。

② 工业检测利用的磁效应

a. 热磁效应。顺磁性气体的导磁率 μ 随着温度的上升而下降的现象称为热磁效应。利用热磁效应检测混合气体中氧含量的分析仪（热磁氧量仪）是一种传统的在线式气体分析仪器，还可以用来检测温度和定点控温，控温灵敏度高且稳定。

b. 铁磁材料的磁弹性效应。铁磁材料的磁弹性效应有磁致伸缩效应及其逆效应。磁致伸缩效应是材料的磁畴在外磁场增加时，不仅方向趋向外磁场，磁畴大小也随之变化，从而引起材料的尺寸的改变。在交变磁场的作用下，材料由伸缩引起机械振动，振动频率与外加交变磁场同频，这一特性被用来制作超声波换能器。

c. 铁磁材料经热处理和工艺处理后磁性发生变化。碳钢零件经淬火、低温回火、渗碳、氰化等工艺处理后，随着处理层厚度增加，导致铁磁材料的磁性变化，通过测量磁性变化程度可检测工艺处理效果。

d. 核磁共振效应。处于均匀磁场 H_0 中的原子核，其自旋轴以固有频率并以 H_0 为轴而运动。当核受到垂直于 H_0 方向的同频电磁波作用时，发生共振，原子核吸收电磁波能量而跃迁到其他能级。核自选轴方向发生变化的这一现象称为核磁共振。核磁共振可用于分析晶体结构、物质的化学结构等，核磁共振成像技术已成为重要的医疗手段。

1.5.2 光学法

光学法是以光的波动性和粒子性为基础的非接触式检测技术，具有高精度、高分辨率和快速响应等一系列优点。

1.5.2.1 概述

交变电磁场以有限速度在空间中传播称为电磁波。所有电磁波在真空中传播的速度都相同，即 $C=3\times 10^8\text{m/s}$ 。其间的差异仅在于它们的特征量——波长 λ 或频率 ν ，因此，波的产生、性质及鉴定方法各异。按照波长或频率的大小将电磁波排列成图表，称为电磁波谱（如图 1-2 所示）。

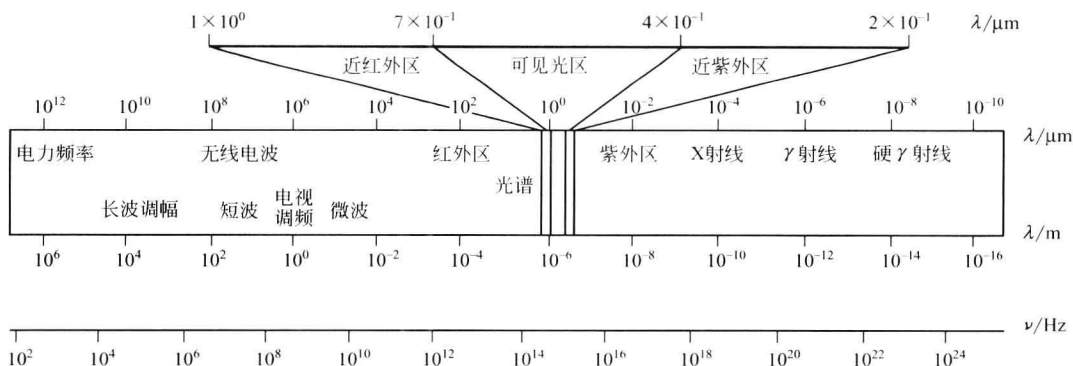


图 1-2 电磁波谱

在电磁波谱中，波长介于 $0.05\sim 1000\mu\text{m}$ 之间的部分称为光辐射，波长为 $0.76\sim 0.4\mu\text{m}$ 之间的部分称为可见光辐射，即可见光；在可见光的红色区域外、波长介于 $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ 之间的光辐射称为红外线；在可见光的紫色区域外、波长介于 $0.4\sim 0.05\mu\text{m}$ 之间的光辐射