

高等院校信息技术规划教材

传感器与电测技术

刘焕成 编著



清华大学出版社

高等院校信息技术规划教材

传感器与电测技术

刘焕成 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍传感器与电测技术。全书共 12 章。第 1~2 章从自动控制系统的分析入手,引出传感器的定义及作用。再从测量延伸到有效的测量结果全过程中所遇到的问题,提出误差的概念、减小误差的方法及误差的处理等数学问题。第 3 章、第 4 章讨论传感器的特性、性能指标及制造传感器的材料、工艺,并简要介绍传感器命名及分类的国家标准。第 1~4 章属于基础篇。第 5~11 章占本书的主要篇幅,主要介绍各类传感器的原理、结构、测量电路、性能分析和应用实例。第 12 章为与本课程配套的课内实验指导。

本书可作为高等院校电子信息工程、自动化、机电工程、道路交通控制等各专业传感器与电测技术等课程的教材或参考书,也可作为传感器应用领域的工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

传感器与电测技术/刘焕成编著. —北京:清华大学出版社,2017

(高等院校信息技术规划教材)

ISBN 978-7-302-46732-8

I. ①传… II. ①刘… 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(2017)第 048637 号

责任编辑:袁勤勇 张爱华

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市少明印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:23

字 数:530 千字

版 次:2017 年 5 月第 1 版

印 次:2017 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00 元

产品编号:073284-01

前言

foreword

随着现代科学技术的发展,世界已进入数字时代。日新月异的信息技术已深入各行各业,触及社会每个成员。与社会生产和物质生活密切相关的计算机技术、网络与通信技术、自动检测与控制技术、集成电路设计与制作工艺、信号采集与处理技术将给人们带来高效的生产率、便利的生活条件及优美的视觉和听觉上的享受。

在体验和享受科学技术的成果之时,人们容易忘记一个在科学技术发展中扮演重要角色的技术内容,即传感器。传感器之所以容易被人遗忘,是因为与以上所提到的计算机、网络与通信等技术相比,它是幕后而非前台的;说传感器是科学技术发展中的重要角色,原因在于传感器是一切自动化、智能系统的物理基础和首要环节,相当于这些系统的感觉器官。当然,我们知道,没有传感器的自动化、智能系统,就如同人失去眼睛和耳朵等感觉器官一样,将失去其所有功能。因为没有传感器对被测量的精确可靠的测量,系统后续工作从信号转换、信息处理直到控制,都成了无源之水。因此,传感器无疑是现代信息技术的重要支柱之一。包括信息的采集、传输、处理、存储和应用等几个方面的现代信息技术,再扩展到微电子技术、计算机技术、自动控制技术等专业的大型系统,都离不开传感器。

传感器技术可追溯到人类有目的的生产的时代,并一直伴随着科学技术的进步而发展,并将一直伴随着科学技术的发展而发展。

传感器技术既是古老的,又是全新的。随着材料科学、集成电路技术的发展,传感器技术将得到长足的进步。传感器技术水平是衡量一个国家基础科学发展水平的标尺之一。传感器产品设计、研发、制造及应用是极具前途和竞争力的行业。

现代传感器的发展与物理学、材料科学、电子技术、计算机科学的发展紧密相关。传感器是跨学科的交叉性科学技术,由于涉及内

容广泛,所以各种传感器技术书籍和教材所讨论的重点或角度略有不同。本书兼顾传感器的原理和传感器信号调理两大内容,希望对从事传感器研发和应用的读者有一定的帮助。

编著者

2017年1月

目录

Contents

第 1 章 从控制系统谈起	1
1.1 测量、检测与控制系统	1
1.1.1 测量与检测	1
1.1.2 传感器的定义	2
1.1.3 传感器的组成	2
1.1.4 有源和无源传感器	3
1.2 传感器在检测系统中的作用与地位	3
1.2.1 传感器的作用	3
1.2.2 传感器的地位	7
1.3 传感器的分类及技术特点与学习策略	8
1.3.1 传感器的分类	8
1.3.2 传感器的技术特点与学习策略	10
1.4 传感器发展方向预测	11
习题与思考题	12
第 2 章 测量误差及处理方法	13
2.1 检测系统误差分析方法	13
2.1.1 误差的基本概念	13
2.1.2 误差的表示方法	15
2.1.3 测量仪器的准确度等级	16
2.2 误差的分类和处理	19
2.2.1 误差的分类	19
2.2.2 误差的处理	21
习题与思考题	31
第 3 章 传感器的特性与性能指标	32
3.1 传感器的静态特性与性能指标	32
3.1.1 概述	32

3.1.2	传感器的静态特性的数学模型	33
3.1.3	传感器的静态特性的性能指标	33
3.2	传感器的动态特性与性能指标	43
3.2.1	传递函数	43
3.2.2	一阶和二阶的系统动态响应特性及指标	45
3.2.3	系统的串联与并联、传递函数的分解	56
3.3	传感器的其他特性	58
	习题与思考题	61
第4章	传感器的材料及加工工艺	63
4.1	制造传感器使用的材料	63
4.1.1	金属材料	63
4.1.2	半导体材料	63
4.1.3	陶瓷敏感材料	64
4.1.4	石英敏感材料	66
4.1.5	金属氧化物及合金材料	66
4.1.6	高分子敏感材料	67
4.1.7	其他敏感材料	68
4.2	传感器制造技术与工艺	69
4.3	传感器命名法及代码	74
4.3.1	传感器命名法	74
4.3.2	传感器代码标记方法	76
	习题与思考题	80
第5章	电阻式传感器	81
5.1	应变计	81
5.1.1	应变与应力	81
5.1.2	应变计工作原理	83
5.1.3	应变计分类	85
5.1.4	应变计应用举例	87
5.1.5	电阻式传感器输出信号调理电路之直流电桥	89
5.2	热敏电阻器	102
5.2.1	温标	102
5.2.2	热敏电阻概述	105
5.2.3	热敏电阻 R/T 关系的线性化	114
5.2.4	热敏电阻的应用	116

5.3 热电阻	119
习题与思考题	130
第6章 半导体电阻式传感器	132
6.1 气敏传感器	132
6.1.1 概述	132
6.1.2 电阻式半导体气敏传感器的应用	134
6.2 电阻型半导体湿敏传感器	139
6.2.1 湿度的定义	139
6.2.2 相对湿度传感器的主要参数	139
6.2.3 湿度计与湿度传感器器件	140
6.3 光敏电阻	146
习题与思考题	152
第7章 变电抗式传感器	153
7.1 自感式传感器	153
7.1.1 工作原理	153
7.1.2 输出特性	154
7.1.3 测量电路	156
7.1.4 自感式传感器的特点	159
7.2 变压器式传感器	160
7.2.1 工作原理与结构	160
7.2.2 输出特性	161
7.2.3 LVDT 的测量电路	162
7.3 电容式传感器	168
7.3.1 可变电容器的启示	168
7.3.2 电容式传感器的结构与输出特性	170
7.3.3 电容式传感器的等效电路	174
7.3.4 电容式传感器的测量电路	175
7.3.5 电容式传感器应用实例	181
习题与思考题	184
第8章 有源传感器	186
8.1 热电偶	186
8.1.1 热电效应	186
8.1.2 常用热电偶	189

8.1.3	热电势信号的传输	195
8.1.4	热电势信号的放大与调理	199
8.2	压电式传感器	204
8.2.1	压电效应及压电材料	204
8.2.2	压电方程	207
8.2.3	压电式传感器测量电路	210
8.2.4	压电式传感器的应用	213
8.3	光电式传感器	218
8.3.1	光敏二极管	218
8.3.2	热释电传感器	223
	习题与思考题	229
第9章	磁电式传感器	230
9.1	霍尔式传感器	230
9.1.1	霍尔效应	230
9.1.2	霍尔元件结构性能参数	232
9.1.3	霍尔元件信号调理	234
9.1.4	霍尔式传感器的应用	238
9.2	电流、电压互感器	240
9.2.1	电流互感器	240
9.2.2	电压互感器	242
9.2.3	利用霍尔元件测量功率	243
	习题与思考题	248
第10章	数字与集成传感器	249
10.1	光栅传感器	249
10.1.1	光栅的结构及工作原理	249
10.1.2	光栅传感器的组成	251
10.2	编码器	254
10.3	集成传感器	256
10.3.1	模拟集成传感器	256
10.3.2	数字集成传感器	259
	习题与思考题	270
第11章	交通传感器	271
11.1	环形线圈车辆检测器	271
11.1.1	电涡流式传感器	271

11.1.2	环形线圈车辆检测器	278
11.2	地磁车辆检测器	281
11.2.1	磁敏电阻	281
11.2.2	地磁车辆检测器原理及应用	283
11.3	超声波车辆检测器	286
11.3.1	超声波及其物理性质	286
11.3.2	超声波传感器	288
11.3.3	超声波传感器的应用	291
11.3.4	超声波测速及其应用	293
11.3.5	超声波车辆检测器	298
11.4	微波车辆检测器	299
11.4.1	概述	299
11.4.2	微波车辆检测器	299
11.4.3	雷达测速仪	300
11.5	视频交通检测系统	301
11.5.1	图像传感器	302
11.5.2	视频交通检测系统	306
11.6	压电带式交通传感器	309
11.6.1	压电薄膜交通传感器	309
11.6.2	压电薄膜交通传感器的铺设方法	311
11.6.3	车辆轮轴距的检测方案	312
11.6.4	动态称重系统设计	314
	习题与思考题	322
第 12 章	课内实验	323
实验 1	压力传感器静态特性测试与数据处理	323
实验 2	K 型、J 型热电偶测温实验	324
实验 3	环形线圈车辆检测器模拟应用	326
实验 4	仪表放大器的制作与性能测试	329
实验 5	数字集成温度传感器测温	331
实验 6	热敏电阻线性化前后线性度对比	332
实验 7	压电式加速度传感器信号的采集与处理	333
实验 8	压电薄膜交通传感器车辆重量信息采集	334
附录 A	标准正态分布表	337

附录 B t 分布表	339
附录 C 传感器产品与标记代码对照表	341
附录 D Pt100 铂电阻 R/t 分度表	346
附录 E Pt1000 铂电阻 R/t 分度表	348
参考文献	354

从控制系统谈起

1.1 测量、检测与控制系统

1.1.1 测量与检测

测量的定义：测量是利用各种装置对被测量进行定性和定量的过程，是变换、放大、比较、显示、读数等环节的综合。

相关概念：测试是测量与试验的简称。

检测的定义：检测是以确定被测量的值或获取被测结果为目的的一系列操作。

检测是广义上的测量，检测的基本内涵是将被测量与同种性质的标准进行比较，以确定被测量的量值或鉴别其属性。

在定量检测中，被测量 x 与标准量(测量单位) u 之间的关系为

$$x = nu \quad (1-1)$$

式中： n 表示比值，为一有量纲的纯数，并含有测量误差(误差是测量中不可避免的瑕疵)。

检测的结果用途很多，依检测的目的而定。

1. 计量

计量与检测一样都是测量。计量是用高精度等级的标准器具，对被测样品进行考核性质的测量，通常具有非实时、离线和标定的性质；检测则是指生产、试验现场利用合适的检测仪器或检测系统对被测对象进行的实时、连续的测量。

标定(通常指静态标定)是在一定的标准条件下，利用一定等级的设备对测试系统进行多次往复测试的过程。

系统指用来完成一个或多个功能所需多个元件、子系统和部件的组合。

2. 鉴别

鉴别指对不同的物质在性质上加以识别的过程，如对气体种类的识别。鉴别属于检测中的定性分析的层次。

3. 过程监测与控制

监测是对被测量进行实时、连续测量的过程。

控制系统是一个带有反馈装置的动力学系统。控制系统能自动连续地检测被控量,并求出偏差,进而根据偏差的大小或正负极性进行控制,以达到减小或力图消除偏差的目的。

偏差:从宏观上讲,偏差是指控制结果与控制目标的差值;从微观上讲,偏差是指控制结果与控制目标的偏差信号。

检测(或检测系统)是传感技术发展到现在一定阶段的产物。在工程上,需要由传感器与多个功能模块组合在一起,构成检测系统,以完成信息的获取任务。本书重点讨论的内容就是传感器原理及使传感器成为检测系统有效的信号源的技术问题。

1.1.2 传感器的定义

国家标准《传感器通用术语》中对传感器定义如下:“能感受(或响应)规定的被测量并按照一定规律转换成有用信号输出的器件或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号的转换元件以及相应的电子线路所组成。”

按本书的狭义理解,传感器是将被测量转换为电信号这类器件或装置的总称。

根据应用场合的不同,传感器也被称为变换器、换能器、探测器等。

被测量:自然科学中涉及的状态信息量。主要为物理量,包括力、热、电、光、原等分支中的基本物理量。此外,还有从物理学中分离出来而形成独立学科的化学量和生物量。

电信号:由被测量转换出的电信号是与被测量相关的、有一定规律的电学量,如电压、电流、频率、脉冲信号等。

相关性指被测量变化时传感器输出信号也随之变化的性质。注意:一个输出信号与被测量无关的装置是与传感器无缘的装置,初学者要特别留心这一点。

一定规律的电学量指输出信号与被测量之间存在的数量对应关系,如比例、线性、频率甚至相位等关系。

1.1.3 传感器的组成

为将非电的被测量转换成便于检测的电信号,传感器必须具备敏感元件和转换元件。

(1) 敏感元件:具有响应被测量能力的装置或材料。

(2) 转换元件:能将响应直接转换成电信号或间接的电学参量的器件或电子材料。

以上两种元件是构成传感器的必要组成部分。一方面,电学能量输出传感器(如电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器等)需要电桥、振荡器、电荷放大器等转换电路,将响应变成电压、电流或频率信号才可供检测系统利用;另一方面,敏感元件直接输出的电信号一般都很微弱,直接应用不利于传输、记录和显示等后续处理,而且微弱的电

信号会影响检测的精度。所以,传感器中一般带有信号放大、滤波或变换等功能的信号调理电路,使其输出信号满足检测系统的需要。

值得注意的是:并不是所有的传感器都能明显地区分出敏感元件和转换元件两个独立的部分,相当一部分传感器中的敏感元件和转换元件是合二为一的。这一问题有待后续讨论。传感器的组成框图如图 1-1 所示。

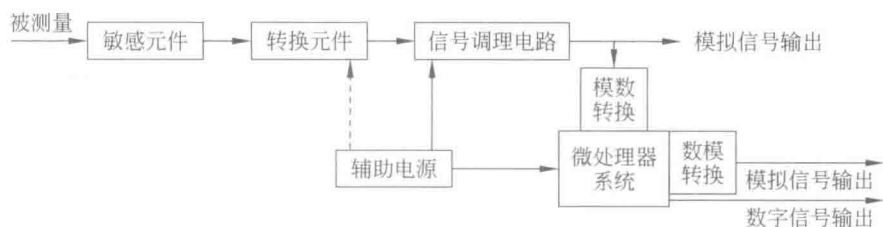


图 1-1 传感器的组成框图

1.1.4 有源和无源传感器

有源传感器:无须任何电源便能由被测量产生电信号的一类传感器,也称能量转换型传感器。

无源传感器:由外部电源供给传感器能量,输出信号(能量)由被测量控制的一类传感器,也称能量控制型传感器。

有源传感器中的敏感元件和转换元件是合二为一的。如基于热电效应(1822年由塞贝克首先发现)的热电偶温度传感器。此外,还有基于压电效应的压电式传感器、基于内光电效应的光电式传感器、基于磁致伸缩效应的位移传感器等。

绝大多数无源传感器的敏感元件和转换元件是独立分开的,结构型传感器更是如此。如加速度传感器、电阻型应变式传感器等。

1.2 传感器在检测系统中的作用与地位

1.2.1 传感器的作用

传感器针对自动检测而产生。由于电信号处理和传输方便且具有灵活多样性,因此受自动检测与自动控制系统设计者所青睐。

就人们认识自然、适应自然最终利用自然规律为人类造福而言,自动检测与自动控制系统是用机器取代人工劳动的典型范例。在此,传感器是人的感觉器官的替代品和延伸装置。图 1-2 表现了两种系统中的传感器与人体感觉器官之间的对应关系。传感器的作用可见一斑。

以下是说明传感器的产生及其在电子测量(简称电测)系统中的作用的例子。

图 1-3 是一种人工控制的恒值水位系统工作原理示意图。人眼在此起到控制系统的检测核心,即传感器作用;大脑是数字和逻辑运算和决策中心;手是执行器,通过执行机

构产生控制效果。所谓执行器,是指接收控制信息,并对受控对象实施控制的装置,如能够使物体旋转或移动的机械装置。执行机构是指继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节器、伺服电机等器件。其中,继电器、电磁铁是中继器件,其后常接有电动机等大功率电磁设备。

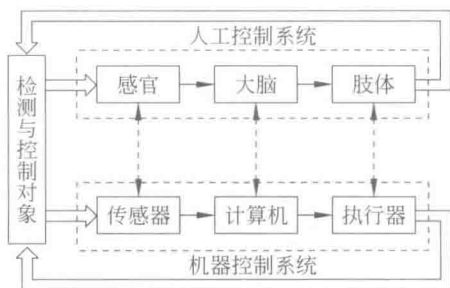


图 1-2 人工控制系统与机器系统中的感官与传感器

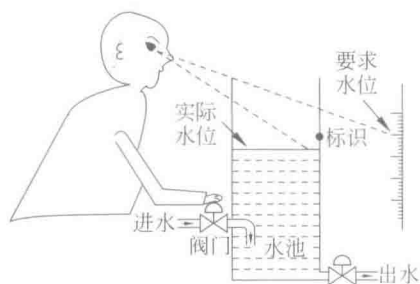


图 1-3 人工控制的恒值水位系统工作原理示意图

对初期、简单的控制,只用图 1-3 中的标识而不用标尺也可达到控制效果。而标尺实现了量化测量,是一大进步。执行机构的发明为自动控制系统的实现提供了必要的条件。

人工控制系统前期投入少,工程见效快。另外,人工控制系统具有准确把握控制提前量的智能特征。另一方面,人工控制也具有明显的缺点,如劳动强度大,成本高,人力资源浪费严重,这是社会学问题。从控制系统功能角度讲,人工控制系统反应迟缓,特别是人容易疲劳,工作环境条件要求苛刻,器官的感觉范围有限,如人眼只对可见光有感光能力,对红外光和紫外光则无视觉效果;人体能感知物体的冷热,但无法对其进行准确的量化,更何况在恶劣的高、低温环境下,人类无法生存,更谈不上工作。为了扩展感知范围和提高感知精度,人类需要研制适用范围更宽,感觉更灵敏、更准确的装置来替代人的工作,这种装置的发展、提高、规范化的结果导致传感器的出现。下面继续恒值水位系统的讨论话题,将其向自动控制系统方向转化,大致能感觉到在此过程中传感器的作用。

图 1-4 相对图 1-3 发生了质的飞跃——系统中引入了传感器。在此,浮子是敏感元件,系统将水位的变化转换为浮子上下浮动的位移,齿轮传动装置将直线运动转换为转

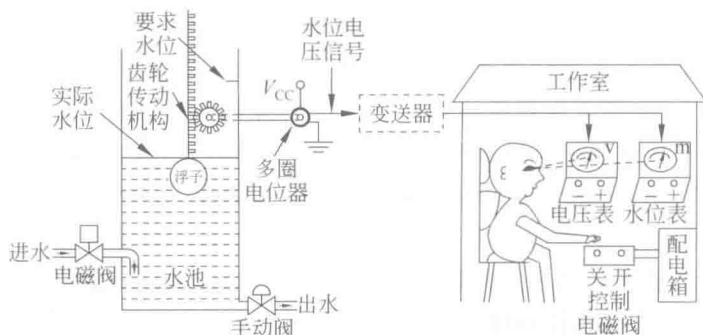


图 1-4 具有传感器的人工控制的恒值水位系统

动,转轴带动多圈电位器的活动端,将水位变成电压信号。这里,多圈电位器就是转换元件。这个传感器显然是无源的。

齿轮传动装置还将直线位移量和角位移量进行了比例调节,使水位和传感器的输出信号满足式(1-1)的形式 $x=nu$ 。这里, x 表示水位; u 是传感器输出的电压信号; n 是比例系数,其SI制的单位是 m/V 。

多圈电位器作为转换元件,水位电压信号转换原理如图 1-5 所示。这里将多圈电位器电阻线圈拉成直线电阻体以便于理解。电位器接成分压形式,适当调节传动比,使水位变化尺度范围略小于电位器活动端电阻有效范围,以便于提高检测的分辨率。

电压信号便于测量和传输,如果工作室距离测量现场较远,则可将电压信号转换为电流信号,可有效地避免信号的衰减和受环境条件的干扰。因为只要变送器维持电路中的电流值,便不易产生寄生电偶和导线电阻的压降,这是电荷守恒的结果。另外,电磁干扰很容易加在电压信号上,而要引起相当幅度的电流干扰信号,则要求干扰源具有相当大的功率,故图 1-4 所示的系统提出了测量信号的变换问题——变送器。

水位变成水位电压信号后,可以直接接上电压表,如将表盘示数改为水位的高度,则更加直观。有了传感器和执行器,控制人员就可以在舒适的工作室进行控制操作了,并且一人可以集中控制多个系统,使得工作效率大大提高,劳动强度大大降低。

图 1-4 的控制系统还不足以使人满足,系统能否使用自动控制,完全不用人工控制呢?首先想到的是电子技术方案,带回差控制的水位保持系统及水位变化图如图 1-6 所示。

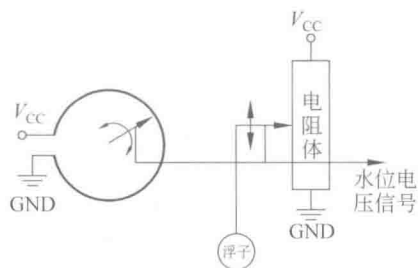


图 1-5 水位电压信号转换原理

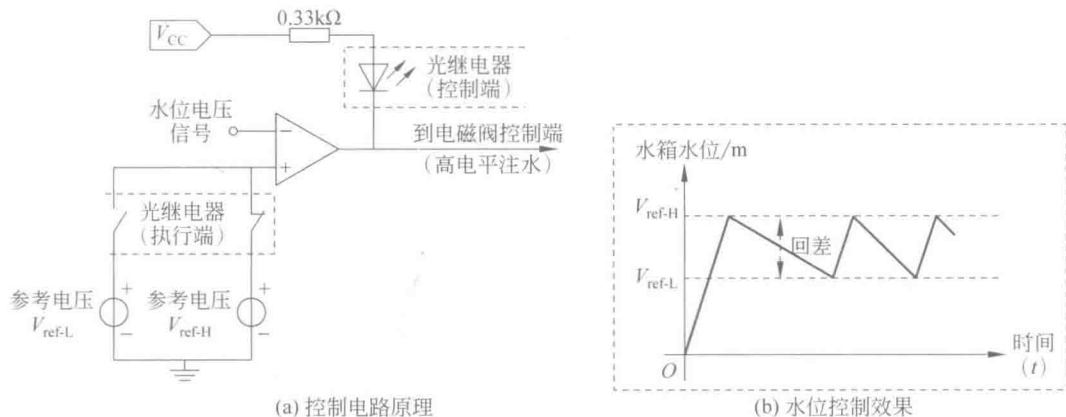


图 1-6 带回差控制的水位保持系统及水位变化图

图 1-6 中, $V_{\text{ref-H}}$ 是水箱要求水位所对应的转换电压值; $V_{\text{ref-L}}$ 是可以允许的水位偏差的最大值。 $V_{\text{ref-H}}$ 与 $V_{\text{ref-L}}$ 之差是系统控制回差。控制电路的核心是由运算放大器组成的比

较器和带有动断(常闭)、动合(常开)(在控制输入端无电流时的状态)两组触点输出的光继电器。参考电压 $V_{\text{ref-H}}$ 接在常闭端上。假设在控制前水箱水位为零,比较器的参考端电压为 $V_{\text{ref-H}}$ 。由于水位电压低于要求水位电压 $V_{\text{ref-H}}$,所以比较器输出高电平,因此产生注水操作,水位开始升高。当水位达到 $V_{\text{ref-H}}$ 时,比较器输出翻转,一方面其输出的低电平停止注水操作,水位保持或开始下降;另一方面,光继电器输入端导通,导致光继电器的输出端产生动作(闭合与断开相互切换),使比较器的参考端电压变为 $V_{\text{ref-L}}$,当水位降到 $V_{\text{ref-L}}$ 时,比较器再次输出高电平,使光继电器的输入端断开,比较器参考电压再次变为 $V_{\text{ref-H}}$,又一次产生注水操作,直到水位转换电压达到 $V_{\text{ref-H}}$ 。如此反复,系统将水位控制在 $V_{\text{ref-L}}$ 和 $V_{\text{ref-H}}$ 之间。

如果对水位进行精确控制,而不采用回差控制,则比较器输出可能在水位电压 $V_{\text{ref-H}}$ 处产生频繁翻转,导致系统无法工作。人工控制系统也是如此,有经验的控制师会根据用水情况以最佳的回差控制水箱的水位。

还可以在图 1-6 的基础上对系统进行数字式智能控制的改造,原理如图 1-7 所示。由传感器输出的水位电压信号通过模数转换器变成数字量,进入嵌入式监测控制系统中,其微处理器对采样值进行处理(如平滑滤波等)后,计算出实际水位值并与通过图示中的人机界面设置的要求水位值和回差值进行比较,做出相应的决策,通过执行器产生控制动作,最终使水位保持在一定的范围内,如图 1-6(b)所示。

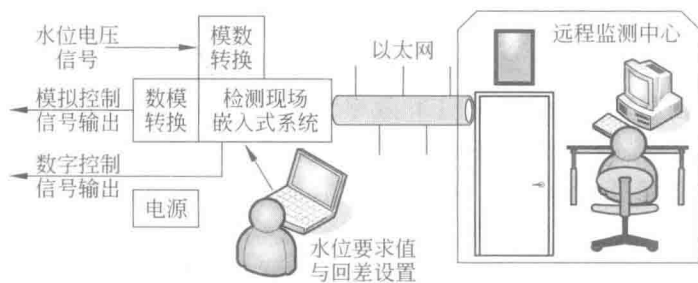


图 1-7 水位保持系统智能与远程控制示意图

在计算机通信技术发展如此成熟的今天,远程监测中心的上位机还可以与现场检测与控制系统构成通信网络(如以太网),成为远程监控系统。这对于偏远、环境恶劣等不方便人或不适于人工作的地方或区域的监控任务,无疑是极好的方案。

以计算机为核心的智能控制系统的硬件构成简单,在强大的控制软件支持下,系统可塑性强,在硬件不变条件下,系统也很容易升级或增加新的功能,计算机强大的数据处理功能可轻松地完成模拟电路需要完成的计算工作(如与要求水位的比较等),很容易根据用户的要求改变控制目标值(如要求水位值),而且系统的控制精度和可靠性均远高于模拟系统。数字通信的抗干扰能力更远高于模拟系统。

名词解释:以太网(Ethernet)指的是由 Xerox 公司创建并由 Xerox、Intel 和 DEC 公司联合开发的基带局域网规范,是当今局域网采用的最通用的通信协议标准。