

中等专业学校教材



热工自动控制设备

第三版

重庆电力学校 孔元发 主编



中等专业学校教材

热工自动控制设备

第三版

重庆电力学校 孔元发 主编

水利电力出版社

中等专业学校教材
热工自动控制设备
第三版

重庆电力学校 孔元发 主编

*

水利电力出版社出版

(现中国电力出版社)

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787毫米×1092毫米 16开本 16.25印张 361千字

1981年6月第一版 1985年5月第二版

1994年6月第三版 1997年6月北京第五次印刷

印数 39241—41340册

ISBN 7-120-01951-1/TP·71

定价 15.00元

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据1989年召开的“电力中等专业学校电厂热力过程自动化专业教学计划和课程教学大纲讨论会”所修订的新教学大纲编写的，作为本专业“热工自动控制设备”课程的教材。它也可作为其他生产过程自动化专业和培训班的参考教材以及供从事电厂热工自动控制工作的工程技术人员学习之用。

本书内容分两篇，共有十五章。第一篇为模拟式自动控制设备（第一章至第十二章）着重介绍目前大、中型火电厂广泛使用的1151系列电容式变送器，ITE型热电偶和热电阻温度变送器，组装式电子综合控制装置，DKJ型电动执行器，TKZ-2系列调速控制组合装置，气动基地式调节仪表和气动执行机构等的结构组成、工作原理和工作特性；第二篇为数字式自动控制设备（第十三章至第十五章）扼要介绍目前正被广泛使用的集散控制系统和单回路数字调节器的功能、结构组成、工作原理和应用方法等。编写时，力求理论联系实际，突出重点，并注意深入浅出，文字通俗易懂。为加深读者对内容的理解和掌握，每章末都附有一定数量的练习及思考题。

本书由重庆电力学校孔元发和张广辉同志编写。孔元发编写绪论和第一章至第十三章；张广辉编写第十四章和第十五章；孔元发担任主编。

本书由西安电力学校周仁主审，他仔细地审阅了书稿并提出了许多宝贵的意见和建议，在此谨表示衷心的感谢。在编写过程中得到了西安仪表厂、南京调速电机厂、浙江瑞安仪表三厂等单位的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，难免有不妥及错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

1993年7月

内 容 提 要

本书介绍了目前大、中型火电厂中常用的热工自动控制设备,如1151系列电容式变送器,ITE型热电偶和热电阻温度变送器,组态式电子综合控制装置,DKJ型电动执行器,TKZ-2系列调速控制组合装置,气动基地式调节仪表,气动执行机构,集散控制系统,单回路数字式调节仪表等的功能、结构组成、工作原理及应用方法。本书着重基本理论知识和应用技术的阐述,并力求结合电厂实际和反映当前的先进技术。

本书除作为中等专业学校“电厂热力过程自动化”专业的教材外,还可供其他工业自动化专业学生以及从事热力生产过程自动化工作的工程技术人员学习和参考。

目 录

前 言

绪 论 1

第一篇 模拟式自动控制设备

第一章 1151 系列电容式变送器 5

第一节 测量部分 5

一、基本结构及工作原理(5) 二、转换特性分析(6)

第二节 转换电路 9

一、电容-电流转换电路(10) 二、电流放大与控制电路(13) 三、调整环节及保护电路(15)

第三节 整机综述 17

练习及思考题 19

第二章 ITE 型温度变送器 20

第一节 ITE 型热电偶温度变送器 20

一、电路组成及工作原理(20) 二、电路分析(23) 三、整机综述(31)

第二节 ITE 型热电阻温度变送器 32

一、电路组成及工作原理(32) 二、电路分析(34) 三、整机综述(38)

练习及思考题 39

第三章 组装式电子综合控制装置概述 40

第一节 组装式电子综合控制装置的特点 40

第二节 组装式仪表的基本组成 41

一、运算、调节功能组件(42) 二、监视、保护功能组件(42) 三、辅助功能组件和装置(42)

第三节 模件组装仪表的型号命名及主要技术性能 43

一、型号命名(43) 二、主要技术性能(44)

练习及思考题 45

第四章 功能组件的基本电路 46

第一节 缓冲电路和综合电路 46

一、缓冲电路(46) 二、综合电路(50)

第二节 比较电路和单向电路 51

一、比较电路(51) 二、单向电路(51)

第三节 比例电路 53

一、电路组成及工作原理(53) 二、工作特性(53)

第四节 保持电路 55

一、电路组成及工作原理(55) 二、工作特性(56)

第五节 开关电路和三角波电路 59

一、开关电路(59) 二、三角波电路(60)

第六节 转换电路 62

一、电路组成及工作原理 (62)	二、工作特性 (63)	
练习及思考题		63
第五章 运算功能组件		65
第一节 ZDZT-4000函数组件		65
一、电路组成及工作原理 (65)	二、运算特性 (69)	三、函数组件的应用 (70)
第二节 乘法、除法和开方组件		72
一、ZDJX 1000乘法组件 (72)	二、ZDJN-1000除法组件 (76)	三、ZDJK-1000开方组件 (78)
练习及思考题		80
第六章 调节功能组件		81
第一节 电路组成及工作原理		81
第二节 电路分析		83
一、比例电路 (83)	二、比例-积分电路 (84)	三、输出限幅电路 (86)
四、自动-手动切换、外跟踪和软手操电路 (88)		
第三节 整机动态特性		92
练习及思考题		93
第七章 监控组件		94
第一节 ZDKJ-5010监控组件		95
一、电路组成及工作原理 (95)	二、电路分析 (97)	
第二节 ZDKJ-1000监控组件		103
一、电路组成及工作原理 (104)	二、电路分析 (105)	三、输入输出关系 (109)
第三节 监控组件的使用及报警过程		110
一、输入信号的引入 (110)	二、ZDKJ-5010组件与操作器的连接 (111)	三、ZDKJ-5010组件与ZDKJ-1000组件之间的连接 (111)
四、低振信号的输入方式 (111)	五、自身故障的消音问题 (112)	六、故障的判断 (112)
七、报警过程综述 (112)		
练习及思考题		114
第八章 操作器及其应用		115
第一节 ZDFH-2000型操作器的特点及功能		115
第二节 电路组成及工作原理		116
一、切换电路 (118)	二、操作电路 (120)	
第三节 操作器的应用		125
一、电动执行器系统 (125)	二、气动执行器系统 (127)	
练习及思考题		129
第九章 DKJ型电动执行器		130
第一节 基本结构及工作原理		130
第二节 伺服放大器		131
一、前置磁放大器 (132)	二、触发器 (135)	三、可控硅主回路 (136)
第三节 执行器		137
一、两相伺服电动机 (137)	二、机械减速器 (138)	三、位置发送器 (139)
第四节 电动执行器整机综述		144
练习及思考题		147
第十章 TKZ-2系列调速控制组合装置		148
第一节 滑差电机		148
一、电磁转差离合器 (148)	二、电磁转差离合器的转速特性 (150)	三、测速发电机 (150)

第二节 DK-2A型控制器	151
一、基本结构及工作原理(151) 二、手操电源(152) 三、脉冲移相触发电路(153) 四、可控整流电路(155)	
五、速度反馈电路(156)	
第三节 TC-2C型同操器	157
练习及思考题	160
第十一章 气动基地式调节仪表	161
第一节 基本结构及工作原理	161
一、测量部件(161) 二、给定机构(162) 三、差动机构(163) 四、二级功率放大器(164) 五、反馈机构(166)	
六、气开关(166) 七、手操机构(167) 八、报警机构(167) 九、整机动作过程(168)	
第二节 整机工作过程及动态特性	170
练习及思考题	172
第十二章 气动执行机构	173
第一节 气动薄膜执行机构	173
一、气动薄膜执行机构(173) 二、气动阀门定位器(173) 三、工作特性(174)	
第二节 ZSLD型电信号气动长行程执行机构	175
一、电-气阀门定位器(176) 二、手操机构(177) 三、阀位移送器(178) 四、三断自锁装置(179)	
练习及思考题	181

第二篇 数字式自动控制设备

第十三章 集中分散型综合控制系统概述	182
第一节 计算机过程控制系统的发展	182
第二节 集中分散型综合控制系统概貌	183
一、集中分散型综合控制系统的概念(183) 二、集散系统的结构组成(184)	
第三节 TDC-2000集散系统简介	187
一、TDC-2000集散系统的设计思想(187) 二、TDC-2000系统的结构组成(188)	
练习及思考题	193
第十四章 单回路数字调节器	194
第一节 KMM的基本组成及工作原理	195
第二节 输入、输出、运算处理功能	198
一、输入处理功能(198) 二、运算处理功能(201) 三、输出处理功能(208)	
第三节 控制类型	208
一、0型控制(208) 二、1型控制(209) 三、2型控制(210) 四、3型控制(210)	
第四节 控制数据表	212
一、基本数据表(212) 二、输入处理数据表(213) 三、PID运算数据表(214) 四、折线数据表(216)	
五、可变参数数据表(216) 六、输出处理数据表(216) 七、运算单元数据表(217)	
练习及思考题	220
第十五章 KMM单回路数字调节器的应用	221
第一节 KMM的型号命名及技术指标	222
一、KMM的型号命名(222) 二、KMM的技术规格(223)	
第二节 面板功能及使用	224
一、参数及报警显示(224) 二、状态显示及切换按钮(225) 三、操作按钮(225)	
第三节 数据设定器的功能及使用	226
一、功能键的功能(226) 二、运算单元数据的调出方法(227) 三、模拟量输入、输出信号的调出与变更方	

法(228) 四、PI D 运算数据的代码显示及含义(229) 五、可变参数数据的代码显示及含义(229) 六、折线 表数据代码显示及含义(230) 七、数字输入、输出数据代码显示及含义(230) 八、报警显示与自诊断显示(230)	
第四节 KMM的外部连接和调校	231
一、KMM的用户端子及连接的信号(231) 二、KMM的信号连接(231) 三、KMM的启动与调 校(234) 四、KMM的辅助开关(237)	
第五节 KMM的通信功能	237
一、通信系统(237) 二、KMM通信功能的指定(240) 三、计算机状态的请求和进入(240) 四、可 由通信系统变更的数据(241)	
第六节 程序装入器的功能和使用	242
一、KMK的键盘及显示器(242) 二、用户ROM的制作过程(244)	
练习及思考题	249

绪 论

一、自动控制设备的作用

自动控制是目前火电厂生产过程中不可缺少的技术手段。随着科学技术的发展和大量、高参数机组的出现,自动控制技术更加广泛地应用于电力工业生产的全过程,并起着越来越重要的作用。

在电厂的热力生产过程中,自动控制的任务是,当生产过程受到内、外干扰(在允许范围内),机组运行参数偏离给定值时,控制设备自动进行操作,消除干扰影响,使机组自动恢复到正常运行状态或按照预定的规律运行。电厂中的热工自动控制系统,一般都为负反馈系统,其典型的系统组成方框图如图0-1所示。系统由调节对象和自动控制设备组成。这里所说的自动控制设备,是指从被测量到调节机构输出之间的全套自动化仪表的总称。

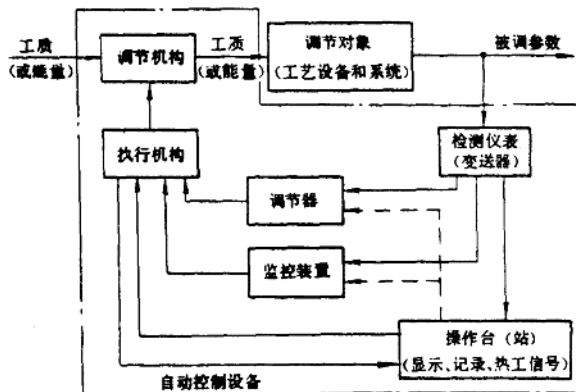


图 0-1 自动控制系统组成方框图

其中,变送器对过程参数进行测量和信号转换;调节器和监控装置等发出调节指令,使调节机构动作,最终使生产过程自动地按照预定的规律运行。一个自动控制系统的控制品质好坏,除取决于控制系统的设计是否合理外,还取决于控制对象和控制仪表的工作特性和使用方法。因此,作为自动化技术工作者,既要熟悉控制对象的特性,还要掌握各种自动控制仪表的工作原理、工作特性和使用方法,以便正确选择和使用各种控制仪表。

二、自动控制设备的概况

由于工业生产过程多种多样,其复杂程度也各异,因而相应的自动化程度亦各不相同,所采用的自动控制设备也多种多样。这些自动控制设备(或仪表)按其所用能源形式的不同,可分为四大类:

(1) 气动控制仪表 气动控制仪表以压缩空气为能源。它具有结构简单、直观,易

于掌握,性能稳定,可靠性高,天然防爆及使用范围广等特点,特别适用于石油、化工等有易燃易爆危险的生产现场。气动控制仪表已有几十年的历史,在60年代以前,它是工业自动化系统的主要控制设备之一。目前气动控制仪表仍广泛应用于石油、化工、轻工等部门,在电力部门中,气动基地式调节仪表和气动执行器也被广泛地采用。近年来,气动控制仪表在发展速度和生产应用方面仅次于电动控制仪表。

(2) 液动控制仪表 液动控制仪表以高压油或水为能源。它也是发展得比较早的一类自动控制仪表,具有结构简单、工作可靠的特点,多用于功率较大的场合。例如,目前电厂中的汽轮机调速系统和水电站中的水轮机调速系统,还较多地采用液动控制仪表。

气动和液动控制仪表的主要缺点是信息传递速度较慢,不适于快速调节、远距离控制和集中控制。

(3) 电动控制仪表 电动控制仪表以电能作为能源。它是在本世纪中期才迅速发展起来的一种控制设备。由于它具有信息传递速度快、能实现快速和远距离控制,易于实现复杂的控制规律,易于集中显示和操作,并能与巡回检测装置、数据处理装置、电子计算机等联用,方便地组成各种复杂的控制系统,实现生产过程的综合自动化,因此,引起了世界各国的广泛重视,得到了迅速发展。目前电动控制仪表已成为工业自动化的主要技术工具,广泛地应用于石油、化工、电力、冶金、轻工、交通等工业部门。

(4) 混合式控制仪表 混合式控制仪表同时使用上述两种或两种以上的能源进行工作。它既具有电动仪表能快速和远传信号等特点,又具有气动或液动控制仪表的特点。如火电厂中的某些汽轮机采用的电液复合调节器,即为混合式控制仪表。

自动控制仪表按结构、功能的不同,又可分为以下四类:

(1) 基地式控制仪表 基地式控制仪表的特点是,其测量、显示、调节等部件组合成一个整体,安装在一个表壳里。这种控制仪表的系统成套性很强,一台基地式控制仪表就能解决一个简单自动控制系统的测量、指示、记录、调节等全部任务,具有结构简单、使用方便、可靠和经济等优点。但这种控制仪表的整定参数范围较窄,使用的局限性较大,一般不能互换使用。因此,它多适用于单参数、单回路的简单控制系统。

(2) 单元组合式控制仪表 单元组合式控制仪表的特点是,整套仪表划分为若干个能独立实现一定功能的单元,各单元之间采用统一的标准信号互相联系,按照生产工艺的需要,少量单元进行不同的组合,便可构成多种复杂程度不同的自动检测和控制系统。这种控制仪表具有组成与改组系统方便,灵活,通用性强等特点,适合于大、中规模生产自动化的要求。

我国于50年代后期就设计和制造了气动单元组合仪表(QDZ型)和电动单元组合仪表(DDZ-I型)两大系列自动化仪表。随着电子技术的发展,半导体器件品种的增加和性能的改善,我国在60年代研制出了以晶体管和小型电子器件为基本元件的DDZ-II型电动单元组合仪表;在70年代研制出了以集成运算放大器为基本元件的DDZ-III型电动单元组合仪表;在90年代开发研制出以微机芯片为基本器件的DDZ-S型第四代电动单元组合仪表。

(3) 组装式综合控制装置(或仪表) 组装式综合控制装置(简称组装式仪表)的

特点是,具有非线性控制、逻辑控制功能,运用了数字技术和断续调节技术,可实现局部过程的综合协调控制。此外,它能够与控制计算机、程序控制装置、图像显示装置等配合使用,实现监控和自动保护,整套仪表的控制性能较高。

在我国,目前生产和使用的组装式仪表有自行研制的TF-900型和MZ-Ⅲ型,以及引进生产的SPEC-200型仪表等。

(4) 集中分散型综合控制装置 集中分散型综合控制装置是一种以微处理器和微型计算机为核心,对生产过程进行分散控制和集中监视、操作的直接数字控制装置。它以微处理器和微型计算机作为过程控制工具,完成目前模拟仪表和程控装置的功能;以小型计算机作为上位机,实现数据处理、监督控制;以图像显示为中心的人-机联系装置,实现集中显示、操作;用通信接口将装置的各部分同上位计算机联接,实现工业生产的综合控制。所以,该控制装置同时兼容了控制(Control)、计算(Computer)、通信(Communication)、图像显示(CRT)等“4C”技术,它将是今后相当长一段时期内适合于大型综合自动化的自动控制装置。

三、自动控制设备的发展方向

自动化技术是为生产服务的,它伴随着生产的发展而发展。自动化程度和对象不同,所采用的自动控制仪表也不相同。生产的发展对自动控制仪表不断提出新的要求;同时,新技术、新工艺以及新材料和新器件的不断出现,又为自动控制仪表的发展创造了条件。自动控制仪表就是这样随着生产发展和科学技术进步而迅速向前发展的。

随着工业生产中各种大容量、高参数、高效率的新型生产设备和生产过程的不断出现,检测和控制参数激增,控制回路增多,系统趋于复杂,系统安全性要求高,从而对自动控制仪表提出了许多新的要求。如要求控制功能更加完善;解决模拟仪表与计算机兼容问题;便于人-机联系和简化操作;简化现场安装、调试和投运工作;提高仪表及系统的安全性、可靠性等。

为了适应上述要求,需要将自动化仪表各个领域的最新技术,如数字控制技术、程序控制技术、数字逻辑技术、字符图像显示技术及数据通信技术等综合利用起来,开发出兼取模拟控制和计算机(数字)控制的优点,弥补它们之间缺点的新型控制装置。

近年来,由于微处理器迅速发展并成功地应用于自动控制仪表中,控制仪表具有记忆、判断、处理等多种功能,有的实现了数字化和智能化。在未来的自动化仪表中,常规的硬件功能式仪表在很多方面将被智能化仪表所取代,这是仪表发展的一种趋势。

在智能化控制仪表中,特别是近几年来得到迅速发展和广泛应用的单回路数字调节器和可编程序调节器,它们以微处理器为核心实现直接数字控制,可以完成模拟控制仪表的各种运算功能及PID调节规律,并配备了同上位计算机的通信接口。在仪表外观、输入输出信号和操作方式上,保留了模拟调节器的特点,可与模拟调节器混合使用,构成各种复杂的控制系统,也可以应用于集中分散型综合控制系统中面向生产过程的“前沿级”。这种数字调节器已在工业生产过程自动化中越来越被广泛地使用。

四、课程内容

“热工自动控制设备”是“电厂热力过程自动化”专业的主要专业课之一。针对我国

目前电厂热工过程所用自动控制仪表的现状,本书着重介绍1151系列电容式变送器、I系列温度变送器、组装式电子综合控制装置、DKJ型电动执行器、TKZ-2系列调速控制组合装置、气动基地式调节仪表、气动执行器和KMM可编程序调节器等。

“热工自动控制设备”课程的内容庞杂,发展更新很快,控制仪表的品种繁多,各有不同的用途和特点。每一种控制设备都是一个独立而完整的仪表或装置,它们一般都有比较复杂的结构形式或电气线路,其工作原理也有所不同。但是,只要我们对各类模拟量控制仪表进行仔细研究和分析,就不难发现,这些不同的模拟量控制仪表有其共同点,它们一般都是按负反馈平衡原理构成的,其组成原理如图0-2所示。由图可知,按负反馈原理构成的各种模拟量控制仪表或装置在结构上主要由输入转换部分、比较部分、放大部分和反馈部分组成,各部分之间的信息传递与作用方向如图中箭头所示。输入转换部分是一个线

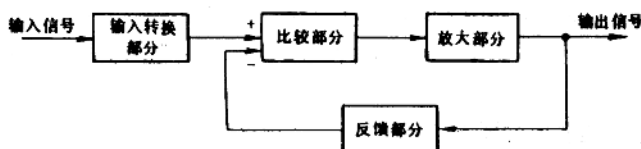


图 0-2 模拟控制仪表的组成原理方框图

性环节,一般由高稳定性和高准确度的元、部件组成;比较部分由线性元、部件组成,用以保证各综合信号在该部分进行线性叠加(或称线性综合);放大部分是一个高增益的放大器(气动放大器、机械放大器或电子放大器等),用以保证负反馈平衡的准确度;反馈部分是由高准确度和高稳定度的元、部件所组成的各种运算电路。当放大部分的增益足够大时,仪表的传递特性基本上由反馈回路传递函数的倒数与输入转换部分传递函数的乘积决定。特性参数的调整环节一般都附设在输入转换部分和反馈部分。

在分析每一个仪表时,主要从使用角度出发(检修、调试),对它们的功能(或用途)、结构组成、工作原理、工作特性、调整环节和使用方法等进行较全面的介绍。

在教学过程中,应始终按唯物辩证法的认识论去系统分析每一个仪表的基本内容,培养学生既要善于分析,又要善于综合。在分析每一个具体仪表时,应注意以下两点:

- 1) 将整体仪表分解为简单的基本部件或环节(以上述的结构框图为基础),弄清它们的工作原理和传递特性,以及保证这些特性的技术条件和调校方法;

- 2) 掌握由基本部件或环节组成仪表的基本方法和对整机特性的测试、调校方法。

在讲授每一个仪表时,应从它们的结构联系、连接、运动以及运动的产生(即动作原理)和消失(即动态或静态平衡)方面去分析,并将整机内容划分为如下六个部分,即仪表的基本用途、结构组成、工作原理、工作特性、调整环节、使用维修,依次逐步深化,使学生较全面地掌握基本知识、基本理论和基本技能。

第一篇 模拟式自动控制设备

第一章 1151系列电容式变送器

电容式变送器是70年代出现的一种新型变送器。它具有准确度高、稳定性好、结构简单、测量范围宽、使用方便等显著特点,因此,最近十几年来得到了显著发展。在目前的新式变送器中,电容式变送器是发展最快、使用最多的变送器之一。它已广泛地应用于石油、化工、电站、冶金、轻工、食品、医药等部门。

在热工测量及自动调节系统中,电容式变送器为检测、变送环节,它可连续地把生产过程中的液体、气体、蒸汽等介质的压力、压差、液位、流量等热工参数的变化转换成 $4 \sim 20\text{mA}$, DC统一信号,送至调节、显示等有关单元进行显示或控制。

本章讲授西安仪表厂从美国罗斯蒙特(Rosemount)公司引进制造技术生产的1151系列电容式变送器。

1151系列电容式变送器主要由测量部分和转换电路两大部分组成,其组成原理如图1-1所示。

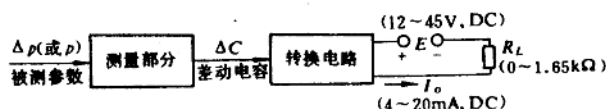


图 1-1 电容式变送器的组成原理图

第一节 测 量 部 分

一、基本结构及工作原理

测量部分的作用是将被测参数(如压差、压力、液位、流量等)转换成相应的差动电容值的变化。

图1-2所示为测量部分的结构示意图。它主要由隔离膜片1和2、测量膜片3、电容固定极板4和5、刚性绝缘体6、引出电极7等组成。隔离膜片与被测介质接触,膜片1与3之间为一室,膜片2与3之间为另一室,两室各自封闭,内充硅油(或氟油),组成两室结构的单元。测量膜片是一片弹性系数温度稳定性好的平板金属膜片,作为差动可变电容的活动极板。在测量膜片两侧,有两个在玻璃凹形球面上用真空蒸发有金属层的固定极板。

被测压力 p_H 和 p_L 分别作用于高、低压侧的隔离膜片1、2上,灌充液将压力传送到测量膜片3上。当两侧压力不相等时,测量膜片向一侧位移,如图1-2(b)中的虚线所示。

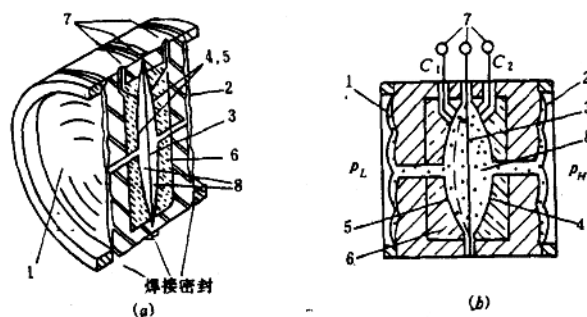


图 1-2 测量部分结构示意图

(a) 结构图; (b) 结构示意图

1, 2—隔离膜片; 3—测量膜片; 4, 5—电容固定极板;
6—刚性绝缘体; 7—引出电极; 8—灌充液

此时, 测量膜片 3 与两侧固定极板间的距离一侧增大, 另一侧减小, 因此两个固定极板与活动极板之间的电容量一个增大, 另一个减小。引出电极 7 将这两个电容的变化信号输至转换电路。这样, 测量部分就把被测参数 (压力、压差、液位等) 的变化转换成差动电容量的变化。

这种结构对测量膜片具有较好的过载保护能力。当被测压差过大时, 测量膜片贴紧一侧的凹形球面上, 不会因产生过大位移而损坏膜片。过载消除后, 测量膜片恢复到正常位置。灌充液 (硅油或氟油) 除用作传递压力外, 它的粘度特性对冲击力具有一定缓冲作用 (阻尼作用), 可消除被测介质的高频脉动压差对变送器输出准确度的影响。

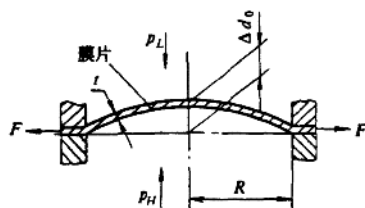


图 1-3 测量膜片工作原理图

二、转换特性分析

测量部分将被测压差 (或压力, 下同) 信号转换为差动电容变化信号是经过两个转换过程来实现的。下面分析这两个转换过程的转换特性。

1. 压差-位移转换特性

1151 系列电容式变送器的压差-位移转换原理如图 1-3 所示。

当被测压差为均匀分布时, 膜片中心处的位移 Δd_0 与被测压差 Δp 之间有如下关系:

$$\frac{\Delta p R^4}{E t^4} = \frac{16}{3(1-\mu^2)} \frac{\Delta d_0}{t} + \frac{2}{21} \frac{23-9\mu}{1-\mu} \left(\frac{\Delta d_0}{t} \right)^3 \quad (1-1)$$

式中 Δp ——被测压差;

E ——膜片材料的弹性模量;

R ——膜片周边半径;

μ ——膜片材料的泊松比;

t ——膜片厚度。

式 (1-1) 所示压差-位移转换特性是一非线性特性。但是, 若 $\Delta d_0 \ll t$ 时, 可忽略该

式中的高次项。此时，位移 Δd_0 与差压 Δp 之间的关系为

$$\Delta d_0 = -\frac{3(1-\mu^2)}{16} \frac{R^4}{Et^3} \Delta p = K_1 \Delta p \quad (1-2)$$

式中 K_1 ——膜片的结构系数， $K_1 = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \frac{R^4}{Et^3}$ 。

显然， K_1 只与变送器测量部分的具体结构（测量膜片的材料及尺寸）有关，一定结构的变送器，其 K_1 值近似为一常数。

由式（1-2）看出位移与压差成线性关系。为了保证压差-位移为线性转换关系，要求膜片的位移仅为0.1mm左右。当测量较高压差时，采用较厚的膜片，容易满足 $\Delta d_0 \ll t$ 条件，式（1-2）所示关系成立；但在测量较低压差时，不易满足 $\Delta d_0 \ll t$ 条件，此时需采用具有初始预紧应力的平膜片，这样不仅可提高压差-位移转换关系的线性度，同时还可减小滞后效应。

厚度很小、初始张力很大的膜片，其弯曲刚度可以忽略，此时膜片中心处的位移可用下式计算：

$$\Delta d_0 = \frac{R^2}{4\sigma_0 t} \Delta p = K'_1 \Delta p \quad (1-3)$$

式中 σ_0 ——膜片受初始张力 F 时对应的预紧应力；

K'_1 ——膜片的结构系数， $K'_1 = R^2 / (4\sigma_0 t)$ 。

式（1-3）中的 K'_1 为常数，因此压差-位移转换特性也是线性的。

由式（1-2）和式（1-3）可知：

- 1）当结构一定时， $\Delta d_0 = f(\Delta p)$ 为比例转换特性；
- 2）当测量膜片的周边半径 R 一定时，改变膜片厚度 t ，可以实现不同压差值的测量（高压差和高压力用厚膜片，低压差和低压用张紧的薄膜片），即可生产多种测量范围的变送器，故1151系列电容式变送器的测量部分具有统一的外形结构。

2. 位移-电容转换特性

为分析简便，利用等效原理，将图1-2所示差动球面-平面型（固定极板为球面，活动极板为平面）电容简化成图1-4所示平板型差动电容。活动极板移动的方向和距离受被测压差的方向和大小控制。当被测压差变化使活动极板产生位移时，活动极板与两固定极板之间的电容量即发生变化。若活动极板移动 Δd_0 距离，则它与固定极板之间的距离，一侧变为 $d_0 + \Delta d_0$ ，而另一侧变为 $d_0 - \Delta d_0$ ，如图1-4中所示。

由图示可得差动平行板电容器的电容量计算公式为

$$C_1 = K \frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0} \quad (1-4)$$

$$C_2 = K \frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0} \quad (1-5)$$

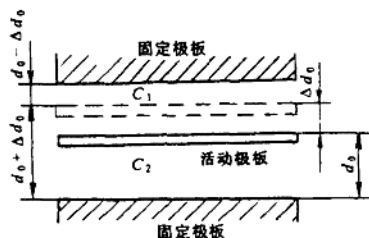


图 1-4 差动平行板电容器结构示意图

式中 C_1 ——活动极板与上固定极板间的电容量;

C_2 ——活动极板与下固定极板间的电容量;

K ——量纲系数;

A ——电容极板的有效面积;

ε ——极板间介质的介电常数;

d_0 ——被测压差为零时, 活动极板(测量膜片)与两固定极板之间的初始距离;

Δd_0 ——活动极板在被测压差作用下所产生的位移。

如果采用差动平行板电容器的差动电容值 $\Delta C = C_1 - C_2$ 作为输出量, 则

$$\begin{aligned}\Delta C = C_1 - C_2 &= K \frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0} - K \frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0} \\ &= K \varepsilon A \frac{2\Delta d_0}{d_0^2 - \Delta d_0^2} = K' \frac{2\Delta d_0}{d_0^2 - \Delta d_0^2}\end{aligned}\quad (1-6)$$

式中 K' ——常数, $K' = K\varepsilon A$ 。

由式(1-6)可以看出, 差动电容 ΔC 与活动极板的位移 Δd_0 之间呈非线性关系。为得到线性转换关系, 可取两电容之差与两电容之和的比值作为输出量, 即

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{K \frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0} - K \frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0}}{K \frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d_0} + K \frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d_0}} = \frac{\Delta d_0}{d_0} = K_2 \Delta d_0 \quad (1-7)$$

式中 K_2 ——系数, $K_2 = 1/d_0$ 。

将式(1-2)代入式(1-7), 得

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = K_1 K_2 \Delta p \quad (1-8)$$

式(1-8)即为电容式变送器测量部分的输入量与输出量之间的线性特性表达式。由此式可得出如下结论:

1) 当 K_1 、 K_2 为常数时, $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$ 之比值与被测压差成线性关系。

2) $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$ 之比值与介电常数 ε 无关, 即从设计原理上消除了介电常数随温度变化给测量带来的误差。

3) 若设计一种转换电路, 使其输出电流 $I_s = K_3(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$, I_s 就与被测压差成正比关系。

4) 如果电容极板的结构完全对称, 则可以得到良好的稳定性。

5) 在上述分析中, 没有考虑分布电容的影响。若考虑分布电容 C_s 的存在, 则测量部分的电容比值为

$$\frac{(C_1 + C_s) - (C_2 + C_s)}{(C_1 + C_s) + (C_2 + C_s)} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2 + 2C_s} \quad (1-9)$$