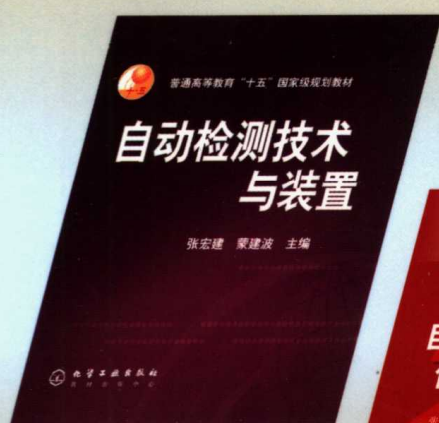


21世纪高等理工科重点课程辅导丛书

检测控制仪表 学习指导

张宏建 王化祥 周泽魁 曹丽 主编



化学工业出版社
教材出版中心



21 世纪高等理工科重点课程辅导丛书

检测控制仪表学习指导

张宏建 王化祥 周泽魁 曹 丽 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

本书是读者学习国家级教材《控制仪表与计算机控制装置》(周泽魁主编)、《自动检测技术与装置》(张宏建等主编)、《自动检测技术及仪表控制系统》(第二版)(张毅等主编)和规划教材《自动检测技术》(王化祥主编)的参考用书,主要内容为检测理论与误差、检测仪表、控制仪表和计算机控制装置等。全书共分21章,每章都有知识要点、例题分析与问题解答、习题和参考答案。书中的例题分析与问题解答中的题目是从这四本书每章的习题与思考题中选出来的,对更好地理解教材的内容、掌握重点、提高分析与解决问题的能力是十分有益的。

本书主要作为自动化、测控技术与仪器和电气工程及其自动化等专业学习检测仪表、控制仪表、计算机控制装置等课程的辅助教材,也可以供其他相关专业的本科生、夜大、函大的师生及有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

检测控制仪表学习指导/张宏建等主编. —北京:化学工业出版社, 2006.4
(21世纪高等理工科重点课程辅导丛书)
ISBN 7-5025-8019-0

I. 检… II. 张… III. 热工仪表-高等学校-教学参考资料 IV. TK31

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第029333号

21世纪高等理工科重点课程辅导丛书

检测控制仪表学习指导

张宏建 王化祥 周泽魁 曹丽 主编

责任编辑:唐旭华

文字编辑:徐卿华

责任校对:王素芹

封面设计:潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 406千字

2006年5月第1版 2006年5月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8019-0

定价:25.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

化学工业出版社先后出版了普通高等学校“九五”国家重点教材《控制仪表与计算机控制装置》(周泽魁主编)、“十五”国家规划教材《自动检测技术与装置》(张宏建等主编),教育部面向21世纪课程教材《自动检测技术及仪表控制系统》(第二版)(张毅等主编)和规划教材《自动检测技术》(王化祥主编)。这四本书涉及检测理论与误差、检测仪表、控制仪表和计算机控制装置等内容,基本覆盖了自动化仪表的知识,可以作为自动化、测控技术与仪器等专业的教材和教学参考用书,现在已被全国许多高校、研究单位和工矿企业选用,受到了广大师生和读者的欢迎和支持。为了更好地帮助大家系统地理解教材的内容,掌握有关的重点,正确分析各教材中的习题,我们将上述四本教材的主要内容和习题集中起来编写了这本《检测控制仪表学习指导》。

本书共分21章,基本上按检测仪表、控制仪表的顺序编写。每章都包括知识要点、例题分析与问题解答、习题和参考答案四部分。知识要点部分主要是这一章重点要掌握的内容;例题分析与问题解答中的题目是从四本书每章的习题与思考题中选出来的,仅对个别题目作了一些修改;习题部分作为读者学习后的进一步训练,留给读者自己完成;参考答案部分只给出部分习题的计算结果或答题要点与结论。

本书的第1章~第10章的知识要点、习题和参考答案由张宏建编写,第11章的知识要点、习题和参考答案由冀海峰编写,第12章~第16章的知识要点、习题和参考答案由周泽魁和蔡晋辉编写,第17章~第21章的知识要点、习题和参考答案由张光新和蔡晋辉编写。各章的例题分析与问题解答分别由张宏建、周洪亮、王化祥、张淑英、曹丽、冀海峰、周泽魁、蔡晋辉和张光新编写,详见各章的说明。全书由张宏建统稿和定稿,程路参加了部分章节的整理工作。

编 者

2005年11月于浙大求是园

目 录

绪论	1
1 检测技术与检测仪表基础	2
1.1 知识要点	2
1.2 例题分析与问题解答	5
1.3 习题	12
参考答案	13
2 测量误差的理论基础	14
2.1 知识要点	14
2.2 例题分析与问题解答	17
2.3 习题	23
参考答案	24
3 检测技术与检测元件	25
3.1 知识要点	25
3.2 例题分析与问题解答	30
3.3 习题	34
参考答案	35
4 检测仪表的设计方法	36
4.1 知识要点	36
4.2 例题分析与问题解答	40
4.3 习题	45
参考答案	45
5 温度检测仪表	46
5.1 知识要点	46
5.2 例题分析与问题解答	48
5.3 习题	54
参考答案	55
6 压力检测仪表	56
6.1 知识要点	56
6.2 例题分析与问题解答	58
6.3 习题	64
参考答案	65
7 物位检测仪表	66
7.1 知识要点	66

7.2	例题分析与问题解答	68
7.3	习题	73
	参考答案	74
8	流量检测仪表	75
8.1	知识要点	75
8.2	例题分析与问题解答	78
8.3	习题	84
	参考答案	85
9	成分检测仪表	86
9.1	知识要点	86
9.2	例题分析与问题解答	88
9.3	习题	93
	参考答案	93
10	机械量测量仪表	95
10.1	知识要点	95
10.2	例题分析与问题解答	97
10.3	习题	100
	参考答案	100
11	显示记录仪表	101
11.1	知识要点	101
11.2	例题分析与问题解答	107
11.3	习题	111
	参考答案	112
12	控制仪表与装置基本知识	113
12.1	知识要点	113
12.2	例题分析与问题解答	117
12.3	习题	120
	参考答案	121
13	控制器	122
13.1	知识要点	122
13.2	例题分析与问题解答	130
13.3	习题	137
	参考答案	139
14	变送器	141
14.1	知识要点	141
14.2	例题分析与问题解答	147
14.3	习题	154
	参考答案	155
15	控制系统常用的其他仪表	156
15.1	知识要点	156
15.2	例题分析与问题解答	157
15.3	习题	165
	参考答案	166

16	执行器	167
16.1	知识要点	167
16.2	例题分析与问题解答	171
16.3	习题	177
	参考答案	179
17	计算机控制基础知识	180
17.1	知识要点	180
17.2	例题分析与问题解答	184
17.3	习题	188
	参考答案	188
18	可编程序控制器	190
18.1	知识要点	190
18.2	例题分析与问题解答	196
18.3	习题	204
	参考答案	206
19	集散控制系统	209
19.1	知识要点	209
19.2	例题分析与问题解答	214
19.3	习题	217
	参考答案	217
20	现场总线控制系统	218
20.1	知识要点	218
20.2	例题分析与问题解答	224
20.3	习题	229
	参考答案	229
21	工业以太网	230
21.1	知识要点	230
21.2	例题分析与问题解答	233
21.3	习题	235
	参考答案	235

绪 论

典型的工业过程自动控制系统的一般结构如图 0.1 所示。它是由被控对象、检测与变送单元、显示单元、调节单元和执行单元等部分组成。

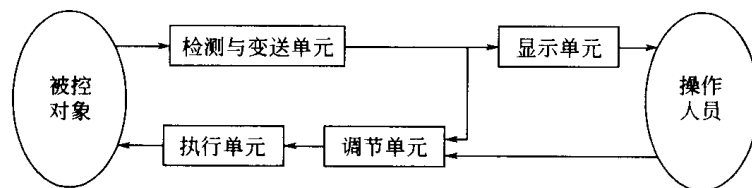


图 0.1 自动控制系统一般结构

被控对象是控制系统的核心。

检测与变送单元（包含检测仪表和变送器）是控制系统实现调节作用的基础。检测仪表对被控对象中的被控变量进行检测，变送器则将检测仪表输出的各种信号转换成统一的标准信号，如常见的 $0\sim 10\text{mA}$ 或 $4\sim 20\text{mA}$ 等。

显示单元是控制系统的附属单元，它通过指针、数字、曲线、图像等方式为操作人员提供被测参数的大小。

调节单元是控制系统的一个重要环节，它完成调节控制规律的运算。传统的调节单元是一台调节器，随着电子技术和计算机技术的发展，现在常采用可编程控制器（PLC）或计算机作为调节单元。

执行单元是控制系统实施控制策略的环节，通过执行单元改变被控对象的输出，使被控变量达到设定值。工业过程控制中常见的执行单元是调节阀。

本书根据控制系统各组成单元，按检测仪表、显示仪表、变送器、控制仪表（包括调节器、执行器等）顺序介绍相关的知识点并给出习题解答。

1

检测技术与检测仪表基础

1.1 知识要点

1.1.1 检测与检测技术

检测是认识自然界的主要手段，是科学研究、工业生产和军事等领域中不可缺少的过程。

检测技术是研究如何获取被测参数信息的一门科学。

检测的过程就是用敏感元件将被测参数的信息转换成另一种形式的信息，通过信息显示或其他形式被人们所认识。

1.1.2 检测仪表

一台检测仪表通常由敏感元件、信号变换、信号传输和处理以及显示装置等环节组成，其中敏感元件和显示装置是必须有的，其余的环节视测量的要求和敏感元件的性能等的不同而异。

测量系统是指由若干台检测仪表（或敏感元件）以及其他配套设备组成，完成一个确定的测量任务。

敏感元件是一种能够灵敏地感受被测参数并将被测参数的变化转换成另一种物理量的变化的元件。

传感器包含敏感元件，直接感受被测参数，并将被测参数的变化转换成一种易于传送的物理量。

变送器是一种特殊的传感器，它使用统一的电源，输出统一的标准化信号。目前变送器输出的标准信号有 4~20mA（称Ⅲ型仪表）和 0~10mA（称Ⅱ型仪表）等几种。

1.1.3 检测仪表的分类

检测仪表按照技术特点或使用范围的不同有各种分类方法。

- ① 按被测参数分类 可分为温度检测仪表、压力检测仪表和流量检测仪表等。
- ② 按仪表对被测参数的响应形式分类 可分为连续式检测仪表和开关式检测仪表。
- ③ 按仪表中使用的能源和主要信息的类型分类 可分为机械式仪表、电式仪表、气式仪表和光式仪表。
- ④ 按仪表是否具有远传功能分类 可分为就地显示仪表和远传式仪表。
- ⑤ 按仪表信号的输出（显示）形式分类 可分为模拟式仪表和数字式仪表。
- ⑥ 按仪表应用的场所分类 可分为普通型仪表、隔爆型仪表及本安型仪表。
- ⑦ 按仪表的结构方式分类 可分为开环结构仪表和闭环结构仪表。

1.1.4 开环结构仪表和闭环结构仪表

开环结构仪表由若干个环节串联组成，如图 1.1 所示。总的传递函数为各环节传递函数之积，而整台仪表的相对误差为各个环节相对误差之和。

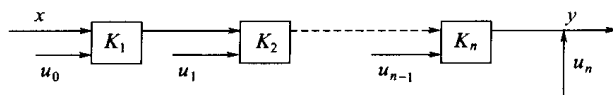


图 1.1 开环结构仪表组成框图

开环式的仪表一般结构较为简单，特别是当组成仪表的环节较多时，其准确度较低。

闭环结构仪表也称为平衡变换式仪表，由正向通道和反馈通道组成，如图 1.2 所示。设正向传递函数 K 为一阶滞后环节，即 $K = \frac{k}{1 + Ts}$ ，则可以推得

$$y = \frac{K_0 \frac{k}{1 + k\beta}}{1 + \frac{T}{1 + k\beta} s} x \quad (1.1)$$

式中， $\beta = \prod_{i=1}^m \beta_i$ ，为反馈通道的总传递函数。

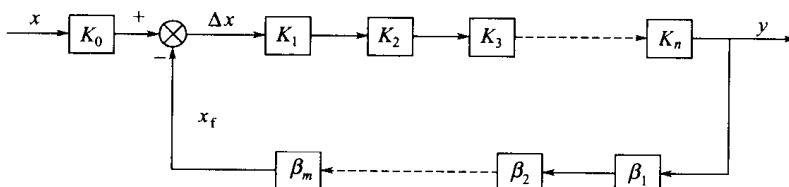


图 1.2 闭环结构仪表组成框图

由式 (1.1) 可知，闭环结构仪表的放大倍数和时间常数皆为开环结构仪表的 $1/(1 + k\beta)$ 。当 $k\beta$ 足够大时，总放大倍数（静态）为 K_0/β 。

闭环结构仪表相对开环结构仪表要复杂一些，稳定性较差；但反应速度快，线性好，准确度高。

1.1.5 检测仪表的基本性能

(1) 测量范围和量程

检测仪表在保证符合要求的前提下能够测量被测参数的最小值（测量下限）和最大值（测量上限）的范围。测量上限和测量下限的代数差称为仪表的量程。

(2) 输入-输出特性

① 灵敏度 S 是检测仪表对被测量变化的灵敏程度，即在被测量改变时，经过足够时间检测仪表输出值达到稳定状态后，仪表输出变化量 Δy 与引起此变化的输入变化量 Δx 之比，即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.2)$$

② 死区 是指检测仪表的输入量的变化不致引起输出量可察觉的变化的有限区间，在这个区间内，仪表的灵敏度为零。

③ 回差 也称变差，是反映检测仪表对于同一被测量在其上升和下降时对应输出值之间的差值。仪表的回差用所有测量点上的最大差值 Δ''_{\max} 与仪表量程比的百分数表示，即

$$\text{变差} = \frac{\Delta''_{\max}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (1.3)$$

④ 线性度 它是衡量检测仪表实际输入-输出特性偏离线性的程度，用非线性误差来表示，它是实际值与理论值之间的绝对误差的最大值 Δ'_{\max} 与仪表量程比的百分数，即

$$\text{非线性误差} = \frac{\Delta'_{\max}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (1.4)$$

(3) 稳定性

在工作条件保持恒定时，仪表输出值在一段时间内随机变动量的大小称为时间稳定性；而仪表在规定的使用条件内某个条件的变化对仪表输出的影响称为使用条件变化稳定性。

(4) 重复性与再现性

在相同测量条件下，对同一被测量，按同一方向多次测量时，检测仪表提供相近输出值的能力称为检测仪表的重复性。在规定的相对较长的时间内，对同一被测量从两个方向（由小到大以及由大到小）上重复测量时，检测仪表的各输出值之间的一致程度称为仪表的再现性。

(5) 可靠性

仪表的可靠性也称可靠度，是指仪表在确定的时期内和确定的外界条件下仪表工作在允许的性能水平（即无故障）的概率，用 $R(t)$ 表示。

故障率 λ 也是描述仪表可靠性的一个指标，它是指仪表工作到 t 时刻时单位时间内发生故障的次数，许多检测仪表在其多数工作时间内 λ 近似为常数，那么可靠度与故障率间有如下关系，即

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

平均无故障工作时间 (MTBF) 是仪表在相邻两次故障间隔内有效工作时的平均时间，设有 N 个检测仪表经受试验，在时间 T 内仪表失效总次数为 N_F ，则观测到的 MTBF 为

$$\text{MTBF} = \frac{NT}{N_F} \quad (1.6)$$

当 n 个检测仪表串联使用时，设它们各自的故障率为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ，则整个系统的可靠性是各个检测仪表的可靠性的乘积，即 $R = R_1 R_2 \dots R_n$ ，由此可得系统的故障率 $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$ 。

(6) 误差

① 绝对误差 Δx 是仪表输出值 x 与被测参数真值 x_0 之间的差值，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.7)$$

② 相对误差 δ_0 仪表的绝对误差与约定真值比的百分数，即

$$\delta_0 = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.8)$$

③ 引用误差 δ 仪表的绝对误差与仪表的量程比的百分数，即

$$\delta = \frac{\Delta x}{\text{量程}} \times 100\% \quad (1.9)$$

④ 仪表基本误差 在标准条件下，仪表在全量程范围内各输出值误差中绝对值最大者称为仪表的基本误差。仪表基本误差与仪表量程比的百分数称为仪表满刻度相对误差。

(7) 准确度与准确度等级

仪表的准确度通常用仪表满刻度相对百分误差略去百分号来表示，也称精度或精确度。将仪表的准确度划分为若干等级，称准确度等级。

按国家统一规定，准确度等级有 0.05, 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 等。仪表的准确度等级按以下方法确定，即先计算仪表的准确度，选其中数值上最接近又比该准确度大的准确度等级作为该仪表的准确度等级。准确度等级的数字越小，仪表的准确度越高，或者说仪表的测量误差越小。

(8) 动态特性

检测仪表的动态特性是指在动态测量时，随时间变化的输出量与输入量之间的关系。常见的检测仪表多为零阶、一阶或二阶系统。

① 零阶系统 零阶系统的传递函数 $G(s) = K$ ，其中， K 为静态灵敏度。说明输出量与输入量成确定比例关系，没有时间滞后。

② 一阶系统 一阶系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (1.10)$$

式中， τ 为一阶系统的时间常数。

图 1.3 给出了一阶系统的阶跃响应曲线。可以看出时间常数越小，系统响应越快，动态误差越小。

③ 二阶系统 二阶系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{K}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_0}s + \frac{1}{\omega_0^2}s^2} \quad (1.11)$$

式中， ω_0 为系统的固有频率； ζ 为阻尼比。显然， ω_0 和 ζ 决定了系统的动态特性。图 1.4 是二阶系统的阶跃响应曲线。当 $\zeta > 1$ 时，系统阻尼较大，上升时间较长；当 $\zeta < 1$ 并逐渐减小时，系统为欠阻尼，上升时间缩短，但出现超调， ζ 越小，超调越大。为了兼顾有短的上升时间和小的超调量，阻尼比在 0.7 比较合适。

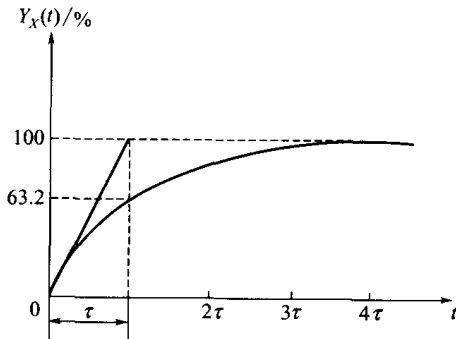


图 1.3 一阶系统的阶跃响应曲线

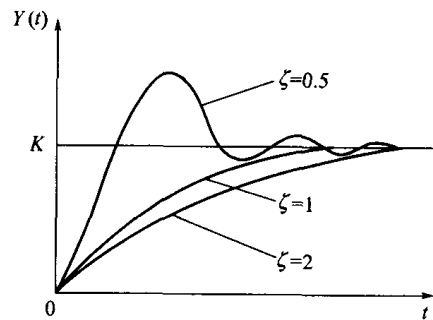


图 1.4 二阶系统的阶跃响应曲线

1.2 例题分析与问题解答

(以下例题来自《自动检测技术与装置》第 1 章，由张宏建、周洪亮解答)

【例 1.1】 开环仪表和闭环仪表各有什么优缺点？为什么？

答 开环仪表的优点是结构简单、成本低、稳定性好。但是开环仪表的相对误差为各环节的相对误差之和，环节越多，误差越大。

如果闭环仪表的正向传递函数很大，则仪表的特性主要取决于反馈通道的特性，所以闭环仪表具有准确度高、响应速度快等优点。由反馈理论可知，闭环仪表的稳定性较差，所以在仪表设计时要特别注意仪表的稳定性。

【例 1.2】 仪表的准确度等级是如何规定的？请列出常用的一些等级。

答 准确度是表征仪表的测量值接近真实值的程度，用仪表的满刻度相对误差（略去百分号）来衡量。仪表的准确度划分为若干个等级，称准确度等级，国家统一规定的准确度等级有 0.05, 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 等。

【例 1.3】 某弹簧管压力表的测量范围为 0~1.6MPa，准确度等级为 2.5 级，校验时在某点出现的最大绝对误差为 0.05MPa，问这块仪表是否合格？为什么？

答 该压力表的量程为 $1.6 - 0 = 1.6 \text{ MPa}$ ，压力表的基本误差为 0.05 MPa ，则满刻度相对误差为

$$\delta_{\max} = \frac{0.05}{1.6} \times 100\% = 3.1\% > 2.5\%$$

所以这块仪表不合格。

【例 1.4】 有一块压力表，其正向可测到 0.6 MPa ，负向可测到 -0.1 MPa 。现只校验正向部分，其最大误差发生在 0.3 MPa 处，即上行和下行时，标准压力表的指示值分别为 0.305 MPa 和 0.295 MPa 。问该表是否符合准确度等级为 1.5 级的要求？

答 该压力表的量程为 $0.6 - (-0.1) = 0.7 \text{ (MPa)}$

测量误差为 $\Delta_{\text{上}} = 0.305 - 0.3 = 0.005 \text{ (MPa)}$ ， $\Delta_{\text{下}} = 0.3 - 0.295 = 0.005 \text{ (MPa)}$

压力表的基本误差为 0.005 MPa ，满刻度相对误差为

$$\delta_{\max} = \frac{0.005}{0.7} \times 100\% = 0.714\% < 1.5\%$$

所以该压力表符合准确度等级为 1.5 级的要求（由于只校验正向部分，所以严格来说应除负向部分）。

（以下例题来自《自动检测技术》第 1 章，由王化祥、张淑英解答）

【例 1.5】 什么是检测装置的静态特性？其主要技术指标有哪些？

答 静态特性是指检测系统在被测量处于稳定状态时，输出量与输入量之间的关系特性。静态特性的主要技术指标有线性度、精度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨力、稳定性及可靠性等。

【例 1.6】 什么是检测装置的动态特性？其主要技术指标有哪些？

答 动态特性是指动态测量时，输出量与随时间变化的输入量之间的关系。动态特性的主要技术指标有动态误差、响应时间及频率特性等。

【例 1.7】 不失真测试对测量系统动态特性有什么要求？

答 ① 输入信号中各频率分量的幅值通过装置时，均应放大或缩小相同的倍数，即幅频特性是平行于横轴的直线。

② 输入信号各频率分量的相角在通过装置时作与频率成正比的滞后移动，即各频率分量通过装置后均延迟相同的时间 t ，其相频特性为一过原点并有负斜率的斜线。

【例 1.8】 测量系统动态特性参数测定常采用的方法有哪些？

答 动态特性参数测定方法常因测量系统的形式不同而不完全相同，从原理上一般可分为正弦信号响应法、阶跃信号响应法、脉冲信号响应法和随机信号响应法等。

【例 1.9】 某位移传感器，在输入位移变化 1 mm 时，输出电压变化 300 mV 。求其灵敏度。

解 灵敏度可采用输出信号与输入信号增量比表示，即

$$K = \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{300}{1} = 300 \text{ (mV/mm)}$$

【例 1.10】 用标准压力表来校准工业压力表时，应如何选用标准压力表精度等级？可否用一台精度等级为 0.2 级，量程为 $0 \sim 25 \text{ MPa}$ 的标准表来检验一台精度等级为 1.5 级，量程为 $0 \sim 2.5 \text{ MPa}$ 的压力表？为什么？

解 选择标准压力表来校准工业用压力表时，首先两者的量程要相近，并且标准表的精度等级要高于被校表的精度等级，至少要高一个等级。题中的标准表精度等级为 0.2 级，量程为 $0 \sim 25 \text{ MPa}$ ，则该标准表可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta_{\max 1} = (25 - 0) \times 0.2\% = 0.05 \text{ (MPa)}$$

被校表精度等级为 1.5 等级，量程为 0~2.5MPa，其可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta_{\max 2} = (2.5 - 0) \times 1.5\% = 0.0375 \text{ (MPa)}$$

显然， $\Delta_{\max 1} > \Delta_{\max 2}$ ，这种选择是错误的，因为虽然标准表精度等级较高，但是它的量程太大，故不符合选择的原则。

【例 1.11】 某一阶系统，在 $t=0$ 时，输出为 10mV； $t \rightarrow \infty$ 时，输出为 100mV；在 $t=5$ s 时，输出为 50mV，试求该系统的时间常数 τ 。

解 对一阶系统在阶跃响应曲线后，输出值达到阶跃值为 63.2% 所用时间为一阶测量系统的时间常数 τ 。但这样确定 τ 值没有涉及响应全过程，为此采用如下方法，可以获得较为可靠的 τ 值。由一阶系统的阶跃响应曲线表达式

$$y(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})x$$

可得出

$$1 - \frac{y(t)}{kx} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

令 $z = -\frac{t}{\tau}$ ，则 $z = \ln\left[1 - \frac{y(t)}{kx}\right]$ 。

由以上分析可见， z 与 t 成线性关系，此处设静态灵敏度系数 $k=1$ ，输入阶跃信号为

$$x = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 100\text{mV}, & t \geq 0 \end{cases}$$

由题意给出的 $y(t)$ 值，可以计算作出 $z-t$ 直线，如图 1.5 所示：

$$t=0\text{s}, z = -0.1053$$

$$t=5\text{s}, z = -0.6931$$

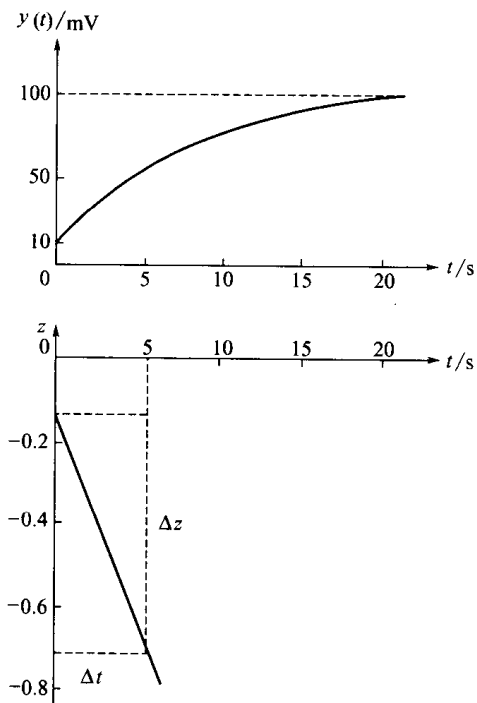


图 1.5 例 1.11 图

则 τ 值为 $z-t$ 直线的斜率，即

$$\tau = -\frac{\Delta t}{\Delta z} = \left| -\frac{5}{-0.5878} \right| = 8.5 \text{ (s)}$$

【例 1.12】 某二阶系统力传感器，已知系统固有频率 $f_0 = 10\text{kHz}$ ，阻尼比 $\zeta = 0.6$ ，如果要求其幅值误差小于 10%，求其可测信号频率范围。

解 讨论系统动态特性时, 常用无量纲幅值比 $A(\omega)$, 即

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

令静态灵敏度系统 $K=1$, 由题意要求幅值误差小于 10%, 则要满足

$$A(\omega) \geq 1 - 10\% = 90\%$$

故得

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} = 0.9$$

将 $K=1$ 和 $\zeta=0.6$ 代入上式解出方程式的解得

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 0.84$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = 0.9165 \quad \text{或} \quad \frac{f}{f_0} = 0.9165$$

$$f = 0.9165f_0 = 9.165 \text{ (kHz)}$$

所以可测频率最高达 9.165kHz。

【例 1.13】 已知某测量系统静态特性方程为 $Y=e^X$, 试分别用端基法、最小二乘法, 在 $0 < X < 1$ 范围内拟合刻度直线方程, 并求出相应线性度。

解 (1) 端基法

在测量两端点间连直线为拟合直线① $Y=a_0+KX$, 则 $a_0=1$, $K=\frac{e-1}{1-0}=1.718$, 得端基法刻度直线方程为 $Y=1+1.718X$ 。

由 $\frac{d[e^X - (1+1.718X)]}{dX} = 0$ 解得 $X=0.5413$ 处存在最大偏差

$$\Delta Y_{\max} = |e^X - (1+1.718X)|_{X=0.5413} = 0.2118$$

得端基法线性度

$$\delta_L = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.2118}{e-1} \times 100\% = 12.3\%$$

(2) 最小二乘法

求拟合刻度直线②。根据计算公式测量范围分成 6 等份, 取 $n=6$, 如表 1.1 所列。

表 1.1 例 1.13 表

X	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Y	1	1.221	1.492	1.822	2.226	2.718
X ²	0	0.04	0.16	0.36	0.64	1
XY	0	0.2442	0.597	1.093	1.781	2.718

计算得 $\sum X=3$, $\sum Y=10.479$, $\sum XY=6.433$, $\sum X^2=2.2$

由公式得

$$a_0 = \frac{\sum XY \cdot \sum X - \sum Y \cdot \sum X^2}{(\sum X)^2 - n \sum X^2} = \frac{6.433 \times 3 - 10.479 \times 2.2}{3^2 - 6 \times 2.2} = 0.894$$

$$K = \frac{\sum X \cdot \sum Y - n \sum XY}{(\sum X)^2 - n \sum X^2} = \frac{3 \times 10.479 - 6 \times 6.433}{3^2 - 6 \times 2.2} = 1.705$$

得最小二乘法拟合直线方程为

$$Y = 0.894 + 1.705X$$

由 $\frac{d[e^X - (0.894 + 1.705X)]}{dX} = 0$ 解出 $X = 0.5335$ 。故

$$\Delta Y_{\max} = |e^X - (0.894 + 1.705X)|_{X=0.5335} = 0.0987$$

得最小二乘法线性度

$$\delta_L = \frac{0.0987}{e-1} \times 100\% = 5.75\%$$

此题计算结果表明，用最小二乘法拟合的刻度直线 δ_L 值最小，因而此法拟合精度最高，在计算过程中 n 取值越大，则其拟合刻度直线 δ_L 值越小。用两种方法拟合刻度直线如图 1.6 所示。

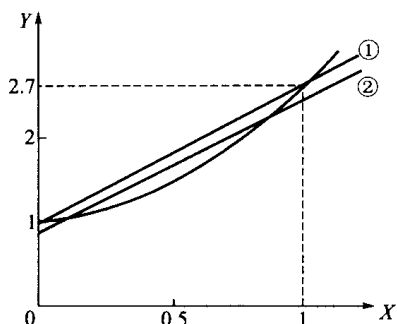


图 1.6 例 1.13 图

【例 1.14】某玻璃水银温度计微分方程式为 $4 \frac{dQ_0}{dt} +$

$2Q_0 = 2 \times 10^{-3} Q_i$ ，式中， Q_0 为水银柱高度，m； Q_i 为被测温度， $^{\circ}\text{C}$ 。试确定该温度计的时间常数和静态灵敏度系数。

解 该温度计为一阶传感器，其微分方程基本形式为 $a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_0 X$ ，此式与已知微分方程比较可得时间常数与静态灵敏度系数，即

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} = \frac{4}{2} = 2\text{s}$$

$$K = \frac{b_0}{a_0} = \frac{2 \times 10^{-3}}{2} = 10^{-3} \text{ (m/}^{\circ}\text{C)}$$

【例 1.15】某压电式加速度计动态特性可用下述微分方程描述，即

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 3.0 \times 10^3 \frac{dq}{dt} + 2.25 \times 10^{10} q = 11.0 \times 10^{10} a$$

式中， q 为输出电荷，pC； a 为输入加速度， m/s^2 。试确定该测量装置的固有振荡频率 ω_0 、阻尼系数 ζ 、静态灵敏度系数 K 的值。

解 该加速度计为二阶传感器，其微分方程基本形式为

$$a_2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_0 X$$

此式与已知微分方程式比较可得

$$\text{静态灵敏度系数 } K = \frac{b_0}{a_0} = \frac{11.0 \times 10^{10}}{2.25 \times 10^{10}} = 4.89 \text{ [pC/(m/s}^2\text{)]}$$

$$\text{固有振荡频率 } \omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} = \sqrt{\frac{2.25 \times 10^{10}}{1}} = 1.5 \times 10^5 \text{ (rad/s)}$$

$$\text{阻尼系数 } \zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}} = \frac{3.0 \times 10^3}{2\sqrt{2.25 \times 10^{10} \times 1}} = 0.01$$

(以下例题来自《自动检测技术》第 3 章，由王化祥、张淑英解答)

【例 1.16】什么是测量系统的可靠性与不可靠性？二者有什么关系？

答 可靠性是指在确定时期内和确定的外界条件下，元件（或系统）工作在允许的性能水平的概率。用 $R(t)$ 表示。

不可靠性是指在确定时间内和确定条件下，元件（或系统）不能工作在允许的性能水平的概率。用 $F(t)$ 表示。

二者关系为可靠性和不可靠性之和必须是 1, 即

$$R(t) + F(t) = 1$$

【例 1.17】 什么是设备的故障率 λ ? 它与 $R(t)$ 和 $F(t)$ 有何关系?

答 故障率是每个设备在单位时间内平均故障次数。若有 N 个一样的元件 (或系统), 在 T 时间内失效总次数为 N_F , 则故障率可表示为

$$\lambda = \frac{N_F}{NT}$$

故障率 λ 与可靠性 $R(t)$ 和不可靠性 $F(t)$ 的关系如下, 即

$$R(t) = e^{-\lambda t}, F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

【例 1.18】 简述改进系统可靠性的方法有哪些?

答 最简单有效的方法是选择好的材料和部件, 使其能耐受恶劣环境。其次是设计系统时采用多余度的方式, 可进一步改善可靠性, 但是这会提高价格和增加复杂性。

【例 1.19】 一个热电偶测量系统如图 1.7 所示。其中各部分的故障率 $\lambda_1 = 1.27 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$, $\lambda_2 = 1.16 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$, $\lambda_3 = 1.16 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ 。试计算该系统的平均无故障工作时间 MTBF, 即工作半年 (4320h) 时的可靠度。

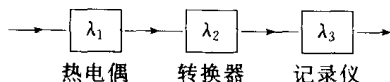


图 1.7 例 1.19 图

解 由图可知该串联系统的故障率 λ 为

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$$

平均无故障工作时间 MTBF 为

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} = 6667 \text{ h}$$

工作半年 ($t=4320\text{h}$) 后的可靠度为

$$R(t) = R(4320) = e^{-\lambda t} = e^{-1.5 \times 10^{-4} \times 4320} = 0.523$$

【例 1.20】 某厂仪表组负责维修 40 台变送器、30 台调节器、25 台记录仪, 它们的平均无故障工作时间 MTBF 分别为 5000h、3000h、8000h。试估计一年内维修组的工作任务。

解 根据公式 $\text{MTBF} = \frac{NT}{N_F}$ 可求出有故障机器数 N_F , 设一年工作时间 $T=8640\text{h}$, 则维修组工作任务分别计算如下。

变送器: $N_1=40$ 台, $\text{MTBF}_1=5000\text{h}$

$$N_{F1} = \frac{N_1 T}{\text{MTBF}_1} = 40 \times \frac{8640}{5000} = 69 \text{ (台)}$$

调节器: $N_2=30$ 台, $\text{MTBF}_2=3000\text{h}$

$$N_{F2} = 30 \times \frac{8640}{3000} = 86 \text{ (台)}$$

记录仪: $N_3=25$ 台, $\text{MTBF}_3=8000\text{h}$

$$N_{F3} = 25 \times \frac{8640}{8000} = 27 \text{ (台)}$$

【例 1.21】 已知某产品故障率为常数 λ , 且要求在使用 1000h 后的可靠度仍在 80% 以上。问此产品故障率必须低于多少才能满足要求?

解 根据可靠度 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 可求出 λ 。

$$R(1000) = e^{-\lambda 1000} = 80\%$$