

高等学校教材

东南大学 王其生 编著

传感器例题 与习题集

机械工业出版社

高等学校教材

传感器例题与习题集

东南大学 王其生 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书是根据高校教材《传感器》的系统和内容编写的。

全书共十章，内容丰富，每章都有大量的例题和习题，将有助于提高教学效果，进一步扩大学生的知识面和提高工程设计能力。

本书与教材《传感器》配套，供精密仪器专业使用，亦可供检测技术与仪器、仪表与测试、计量测试、自动控制等专业的师生和有关工程技术人员参考。

传感器例题与习题集

东南大学 王其生 编著

*

责任编辑：贡克勤 责任校对：丁丽丽

封面设计：姚毅 版式设计：冉晓华

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $47/8$ ·字数 104 千字

1993年10月北京第1版·1993年10月北京第1次印刷

印数 0 001—3 400·定价：3.20元

*

ISBN 7-111-03717-0/TM·468(译)



前 言

哈尔滨工业大学强锡富教授主编的《传感器》于1989年6月由机械工业出版社出版以来已印刷了两次，被国内很多高等院校有关专业作为教科书并被评为机械电子工业部优秀教材。本书是为该书配套而编写的。

传感器是现代测控系统中的关键环节，它在生产过程自动化、基础科学研究、军事科学技术、生物医学工程和计量等领域中都具有突出的地位，甚至渗透到宇宙和海洋探索、环境保护、资源调查、家用电器、农业生产与管理、文物保护等极其广泛的领域中。因此，它的种类繁多，使得传感器课程成为一门综合性、理论性和实践性都很强的课程，涉及的知识面很广。

近几年来，随着科学技术的发展，国内外有关传感器的教材、参考书日益增多，但绝大多数缺少例题和习题。为弥补这一不足，我们根据该课程的特点编写了这本例题与习题集，其中对大量的例题阐述了解题的依据和步骤，给出了计算题的答案。作者期望该书能有助于提高教学效果，进一步扩大学生的知识面和提高工程设计能力。

主审强锡富教授在百忙中审阅了全书，提出了很多宝贵意见和建议。在本书编写过程中，除参考了有关文献外，还收到了中国计量学院张云骏副教授和上海机械学院轻工分院董白波老师寄来的有关素材；东南大学安福生、王玉生老师和宜兴市护卡膜厂蒋国新厂长也给予了很大支持。在此谨表

衷心的感谢。

由于作者水平有限，实践经验不足，不妥和错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

王其生

1992年3月于东南大学

目 录

前言

第一章 传感器的一般特性	1
第一节 例题	1
第二节 习题	12
第二章 电阻式传感器	16
第一节 例题	16
第二节 习题	26
第三章 电感式传感器	42
第一节 例题	42
第二节 习题	57
第四章 电容式传感器	65
第一节 例题	65
第二节 习题	73
第五章 压电式传感器	79
第一节 例题	79
第二节 习题	87
第六章 磁电式传感器	97
第一节 例题	97
第二节 习题	109
第七章 光电式传感器	113
第一节 例题	113
第二节 习题	121
第八章 热电偶、超声波、核辐射检测	126

第一节 例题	126
第二节 习题	133
第九章 谐振式传感器	136
第一节 例题	136
第二节 习题	138
第十章 力平衡式传感器	139
第一节 例题	139
第二节 习题	144
参考文献	146

第一章 传感器的一般特性

第一节 例 题

例1-1 一只压力传感器的校准数据如表1-1所列，试求：①端点连线平移线性度。②最小二乘法线性度。③重复性。④迟滞误差。⑤总精度。

表1-1 已知的传感器校准数据

输出电压 y_i (V)		输入压力 x_i ($\times 10^5$ Pa)					
		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
1	正行程	0.0020	0.2015	0.4005	0.6000	0.7995	1.0000
	反行程	0.0030	0.2020	0.4020	0.6010	0.8005	
2	正行程	0.0025	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9995
	反行程	0.0035	0.2030	0.4020	0.6015	0.8005	
3	正行程	0.0035	0.2020	0.4010	0.6000	0.7895	0.9990
	反行程	0.0040	0.2030	0.4020	0.6010	0.8005	

解

1. 先求出一些基本数值

1) 求出各个校准点正、反行程校准数据的算术平均值和迟滞值，列于表1-2中。

$$\text{算术平均值 } \bar{y}_i = \frac{1}{2} (y_{i1} + y_{i2})$$

$$\text{迟滞值 } \Delta H = |y_{i1} - y_{i2}|$$

表1-2 端点连线平移法和最小二乘直线法各项数据

压力 ($\times 10^5$ Pa) x	平均值 (V)		迟滞值 ΔH (V)	子样方差平方根		子样标准偏差 S	端点连线 $y = 0.0031 + 0.39856x$		
	正行程	反行程		正行程 S_{JI}	反行程 S_{JD}		理论值	系统误差	
							y (V)	正行程 (ΔL)'	反行程 (ΔL)'' (V)
0	0.0027	0.0035	0.0008	0.0008	0.0005	0.0004	0.0031	-0.0004	+0.0004
0.5	0.2018	0.2027	0.0009	0.0003	0.0005		0.2024	-0.0006	+0.0003
1.0	0.4008	0.4020	0.0012	0.0003	0.0000		0.4017	-0.0009	+0.0003
1.5	0.6000	0.6012	0.0012	0.0000	0.0003		0.6009	-0.0009	+0.0003
2.0	0.7995	0.8005	0.0010	0.0000	0.0000		0.8002	-0.0007	+0.0003
2.5	0.9995	0.9995	0	0.0005	0.0005		0.9995	0	0

压力 ($\times 10^5$ Pa) x	正行程 平均值 $\bar{y}_I$ (V)	端点连线平移线 $y = 0.00285 + 0.39856x$		最小二乘直线 $y = 0.00293 + 0.39850x$			
		理论值 y (V)	非线性误差 ΔL (V)	理论值 y (V)	系统误差		非线性误差 ΔL (V)
					正行程 (ΔL)' (V)	反行程 (ΔL)'' (V)	
0	0.0031	0.0028	0.0003	0.0030	-0.0003	+0.0005	+0.0001
0.5	0.2023	0.2021	0.0002	0.2023	-0.0005	+0.0004	+0.0000
1.0	0.4014	0.4014	0.0000	0.4015	-0.0007	+0.0005	-0.0001
1.5	0.6006	0.6007	0.0001	0.6008	-0.0008	+0.0004	-0.0002
2.0	0.8000	0.8000	0.0000	0.8000	-0.0005	+0.0005	0
2.5	0.9995	0.9992	0.0003	0.9993	+0.0002	+0.0002	+0.0002

上两式中: $\bar{y}_I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{JI}$, $\bar{y}_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{JD}$, I 表示正行程, D 表示反行程, n 为重复测量序数, 这里 $n=3$, $i=1, 2, 3$.

程, D 表示反行程, n 为重复测量序数, 这里 $n=3$, $i=1, 2, 3$.

2) 由子样方差公式知

$$S_{jI}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiI} - \bar{y}_j)^2$$

$$S_{jD}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiD} - \bar{y}_j)^2$$

上式中的 $n=3$, j 分别为 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ($\times 10^5 \text{Pa}$) 压力。计算结果列于表1-2中。

3) 由子样标准偏差公式求出 S 值, 当 $m=6$,

$$S = \sqrt{\frac{1}{2m} \left(\sum_{i=1}^n S_{jiI}^2 + \sum_{i=1}^n S_{jiD}^2 \right)}$$

计算得 $S=0.0004$ 。

2. 按端点连线平移线法计算各性能指标

1) 端点连线的截距、斜率、方程式、理论值和系统误差

已知 $x_1 = 0 \text{Pa}$ $\bar{y}_1 = 0.0031 \text{V}$

$x_m = 2.5 \times 10^5 \text{Pa}$, $\bar{y}_m = 0.9995 \text{V}$

求得截距 $b = \frac{\bar{y}_1 x_m - \bar{y}_m x_1}{x_m - x_1} = 0.0031$

斜率 $k = (\bar{y}_m - \bar{y}_1) / (x_m - x_1) = 0.39856$

端点连线方程为 $y = 0.0031 + 0.39856x$

由该方程式可以计算出各校准点的理论值, 以及正、反行程的系统误差(即正、反行程各点的算术平均值与理论值之差), 这些值列于表1-2中。

2) 端点连线平移线的截距、斜率、方程、理论值和非线性误差。先算出各标准点上相对于端点连线的最大正误差 $(\Delta L)'_{\max} = 0.0004$ 和最大负误差 $(\Delta L)''_{\max} = 0.0009$, 由此便可

求得其截距和斜率:

$$b = y_1 + \frac{|(\Delta L)_{\max}'| - |(\Delta L)_{\max}'|}{2} = 0.00285$$

$$k = k_1 = 0.39856$$

这样, 端点连线平移线的方程为

$$y = 0.00285 + 0.39856x$$

由该方程可求出各校准点的端点连线的理论值和非线性误差, 即正、反行程校准数据算术平均值与理论值之差, 这些值也列于表1-2。

3) 各性能指标计算

①理论满量程输出

$$y_{r.s} = |(x_m - x_1)k| = 0.9964(\text{V})$$

②重复性取置信系数 $\lambda = 3$, $S = 0.0004$

$$v_R = \frac{\lambda \cdot S}{y_{r.s.}} \times 100\% = 0.12\%$$

③线性度

$$v_L = \frac{\Delta L_{\max}}{y_{r.s.}} \times 100\% = 0.03\%$$

④迟滞误差

$$v_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{y_{r.s.}} \times 100\% = 0.06\%$$

⑤精度。由于最大系统误差 $(\Delta L)_{\max} = 0.0007$, 并取置信系数 $\lambda = 3$, 则精度为

$$\sigma = \frac{|(\Delta L)_{\max}| + \lambda S}{y_{r.s.}} \times 100\% = 0.19\%$$

3. 按最小二乘法计算各性能指标: 截距、斜率、方程式、理论值和系统误差。由已知数据可以求出:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{33} x_i &= 37.5 & \sum_{i=1}^{33} y_i &= 15.0425 \\ \sum_{i=1}^{33} x_i y_i &= 25.5618 & \sum_{i=1}^{33} x_i^2 &= 63.75\end{aligned}$$

则 $k = 0.39853$ $b = 0.002986$

方程式为

$$y = 0.002986 + 0.39853x$$

依此方程计算出的理论值，系统误差和非线性误差都列于表1-2中。

①理论满量程输出

$$y_{f.s.} = |(x_m - x_1)k| = 0.9964V$$

②重复性 取置信系数 $\lambda = 3$ ， $S = 0.0004$

$$v_R = \frac{\lambda S}{y_{f.s.}} \times 100\% = 0.12\%$$

③线性度

$$v_L = \frac{\Delta L_{max}}{y_{f.s.}} \times 100\% = 0.03\%$$

④迟滞误差

$$v_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{max}}{y_{f.s.}} \times 100\% = 0.06\%$$

⑤精度

$$v = \frac{|\Delta L_{max}| + \lambda S}{y_{f.s.}} \times 100\% = 0.19\%$$

从以上计算结果可以看出：用端点连线平移线和最小二乘法分别求出的性能数据是相同的。

例1-2 液体温度传感器是一阶传感器，现已知某玻璃水银温度计特性的微分方程式为

$$4 \frac{dy}{dt} + 2y = 2 \times 10^{-3} x$$

式中 y —— 水银柱高(m);

x —— 被测温度($^{\circ}\text{C}$)。

试确定该温度计的时间常数及静态灵敏度。

解 一阶传感器的方程式为

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

或为

$$(\tau s + 1)y = kx$$

式中 $\tau = a_1/a_0$ —— 时间常数(s);

$k = b_0/a_0$ —— 静态灵敏度, 以 y/x 的比值为单位。

于是可得, 温度计的时间常数 $\tau = 2\text{s}$, 静态灵敏度 $k = 10^{-3} \text{ m}/^{\circ}\text{C} = 1\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ 。

例1-3 若一阶传感器的时间常数为0.01s, 传感器响应的幅值百分误差在10%范围内, 此时 $\omega\tau$ 最高值达0.5, 试求此时输入信号的工作频率范围。

解 一阶系统的标准的频率响应曲线(幅频曲线)如图1-1所示。它说明幅值比随频率变化的情况。由图可见, 在 $\omega\tau = 0.3$ 的范围内时, 幅值失真很小。若系统响应的幅值百分误差在10%范围内, 即相当于幅值比应大于

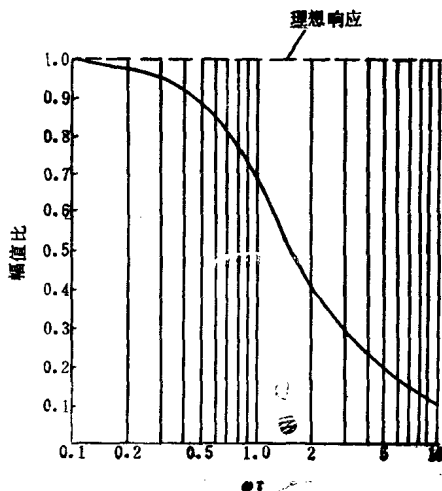


图 1-1

0.9, 则此时 $\omega\tau$ 最高可达0.5。

所以可用 $\omega\tau=0.5$ 来确定输入信号工作频率范围上限, 即可得上限频率为

$$\omega = 0.5 / \tau = 0.5 / 0.01 = 50 \text{ rad/s}$$

或

$$f = 50 / 2\pi = 8 \text{ Hz}$$

也就是说, 所求工作频率范围为 $0 \sim 8 \text{ Hz}$ 。

例1-4 某一阶系统的时间常数为 6 ms , 试求出相应于 $\omega\tau = 1$ 时的频率, 并概略算出在此频率处幅值的百分误差。

解

$$\because \omega\tau = 1$$

故频率

$$\omega = 1 / \tau = 166.7 \text{ rad/s}$$

或

$$f = 26.5 \text{ Hz}$$

又从图1-1可见, 在 $\omega\tau = 1$ 处, 幅值比 ≈ 0.7 。

所以所求幅值百分误差为30%。

例1-5 某一质量、弹簧、阻尼系统在受到阶跃输入激励时, 出现的第一个超调量约为最终值的40%。如果从阶跃输入开始至第一个超调量出现所需时间为 0.8 s , 试估算阻尼比 ξ 和自振角频率 ω_0 的大小。

解 质量—弹簧—阻尼系统是二阶系统, 其方程为

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

也可写成 $(\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1)y = kx$

式中 τ ——时间常数, $\tau = \sqrt{a_2/a_0}$;

ω_0 ——自振角频率, $\omega_0 = 1/\tau$;

ξ ——阻尼比, $\xi = a_1/(2\sqrt{a_0 a_2})$;

k ——静态灵敏度, $k = b_0/a_0$ 。

需要指出: 自振角频率 ω_0 是衡量二阶系统响应速度的一种尺度, ω_0 值越大, 表示系统对瞬态变化的响应越快。

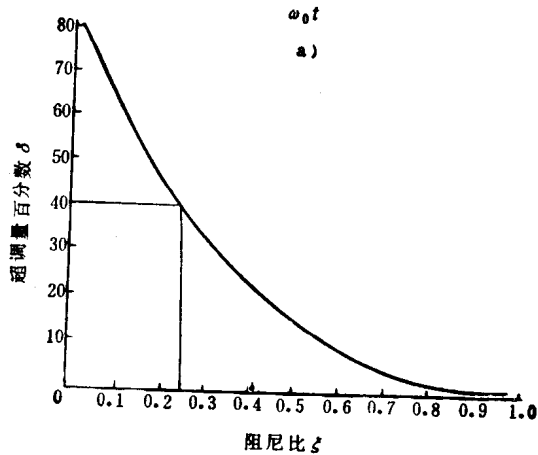
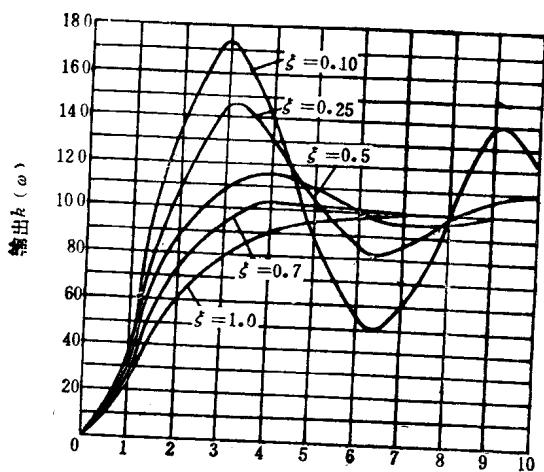
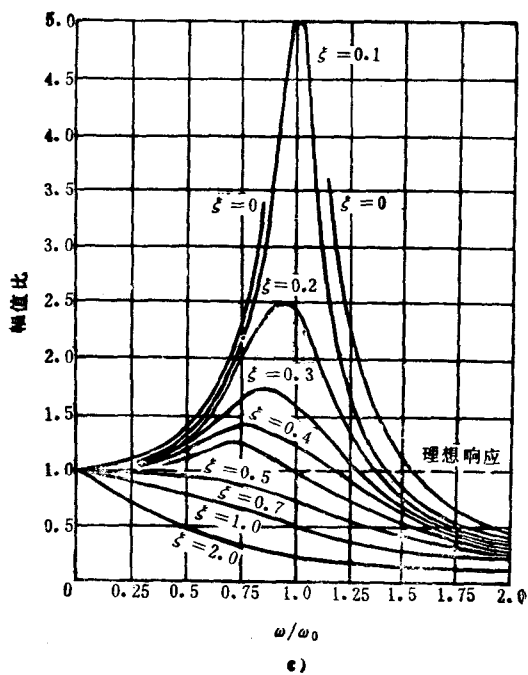


图 1
a) 二阶系统的阶跃响应 b) 百分数超调量与



阻尼比 ξ 则是系统存在阻尼的一种量度，它等于实际阻尼系数与临界阻尼系数之比， ξ 值的大小决定了阶跃响应和频率响应的形式。

1) 阶跃响应 二阶系统的阶跃响应并不只有一种形式，根据系统阻尼 ξ 的大小不同，可以有无数种形式。图1-2a示出对应于几种 ξ 值的二阶系统阶跃响应曲线，它说明超调量和振荡随着阻尼比减小而增加。

图1-2b所示是描述第一个超调量与阻尼比之间关系的实用曲线。

2) 频率响应 由图1-2c表示典型的二阶系统的频率响应曲线族可以看出，对于阻尼很小的系统，如果输入信号的频率接近系统的自振频率，便有谐振现象；如果输入频率增高到远超过自振频率时，则幅值比将大大减小，说明系统响应不了这么高的频率。理想的频率响应应该对所有输入频率都具有同样的幅值比。就阻尼比而言，接近理想状态的响应范围是 $\xi = 0.6 \sim 0.7$ 。必须指出， ξ 的“最佳值”是为获得阶跃信号和正弦信号的最佳响应而提出的。然而有些二阶传感器专门设计在过阻尼状态下工作，并不要求迅速响应变化的信号，而仅给出平均值，这时， ξ 的最佳值应是最大的。

了解上述数学模型、阶跃响应和频率响应后，便可对例题作出解答。

从图1-2b可见，40%超调量所对应的 ξ 值约为0.25，由此便可利用图1-2a来确定 ω_0 值。在 $\xi = 0.25$ 曲线的第一个超调量处，有

$$\omega_0 t = 3.2$$

因此，自振频率