

图解实用电子技术丛书

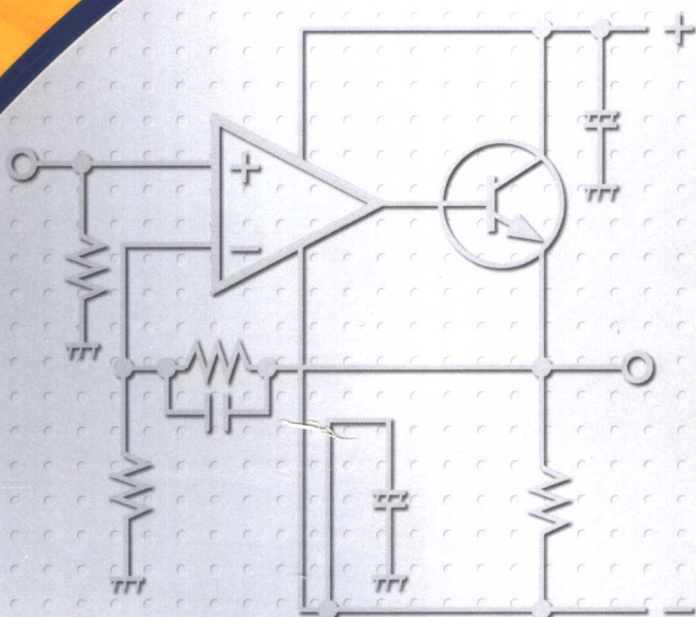
模拟技术应用技巧

101 例

通过实验学习提高电路性能技巧

〔日〕稻叶 保 著

关 静 胡圣尧 译

科学出版社
www.sciencep.com

图解实用电子技术丛书

模拟技术应用技巧 101 例

通过实验学习提高电路性能技巧

〔日〕 稻叶 保 著

关 静 胡圣尧 译

科 学 出 版 社

北 京

图字: 01-2005-1165 号

内 容 简 介

本书是“图解实用电子技术丛书”之一。本书共分 11 章,第 1 章到第 3 章介绍 RC 电路的有效使用方法;第 4 章到第 6 章针对电感的电路技术、电源线路用滤波器技术、模拟电路和高速逻辑电路混合电路板的噪声对策技术进行讲解;第 7 章和第 8 章阐述了 OP 放大器电路及周边电路,并针对典型电路进行介绍;第 9 章介绍二极管的使用方法、整流、箝位电路、高速绝对值电路、PIN 二极管电路等;第 10 章介绍晶体管、功率 MOSFET 等分立电路的高性能化及其基本事项;第 11 章是实践经验部分。

本书采用大量波形照片,配有丰富的图表,即使没有搭建电路,也能使读者在视觉上把握其动作、特性,并掌握提高基本电路性能的技巧。

本书可供从事模拟技术开发及电路设计的技术人员参考,也可供大专院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

模拟技术应用技巧 101 例/(日)稻叶保著;关静,胡圣尧译. —北京:科学出版社,2006

(图解实用电子技术丛书)

ISBN 7-03-016530-6

I. 模… II. ①稻…②关…③胡… III. 模拟电路-电子技术 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 140289 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科苑图文有限公司 制作

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

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 1 月第一次印刷 印张: 16

印数: 1—4 000 字数: 239 000

定 价: 30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前言

随着通信技术、信息技术的高速发展,在要求模拟电路的电气特性飞跃发展的今天,当然也要求与之相对应的各种半导体设备的高性能化。

比如通过高频段使用的 OP 放大器、对应数百 MHz 的超高速 A-D/D-A 变换器、千兆赫频段的 RF 单片 IC 等的出现,使得电路板设计技术者的劳动正在显著减少,剩下的是技术者如何利用这些高性能化的电子设备的技能。但是,这些高性能设备能像以往那样,仅连接 IC、LSI 间的端子就能使其稳定动作吗?

观察实际的产品化的电路图,会发现在教科书的电路以外,实际安装了很多元件,如铁氧体磁心、电阻、电容等。这是由于伴随着高性能化、高频率化的发展,仅标准的电路技术已经不能解决问题,除基本的电子电路技术以外,还要求元件的知识、安装技术等。

要想了解电路的动作、电气特性,必须首先实际搭建出评估电路,然后输入信号,变化负载、温度、电源电压等,评估其电气特性、动作如何变化。

现实中经常有技术人员以没有时间为理由,在设计、制作印制线路板后,还会进行电路参数的变更、图形的更换,在不易察觉的地方又安装上电容等。

本书正是为这些没有时间的技术人员而准备的,采用大量波形照片,即使没有搭建电路,也能从视觉上把握其动作、特性,并介绍提高基本电路性能的技巧。

从第 1 章到第 3 章介绍电子电路中最重要电阻、电容,即 RC 电路的有效使用方法,这看起来似乎很简单,但却是最核心、重要的部分。

第 4 章到第 6 章针对线圈(电感)的电路技术、电源线路用滤波器技术、模拟电路和高速逻辑电路混合电路板的噪声对策技术进行了解说。

第 7 章和第 8 章阐述了 OP 放大器电路及周边电路,并针对几个电路例子进行了介绍。现在,使用 OP 放大器就能很简单地

实现高性能的模拟电路。OP 放大器的“反馈技术”，即通过外加反馈电路，就能很容易地实现具有各种各样特性的电路。

第 9 章针对二极管的使用方法、整流、箝位电路、高速绝对值电路、PIN 二极管电路进行了解说。

第 10 章介绍了晶体管、功率 MOSFET 等的分立电路的高性能化及其基本事项。

第 11 章介绍了作者的实验经验，可使读者深切感受到电阻、电容的分类使用的重要性。

本书的波形照片、测量数据，都是实验电路的实测值，会随着测量条件、元件的偏差而发生变化，因此，不能以测量波形中表示的测量数据为依据而进行设计。

本书使用的主要测量仪器如下：

- 示波器——索尼公司的 TDS350P 及 2465
- 频谱分析仪——ADVANTEST 公司的 TR4171
- 阻抗增益/相位分析仪——安捷伦公司的 HP-4194A
- 信号发生器、脉冲发生器——安捷伦公司的 33120A，安立公司的 MG443B, MG418A
- 电流探测器——索尼公司的 AM503

本书是对 CQ 出版株式会社的月刊《晶体管技术》1997 年 1 月号～1998 年 9 月号连载的“Live Studiot”的再编辑和撰写。

最后衷心感谢在出版过程中给予本书极大支持的 CQ 出版株式会社编辑局长蒲生良治先生。

目 录

第 1 章 活用 RC 基本特性的电路实验 1

- 1 RC 低通滤波器的响应特性 1
- 2 高速化 RC 低通滤波器的上升响应 3
- 3 用 RC 低通滤波器防止振荡 5
- 4 利用 RC 产生积极的延迟电路 8
- 5 接通延迟电路和断开延迟电路的应用 10
- 6 波形边沿检测电路的应用 12
- 7 电力开关中不可缺少的死区时间发生电路 14
- 8 保护 CMOS 数字 IC 的输入 15

第 2 章 高频波中电阻的动作和特性的影响 19

- 9 注意电流检测用电阻的频率特性 19
- 10 电阻分割中浮游电容、放大器输入电容的影响 ... 22
- 11 分压比由开关切换的增益控制器 24
- 12 输入电阻 $10\text{M}\Omega$, $100:1$ 的增益控制器 27
- 13 高频用低阻抗增益控制器 30
- 【专栏】示波器 $100:1$ 探头的实际情况 31

第 3 章 用于电源稳定化的电容效果的实验 33

- 14 电源旁路电容的必要性 33
- 15 电源旁路电容的电容特性 36
- 16 模拟电路的电源去耦装置的效果 40
- 17 加大平滑电容容量的纹波滤波器 43
- 18 稳压二极管的噪声和抑制 44
- 19 AC 电源线路的噪声对策电容 46

第 4 章 电源中使用扼流线圈的效果实验 51

- 20 使用扼流线圈时应注意高频带中的共振 51
- 21 电源线路滤波器中的 π 形低通滤波器 53

22	低噪声宽带放大器的电源线路滤波器	54
23	以阻止信号为目的的扼流线圈	56
24	附加在接地线路上的噪声不能除去	57
25	在电源线路中插入对称 π 形滤波器	59
26	理解铁氧体磁珠的特性	60
 第 5 章 LC 滤波器和匹配电路的特性及效果的实验 65		
27	测定阻抗匹配的重要性...1 段 π 形滤波器	65
28	2 段 π 形低通滤波器的特性	67
29	3 段 π 形低通滤波器的特性	69
30	测定用视频滤波器的特性	72
31	由 LC 组成的阻抗匹配电路	73
32	π 形阻抗匹配电路	75
 第 6 章 自作并充分理解使用环形铁心的 电路的实验 79		
33	制作环形铁心	79
34	由环形铁心组成的 1 : 1 变压器的动作	81
35	共模扼流圈...平衡-不平衡变压器的活用	82
36	平衡-不平衡变压器应用于平衡输出变压器	85
37	由 3 绕线变压器组成的平衡输出电路	87
38	由单绕线变压器组成的 50 Ω /75 Ω 的 阻抗变换电路	89
39	使用平衡-不平衡变压器的 4 : 1(1 : 4) 的 阻抗变换电路	91
40	由 3 绕线变压器组成的 1 : 9(9 : 1) 的 阻抗变换电路	93
41	高频用 90°相位移相器	95
42	应用于信号分配的混合电路	98
43	测定阻抗匹配的反射损耗桥式电路	99
44	反射损耗桥式电路的制作	100
45	应用于高频 CT 时的输入阻抗	102
46	高频变压器的漏电感	104
47	漏电感...1 : 1 变压器	105
48	漏电感...1 : 2 变压器	107

49	漏电感…脉冲变压器	109
 第 7 章 在 OP 放大器电路中有效使用 RC 的实验..... 113		
50	OP 放大器电路…使用于输入的电阻值的 选择方法	113
51	在宽频带、低噪声的 OP 放大器中使用低电阻 ..	116
52	补偿 OP 放大器的电容负载的特性	118
53	抑制高速、宽带电路的高频峰值的电容	121
54	扩大宽带放大器频带的信号校正电容	122
55	光电微小电流输入的前置放大器的反馈电阻值 ..	124
56	光电二极管用前置放大器的频率特性	126
57	电流互感器的低域补偿电路	129
58	选择峰值保持用电容器	132
59	积分电路选择薄膜电容	135
 第 8 章 应用 OP 放大器于滤波器的实验		
60	复习 RIAA 补偿放大器	139
61	NF 型调制控制电路	143
62	图形均衡器电路	145
63	粉红噪声发生用的 -3dB/oct 滤波器	148
64	用同一常数电容构成的 -12dB/oct 的 有源滤波器	150
65	用同一常数电容构成的 -18dB/oct 的 有源滤波器	153
66	低通滤波器的脉冲响应	156
67	只改变相位的 RC 移相电路	158
68	同轴电缆均衡器	162
69	由文氏电桥构成的陷波滤波器	164
70	改善陷波滤波器的对称型双 T 电路	168
71	减少陷波滤波器的元件的桥式 T 电路	170
 第 9 章 有效使用二极管的电路实验		
72	研究二极管的开关特性	175
73	OP 放大器电路的输入保护的应用	178
74	限制信号幅度的常用的限幅器	181

75 由 OP 放大器组成的非反相型理想的 二极管电路	182
76 反相型理想二极管电路	185
77 使用理想化二极管的绝对值的全波整流电路 ...	187
【专栏】 OP 放大器的开环频率特性	189
78 高速化的绝对值电路	190
79 使用差动放大器的高速绝对值电路	192
【专栏】 针对输出波形的不平衡	193
80 利用平衡输出变压器的高频响应的全波整流电路	195
81 使用肖特基二极管的 DBM 电路的构成	197
82 使用 DBM 的调制解调电路的实验	199
83 由 PIN 二极管组成的高频开关的构成	201
84 T 形 PIN 二极管衰减器的构成	204
85 继电器的反冲电压的限制	205

第 10 章 提高晶体管、功率 MOSFET 电路性能的

实验

209

86 稳定化射极跟随器的电阻	209
87 自举提高射极跟随器的输入阻抗	211
88 晶体管开关电路的加速电容器	213
89 MOSFET 中加速二极管的效果	215
90 150W 级功率 MOSFET 的门驱动电路	217
91 250W 级功率 MOSFET 的门驱动电路	219
92 开路集电极时的功率 MOSFET 的驱动	222
93 射极跟随器时的功率 MOSFET 的驱动	224
94 由晶体管组成的功率 MOSFET 驱动的高速化 ...	226
95 使用驱动功率 MOSFET 栅极的专用 IC	229
96 使用脉冲变压器的绝缘驱动电路	230

第 11 章 实践经验

233

97 抑制电源接通时的冲击电流的限制电阻	233
98 高频信号传送时的终端电阻的效果	235
99 降低并联共振电路 Q 的 Q 减振电阻的效果 ...	237
100 不消耗功率的电抗衰减器	238
101 实测市场上出售的信号发生器的噪声频谱 ...	240

第 1 章

活用 RC 基本特性的电路实验

由电阻(R)和电容(C)构成的 RC 电路是电子电路中使用最多的电路。首先,研究简单的 RC 电路的特性,针对在 CMOS 数字电路中的应用进行实验。

1 RC 低通滤波器的响应特性

图 1.1 是各使用一个电阻、一个电容的 RC 电路。这种电路从频率轴来看,可作为 1 次低通滤波器处理。所谓低通滤波器是指低频率时通过、高频率时截止,能除去噪声等不必要的高频率的滤波器。

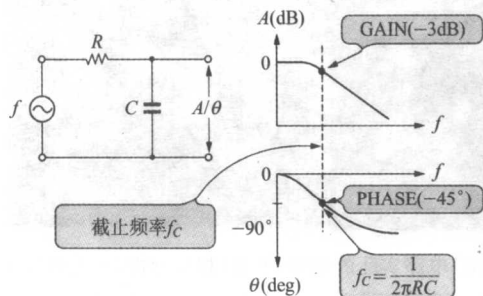


图 1.1 RC 电路的频率-增益/相位特性

使用比 RC 常数所决定的频率 f_c (称截止频率) 低的输入频率时,信号的衰减小;相反地,高频时,因电容 C 的阻抗 ($1/\omega C$) 与电阻 R 相比变小,故衰减将变大,并与频率成反比。

一般将低通滤波器上增益为 -3dB ($1/\sqrt{2}$) 处的频率称为截止频率,表示为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR}$$

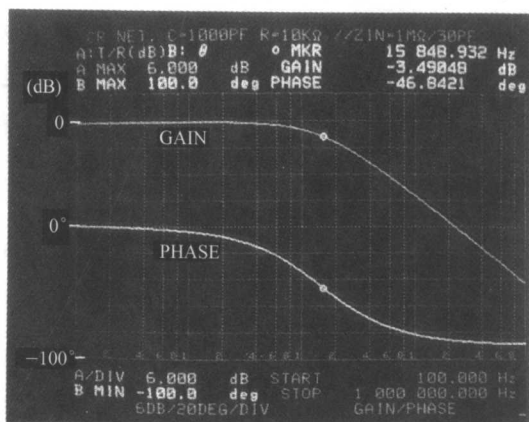
超过截止频率 f_c 的高频域的衰减特性,是以 -6dB/oct (频率为 2 倍时衰减 6dB)或 -20dB/dec (频率为 10 倍时衰减 20dB ,变为 $1/10$)特性的频率使增益下降。

另外,输入输出间的相位特性也与输入频率 f 有关。随着频率 f 的上升,相位延迟角 θ 变大,在截止频率 f_c 处,变为如下关系:

$$\theta = -\arctan \frac{f}{f_c} = 45^\circ$$

高频处可接近 -90° 。

照片 1.1 是为研究 $R=10\text{k}\Omega$ 、 $C=1000\text{pF}$ ($f_c=15.92\text{kHz}$) 的增益/相位特性,用增益相位分析器测定出来的结果。照片上 f_c 处放入的标识点(·)与理论值不同,增益为 -3.49dB (正确值 -3.0dB)、相位为 -46.8° (正确值 -45°),这是因为分析器的输入阻抗及 RC 的值存在误差的原因。



照片 1.1 RC 电路实际的频率-增益/相位特性(·表示截止频率)
($f=100\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$, 6dB/div , $20^\circ/\text{div}$, $R=10\text{k}\Omega$, $C=1000\text{pF}$)

从时间轴来看的 RC 滤波器电路如图 1.2 所示,阶跃响应特性的滤波器电路被广泛地使用。因其通过电阻对电容进行充放

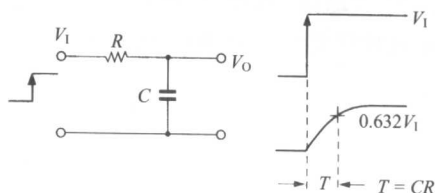


图 1.2 RC 电路阶跃响应特性($T=RC$ 称为时间常数)

电,故也称为RC充放电电路。这种电路对应阶跃输入的响应用下式表示:

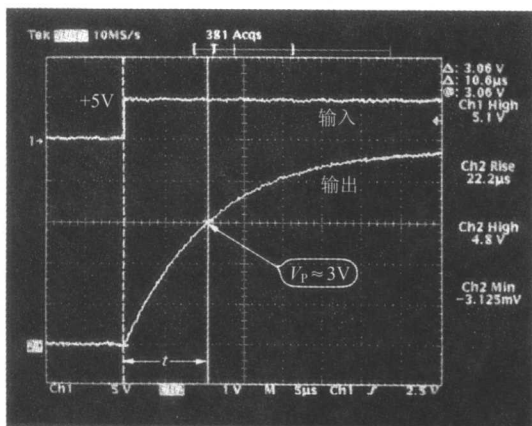
$$V_0 = V_1(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

输出电压 V_0 随着时间上升,但并不是直线上升。到达某输出电压 V_0 时所需要的时间 t 可由 $\frac{V_0}{V_1} = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}$ 推导出:

$$t = -RC \cdot \ln\left(1 - \frac{V_0}{V_1}\right)$$

一般地,时间常数 $T(=RC)$ 是到达输入电压 V_1 的 63.2% 时的时间。

照片 1.2 是 $R=10\text{k}\Omega$ 、 $C=1000\text{pF}$ 、 $V_1=5\text{V}$ 时的阶跃响应,在 $V_0=3\text{V}$ 处放入光标。这里的 $V_0=3\text{V}$ 表示后述的 HS-CMOS 逻辑电路(74HC14AP)的高电平阈值, $T=RC=10 \times 10^3 \times 1000 \times 10^{-12} = 10\mu\text{s}$ 为最接近的时间点。



照片 1.2 RC 电路实际的阶跃响应

(CH_1 为 $5\text{V}/\text{div}$., CH_2 为 $1\text{V}/\text{div}$., $5\mu\text{s}/\text{div}$., $R=10\text{k}\Omega$, $C=1000\text{pF}$)

2 高速化RC低通滤波器的上升响应

在RC低通滤波器中,有时只需加快对应阶跃响应上升变化的响应。截止频率低,上升时的阶跃响应快。如果只从阶跃响应来看,时间常数 $T=RC$ 小是好的,但这样会使从频率轴上看的截止频率变高。

例如,作为需要钻研的RC滤波器的例子,有PLL电路用的环

形滤波器等。图 1.3 表示在实际 PLL 电路中使用环形滤波器的例子,由此电路可看出要改善响应特性的困难。

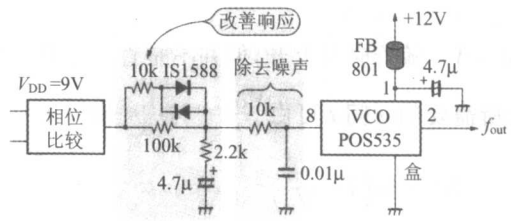


图 1.3 PLL 电路中使用环形滤波器的一例

图 1.4 是为高速化单纯的 RC 低通滤波器,附加两个二极管 D_1 、 D_2 和电阻 R_s 的电路。这一电路当 $V_O < V_1$, 即电容 C 充电时, D_1 和 D_2 处于导通状态,电阻 R_s 和 R 等价于并联连接,因此当电压偏差大时,将会产生高速响应。

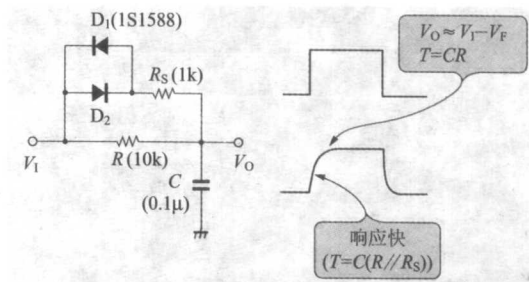


图 1.4 高速化 RC 电路阶跃响应

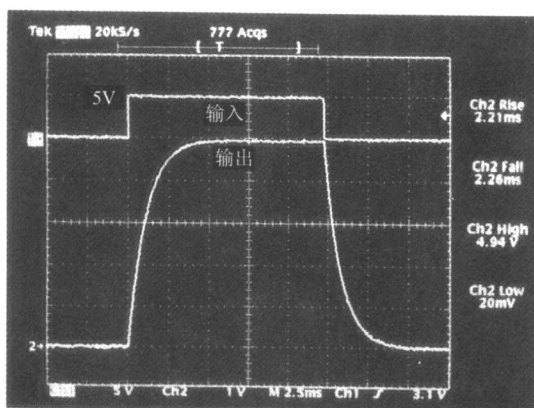
$T = C(R // R_s)$...// 是并联的标志

另一方面,当 V_1 中所含有的噪声在二极管的顺方向电压 ($\pm V_F$) 以下时,二极管处于关断状态,这样就会以 $T = RC$ 的低截止频率进行动作。

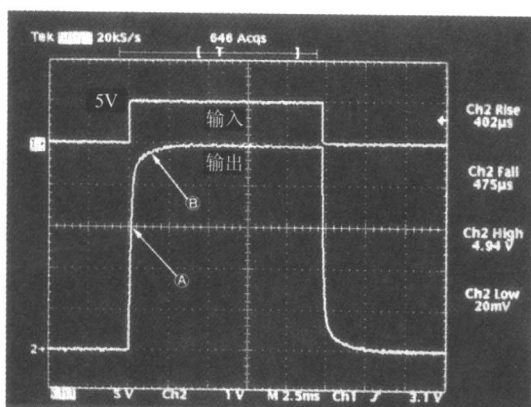
因此,如图 1.3 所示的 PLL 电路等,具有定常状态时,低通滤波器的时间常数大、S/N 高;而频率急变时,响应速度快的好性能。

照片 1.3 是单纯的 RC 电路的阶跃响应, $V_O \approx V_1$ 时的时间约 10ms, 是 $T = RC = 1\text{ms}$ 的 10 倍以上。

照片 1.4 是像图 1.4 那样,高速化电路后的阶跃响应。上升部分(Ⓐ)响应极快,但接近 $V_O = 5\text{V}$ 时响应变慢。



照片 1.3 RC 电路($R=10\text{k}\Omega$, $C=0.1\mu\text{F}$)的阶跃响应
(CH_1 为 $5\text{V}/\text{div}$, CH_2 为 $1\text{V}/\text{div}$, $2.5\text{ms}/\text{div}$.)



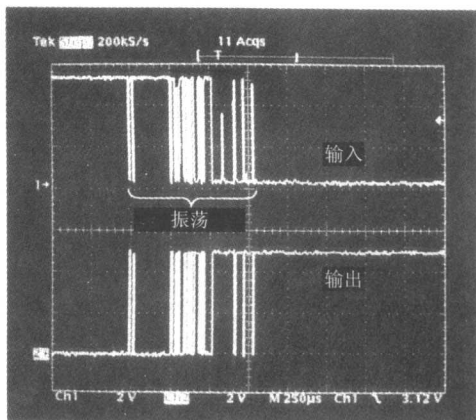
照片 1.4 高速化图 1.4 电路的阶跃响应($R=10\text{k}\Omega$, $R_s=1\text{k}\Omega$, $C=0.1\mu\text{F}$, CH_1 为 $5\text{V}/\text{div}$, CH_2 为 $1\text{V}/\text{div}$, $2.5\text{ms}/\text{div}$.)

3 用 RC 低通滤波器防止振荡

RC 低通滤波器的代表应用之一,是防止机械开关、机械触点的振荡。机械触点的振荡(触点 ON 时产生大的振动)被开关的构造左右,首先我们实测一下微型开关的振荡。

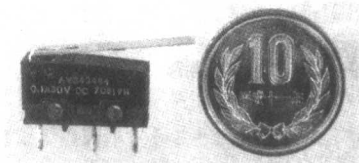
照片 1.5 是称为限位开关的微型开关的振荡波形图。机械触点的开关由于按压方法、时间不同会发生各种各样的振荡,此时的

时间、波形也各种各样,这里表示了最长时间的振荡的例子。

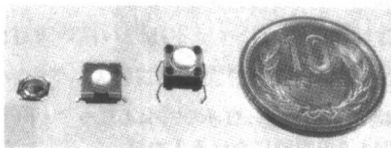


照片 1.5 微型开关触点 ON 时的振荡示例

具有机械触点的开关有很多种,照片 1.6 表示的是具有代表性的。电磁继电器也具有机械触点,也会产生大大小小的振荡。



(a) 杆式微型开关



(b) 按钮开关

照片 1.6 机械开关产生振荡

数字电路是不希望振荡的。使用触发电路原理上也是防止振荡影响的电路,简单的防止对策就是组合 RC 低通滤波器和施密特触发电路。

通常 CMOS 数字 IC 的阈值电压(区别 L 和 H 的电压电平) V_T 只是一点,图 1.5 表示具有施密特触发电路的反相电路、74HC14 的阈值电压。施密特触发电路具有高电平阈值 V_P 和低电平阈值 V_N , 阈值间

具有磁滞电压 V_H , V_H 为 $V_P - V_N$ 。即 V_P 以上、 V_N 以下的输入电平可被确定逻辑输出;磁滞电压 V_H 以下时,即使有噪声,输出电平也不变化。因此,具有施密特输入的数字 IC 电路,即使加上变化缓慢的信号,因噪声等引起输出电平翻转的危险也会变少。在数字电路的输入电路中插入 RC 低通滤波器,可去掉输入信号中含有的噪声,整形输出波形。

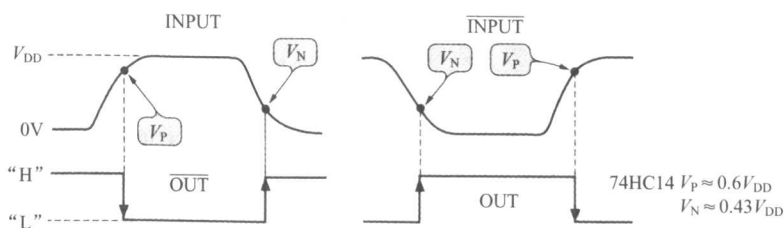


图 1.5 施密特反相电路的临界电压

图 1.6 是防止输入触点振荡的电路举例,实际应用中还可加入过电压输入保护电路(第 8 项中阐述)等等。

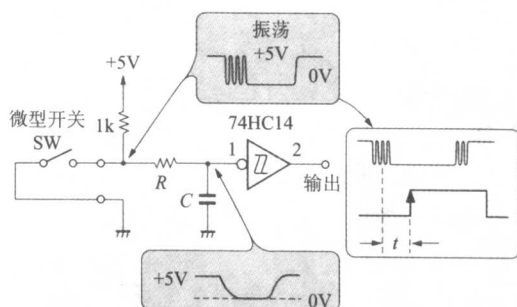
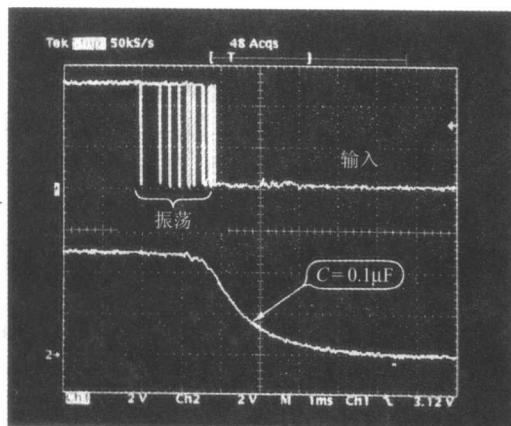


图 1.6 由 RC 滤波器构成的振荡防止电路

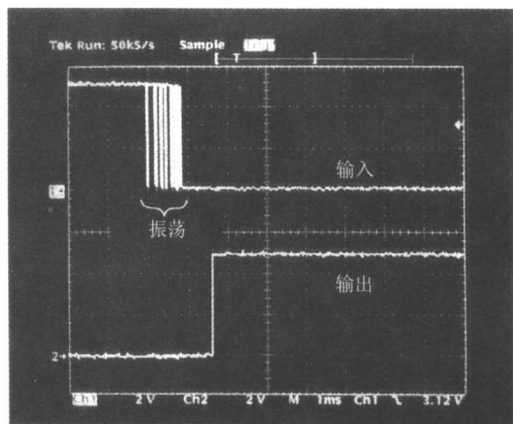
照片 1.7 的输入波形是图 1.6 电路中 $C=0$ 时的波形。这里



照片 1.7 图 1.6 实验的输入波形($R=10\text{k}\Omega$, $C=0.1\mu\text{F}$, CH_1 为输入点的振荡, CH_2 为经滤波器后的施密特反相电路的输入波形, $1\text{ms}/\text{div}$.)

即使使用施密特输入的数字 IC 电路,但如果不附加 RC 低通滤波器,对防止振荡不会具有任何意义。

照片 1.7 的下段是 $R=10\text{k}\Omega$ 、 $C=0.1\mu\text{F}$ ($T=1\text{ms}$) 时的输入波形。RC 低通滤波器可去掉振荡, C 的端子电压…数字 IC 的输入信号变化延迟,这一信号如果输入到不具有施密特电路的数字 IC 电路中,则在阈值电压附近易发生误动作。照片 1.8 是振荡防止电路的输入输出波形,从图形中可看出确实除掉了开关处的振荡现象。



照片 1.8 振荡防止电路的输入输出波形
(输出波形需要延迟)

像这种附加的 RC 电路,只能适用于输入阻抗高的 CMOS 数字 IC。由于 TTL 电路等输入阻抗低,所以是不能在输入处插入高阻抗的。另外,还必须要注意产生时间延迟的点,振荡时间随开关种类的不同而有很大的区别,因此必需研究 RC 电路的时间常数。

4

利用 RC 产生积极的延迟电路

图 1.7 是使用 CMOS 反相电路(附加施密特触发电路)的延迟电路举例。它适用于因某些原因在信号传达上需要加以延迟时间的场合。

这种电路延迟…延迟时间 t_1, t_2 几乎由 RC 的时间常数 $T=RC$ 决定。我们必须正确考虑 IC 电路的传送延迟时间、输入电容、阈值电压 V_P 、 V_N 等,目前这种电路被正确应用的示例还不是很多。