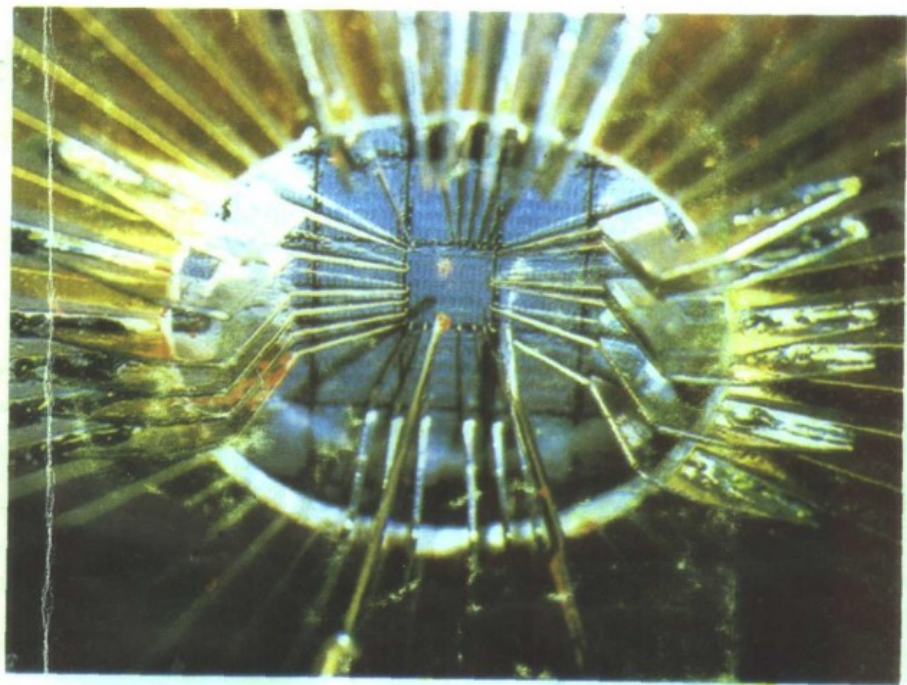


智能仪表与开关电容电路



7
7 戎克中 杨先麟 编著

湖北科学技术出版社

责任编辑 汪 敏

封面设计 田剑云

ISBN 7-5352-0870-3

TH · 14 定价: 3.95 元



智能仪表与开关电容电路

戴克中 杨先麟 编著

湖北科学技术出版社

鄂新登字03号

内 容 简 介

本书着重介绍了开关电容电路模块在现代智能化仪表中应用的情况。全书共分五章,一、二章是开关电容电路的基本知识、基本部件和基本电路;三、四章详细介绍了已在智能仪表中使用的各种开关电容电路模块;第五章介绍了两个采用了开关电容电路模块的智能仪表实例。

本书可供从事电子、仪器仪表、自动检测控制的科研人员和工程技术人员阅读,也可供大专院校电类专业的师生参考。

智能仪表与开关电容电路

戴克中 杨先麟 编著

宗

湖北科学技术出版社出版发行

湖北省咸宁市印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 6印张 2插页 129千字

1992年11月第1版 1992年11月第1次印刷

ISBN7-5352-0870-3/TH·14

印数: 1—1000 定价: 3.95元

前 言

现代模拟电路技术中,由开关、电容器和运算放大器组成的开关电容电路越来越引起电子元器件制造、信息处理和仪器仪表界的关注。近年来,微电子学的飞跃发展给仪表的智能化奠定了基础,计算机硬件和软件技术的成就为仪表智能化的开发创造了极为有利的条件。

开关电容电路模块是 MOS 工艺不断成熟的产物,由于它的功耗低、精度高、温度稳定性好、动态范围宽、易于集成化,已开始逐渐用于各类智能化仪表之中。就目前国内外智能仪表的研制和发展来看,许多传统的模拟电路正在逐步被 MOS 工艺的开关电容模拟电路所取代。

本书主要介绍了近年来国内外直接用于智能仪表的各类开关电容电路模块。重点详细介绍了在电容量测量的智能仪表中已在使用和正在研制的这类模块。书中除介绍了作者自己工作的体会之外,也收集了许多最新国外有关文献和报道。其目的是为了使国内智能化仪表和微电子制造领域能尽快地引入开关电容的新技术。

为了便于阅读和理解,本书比较简单地介绍了开关电容网络的基本知识和基本电路。该书第一章、第二章和第三章的 4,5,6,7 节由杨先麟编写;第四章、第五章和第三章的 1,2,3,

8,9 节由戴克中编写。在本书的编写过程中曾得到华中理工大学的李德华教授、朱定华副教授、武汉大学的陈淑珍教授、武汉化工学院的李相华副教授的指导和帮助,特表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限,错误和不妥之处敬请读者指正。

编 著 者

1991 年 10 月

目 录

第一章 概述	1
第二章 开关电容电路	5
§ 2.1 开关电容电路的基本部件	5
一、MOS 开关	5
二、MOS 电容	10
三、MOS 运算放大器	13
§ 2.2 开关电容基本电路	18
一、开关电容与等效电阻	18
二、开关电容等效电阻(SCER)电路	21
三、分压电路	27
四、电压反向开关(VIS)电路	36
§ 2.3 模拟信号的开关电容电路	37
一、采样与采样——保持信号	38
二、开关电容网络的信号	40
三、开关电容积分(SCI)电路	42
四、开关电容比例电路(SCPC)	53
五、开关电容延迟(SCD)电路	54
§ 2.4 开关电容电路器件的工作范围	58

第三章 SC 的模块结构	61
§ 3.1 S/H(采样/保持)电路模块	62
一、增益为 1 的 S/H 电路模块	62
二、具有任意正或负增益的 S/H 放大器模块	63
三、积分型 S/H 放大器	65
§ 3.2 SC 对数—指数转换模块	66
一、对数转换模块	66
二、指数转换模块	69
§ 3.3 SC 指数时间函数发生器模块	74
§ 3.4 开关电容滤波(SCF)电路模块	78
一、滤波电路概述	78
二、跳耦型开关电容滤波电路	84
三、状态变量型开关电容滤波电路	87
四、开关电容滤波电路折性能特点	89
§ 3.5 开关电容振荡(SCO)电路模块	91
§ 3.6 开关电容放大(SCA)电路模块	97
§ 3.7 开关电容均衡(SCE)电路模块	101
§ 3.8 SCA/D 转换模块	110
一、自动定标式 SC A/D 转换模块	110
二、电荷平衡 SC A/D 转换模块	118
§ 3.9 串行 SC D/A 转换模块	125
一、D/A 转换简介	125
二、串行 SC D/A 转换模块	127
第四章 智能仪表中专用的开关电容模块	134
§ 4.1 处理非线性模拟信号的开关——电容 模块	134
一、模块的工作原理	135

二、平方和平方根 SC 转换器模块	138
三、SC 三角函数模块	140
§ 4.2 智能电容类传感器的 SC 接口模块	146
一、电容类传感器 SC 接口模块的工作原理	148
二、接口模块的误差和校正	151
§ 4.3 数字电容表中的 SC 模块	153
第五章 采用开关电容电路模块的智能仪表	158
§ 5.1 智能湿度计	158
一、电容类湿度传感器	159
二、智能湿度计的结构	161
三、校准和精度	167
§ 5.2 智能化压力/差压变送器	170
一、电容式压力/差压变送器的工作原理	170
二、压力/差压变送器的 SC 数字输出接口	173
三、智能化压力/差压变送器	174
附录一 高频振荡电容差值测量电路(4~20mA)输出)	176
附录二 开关电容滤波器(SCF)单片集成电路	179
参考文献	181
英文专业名词缩写和中英专业名词对照	183
附表 R5604 系列主要电特性参数表	

第一章

概述

本世纪60年代后期,在现代模拟电路技术中, W. Poschenrieder, A. Fettweis 和 R. Boite 首先在理论上论证了用开关和电容取代电路中的电阻,形成了由开关、电容和运算放大器构成的新型有源电路——开关电容(SC)电路。随后,这一新型电路就用于选频滤波网络。特别是1977年关于全集成化的开关电容滤波器的论文发表以来,对开关电容网络的研究受到电路理论、系统工程、仪表技术、信息处理和集成电路制造等领域科技工作者、工程技术人员的极大重视。而且,在SC电路设计、SC电路的分析和综合、MOS集成电路中SC电路实现等方面取得极大的、迅速的发展。SC电路的许多大规模集成电路功能模块已经成功地应用于通信、信息处理、智能化仪器仪表等工程实际之中。SC电路形成了新的电路理论分支学科,SC电路以功能模块的形式用于模拟和数字电路系统之中。

开关电容电路是由MOS开关、MOS电容和MOS运算放大器为主要元件组成的电子线路,它属于有源网络范畴。SC电路的工作特点是在多相时钟(例如经常使用的互为反相的两相时钟)的驱动下工作。电路根据电荷平衡原理,利用MOS开关受控而周期性地导通和断开以实现电容的充放电来贮存和转移信号,并对信号进行放大或其他各种处理。所以SC电

路属于模拟采样—数据处理系统。它的输入可以是模拟信号，而它所处理的却是采样/保持信号，它是在离散域进行工作。因此，正如用微分方程描述连续系统、用传递函数对连续系统进行频域解析一样，SC 电路可以用差分方程进行系统描述，用离散 Z 变换对系统进行频域解析。从这个意义上讲，SC 电路区别于一般概念的模拟电路。

SC 电路最显著的特点之一是集成精度高，这一点在理论上和实际电路中都得到充分的证实。例如目前研究最广泛、应用最成熟的 SC 滤波电路，其电路特性在驱动时钟频率一定时仅取决电路中电容的比率，而与制造工艺过程中造成的绝对误差无关。这一点在滤波特性和电路原理上是一个突破，它改变了有源 RC 滤波电路的特性取决于 RC 乘积的传统方式。在单片集成过程中，很难获得精确而稳定的 RC 乘积，而在同一硅片上实现精确且稳定的电容比却是不困难的。电容比的控制只需要使硅片面上氧化层的介电常数和厚度比较均匀，则电容比的准确性就主要取决于各电容电极的面积，这在现代光刻工艺中是完全可以保证的。采用同质心版面设计，恒定的电容面积周长比以及环绕电容极板的均匀刻蚀宽度等现代 MOS 集成工艺技术，电容比的精度可达 0.01%。另外，MOS 电容的温度变化率约为 $(2\sim5)\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，电压变化率约为 $(1\sim10)\times 10^{-5}/\text{V}$ ，所以因为温度和电压波动引起的误差微不足道，即 SC 电路具有良好的温度稳定性和工作可靠性。

除集成精度高、功耗低、稳定性好、动态范围大等优良性能特点外，SC 电路易于大规模单片集成也是 SC 电路得以广泛重视和应用的重要原因之一。以目前已集成成功的 MO-DEM(调制解调)模块为例(图 1—1)，我们可以看到这种由一个数字信号处理器(DSP)和一个模拟前级结合起来的 MO

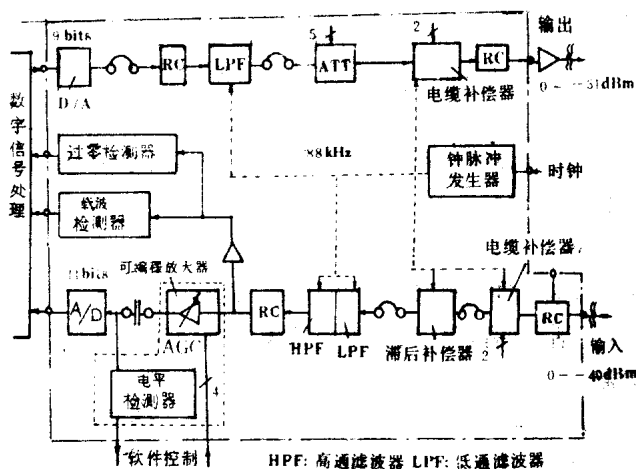


图 1-1 采用 SC 电路的 MODEM 前级模块

DEM 模块完全采用了 SC 电路。这块 LSI 是采用 $5\text{ }\mu\text{m}$ MOS 工艺制造出来的。其中 9 bit D/A 和 11 bit A/D 转换器、低通滤波器(LPF)、幅度和延迟均衡器都是采用 SC 电路。制成后的片面积为 $7.14 \times 6.51\text{ mm}$ 。在 $\pm 5\text{ V}$ 供电时,它的功耗只有 270 mW。

正是 SC 电路易于大规模集成的这一特点使 SC 电路在智能仪器仪表方面获得应用。它使得智能仪器仪表在测量和处理精度、长期运行的稳定性以及小型化微型化等方面表现出明显的进步和良好的前景。

智能化仪器仪表的出现和发展与数字大规模集成电路,计算机技术的应用和发展紧密相关。随着数字处理技术和硬件技术的不断提高和完善,现代仪器仪表对于转换成数字信

号后的信号处理(包括运算类型的处理和智能化形式的处理)应该是相当满意的。但是,仪器仪表的激励信号和响应后的输出信号一般都是模拟信号,而输入的模拟信号又不可简单转换成数字信号后就交给数字信号处理单元(如 CPU)进行处理,而必须对模拟信号先行转换、放大、比较、滤波等各种功能性处理后再让数字信号处理单元进行智能化处理。这样,就出现了完善的、多功能的大规模数字集成电路与分立元件实现的模拟电路在功能、特性和小型化、微型化方面形成的强烈反差。换句话说,智能化仪器仪表的发展受到模拟电路处理技术的限制。

以功能模块形式,如滤波、振荡、放大、均衡和信号转换等 SC 电路模块成功地用于智能化仪器仪表和各类电子系统,消除和缩小了上述反差,为智能仪器仪表的进一步发展创造了必要的条件。目前在智能仪表中,SC 电路模块应用得最成功的是各类信号转换系统(如仪表中电容式传感器的直接 A/D 转换)。此外,在仪表的滤波,非线性补偿等系统中,SC 电路模块也有十分成功的应用。

由于 SC 网络中所需的器件——开关、电容和运算放大器都采用 MOS 工艺,这与数字大规模集成电路的工艺相同,所以国内外正广泛研究、致力于将以往的一切模拟电路系统用 SC 技术实现大规模集成。因此,模拟电路的单片集成,或包括模拟电路和数字电路在内的整个系统,即智能仪器仪表整个系统的单片集成,都将引起智能化仪器仪表的重大变革。

第二章

开关电容电路

开关电容电路是由 MOS 开关、MOS 电容和 MOS 运算放大器构成的电路。在这种电路中,用驱动脉冲控制的开关与电容来取代电路中的其他元、器件,例如电路中广泛使用的电阻。SC 电路是近年来随着 MOS 大规模电路集成技术的进步和迅速发展而建立起来的新的电子电路。

SC 电路是模拟采样—数据处理系统。它将信号在某一时刻的值,通过 MOS 开关周期地开断、闭合,以及电容器保持电荷的功能,对信号进行传输和处理的一种装置。因此,SC 电路所处理的信号是采样—保持信号。利用 SC 电路可构成滤波器、振荡器、A/D 或 D/A 转换器等多种器件或模块,而广泛地用于智能化仪器仪表之中。

§ 2.1 开关电容电路的基本部件

一、 MOS 开关

在半导体集成电路发展过程中,MOS(金属—氧化物—半导体)集成电路技术,以其在速度、集成度和低功耗方面的优良特性,表现出强大的生命力,得到迅速发展。在这类电路中,晶体管是一种十分重要的元件,采用 MOS 技术的场效应管,

如图 2-1 所示。MOS 管是一个三端器件,它们分别称为源极、栅极和漏极,其电路符号如图 2-1 所示。

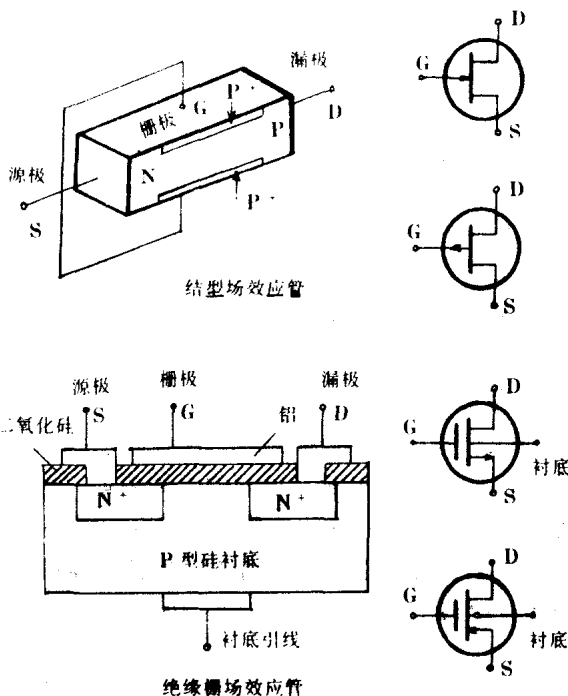


图 2-1 MOS 管的结构及符号
(a) 结型场效应管 (b) 绝缘栅场效应管

在 MOS 管的特定使用条件下,栅极 G 和源极 S 间的电压 V_{GS} 要么是 0V, 或者就是大于某个电压阈值 V_{α} (典型值为 1V 或 2V)。在这种运行模式下, MOS 管就成为所谓的 MOS 开关。

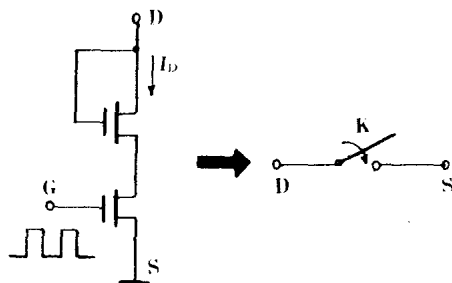


图 2-2 MOS 开关

例如如图 2-2 所示, N 沟道增强型场效应管的栅极 G 上加正向电压 $V_{GS} (> V_{CR})$, 则漏源之间视为导通。反之, 若在 G 极上加零电压或负电压, 则漏极电流 I_D 几乎为零。因此, 当 V_{GS} 为正负交替的脉冲电压

时, 则 I_D 时通时断, 形成 MOS 开关, 开关的控制电压为 V_{GS} , 而我们更感兴趣的是源漏之间的通道可等效为电阻 R_{eq} 。当控制信号电压 V_{GS} 小于 V_{CR} 时, 等效电阻 R_{eq} 非常大, 约为 $100M\Omega$; 当 V_{GS} 大于 V_{CR} 时, R_{eq} 相对来说非常小, 一般为 100Ω 左右。

这样, 在两种不同的控制信号作用下, R_{eq} 值的比率是相当大, 其数量级在 10^6 以上, 即只要选定 V_{GS} , 就可以在相对比率相当大的等效电阻之间进行开、关选择。在 MOS 开关的应用中, 开、关时等效电阻值的比率大小比两种状态下电阻的绝对值重要得多。以这种方式应用于电路的 MOS 管称为 MOS 开关。显然, 其开关状态取决于 V_{GS} 的值, V_{GS} 大于 V_{CR} 时, MOS 开关呈开状态, 即低阻开状态; 当 V_{GS} 小于 V_{CR} 时, MOS 开关表现出关状态, 即高阻关状态。

这种单个 MOS 开关属于所谓单刀单掷开关 (SPST), 其开关作用的表达形式如图 2-3 所表示的那样。图中都是 MOS 开关的理想模式。

用数字电路中的时钟信号, 也称为周期脉冲信号, 来控制

控制条件	状态	等效电阻	模式
$V_{GS} > V_{CR}$	开	100Ω	
$V_{GS} < V_{CR}$	关	$100M\Omega$	

图 2—3 MOS 开关在开、关状态时的等效电阻

MOS 开关,即由 φ 来表示 V_{GS} ,则在时钟信号每个周期,MOS 开关各导通、断开一次。 φ 为周期 T_c 的脉冲序列,MOS 开关就表现出周期性地通断,如图 2—4 所示。在数字电路中,系统时钟提供周期性的同步信号。

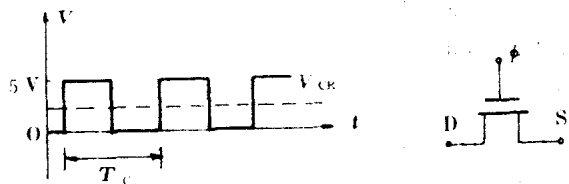
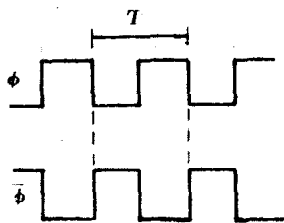


图 2—4 将时钟信号 φ 作用于 MOS 开关

图 2—5 给出在以后章节中经常涉及的互为反相的两相



时钟信号的波形图。 φ 与 $\bar{\varphi}$ 有相同的频率 f_c ,并且它们互为反相。因此,当 φ 为高电平时, $\bar{\varphi}$ 为低电平;而当 φ 为低电平时, $\bar{\varphi}$ 为高电平。如果将 φ 和 $\bar{\varphi}$ 分别作为两个 MOS 开关的控制信号,那么它们不仅随频率 f_c 周期性地通断,而且两个 MOS 开关中,其一导通另一必然断开,即两开关互为反置。用波形如图 2—5