



高等学校统编教材

导航系统信息转换

谈振藩 周洪宇 袁赣南 编著

国防工业出版社

导航系统信息转换

谈振藩 周洪宇 袁赣南 编著

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

导航系统中的信息处理越来越多地使用微型计算机, 因而信息转换装置成为导航仪器中必不可少的组成部分。本书从应用角度论述了数模及模数转换器的工作原理、技术特性及应用方法, 各种典型的集成转换器件的内部结构、外部引脚及功能和实用电路。还讨论了船舶导航系统中常用的各种转换电路及它们与微型计算机之间的接口和数据通信。

本书可作为高等院校陀螺导航专业本科生和研究生的教材, 也可供导航及相近专业从事信息转换方面工作的工程技术人员参考。

导航系统信息转换

谈振溢 周洪宇 袁赣南 编著

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092毫米 16开本 印张13³/₄ 314千字

1992年10月第一版 1992年10月第一次印刷 印数: 001— 170册

ISBN 7-118-00992-X/U·85 定价: 3.60元

出版说明

根据国务院国发[1978]23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

本书根据 1987 年 1 月全国造船院校陀螺导航专业统编教材会议通过的“导航系统信息转换”大纲编写的,供高等院校陀螺导航、船舶电器及其他相关专业使用,参考学时为 54 h。

近 10 多年来,由于现代控制技术及微型计算机技术的发展,导航系统中越来越多地采用微型计算机作为解算和控制部件;而且还出现了组合导航系统,它把多个导航设备输出的导航信息加以综合,利用现代控制理论获得更高精度的导航数据。这就使得导航设备之间的信息交换日益复杂,信息转换技术也使用得越来越广泛。为了适应这一趋势,我们在导航专业本科生的高年级开设了这一课程。它是在“数字脉冲电路”、“微机原理及应用”等课程之后开设的。

本书从应用角度出发介绍了数模和模数转换的基本原理,对近年来大量出现的转换器芯片和模块介绍了一些典型和常用的型号。作为实例,我们还介绍了自己设计并用在平台罗经、惯性导航系统及组合导航系统中的各种转换电路。因此,本书除了作为导航专业高年级学生的教材之外,还可以供从事这方面工作的工程技术人员参考。

全书共分六章。第一章是概论,第二、三章介绍了数模和模数转换器的基本原理,第四章介绍了各种轴角-数字和数字-轴角转换器,第五章介绍了集成数模和模数转换器件及其接口技术,第六章介绍了转换技术在导航系统中的应用。

本书由谈振藩、周洪宇、袁赣南同志共同编著。第一、二章由谈振藩编写,第三、五章、第四章第四节及第六章第四节由袁赣南编写,第四章、第六章其余部分由周洪宇编写,并由谈振藩副教授统稿。本书由东南大学王明峰副教授主审,他认真仔细地审阅了全书,对书稿提出了许多宝贵意见和建议。在此,对他表示衷心的感谢。由于编著者的水平有限,不足和错误之处在所难免,谨请读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 概论	1
§ 1-1 导航系统中信息转换技术的应用	1
§ 1-2 信息转换的基本原理	3
§ 1-3 信息转换技术的现状和发展趋势	5
第二章 数模转换器	7
§ 2-1 数模转换功能的实现	7
§ 2-2 双极性数模转换器	12
§ 2-3 数模转换器的性能分析与测试	17
§ 2-4 数模转换器的选择	26
问题与习题	30
第三章 模数转换器	31
§ 3-1 反馈型模数转换器	31
§ 3-2 积分型模数转换器	37
§ 3-3 并行模数转换器	39
§ 3-4 串-并行模数转换器	41
§ 3-5 模数转换器的性能分析	42
§ 3-6 模数转换器的选择	48
问题与习题	50
第四章 轴角-数字及数字-轴角转换	52
§ 4-1 自整角机/旋转变压器-数字转换	52
§ 4-2 感应同步器-数字转换	88
§ 4-3 数字-自整角机/旋转变压器转换	94
§ 4-4 数字-步进电机轴角转换	100
§ 4-5 轴角-数字及数字-轴角转换模块的选用	111
问题与习题	115
第五章 集成数模和模数转换器及其接口	116
§ 5-1 常用数模转换器芯片	116
§ 5-2 数模转换器与CPU的接口	128
§ 5-3 常用模数转换器芯片	132
§ 5-4 模数转换器与CPU的接口	148
§ 5-5 数字信号传输及接口电路	158
§ 5-6 组合导航系统数字信号传输与接口	169
问题与习题	177
第六章 转换技术在导航系统中的应用	178
§ 6-1 数模转换器的应用	178
§ 6-2 模数转换器的应用	189

VI

§ 6-3 平台罗经及惯性导航姿态角-数字转换	197
§ 6-4 电罗经航向角和计程仪航速的转换	204
问题与习题	210
参考文献	212

第一章 概 论

§ 1-1 导航系统中信息转换技术的应用

在许多大中型舰艇上,装备有多种导航设备。它们的基本作用可概括为:保证舰艇的航行安全和有效而准确的战斗机动;向观通和武备等系统提供导航信息和控制信息。例如,当舰艇到某海域去执行任务时,要求导航系统能及时准确地把舰艇引导到指定海区。在对目标实施攻击时,首先使舰艇运动到攻击阵位,再进入攻击航向。所有这些都离不开导航信息。再如,在发射导弹或鱼雷时,为了使射击指挥仪计算出准确的射击诸元,需要把我舰的航向、航速、姿态等导航信息及敌舰的舷角和距离等信息送入指挥仪,经过解算才能使导弹或鱼雷准确地命中目标。当一艘远洋考察船或发射运载火箭所用的跟踪测量船出海执行任务时,它每时每刻都需要知道自己准确的地理位置,因此也离不开导航系统提供的导航信息。

60年代中期以来,我国已开始把计算机技术用于先进的导航设备。数字式的导航信息在提高导航性能,实现快速反应和现代控制等方面发挥了一定作用。80年代初以来,微型计算机技术飞速发展,它们成本低、功耗小、功能强、体积小、可靠性高、应用方便。这些特点使它们在导航设备中的应用越来越广泛。不但在一些大型、精密的导航设备,如惯性导航系统、平台罗经上无例外地采用微型计算机控制,就是在一些普航设备的更新换代中也在逐步采用微型计算机以实现智能化。此外,在雷达、卫星导航、天文导航等设备上对航向、航速和纵横摇角等导航信息也提出了数字化要求。由于微型计算机在导航系统中的应用日益广泛,导航信息以数字形式传输和交换也会越来越多。

但是,模拟式的导航信息在当前舰船的导航设备中又是必不可少的。这主要是因为:

(1) 由于技术发展的连续性,目前舰船上大量的导航设备仍以模拟式输出导航信息。

(2) 从数据显示的角度看来,模拟式显示导航信息有很多优点,如数据指示连续、直观、容易判断变化。而数字式显示是断续的,不容易迅速判断变化方向。数字显示的不停变化容易使操作人员眼花疲劳。

(3) 从可靠性角度看,模拟信息接口用的是微电机和齿轮传动机构,对环境适应性强,故障少,而一般说来数字信息对环境适应性差。在长线传输时,模拟信息较数字信息传输简单、经济、可靠。在大型舰船上,从发送信息的设备到用户设备的电缆长达几十米,长线电阻引起信号衰减。周围电气、电子设备繁多,如不采取特殊措施,数字信息电平较低易受干扰[●]。

(4) 即使是应用数字计算机的设备,仍需模拟信息的控制。如在捷联式惯性导航系统中,陀螺仪是一个输入和输出都是模拟信息的惯性器件,它的再平衡回路却是一个

● 目前由于总线技术及光纤技术的发展,长线传输易受干扰的问题正在逐步被克服。

数字脉冲电路。由于舰船的摇摆，惯性转速作用于陀螺主轴上，使其进动。角度传感器输出偏差信号，经放大补偿和模数转换把一定数量和正负的恒流脉冲送入力矩器，力矩器产生力矩使陀螺反方向进动减少偏差角。转速的大小和方向不同，送入力矩器的脉冲多少及其正负也不同。同时，脉冲个数的多少及其正负送入计算机，经处理可以得到数字输出的舰船姿态角。

综上所述，在一个现代化的舰船上，导航系统已不仅仅是提供航向、航速指示信息的简单设备，而是由多种导航设备（如惯性导航、电罗经、无线电导航、天文导航、卫星导航、雷达等）组成的一个大型而复杂的系统。不但在系统内部各导航设备间有大量信息交换，而且在导航系统为全船其他系统，如武器系统、作战情报系统、火控系统、雷达通信系统、电子战系统、操纵控制系统等提供导航信息时，信息的交换量更大。在这些大量的信息交换中，各设备对输出输入信息的性质、形式等要求不一，因此各种各样的模数转换器(analog-digital converter, 简称为ADC)和数模转换器(digital-analog converter, 简称为DAC)得到了广泛的应用。

下面举几个常用的例子。

图 1-1 是一个典型的组合导航系统方块图。组合导航系统通过微型计算机组合舰船上现有各种导航定位信息，经过数据处理使各种导航设备在性能上取长补短，获得更精确、更可靠的导航信息。在这种系统中，进出计算机的都是数字信息，而各导航设备输出的大多是模拟信息。图中的ADC和DAC是这些信息交换时必不可少的接口。

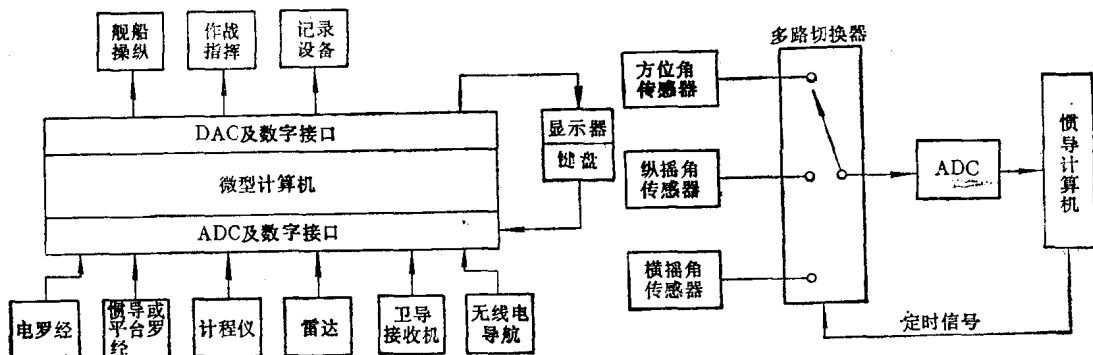


图1-1 组合导航系统方块图

图1-2 惯性平台转角ADC示意图

惯性导航系统中的ADC和DAC应用得更多。惯性平台的三个轴上各装一个角度传感器（旋转变压器或感应同步器）输出舰船的姿态角信号。这些信号都是代表转角的交流调制信号，它们在同一个ADC中经分时切换进行转换变成数字信号（有时也称做角度的编码）送给惯导计算机作进一步处理，如图 1-2 所示。

惯性平台由于舰船运动和地球自转的影响会偏离当地水平面和真北方位，因此必须根据计算机的计算结果对陀螺力矩器不断施加修正电流。计算机输出的修正电流是编码值，而加入陀螺力矩器的是模拟电流，这之间的数字—电流转换器是一个精度高、量程宽且稳定性要求极严的DAC。

图 1-3 是一个舰船自动操舵仪的部分原理方块图。自动操舵仪是根据现代控制理论，利用微型计算机定时地对舰船航向、航速、舵角、偏航速率进行采样，实时地对船的航行

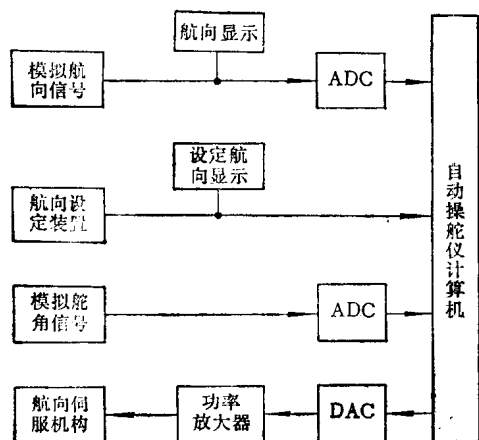


图1-3 自动操舵仪原理方块图

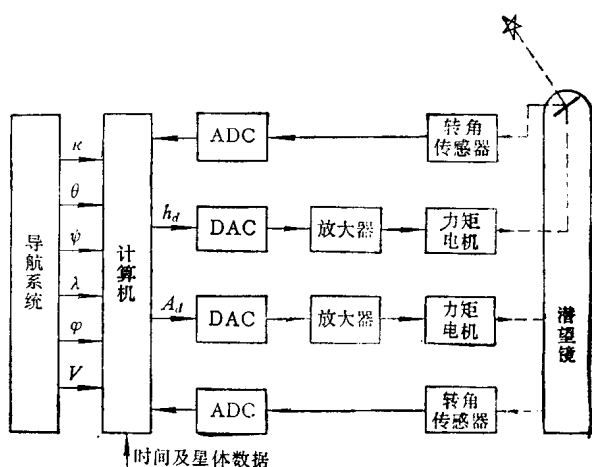


图1-4 天文潜望镜自动跟踪系统

状态参数进行辨识，按最优控制规律进行计算，输出指令舵角，使舰船被控制在最佳航行状态。如果从导航系统传输来的航向是模拟信息，而且舵角传感器输出的舵角也是模拟信息，它们必须被转换成数字信息后才能进入操舵仪计算机。另一方面，计算机经过计算输出的舵角指令是数字信号。该信号必须经过数模转换和功率放大后才能驱动操舵机构。

图1-4是一个潜艇上使用的天文潜望镜跟踪系统。惯导系统输出的三个姿态角(ψ 、 θ 、 κ)、航速 V 以及潜艇的位置坐标 λ 、 φ 等都是数字信息，经计算机计算，并根据被测天体的天文坐标和时间算出被测天体的地平坐标高度和方位。再经坐标变换，将地平坐标变换为甲板坐标高度 h_d 和方位 A_d 。经DAC后输出至高度和方位随动系统，控制潜望镜作旋转和俯仰运动，自动跟踪被测天体。图中两个旋转变压器测得高度和方位经模数转换后送回计算机作为闭环控制的反馈信号。

转换器还被用于许多其他种类的导航设备。随着电子技术、集成技术和计算机技术的迅速发展，随着现有各种导航仪器的更新换代，模数和数模转换技术的应用也在迅速扩大。总的说来，凡是需要计算机和模拟设备之间交换信息的场合，凡是需要模拟量和数字量之间进行变换的场合，都需要信息转换技术。

§ 1-2 信息转换的基本原理

信息转换器包括数模转换器DAC和模数转换器ADC。

DAC的功能是把数字量变成模拟量。它实际上是一种解码器，它的输出-输入函数关系可以写成

$$A = RX \quad (1.1)$$

式中， A 是模拟量， R 是参考量， X 是数字量。因为 X 是离散的，所以DAC的输出模拟量 A 在时间上也是离散的。如果 X 是定点二进制小数，则(1.1)式可以写成

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = (x_1 2^{-1} + x_2 2^{-2} + \cdots + x_n 2^{-n}) R = \sum_{i=1}^n x_i 2^{-i} R \quad (1.2)$$

式中, x_i 为数字量 X 的第 i 位代码, 取值 1 或 0, 当 $x_i = 1$ 时, $A_i = 2^{-i}R$; 当 $x_i = 0$ 时, $A_i = 0$ 。

(1.2) 式说明, DAC 的模拟量输出 A 由一系列二进制分量 $x_i 2^{-i}R$ 组成。因此, DAC 在原理上应具有图 1-5 的结构。

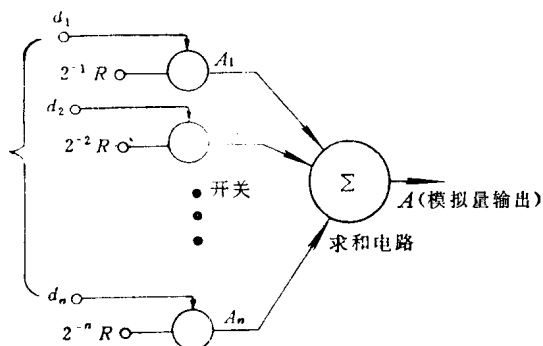


图1-5 DAC 原理结构

为了观察 DAC 的输出情况, 可以采用图 1-6 的电路。用一个 4 位二进制计数器的输出作为 DAC 的数字输入, R 为直流参考电压。转换器输出端接示波器。当连续脉冲输入计数器时, 从示波器上可以看到输出 A 是一个阶梯波。输出最小阶跃幅度为 $2^{-4}R$, 这就是转换器的分辨力。这个数值越小, 表示分辨力越高, 模拟量的平滑程度也越好。一般情况下, 一个 n 位 DAC 的分辨力为 $2^{-n}R$ 。DAC 的转换精度主要取决于二进制分量 $x_i 2^{-i}R$ 之间的比例关系精确到何种程度。

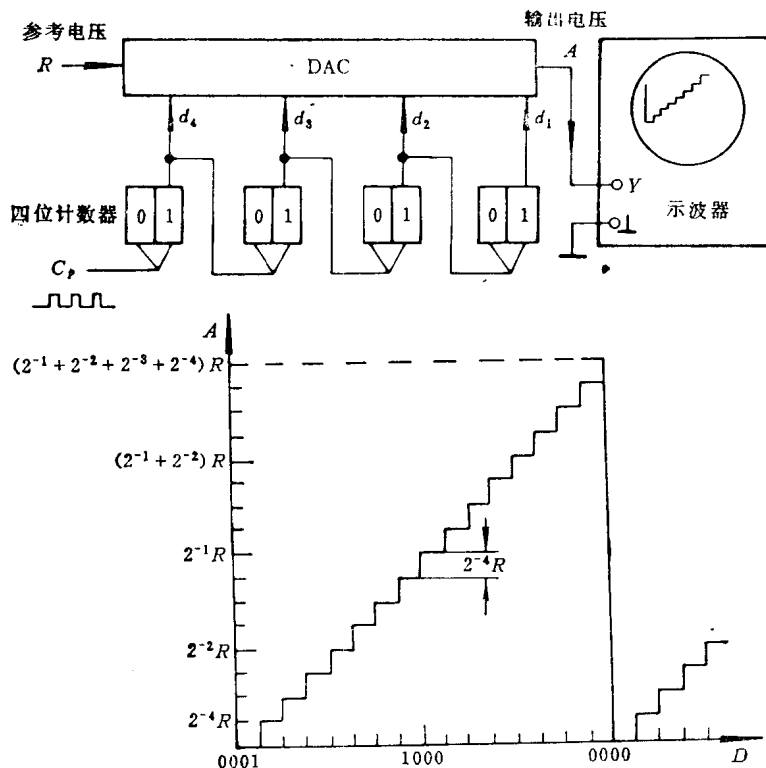


图1-6 DAC 输出的检查

ADC的功能是把模拟信号转变成某种代码的数字信号,因此它又称为编码器。实现模数转换的基本思想是以某一参考量 R 为单位去度量模拟信号 A ,从而得到数字量 X 。可以用下式来表达这一过程。

$$X \equiv \left[\frac{A}{R} \right] \quad (1.3)$$

式中, $\equiv$ 和 $[]$ 表示一种舍零取整过程。由于多数情况下 A 不能被 R 整除,而且计算机或数字系统也只能读取有限位数的数字量,因此转换结果所得的数字量 X 只是 A/R 的一个近似值,近似程度取决于 X 的位数。这个过程可用天平称量物体质量的过程来类比。称量结果所得数字量是最小法码质量的整数倍,小于最小法码质量的零头被舍去。

图1-7是基于这一原理而设计的一种ADC原理结构。它用一套比较器把输入模拟电压与一组参考电压 R_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 同时进行比较,比较器的输出 V_{oi} 只有两种逻辑电平(取0或1),分别代表 $A < R_i$ 和 $A > R_i$ 两种关系。各比较器输出逻辑电平 V_{oi} 经过适当编码,即可得到与 A 对应的数字量 X 。如果参考电压 $R_1 \sim R_n$ 符合二进制关系(即 $R_2 = 2R_1, R_3 = 2^2R_1, \dots, R_n = 2^{n-1}R_1$),则 X 为二进制码的数字量。比较器在这里担任着模拟电路和数字电路之间接口的任务,它的输入是模拟量,输出是开关量。比较器的分辨力和精度对ADC的分辨力有着决定性的影响。

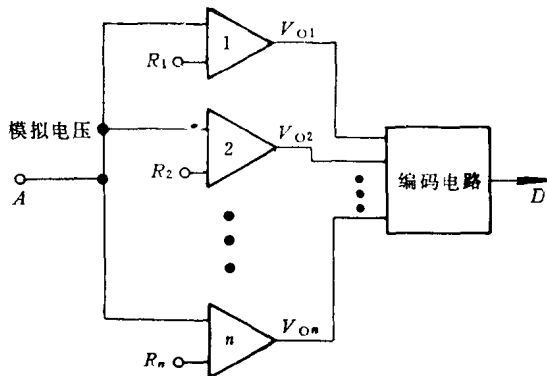


图1-7 ADC原理结构

模数转换的过程实质是将模拟信号进行幅值整量化的过程。量化过程中舍零取整所产生的误差称为量化误差,这是模数转换的原理性误差。减小这一误差的唯一办法是缩小度量单位 R_i (又称量化单位),但这要受到比较器分辨能力的限制。

§1-3 信息转换技术的现状和发展趋势

和数字计算机一样,转换器也经历了由电子管到晶体管再到集成电路三个发展阶段。在微型计算机出现以前,除数字仪表外,基本上没有通用的转换装置。用于各种测量和控制系统的转换器是与系统其他部分的电路统一设计,并由系统工作者使用晶体管、电阻、电容等分立元件进行组装和调整的。1964年集成运算放大器制造成功,它标志着模拟电路集成化的开端。20多年来,模拟集成技术取得了长足的进步。目前,不仅可用双极型工艺和MOS工艺制造出高性能的有源器件,而且可用薄膜工艺、离子注入工艺或扩散工艺获得高精度、高稳定的微型电阻,使ADC和DAC及其支持电路(模拟开关、多路切换器、采样-保持器、参考电压源及各种放大器和信号调理电路等)实现了微型化。它们被封装在双列直插式组件壳体内或被灌封在模块内,使用时可以直接焊接在印制电路板上,前者还可以插在通用的集成电路插座上。与性能相同的分立元件电路相比,它们的体积和重量都减少了几百倍,而且功耗大大降低,可靠性大大提高。这

一变革使得过去那种设计、制造和应用的分工界限发生了根本的变化。转换器及其支持电路的内部设计、制造和调整工作都由转换器的开发研制部门所接替,留给系统设计者的工作只是适当的选择、测试、组装和外部微调。他们不必了解其内部的细微结构,只需了解各类器件或模块的技术特性及其物理意义,以及不同功能的电路相联时会产生哪些相互作用,就能正确地估计转换器插入系统后对系统的性能指标产生多大的影响。用户只要按照制造厂提供的接线说明进行联接,并满足规定的工作条件,转换器一般就能正常工作。因此,这种变革不仅标志着转换器本身产生了质的飞跃,而且为更多的其他专业工作者能够运用转换器提供了方便条件。

由于微型计算机的普及,对模拟输入/输出接口的需求猛增,从而大大刺激了集成转换器的发展。10多年来,转换器的性能不断提高,成本逐年下降,品种和规格日益增多,并逐渐系列化。现在市场供应的集成转换器产品中,DAC的分辨力已达到18位二进制(如DAC1146,其稳定时间只需 $6\mu\text{s}$),就转换速度而言,8位DAC的稳定时间最短的只有 5ns (如AD9768,其刷新速率可达 100MHz);ADC的最高分辨力可达16位二进制(如ADC1140,其转换时间为 $35\mu\text{s}$),从转换速度看,视频用ADC的转换时间已小到 10ns 以下(如AD5010,其分辨力为6位二进制)。

随着集成工艺的不断改进,许多复杂的转换装置也不断实现微型化。例如轴角-数字转换器,在10多年前,要把一个角度传感器-自整角机(即同步机)或旋转变压器(即分解器)的输出交流信号转换成轴角的数字量,除了一整套硬件电路外,还需要用计算机进行反三角函数的运算。而现在,在一个烟盒大小的标准模块内可以容纳16位分辨力的双速(粗精组合)自整角机/旋转变压器-数字转换器(型号为SDC361/362),而且它不需要用计算机解算角度,直接能得出角度数字量。用两个36脚双列直插式组件就可组成一个四通道14位分辨力的自整角机/旋转变压器-数字转换器(型号为HMSDC8700)。目前,转换器制造业在不断改进产品结构,提高精度、分辨力和转换速度的同时,正在努力提高器件的集成度,以便在一个器件壳体内集中更多的功能,使转换器能更方便地与各种微处理器接口,以及使更复杂的标准电路微型化。

第二章 数模转换器

DAC 的作用是为数字编码形式的信号提供与之相应的模拟量输出。当数字信息处理系统的输出设备为电机、电液阀等以模拟方式工作的设备时, DAC 常常用作这类系统的输出接口。在舰船导航仪器中, 它主要用于把计算机输出的航向、姿态角、航速等数字信息转换成模拟量, 然后传输到船上其他需要模拟式显示或用来作为基准的地方。在惯性导航系统中, 高精度的 DAC 把计算机算出的地理坐标系的旋转速度变成控制陀螺进动的电流(可编程电流源)使平台坐标系精确地跟踪地理坐标系。

本章将介绍 DAC 的一般原理及实现方式, 双极性工作的 DAC, DAC 的性能分析和测试以及如何正确选择 DAC 等内容。

§ 2-1 数模转换功能的实现

一、权电阻网络 DAC

实现数模转换功能的最简单电路如图 2-1 所示。它包括一个参考电压源和一组二进制加权电阻, 每个电阻与一个模拟开关连接。开关所处的位置代表二进制输入数码。若开关处于所标的“1”状态, V_R 就产生电流流过与此开关连接的电阻。电流的大小和电阻的大小有关。所有支路电流之和就是此网络的输出总电流, 该电流与输入的数码成一定关系。

以图 2-1 中的 3 位 DAC 为例。第 1 位为数码的最高有效位 (MSB), 此位开关接通时, 提供的短路输出电流值为 V_R/R ; 第 2 位提供大小为 $V_R/2R$ 电流; 第 3 位是数码的最低有效位 (LSB), 它提供 $V_R/4R$ 电流。如果采用图中给出的数据: $V_R=10\text{V}$, $R=5\text{k}\Omega$, 可使 LSB 提供电流 0.5mA 。各位均接通时 (对应输入数码为 111), 短路输出电流为 3.5mA ($7/8$ 满量程, 此处满量程为 4mA)。

图 2-1 中的三组开关可以有 8 种 (2^3) 不同的状态, 如果测出不同状态下的电流, 并画出输出电流和输入数码之间的关系, 就会得出图 2-2 中的关系。

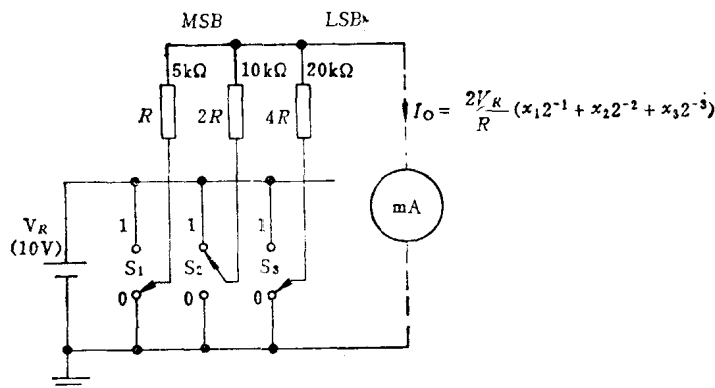


图 2-1 具有二进制权电阻的 DAC

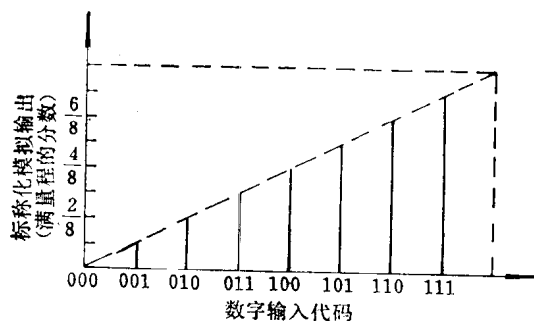


图2-2 理想的3位DAC转换特性

用上面叙述的原理, 每增加一位, 只要增加一个开关和一个相应的电阻, 就可以实现多位数码输入时的DAC。因此, n 位二进制DAC就需要 n 种加权电阻, 它们是 R , $2R$, $3R$, $\dots$, $2^{n-1}R$ 。对于这种网络所形成的短路输出电流, 其表达式为

$$I_o = \frac{2V_R}{R}(x_1 2^{-1} + x_2 2^{-2} + \dots + x_n 2^{-n}) \quad (2.1)$$

这里, 若开关 S_i 处于接通状态 $x_i = 1$, 反之 $x_i = 0$ 。

这种电阻网络式的DAC有一个严重的缺点, 即各位电阻阻值分布范围太宽。它们的精度以及随温度变化时的特性直接影响DAC的转换精度。对一个 n 位二进制网络, 其最高位和最低位电阻阻值之比为 $1:2^{n-1}$ 。如果用集成技术制造这种电阻网络, 当阻值比大于20时就难以保证各位电阻值的匹配及温度跟踪性能。因此, 采用电阻网络的集成DAC一般不能超过5位二进制。

图2-1所示的DAC只是一个原理线路。如果我们直接用毫安表读出输出电流, 则既不方便还会由于毫安表的低输入电阻而降低读出精度。为了读出这种二进制电阻网络所产生的模拟输出, 可以采用运算放大器将电流输出转变为电压输出。用图2-3所示的电路可以做到这一点。这里模拟输出信号是低输出阻抗的电压信号, 其值由下式确定, 选择不同的 R_f 可以确定不同的标度。

$$V_o = -\frac{2V_R}{R} R_f (x_1 2^{-1} + x_2 2^{-2} + \dots + x_n 2^{-n}) \quad (2.2)$$

式中的负号是因为运算放大器采用反向输入端的缘故。

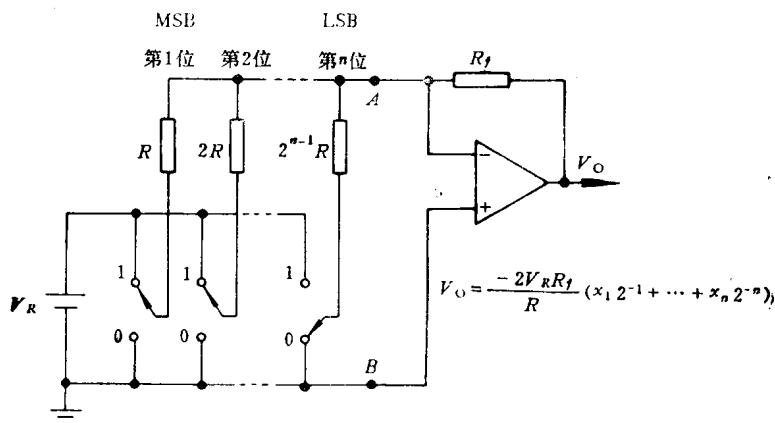


图2-3 运算放大器将电流输出变为低阻抗电压输出

二、 R - $2R$ 网络 DAC

从前面的分析可以看出, 权电阻网络是实现数模转换最简单和直接的方法。但是当转换位数较大时, 网络所需的电阻阻值范围太大。解决这一问题的方法是采用如图 2-4 所示的 T 形网络。这种网络保留了二进制权值的位电流, 但只需两种阻值的电阻, 因此称为 R - $2R$ T 形网络。

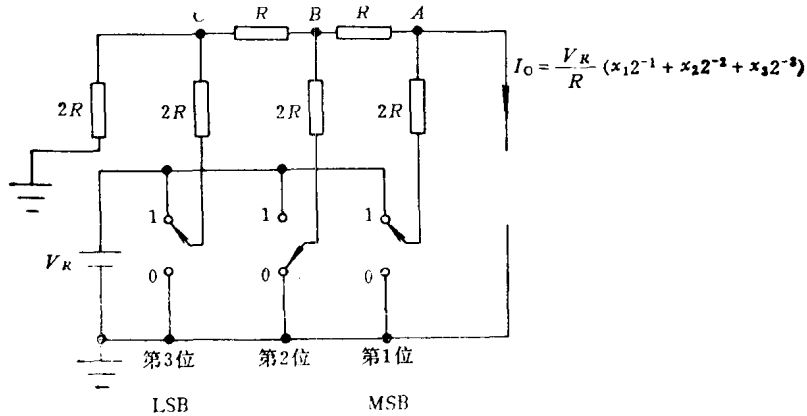


图 2-4 T 形网络实现二进制位权

为了简化起见, 图中只画出了三级网络。但是有趣的是, 不论多少级, 如果忽略参考电压源的内阻, 则网络的等效输出电阻都是 R 。从 C 点向左看电路, 输出等效电阻为 $2R \parallel 2R = R$; 在 B 点的输出等效电阻是 R 和 R 串联后再与 $2R$ 并联, 即 $(R + R) \parallel 2R = R$; 如此类推, 可以看出输出电阻和级数无关。

现在我们用叠加原理来推导输出电压的大小。网络总的输出电压可以看成各级开关所产生的输出电压的和。在讨论每一级开关接 “1” 状态所产生的输出电压时, 假定其他各级开关皆处于 “0” 状态。图 2-5 中给出了各级的等效电路。由图可见, 第 1 位 (MSB) 对开路输出电压提供的分量为 $V_R/2$; 第 2 位提供的分量为 $V_R/4$; 第 3 位 (LSB) 提供的分量为 $V_R/8$ 。显然, 对于 n 级 R - $2R$ 网络 DAC, 开路输出电压的表达式为

$$V = V_R(x_1 2^{-1} + x_2 2^{-2} + \cdots + x_n 2^{-n}) \quad (2.3)$$

和前面一样, 若开关 S_i 处于接通状态, 则 $X_i = 1$; 反之, $X_i = 0$ 。

相应的输出电流为

$$I_{O_{\text{开路}}} = \frac{V_R}{R}(x_1 2^{-1} + x_2 2^{-2} + \cdots + x_n 2^{-n}) \quad (2.4)$$

当外接负载为 R_L 时, 网络输出电压为

$$V_O = V_R \frac{R_L}{R + R_L}(x_1 2^{-1} + x_2 2^{-2} + \cdots + x_n 2^{-n}) \quad (2.5)$$

R - $2R$ 网络 DAC 具有对称特性。如果把图 2-4 所示的网络端口倒置, 即把电阻网络的输出端接参考电压 V_R , 而把各位开关接参考电压的一端改接为输出相加点, 则同样可以完成数模转换。我们称这种接法为电流开关型接法, 如图 2-6 所示。这种网络结构具有两个特点: 一是不管开关接哪一端, 流过网络的电流总是近似恒定的, 因此输入

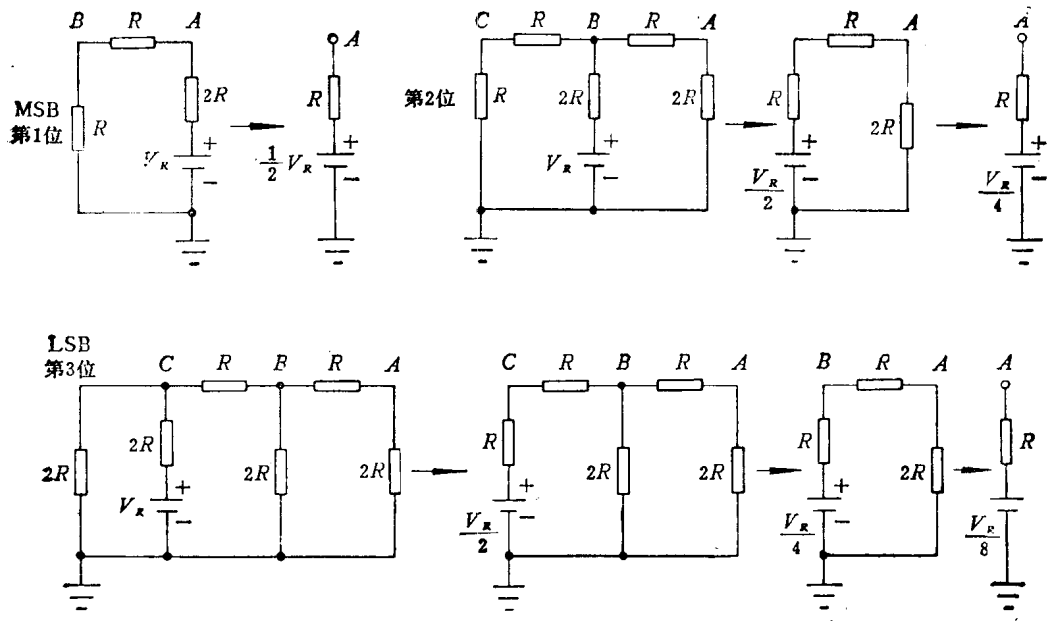
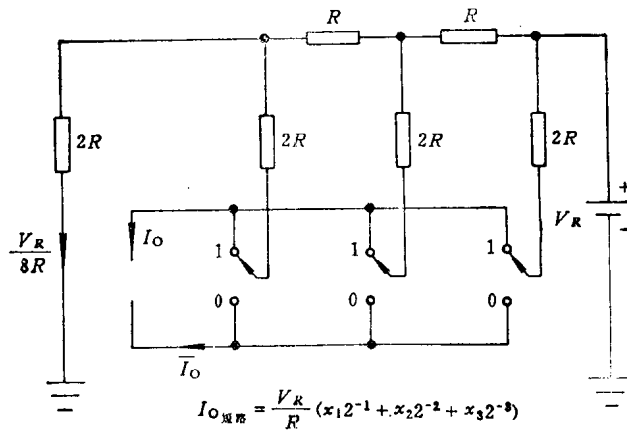


图2-5 T形网络转换器等效电路

图2-6 R - $2R$ 网络的电流开关接法

数码变化时, 网络中由于变化的电流对杂散电容充电引起的瞬态过程要短得多; 二是模拟开关切换时, 流过开关的电流恒定, 开关两端电压很小, 所需的驱动电压也很小。这不仅有利于提高切换速率, 而且切换时产生的瞬态电压也很小。

由图 2-6 的 3 位 DAC 产生的短路输出电流为

$$I_{O_{短路}} = I_R (x_1 2^{-1} + x_2 2^{-2} + x_3 2^{-3}) \quad (2.6)$$

其中 $I_R = V_R / R$ 。

三、分级权电阻网络 DAC

前面讨论了两种最常用的二进制位权网络结构的 DAC。在有些设计中常常把上述两种网络结构混合使用, 组成多组位权网络结构, 以提高转换器的分辨力或得到非二进