

态。

以上四点没有涉及电荷激发电磁场的具体细节。所以，尽管经典电动力学在处理电子的自场反作用问题上尚存在着困难，但 $\gamma(\nu)$ 的表示式 (2.10) 和 (2.10') 却可以不受这一“困难”的影响而预先确定出来。

2. 我们不考虑电子激发电磁场的具体细节，就能定出 $\gamma(\nu)$ 的原因在于：

(1) 用 $\gamma(\nu)$ 来描写自场反作用，本身是一种近似；

(2) 我们要求振子与辐射场之间能够达到热平衡状态，这实际上是对振子与辐射场之间的相互作用加上了一种限制；

3. 从能量交换的角度来看， γ 可视为“动力摩擦系数”^[5]，它与振子输运给场的能量速率有关，而随机洛仑兹力决定场输送给振子的能量

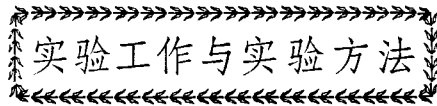
速率。两者要达到平衡，故 γ 不可取任意值。这与自发辐射的爱因斯坦系数的热平衡确定方法是一样的；

4. 因为方程 (1.5) 中的阻尼项所对应的功率就是振子的辐射功率，因此，我们对 $\gamma(\nu)$ 的确定也就是用统计方法确定了振子辐射功率的表示式 (1.8) 和振子对电磁波的散射截面。

感谢谈镐生教授的指导和甘子钊同志的有益意见。

参 考 文 献

- [1] 曹昌琪,《电动力学》,1962年,第五章.
- [2] W. Heitler,《The Quantum Theory of Radiation》,1954年,第一章.
- [3] 朗道和栗弗席兹,《场论》,1959年,§9-9.
- [4] 张宗燧,《电动力学及狭义相对论》,1957年,第五章,第九章和第十章.
- [5] R. Kubo, *J. Phys. Soc. Japan*, **12** (1957), 570, and **12** (1957), 1203.



一个带误差校正的并串行模数转换器

模数转换器研制小组
(中国科学院物理研究所)

一、前 言

在我们生活的这个世界上,许多物理量,例如温度、长度、重量等等,都是模拟量,即它们的变化是连续的。在进行数值计算以前,首先必须把它们换算成数字量,例如用温度计测出某物体的温度是多少度;用尺子量出某物体的长度是多少米;用秤来称出某物体的重量是多少公斤;把这些连续量变成不连续的数字(这些数字是度量单位的倍数)。然后用纸记下这些测得的数字,进行计算。这个过程就是一个模数转换过程。从某种意义上说,温度计、尺子、秤等也可称作是模数转换器(通常用 ADC 或 A/D 表示)。本文所讨论的模数转换器是指把

电学模拟量(电压或电流)转换成数字量的设备,常见的数字电压表就是这类模数转换器的一种。当然,真是要用它来作模数转换器用时,因其速度太慢而常常不能满足使用者的要求。

任何物理实验装置如果要和数字电子计算机打交道,首先必须把实验装置送出的模拟物理量(如温度、光强、压力等)经传感元件(如热敏元件、光电器件、压电元件等)转换成与之有一定关系的电压或电流信号,再用模数转换器把这些电压或电流转换成数字量,这些数字量与物理实验装置送出的物理量是等值的(这里所谓的等值是指通过一定的转换关系,可以用这些数字量换算成与装置送出的物理量足够准确接近的物理量,其接近的程度视模数转换器

的精度而定).它可以直接送到数字计算机进行计算和数据处理.在使用模数转换器以前的物理实验里,常用的办法是把实验得到的曲线显示在示波器荧光屏上,然后拍照片,从照片上一点一点地取数据;或者把实验结果记录在电子电位差计记录纸上,从纸上一点点地取数据,这样作不但不精确,也很花时间.如果一个实验在连续进行,要求根据从前面得到的实验结果去指导后面实验的进行,甚至自动修正实验条件,用上述的办法显然是无法作到的.这就要求不断地把从实验装置中得到的实验结果通过模数转换器变成数字量,送进数字计算机进行计算处理,并最后得到处理结果.如果需要,计算机给出的数字结果以数字的形式送进数模转换器(一种可以把数字量转换成与之等值的电压或电流的装置).通过它去控制执行部件改变实验条件,从而完成了实验自动化.例如,我们要求一个加温设备按给定的温升曲线对某实验装置进行自动加温,首先用热敏元件把被加温的实验装置温度转换成与之有确定关系的电压(或电流),通过模数转换器把这个电压(或电流)转换成数字量送进计算机,计算机根据预先设定的曲线参数和排好的程序对采进来的数据进行处理,然后给出处理结果,它以数码的形式送到数模转换器,根据计算机的指令控制加热器的电流大小进行加温.在这个过程中不断地采集温度参数,经计算机处理后又不断地修正加温条件,使温升能较好地按照预先给定的温升曲线进行加温.这是一个闭环控制的例子.再如,对于一个不能在现场进行观测的实验装置进行遥测时,如果把从装置中所得到的模拟信号直接从远距离传送出去,为消除远距离传输所引起的衰减,必须逐级进行放大,由于噪声和失真的积累而无法得到准确的实验结果.然而,如果使用了模数转换器,在实验装置附近就近将模拟信号变成数字代码而进行数字远距离传送,就可避免模拟信号逐级放大所引起的噪声和失真积累所带来的实验结果不准确.同时,这些数字量可直接送到计算机中进行处理.

我们所研制的模数转换器用在科学院物理

所受控热核反应 6 号实验装置的数据采集处理系统中,实验装置所产生的单次信号经模数转换器送进计算机进行计算、处理,计算机给出实验结果,用以指导工作人员修正实验条件和诊断条件,同时把实验结果穿成纸带或记入磁带机,并通过数模转换器在示波器上显示单次实验所得到的各种参数的实验曲线.由于模数转换器和数据采集系统的使用,使该装置的实验周期大大缩短,所得到的实验数据也较前更为准确.该数据采集和处理系统方框图示于图 1.

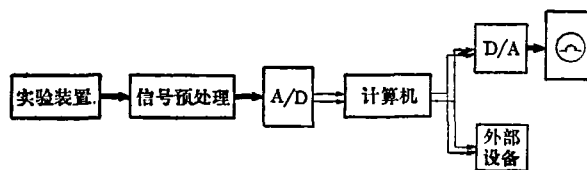


图 1 受控热核反应 6 号实验装置数据采集处理系统方框图(粗线为模拟信号线,细线为数字信号线)

从上面所述可以看出,模数转换器有两个指标,一个是转换速度,即每秒钟它可以把多少个模拟量转换成数字量;另一个是测量精度,即在满刻度量程时可得到多少位精确的数字量.

随着科学技术的发展,许多要检测的物理实验要求模数转换器有更快的速度和更高的精度;而由于电子计算机速度的不断提高和容量的不断加大,为高速度、高精度模数转换器的联机使用提供了可能性,进一步促进了模数转换器的发展.近几年来,新的高速度、高精度、集成化模数转换器不断出现,各种类型的模数转换器在遥测、遥控、数字通信、数字控制等科学技术以及国防、工农业生产等各个领域,日益发挥着不可缺少的重要作用.

二、模数转换器的工作原理

不同的使用对象对模数转换器的指标要求也不同.例如在电视图象数据处理中所使用的模数转换器精度要求不高,但要求速度快.而在一些精细结构测量的场合,对速度要求不高

但要求有比较高的精度。因而，对不同的使用对象就有不同类型、不同方案的模数转换器。这些方案在有关模数转换器的书中都有介绍，这里只就和我们工作有关的两种方案作一原理性介绍，着重介绍我们所采用的第三种方案的工作原理。

常见的超快速模数转换器方案是并行的，图 2 给出了一个三位并行模数转换器方框图。

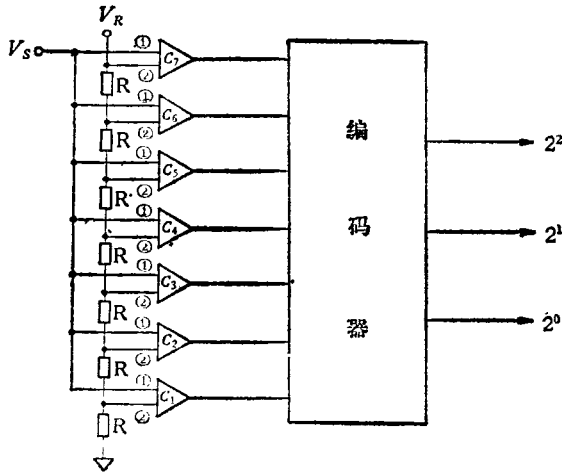


图 2 全并行 A/D 方框图

参看图 2，被测模拟信号同时加在 7 个比较器的输入端 ①，各比较器的另一输入端 ② 分别接在电阻分压器的各分压点上，该点电压为比较器的参考电压，当 ① 端电压超过 ② 端电压时，比较器翻转，输出电平由高变到低。不难看出，如果 V_R 为 7 伏，比较器 C_1 翻转的条件是输入被测模拟电压 $V_s > 1$ 伏， C_2 翻转的条件是 $V_s > 2$ 伏，……， C_7 翻转的条件是 $V_s > 7$ 伏，这个 A/D 可以把 V_s 转换成 8 个数字(0, 1, 2, …, 7)经编码器后输出三位二进制数。由于各比较器是同时工作的，全部转换时间等于比较器翻转时间和编码器编码时间之和，因而速度是很快。但是每增加一个数字就要增加一个比较器，同时编码器也要相应地增加元件。输出每增加一位二进制数，器材就要增加一倍，在高精度模数转换器的制造中，这种方案由于太费器材而无法采用。

目前在数据采集系统中运用较广的一种物理

方案是逐位比较模数转换器，它是一种串行工作方式的，原理方框图示于图 3。参看图 3，在开

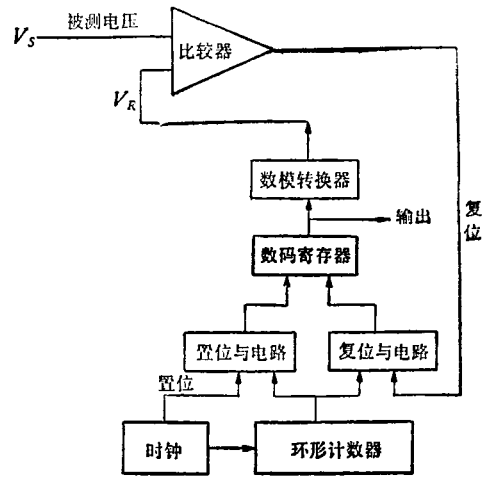


图 3 逐位比较模数转换器原理方框图

始测量时，启动脉冲使数码寄存器清“0”，数模转换器输出到比较器的电压为 0 伏。第一拍测量周期时，环形计数器仅接通最高位数码寄存器的输入“与电路”。当由时钟脉冲发生器送出的“置位”脉冲到来时，最高位数码寄存器被置“1”，因而数模转换器产生与之等值的模拟电压 V_{R1} ，与被测模拟信号 V_s 电压在比较器进行比较，如果 $V_{R1} < V_s$ ，说明这位数码寄存器的状态是正确的，比较器无动作，没有复位脉冲输出，最高位的“1”状态就被保留下来了。如果数模转换器输出的电压比被测模拟电压高，说明这位数码寄存器的状态是错误的，这时比较器翻转给出“复位”脉冲，将该位数码寄存器置“0”，则该位数模转换器输出电压为 0 伏。

第二拍测量周期时，环形计数器仅接通次高位数码寄存器的“与电路”，工作原理和第一拍一样，由比较器的输出决定该位数码寄存器的状态是“1”还是“0”。

以下各拍测量周期顺序逐位重复第一拍所进行的过程，直到最后一拍，将最低位测完为止，全部测量就结束了，由数码寄存器送出所保留下的状态，作为与被测模拟电压等值的数字。

和并行模数转换器比较可看出，它只要一

个比较器,测量精度按等比级数增加,而器材却只按等差级数增加,对高精度的模数转换器说来,这种方案是很省费用的;但从速度来看每增加一个二进制位,就要增加一拍测量周期,十二位的转换器要用十二个测量周期时间,因而很难得到高速转换器,这是串行模数转换器的主要缺点。

根据上述两种方案的优缺点,在我们所用的方案中,采用了带误差校正的并串行模数转换方案。在整个电路中有一个四位并行模数转换器,它可以同时转换模拟电压成四位二进制数码(除第一组外,其他几组四位数的首位作为误差校正的标志,因而每组对输出只贡献三位二进制数。)第二拍测量周期时,同时转换并给出后面四位二进制数,以此类推。可以看出,它不是一位一位地串行转换,而是三位一组地转换,在小组内是并行的,小组之间又是串行的,故称作并串行的。这样既满足了速度要求,又节省了器材。

我们研制的 7601 型带误差校正的并串行模数转换器原理框图示于图 4。根据实验装置中所给出的信号频谱的最高频率分量,设置条件处理网络,将不希望的高频干扰滤掉,经处理

后的被测信号送到采样保持电路,采样门接通 600 毫微秒以后断开,在保持电路中给出与在采样时间里被测电压信号同样大小稳定不变的电压信号,在模数转换的时间里,它相当于一个直流信号。工作过程参看图 4: 第一拍测量周期时,保持电路给出的电压信号经电压跟随器被第一个模拟开关 α_1 接通到四位并行模数转换器“A/D”,在那里,模拟电压被转换成四位二进制数码(以二进制补码表示,首位为符号位,“1”代表负号,“0”代表正号)。从“A/D”出来的四位二进制数码分两路送出,一路往上送到数模转换器“D/A I”中的“数码寄存器 I”,由它控制“D/A I”产生与所送进的数码等值的模拟电压,从“D/A I”出来的模拟电压与被测模拟电压相减,其差值被送到“ $\times 8$ 放大器 I”的输入端(它代表被测模拟信号四位以后所有位模拟信号幅度的大小)。从“A/D”出来的数码通过另一通路被送到“接数寄存器 I”,并通过它送进全加器,准备与下一组数码相加,如果需要可对这组数码进行校正,这样,第一拍测量就完成了。在全加器中得到的四位数码,其中第一位为符号位。在第二拍测量周期时, α_1 断开, α_2 接通,由“ $\times 8$ 放大器 I”输出的差值模拟信

号被放大了 8 倍,使被测模拟信号四位以后的模拟量进入“A/D”测量门限以内,经 α_2 使它送入“A/D”,“A/D”转换它成为四位二进制数,如同第一拍时的情况一样,此四位数一路送往“D/A II”中的“数码寄存器 II”,通过“D/A II”产生与之等值的模拟电压,与“ $\times 8$ 放大器 I”的输出模拟电压相减送进“ $\times 8$ 放大器 II”(它代表被测模拟信号 7 位以后所有位模拟信号幅度的大小)。这四位数通过另一通路被送进“接数寄存器 II”,并送进全加器,这一拍所得四位数的

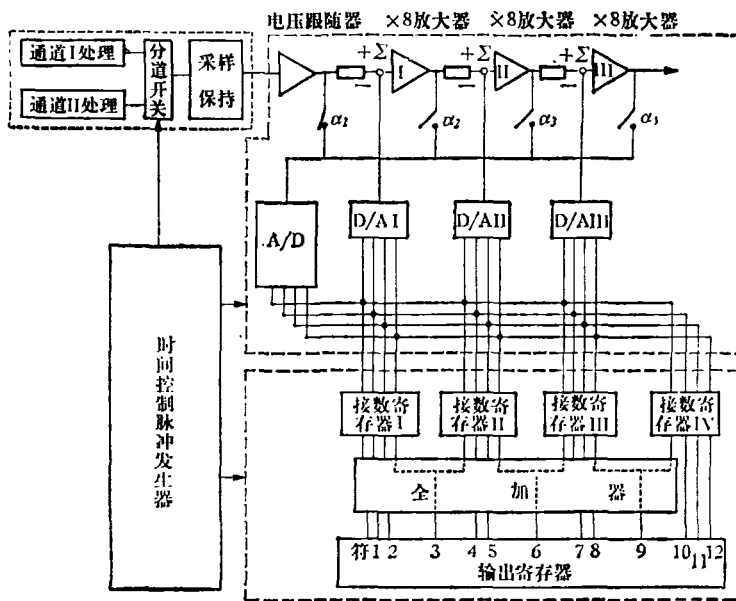


图 4 7601 型 A/D 工作原理方框图

首位与前一拍所得四位数的末位同位在全加器里相加,并进行误差校正,在全加器中得到七位二进制数,这样,第二拍测量周期就结束了。第三拍开始时, α_2 断开, α_1 接通,类似于第二拍的过程又重复一次,在全加器中得到十位二进制数,第四拍类似于第三拍,是从 α_3 断开, α_4 接通开始的,但由“A/D”出来的四位数不再送“D/A”而只送“接数寄存器 IV”,其首位作为误差校正的判据,其余三位直接送到“输出寄存器”。当第四拍结束后,由全加器将全部进行了误差校正过的正确数码送到“输出寄存器”,在“输出寄存器”中有 13 位数,一旦计算机发来取数命令,就可将这转换好的数取走,采样门又开始采样,转换器又开始转换,从而又开始对下一个模拟电压进行转换并输出数字。时间控制脉冲发生器给出节拍脉冲,使模数转换器按设计要求进行工作。

三、误差校正的意义和方法

理想的比较器应具有这样的特性,假定比较器所加的参考电压为 1 伏,被比较电压只要大于 1 伏,比较器就输出逻辑“0”,但实际的比较器在 1 伏附近总有一个不确定区,当被比较电压为 1.01 伏,或为 0.99 伏时,比较器都可能输出逻辑“1”,也都可能输出逻辑“0”,这就会引起转换误差,对于一个满刻度为 2.048 伏,12 位精度的并串行模数转换器而言,比较器的不确定区必须小于 1 毫伏,这对比较器是一个很高的技术指标。

理想的模拟开关在通导时,阻抗为 0 欧,断开时,阻抗应为无穷大。而在实际的模拟开关中,总是存在着通导阻抗,当信号通过模拟开关进入四位并行模数转换器时,总是会有所衰减而给测量带来误差。

为满足模数转换器速度和精度的要求,希望放大器输出的模拟信号能尽快地达到实际被测幅度。例如,对一个 12 位的并串行模数转换器而言,必须在被测电压上升到实际幅度的 99.9% 以后才能进行转换,这对放大器的速度

指标提出了很高的要求。

我们采用误差校正方案的意义在于,不是完全靠提高比较器、模拟开关和放大器的技术指标来消除误差、提高转换速度和精度,而是先默认了这种误差,然后由控制逻辑电路加以校正,从而给出正确的结果。由于采用了误差校正方案,允许比较器有较宽的不确定区,允许信号在经过模拟开关时有点衰减,也允许放大器输出电压达到最大幅度的 90% 以后即可进行转换。这些元器件所引起的误差都在下一拍得到校正。这样就作到了使用低指标的元器件来完成高速度、高精度模数转换器的目的。

误差校正的方法在前面转换原理部分已提到一些,在设计四位并行模数转换器时,每个比较器上所加的参考电压都比数码所代表的模拟电压少半个门限电压。例如,对于每节门限电压差为 0.1 伏的并行模数转换器,输入电压只要大于 0.05 伏就被认为是 0.1 伏,用二进制编码 0001 来表示它。同样,只要大于 0.15 伏就被认为是 0.2 伏而被编码成 0010; 大于 0.25 伏就被认为是 0.3 伏而被编码成 0011, 大于 0.35 伏就编成 0100…。只要元器件、噪声干扰引起的误差不大于半个门限电压,转换器经校正后都可给出正确的结果。下面用一个例子来说明误差校正是如何进行的。参看图 4。

设想有一个模拟电压,它的正确数值用八进制数表示为 $\bar{1}.50\bar{5}$ 伏(在数码上加“-”,表示数是八进制的,以示与十进制的区别)。这个模拟电压送进模数转换器进行转换,看它如何经转换、校正而得到正确的结果。

第一拍: 因为 $\bar{1}.50\bar{5}$ 在 $\bar{1}.4$ 与 $\bar{2}.4$ 之间,经四位并行“A/D”被认为是 $+\bar{2}$,表示成二进制数为 0010,通过“数模转换器 I”产生与 $+\bar{2}$ 等值的模拟电压 $+\bar{2}.00\bar{0}$ 伏的模拟电压,它与输入电压 $\bar{1}.50\bar{5}$ 在“ $\times 8$ 放大器 I”输入端相减:

$$\bar{1}.50\bar{5} - \bar{2} = -\bar{0}.27\bar{3} \text{ (伏)}$$

所得差值 $-\bar{0}.27\bar{3}$ 伏经“ $\times 8$ 放大器 I”放大后为 $-\bar{2}.7\bar{3}$ 伏。

第二拍: $-\bar{2}.7\bar{3}$ 在 $-\bar{2}.4$ 与 $-\bar{3}.4$ 之间,经 A/D 转换被认为是 $-\bar{3}$,用二进制补码表

示为 1101, 其首位为 1, 给出校正标志, 要求在其前各位都加 1. 同时, 1011 码通过“数模转换器 II”产生与 -3 等值的模拟电压 -3.000 伏, 在“ $\times 8$ 放大器 II”输入端与 -2.73 伏相减:

$$-2.73 - (-3) = +0.05 \text{ (伏)}.$$

所得差值 $+0.05$ 伏经“ $\times 8$ 放大器 II”放大后为 $+0.5$ 伏.

第三拍: $+0.5$ 在 $+0.4$ 与 1.4 之间, 经 A/D 被认为是 1 , 用二进制码表示为 0001, 通过“数模转换器 III”产生与 1 等值的模拟电压 1.000 伏, 在“ $\times 8$ 放大器 III”输入端与 $+0.5$ 伏相减:

$$0.5 - 1 = -0.5 \text{ (伏)}$$

所得差值 -0.5 伏经“ $\times 8$ 放大器 III”放大后为 -3 伏.

第四拍: -3 在 -2.4 与 -3.4 之间, 经 A/D 被认为是 -3 , 用二进制数补码表示为 1101, 其首位为 1, 给出校正标志, 要求在其前各位都加 1. 至此经“A/D”的转换都已完成, 在全加器中将每拍所得结果按位相加并进行误

差校正:

第一拍得 ($+2$):	0010	
第二拍得 (-0.3):	1111101	(校正)
第三拍得 ($+0.01$):	0001	
第四拍得 (-0.003):	<u>+111111111011</u>	(校正)
	0001101000101	

相加结果得到 0001101000101, 首位为 0 表示正数, 其余 12 位刚好为 8 进制的 1.505 .

四、7601 型模数转换器

根据上述原理, 我们研制成一台 7601 型带误差校正的并串行模数转换器, 全部采用国产元器件, 现已达到这样的技术指标, 包括采样保持时间, 全部转换时间为 9.6 微秒, 满刻度量程为 ± 2048 毫伏, 精度为 12 位二进制位. 后来根据工作需要作成双通道工作方式, 每个通道转换速度为 50 千赫, 单通道工作时转换速度为 100 千赫. 目前, 该项工作已推广到北京市东城区东四电子仪器三厂.

不用纯试样 X 射线多相定量分析新方法

刘 沃 垣

(包头钢铁公司冶金研究所钢种室)

引 言

物质中各种类型的相的形态、晶体结构及分布, 对物质的物理化学性能有决定性的影响. 研究这些相的分析方法称为相分析法. 根据这些相的 X 射线衍射花样及衍射强度, 可以定出各相在物质中的重量分数, 称为 X 射线定量相分析法, 它在科研和生产中有重要的应用. 但是过去由于此法分析程序复杂、纯试样制备困

难以及有的相衍射花样重叠等原因, 限制了它的广泛应用. 近几年 F. H. Chung 提出了基本抵消法^[1]和非内标法^[2], 简化了分析程序, 提高了微量相的分析灵敏度. 随后, 我们也发展了一些分析方法, 如不用纯试样求参考强度的联立方程法, 自身内标法, 重叠线分离法等等. 所有这些新方法都在一定程度上克服了过去的分析困难, 使 X 射线定量相分析技术在科研和生产中发挥更大的作用. 另外, 这些新的数学处理方法在其他物理量的检测工作中, 也有一定