

数字伺服系统

徐承忠 王执铨 王海燕 著



国防工业出版社

数字伺服系统

徐承忠 王执铨 王海燕 著

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书是将控制理论、信号处理与微型计算机软硬件、专用模块、驱动线路紧密结合起来的著作。通过本书学习，读者能从硬件、软件两个方面掌握数字伺服系统原理，并能实际地设计装调出符合工程要求的数字伺服系统。本书内容主要包括：基础知识；数字伺服系统中角的表示方法；轴角编码装置的原理与设计；PWM放大器；控制计算机及其接口；控制计算机的程序设计基础；数字伺服系统中的复合控制信号；数字伺服系统的控制算法举例；数字伺服系统的调试与专用测试仪器。

本书绝大部分内容取材于作者们多年来的科研工作，其中有一半源于作者近几年发表的论文。

本书可供高等院校自动控制类专业高年级本科生、研究生使用，也可供从事电气自动化方面工作的工程技术人员参考。

数 字 伺 服 系 统

徐承忠 王执铨 王海燕 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)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850 × 1168 毫米 32 开本 印张 57 153 千字
1994年2月第一版 1994年2月第一次印刷 印数：00 001—2 500册

ISBN 7-118-01144-4/TP·149

定价：7.00 元

前 言

近年来，计算机控制系统、数字控制系统等书籍已出版了多种。它们大多详细地叙述了离散控制原理，而对数字伺服系统的原理与设计讨论甚少。

本书则是将控制理论、信号处理与微型计算机软硬件、专用模块、驱动线路紧密结合起来专著。通过本书学习，读者能从硬件软件两个方面掌握数字伺服系统的原理，并能实际地设计和装调出符合工程要求的数字伺服系统。

我们撰写本书，以自动控制类专业高年级学生和研究生为读者对象。假设读者在阅读本书之前已掌握了“自动控制理论”、“微型计算机原理”、“自动控制系统”的基本知识；并不熟悉本书举例时用到的16位单片机 MCS-96。

由于篇幅所限，对于读者在阅读本书之前应该掌握的理论、方法，硬、软件知识，我们将直接引用；对于读者不易得到资料的模块（轴角编码装置所用模块），我们将做较详细地介绍；对于常用芯片，如：存储器、锁存器、驱动器、译码器、通用接口和D/A转换芯片等，凡与应用直接有关的内容，我们将简要介绍。

在深度方面，我们力图对数字伺服系统的主要问题做深入细致地讨论。在广度方面，考虑到内容的先进性、应用的广泛性、本书的系统性与可读性，我们通常只分析1~2种例子，并通过例子来说明问题。

虽然具体例子总带有特殊性，但普遍性寓于特殊性之中，希望读者对此予以充分注意。若能通过实例总结出寓于其中的普遍性，那么作者的意图就已经达到。

本书是诸作者多年来科学研究工作的总结与提高。撰写本书

的宗旨是：凡属数字伺服系统的主要问题，凡作者通过理论分析与实践检验且确认为正确有用的，均在本书中得到了较充分的反映。主要有以下几点：

1. 数字伺服系统中角的表示方法、数字信号的圆图表示法（分析数字伺服系统时，补码的图形表示法的应用与引伸）；
2. 多极双通道旋转变压器—RDC 轴角编码装置的数据锁存及组合问题分析；
3. 二态及三态工作制的 PWM—GTR 伺服驱动器的原理、特性及优缺点比较；常用的电流保护电路；“动力润滑”的实现；电流环的非线性控制；
4. 控制计算机及其接口的时序分析；
5. 输入角 θ_i 的量化对信号 $K_s \Delta^2 \theta_i$ 的影响及其对策；
6. 分析线性伺服系统正弦跟踪达稳态后的误差角时，矢量图的应用；
7. 设计控制算法时，在线性区和砰砰区之间设置等角加速度区及其设计方法；
8. 对数字伺服系统专用测试仪器的技术要求。

本书的第一、二、四、五、六章由徐承忠撰写，第三章由王执铨撰写，第七章由王海燕撰写。

参加科学研究工作的还有徐志良老师、黎晓明老师、杜宪师傅；研究生曹璟、白记中、郎澄宇、刘慧、李军，85~87级十多位本科生也参加了科研工作。没有他们大量辛勤地劳动，就无法写成本书。

由于控制理论、计算机技术以及元器件的迅速发展，数字伺服系统涉及的面又十分广泛，加之受作者学术水平的限制，本书在内容的取舍、安排，叙述的系统性、正确性方面定会存在不少问题，恳请读者批评指正。

作者

1992年于南京孝陵卫

目 录

第一章 基础知识	1
§ 1—1 概述	1
§ 1—2 数字伺服系统的工作原理及其各处的信号	1
§ 1—3 数字伺服系统中角的表示方法	8
§ 1—4 数字伺服系统中数字信号的圆图	12
习题	15
参考文献	15
第二章 轴角编码装置	16
§ 2—1 概述	16
§ 2—2 自整角机—数字转换器 (SDC) 和正余弦旋转变压器—数字转换器 (RDC)	18
§ 2—3 单通道旋转变压器—RDC 轴角编码装置	28
§ 2—4 双通道旋转变压器—RDC 轴角编码装置	33
习题	42
参考文献	43
第三章 PWM 伺服放大器	44
§ 3—1 PWM 功率放大器的工作原理与特性分析	44
§ 3—2 PWM—GTR—伺服电动机的保护电路	58
§ 3—3 三态工作制的 PWM—GTR 伺服驱动器	64
习题	71
参考文献	72
第四章 控制计算机及其接口	73
§ 4—1 数字伺服系统中的控制计算机的功能和对它的要求	73
§ 4—2 输出接口	76
§ 4—3 输入接口	79

VI

§ 4—4 控制计算机的硬件线路	86
§ 4—5 接口举例	96
§ 4—6 时序分析	100
§ 4—7 控制计算机的地址译码器举例	104
习题	107
参考文献	108
第五章 控制计算机的程序	109
§ 5—1 控制计算机的程序设计基础	109
§ 5—2 数字伺服系统中的复合控制信号	116
习题	130
参考文献	131
第六章 数字伺服系统的控制算法举例	132
习题	162
参考文献	162
第七章 数字伺服系统的调试与专用测试仪器	163
§ 7—1 数字伺服系统的调试	163
§ 7—2 对数字伺服系统专用测试仪器的技术要求	166
§ 7—3 DSST—II 型数字伺服系统测试仪简介	172
习题	177
附录 两条公式的实验验证	178

第一章 基础知识

§ 1—1 概 述

伺服系统原称位置随动系统，简称随动系统。本书所说的数字伺服系统是指：以计算机作为控制器的伺服系统。

在一些国家的很多应用场合中，数字伺服系统已代替了模拟式伺服系统。在我国，数字伺服系统的研制工作已由实验室研究阶段步入应用阶段。数字伺服系统在很多应用场合代替模拟式伺服系统，这是一个必然的趋势。产生这一趋势的原因如下：

自动控制理论和计算机技术是数字伺服系统技术的两个最主要的依托。自动控制理论的高速发展，为数字伺服系统研制者提供了不少新的控制律以及相应的分析和综合方法。计算机技术的飞速发展，为数字伺服系统研制者提供了实现这些控制律的现实可能性。以计算机作为控制器、基于现代控制理论的伺服系统，其品质指标无论是稳态精度还是动态响应达到了前所未有的水平，比模拟式伺服系统高得多。

计算机之所以能实现这些控制律，由于它精度高、运算速度快、存储器容量大、输入输出功能强以及具有很强的逻辑判断功能。

单片微型计算机由于工作可靠、体积重量小、价格低廉，深受数字伺服系统研制者青睐。近几年来，控制计算机（作为数字伺服系统控制器的计算机）这一角色常由以单片微型计算机为核心组成的基本系统来扮演。

§ 1—2 数字伺服系统的工作原理及其各处的信号

在数字伺服系统中，作为控制器的控制计算机之输入信号与输出信号均为数字信号，功率放大元件、执行元件等的输入信号

与输出信号均为模拟信号。因此，数字伺服系统是数字—模拟混合控制系统。下面讨论数字—模拟混合控制系统中信号的各种形式。

从数学的观点看，控制系统中的信号是时间的函数。按其定义域的不同对信号进行分类：若定义域为区间，信号称连续信号；若定义域为区间上离散的点，信号称离散信号。按其函数值的形式不同对信号进行分类：数字信号以数码形式出现，由于寄存器的位数总是有限的，因此数字信号可能取的值总是有限多个，如寄存器 8 位，数字信号可能取的值为 $00\text{H} \sim 0\text{FFH}$ ，共 256 个；模拟信号以电压、电流、角速度、转矩等形式出现，可能取的值通常有无穷多个。

对数字—模拟混合控制系统中的信号进行更细的分类，可分四类，即连续数字信号、连续模拟信号、离散数字信号和离散模拟信号。图 1—1 形象地表示它们，横坐标 t 表示时间。图 1—1(a)

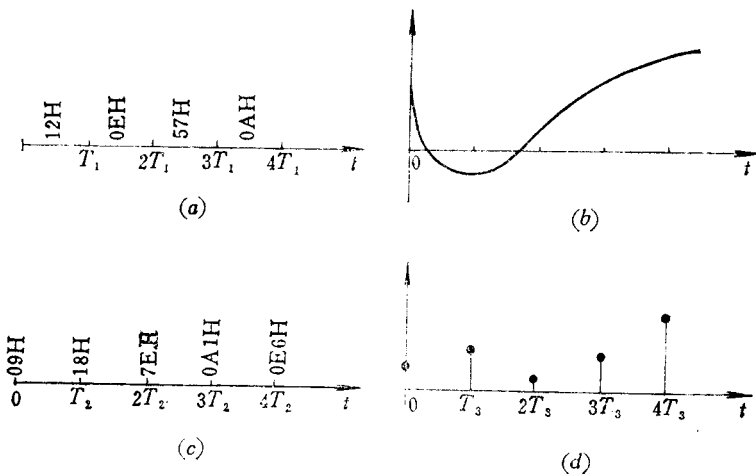


图 1—1 数字—模拟混合控制系统中信号的形式

表示连续数字信号，在 $0 \leq t < T_1$ 这段时间间隔其值为 12H ，在

$T_1 \leq t < 2T_1$ 这段时间间隔其值为 $0EH$, \dots 。图 1-1(b) 表示连续模拟信号。图 1-1(c) 表示离散数字信号, 当 $t=0$ 时其值为 $09H$, 当 $t=T_2$ 时其值为 $18H$, 当 $t=2T_2$ 时其值为 $7EH$, \dots ; 当 $0 < t < T_2$, $T_2 < t < 2T_2$, \dots , 它没有定义。图 1-1(d) 表示离散模拟信号, 当 $t=0, T_3, 2T_3, \dots$, 它取一定数值; 其余时刻它没有定义。

多数书上, 只将图 1-1(c) 的那类信号称数字信号; 本书为了叙述方便, 将图 1-1(a) 的那类信号也称数字信号, 在“数字信号”前加上“连续”或“离散”来区分图 1-1(a) 和图 1-1(c) 这两类信号。

图 1-2 为一简单的数字伺服系统原理图。图中三个开关均表

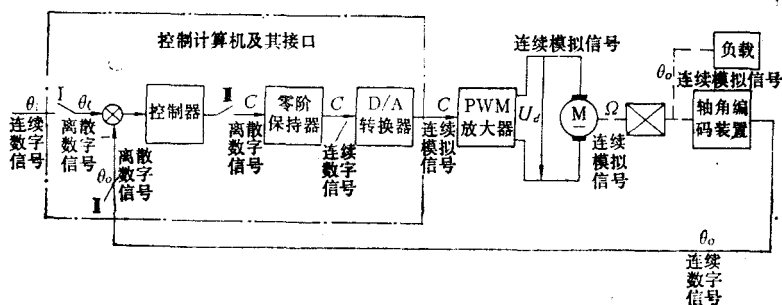


图 1-2 简单的数字伺服系统原理图

示采样开关, 点划线框内为控制计算机及其接口, 虚线表示机械轴。图上标出了该数字伺服系统各处信号的形式。

数字伺服系统通常扮演多级计算机控制系统中末级控制系统这一角色, 由它驱动负载。在图 1-2 中, 采样开关 I 之前的 θ_i (连续数字信号) 为数字伺服系统的输入角, 它来自上级计算机。

在图 1-2 中, 轴角编码装置可看成一只量角器, 它测量负载轴位置, 测量的结果 θ_o (连续数字信号) 为数字伺服系统的主反馈信号。

数字伺服系统是这样工作的: 每个采样周期一开始, 控制计

计算机通过其一个输入接口采样来自上级计算机的 θ_i ，这相当于合一下采样开关 I；接着控制计算机通过其另一个输入接口采样来自轴角编码装置的 θ_o ，这相当于合一下采样开关 II（也可先合一下采样开关 II，接着再合一下采样开关 I）；控制计算机根据本采样周期采到的 $\theta_i(n)$ 和 $\theta_o(n)$ 、上一个采样周期采到的 $\theta_i(n-1)$ 和 $\theta_o(n-1)$ 、上上个采样周期采到的 $\theta_i(n-2)$ 和 $\theta_o(n-2)$ 、……，把它们作为计算本采样周期的控制变量 $C(n)$ 的原始数据，去执行体现数字伺服系统研制者所选定之控制律的、在该系统研制完毕时已固化了的控制算法程序，求出 $C(n)$ ；最后，将 $C(n)$ 送至 D/A 转换线路，这相当于合一下采样开关 III。从控制计算机来看，这 D/A 转换线路为其一个输出接口；从信号的转换来看，它包含一个零阶保持器和一个 D/A 转换器（见图 1—2）。它的输出 C （连续模拟信号）加到 PWM 放大器的输入端。到此时，控制计算机在本采样周期的任务已全部完成，等待下一个采样周期的来到。

上述 D/A 转换线路的输出 C 虽为连续模拟信号，但其可能取的值却只有有限多个。例如，D/A 转换器 8 位，则其可能取的值只有 256 个。

数字伺服系统的误差角 $\theta_e = \theta_i - \theta_o$ ，这里的 θ_i 和 θ_o 应是同时的，否则它们相减的结果就不是 θ_e 。控制计算机做不到同时采样 θ_i 和 θ_o ，数字伺服系统研制者为了使不同时采到的 θ_i 和 θ_o 之差尽量接近 θ_e ，在设计程序时总是使采 θ_i 的时刻和采 θ_o 的时刻尽量靠近。由于 $\theta_i(n)$ 和 $\theta_o(n)$ 均为计算 $C(n)$ 的原始数据，因此在采样周期的一开始就采 θ_i 和 θ_o 。由于采样周期的绝大部分时间用来执行控制算法程序，因此控制计算机常在临近采样周期结束时向 D/A 转换线路送控制变量 C 。图 1—3 示意地表示了采样周期中采样 θ_i 和 θ_o 的时刻及输出 C 的时刻， T_0 为采样周期。

从采到 $\theta_i(n)$ 和 $\theta_o(n)$ 至输出 $C(n)$ ，有一段延时。这段延时越长，对数字伺服系统的稳定性越不利。由于这段延时总是小于采样周期 T_0 ，而 T_0 通常只有 10 ms 左右，甚至只有 1~2 ms，所

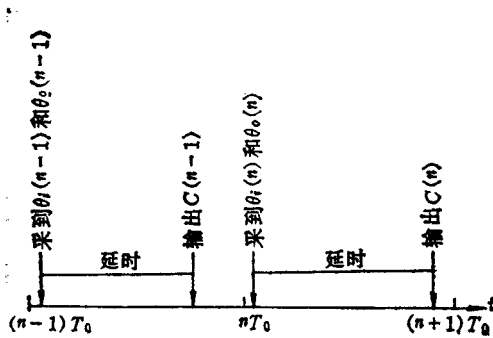


图 1—3 采样 θ_i 和 θ_o 及输出 C 的时刻

以这段延时有对系统稳定性影响不大。为了方便，人们常常略去这段延时，近似地认为：采到 $\theta_i(n)$ 和 $\theta_o(n)$ 与输出 $C(n)$ 是同时的。若我们在建立数字伺服系统的数学模型时略去了这段延时，我们应该想到：真实系统的稳定性比其数学模型的稳定性稍微差一些。

人们在研制数字伺服系统时，总是尽量利用控制计算机的逻辑判断功能。因此，不同的采样周期，执行控制算法程序时，所走的路径常常不同，执行控制算法程序所花的时间也就不同，上述这段延时也就不同。我们在画图 1—3 时，第 n 个采样周期的延时画得和第 $(n-1)$ 个采样周期的延时不一样长。

由自动控制理论可知：采样周期 T_0 的大小影响系统的稳定性。在其他参数不变时，加大 T_0 将使系统稳定性变差。因此，人们在研制数字伺服系统时，在保证实现控制律的前提下，总是尽量设法缩短采样周期 T_0 。为了达到这一目的，人们想方设法使控制算法程序执行得尽量快，仔细计算执行一个采样周期的程序最慢需多少时间，定下采样周期 T_0 值。这样做，既使 T_0 尽量短，又不会出现这样的情况：本采样周期时间到，控制计算机尚未算出控制变量 $C(n)$ ，因此也就没有向 D/A 转换线路送 $C(n)$ 。由上所述，一个采样周期的程序应包括：采样 θ_i 、采样 θ_o 、计算 C 和输出 C 。有的数字伺服系统，上述一个采样周期的程序还包

括：将系统误差角 θ_e 送显示口（也是控制计算机的一个输出接口）等一些其他的事项。

鸟瞰模拟式伺服系统，它的功能为：使负载轴随输入轴（如自整角发送器的转子轴或旋变发送器的转子轴）动。鸟瞰数字伺服系统，它的功能为：使负载轴根据输入数码（即图1—2中连续数字信号 θ_i ）转到相应的位置。如果把一套模拟式伺服系统比作上体育课时一个随老师做操的学生，不妨把一套数字伺服系统比作工作间操时一个随广播操音乐做操的人（无人领操）。

见图1—2，若数字伺服系统的输入角 θ_i 是16位的，则要求负载轴（也称数字伺服系统的输出轴，简称输出轴）奔向的位置有 2^{16} （=65536）个。在这种情况下，我们为了方便可将1个圆周角（= $360^\circ = 6000 \text{ mil}$ ）等分成 2^{16} 份，每份记作 1δ 。mil即密位。

$$1\delta = \frac{6000}{2^{16}} \approx 0.092 \text{ mil}$$

$$1\delta = \frac{360 \times 60 \times 60}{2^{16}} \approx 19.8''$$

若 θ_i 增（或减）1，则要求输出轴奔向的位置沿正（或反）向转动 1δ 。

见图1—2，若轴角编码装置也是16位的，则它测量输出轴位置的分辨率为 $2^{16}/2^{16} = 1\delta$ 。下面计算上述分辨率引起的数字伺服系统的静态误差角（简称静差）。若 θ_i 为常量（不随时间变化），则该数字伺服系统已结束了过渡过程，静止下来了。我们人为地在 1δ 范围内拨动输出轴，由于轴角编码装置的输出即连续数字信号 θ 。（也即系统的主反馈信号）维持不变，因此系统仍然维持原来的静止状态。由此可知，在这种情况下，轴角编码装置的分辨率引起的数字伺服系统的（最大）静差为 1δ 。应该指出：引起数字伺服系统静差的因素有多个，这仅是其中之一。

若轴角编码装置是18位的，则它的分辨率为 $2^{16}/2^{18} = 0.25\delta$ 。在这种情况下，轴角编码装置的分辨率引起的数字伺服系统的

(最大)静差为 0.25δ 。由于引起数字伺服系统静差的因素有多个,因此当将轴角编码装置的位数由16位提高到18位,数字伺服系统的静差下降不了多少。所以,在设计数字伺服系统时,一般来说,没有必要选轴角编码装置的位数大于输入角 θ_i 的位数。

若轴角编码装置是12位的,则它的分辨率为 $2^{16}/2^{12}=16\delta$ 。在这种情况下,轴角编码装置的分辨率引起的数字伺服系统的(最大)静差为 16δ 。在设计数字伺服系统时,不宜选位数太低的轴角编码装置,以免数字伺服系统的静差太大,不满足设计指标要求。

我们认为:应将轴角编码装置的位数定义为数字伺服系统的位数。这里需要说明一点:若轴角编码装置17位,控制计算机只用其高16位,舍去最低位,则该数字伺服系统是16位的。准确地说:应将轴角编码装置的位数(不计被控制计算机舍去的位数)定义为数字伺服系统的位数。

数字伺服系统的输入角 θ_i 的位数通常等于数字伺服系统的位数。若数字伺服系统的位数大于 θ_i 的位数,则一般来说该系统的轴角编码装置大材小用;若数字伺服系统的位数小于 θ_i 的位数,如系统的静差符合设计指标要求,则也未尝不可。

控制计算机的位数未必一定等于数字伺服系统的位数。如有的16位数字伺服系统,其控制计算机是8位的,采样 θ_i (或 θ_o)时分两次采,先采高字节后采低字节。常选控制计算机的位数等于数字伺服系统的位数,这出于运算速度、采样 θ_i (及 θ_o)的速度等方面的考虑。有的初学者把控制计算机的位数当作数字伺服系统的位数,这是糊涂认识。

根本没有必要选D/A转换器的位数等于数字伺服系统的位数。例如,设计16位数字伺服系统时,通常选8位D/A转换器就可以了。D/A转换器的位数只决定它输出的连续模拟信号的挡数(若D/A转换器8位,则它输出的连续模拟信号256挡),根本不影响数字伺服系统的静差。

见图1—2，有人把连续数字信号 θ_0 看作数字伺服系统的输出量，在他看来，数字伺服系统的功能为：连续数字信号 θ_0 跟踪连续数字信号 θ_i 。如果不是从多级计算机控制系统的观点看，而仅从数字伺服系统本身的观点看，他的这一看法是可以被人接受的。

见图1—2，数字伺服系统的输出轴与轴角编码装置的轴是同一根轴。在实际系统中，它们通常并非是一根轴，而被传动比严格等于1的减速器连起来。但在分析数字伺服系统工作原理时，我们可以把它们看成同轴。

§ 1—3 数字伺服系统中角的表示方法

如何用数表示角，这是研究数字伺服系统时首先遇到的一个问题。为了讨论方便，我们先假定：数字伺服系统的输入角 θ_i 及轴角编码装置均为16位的。

角是一个几何量，它与所有物理量一样，有一个度量单位的问题，我们用 δ 作为其度量单位（ $1\delta = 360^\circ \times 2^{-16}$ ）。以 δ 为度量单位去量一个角，量的结果是一个数，该数存储在控制计算机里，或参加运算，总是以二进制的形式出现。

角和许多物理量一样，有一个正方向规定的问题。为了实验时方便，系统输出角 θ_0 （连续模拟信号，见图1—2）的正方向规定如下：当输出轴沿正方向旋转，轴角编码装置输出的码（连续数字信号 θ_0 ，见图1—2）增加。在这样的正方向规定下，有的数字伺服系统输出轴逆时针旋转算正转，有的系统则相反。数字伺服系统和模拟式伺服系统不同，它没有输入轴，系统输入角 θ_i 仅是一个抽象的数码，因此系统输入角 θ_i 不存在正方向规定的问题。

由于我们用 δ 作为角的度量单位，又把度量的结果存储在一个字寄存器（含两个字节寄存器，共16位）中，出现了以下三件有趣的事。

第一件，数字伺服系统输出轴的位置唯一确定了表示该位置

的字寄存器的内容。

伺服系统输出轴的位置对应了无穷多个输出角，因此对应了无穷多个数。例如，输出角 $\dots, -270^\circ, 90^\circ, 450^\circ, \dots$ 确定输出轴的同一个位置，因此该位置对应了 $\dots -270, 90, 450, \dots$ 这些数，共无穷多个。

若数字伺服系统输出轴还在那个位置，表示该位置的寄存器内容必是4000H，不可能是其他数。因此，数字伺服系统输出轴的位置唯一确定了表示该位置的寄存器的内容。具体地说，开始，数字伺服系统输出轴在零位，该寄存器内容为0000H；输出轴沿正向转 1δ ，该寄存器内容变为0001H；输出轴沿正向再转 1δ ，该寄存器内容变为0002H；如此做下去，当输出轴将回到零位时，该寄存器内容为0FFFFH；输出轴沿正向再转 1δ ，回到了零位，该寄存器的内容重新变为0000H。

从外表看，上述唯一确定的原因在于一个相似性：当数字伺服系统输出角 θ 。（连续模拟信号）连续增加时，输出轴的位置循环转圈，其循环周期为 $10000H\delta$ ；当该寄存器的内容不断加1时，其内容循环变化，循环周期为 $10000H$ 。

第二件，角的两种表示法及其关系：

在图1—4中，圆表示数字伺服系统输出轴的刻度盘。甲按内圈读刻度，乙按外圈读刻度。若输出轴在位置B，甲、乙均读4000H；若输出轴在位置D，甲读8000H，乙读-8000H；若输出轴在位置F，甲读0FFFFH，乙读-0001H。容易看出：甲的读数正好是乙的读数的补码（模为 2^{16} ）。控制计算机中放的是甲的读数，乙的读数在为负数时无法直接放进计算机。在甲看来，计算机中放的是输出角；在乙看来，计算机中放的是输出角的补码。

如前所述，数字伺服系统无输入轴，输入角 θ_i 仅是一个抽象的数码。但若将该数码（例如其值为4000H）与要求输出轴奔向的位置（B点）对应起来，该数码就有明显的几何意义了。

为了方便，以后我们在考虑数字伺服系统输入角和输出角

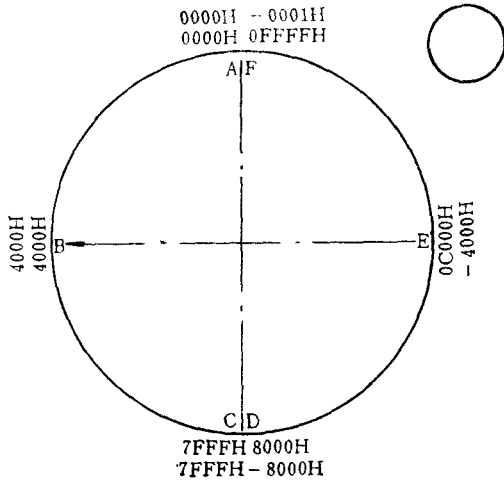


图 1—4 角的两种表示法

时，采用甲的观点。

数字伺服系统的误差角 θ_e ($=\theta_i - \theta_o$) 是一个数码，人为地赋予其几何意义：误差角 θ_e 也可用图1—4表示，圆不再表示系统输出轴的刻度盘，此时，圆周上的 2^{16} 个点表示系统的误差角 θ_e 。同样地，甲、乙分别按内、外圈读刻度；甲的读数是乙的读数的补码（模为 2^{16} ）；计算机里放的是甲的读数；在甲看来，计算机里放的是误差角，在乙看来，计算机里放的是误差角的补码。

为了方便，以后在考虑数字伺服系统误差角时，通常用乙的观点。若表示系统误差角 θ_e 的字寄存器内容为 0FFFFH ，我们通常说误差角 θ_e 为 -1δ ， 0FFFFH 为 -0001H 的补码。

图1—4右上角有个圆圈，若该图表示的是系统的输出角（或输入角、误差角），则在圆圈中写上 θ_o 。（或 θ_i 、 θ_e ），使人一目了然。为方便起见，我们以后不妨称图1—4为系统的输出角（或输入角、误差角）的圆图。在圆图上不一定内外圈刻度均标，常根据需要只标其中一种刻度。