

光 电 信 息 转 换 器

〔苏〕 Л. Н. 普勒斯鲁希

В. Ф. 沙尼根

С. А. 莫依洛夫

И. В. 明希科

范又功 张 玮

张微元 姚家渭

著

译



机 械 工 业 出 版 社

本书论述了模-数转换的基本原理, 详述了各种光电转换器的构造、结构的构件及其制造工艺和调整问题, 以及装配实例。书中还介绍了目前最有发展前途的光电转换器的机理和有关计算。

本书可供从事数控机信息转换器设计和使用的工程技术人员参考。

Фотоэлектрические преобразователи информации.

Л. Н. Преснухин В. Ф. Шанъгин

С. А. Майоров И. В. Месъкин

издательство «Машиностроение», 1974

* * *

光电信息转换器

〔苏〕 Л. Н. 普勒斯鲁希 В. Ф. 沙尼根 著
С. А. 莫依洛夫 И. В. 明希科

科学技术博士、教授 Ю. И. 道波契 评论
范又功 张 琦 张微元 姚家渭 译

*

责任编辑: 边 萌 版式设计: 胡金英
封面设计: 王 伦 责任校对: 陈 松

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $13 \frac{5}{8}$ · 字数 302 千字
1988 年 12 月北京第一版·1988 年 12 月北京第一次印刷
印数 0,001—2,250 · 定价: 5.40 元

*

ISBN 7-111-00610 0/TP·44

译 者 的 话

光电信息转换器是目前最有发展前途的一种数字位移编码器。它在数字计算机控制系统和信息处理系统中占有重要地位。这是因为在使用数字计算机解算一系列计算和逻辑命题时，其输入、输出皆为数字量，但实际控制的对象往往都是模拟量，因此在被控对象和数字计算机之间必须有模-数转换器，以便将被控的直线、角度、速度、相位等量转换成数字信息量。同时，由于光电信息转换器是基于无接触的光电扫描和光电转换来实现数字化的编码器，因此具有精度高、结构紧凑、速度范围大、运动灵活和寿命长等特点。

目前，由于数字计算机的迅速发展和普及，光电信息转换器更加广泛地用于各个领域。国外都设有专门的研究机构和生产厂家，国内也有百十个单位对这种转换器进行了研究，但现在仍处于研制、试用和少量生产阶段。因此国内很需要这方面的专业技术知识和资料。

该书是一本光电信息转换器的专著。它是系统地论述光电转换器的原理、设计与制造的一本比较完整的、有实用价值和指导意义的书籍。

在翻译过程中，对原文中所发现的错误已作了纠正和说明。由于时间仓促和水平有限，难免存在错误，请读者批评指正。

在翻译过程中曾得到航空工业部三〇三所刘迎辉和王绍以及国防科工委后勤部阎朝宗等同志的热情帮助，在此深谢意。

目 录

.....	1
模-数转换器的理论基础	4
和信息计量转换的实质	5
移-数字”光电转换器的分类和基本特性	9
量按时间和电平量子化	14
转换器的码尺	23
误差	53
计数光电转换器	61
光电转换器的原理	62
光电转换器的基本关系	63
转换器的辐射源	83
转换器的光电接收器	93
光源与光电接收器光谱特性的匹配	103
转换器用的光导纤维	103
光电接收器信号的线路	123
函数转换器	133
光栅光电转换器	153
和光栅的栅格	153
月光栅组合的位移变换	153
光栅组合调制辐射通量	164
线性和角位移光电光栅转换器的分类	153
累加转换器	203
立计式移相器	203
弦-余弦平衡插补器	203
频调制的相位光栅插补器	203
描极值插补器	203

10. 电调制的光栅相位转换器	238
11. 电调制的光栅相位转换器的精度分析	263
第四章 光电转换器的设计问题	293
1. 光电转换器的能量方程	293
2. 光电信息转换器计数系统的特点和分类	311
3. 单系统的信息计数	314
4. 多系统的信息计数	324
5. 双盘光电转换器	330
6. 关于提高光电计数器的分辨率	332
7. 光电转换器的结构	339
8. 输入轴和译码轴的联结形式	352
第五章 光电转换器的制造工艺	357
1. 码盘的要求及其制造特点	357
2. 码盘和光栅标尺的制造方法	358
3. 工作码盘模板和光栅的制造	395
4. 码盘和光栅的检验	397
5. 光电转换器的主要构件及其各部分的装配与 调整的特点	400
附录	404
参考文献	425

引 言

在现代控制系统和信息处理系统中，数字计算机被广泛地用来解决一系列的計算和逻辑问题。数字计算机的输入和输出信息在本計算系统中是用相应的数字编码来表示的。任何一个实际的系统通常具有连续的信息输入或输出对象。因此，在建立这些系统时就产生了数字计算机与控制对象的接口问题。从连续形式转换成为离散形式或从离散形式转换成为连续形式的信息转换器就是数字计算机与控制对象的接口装置。

位移编码转换器在模-数转换器中占有重要的地位。在金属切削机床的程序控制过程中，角位移和线位移编码转换器对于控制工艺过程等系统是必不可少的。

位移编码转换器的主要指标是：转换精度、快速性以及广泛的使用条件范围内的可靠性等。

转换精度是最重要的指标。

位移转换器的主要部件有：标尺、敏感元件和原始信号转换装置。标尺是转换器的基本度量部件，通常它是转换器结构中最复杂、最昂贵和难度最大的部件。标尺的选择在很大程度上决定了转换器的类型。标尺是具有一个或几个沿其长度方向周期分布的物理量的有序结构。

在标尺和敏感元件的结构中，利用了一些极不相同的物理现象，这些现象和是否存在触点、磁力线、电场、光线等有关。敏感元件将标尺的物理量转换为电信号，并有模拟量

或离散量两种形式的输出。

根据所利用的物理现象的不同，转换器可分为：具有机电计数系统的接触式转换器；具有电磁测量系统的电感式转换器；基于码盘和敏感元件之间电容耦合为工作原理的电容式转换器以及由光接收器和光源组成光电计数系统的光电转换器。

在上述各类转换器中，具有很高转换精度的光电转换器得到广泛的应用。

光电位移转换器有两种基本的转换方法：编码图案计数法和单位增量的连续计数法。

连续计数的转换器又分成两类：积累式和循环式。编码图案是一个完全确定的数码组，它对应着每个角度或直线位置的量化电平。光电转换器的计数编码图案通常是一组按二进制规律刻制的间距不等的光学刻线。光电计数转换器的敏感元件具有继电器式的输出。转换器输出编码位数的增加将导致低位码标尺间距的减小，并要求采用很窄的光学计数狭缝。这样，定将使转换器的能量关系变坏。用栅距与低位码刻线间距相等的光栅来代替单个的狭缝，可以增加低位码的光接受器所接收的光通量。

现有的按编码图案计数法制作的位移光电转换器可达到下列分辨率：线位移转换器达到 $0.02\sim 0.05\text{mm}$ ；角位移转换器可达到 $10''\sim 20''$ 。

进一步提高光电计数转换器的分辨率将导致不合理地增大转换器的外形尺寸并使其结构复杂化。

采用对光学刻线节距数连续计数的光电转换器结构，可达到很高的精度。连续读取衍射或干涉条纹的积累式转换器具有 $\pm 0.0005\text{mm}$ 的分辨率。

积累式转换器有其不足之处。为了得到理想的分辨率，必须具有刻线间距极小的衍射光栅，这在制造工艺上是很困难的。由于元件没有足够的可靠性而可能出现系统误差是积累式转换器的主要缺点。

利用细分光栅栅距来测定莫尔条纹位置的方法，或称为内插法，可达到更高的分辨率。使用内插法可利用栅格较粗的光栅，这种光栅用照相法极易制作。同样的分辨率，采用粗光栅和内插法的转换器，比不用内插法的积累式转换器具有更好的工艺性。

当前，苏联和其他国家在模-数信息转换技术和理论领域里进行了大量的工作，制造了很多种角位移和线位移编码转换器。关于模-数和数-模转换器的技术和理论问题，在国内外皆有专著叙述，〔19、20、21、45、64〕并有不少小册子和大量的文章。近年来，还出现了专门论述某一特定类型转换器的书籍，如电感式〔5、6、9、10〕转换器，电容式〔7〕转换器等。

本书是一本首次试图把编码式光电位移转换器的理论、计算、设计和工艺制造等方面的大量材料系统化的书籍。它也是作者们在莫斯科包曼高等工业学校、列宁格勒光学和精密机械学院、莫斯科电子工程学院工作经验的总结。书中第2.6、2.7、2.8、5.2节的部分材料是由B. H. 契斯托夫，K. K. 康特拉肖夫和K. K. 尼德彼金工程师提供的。

第一章 模-数转换器的理论基础

数组、符号或数码连续变换的过程叫做模-数转换。信息的模-数转换是以数字形式给出测量结果的测量过程。

通常，模-数转换简化为两个过程：量子化和编码。

将被测量的连续信号改成数字形式近似地表示出来的过程叫做量子化。量子化可以按电平和时间来实现。按电平实现的量子化是在任意时刻确定信号的离散的电平值。按时间实现的量子化是确定时间的离散的時刻值，而在这些时刻其信号的电平可以取任意值。当按电平和时间量子化时，连续信号可以用离散的电平代替，这是因为其离散电平最接近于相应的离散时刻的连续信号的值。

编码就是确定每个量子化电平与码组的一些符号之间的对应关系。当每个量子化电平对应一个固定数时，实际上最重要的是数字编码。数的表示形式取决于转换器的数据处理计算系统。

编码式角位移和线位移转换器，尤其是计数法工作的光电转换器，其特点是用码盘直接编码。选择哪种码盘是由所采用的转换器的特性来决定的。

连续量转换成数码时有一定误差。该误差由以下两因素所决定：①按电平和时间量子化原理的误差；②转换器元、部件的精度和灵敏度所引起的误差。这可用测量装置信息理论来解决误差的估价问题。

1. 信息和信息计量转换的实质

在叙述信息的连续-离散转换问题之前，首先谈谈有关信息的计算问题。这种计算和由它引出的重要结论构成了信息理论的内容，并明确地表达了信息计量转换的实质。由于信息理论的产生和发展与电信理论一样，因此运用信号传递理论的术语很容易叙述它的原理。

信息包含在由发送者传输到接受者的消息中。消息是某些事件的叙述。任何事件都是由某些客观事物的状态变化或者过程构成的。消息说明了客观事物或者过程所处的可能状态。客观事物和过程所可能处的状态越多，也就是说原始的不确定性越多，由通讯接收到的信息也就越多。对接收者来说，客观事物或者过程的状态是一个随机量。根据概率论，随机量的全特性就是这个随机量的概率分布律。

信息理论的创始人之一 R. 谢诺建议在信息理论中用新的准则来简要说明随机量的概率分布律，并称之为熵。

如果连续随机量 x 具有可微的概率分布律 $P(x)$ ，那么它的熵为：

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \ln P(x) dx$$

假如离散的随机量 x 是有限数，其可能值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，并对应于概率 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 。那么，它的熵为：

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n P_i \log P_i \quad (1)$$

熵的计量单位与所选的对数的底有关。如果选用 2 为底的对数，也就是用二进制对数，那么熵用二进制单位——

bit (бит) 表示。当用10为底的对数时, 熵为十进制单位——基特 (кит)。应该指出, 在分析模数信息转换器时, 因为其运算系统通常是二进制, 故用二进制单位比较方便。

假如离散的随机量有 n 个等概率值, 而且每个等概率值的概率为 $P_i = 1/n$, 那么, 熵即为

$$\begin{aligned} H(x) &= - \sum_{i=1}^n P_i \log i \\ &= - n \frac{1}{n} \log \frac{1}{n} = \log n \end{aligned}$$

由上式可见, 等概率状态的事物和过程的熵等于这些状态数的对数。可以证明, 在所有可能的状态数为一定时, 熵为最大值。当 $n = 2$ 时, 也就是当所研究的随机量仅是两个可能值中的一个, 或者当信息只可能传递两个事件中的一个时, 这一性质更为明显。在这种情况下

$$P_1 + P_2 = 1; \quad P_2 = 1 - P_1$$

而式 (1) 可写成

$$\begin{aligned} H(x) &= -P_1 \log_2 P_1 - P_2 \log_2 P_2 \\ &= -P_1 \log_2 P_1 - (1 - P_1) \log_2 (1 - P_1) \end{aligned}$$

图1为这个函数的图形。当 $P_1 = 0$ 和 $P_2 = 1$ (或 $P_1 = 1$ 和 $P_2 = 0$) 时, 熵 H 为零。当 $P_1 = P_2 = 1/2$ 时, 熵达到最大值, 并等于 1。两种可能状态之一的概率等于 0 或 1 时, 就表示有充分的确定性, 消息本身不包含其他事件的任何信息。当 $P_1 = P_2 = 1/2$ 时, 选择两个事件之一是最不确定的。因而, 从事件的消息中取出的信息量为最大值。

在此例中, 熵的最大值等于一个二进制单位 (1 bit)。

因此，熵是度量随机量不确定性的尺度，是一个估计信息的方便量。

在实际通道中，传输消息经常伴随着噪声和干扰。在信号传输中噪声和干扰造成的伪信号与随机量一样，由噪声熵来确定。

根据信息理论的基本关系，在有干扰的情况下沿传输通道传送的信息量为

$$I = H(x) - H(\Delta) \quad (2)$$

式中， $H(x)$ 为消息的熵，

$H(\Delta)$ 为噪声的熵。

对式(2)可以作这样的解释：由传输消息和噪声混合信号中取出的事件的信息等于传输消息的熵和噪声的熵之差。换句话说，由于干扰或随机误差引起的信息的损失等于这个随机误差的熵。

信息的连续-离散转换是一个测量过程，并以数字形式表示其结果。求任何信息，包括测量信息，应由测量前后位置的不确定性之差求出。信息论指明如何消除某些不确定的因素。

测量前，位置的不确定性，由被测量本身概率分布规律所确定的被测值 x 来决定，其原始不确定性可用熵 $H(x)$ 表征。除由测量仪器得到的示值 x_0 之外，剩下的不确定性可

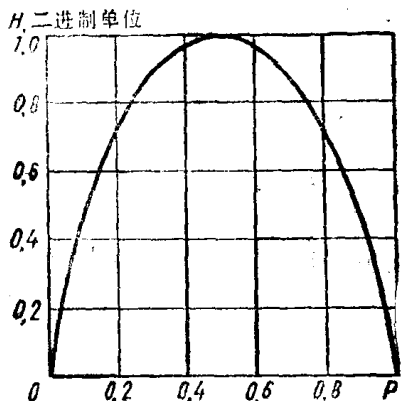


图1 具有两种状态随机量的熵 $H(P)$ 曲线

用测量误差的概率分布规律的熵 $H(\Delta)$ 来表征。由测量得到的信息量同样可以用式 (2) 求出，但其符号具有新的含意： $H(x)$ ——原始的或臆断的（绝对的）被测量的熵， $H(\Delta)$ ——测量随机误差的熵或称为相对熵 $H\left(\frac{x}{X_n}\right) = H(\Delta)$ 。

引入“相对熵”这个术语可作如下解释：假定一次测量 x 的结果，测量装置给出示值 X_n 。如果测量装置有 $\pm \Delta$ 大小的随机误差，那么可以断言，测量值的有效值位于 $X_n \pm \Delta$ 范围内。换句话说，在读取示值 X_n 后，测量值的精确值仍是未知数。但是，这时的不确定性不由原始熵 $H(x)$ 表征，而仅由分散在读数 X_n 周围的被测量的有效值 x 的熵来表征，并称之为相对熵 (X_n 已知)，以 $H\left(\frac{x}{X_n}\right)$ 表示。

现在来求用测量装置测取 x 的结果中的信息量。测量装置的测量范围为 X_1 至 X_2 ，其绝对测量误差为 $\pm \Delta$ 。假设被测量的各个值的分布规律概率密度，在整个测量范围是均匀的。也就是，

$$P(x) = \frac{1}{X_2 - X_1}$$

再假设测量误差的概率密度同样是均匀的，也就是 $P'(x) = \frac{1}{2\Delta}$ ，从信息理论的观点来说，测量结果归结为，测量以前不确定性的范围由 X_1 到 X_2 ，并具有小的概率密度特性 $P(x) = \frac{1}{(X_2 - X_1)}$ ，而测量后，不确定性的范围缩小到 2Δ ，并具有大的概率密度特性 $P'(x) = \frac{1}{2\Delta}$ 。

测量前，原始的或绝对的熵为：

$$\begin{aligned}
 H(x) &= - \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log P(x) dx \\
 &= - \int_{X_1}^{X_2} \frac{1}{X_2 - X_1} \log \frac{1}{X_2 - X_1} dx \\
 &= \log(X_2 - X_1)
 \end{aligned}$$

测量后，测量结果的终止的或相对的熵为：

$$H\left(\frac{x}{X_n}\right) = - \int_{X_n - \Delta}^{X_n + \Delta} \frac{1}{2\Delta} \log \frac{1}{2\Delta} dx = \log 2\Delta$$

由测量得到的信息量等于原始熵和终止熵之差：

$$\begin{aligned}
 I &= H(x) - H(x/X_n) \\
 &= \log(X_2 - X_1) - \log 2\Delta = \log \frac{X_2 - X_1}{2\Delta} \quad (3)
 \end{aligned}$$

于是，测量的实质便归结为缩小被测量的不确定性的区域。

测量装置现代理论的基本概念就是关于测量转换的概念，它意味着被测量量只能和某个表现它的物理现象一起被接收下来。测量转换是实际制造测量装置和模-数转换器的基本方法。这是因为任何一个测量装置都是利用输入量和输出量之间的这种或那种函数关系。任何一种实际的测量装置或模-数装置都是由一连串的测量转换环节组成的。它们是实现被测量转换为测量结果的通道。

2. “位移-数字”光电转换器的分类和基本特性

数码式空间位移转换器实质上是数字输出的测量装置。

“位移-数字”转换器的分类以获得测量值的数字当量作原则来划分较为合理。这个原则足以肯定地表明转换器最根本

的特性。

测量连续量的数字当量可由三种基本方法获得：连续计数法、读数法和比较运算法。

在数码式空间转换器中，仅前两种方法——连续计数法和读数法得到了应用。

连续计数法的实质如下：把测量值分成一系列相等的部分（增量），其中每个部分都对应着数码低位的一个单位。当计算这些增量时就得到码——测量值的数字当量。

读数法的实质如下：测量值和所有预先准备的成套数字当量相比较。根据测量值读取一定的数字当量。

按照这些方法，数码式空间转换器分成两类：连续计数转换器和读数转换器（图2）。

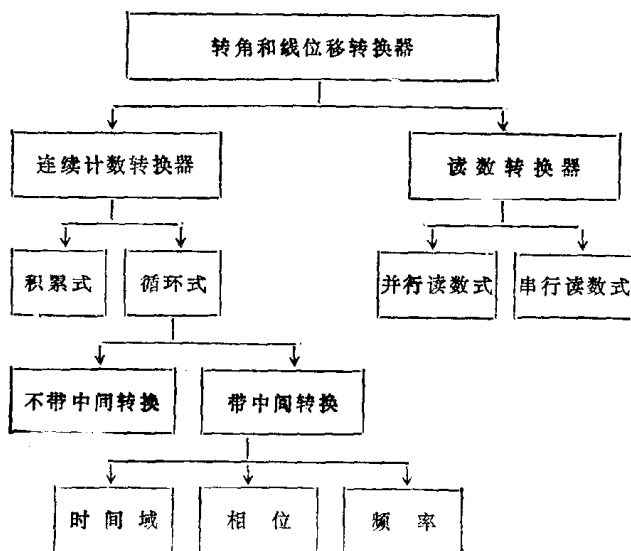


图2 角位移和线位移转换器的分类

连续计数转换器本身又分成两组：积累式转换器和循环式转换器。

积累式转换器不反映空间位置而反映空间位移。这种位移借助于专门电路分解成一系列基本的增量。转换器用计数法积累这些增量，然后形成与被测量的空间位置成比例的数码。

和积累式转换器不同，循环式转换器反映空间位置，它具有固定的转换周期，也就是说，这种转换器把给定的模拟量转换成码时，所耗费的时间是一个与这个量无关的常数。循环式转换器通常完成由机械量转换成时间域、频率或相位的中间转换。

因积累式和循环式连续计数转换器的作用原理不同，所以其使用性能也不同。后者在每一个周期中得到被测模拟量的全部值的数字当量，而前者仅测增量。积累式转换器的转换时间实际上等于从计数器上读取示值的时间，故具有速度快的特点。但是，它具有根本的缺点，即具有产生系统误差的可能性。的确，假如由于某种故障，瞬时中断了传输到计数器的脉冲。那么，在积累式转换器中，计数器在中断后的总示值中将有系统误差。而在循环式转换器中，类似的紊乱仅在一个转换周期内产生误差。

通常，读数转换器有正比于测量量的码盘和一组敏感元件。等效于测量值的数码，是通过敏感元件的询问和对所得到的信号的依次处理来形成的。读数转换器分成两类：并行读数转换器和串行读数转换器。

在并行读数转换器中，敏感元件是同时询问的。而在串行读数转换器中，敏感元件则按顺序进行询问。

空间位移数码转换器的主要指标是：输入和输出量的表现形式和这些量的变化范围、转换精度、快速性和工作的可靠性。

空间位移数码光电转换器的输入量往往是线位移和角位移或某一装置的位置，很少是线速度、角速度或加速度。

作为“位移-数字”光电转换器的输出量，可以使用不同形式的数码，其中有二进制、十进制和二-十进制码。有时，使用专门形式的码，例如：循环码和余码。

选择这样或那样形式的数码是和转换器的用途有关的。假如转换器在数字显示系统中应当给出直接为人们所使用的输出量，那么采用人们习惯的十进制比较方便。假如转换器是电子数字控制机的输入装置，则采用机器系统使用的比较合适。通常，电子数字控制机以二进制计算系统对输入的信息进行处理。近来，使用余码的电子数字控制机得到了一定的发展。

应当考虑到数码能够以串行或并行形式提供。转换器的输出和电子数字控制机的输入应考虑数码形式的一致。例如，对并列运行的电子数字控制机，转换器应当给出并行数码形式的数据，也就是同时给出所有的数位。否则，在数字机中对码要做进一步的转换。下面，将更详细地叙述关于转换器中所应用的数码概念。

转换器输入量 x 的变化范围等于该量最大值和最小值之差：

$$A_x = x_{\max} - x_{\min}$$

转换器输出量的变化范围取决于输入量的变化范围以及转换器的分辨率。

输入量的最小增量可理解为“模-码”转换器的分辨率 Δx_p ，而这个输入量的增量对应着输出码的一个单位。也就是

$$\Delta x_p = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N}$$