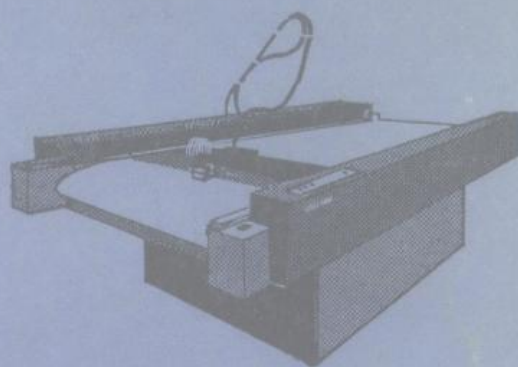


潘柏楷 佟国治 黄彭龄 马自天 编著



# 计算机自动绘图系统

中国铁道出版社

# 计算机自动绘图系统

潘柏楷 佟国治 编著  
黄彭龄 马自天

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 2 年 · 北 京

## 内 容 简 介

本书较系统地介绍了计算机自动绘图的原理和方法。

全书共分八章。第一章介绍了计算机图学的发展及目前概况；第二章介绍了自动绘图机的结构及绘图原理；第三章介绍了自动绘图机的几种主要插补原理；第四章结合图形实例介绍了基本的FORTRAN语言；第五章介绍了基本绘图软件，这一章着重讲述了 Benson（法国）、DAP（日本）和 Calcomp（美国）的绘图软件；第六章介绍了图形的坐标变换；第七章介绍了绘图程序的编写方法和步骤，并且给出了一些典型图形的绘图程序实例；第八章介绍了透视图的形成、画法、坐标变换（计算方法）和绘图程序。

本书可作为高等院校计算机绘图课的教材，也可供有关技术人员学习、参考或作为计算机绘图短训班的教材。

## 计算机自动绘图系统

潘柏楷 佟国治 黄彭龄 马自天 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 郭 宇

封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 印张：23.25 字数：576千

1982年12月 第1版 1982年12月 第1次印刷

印数：0001—7,000册 定价：2.90元

# 前 言

近二十多年来,随着计算机技术的发展,图形显示和计算机绘图取得了较大的进展,图形作为计算机的一个终端输出得到了广泛的应用。在国外,计算机图学无论在理论、技术及应用方面都做了大量的工作,并取得了非常显著的成绩。在国内,计算机图学正在受到重视,不仅引进了国外的先进技术和设备,而且出现了各种各样的国产绘图机。随着“四个现代化”建设的需要,计算机绘图将会在更多的部门得到应用。为了适应这种情况,我们编写了《计算机自动绘图系统》一书。本书的特点如下:

1. 本书抓住了图形这一关键。无论是在讲述FORTRAN语言、绘图软件以及图形的坐标变换等,都是紧密地围绕着各种各样的图形进行阐述的。据编者经验,这是掌握计算机绘图的捷径。

2. 本书把重点放在如何编写绘图程序上。编写绘图程序是计算机绘图的一个最基本问题,也是一个非常重要的问题。因为绘制任何一个图形,都必须编写它的绘图程序。因此,本书用了较大的篇幅介绍了大量的绘图程序。

3. 本书所列举的大量图形实例都具有一定的代表性,如三面图、投影图、轴测图,以及各类典型零件图等。这些图形实例都是由计算机绘制的,因此,这些绘图程序又具有相当的可靠性。

4. 本书力求使编制绘图程序的思路和方法多样化。无论从内容或格式上,不拘于某一固定模式。这样做的目的是让读者掌握更多的编制程序的方法或技巧,开阔思路、增长分析问题及编制绘图程序的能力,提高所编程序的质量和效率。

本书第一章由佟国治编写;第二章由佟国治、黄彭龄编写;第三章由马自天编写;第四章由黄彭龄编写;第五、六、八章由潘柏楷编写;第七章由潘柏楷、黄彭龄、佟国治编写;本书附录是潘柏楷、黄彭龄、佟国治、马自天整理。全书由傅中兰审阅。

本书所介绍的内容是计算机绘图的基本问题,是编者前期学习、工作和实践的总结。有关深入的问题,诸如隐藏线、曲线、曲面、等高线、体系并合、零件图、装配图等问题,限于篇幅,本书不作介绍。

由于编者水平有限,书中的错误和不妥之处,请读者批评指正。

编 者

一九八一年七月

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 自动绘图系统简介 .....           | 1   |
| 第一节 自动绘图机的诞生 .....           | 1   |
| 第二节 计算机图学的研究对象 .....         | 2   |
| 第三节 自动绘图系统及绘图机原理简介 .....     | 5   |
| 第二章 自动绘图机 .....              | 9   |
| 第一节 控制元件 .....               | 9   |
| 第二节 转筒式绘图机 .....             | 14  |
| 第三节 平台式绘图机 .....             | 19  |
| 第四节 平台式与转筒式绘图机的比较 .....      | 22  |
| 第五节 高速平台式绘图机 .....           | 23  |
| 第六节 介绍两种国产绘图机 .....          | 26  |
| 第三章 自动绘图的插补原理 .....          | 29  |
| 第一节 基本概念 .....               | 29  |
| 第二节 直线插补原理 .....             | 31  |
| 第三节 圆弧插补原理 .....             | 36  |
| 第四节 抛物线插补原理 .....            | 39  |
| 第五节 八方向线性插值法 .....           | 43  |
| 第四章 FORTRAN语言的基本内容 .....     | 49  |
| 第一节 流程图的符号与编制 .....          | 49  |
| 第二节 FORTRAN程序设计举例 .....      | 51  |
| 第三节 FORTRAN语言的字符、数据及类型 ..... | 54  |
| 第四节 数组和数组元素 .....            | 56  |
| 第五节 类型说明与数组说明 .....          | 57  |
| 第六节 表达式 .....                | 58  |
| 第七节 函数 .....                 | 60  |
| 第八节 基本语句 .....               | 61  |
| 第九节 函数子程序与子例程子程序 .....       | 74  |
| 第十节 数据初值语句 .....             | 78  |
| 第十一节 公共语句 .....              | 78  |
| 第十二节 FORTRAN语言的补充说明 .....    | 82  |
| 第五章 自动绘图软件 .....             | 89  |
| 第一节 Benson 绘图机的绘图软件 .....    | 93  |
| 第二节 DAP绘图软件 .....            | 114 |
| 第三节 CALCOMP绘图软件简介 .....      | 130 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第六章 图形的坐标变换 .....           | 132 |
| 第一节 图形变换的基本概念 .....         | 132 |
| 第二节 图形的坐标变换 .....           | 132 |
| 第三节 用一般的数学方法表示图形的坐标变换 ..... | 135 |
| 第四节 用矩阵方法表示图形的坐标变换 .....    | 143 |
| 第七章 绘图程序的设计方法 .....         | 161 |
| 第一节 绘图程序设计的方法 .....         | 161 |
| 第二节 绘图程序典型实例 .....          | 177 |
| 一、铁路徽章图案通用绘图程序的设计 .....     | 177 |
| 二、标准六角螺栓通用绘图程序的设计 .....     | 186 |
| 三、阶梯轴绘图程序的设计 .....          | 192 |
| 四、典型轴承座通用绘图程序的设计 .....      | 199 |
| 五、圆柱齿轮绘图程序的设计 .....         | 214 |
| 六、螺旋弹簧绘图程序的设计 .....         | 220 |
| 七、平面立体三视图与轴测图绘图程序的设计 .....  | 232 |
| 八、平面立体旋转绘图程序的设计 .....       | 247 |
| 九、曲面立体三视图绘图程序的设计 .....      | 263 |
| 十、曲面立体轴测图绘图程序的设计 .....      | 275 |
| 第八章 透视图的画法及绘图程序的编制 .....    | 280 |
| 第一节 透视的基本概念 .....           | 280 |
| 第二节 由正投影图画透视图 .....         | 283 |
| 第三节 透视的坐标变换 .....           | 287 |
| 第四节 绘制透视图的程序实例 .....        | 297 |
| 附 录 DAP—II 各子程序的源程序 .....   | 314 |

# 第一章 自动绘图系统简介

## 第一节 自动绘图机的诞生

多少年来,人们习惯用图表达思想、表现生活,这主要是因为它具有直观性和形象化的特点。随着生产和科学技术的发展,图的用途也更加广泛了。

然而,绘图方法却长期停留在手工业的落后状态,远远满足不了实际的 需要。为此,发明了许多绘图工具。例如:丁字尺、三角板、圆规、专用绘图仪器、成套的绘图模板等。据不完全统计,仅画椭圆一项就发明了20多种绘图工具。由于不断地改进绘图工具,因此改善了绘图工作条件,也提高了绘图效率和图面质量。

生产的发展对绘图精度和速度提出了更高的要求,有些复杂的图形单纯用简单的绘图工具画,是比较困难的,必须用更精密的绘图机械才能实现。1879年坎波(Kempe)从理论上证明了:所有的代数平面曲线,用适当的连杆机构可完成其绘图工作。此后,由于精密机械的发展,创造出绘制平面曲线的各种绘图机械。瑞士的霍鲁裁戈(Holzegger)发明了彩纹雕刻机,如图1—1所示,它可以绘制各种精美而细致的几何图案。图1—2为这种彩纹雕刻机所画的花纹实例。

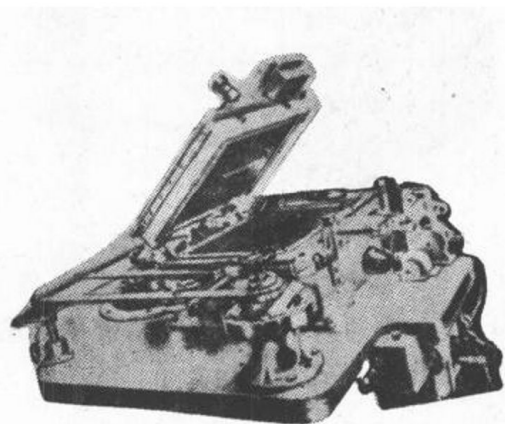


图1—1 彩纹雕刻机

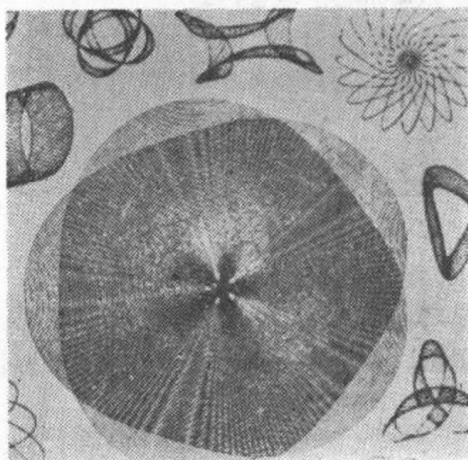


图1—2 彩纹雕刻机画的花纹

从手工绘图到用精密机械绘图,在绘图方法上是一个很大的进步。在实践中不断地出现各种各样的复杂图形,有待人们去解决。但有些图形只是从绘图方法上去实现还是不够的,甚至是不可能的。为此,必须从理论上深入研究各种图形的性质和规律,这就是用数学的方法研究图形。在实际工作中也常常是把绘图和计算结合起来,即所谓形数结合。实践证明:任何一个图形,都可以用数学方程表示它、讨论它;反之,数学问题也可以用图形来描绘。这就为形与数结合奠定了理论基础。

在实践中如何实现这一理论,也不是一件很容易的事,因为有一些图形(包括曲面等等)的数学表达式是很复杂的,用人工计算是很困难的,有些甚至在短时间内不能完成的。由

于受到了计算时间的限制，就直接影响到对复杂图形的研究与表达。

电子计算机（简称计算机）出现之后，由于它的计算速度非常之快，而且它计算的准确性也是空前的（人的计算能力和它是无法比拟的），因此它为形数结合开辟了新的道路。由于计算机的飞速发展，使得图学的应用更加广泛，而且深入到各行各业、各种学科领域中去。它应用于航空、汽车、造船、电子、铁路、建筑、机械、服装、医疗等各部门，表现了具大的生命力。

50年代末60年代初，美国哥勃（Gerber）公司首先研究出机械加工用的APT（Automatic Programming Tools）计算机语言，用它来对工作机械进行控制，出现了数控机床。同时也把这一成果用于绘图工作，产生了世界上第一台由计算机进行控制的自动绘图机，它的外形如图1—3所示。而且在美国的飞机制造厂波音公司得到了第一次的应用。世界上第一台自动绘图机，它是大型精密平台式自动绘图机，长4.6m，宽1.8m，重约1179公斤。与此同时，美国卡尔康（Calcomp）公司灵活运用了数控技术，制成了一种代替行式打印机的新式电子计算机的外部设备——转筒式自动绘图机。它的特点是高速绘图，适应了输出图形化的要求，为“人机对话”打下了基础。在这以后，Calcomp公司又建立了成套的绘图系统软件，能向用户提供从输入到输出的全部系统。例如：作为图形处理语言而使用的画直线子程序PLOT等，就是Calcomp公司第一个创造出来的。并且生产了世界上第一台565型转筒式自动绘图机。如图1—4所示。

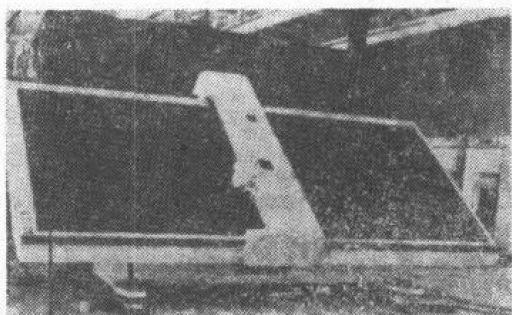


图1—3 世界上第一台最大的平台式自动绘图机

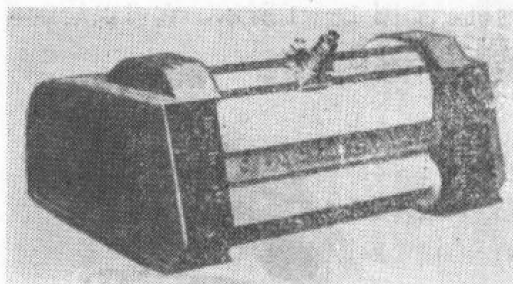


图1—4 世界上第一台565型转筒式自动绘图机

总之，目前自动绘图机有两种类型：一种是以Garber公司为代表的大型精密平台式自动绘图机。另一种是以Calcomp公司为代表的高速普及型的转筒式自动绘图机。

## 第二节 计算机图学的研究对象

由计算机控制的自动绘图机的出现，使图学工作进入了一个崭新的阶段。无论从图学理论、绘图方法方面都产生了巨大的变化。在计算机科学、应用数学、图学等学科的基础上，综合发展成一门新的学科——计算机图学。

大量的实践证明，计算机图学虽然是一门年青的学科，甚至在某些方面还不完善，但是它的威力已经初露锋芒，前程不可估量。

计算机图学的研究对象是运用计算机的先进技术，对图形进行数学处理，进而研究图学领域中各种理论和实践问题。它不同于单纯用几何方法研究图形的各种几何学，也不同于用一般数学计算来研究各种图形的纯数学方法，而是用计算机便于处理的数学方法（计算数

学)来研究各种图形及空间关系等,并把计算机处理的结果送到绘图机画出图来。因此,计算机图学把形和数很好的结合起来,作到了从图学理论到绘图实践的完美的统一。

目前计算机图学深入到各个领域之中,用途极广。在飞机、造船、汽车工业中可以绘制高精度的理论外形模线和结构模线,如图1—5所示;在电子工业中可以绘制精密的印刷电路板,如图1—6所示;在机械工业中可以绘制机械图样,如图1—7所示;在建筑业中可以绘制比较理想的透视图,如图1—8所示;在大地测量中可以绘制复杂的地形图,如图1—9所示;还可以绘制各种精细的花纹图案,如图1—10所示为金刚石花纹,这是把圆周分成奇数等分,各点之间用直线连接起来,形成美丽的花纹。在绘制复杂的曲面方面尤其突出,如图1—11所示,这是一个4次曲面实例。此外,在地震、地质、气象等部门中可以绘制地质断面图、地图、气象图等。在经济统计部门中可以绘制计划图,以及各种图表。在医药卫生部门中,可以绘制心电图、人体骨骼图、药效分析图、染色体图等。总之,计算机绘图目前已涉及到工业、农业、国防和科学研究各方面,它将发挥愈来愈大的作用。

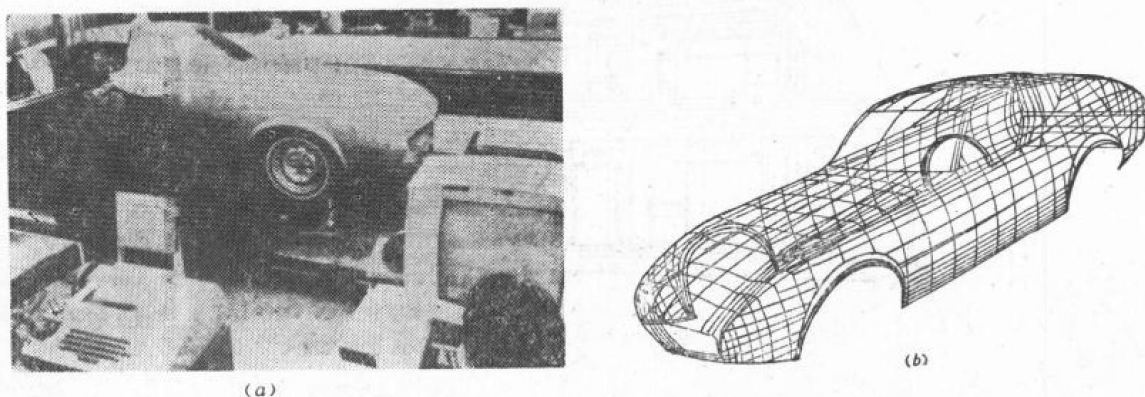


图1—5 汽车模线图

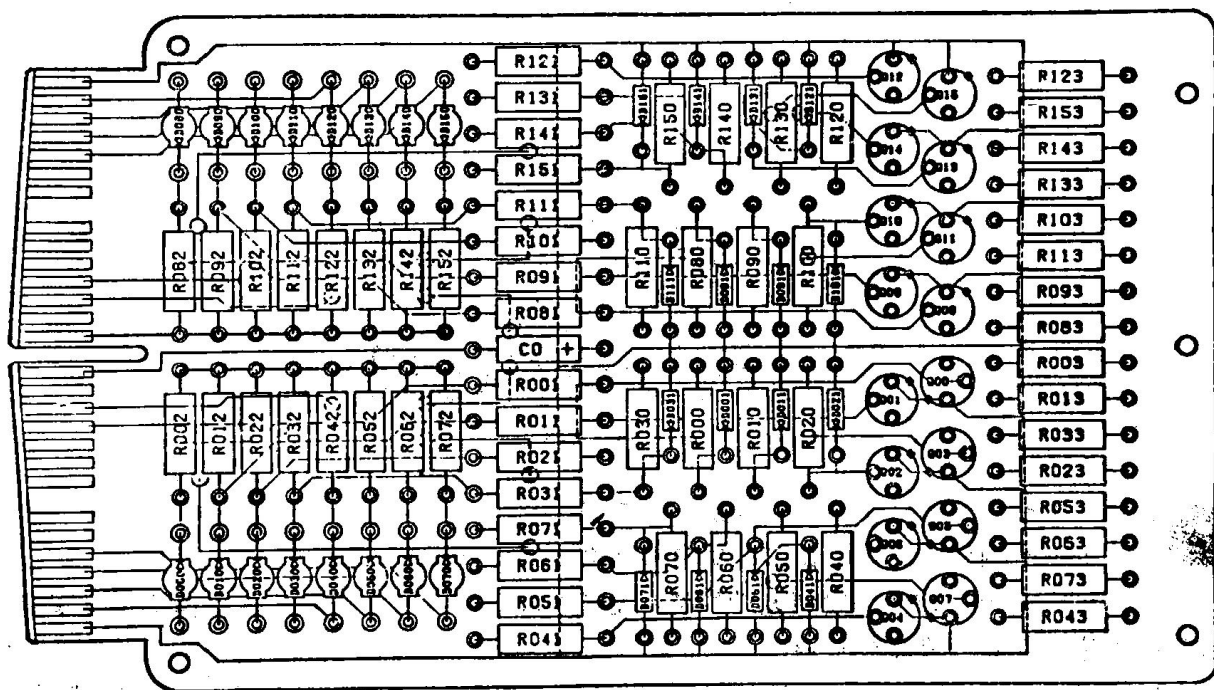


图1—6 印刷电路板

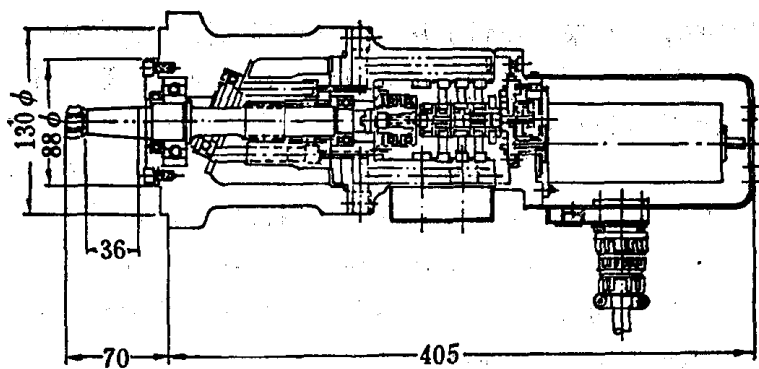


图 1—7 液压扭矩放大器装配图



图 1—8 房屋建筑图



图 1—9 地形图

计算机图学的效果也是十分明显的，它可以

1. 提高绘图的精度和准确度，能绘制很复杂物体的形状；
2. 加快绘图的速度、缩短设计周期，提高效率，短时间内可以快速的从多种方案中精选最佳方案，并达到满意的结果；
3. 通过计算机辅助设计CAD (Computer Aided Design) 与计算机辅助制造 CAM (Computer Aided Manifeture) 产品的设计可以向着更高的自动化方向发展。

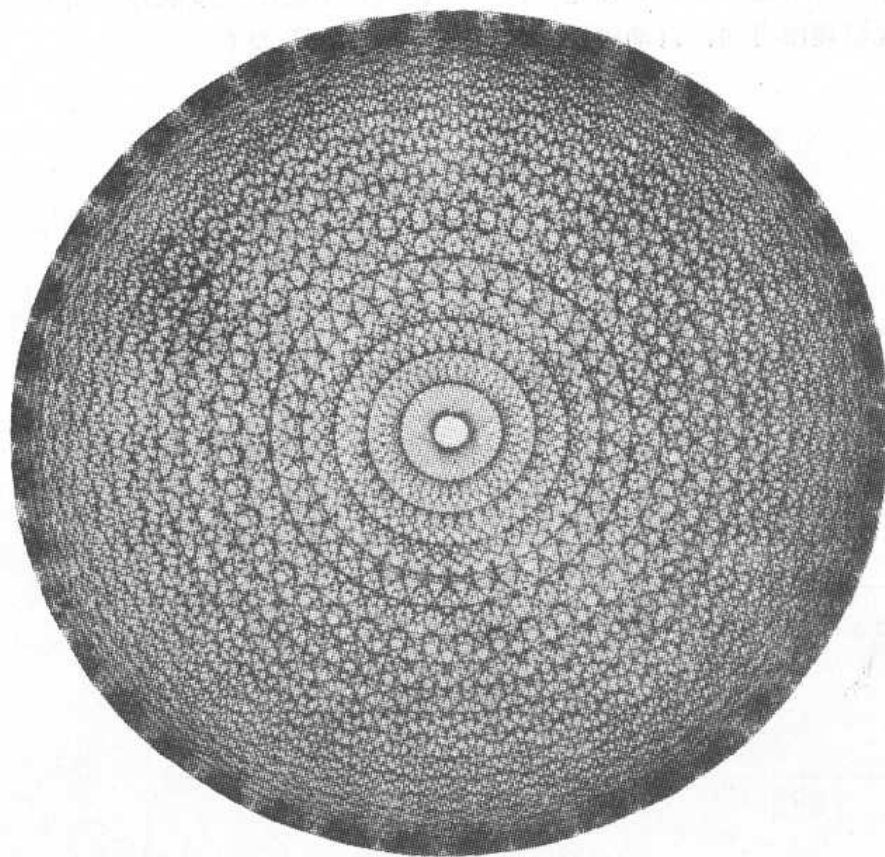


图 1-10 金刚石花纹

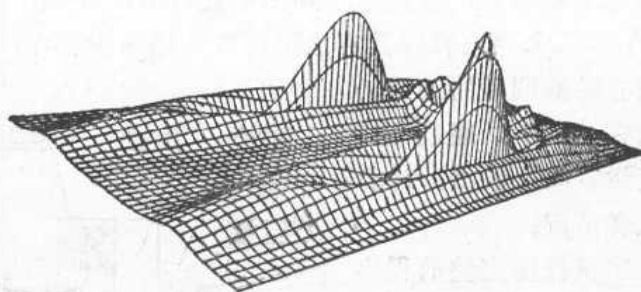


图 1-11 4次曲面

### 第三节 自动绘图系统及绘图机原理简介

#### 一、自动绘图系统原理

自动绘图系统主要由计算机和自动绘图机组成。根据不同情况可分为联机系统和脱机系统。

联机系统是计算机和自动绘图机直接联在一起工作。此时，自动绘图机相当于计算机的输出设备。由于图形的数据繁多、计算工作量大、占机时间长，影响主机的工作，这样联机系统不能适应，为此发展成脱机系统。这个系统中计算机和自动绘图机是分开工作的，它们以磁带或穿孔纸带为媒介将计算机处理过的图形信息传递给自动绘图机。

图 1—12 为自动绘图系统原理图。图 1—13 为自动绘图机系统外形图。  
由该系统原理图可知，自动绘图系统的基本工作过程如下：

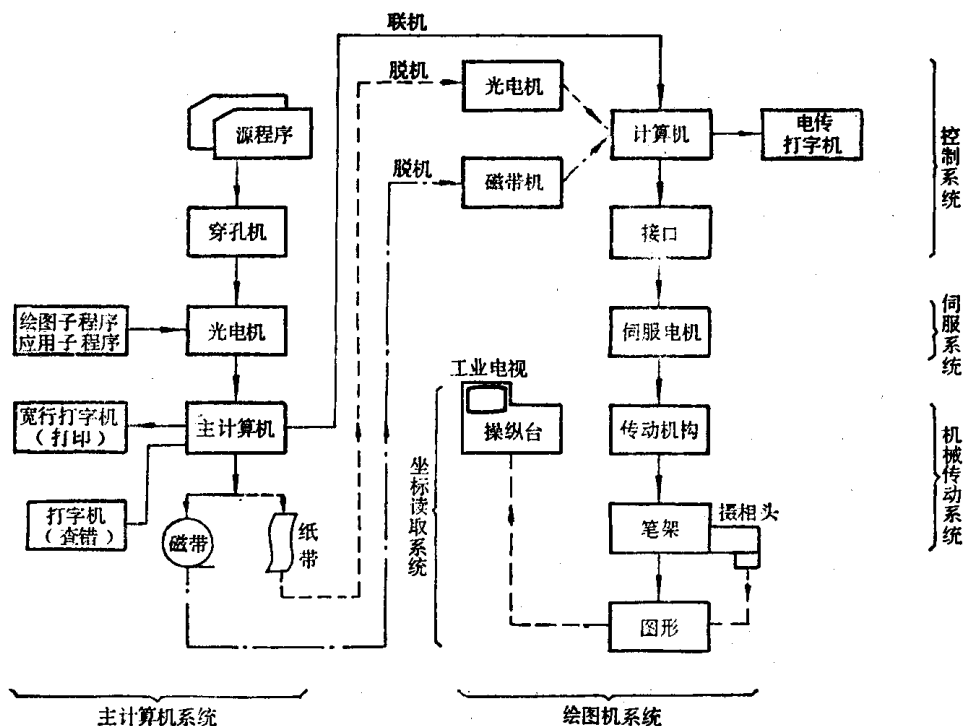


图 1—12 自动绘图机系统原理图

利用自动绘图系统绘制图形，首先对所画图形进行数学处理，然后用计算机所使用的语言（FORTRAN、ALGOL等语言或其它绘图语言）编写源程序，根据源程序制成穿孔卡片或穿孔纸带，连同各种被调用的绘图子程序输入到计算机的存储器中，通过计算机的处理，最后将其运算结果输出。计算机输出通常有下列几种情况：

1. 通过宽行打字机打印完整的程序及计算结果；
2. 通过磁带或穿孔纸带，在其上面记载绘图信息，作为脱机系统中自动绘图机的输入信息；
3. 直接控制自动绘图机（计算机与绘图机联机）；
4. 通过显示设备显示出图形。

在脱机系统中，自动绘图机把磁带（或穿孔纸带）记录的绘图信息通过磁带机或光电机输给计算机进行信息处理，然后再通过接口（插补器）发出一系列 $X$ 、 $Y$ 方向或 $XY$ 合成方向的指令脉冲，经过放大驱动伺服系统、机械传动系统，最后通过画笔绘出图形。

由此可见，整个自动绘图系统如同一个人绘图一样：将外界各种形式的图形信息转换成光或声音（语言）等，通过人们的眼睛和耳朵等感觉器官（相当于光电机或者磁带机）传给

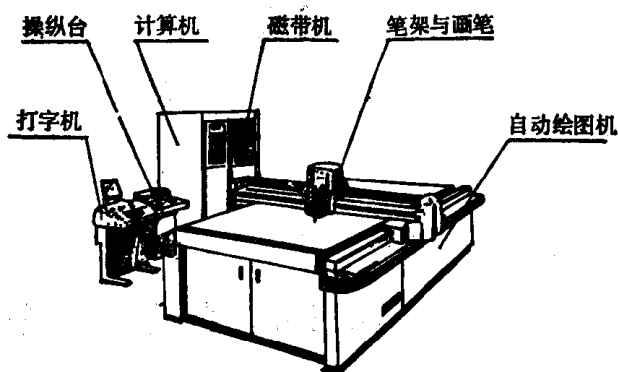


图 1—13 自动绘图机的外形图

大脑（中央处理单元）进行分析、判断，通过神经（接口或插补器）传给筋肉（伺服系统）带动骨骼（机械传动系统）驱动手使用画笔（笔架与画笔），在图板上（自动绘图机的平台或转筒上）绘出图形。

## 二、自动绘图机的动作原理

一般的绘图机画笔的动作对纸面来讲有上、下、左、右四个基本方向，这四个基本方向加上四个合成方向，共八个运动方向，可写成： $+X$ ， $+Y$ ， $-X$ ， $-Y$ ， $+X$ ， $+Y$ ， $-X$ ， $+Y$ ， $-X$ ， $-Y$ ， $+X$ ， $-Y$ 。如图 1—14 所示。除此之外画笔还有抬笔、落笔二个动作。这样，绘图机画笔可以有十个动作方向。这些动作都是根据计算机计算结果，由插补器（控制器）发出电脉冲（简称脉冲）指令，经过电压放大使伺服系统（步进电机或伺服电机）动作，通过机械传动系统进而驱动画笔绘图。一个脉冲使画笔走过的距离称为一个步长，一般绘图机的步长为 0.1~0.02 毫米；而速度一般为每秒 300~12000 步。

因为画笔对纸面只有八个运动方向和（抬笔、落笔）二个动作，所以绘图机也只能发出八个方向的运动指令和二二个动作指令。这十个指令可以用编码表示，例如 Benson 绘图机的指令编码如下：

| 指 令 | 画 笔 移 动 方 向 |
|-----|-------------|
| 1   | $+X$        |
| 2   | $-X$        |
| 4   | $+Y$        |
| 8   | $-Y$        |
| 5   | $+X$ , $+Y$ |
| 9   | $+X$ , $-Y$ |
| 6   | $-X$ , $+Y$ |
| 10  | $-X$ , $-Y$ |
| 3   | 抬 笔         |
| 7   | 落 笔         |

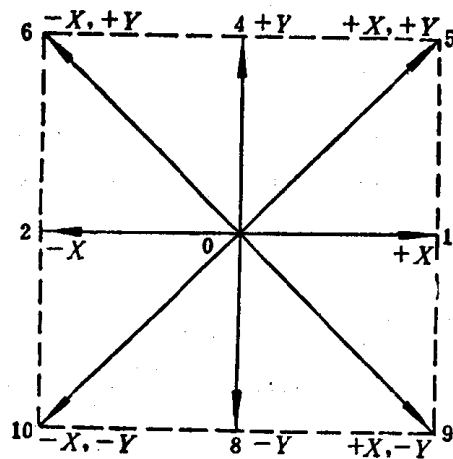


图 1—14 画笔的运动方向

如果直接用 Benson 绘图机这十个动作指令编程（也称手工编程），可使绘图机绘出简单的图形。例如：根据 Benson 绘图机的功能编码指令编写“5”字。设：字高为 6 毫米、宽 4 毫米，从“5”字左下角开始画。把字放在 6×6 的方格中，每一小格为 1 毫米×1 毫米。步长为 0.1 毫米。则绘图程序的指令编程清单见第 8 页。

由图 1—15 可知：“5”字是用一些小的线段表示的，而这些线段的方向是画笔所能动作的方向，因此用编码指令控制画笔是能实现的。可是如果给定与水平线成 30 度角的线段或给定一个圆、各种曲线等等，则画笔不能沿这些线的方向运动或者说画笔本身是不能实现的。而是用直线近似逼近的方法，即插补原理的方法才能完成。如图 1—15 所示。

画笔绘制直线的逼近方法，如图 1—16 所示。 $AB$  为一般的斜线，因为  $AB$  方向不是绘图机画笔动作方向，因此画笔不可能直接从  $A$  点画到  $B$  点，而只能按八个方向去近似的逼近  $AB$  直线，其逼近的结果为锯齿状的折线。但是由于绘图机的步长很小（只有 0.1~0.02 毫米），则锯齿状的线条就会隐藏在画笔墨水的粗细里（墨水粗细为 0.2 毫米以上），其绘图结果，我们用眼睛是分辨不出来的，因此可以满足工程上的要求。例如：飞机模线的绘图精

度为 0.1 毫米，而绘图机绘出来的图，高于这个精度。

以图 1—16 为例，具体说明绘图机的插补绘图原理。

设：直线  $AB$  在第一象限内，从  $A$  画到  $B$ 。

```

3
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
7
9 9 9 9 9 9 9 9 9 9
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
3
    
```

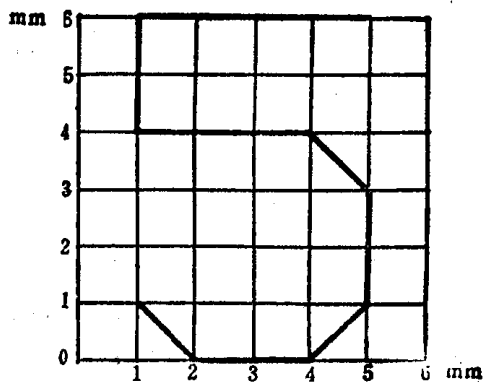


图 1—15 指令编程绘图结果

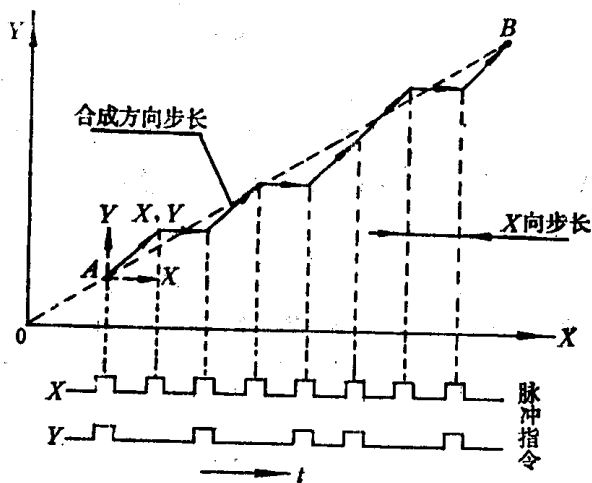


图 1—16 用折线近似逼近直线

计算机根据已知直线  $AB$  的数学方程，从  $A$  点开始发出画笔走第一步的脉冲指令。根据绘图机的功能，在第一象限内画笔只有三个动作方向（即： $+X$ ； $+Y$ ； $+X, +Y$ ），究竟画笔走那个方向，这需要计算机通过分析、比较、计算后才能确定的。其原则是：选定画笔走完一步后，终点的坐标位置距  $AB$  直线最近。如图 1—16 所示，从  $A$  点应该同时发出  $+X, +Y$  的合成方向的脉冲指令，即  $45^\circ$  方向。因为这一方向走完一步后距  $AB$  直线最近。同样道理，第二步应发出  $+X$  方向的脉冲指令；第三步……，一直画到终点  $B$  停止。在从  $A$  到  $B$  的过程中，每走一步计算机都是逐点比较后确定的。所以插补原理也叫逐点比较插补计算原理。从笔的运动轨迹来看，由  $A$  到  $B$  不是一条直线，而是一条折线。

插补原理也有各种各样的方法，如正负法、线性内插法、数字积分器法、微分分析法等等。每种插补原理中又分直线插补、圆弧插补和抛物线插补。其最常见的数学处理方法将在第三章中详细叙述。

综上所述，计算机绘图可以绘制任何图形，但绘出的实际结果是若干个微小的折线的集合，如图 1—17 所示。

由于整个过程是由计算机控制的，所以计算的速度高、准确，使得绘图机能够画出比较理想的图形。

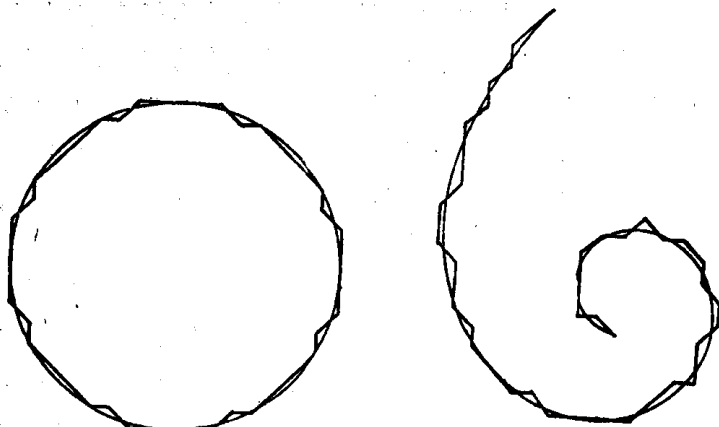


图 1—17 计算机绘图用直线逼近曲线

## 第二章 自动绘图机

从自动绘图机的发展情况来看,大致可分为两种类型:一种以美国Calcomp公司为代表的转筒式的自动绘图机,它是作为计算机的一种外部设备而发展起来的,其目的是将计算结果用计算机自动的绘制图形,适用于图形的高速处理、实现“人机对话”。另一种是以美国Gerber公司为代表的平台式的自动绘图机,这是从数控机床的一种应用发展起来的,主要用于绘制生产图纸,也适用于精密图形处理,如画飞机的模线图。

但是,由于生产对绘图质量和速度都提出较高的要求,这两种类型之间的差别也逐渐消失。自动绘图机向着超高速和超高精度方向发展。

### 第一节 控制元件

自动绘图机的核心部分是驱动电机,它是一个控制元件。目前自动绘图机采用的驱动电机有:步进电机、伺服电机和平面电机。下面分别介绍它们的工作原理与结构:

#### 一、步进电机

步进电机又名脉冲电机或同步脉冲电机。它接受脉冲数字信号,并与信号同步,以相同数量的步数进行一步一步的转动。

##### 1. 步进电机的工作原理

步进电机由转子和定子组成。定子有A、B、C三相绕组;转子是由若干个等距的齿构成,与一般电动机不同,实际上就是利用电磁铁的作用原理。

如图2—1所示。当某一相通电后,若转子一个齿与定子对齐时,则定子与转子磁极轴向夹角 $\theta=0$ ,转动力矩 $M_e$ ,使 $M_e=0$ 。若 $\theta \neq 0$ ,由于磁力线的弹力作用,将产生一个力矩 $M_e$ ,使转子逆时针转动。

以图2—2为例说明其工作原理。步进电机是由四极的转子和具有三对磁极的定子组成,通过独立的三极管顺序向三对磁极流入脉冲电流进行激磁。设定子线圈为A、B、C;转子由1、2、3、4四个齿构成。如果只是三极管 $T_A$ 导通时,则电流只能流入线圈A,此时转子的1、3极与定子A对正,保持为一直线状态;而如果切断 $T_A$ 使 $T_B$ 导通时,与定子B距离最近的转子极2、4将以逆时针方向旋转,使定子B与2、4极保持直线状态。

总之,当切断定子的一个极的电流,使电流流入转子的另一个极时,步进电机的转子就转过 $1/12$ 圈。如电流按顺时针方向从 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 流入线圈时,转子按逆时针方向步进转动。反之,电流按逆时针方向从 $A \rightarrow C \rightarrow B$ 流入线圈时,则转子按顺时针方向步进转动。

其具体工作过程如下:

(1) 三极管 $T_A$ 导通时,A相通电,则电流只能流入A相线圈绕组,转子1、3两齿被A极吸引成直线状态。

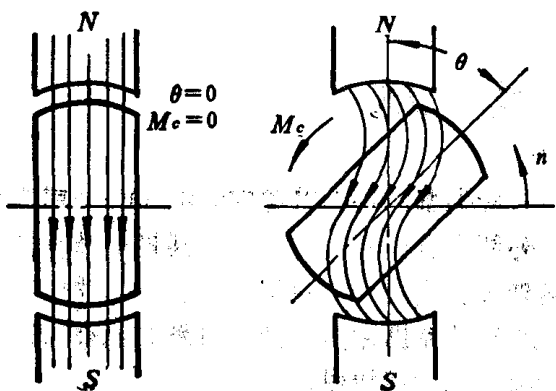


图 2—1 步进电机转动原理图

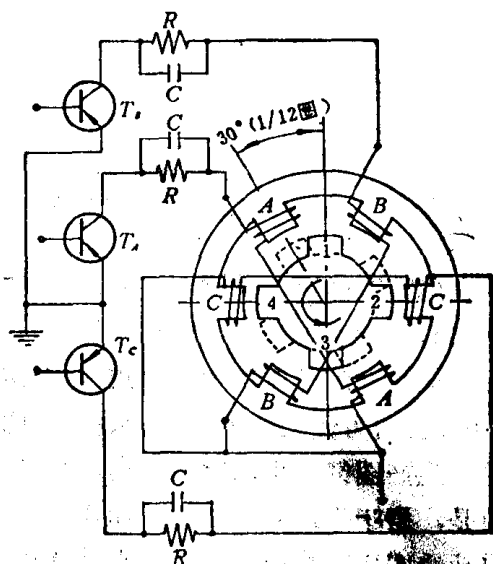


图 2—2 步进电机原理图

(2) 若三极管  $T_B$  导通时,  $B$  相通电,  $A$  相断电, 电流只流入  $B$  相线圈绕组, 则转子 2、4 两齿被  $B$  极吸引成直线状态, 转子逆时针转过  $30^\circ$  角。

(3) 若三极管  $T_C$  导通时,  $C$  相通电,  $B$  相断电, 电流只流入  $C$  相线圈绕组, 则转子 1、3 两齿被吸引成直线状态, 转子逆时针又转过  $30^\circ$  角。

(4) 三极管  $T_A$  又导通了, 此时  $A$  相通电,  $C$  相断电, 转子逆时针又转过  $30^\circ$  角。

由上所述, 若按  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$  顺序轮流通电, 转子就不断地逆时针旋转, 这种方式叫做三拍控制方式。通电绕组每转换一次, 转子就逆时针转过  $30^\circ$  角 (或转  $1/12$  圈)。同理可知, 如果绕组通电顺序按  $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow B$  进行, 则转子将顺时针旋转。为了改善步进电机的性能, 通电顺序按  $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$  进行, 每转一次转子转过  $15^\circ$  角, 这种方式叫六拍控制方式。它比三拍控制方式步距减少一半, 提高了精度, 又因为在转换时始终保持有一个绕组通电, 工作比较稳定, 故转换频率可提高一倍。

一般希望步进电机具有较小的步距。例如某型号步进电机, 如图 2—3 所示, 定子上有  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三对三相绕组供电; 转子没有绕组, 而有 40 个均匀等距的齿, 定子上三对磁极也均匀分布圆周上, 相邻磁极夹角为  $60^\circ$ , 每个磁极上有 5 个齿, 与转子上齿的形状大小一样, 并且, 定子相邻磁极上的齿在圆周方向上相互错开  $1/3$  齿距。为此, 当转子上的齿与  $A$  相定子的齿对齐时, 转子齿与  $B$  相齿相错  $1/3$  齿距, 与  $C$  相齿相错  $2/3$  齿距。如果转子齿为 40, 则步距

$$t = \frac{360}{40} = 9^\circ$$

当  $A$  相通电时, 转子齿与  $A$  相齿相对, 当  $A$  相磁极断电而  $B$  相通电时, 转子齿即转过  $1/3$  齿距, 使之与  $B$  相齿对齐 (即转子转过  $3^\circ$ ), 同样,  $B$  相磁极断电而  $C$  相磁极通电时, 转子又转过  $1/3$  齿距, 与  $C$  相对齐。如此循环下去, 则转子以步距为  $3^\circ$  断续转动。这是三拍控制方式, 如六拍控制方式供电时, 则步距可减少到  $1.5^\circ$ 。由此可得出步进电机步距转角  $\theta$  与定子绕组相数  $m$ 、转子上的齿数  $z$  供电状态  $k$  之间的关系, 用公式表示为:

$$\theta = \frac{360^\circ}{m \cdot z \cdot k}$$

式中  $m$  —— 定子绕组相数;

$z$  —— 转子齿数;

$k$  —— 逻辑供电状态。

若三拍控制供电  $k = 1$ , 若六拍控制供电  $k = 2$ 。

一般绘图机中常用 5 相十拍的步进电机。

## 2. 步进电机的结构与性能

我国目前使用的多为反应式步进电机。所谓反应式, 即转子无绕组, 步进运行由定子绕组通电激磁产生的反应力矩作用来实现。其结构剖面图如图 2—4 所示。定子铁芯是由电工钢片迭压成一个整体, 定子上有多对极, 每对极上有小齿, 极上装有多相对称绕组。转子是由转轴和转子铁芯 (即转子冲片) 组成, 转子冲片由矽钢片冲制, 上面有许多齿。这种步进电机的结构如图 2—5 所示。

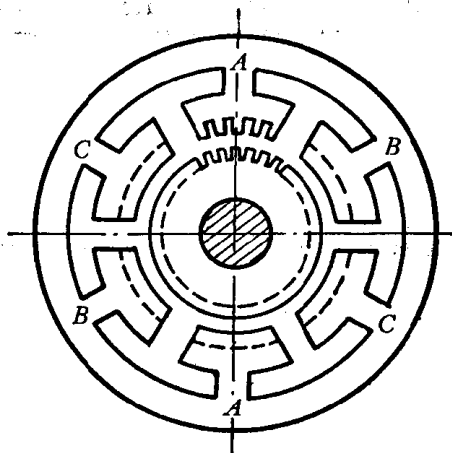


图 2—3 某型号步进电机结构剖面图

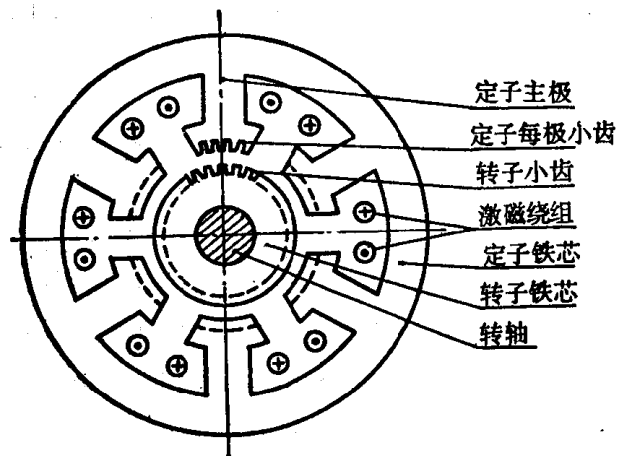


图 2—4 反应式步进电机的结构剖面图

另一种是多定子轴向分相式步进电机, 其结构如图 2—6 所示, 它的定子齿成内齿状, 每段定子为一相, 每相齿数和转子齿数相等。定子每相在径向彼此错开  $\frac{1}{n}$  齿距 ( $n$  为相数), 转子上各段齿彼此不错位。为了防止相间漏磁, 在定子及转子的相间都加以绝缘。

国产步进电机的技术性能见表 2—1。其步距精度一般为  $\pm 10' \sim \pm 30'$ 。有的可达到  $\pm 2' \sim \pm 5'$ 。

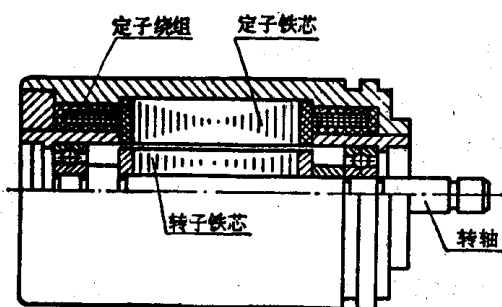


图 2—5 反应式步进电机结构示意图

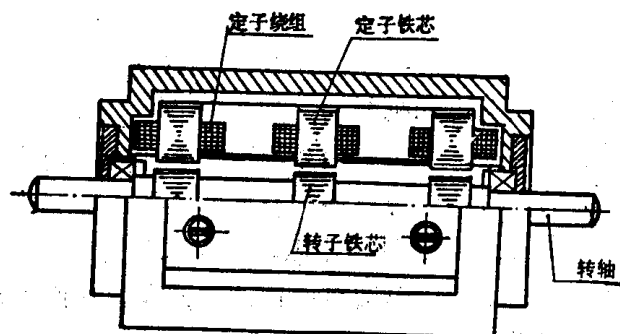


图 2—6 轴向分相式步进电机结构示意图