

机械电子实验课

（机械电子工程方向）

机电与信息研究所

2005 年 10 月

目 录

前言	1
第一章 数控技术	4
第一节 数控编程	4
第二节 数控装置的轨迹控制原理	9
第三节 数控机床中的进给伺服系统	16
第二章 机床电气自动控制	21
第一节 可编程序控制器（PLC）实验的相关知识	21
第二节 交流异步电机变频调速	32
第三章 单片机原理及应用	38
第一节 单片机的指令系统	38
第二节 输入/输出端口	43
第四章 机械 CAD/CAM 技术	47
第一节 计算机图形变换原理	47
第二节 机械零件的三维 CAD 造型	54
第三节 CAD/CAM 的综合设计	56
第五章 机器人的结构分析	59
第一节 工业机器人的组成	59
第二节 机器人的结构类型	61
第六章 机电一体化系统设计	68
第一节 概述	68
第二节 机电一体化的稳态设计	69
第三节 机电一体化系统的动态设计	80
第二部分 实战篇	85
《机械电子实验课》教学大纲	86
学生实验守则	91
实验 1 数控机床手工编程实验	92
实验 2 直线（圆弧）插补实验	102
实验 3 可编程序控制器编程及运行操作	108
实验 4 组合机床顺序控制系统设计及模拟调试	110
实验 5 机械手时间顺序控制系统设计及模拟调试	113
实验 6 异步电动机变频调速	115
实验 8 插值算法及复合变换程序实验	117
实验 9 机械零件的三维 CAD 造型实验	125
实验 10 气动机械手机械结构分析实验	127
实验 11 机电一体化系统稳态设计	129

实验 12	步进电动机基本原理实验	139
实验 13	电机控制系统实验	144
实验 14	CAD/CAM 综合设计	147
实验 15	气动机械手自动控制实验	150
实验 16	机电一体化系统动态设计	152
实验 17	直线一级倒立摆运动分析	163

第三部分 附录

附录 1	广泰数控铣床模拟仿真软件使用说明书-----	227
附录 2	步进电动机脉冲分配程序-----	263
附录 3	E6000 软件的使用方法-----	266
附录 4	步进电机脉冲分配参考程序-----	273
附录 5	机械电子实验课实验报告格式-----	278

前言

21 世纪世界经济发展中最激烈的竞争，不仅表现在生产和科技领域中，同时也集中在培养人才的教育领域，特别是高等教育领域上。教育学家提出了 21 世纪高等学校培养学生的目标是：具有合理的知识结构、较强的能力，较好的思想道德素养、文化素养和身心素质。教育部在对机械专业学生的业务培养要求中强调了“具有较强的自学能力和创新意识”。面对如此的挑战，教育机构就必须进行教学改革，而改革的中心是培养高素质的人才。综观我国目前的高等教育，虽然取得了长足的发展，但仍存在着“四重四轻”现象，即：重理论轻能力、重书本轻创新、重主导轻主体、重局部轻全局。还在一定程度上造成培养出来的学生与社会需要相脱节，动手能力差，缺乏自我创新和开拓精神。

为了扭转这一状况，培养既能适应 21 世纪市场经济大环境，又具有综合能力和创新能力的优秀人才，必须对原有的专业实验进行相应的改革。通过认真讨论机械电子工程方向的实验教学改革思路，我们认为：机械电子工程方向实验教学改革应紧紧围绕着“提高学生创新能力及培养学生的综合素质”这个方向来进行。为此，我们确定了机械电子工程方向的专业实验教学改革的思路是：以能力培养为中心、以学生为主体，注重理论与实践的结合，强化以机电结合为主的综合能力培养，促进学生个性及创造性发展。提出了机械电子工程方向实验教学独立设课的这种新型的实验教学模式。

该实验独立设课涵盖了“机械控制基础”、“测试技术”、“单片机原理与接口技术”、“数控技术”、“计算机辅助设计与制造”、“机械电气自动控制”、“工业机器人”、“机电一体化系统设计”、“数控机床及编程等机械电子工程专业的部分基础课程和全部专业课程。整个实验课由两大模块组成：基础实验模块和综合实验模块。基础实验模块部分的实验随相应课程教学进度进行，主要是让学生掌握相关课程的基本的实验手段与实验方法，进一步加深对专业基础课的理解，对后续课程的学习打下良好的基础。综合实验模块部分设计为开放性实验，不安排固定的时间和固定的实验项目，只确定实验学时数。由学生按自己的兴趣及能力在相同学时的实验中选择不同类型的实验项目。通过一系列机电一体化相关技术的实验，使学生在实验过程中系统地学习、掌握有关机电一体化技术基础知识，其目的是培养学生综合利用基础知识和技能来分析和解决工程实际问题的能力。

第一部分 理论篇

第一章 数控技术

数控技术(Numerical control)----是指用数字信号构成的控制程序对某一对象进行控制的一门技术，简称 NC (Numerical Control)。所控制的量有：位移、角度、速度等机械量，也可以是温度、压力、流量、颜色等物理量。这些量可经 A/D 转换，用数字信号表示。

第一节 数控编程

一、 数控编程的步骤

将从零件图样到程序检验前的全部过程称为数控加工的程序编制，简称数控编程。其步骤包括：

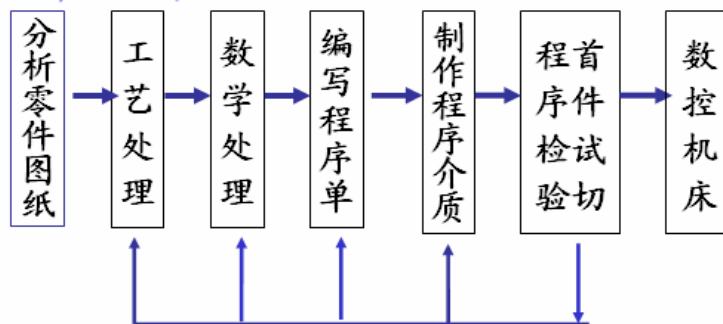


图 1-1 数控编程的步骤

1、分析零件图纸并进行相应的工艺处理

对零件图进行分析明确加工内容及要求；

包括：确定加工方案、选择适合的数控机床、设计夹具、选择刀具、确定合理的走刀路线及选择合理的切削用量。

2、数学处理

按已确定的加工路线和允许的零件加工误差，计算出所需的输入数控装置的数据。即获取刀位数据（主要进行基点和节点的计算）

3、编写程序单

根据数控系统规定的功能指令代码及程序段格式，逐段编写加工程序单。

4、制作程序介质

把编制好的程序单上的内容记录在控制介质上作为数控装置的输入信息。

5、程序检验

检查机床运动轨迹与动作的正确性。

6、首件试切

检验零件分析、数学处理、程序编写及介质制作中存在的错误并及时解决。

二、 数控编程的方法

程序编制的方法包括手工编程和自动编程两种。用人工完成程序编制的全部工作（包括通过计算机辅助进行数值计算）称为手工编程。在自动编程中，编程人员只要根据零件图纸的要求，按照某个自动编程系统的规定，将零件的加工信息用较简便的方式送入计算机，由计算机自动进行程序的编制，编程系统能自动打印出程序单和制备控制介质。

手工编程适用于：几何形状不太复杂的零件。

自动编程适用于：

- Ø 形状复杂的零件，
- Ø 虽不复杂但编程工作量很大的零件（如有数千个孔的零件）
- Ø 虽不复杂但计算工作量大的零件（如轮廓加工时，非圆曲线的计算）

三、 数控编程的坐标系及其方向设定

1、 数控机床坐标轴和运动方向的规定

ISO 和中国标准规定：

- n 数控机床的每个进给轴(直线进给、圆进给) 定义为坐标系中的一个坐标轴。
- n 数控机床坐标系统标准：右手笛卡尔坐系统；

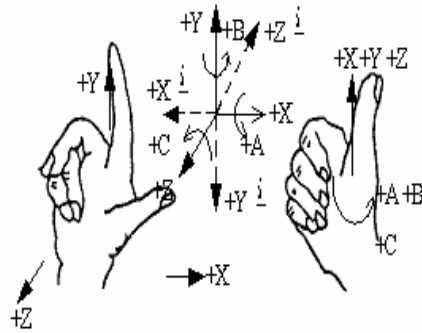


图 1-2 坐标系设定

(1) 右手笛卡尔坐标系

直线进给的基本坐标系：X、Y、Z

回转座标：围绕 X、Y、Z 轴旋转的圆周进给坐标轴分别用 A、B、C 表示，坐标轴相互关系由右手螺旋法则而定。

(2) 机床坐标轴及正方向的规定方法

标准统一规定，以增大工件与刀具之间距离的方向（即增大工件尺寸的方向）为坐标轴的正向。

1) Z 轴。由传递切削力的主轴所规定。

若没有主轴(牛头刨床)或者有多个主轴，则选择垂直于工件装夹面的方向为 Z 坐标。若主轴能摆动：在摆动的范围内只与标准坐标系中的某一坐标平行时，则这个坐标便是 Z 坐标；若在摆动的范围内与多个坐标平行，则取垂直于工件装夹面的方向为 Z 坐标。

2) X 轴一般是水平的，且与工件装夹面平行。

在工件旋转的机体上（如车床），X 运动方向是径向的，与横向导轨平行。刀具离开工件旋转中心的方向是 +X 方面；在刀具旋转的机床上，若 Z 坐标水平时（如卧式铣床），由主轴向工件看时，+X 方向向右；若 Z 坐标是垂直的（如立式铣床），由主轴向立柱看时，+X 的方向向右。

3) Y 轴及正方向按右手笛卡尔坐标系统决定。

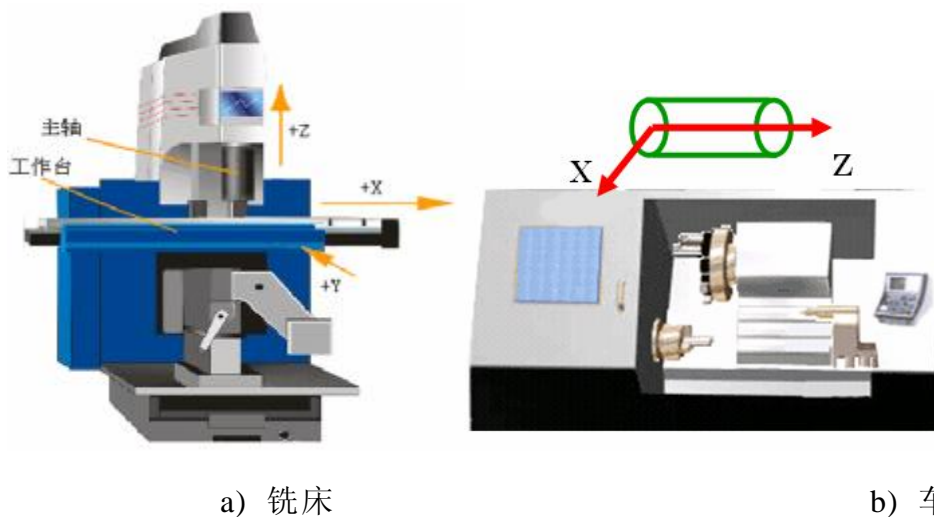


图 1-3 坐标系设定

2、机床坐标系与工件坐标系

(1) 机床坐标系与机床原点

编程总是基于某一坐标系统的，因此，弄清楚数控机床坐标系和工件坐标系的概念及相互关系是至关重要的。

机床原点：机床坐标系的零点。这个原点是在机床调试完成后便确定了，是机床上固有的点；**机床原点的建立：**用回零方式建立；机床原点建立过程实质上是机床坐标系建立过程

机床坐标系：以机床原点为坐标系原点的坐标系，是机床固有的坐标系，它具有唯一性；机床坐标系是数控机床中所建立的工件坐标系的参考坐标系。

注意：机床坐标系一般不作为编程坐标系，仅作为工件坐标系的参考坐标系。

(2) 工件坐标系和工件原点

工件原点：为编程方便在零件、工装夹具上选定的某一点或与之相关的点。该点也可以是对刀点重合。

工件坐标系：以工件原点为零点建立的一个坐标系，编程时，所有的尺寸都基于此坐标系计算。

工件坐标系是用来确定工件几何形体上各要素的位置而设置的坐标系，工件原点的位置是人为设定的，它是由编程人员在编制程序时根据工件的特点选定的，所以也称编程原点。

程序起点：刀具（刀尖）在加工程序执行时的起点，又称为程序原点。现代数控机床均可设置多个工件坐标系，在加工时通过 G 指令进行换。

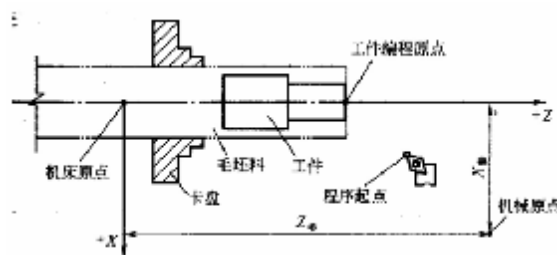


图 1-4 数控车床的坐标系

四、 数控编程中的功能代码

1、 准备功能代码

准备功能指令又称为 G 指令、G 代码、G 功能。

指令的作用：主要是指定数控机床的运动方式，为数控系统的插补算作好准备。

指令的组成：G 后跟 2 位数字组成。即： G00~G99

指令的特点：同一程序段中，同一组的指令不能出现两次；一旦模态代码使用，其功能便一直保持到下一个同组的指令出现。

2、 辅助功能代码

M00—程序停止 主轴停转、进给停止、冷却液关断、程序停止；

M01—计划停止 类似于M00，与“任选停止”按钮配合使用；

M02—程序结束 程序全部结束，机体复位

M30—纸带结束

M03 —主轴顺转

M04 —主轴逆转

M05—主轴停止

M06—换刀

M07— 2 号冷却液开，雾状冷却液开；

M08— 1 号冷却液开，液状冷却液开；

M09—冷却液关

M10 —夹紧

M11— 松开

M13—主轴顺转、冷却液开；

M14—主轴逆转，冷却液开；

3、 F、S、T 功能代码

1) F 指令

作用：指定刀具的进给速度。是模态代码。

格式： $\left\{ \begin{array}{l} \text{代码法：} F \text{后跟几位数字，是进给速度的序号，不表示进给速度的大小；} \\ \text{直接法：} F \text{后跟的数字即进给速度的大小。} \end{array} \right.$

2) S 指令

作用：为主轴速度指令。是模态代码。

格式：与 F 相同

3) T 指令作用：指定刀具号‘

格式：T 后跟 2 位数字，以代表刀具的编号。必须在有自动换刀功能的机床上用才有效。

五、 常用准备功能指令的编程方法

1、 与坐标系有关的指令

(1) 绝对坐标与增量坐标指令----G90、G91

G 90—按绝对坐标编程；

G 91—按增量坐标编程；

这两个指令是同组模态指令，也就是说在同一程序段中只允许用其中之一，而不能同时使用。在缺省的情况下（即无 G90 又无 G91），默认是在 G90 状态下。

(2) 坐标系设定指令----G92 作用：以工件原点为准，确定刀具刀位点的坐标值。

注意：执行该指令时，刀具不移动。坐标值必须齐全；只能使用绝对坐标值；在一个零件的全部加工程序中，可重复多次使用 G92。(3) G 17、G 18、G 19—坐标平面选择 为模态指令。缺省值为 G17

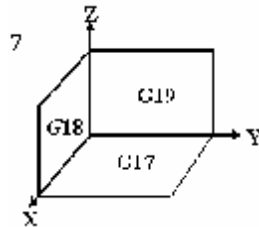


图 1-5 坐标平面设定

2、运动控制指令

(1) G 00—快速点定位

作用：快速定位，不进行切削，无运动轨迹要求。

格式：G00 X__Y__Z__；

注意：G00 指令中不需要指定速度。即 F 指令无效。G00 的运动轨迹不一定是直线，若不注意则容易干涉。(2) G 01 格式：G01 X_aY_bZ_cF_f 作用：指令多坐标（2、3 坐标）以联动的方式，按程序段中规定的合成进给速度 f ，使刀具相对于工件按直线方式，由当前位置移动到程序段中规定的位置（ a 、 b 、 c ）。当前位置是直线的起点，为已知点，而程序段中指定的坐标值即为终点坐标。模态指令

(3) G 02、G 03—圆弧插补使机床在指定平面内执行圆弧运行，切削出圆弧轮廓。

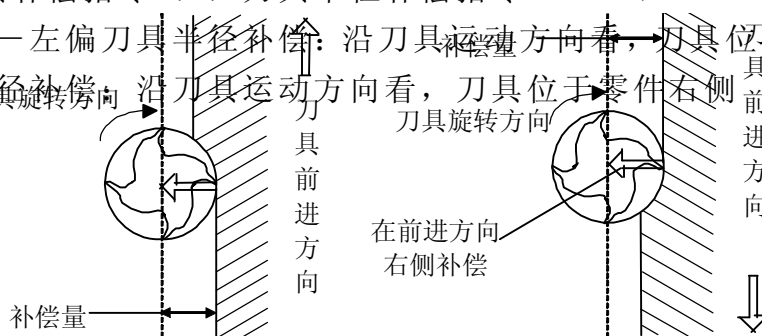
G 02—顺时针圆弧插补；G 03—逆时针圆弧插补

顺、逆方向判别规则：沿垂直于圆弧所在平面的坐标轴的负方向观察，来判别圆弧的顺、逆时针方向。

格式：X、Y——表示圆弧的终点坐标（绝对坐标系下）或圆弧终点相对于起点的距离（相对坐标系下）；I、J——表示圆弧中心相对于圆弧的起点在 X、Y 方向的坐标增量； R----圆弧半径。R 表示法：用半径 R 带有符号的数值来表示：圆心角大于 180 度取负值，小于等于 180 度取正值。

3、刀具补偿指令 (1) 刀具半径补偿指令—G 41、G 42

G 41—左偏刀具半径补偿：沿刀具运动方向看，刀具位于零件左侧 G 42—右偏刀具半径补偿：沿刀具运动方向看，刀具位于零件右侧



a) G41

b) G42

图 1-7 刀具补偿指令

G41 和 G42 的指令格式可分为两种情况：1) G00、G01 的格式为：

其中：D 为补偿号，即存放刀补值的存储器地址号。2) G02 和 G03 的指令格式为：(2)G40 仅用在 G00、G01 的刀具半径补偿注销。(3) 刀具半径补偿功能的优点：1) 只需按零件轮廓编程，不需计算刀具中心运动轨道；

2) 刀具磨损或刀具重磨后，刀具半径变小，只需改动刀具半径补偿值，而不必改程序 3) 同一把刀具进行粗、精加工时，设精加工余量为 Δ ，则粗加工的刀具半径补偿值为 $r_{刀} + \Delta$ ，精加工的刀具半径的补偿值为 r 即可。

(4) 刀具长度补偿指令— G43、G44 用于刀具的轴向 (Z 方向) 补偿。

G43—刀具长度正补偿 (在相应的程序段内增加坐标尺寸)；

G44—刀具长度负补偿 (在相应的程序段内减少坐标尺寸)。

4、固定循环指令一条指令可以完成一组固定的动作。可使程序编制简短、方便，提高编程质量。固定循环指令一般随机床的种类、型号、生产厂家等而变，是不通用的。

第二节 数控装置的轨迹控制原理

一、插补概述

数控机床加工的零件轮廓一般由直线、圆弧组成，也有一些非圆曲线轮廓例如高次曲线、列表曲线、列表曲面等，但都可以用直线或圆弧去逼近，当按各直线和圆弧线段的数据编写数控加工程序，并输入、启动数控系统工作时，数控系统便将程序段进行输入处理、插补运算、输出处理，并按计算结果控制伺服机构，从而驱动数控机床的伺服机构，使刀具和零件作精确的完全符合各程序段的相对运动，最后加工出符合要求的零件。

插补计算就是数控系统根据输入的基本数据，如直线终点坐标值、圆弧起点、圆心、终点坐标值、进给速度等，通过计算，将工件轮廓的形状描述出来，边计算边根据计算结果向各坐标发出进给指令。插补实际上是根据有限的信息完成数据密化的工作，无论是硬件数控还是 CNC 数控，插补模块是不可缺少的，能完成插补功能的模块或装置称为插补器。

插补方法可以分为：

1、一次插补器、二次插补器和高次插补器

这是根据数学模型来划分的，如直线插补就是一次插补，圆或抛物线插补是二次插补等。

2、硬件插补和软件插补

一般，硬件数控的插补模块由数字电路组成，速度较快，但升级不易，柔性较差，称为硬件插补。

3、 基准脉冲插补和数据采样插补

C N C 数控的插补模块由软件来实现，速度虽然没有硬件插补快，但容易升级，成本也较低廉，称为软件插补。

(1) 基准脉冲插补（又：行程标量插补、脉冲增量插补）：

脉冲增量插补是行程标量插补，每次插补结束产生一个行程增量，以脉冲的方式输出。这种插补算法主要应用在开环数控系统中，在插补计算过程中不断向各坐标轴发出互相协调的进给脉冲，驱动电机运动。一个脉冲所产生的坐标轴移动量叫做脉冲当量。脉冲当量是脉冲分配的基本单位，按机床设计的加工精度选定，普通精度的机床一般取脉冲当量为：0.01mm，较精密的机床取 1 或 0.5 。采用脉冲增量插补算法的数控系统，其坐标轴进给速度主要受插补程序运行时间的限制，一般为 1~3m/min。

本方法因为只涉及加法和移位计算，实现起来比较简单，容易用硬件实现。比较常用的有：

1) 数字脉冲乘法器（又：二进制比例乘法器 BinaryRateMultiplier，简称 BRM）

2) 逐点比较法（又称区域判别法）

3) 数字积分法（简称 DDA 法）

4) 矢量判别法

5) 比较积分法

6) 最小偏差法

7) 目标点跟踪法

8) 单步追踪法

9) 直接函数法

10) 加密判别和双判别法...

(2) 数据采样插补（又：时间标量插补、数字增量插补）

特点是数控装置产生的不是单个脉冲而是二进制字，适用于闭环、半闭环交直流伺服电机驱动的系统。它可以划分两个阶段：

粗插补：用微小的直线段逼近给定的轮廓，该微小的直线段与指令给定的速度有关，常用软件实现。

精插补：在上述微小的直线段上进行“数据点的密化”，这一阶段其实就是对直线的脉冲增量插补，计算简单，可以用硬件或软件实现。

下面是常用的数据采样插补方法：

1) 直线函数法

2) 扩展 D D A 法

3) 二阶递归扩展 D D A 法

4) 双数字 D D A 法

5) 角度逼近圆弧插补法

6) 改进吐斯丁法...

二、基准脉冲插补

脉冲增量插补主要有逐点比较法、数据积分插补法等。

逐点比较法最初称为区域判别法，或代数运算法，或醉步式近似法。这种方法的原理是：计算机在控制加工过程中，能逐点地计算和判别加工偏差，以控制坐标进给，按规定图形加工出所需要的工件，用步进电机或电液脉冲马达拖动机床，其进给方式是步进式的，插补器控制机床。逐点比较法既可以实现直线插补也可以实现圆弧等插补，它的特点是运算直观，插补误差小于一个脉冲当量，输出脉冲均匀，速度变化小，调节方便，因此在两个坐标开环的 CNC 系统中应用比较普遍。但这种方法不能实现多轴联动，其应用范围受到了很大限制。

(1) 插补原理

被控对象在按要求的轨迹运动时，每走一步都要和规定的轨迹比较，由比较结果决定下一步移动的方向。

(2) 插补步骤

例如：采用逐点比较法对轮廓直线 OE 进行插补，如图 1-8 所示。每进给一步都要经过如下四个工作节拍，如图 1-9 所示。

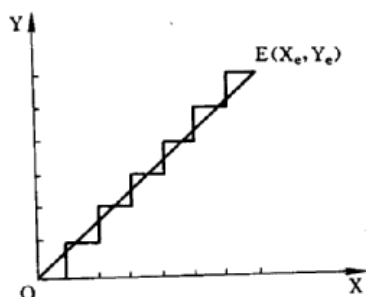


图 1-8 逐点比较法插补轨迹

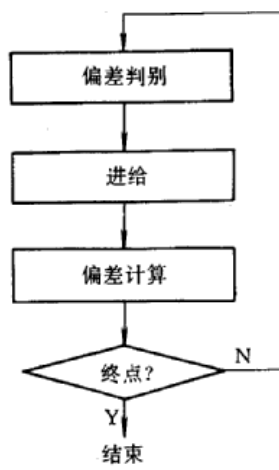


图 1-9 逐点比较法的工作节拍

第一节拍——偏差判别。判别刀具位置相对于给定轮廓的偏离位置，以决定进给方向；

第二节拍——进给。根据偏差判别结果，决定刀具的进给方向；

第三节拍——新偏差计算。刀具进给后，位置改变，需计算刀具当前位置的新偏差，为下一次偏差判别作准备；

第四节拍——终点判别。判断刀具是否达到终点。若达到，则停止插补，若未达到终点，在继续插补。

(3) 直线插补

设在第一象限：起点 $O(0, 0)$ ，终点 $E(X_e, Y_e)$ ， $P(X_i, Y_i)$ 为加工动点。

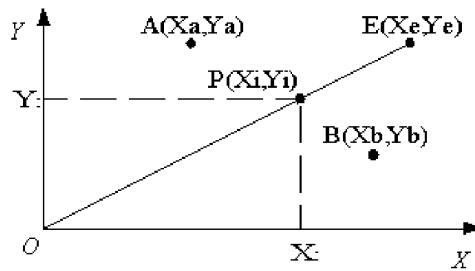


图 1-10 直线方程

1) 偏差计算公式

直线 \overline{OE} 的方程：

$$\frac{X}{Y} = \frac{X_e}{Y_e} \Rightarrow YX_e - XY_e = 0 \text{ 取判别函数 } F \text{ 为:}$$

$$F = YX_e - XY_e$$

在第一象限有：① $F=0$ ， $P(X_i, Y_i)$ 在直线上；

② $F>0$ ， $P(X_i, Y_i)$ 在直线上方；

③ $F<0$ ， $P(X_i, Y_i)$ 在直线下方。

设在第一象限有点 $P(X_i, Y_i)$ ， F 值为 $F_{i,j}$ ，即得偏差计算公式：

$$F_{i,j} = Y_j X_e - X_i Y_e$$

2) 进给

1) 若 $F_{i,j} \geq 0$ ，沿 $+X$ 方向走一步；

2) 若 $F_{i,j} < 0$ ，沿 $+Y$ 方向走一步。

3) 新偏差计算

1) 沿 $+X$ 方向走一步，新偏差计算公式：

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i + 1 \\ F_{i+1,j} = Y_j X_e - (X_i + 1) Y_e = F_{i,j} - Y_e \end{cases}$$

2) 沿 $+Y$ 方向走一步，新偏差计算公式：

$$\begin{cases} Y_{j+1} = Y_j + 1 \\ F_{i,j+1} = (Y_j + 1) X_e - X_i Y_e = F_{i,j} + X_e \end{cases}$$

4) 终点判别

① 每走一步判断 $X_i - X_e \geq 0$ ，且 $Y_j - Y_e \geq 0$ 是否成立，若成立，插补结束；

② 求程序段中的总步数 Σ : $\Sigma = [X_e] + [Y_e]$, 每走一步, $\Sigma - 1$, 直到 $\Sigma = 0$ 为止。

5) 第一象限直线插补流程图

逐点比较法直线插补的运算流程可归纳如图 1-11 所示。

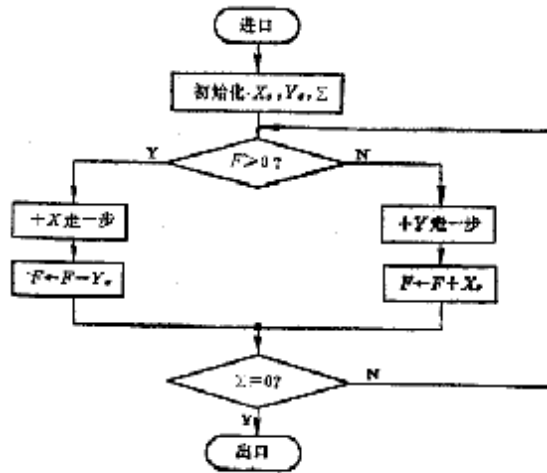


图 1-11 第一象限插补流程框图

7) 四象限的直线插补的进给方向

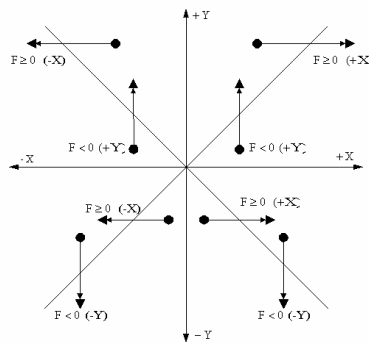


图 1-12 四象限步进方向

8) 四象限直线插补的流程图

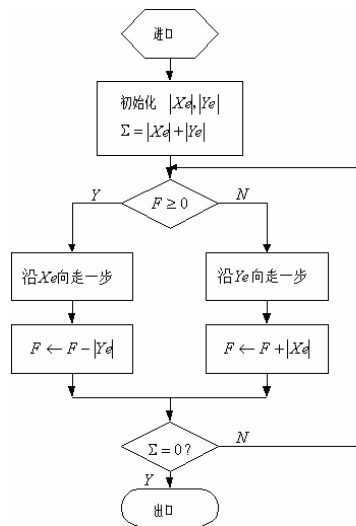


图 1-13 四象限直线插补流程图

(4) 圆弧插补

以第一象限逆圆为例。圆心为原点，圆弧起点坐标 (X_0, Y_0) 和终点坐标 (X_e, Y_e) 。

1) 偏差计算公式

圆弧上任意点动点 (X, Y) ，有：

$$(X^2 + Y^2) - (X_0^2 + Y_0^2) = 0$$

判别函数 F ：

$$F = (X^2 + Y^2) - (X_0^2 + Y_0^2)$$

情况：

- ① $F=0$ ，动点在圆弧上；
- ② $F>0$ ，动点在圆弧外；
- ③ $F<0$ ，动点在圆弧内。

设在第一象限有点 (X_i, Y_j) ， F 值为： $F_{i,j}$ ，则有偏差计算公式：

$$F_{i,j} = (X_i^2 + Y_j^2) - (X_0^2 + Y_0^2)$$

2) 进给

- ① 若 $F_{i,j} \geq 0$ ，沿 $-X$ 方向走一步；
- ② 若 $F_{i,j} < 0$ ，沿 $+Y$ 方向走一步。

注：第一象限逆时针加工： $F \geq 0$ ， $-\Delta X$ 进给， $F < 0$ ， $+\Delta Y$ 进给；

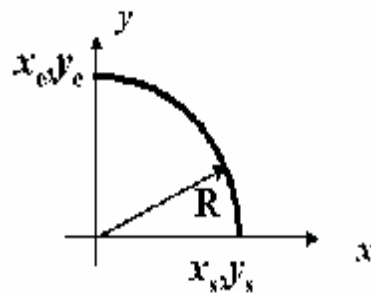


图 1-14 第一象限逆圆插补

第一象限顺时针加工： $F \geq 0$ ， $-\Delta Y$ 进给， $F < 0$ ， $+\Delta X$ 进给。

3) 新偏差计算

① 若 $F_{i,j} \geq 0$ ，沿 $-X$ 方向走一步，则新偏差计算公式为：

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i - 1 \\ F_{i+1,j} = (X_i - 1)^2 + Y_j^2 - (X_0^2 + Y_0^2) = F_{i,j} - 2X_i + 1 \end{cases}$$

② 若 $F_{i,j} < 0$ ，沿 $+Y$ 方向走一步，则新偏差计算公式为：

$$\begin{cases} Y_{j+1} = Y_j + 1 \\ F_{i,j+1} = X_i^2 + (Y_j + 1)^2 - (X_0^2 + Y_0^2) = F_{i,j} + 2Y_j + 1 \end{cases}$$

4) 终点判别

① 终点坐标与动点坐标比较法：

若 $X_i - X_e = 0$ ，则 X 向到终点；

若 $Y_j - Y_e = 0$ ，则 Y 向到终点。

当两个坐标轴同时到终点，插补结束。

② 求程序段中的总步数 Σ ： $\Sigma = X_e + Y_e$ ，每走一步， $\Sigma - 1$ ，直到 $\Sigma = 0$ 为止。

5) 第一象限的顺圆、逆圆插补流程图

第一象限的逐点比较法的圆弧插补每进给一步也需要经过四个工作节拍。其流程图见图 1-16 所示。

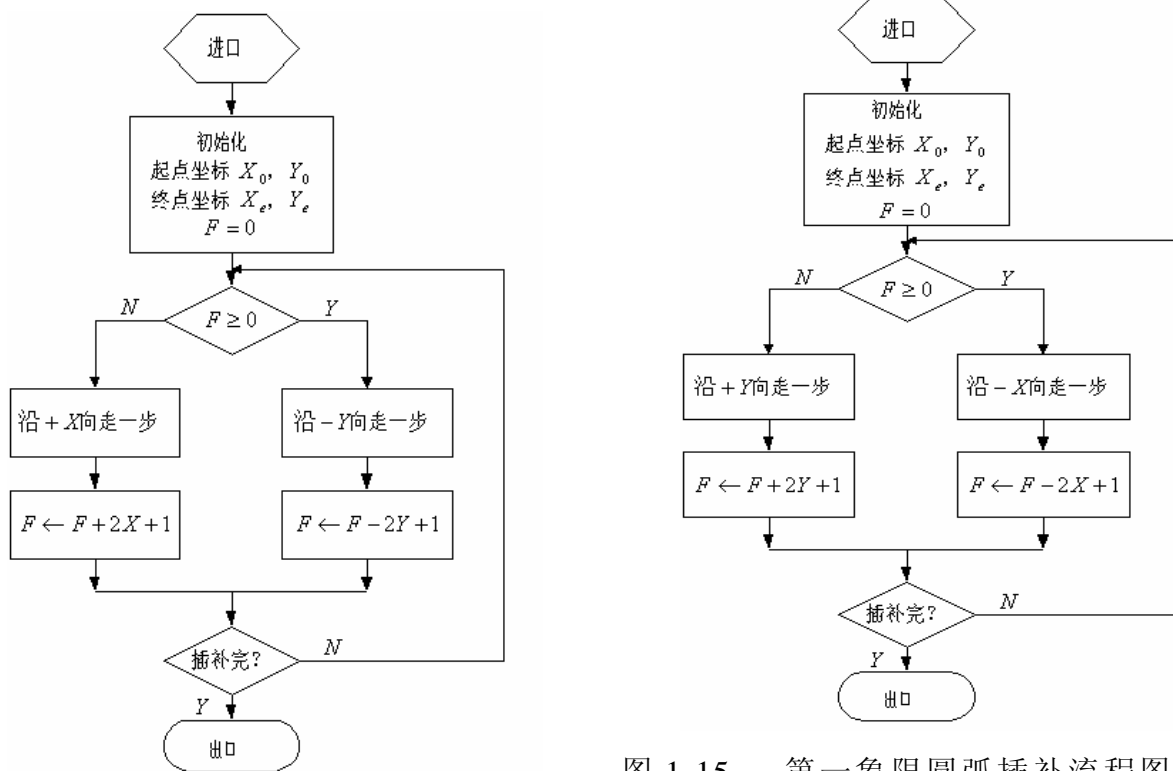


图 1-15 第一象限圆弧插补流程图

7) 其它象限圆弧插补

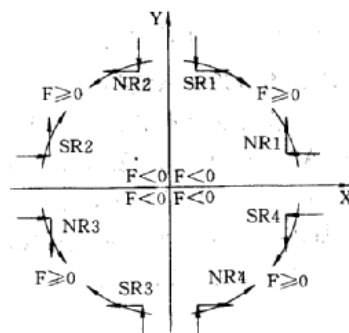


图 1-16 四象限

2、数据采样插补法

数据采样插补是根据用户程序的进给速度，将给定轮廓曲线分割为每一插补周期的进给段，即轮廓步长。每一个插补周期执行一次插补运算，计算出下一个插补点坐标，从而计算出下一个周期各个坐标的进给量，进而得出下一插补点的指令位置。与基准脉冲插补法不同的是，计算出来的不是进给脉冲而是用二进制表示的进给量，也就是在下一插补周期中，轮廓曲线上的进给段在各坐标轴上的分矢大小，计算机定时对坐标的实际位置进行采样，采样数据与指令位置进行比较，得出位置误差，再根据位置误差对伺服系统进行控制，达到消除误差使实际位置跟随指令位置的目的。数据采样法的插补周期可以等于采样周期也可以是采样周期的整数倍；对于直线插补，动点在一个周期内运动的直线段与给定直线重合，对于圆弧插补，动点在一个插补周期运动的直线段以弦线逼近圆弧。数据采样插补主要有：时间分割法、扩展 DDA 法、双 DDA 法等等。

第三节 数控机床中的进给伺服系统

一、概述

CNC 部分是数控机床的“大脑”是发布“命令”的“指挥机构”；驱动及位控是数控机床的“四肢”，是一种“执行机构”。伺服系统的性能，在很大程度上决定了现代数控机床的性能。如：数控机床的最高移动速度、跟踪精度、定位精度等重要指标均取决于伺服系统的动态与静态性能。

数控机床的进给伺服系统是由：伺服电路、伺服驱动装置、机械传动机构及执行部件组成。

1、数控进给伺服系统的分类

数控进给伺服系统是一种位置控制系统，分为开环、半闭环和闭环三种。

1) 开环进给系统

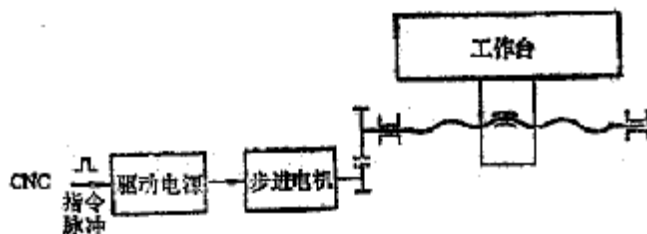


图 1-17 开环伺服系统结构图

特点：

- ①结构较简单，调试、维修、使用方便、成本低；
- ②无位置反馈环节，系统稳定；
- ③速度及精度较低。

2) 半闭环与闭环进给系统

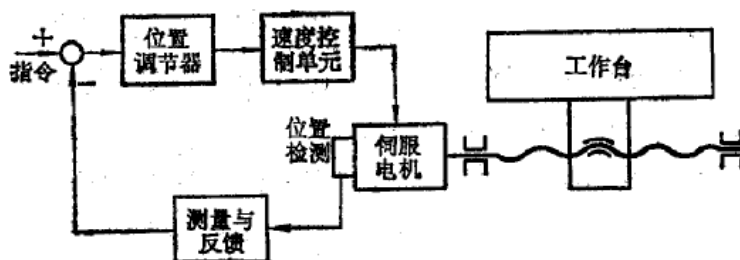


图 1-18 半闭环伺服系统结构图

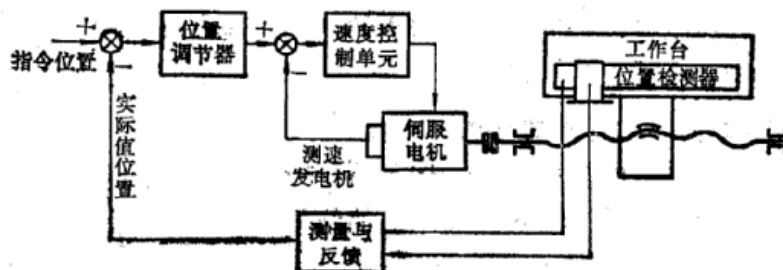


图 1-19 闭环伺服系统结构图

特点：

- ①结构比较复杂，安装调试比较麻烦；
- ②加工精度高，速度快。

2、进给伺服系统的驱动装置

(1) 对进给伺服驱动装置的要求：

- 1) 精度高：定位精度和加工精度。实际位移与指令位移之差要小，亦即跟随误差要小。
- 2) 快速响应：达到最大稳态速度的时间要求在 200ms 以内。
- 3) 调速范围宽：调速范围：电机的最高转速 N_{max} 和最低转速 N_{min} 之比。要求应大于：1:10000
- 4) 负载特性要硬：当负载变化时，输出速度应基本不变。

(2) 分类：

- 1) 步进电机：开环进给驱动装置，在经济型数控机床上应用；
- 2) 改进型直流电机：在静态和动态特性较普通直流电机有所改变，早期使用；
- 3) 小惯量直流电机：减小电枢的转动惯量，获得好的快速性，早期使用；
- 4) 永磁直流伺服电机：能在较大过载转矩下长期工作；可在低速下(1r/mm 甚至 0.1r/mm)平稳运转。70 年代—80 年代中期广泛应用，目前还在使用；
- 5) 无刷直流电机：实质是交流调速电机的一种。性能达到直流电机的水平，又取消换向器及电刷部件，电机寿命提高一个数量级；
- 6) 交流调速电机：自 80 年代中期开始，以异步电机和永磁同步电机为基础的交流进给驱动得到迅速的发展，是进给驱动的一个发展方向。

二、步进电机

步进电机是一种用电脉冲信号进行控制，并将电脉冲信号转换成相应角位移的执行元件。其角位移量与电脉冲数成正比；转速与电脉冲频率成正比。



图 1-20 反应式步进电机结构原理图：

1、步进电机的工作原理

如图示，定子上有六个极，每个极上装有控制绕组，每两个相对的极组成一相。转子是四个均匀分布的齿，上面没有绕组。

① 当 A 组相绕组通电时，磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合，使转子齿 1、3 和定子极 A、A' 对齐；

② A 相断电，B 相绕组通电时，转子将在空间转过 α° ，使转子齿 2、4 和定子极 B、B' 对齐；

③ B 相断电，C 相绕组通电，转子又在空间转过 α° ，使转子齿 1、3 和定子极 C、C' 对齐；

④ 如此循环往复，并按 A—B—C—A 的顺序通电，电动机便按一定的方向转动；

⑤ 电机的转速直接取决于绕组与电源接通或断开的变化频率；

⑥ 若按 A—C—B—A 的顺序通电，则电动机反转；

⑦ 电动机定子绕组每改一次通电方式——称为一拍；

⑧ 每输入一个脉冲信号，转子转过的角度——步距角 α° 。

上述通电方式称为：三相单三拍。(三相三拍)。单—每次通电时，只有一相绕组通电；双—每次通电时，有两相绕组通电；三拍—经过三次切换绕组的通电状态为一个循环；除了三相单三拍的通电方式外，还有三相双三拍、三相单双六拍的通电方式，即：

三相双三拍： AB-BC-CA-AB 或 AC-CB-BA-AC

三相单双六拍： A-AB-B-BC-C-CA-A 或 A-AC-C-CB-B-BA-A

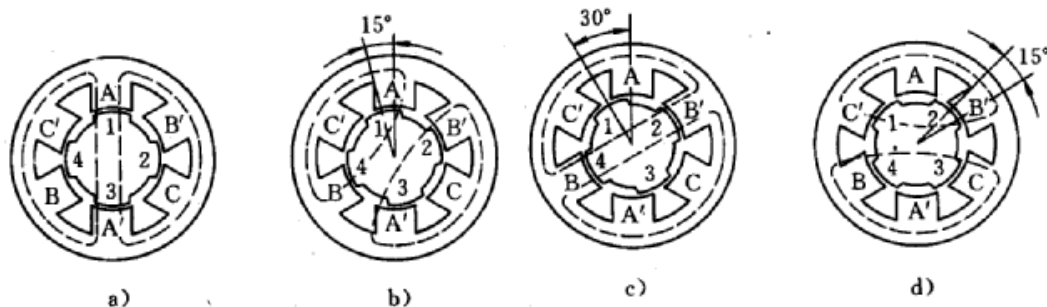


图 1-21 步进电机三相六拍运行方式

a) A 相通电 b) AB 相通电 c) B 相通电 d) BC 相通电

定子绕组要经过六次切换才能完成一个循环，故为六拍；定子绕组通电方式有单个，又有两个绕组同时接通，故为单、双。

设步进电机的定子绕组有 m 相，转子齿数为 Z 齿，通电方式系数为 k ，则每输入一个脉冲电信号，转子的步距角 α° 有：

$$\alpha = \frac{360^\circ}{mzk}$$

单拍通电时 $k=1$ ；双拍通电时 $k=2$ 。

由上式知道：步进电机的步距角越小，位置精度越高；磁极数越多，转子齿数越多，步距角就越小。

步进电机的转速： $n = \frac{1}{6}fq(r/\min)$ f ——控制脉冲的频率

2、步进电机工作特点

1) 步进电机受脉冲电流的控制，转子的角位移和角速度与输入脉冲的数量和脉冲频率成正比，改变相的通电顺序可以改变步进电机的旋转方向；

2) 步进电机有自整角能力，不需机械制动；

3) 步距无累积误差；

4) 步进电机的效率低，脉冲当量不能太小，调速范围不大。

3、步进电机的使用特性

1、步距误差：

步距误差直接影响执行部件的定位精度。

单相通电时，步距误差由定子和转子的分齿精度和各相定子错位角度的精度确定；

多相通电时，步距误差还和各相电流的大小、磁路性能等因素有关。

2、最高启动频率和最高工作频率

最高启动频率 f_g ：步进电机由静止突然启动，并不失步地进入稳速运行，所允许的启动频率的最高值。最高启动频率 f_g 与步进电机的惯性负载 J 有关。

最高工作频率：步进电机连续运行时所能接受的最高频率。

3、输出的转矩——频率特性

电机工作时输出的转矩与输入频率之间的关系，随着输入频率的增加，输出转矩将下降。

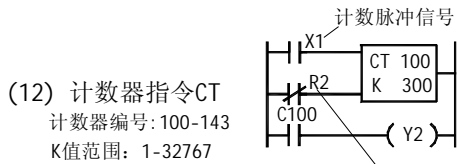
第二章 机床电气自动控制

第一节 可编程序控制器（PLC）实验的相关知识

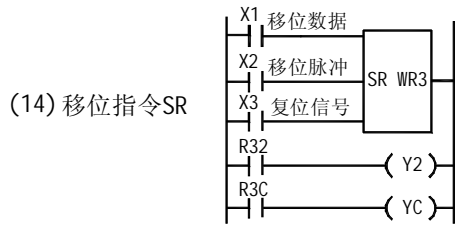
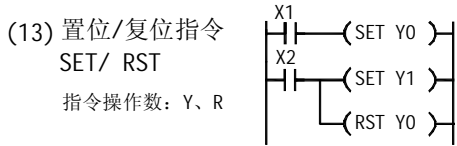
一、FP1 系列 PLC 常用指令及其编程操作

(1) 取指令 ST		ST X0	
(2) 取反指令ST/		ST/ X1	
(3) 与指令 AN		ST X0	
		AN X1	
(4) 与反指令AN/		ST X0	
		AN/ X1	
(5) 或指令OR		ST X1	
		OR X2	
(6) 或反指令OR/		ST X1	
		OR/ X2	
(7) 输出指令OT		OT Y5	
(8) 并联输出指令OT (可多次并联输出)		OT Y5	
		OT Y8	
(9) 串联电路块的 并联指令ORS		ST X1	
		AN X3	
		ST X2	
		AN X4	
ORS			
(10) 并联电路块的 串联指令ANS		ST X1	
		OR X2	
		ST X3	
		OR X4	
		ANS	
(11) 定时器指令		ST R1	
		TM Y3	
		K 20	
		ST T3	
		OT Y5	

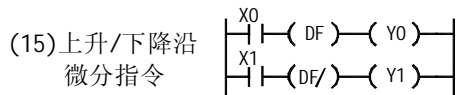
注: 1. 输入信号R1保持时间应大于定时值;
2. T3为定时器TM Y3的输出信号



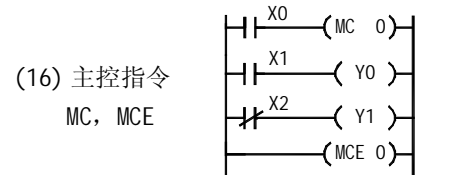
注: 1. 复位信号在计数时应断开, 计数器复位清零时应闭合。
2. 若计数未达预置值时停电, 恢复供电后保留此前计数值。



注: (1)X1的类型: 单脉冲信号或电平信号。
(2)X1发信时刻: 单脉冲信号必须与X2同步发信。电平信号可比X2提前发出, 在移入0位时撤销。
(3)当X3断开时, X1、X2同步发信, X1的“1”值移入R30位, 且该位有输出。随后每输入一个移位脉冲, “1”值相继向高一位R31、R32、...移位。
(4)当X3闭合时, 移位寄存器WR 3中的数据清零。



注: (1)在X0接通的上升沿时, Y0接通一个扫描周期。
(2)在X1断开的下降沿时, Y1接通一个扫描周期。



注: (1)X0闭合时, 执行MC和MCE之间的指令。
(2)MC和MCE的编号: 0-31。

ST	X1	ST X-WX	ST X-WX	1	WRT			
ST/	R2	ST X-WX	NOT DT/Ld	OR R-WR	2	WRT		
CT	100	CT C-EV	1	0	0	ENT		
K	300	(BIN) K/H	3	0	0	WRT		
ST	C100	ST X-WX	CT C-EV	1	0	0	WRT	
OT	Y2	OT L-WL	AN Y-WY	2				
ST	X1	ST X-WX	ST X-WX	1	WRT			
SET	Y0	SHIFT SC	1	9	SHIFT SC	AN Y-WY	0	W
ST	X2	ST X-WX	ST X-WX	2	WRT			
SET	Y1	SHIFT SC	1	9	SHIFT SC	AN Y-WY	1	W
RST	Y0	SHIFT SC	1	A	SHIFT SC	AN Y-WY	0	W
ST	X1	ST X-WX	ST X-WX	1	WRT			
ST	X2	ST X-WX	ST X-WX	2	WRT			
ST	X3	ST X-WX	ST X-WX	3	WRT			
SR	WR 3	SHIFT SC	3	SHIFT SC	OR R-WR	3	WRT	
ST	R32	ST X-WX	OR R-WR	3	2	WRT		
OT	Y2	OT L-WL	AN Y-WY	2				
ST	R3C	ST X-WX	OR R-WR	3	C	WRT		
OT	YC	OT L-WL	AN Y-WY	C				
ST	X0	ST X-WX	ST X-WX	0	WRT			
DF		SHIFT SC	0	SHIFT SC		WRT		
OT	Y0	OT L-WL	AN Y-WY	0				
ST	X1	ST X-WX	ST X-WX	1	WRT			
DF/		SHIFT SC	0	SHIFT SC	NOT DT/Ld	WRT		
OT	Y1	OT L-WL	AN Y-WY	1				
ST	X0	ST X-WX	ST X-WX	0	WRT			
MC	0	SHIFT SC	4	SHIFT SC	0	WRT		
ST	X1	ST X-WX	ST X-WX	1	WRT			
OT	Y0	OT L-WL	AN Y-WY	0				
ST/	X2	ST X-WX	NOT DT/Ld	ST X-WX	2	WRT		
OT	Y1	OT L-WL	AN Y-WY	1				
MEC	0	SHIFT SC	5	SHIFT SC	0	WRT		

二、PLC 顺序控制系统设计

顺序控制系统是按照预定的动作顺序逐步动作的一种控制系统。这种控制系统在机械设备上应用最广。本章以某单面钻镗组合机床为控制对象, 介绍 PLC 控制系统的主要设计步骤及控制程序梯形图的几种设计方法。

1. 控制对象的工艺分析

某钻镗组合机床的液压系统如图 2-1 所示。工步状态见表 2-1。它的初始状态为：定位液压缸、夹紧液压缸和进给滑台均处在原位，分别压合行程开关 SQ1、SQ3、SQ4。当控制系统启动时，电磁阀 B 的电磁铁 YV2 和卸荷电磁阀 L 的电磁铁 YV5 同时得电，液压系统加载，定位液压缸活塞上移定位，并压合行程开

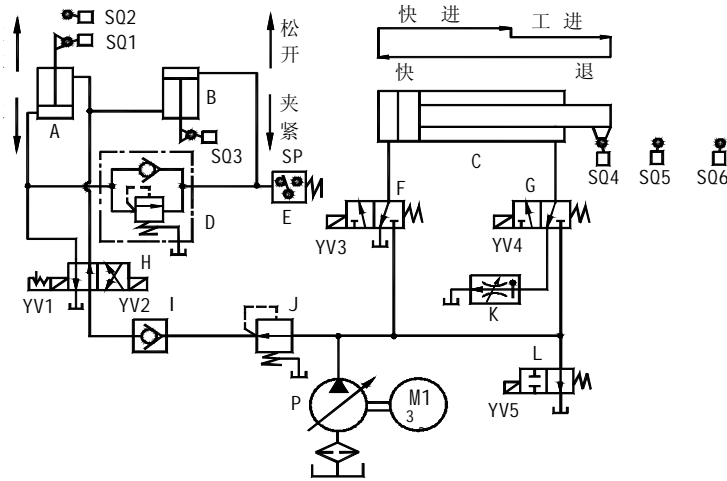


图2-1 某钻镗组合机床液压系统原理图

关 SQ2。发出定位完成信号。其后，夹紧回路压力

表 2-1 钻镗组合机床工步状态表

工 步	1 2 3 4 5 6 7						
	定位、夹 紧 快进、主电机启动 工进 停留 10s 快退 松开、拔销 主电机 停止						
转步主令	SB1、SQ1 SQ3、SQ4 SQ2、SP SQ5 SQ6 T× SQ4 SQ1 SQ3						
电 磁 阀 状 态	YV1						+
	YV2	+					
	YV3		+	+	+		
	YV4		+			+	
	YV5	+	+	+	+	+	+
接 触 器	KM + + + +						

升高，打开单向顺序阀 D，夹紧缸活塞下移将工件夹紧。夹紧压力达到压力继电器 E 的调定压力，使其微动开关 SP 闭合，此时同时满足了定位和夹紧完成的条件，即 SQ2·SP。此“与”信号输入控制系统，使电磁换向阀 F、G 的电磁铁 YV3、YV4 和接触器 KM 得电，令进给滑台差动快进和主电动机 M1 启动，当滑台压合行程开关 SQ5 时，控制系统令 YV4 失电，滑台液压缸的回油流经调速阀 K 回油箱，滑台转为工进。工进完成时压合行程开关 SQ6。根据加工工艺要求，为了保证钻镗加工轴向尺寸的精度要求，工进结束后要停留 10 秒，然后控制系统使 YV4 得电，YV3 失电，使滑台快退。当其退至原位压合行程开关 SQ4 时，控制系统使滑台停止，并接通 YV1 和断开 KM，定位液压缸和夹紧液压缸拔销和松开，

这两个动作完成后压合行程开关 SQ1 和 SQ2，此时主电机 M1 停止。整个液压系统在原位停止。这一过程为半自动工作状态。

组合机床一般有三种工作方式：

(1) 半自动工作方式。这种工作方式如上述工艺分析的那样，由操作者按启动按钮，机床按上述预定动作顺序自动地完成一个工作循环后自动停止。这种工作方式一般是在组合机床流水生产线上应用，一个工人操作一台机床。

(2) 自动工作方式。这种工作方式是操作者首次人工启动后，机床按照预定的动作顺序周而复始地不断进行工作循环。要停止时，必须按下停止按钮，但机床不是立即停止，而是完成一个工作循环后才停止。自动工作方式通常是机床为自动生产线上一个工位。所以，首次人工启动后的重新启动是由自动生产线的关联控制信号实现启动。

(3) 手动工作方式。这种工作方式是用人工按按钮或拨动扭子开关，分别对机床的各个动作进行控制。主要用于机床的初次安装调试和以后的维修、调整。

以上三种工作方式必须有互锁。

2 选择 PLC 的型号规格

(1) 确定要求的 I/O 点数

在选择 PLC 的型号规格以前，首先要确定控制系统需要的主令开关、现场检测开关数和执行电器的数目。由此确定所需的 I/O 点数。

从表 2-1 可见，本例控制系统在半自动工作方式时，现场检测开关为 SQ1~SQ6 及压力继电器 SP，共 7 个，主令开关为一个按钮 SB1，输入点为 8 个。为了在紧急情况如发生事故时能够紧急停止，应加 1 个急停按钮。如果要使机床具有全自动功能，应增加一个全自动启动按钮。机床的手动是必不可少的，其中的定位、夹紧和松开、拔销、快进和快退的手动共需 6 个按钮。再考虑一个自动、半自动与手动的互锁开关，共计需要 16 个输入点。

表 2-1 所示的执行电器有 YV1~YV5 共 5 个电磁换向阀电磁铁和一个接触器 KM。共计需要 6 个输出点。

(2) 选择 PLC 的型号规格

选择 PLC 的型号规格时应遵循以下原则：

1) 对一个用户来说，使用的 PLC 型号应尽可能少，最好只用一种，这是因为目前世界上各个 PLC 生产厂家生产的 PLC 产品，无论是硬件还是软件均互不兼容。型号多种多样对使用和管理均带来不便。

2) 选择的 PLC 型号性能价格比应较高。

3) 质量好，工作可靠。

4) I/O 点够用并略有裕量。

根据以上原则，选择松下电工 FP1 系列 C-24 型 PLC，继电器输出型，电源为 AC100~240V。该机的 I/O 点为 16/8。I/O 点的裕量为 0/2，可满足要求。

3. 列 PLC 的 I/O 分配表

PLC 的 I/O 分配如表 2-2 所示。

表 2-2 PLC 的 I/O 分配表

输								入							
XO	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	XA	XB	XC	XD	XE	XF
SB0	SQ1	SQ2	SQ3	SQ4	SQ5	SQ6	SP	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SA1	SA2	SA3

半自动启动按钮	定位原位开关	定位终点开关	夹紧原位开关	滑台原位开关	工进主令开关	工进终点开关	压力继电器	全自动启动按钮	紧急停止按钮	快进点动按钮	快退点动按钮	全自动停止按钮	定位夹紧手动开关	松开拔销手动开关	自动手一转动换开关
输								出							
Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7								
	YV1	YV2	YV3	YV4	YV5	KM									

4. 按选定的 PLC 机型的编程元件绘制控制流程图

按工步状态表 2-1 绘制 FP1-C24 型 PLC 编程元件表示的控制流程图，如图 2-2 所示。

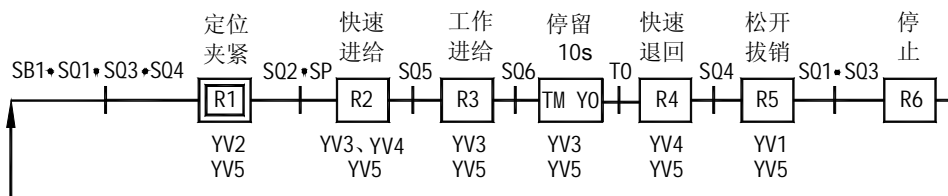


图2-2 PLC控制流程图

5. 逐步得电同步失电式 PLC 控制梯形图设计

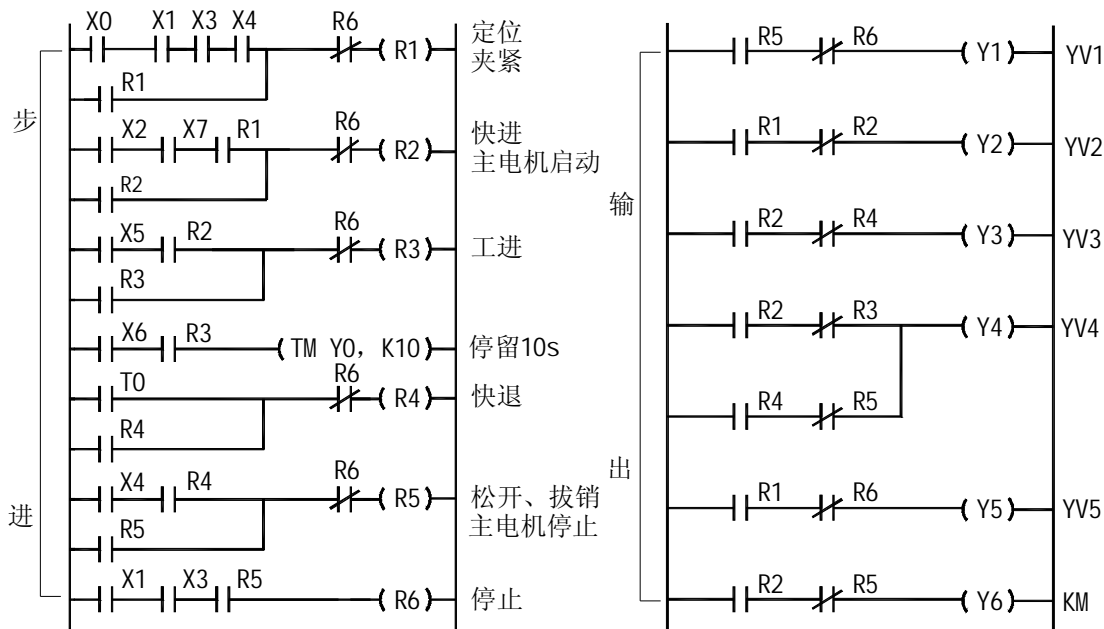


图2-3 逐步得电同步失电式半自动PLC控制梯形图

在设计 PLC 控制梯形图时，首先设计半自动工作循环的梯形图，然后在此基础上再加上全自动和手动回路，使之具有自动、半自动和手动功能的 PLC 控制系统。

(1) 逐步得电同步失电式半自动 PLC 控制梯形图设计

逐步得电同步失电式半自动 PLC 控制梯形图设计，实际上是在图 2-2 所示逐步得电同步失电回路的基础上进行的扩展设计。要特别注意的是以下几个问题：

1) 步 1 中的得电信号，应为按钮启动信号和每个执行部件的原位信号的“与”信号。本例的执行部件有定位机构、夹紧机构和进给滑台。它们的原位开关信号分别为 SQ1、SQ3 和 SQ4，按钮启动信号为 SB0。所以得电信号为 X0·X1·X3·X4。

2) 停止步的得电信号，应为最后工作工步的内部继电器常开触点信号和停止工步的转步主令信号的“与”信号。从表 2-1 可见，本步的得电信号为 X1·X3·R5。

由此可总结出其设计规律为：在工步状态表中，不管是那一工步，凡是其转步主令信号是两个以上的，该步的得电信号就是各个转步主令信号和上一工步的内部继电器常开触点信号的“与”信号。

(2) 逐步得电同步失电式全自动 PLC 控制梯形图设计

逐步得电同步失电式全自动 PLC 控制梯形图设计，是在逐步得电同步失电式半自动 PLC 控制梯形图基础上的补充设计。如图 2-4 所示。

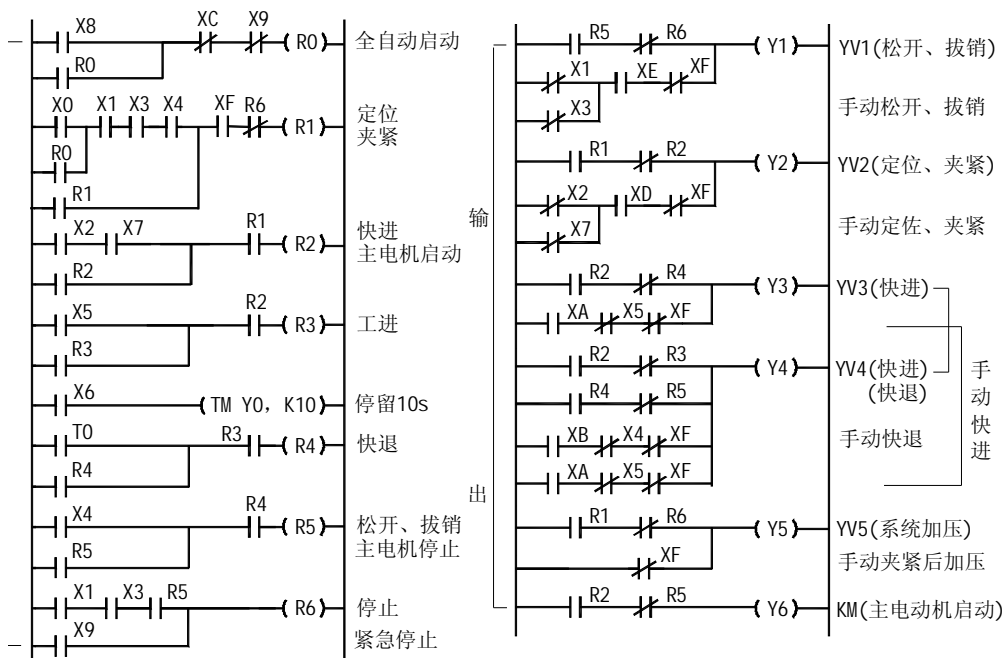


图2-4 逐步得电同步失电式全自动和手动PLC控制梯形图

设计具有全自动、半自动和手动功能的 PLC 控制系统时，必须考虑以下几个问题：①全自动、半自动与手动之间的互锁；②手动操作时，所控制的执行机构碰到限位开关时应能立即停止；③应设紧急停止按钮，当机床加工过程发生异常或事故时，按下急停按钮，使整个系统立即停止运行。

1) 全自动启动回路的结构

全自动启动回路附加在步进回路的开头，如图 2-4 的左上角所示，它是一个自锁电路，即启动信号 X8（该信号通常由与本机床有联系的自动生产线输送机构发出）启动内部继电器 R0，使 R0 得电自锁，R0 的常开触点与半自动启动信号 X0 并联，实现全自动启动或半自动启动。

全自动运行的停止，可在全自动启动回路上串联停止按钮 XC 的常闭触点实现。当按下该按钮时，只是撤销全自动启动信号，不能也不允许立即停机，而是在机床继续工作并完成一个工作循环时才停机。

2) 手动回路的结构

手动回路设在输出电路中，如图 2-4 所示。即手动直接控制输出继电器。其电路结构是：手动按钮（或扭子开关）常开触点、自动与手动的互锁信号的常闭触点和手动的限位开关的常闭触点互相串联，然后与所控制的输出继电器的自动控制信号并联即可。

3) 自动与手动互锁信号的设置

自动与手动互锁可用一个主令开关或扭子开关实现。即在步进电路的步 1 回路上串联互锁开关的常开触点，如图 2-4 的步进电路中的定位夹紧回路所示的常开触点 XF。而在每一个手动回路则用互锁开关的常闭触点 \overline{XF} 。

4) 紧急停止信号的设置

紧急停止信号一般是机床在自动或半自动加工过程中出现异常或事故时使用，所以，只要能使控制系统立即停止即可。就图 2-4 所示控制系统来说，在停止步的控制信号回路并联急停按钮的常开触点 X9 就能实现紧急停止。

6. PLC 控制系统输入输出外接电路的设计

PLC 的输入输出外接电路如图 2-5 所示。设计时考虑到其输入阻抗很大，而且是采用机内提供的 DC24V 电源，输入电流一般只有 7~10mA，而且输入开关都是连接在电源的一极，不会出现短路现象，所以输入端不必采取保护措施。然而，

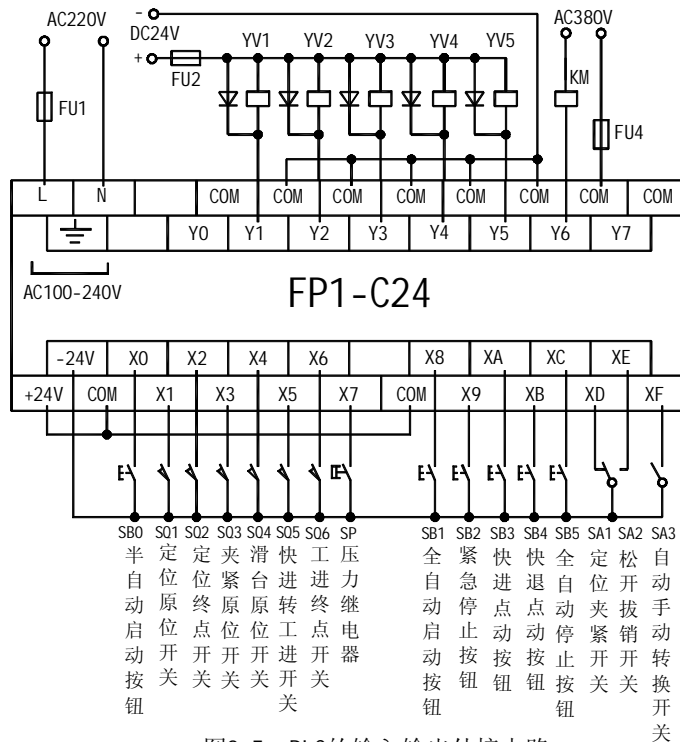


图2-5 PLC的输入输出外接电路

PLC 的输出容量是较小的。继电器输出的最大电流为 2A，晶体管或双向晶闸管的最大输出电流为 0.5A。而组合机床液压系统的电磁换向阀一般采用 DC24V 的电磁铁，其电流为 1A 左右。如果 PLC 选用晶体管或双向晶闸管输出方式，显然不能直接驱动电磁铁。虽然继电器输出的 PLC 可以直接驱动电磁铁，但由于电磁铁为感性负载，断电时产生较大的感应电流而导致 PLC 中的继电器触点烧损。为安全起见，可采取两种保护措施，一种是由 PLC 的输出先驱动外部的小型继电器 KA1~KA5，再由这些继电器驱动电磁铁 YV1~YV5；另一种是图 2-5 所示的 PLC 的输出直接驱动电磁铁 YV1~YV5，但要将每个电磁铁的每个线圈反向并联一个二极管（通常称续流二极管）。当电磁铁线圈断电时，二极管和线圈形成闭合回路，使瞬间产生的感应电流的能量消耗在线圈的电阻上。这样可以避免 PLC 中输出继电器

触点的烧损。

7. PLC 控制系统的模拟调试

PLC 控制系统设计完成以后，为了验证控制系统是否达到设计要求，应首先进行模拟调试，然后才到现场安装调试。下面介绍 PLC 控制系统模拟调试板的结构和调试方法。

(1) PLC 控制系统模拟调试板的结构

如图 2-6 所示，模拟调试板是由一块绝缘板、一个小型按钮 SB 和若干个开关组成（如图中的 SQ1~SQ6 和 SP）。这种开关实际上是将两根弯成书钉状的裸铜线钉扣在绝缘板上，构成开关的两极。按钮和每个开关触点的一端在绝缘板背面并联在一起，作为引出公共端，该端与 PLC 输入侧电源的 -24V 端子连接。按钮 SB 和开关 SQ1、SQ2, ...触点的另一端则从绝缘板背面引出，每根引出线可用于与 PLC 输入继电器的对应端子连。

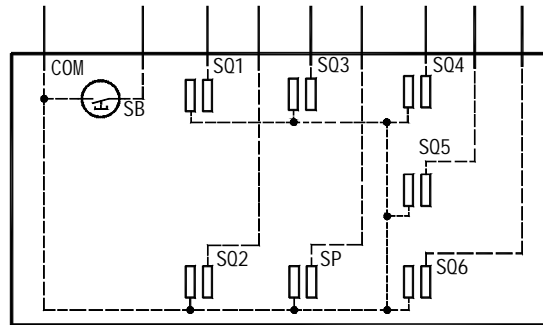


图2-6 PLC控制系统模拟调试板

开关的闭合和断开是借助导电块(用 M14 的镀锌螺母或其它与之大小和重量相当的金属导电块)实现。导电块放在开关的两根导线即可使其接通，拿开导电块则开关断开。导电块的作用除了接通开关外，还可以模拟执行机构的运动状态。

(2) PLC 顺序控制系统的模拟调试方法

1) 模拟调试前的准备工作

按图 2-2 所示控制系统控制流程的要求，在图 2-6 所示面板上贴上标签，标记执行机构的动作名称、运动方向（用箭头表示）、按钮、行程开关和压力继电器的名称及其所对应的 PLC 输入继电器编号，详见图 2-7。

将各行程开关的引出线接到 PLC 输入继电器端子上，然后接通 PLC 的电源，逐个接通各个开关，检查 PLC 的各个输入继电器端子接线是否与按钮和行程开关或其它开关一一对应。若接线正确便可进行下一个步骤。

2) 模拟调试方法

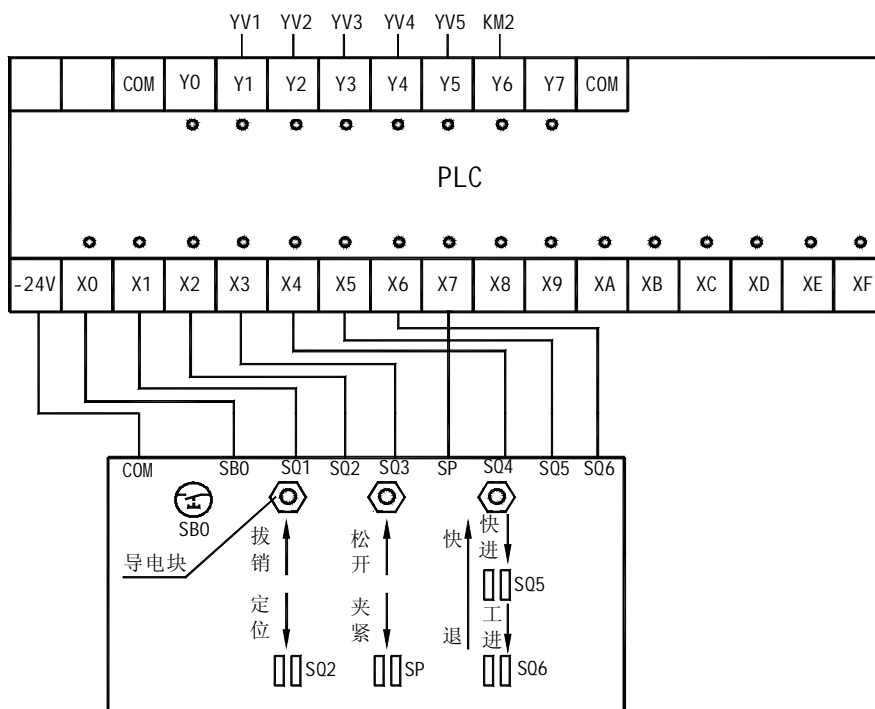


图2-7 PLC控制系统模拟调试图

如图 2-7 所示，根据表 2-2 所示控制流程的转步主令，在模拟调试板上找出对应的行程开关 SQ1、SQ3、SQ4，并在这些开关上放置导电块，如果它们各自对应的输入继电器 X1、X3、X4 的指示灯都亮，说明满足工步 1 的起动条件（即定位、夹紧机构和进给滑台都处在原位）。此时，按下按钮 SB0 使控制系统起动，然后观察电磁阀所对应的输出继电器的指示灯，如果电磁阀 YV2 和 YV5 所对应的 Y2 和 Y5 的指示灯亮，表明输出正确，机床执行定位、夹紧动作。为了模拟这两个动作，用手分别将压住 SQ1 和 SQ3 的导电块，沿着定位、夹紧的箭头指示方向移动，这两个导电块离开 SQ1 和 SQ3 后，SQ1 和 SQ3 断开了 X1 和 X3 的输入回路，对应的两个指示灯熄灭，这一过程真实模拟了定位和夹紧机构的运动，也模拟了在定位、夹紧动作执行后其原位开关的复位状态。当这两个导电块到达终点行程开关 SQ2、SP 处时，SQ2、SP 所对应的输入继电器 X2 和 X7 的指示灯亮，说明定位、夹紧动作已完成，并已发出工步 2 的主令信号。此时观察输出继电器的指示灯，如果 YV3、YV4、YV5、KM2 所对应的输出继电器 Y3、Y4、Y5、Y6 的指示灯亮，表明输出正确，快进和主电机起动能正确实现。然后，将位于 SQ4 处的导电块沿快进的方向移动到 SQ5 处，模拟滑台快进动作。按此方法一步一步地进行下去，直到所有的导电块全部回到各个原位开关的位置，至此，便完成了控制系统半自动循环的模拟调试。

这种调试方法实际上就是用移动导电块的方法，来模拟被控运动部件的动作顺序，及其每步动作如何触发和释放各运动部件的原位开关和终点开关；在导电块每步模拟动作结束和发出指令时，观察控制系统的输出是否正确。以此来验证所设计的 PLC 控制系统是否符合设计要求。

三、时间顺序控制系统的设计

在工业、城市交通管理、或其他需要按时间段进行自动控制或管理的场合，都广泛应用 PLC 时间顺序控制系统。本节将介绍这种系统的设计方法。

1 时间顺序控制系统的设计依据

PLC 时间顺序控制系统的设计依据可以用功能流程图来表示,但用程序状态表来表示更为清晰。如表 2-3 所示。它的每一列表示一个程序步的时间、定时器编号及输出继电器的得失电状态。在输出继电器栏中,每一行表示一个输出继电器在各程序步的得失电状态。根据这种程序状态表即可进行 PLC 顺序控制系统的设计。

表 2-3 时间顺序控制程序状态表

程序步	1	2	3	4	5	6
时间(分)	90	118	245	390	450	停止
定时器	TM Y1	TM Y2	TM Y3	TM Y4	TM Y5	
输出继电器	Y1	+	+			+
	Y2		+	+	+	
	Y3	+		+		+
	Y4		+		+	+

2. 半自动时间顺序阶梯的设计

设计半自动时间顺序阶梯应按思路进行:

(1) 启动信号必须用自锁电以记忆。如图 3-1 所示的启动信号电路所示。

(2) 用启动记忆信号作为步 1 器的输入信号。

(3) 步 1 定时器的输出常开信号作为步 2 定时器的输入信号。依次类推。

(4) 最终程序步完成时,用时输出常闭触点撤销启动记忆信控制系统相继断电。

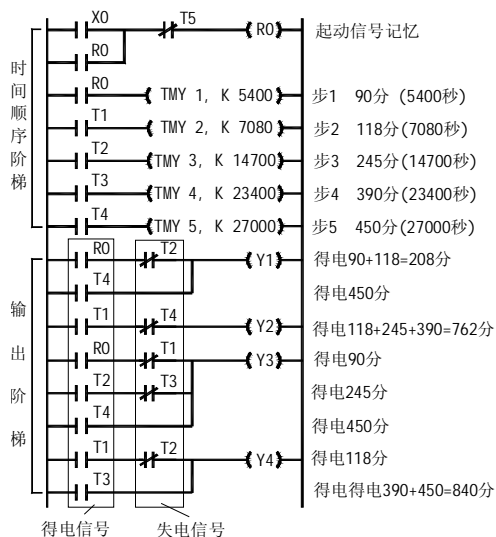


图2-8 半自动时间顺序控制系统梯形图

以下
路予
记忆
定时
触点
其余
其定
号,使

如图 2-8 所示,按这种思路设计的时间顺序阶梯具有以下特点:启动后逐步计时,定时器逐步输出,工作循环结束时控制系统同步失电。

3. 输出阶梯的设计

由于时间顺序控制系统输出阶梯的工作方式为逐步计时,定时器逐步输出,工作循环结束时同步失电,与上述的逐步得电同步失电顺序控制系统的工作原理相似,所以其输出阶梯的设计可采用相同的思路:

(1) 输出继电器在哪一步开始得电,就用该步开始输出的定时器常开触点信号作为输出继电器的得电信号。

(2) 输出继电器在哪一步开始失电,就用该步开始输出的定时器常闭触点

信号作为输出继电器的失电信号。

(3) 输出继电器的控制信号就是其得电信号和失电信号的“与”信号。按此思路设计的输出阶梯如图 3-1 的下半部所示。

4. 全自动时间顺序阶梯及输出阶梯的设计

全自动时间顺序阶梯只需在图 3-1 的基础上，稍加补充一个全自动和手动的转换开关 X1 即可实现。如图 3-2 所示，在起动信号记忆回路的 $\overline{T5}$ 常闭触点处，并联 X1 的常开触点；在步 1 定时回路串联 $\overline{T5}$ 和 $\overline{X1}$ 的并联电路。当 X1 断开时为半自动工作方式。TMY5 计时结束时 $\overline{T5}$ 断开起动信号记忆回路，整个系统失电并回到初始状态。若电路工作时 X1 闭合，当其完成一个工作循环时， $\overline{T5}$ 不能断开起动信号记忆回路，但可以断开步 1 定时回路，从而使各个定时器复位（初始化）。由于 R0 的常开触点不断开，所以经过一个扫描周期的初始化，系统又重新自动启动，进入全自动工作循环。

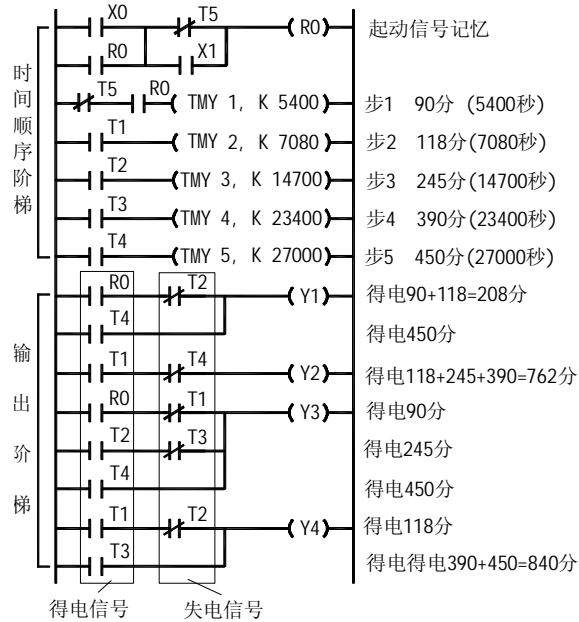


图2-9 全自动时间顺序控制系统梯形图

全自动时间顺序控制的输出阶梯和半自动的完全一样，不再赘述。

第二节 交流异步电机变频调速

一、变频调速的基本控制方式

交流异步电动机调速时，和直流电动机一样，希望保持电动机中每极的磁通为额定值，并且保持不变。如果磁通太弱，电动机的铁心得不到充分利用，造成浪费。若磁通太强，会使铁心饱和，导致过大的励磁电流，严重时会使绕组过热而烧坏。

三相交流异步电动机定子每

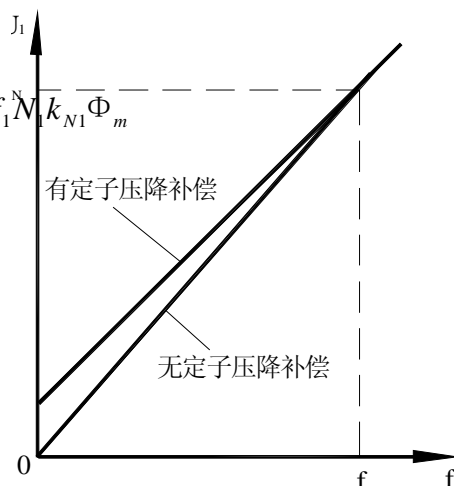
$$E_g = 4.44 f_1 N_1 k_{N1} \Phi_m$$

相的电动势有效值为

式中， E_g ——气隙磁通在定子每相中感应电势的有效值；

f_1 ——定子频率；

N_1 ——定子每相绕组串联



匝数；

k_{N1} ——基波绕组系数；

Φ_m ——每极气隙磁通。

如果忽略定子绕组电阻和感抗压降， E_g 可写成 $E_g \approx U_1$

U_1 为供电电源电压，是一定的。当 f_1 在额定频率（基频）上下变化时， Φ_m 亦随之变化。为了保持 Φ_m 不变，必须保持 U_1 随着 f_1 变化而成正比变化，即

$$U_1/f_1 = \text{常数}$$

这就是电压频率比恒定的控制方式，如图 2-10 所示。

按式 U_1/f_1 控制 f_1 和 U_1 时，交流异步电动机的机械特性是一簇平行曲线，当 f_1 降低时，交流异步电动机产生的最大电磁转矩也降低，这是因为当 f_1 降低时， U_1 和 E_g 也降低，这时定子绕组的漏磁阻抗压降所占的比例增大，不能再忽略。因此，仅保持 U_1/f_1 为常数已不能保持 Φ_m 恒定， Φ_m 会逐渐减少，从而导致电动机电磁转矩（包括最大电磁转矩）降低。当 f_1 很低时，电动机负载能力太低。可见，低频调速只适用于转矩随转速下降而下降的风机类负载及调速范围不大的场合。

对于调速范围较大的恒转矩负载，要维持调速过程中电动机产生的最大电磁转矩不变，可在频率 f_1 降低时，人为地提高定子电压 U_1 以补偿定子压降，这样才能维持调速过程中 Φ_m 和电动机产生的电磁转矩不变。这种调速方式称为恒转矩变频调速。

在基频以上即 f_1 从额定值 f_{1N} 往上增高时，定子电压 U_1 的增高不能超过其额定值 U_{1N} 。当频率 f_1 增高而 $U_1 = U_{1N}$ 不变时， Φ_m 将成反比下降，从而导致电动机最大电磁转矩随转速升高而下降，这相当于直流电动机弱磁升速的情况。可见，基频以上调速时，电动机的输出功率近似保持不变。这种调速方式称为恒功率变频调速。

为了得到更好的性能，把基频以下和基频以上两种情况结合起来，如果电动机在不同转速下的电流都是额定电流，即电动机在允许的温升下长期运行，则电动机的电磁转矩基本上随磁通 Φ_m 变化而变化。

二、变频器的分类及特点

现有的交流电源都是恒压恒频的，要实现变频调速，需要一个能同时改变电压及频率的交流供电装置，即 Variable Voltage Variable Frequency 装置（简称 VVVF 装置）。

从结构上分，变频装置可分为直接变频器（交-交变频器）和间接变频器（交-直-交变频器）。这两类变频器从电源的性质上看，又可以分为电压源型变频器和电流源型变频器两大类。

交-直-交变频器的作用是将工频交流电（频率和电压幅值恒定）经过整流器整流成为直流电，直流电再经过逆变器转换成可变压变频的交流电。根据控制方式的不同，交-直-交变频器可分为三种形式：

(1) 可控整流器调压、逆变器调频的交-直-交变频器 这种变频器调压和

调频分别由互相协调配合的两个控制电路实现。

(2) 不控整流器整流、斩波器调压、逆变器调频的交-直-交变频器 这种变频器的整流环节由二极管构成，只整流不调压，斩波器用脉宽调压。

(3) 整流器整流、脉宽调制 (PWM)、逆变器调压调频的交-直-交器不控变频器 这种变频器用 PWM 逆变，输出谐波较小，而且输出波形非常接近正弦波。

交-直-交变频器适用于各种电力拖动系统、稳压稳频电源和不停电电源。

交-交变频器的作用是将工频交流电（频率和电压幅值恒定）经过交-交变频器直接转换成变压变频的交流电。反向并联的两组整流器按一定的周期分别导通，在负载上就得到交流输出电压 u_0 ，其频率由两组整流器的切换频率决定。而 u_0 的幅值由两组整流器的控制角 α 决定。如果控制角 α 一直不变，则输出平均电压是方波，如图 4-2 所示。如果要输出正弦波，则须在每一组整流器导通期间不断改变整流器的控制角 α 。用交-交变频器控制三相负载时，如果整流器采用桥式连接，则需要 36 个晶闸管；如果整流器采用零式接法，则需要 18 个晶闸管。因此，交-交变频器所需的元件较多，设备庞大。另外，交-交变频器受到脉动转矩及谐波电流的限制，最高输出频率一般不超过电网频率的 $1/3 \sim 2/3$ ，因此，交-交变频器一般只适用于水泥回转窑、轧钢机等低转速大转矩的调速系统。

电压源型交-直-交变频器和电流源型交-直-交变频器的主要区别在于中间直流环节所采用的滤波器。当电流源型交-直-交变频器的中间直流环节采用大电容

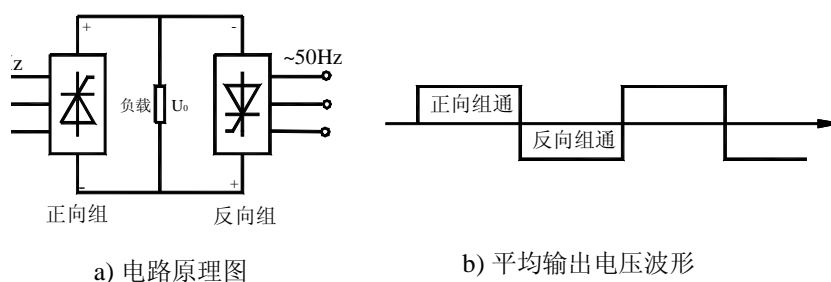


图2-11 交-交变频器单相电路

器滤波时，在理想情况下，电源的内阻抗为零，可以看成是恒压源，电源的直流电压波形比较平直，输出交流电压波形接近矩形波或阶梯波，这样的交-直-交变频器称为电压源型变频器，如图 2-11 a) 所示。当电流源型交-直-交变频器的中间直流环节采用大电感滤波时，电源具有很高的内阻抗，可以看成是恒流源，电源的直流电流波形比较平直，输出交流电流波形接近矩形波或阶梯波，这时的交-直-交变频器称为电流源型变频器，见图 2-12

交-直-交电压源型变频器和电流源型变频器的主要特点如表 2-4 所示。

表 2-4 交-直-交电压源型变频器和电流源型变频器的主要特点

变频器类型 比较项目	电压源型变频器	电流源型变频器
直流回路滤波环节 (无功功率缓冲环节)	电容器	电抗器
输出电压波形	矩形波	负载为异步电动机时 近似为正弦波
输出电流波形	由负载功率因数决定,谐波分量较大	矩形波
输出动态阻抗	较小	较大
回馈制动	电源侧需设置反向并联 逆变器	方便,主回路无需附加 设备
过流及短路保护	困难	容易
动态响应	较慢,采用 PWM 则快	快
对晶闸管的要求	关断时间要短,耐压要求 低	关断时间无特殊要求, 耐压要高
电路结构	较复杂	较简单
适用范围	多电动机拖动,稳压稳频 电源,不经常起、制动的场 合	单电动机拖动,可逆拖 动,经常起、制动的场 合

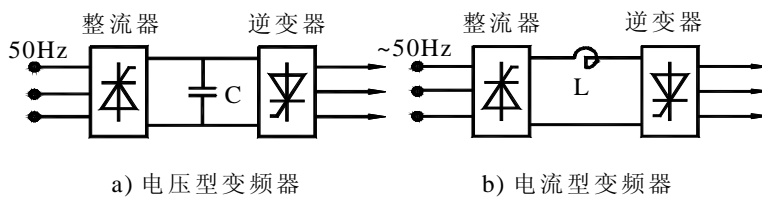


图2-13 电压源型与电流源型交-直-交变频器

一般的交-交变频器属于电压源型变频器。它没有滤波电容器，但供电电源具有低阻抗，因此具有电压源的性质。当交-交变频器采用电抗器将输出电流强制变成矩形波或阶梯波时，则属于电流源型变频器。

三、可控整流器调压、逆变器调频的交-直-交变频器

图2-14所示为三相可控整流器调压、逆变器调频的交-直-交变频器的主电路。电路中整流器和逆变器中的开关元件（晶闸管或GTO或GTR等）一般接成三相桥式电路。三相桥式逆变器有180°和120°导通型两种工作方式。在一个周期中，使各个开关元件轮流导通和关断，即可在负载两端得到三相交流电压，改变周期

的长短，即可改变输出电压的频率。

图 2-14 中的逆变器由六个开关元件 $V_1 \sim V_6$ 组成。

当逆变器采用 180° 的工作方式且电动机正转时，开关元件 $V_1 \sim V_6$ 的导通与关断顺序如图 4-4 所示。每个开关元件的控制导通脉冲依次间隔 60° 度电角度，每个开关元件导通 180° 电角度，然后关断 180° 电角度，同一桥臂上下两管之间互相换相。在图 4-4 中，除了 $-2\pi \sim -4\pi/3$ 区间和换相时刻外，任一时刻总共有三个开关元件同时导通，无论哪三个管子导通，从电动机的定子绕组上看，都是两相绕组并联后再与另一相绕组串联，然后接到直流电源上。

当逆变器采用 120° 的工作方式且电动机正转时，开关元件 $V_1 \sim V_6$ 的导通与关断顺序如图 4-4 所示。每个开关元件的控制导通脉冲依次间隔 60° 度电角度，每个开关元件导通 120° 度电角度，然后关断 240° 电角度。在图 4-4 中，除了 $-2\pi \sim -5\pi/3$ 区间和换相时刻外，任一时刻总共有两个开关元件同时导通，当电动机绕组接成 Y 形时，从电动机的定子绕组上看，都是两相绕组串联而另一相绕组悬空，然后接到直流电源上。

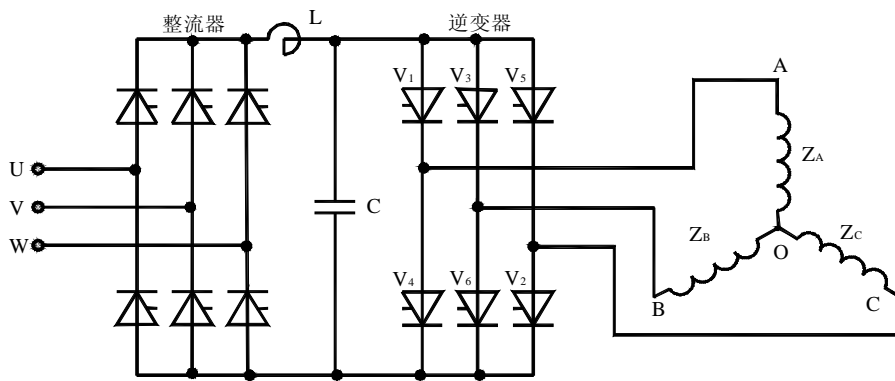


图2-14 三相交-直-交变频器主电路

只要控制开关元件导通脉冲出现的频率 f_0 ，即可改变逆变器输出交流电压的周期 T （周期 $T=6/f_0$ ），从而改变逆变器输出交流电压的频率 f （ $f=1/T$ ）。改变三相可控整流器的触发角 α ，可以改变整流电压 U_d 的大小，从而改变逆变器输出电压的大小。

交-直-交变频器输出的电压波形为脉冲宽度和幅值均相等的正负交替的矩形波，与正弦电压波差异大，直接施加于电动机时，电动机绕组中会产生额外的铜损耗，还会产生脉动转矩，并使电动机的效率降低 $5\% \sim 7\%$ ，功率因数降低约 8% ，电流增大 10% 左右。所以逆变器输出的交流电压的波形应尽量接近正弦波，以保证电动机正常工作。

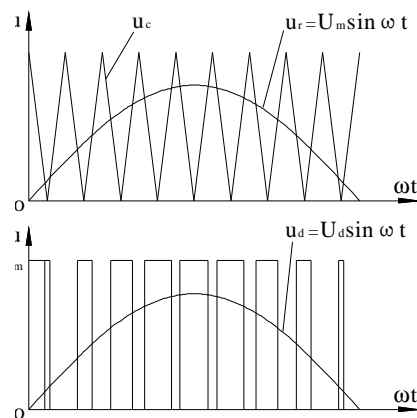


图2-15 正弦波脉宽调制波形

（四）脉宽调制（SPWM）变频器

为获得幅值相等且宽度正比于参考信号波幅值的一系列矩形脉冲，为此而进行的信号调制称为脉宽调制。与参考信

号波等效的一系列等幅不等宽的矩形脉冲波称为脉宽调制波。

1. 正弦波脉宽调制原理 用期望的输出正弦波作为调制波，对一等腰三角形波（称为载波或被调制波）进行调制，得到一组幅值相等，且宽度正比于正弦波幅值的矩形脉冲波。三角波的间隔宽度随其幅值的变化而线性变化。任何一条光滑曲线与三角波相交时，都可在每两个三角波间隔处得到幅值相等且脉冲宽度正比于该曲线函数值的矩形脉冲。根据这一原理，用一个等腰三角形的载波与所需频率的正弦波信号（幅值应小于三角波）相比较（见图 2-15），在两波相交处，便可得到一系列幅值相等且脉冲宽度按正弦规律变化的矩形脉冲，即两波交点处的正弦波幅值大时，位于该处的矩形脉冲宽度也大，反之则小；这样得到的矩形脉冲波的脉冲宽度和频率的大小均由正弦波信号来控制，当改变正弦波信号的电压幅值和频率时，矩形脉冲波的脉冲宽度和频率也随之改变；这样得到的矩形脉冲波与正弦波近似等效。

正弦波脉宽调制变频器就是利用这种正弦脉宽调制信号，来触发逆变器中具有高速开关性能的大功率晶体管 GTR 或者门极可关断晶闸管 GTO，使逆变器的输出端获得一系列与正弦波近似等效的矩形脉冲交流电压波。这种电压波的幅值由逆变器的输入直流电压决定；其脉冲宽度和频率则取决于脉宽调制信号的脉冲宽度和频率。因此，改变脉宽调制信号的脉冲宽度，就可以改变逆变器输出电压的大小（等于矩形脉冲电压波幅值与脉冲宽度的乘积）；改变脉宽调制信号的频率，就可以改变逆变器输出电压的频率。异步电动机采用这种脉冲电压波电源，可以克服上述普通变压变频调速系统的缺点。

MOV @Ri, direct ; (direct) → (Ri)

MOV @Ri, #data ; data → (Ri) 十六位数据传送指令 (1 条)

MOV DPTR, #data16 ; dataH → DPH, dataL → DPL 查表指令 (2 条)

MOVC A, @A+DPTR ; ((A) + (DPTR)) → A

MOVC A, @A+PC ; ((A) + (PC)) → A 累加器 A 与片外 RAM 的数据传送指令 (4 条)

MOVX A, @Ri ; ((Ri)) → A, 且使/RD=0

MOVX A, @DPTR ; ((DPTR)) → A, 且使/RD=0

MOVX @Ri, A ; (A) → (Ri), 且使/WR=0

MOVX @DPTR, A ; (A) → (DPTR), 且使/WR=0 堆栈操作指令 (2 条)

PUSH direct ; 先(SP)+1 → SP, 后 (direct) → (SP)

POP direct ; 先((SP)) → direct, 后(SP)-1 → SP 交换指令 (5 条)

XCH A, Rn ; (A) ↔ (Rn)

XCH A, direct ; (A) ↔ (direct)

XCH A, @Ri ; (A) ↔ ((Ri)) XCHD A, @Ri ; (A_{0~3}) ↔ ((Ri)_{0~3}) SWAP A ; (A_{0~3}) ↔ (A_{4~7})

二、算术运算指令

包括加、减、乘、除运算；第一操作数一般为 A；一般影响标志位 CY、AC、OV 和 P。共 24 条指令，分成七个小类。

1、不带进位加法指令 (4 条)

ADD A, Rn ; (A) + (Rn) → A

ADD A, direct ; (A) + (direct) → A

ADD A, @Ri ; (A) + ((Ri)) → A

ADD A, #data ; (A) + #data → A2、带进位加法指令 (4 条)

ADDC A, Rn ; (A) + (Rn) + CY → A

ADDC A, direct ; (A) + (direct) + CY → A

ADDC A, @Ri ; (A) + ((Ri)) + CY → A

ADDC A, #data ; (A) + #data + CY → A3、带借位减法指令 (4 条)

SUBB A, Rn ; (A) - CY - (Rn) → A

SUBB A, direct ; (A) - CY - (direct) → A

SUBB A, @Ri ; (A) - CY - ((Ri)) → A

SUBB A, #data ; (A) - CY - #data → A 乘除法指令 (2 条)

MUL AB ; (A) × (B) → B_{15~8}, A_{7~0}

DIV AB ; (A) / (B) 的商 → A, 余数 → B₅、加 1 指令 (5 条)

INC A ; (A) + 1 → A

INC Rn ; (Rn) + 1 → Rn

INC direct ; (direct) + 1 → direct

INC @Ri ; ((Ri)) +1 → (Ri)
 INC DPTR ; (DPTR) +1 → DPTR6、减 1 指令 (4 条)
 DEC A ; (A) -1 → A
 DEC Rn ; (Rn) -1 → Rn
 DEC direct ; (direct) -1 → direct
 DEC @Ri ; ((Ri)) -1 → (Ri)

7、十进制数调整指令 (1 条)

DA A ; 调整累加器内容为 BCD 码 (压缩的) 三、逻辑操作指令

包括与、或、异或、清除、求反、移位等操作。这类指令一般不影响标志位 CY、AC 和 OV。共 24 条指令，分成五个小类。

1、累加器 A 清 0 与取反指令 (2 条)

CLR A ; 0 → A
 CPL A ; (/A) → A, 相当于 0FFH - A → A 移位指令 (4 条)

累加器 A 循环左移 RL A ;

累加器 A 循环右移 RR A ;

累加器 A 带进位位循环左移 RLC A ;

累加器 A 带进位位循环右移 RRC A 逻辑“与”指令 (6 条)

ANL A, Rn ; (A) ∧ (Rn) → A

ANL A, direct ; (A) ∧ (direct) → A

ANL A, @Ri ; (A) ∧ ((Ri)) → A

ANL A, #data ; (A) ∧ #data → A

ANL direct, A ; (direct) ∧ (A) → direct

ANL direct, #data ; (direct) ∧ #data → direct 逻辑“或”指令 (6 条)

ORL A, Rn ; (A) ∨ (Rn) → A

ORL A, direct ; (A) ∨ (direct) → A

ORL A, @Ri ; (A) ∨ ((Ri)) → A

ORL A, #data ; (A) ∨ #data → A

ORL direct, A ; (direct) ∨ (A) → direct

ORL direct, #data ; (direct) ∨ #data → direct 逻辑“异或”指令 (6 条)

XRL A, Rn ; (A) ∨ (Rn) → A

XRL A, direct ; (A) ∨ (direct) → A

XRL A, @Ri ; (A) ∨ ((Ri)) → A

XRL A, #data ; (A) ∨ #data → A

XRL direct, A ; (direct) ∨ (A) → direct

XRL direct, #data ; (direct) ∨ #data → direct

四、控制程序转移类指令

包括无条件转移、条件转移、子程序调用和返回指令等，共 17 条。

只有比较转移指令影响标志。

1、无条件转移指令（4 条）

AJMP addr11 ; 先 (PC) +2→PC addr11→PC_{10~0}, (PC_{15~11}) 不变

LJMP addr16 ; addr16→PC

SJMP rel ; 先 (PC) +2→PC,后 (PC) +rel→PC

JMP @A+DPTR ; (A) + (DPTR) →PC 条件转移指令（8 条）

1) 累加器 A 为零（非零）转移指令

JZ rel ; 当 A=0 时, (PC) +rel→(PC) 转移;
; 当 A≠0 时, 顺序执行。JNZ rel ; 当 A≠0 时, (PC) +rel→(PC) 转移;
; 当 A=0 时, 顺序执行。

2) 比较转移指令 为新增设的, 4 条, 均为三字节指令。一般形式为:

CJNE (目的操作数), (源操作数), rel

CJNE A, direct, rel

; 若 A >(direct) , 则(PC)+rel→PC, 且 0→CY;

; 若 A <(direct) , 则(PC)+rel→PC, 且 1→CY;

; 若 A =(direct) , 则顺序执行, 且 0→CY。

CJNE A, #data, rel

; 若 A > #data , 则(PC)+rel→PC, 且 0→CY;

; 若 A < #data , 则(PC)+rel→PC, 且 1→CY;

; 若 A = #data , 则顺序执行, 且 0→CY。

CJNE Rn, #data, rel

; 若 (Rn) >#data , 则(PC)+rel→PC, 且 0→CY;

; 若 (Rn) < #data , 则(PC)+rel→PC, 且 1→CY;

; 若 (Rn) = #data , 则顺序执行, 且 0→CY。

CJNE @Ri, #data, rel

; 若((Ri)) >#data , 则(PC)+rel→PC, 且 0→CY;

; 若((Ri)) <#data , 则(PC)+rel→PC, 且 1→CY;

; 若((Ri)) =#data , 则顺序执行, 且 0→CY。

3) 循环转移指令

DJNZ Rn, rel ; (Rn) -1→Rn;

;若(Rn)≠0, 则(PC)+rel →PC ;

;若(Rn) = 0, 则结束循环, 顺序执行

DJNZ direct, rel ; (direct) -1→direct ;

;若(direct)≠0, 则(PC)+rel →PC ;

;若(direct) = 0, 则结束循环, 顺序执行

3、程序调用和返回指令（3条）

1) 短(绝对)调用指令

ACALL addr11 ; (PC) +2→PC
 ; (SP)+1→SP, (PC 0~7)→(SP)
 ; (SP)+1→SP, (PC 8~15)→(SP)
 ; addr0~10→PC0~10, (PC11~15 不变)

令

LCALL addr16 ; (PC) +3→PC
 ; (SP)+1→SP, (PC 0~7)→(SP)
 ; (SP)+1→SP, (PC 8~15)→(SP)
 ; addr0~15→PC

3) 返回指令

① 子程序返回指令 RET ; ((SP)) →PC 8~15 , (SP) -1→SP
 ; ((SP)) →PC 0~7 , (SP) -1→SP

② 中断服务程序返回指令 RETI ; ((SP)) →PC 8~15 , (SP) -1→SP
 ; ((SP)) →PC 0~7 , (SP) -1→SP
 ; 开放中断逻辑

包括位变量传送、逻辑运算、控制转移等指令，共 17 条，分成 4 个小类。
只有部分指令影响 CY 标志。位地址的表示方法

1、直接用位地址 如：D4H

2、用特殊功能寄存器名加位数 如：PSW.4

3、用位名称 如：RS1

4、用 bit 定义的有名字的位地址

如：SUB.REG bit RS1, FLAGRUN bit 02H

1) 位数据传送指令（2条）

MOV C, bit ; (bit) →C
MOV bit, C ; (bit) →C

① 位清 0 指令

CLR C ; 0 → C
CLR bit ; 0 → (bit)

② 位置 1 指令

SETB C ; 1 → C
SRTB bit ; 1 → (bit)

③ 位取反指令

CPL C ; (/C) →C
CPL bit ; (/bit) →bit

① 位逻辑“与”指令

ANL C, bit ; (C) ∧ (bit) → C
ANL C, /bit ; (C) ∧ (/bit) → C

② 位逻辑“或”指令

ORL C, bit ; (C) \vee (bit) \rightarrow C
ORL C, /bit ; (C) \vee (/bit) \rightarrow C

移类指令 (5 条)

① 判断 C 值转移指令

JC rel ; (PC) +2 \rightarrow PC
; (C) =1, 则 (PC) +rel \rightarrow PC
; (C) =0, 则顺序向下执行
JNC rel ; (PC) +2 \rightarrow PC
; (C) =0, 则 (PC) +rel \rightarrow PC
; (C) =1, 则顺序向下执行

② 判断位值转移指令

JB bit, rel ; (PC) +2 \rightarrow PC
; 若 (bit) =1, 则 (PC) +rel \rightarrow PC
; 若 (bit) =0, 则顺序向下执行
JNB bit, rel ; (PC) +2 \rightarrow PC
; 若 (bit) =0, 则 (PC) +rel \rightarrow PC
; 若 (bit) =1, 则顺序向下执行

③ 判断位值并清 0 转移指令

JBC bit, rel ; (PC) +2 \rightarrow PC
; 若 (bit) =1, 则 (PC) +rel \rightarrow PC,
0 \rightarrow bit
; 若 (bit) =0, 则顺序向下执行

六、汇编语言

汇编就是把汇编语言转变为机器语言;反汇编就是把机器语言转变为汇编语言。

第二节 输入/输出端口

一、8051 并行 I/O 端口

四个端口、双向、每个口包含一个锁存器、一个输出驱动器和二个输入缓冲器。

1、P0 口

P0 口可作通用 I/O 口使用,又可作地址/数据总线口;

P0 既可按字节寻址,又可按位寻址;

P0 作为输入口使用时:是准双向口;

作通用 I/O 口输出时：是开漏输出；

作地址/数据总线口时，P0 是一真正双向口，而作通用 I/O 口时，只是一个准双向口

2、P1 口

只能作 I/O 口用，且是一个准双向口。内部已有上拉电阻，不是开漏输出。

(1) 无地址/数据口功能

(2) 可按字节寻址，也可按位寻址

(3) 作 I/O 输入口时：是一准双向口，不是开漏输出。

3、P2 口

(1) 当 P2 口作为通用 I/O 时，是一准双向口。

(2) 从 P2 口输入数据时，先向锁存器写“1”。

(3) 可位寻址，也可按字节寻址

(4) 可输出地址高 8 位。

4、P3 口

(1) 作通用 I/O 时，“选择输出功能”应保持高电平，

(2) 工作于第二功能时，该位锁存器应置 1，

(3) 作输入口时，输出锁存器和选择输出功能端都应置 1

(4) 第二功能专用输入，取自输入通道第一缓冲器 (G1) 输出端，通用输入信号取自“读引脚”。

二、可编程并行 I/O 接口芯片 8255A

1、引脚功能

分三部分：

1) 总线接口部分

/CS —— 片选线

A1、A0 —— 端口选择线（选片内四个端口寄存器） 输入

/RD —— 读信号线

/WR —— 写信号线

2) 内部逻辑部分

PA

PC7 ~ PC4

PB

PC3 ~ PC0

A 组控制电路

B 组控制电路

控制 8255A 工作方式

二者合一成为端口控制寄存器。

3) 外设接口部分

可由编程决定三个端口的功能

	输入	输出	其它
A 口	8 位锁存 / 缓冲	8 位锁存	双向
B 口	8 位锁存 / 缓冲	8 位缓冲	
C 口	8 位锁存 / 缓冲	8 位缓冲	可分成两组分别作 A 口、B 口的选通联络线

2、8255A 的端口操作

A1	A0	选中
0	0	PA 口
0	1	PB 口
1	0	PC 口
1	1	控制寄存器

3、8255A 的工作方式及方式选择

(1) 8255A 的工作方式

1) 方式 0 —— 基本输入/输出方式

A 口、B 口、C 口均有此方式，无选通，是单片机与外部设备之间的直接数据通道。

2) 方式 1 —— 选通输入/输出方式

仅 PA 口、PB 口有此方式，PC 口中若干位作联络信号线

各联络信号线的意义：

/STB —— 输入选通信号，外设发来。

IBF —— 输入缓冲器满信号，发给外设（通知外设数据未被取走，暂不能接收新数据）

INTR —— 中断请求信号，外部设备发给单片机

INTE —— 中断允许信号

/OBF —— 输出缓冲器满信号，发给外设（单片机将数据已送到指定口，外部设备可以取走）

/ACK —— 外设响应信号，由外部设备发来（数据已送到外部设备）

3) 方式 3 —— 双向方式

仅 PA 口有此方式。PC3 ~ PC7 作联络线

此时，PB 口可以是方式 0；也可以是方式 1（PC0 ~ PC1 作联络线）。

(2) 8255A 的方式控制字

用编程方法向 8255A 的控制口写控制字，可决定它的工作方式。有两个控制字：

1) 方式选择控制字



“1”——方式控制标志位

D6、D5——决定 A 组的工作方式，0 0 —— 方式 0

0 1 —— 方式 1

1 × —— 方式 2

D4 —— A 口的传输方向，1 —— 入，0 —— 出。

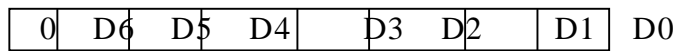
D3 —— PC7 ~ PC4 的传输方向，1 —— 入，0 —— 出。

D2 —— 决定 B 组的工作方式，0 —— 方式 0，1 —— 方式 1。

D1 —— B 口的传输方向，1 —— 入，0 —— 出。

D0 —— PC3 ~ PC0 传输方向，1 —— 入，0 —— 出。

2) PC 口置位/复位控制字



“0”—— 标志位。

D6、D5 —— 不使用位。

D3、D2、D1 —— 位选择位，000 ~ 111 分别对应 PC7 ~ PC0。

D0 —— 位状态位，1 —— 置位，0 —— 复位。

三、8051 和 8255A 的连接及应用

单片机	8255A
A0	A0
A1	A1
A15 ~ A2 中任一线	/CS
P0	D7 ~ D0
/RD	/RD
/WR	/WR
RST	

第四章 机械 CAD/CAM 技术

经过四十多年的发展，CAD/CAM 技术有了长足的进步。现在 CAD/CAM 主要运行在 workstation 或微机平台上。

微机平台的 CAD/CAM 软件的特点是：

1、采用 Windows 环境

采用 WindowsNT 操作系统是新一代推出的微机 CAD/CAM 软件的共同特点。现在，个人计算机已经具备了与中低档 workstation 竞争的實力，再加上其价格低廉，使得普及 CAD 应用成为可能。Windows 平台上的新一代 CAD/CAM 软件基本上都采用典型的 Windows 界面和操作规范，同时由于 DDE 和 OLE 技术的广泛应用，这些 CAD/CAM 软件可以与 Windows 平台的其他软件进行动态数据交换，也可以在不退出 CAD/CAM 软件的前提下嵌入（或链接）其他应用程序的对象。

2、采用 COM 技术

COM(ComponentObjectModel)是国际上为提高软件稳定性和开发效率而引入的重要技术。现今推出的 Windows 平台的 CAD/CAM 软件都或多或少地应用了 COM 技术。通过使用现成的组件，软件开发商可以避免软件开发中许多烦琐和困难的基础部分，从而可以从极高的起点出发，大大缩短 CAD 软件上市周期，这样容易取得竞争优势。

同时，由于采用面向对象技术，使得微机 CAD 软件的可维护性和可扩展性得以增强。

4、吸收 Unix 平台软件的优点

新一代微机平台 CAD 软件充分吸取 Unix workstation 软件的精华。诸如参数驱动、特征造型、动态导航、二维与三维双向相关、STEP 标准和动态图形显示等这些比较好的特点已经被微机平台软件全部吸收。

第一节 计算机图形变换原理

图形变换一般是指对图形的几何信息经过几何变换后产生的新的图形。图形

变换即可看作坐标系不动而图形变动，变动后的图形在坐标系中的坐标值发生变化；也可看作图形不动而坐标系变动，变动后，该图形在新的坐标系下具有的新的坐标值。而这两种情况的本质是一样的。图形变换是 CAD 中一个重要组成部分，了解变换的原理可以我们对 CAD/CAM 系统中图形数据的存储形式有更深入的认识。对于线框图的变换，通常以点变换作为基础，把图形的一系列顶点作几何变换后，连接新的顶点系列即可得到新的图形。对于参数方程描述的图形，可以看作通过参数方程作几何变换，实现对图形的变换。一般限于图形拓扑关系不变的几何变换，若引进不同的几何变换算子，即可实现改变图形拓扑关系的几何变换，由此可产生许多形状各异、更复杂的图形。由于图形采用了齐次坐标表示，可以方便地用变换矩阵实现对图形的变换。假设二维图形的点变换以前坐标为 $[x \ y \ 1]$ ，变换后为 $[x^* \ y^* \ 1]$ ；三维图形的点变换以前坐标为 $[x \ y \ z \ 1]$ ，变换后为 $[x^* \ y^* \ z^* \ 1]$ 。

二维图形的几何变换

1、二维变换矩阵

$$\text{二维图形几何变换矩阵可表示为： } T_{2D} = \begin{bmatrix} a & d & g \\ b & e & h \\ c & f & i \end{bmatrix}$$

从变换功能上可把 T_{2D} 分为四个子矩阵，其中 $[c \ f]$ 是对图形进行平移变换； $\begin{bmatrix} a & d \\ b & e \end{bmatrix}$ 是对图形进行缩放、旋转、对称、错切等变换； $\begin{bmatrix} g \\ h \end{bmatrix}$ 是对图形作投影变换， $[g]$ 的作用是在 x 轴的 $1/g$ 处产生一个灭点， h 的作用是在 y 轴的 $1/h$ 处产生一个灭点； $[i]$ 是对整体图形做伸缩变换。

T_{2D} 为单位矩阵时既定义二维空间的直角坐标系，此时 T_{2D} 可看作是三个行向量，其中， $[1 \ 0 \ 0]$ 表示 x 轴上的无穷远点， $[0 \ 1 \ 0]$ 表示 y 轴上的无穷远点， $[0 \ 0 \ 1]$ 表示坐标原点。

1) 平移变换

$$[x^* \ y^* \ 1] = [x \ y \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & 1 \end{bmatrix} = [x+T_x \ y+T_y \ 1]$$

2) 比例变换

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cdot s_x & y \cdot s_y & 1 \end{bmatrix}$$

- ① 当 $s_x = s_y = 1$ 时, 为恒等变换, 即图形不变;
- ② 当 $s_x = s_y > 1$ 时, 图形沿两个坐标轴方向等比例放大;
- ③ 当 $s_x = s_y < 1$ 时, 图形沿两个坐标轴方向等比例缩小;
- ④ 当 $s_x \neq s_y$ 时, 图形沿两个坐标轴方向作非均匀的比例变换。

3) 对称变换

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a & d & 0 \\ b & e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax+by & dx+ey & 1 \end{bmatrix}$$

- ① 当 $b = d = 0, a = -1, e = 1$ 时, 有 $x^* = -x, y^* = y$, 产生对称于 y 轴的反射变换;
- ② 当 $b = d = 0, a = 1, e = -1$ 时, 有 $x^* = x, y^* = -y$, 产生对称于 x 轴的反射变换;
- ③ 当 $b = d = 0, a = e = -1$ 时, 有 $x^* = -x, y^* = -y$, 产生对称于原点的反射变换;
- ④ 当 $b = d = 1, a = e = 0$ 时, 有 $x^* = y, y^* = x$, 产生对称于直线 $y=x$ 的反射变换;
- ⑤ 当 $b = d = -1, a = e = 0$ 时, 有 $x^* = -y, y^* = -x$, 产生对称于直线 $y=-x$ 的反射变换。

4) 旋转变换

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos q & \sin q & 0 \\ -\sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} x \cdot \cos q - y \cdot \sin q & x \cdot \sin q + y \cdot \cos q & 1 \end{bmatrix}$$

在 XOY 平面上的二维图形绕原点顺时针旋转 θ 角, 则变换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \cos q & \sin q & 0 \\ -\sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5) 错切变换

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d & 0 \\ b & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x+by & dx+y & 1 \end{bmatrix}$$

① 当 $d=0$ 时，有 $x^* = x+by, y^* = y$ ，此时，图形的 y 坐标不变， x 坐标随初值 (x,y) 及变换系数 b 作线性变化；如 $b>0$ ，图形沿 $+x$ 方向作错切位移；如 $b<0$ ，图形沿 $-x$ 方向作错切位移；

② 当 $b=0$ 时，有 $x^* = x, y^* = dx+y$ ，此时，图形的 x 坐标不变， y 坐标随初值 (x,y) 及变换系数 d 作线性变化；如 $d>0$ ，图形沿 $+y$ 方向作错切位移；如 $d<0$ ，图形沿 $-y$ 方向作错切位移；

③ 当 $b \neq 0, d \neq 0$ 时，有 $x^* = x+by, y^* = dx+y$ ，图形沿两个方向作错切位移。

6) 复合变换

① 复合平移

$$\begin{aligned} T_t &= T_{t1} \cdot T_{t2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_{x1} & T_{y1} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_{x2} & T_{y2} & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_{x1}+T_{x2} & T_{y1}+T_{y2} & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

② (相对于原点) 复合比例

$$T_s = T_{s1} \cdot T_{s2} = \begin{bmatrix} s_{x1} & 0 & 0 \\ 0 & s_{y1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & s_{y2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{x1} \cdot s_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & s_{y1} \cdot s_{y2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

③ (相对于原点) 复合旋转

$$T_r = T_{r1} \cdot T_{r2} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & \sin q_1 & 0 \\ -\sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos q_1 & \sin q_1 & 0 \\ -\sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & \sin(q_1 + q_2) & 0 \\ -\sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

比例、旋转变换是与参考点有关的，②、③分别为相对于坐标原点的比例、旋转变换。如果相对于某一个参考点 (x_f, y_f) 作比例、旋转变换，变换过程可分为以下三步：

- (1) 把坐标系原点平移至参考点 F；
- (2) 在新的坐标系下相对原点作比例、旋转变换；
- (3) 将坐标系再平移回原点。

其变换过程是先把坐标系原点平移到 (x_f, y_f) ，在新的坐标系下作比例、旋转变换，再将坐标原点平移回去。

- (4) 相对 (x_f, y_f) 点的比例变换

$$T_{sf} = T_{sf}^{-1} \cdot T_s \cdot T_{sf} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_f & -y_f & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x_f & y_f & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ (1-s_x) \cdot x_f & (1-s_y) \cdot y_f & 1 \end{bmatrix}$$

- (5) 相对 (x_f, y_f) 点的旋转变换

$$T_{rf} = T_{rf}^{-1} \cdot T_r \cdot T_{rf} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_f & -y_f & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos q & \sin q & 0 \\ -\sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x_f & y_f & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q & \sin q & 0 \\ -\sin q & \cos q & 0 \\ (1-\cos q) \cdot x_f + y_f \cdot \sin q & (1-\cos q) \cdot y_f - x_f \cdot \sin q & 1 \end{bmatrix}$$

- (6) 几点说明：

① 平移变换只改变图形的位置，不改变图形的大小和形状。

②旋转变换仍保持图形各部分间的线性关系和角度关系，变换后直线的长度不变。

③比例变换可改变图形的大小和形状。

④错切变换引起图形角度关系的改变，甚至导致图形发生畸变。

⑤拓扑不变的几何变换不改变图形的连接关系和平行关系。

2. 三维图形的几何变换

三维图形的几何变换可 T_{3D} 用表示，其表示形式如下：

$$T_{3D} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

从变换功能上可把 T_{3D} 分为四个子矩阵，其中 $[a_{41} \ a_{42} \ a_{43}]$ 是对图形进行平移变换；

$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ 是对图形进行比例、旋转、错切等变换； $\begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{bmatrix}$ 是对图形作投影变换，

$[a_{44}]$ 的作用是对整体图形做伸缩变换。

1) 平移变换

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & z^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x+T_x & y+T_y & z+T_z & 1 \end{bmatrix}$$

2) 比例变换

若比例变换的参考点为 (x_f, y_f, z_f) ，其变换矩阵为：

$$\begin{aligned} T_{sf} &= T_{sf}^{-1} \cdot T_s \cdot T_{sf} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ -x_f & -y_f & -z_f & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_x & & & \\ & s_y & & \\ & & s_z & \\ & & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ x_f & y_f & z_f & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ (1-s_x) \cdot x_f & (1-s_y) \cdot y_f & (1-s_z) \cdot z_f & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3) 绕坐标轴的旋转变换

在右手坐标系下相对坐标系原点绕坐标轴旋转 θ 角的变换公式为：

(1) 绕 x 轴旋转 θ 角

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & z^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q & \sin q & 0 \\ 0 & -\sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 绕 y 轴旋转 θ 角

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & z^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q & 0 & -\sin q & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q & 0 & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 绕 z 轴旋转 θ 角

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & z^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q & \sin q & 0 & 0 \\ -\sin q & \cos q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4) 绕任意轴的旋转变换

设旋转轴 AB 由空间任意一点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 及其方向数 (a, b, c) 定义，空间一点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 绕 AB 旋转 θ 角到 $P^*(x_p^*, y_p^*, z_p^*)$ ，要使

$$\begin{bmatrix} x^* & y^* & z^* & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \cdot R_{ab}$$

其中 R_{ab} 为待求的变换矩阵。

求 R_{ab} 的基本思路是：以 $A(x_a, y_a, z_a)$ 为新的坐标原点，并使 AB 分别绕 X 轴、Y 轴旋转适当角度与 Z 轴重合，再将 $P(x_p, y_p, z_p)$ 点绕 Z 轴旋转 θ 角，然后作上述变换的逆变换，使坐标系回到原来的位置。

在机械 CAD/CAM 中，曲线和曲面的研究是一个重要内容，要加工出符合设计要求的机械零件，则必须对其曲线、曲面进行分析，确定其表述形式。插值算法是其中的一种分析算法。拉格朗日插值中的两点一次(线性)插值多项式和三点

二插式

$$L_2(x) = \frac{(x-x_1) \cdot (x-x_2)}{(x_0-x_1) \cdot (x_0-x_2)} y_0 + \frac{(x-x_0) \cdot (x-x_2)}{(x_1-x_0) \cdot (x_1-x_2)} y_1 + \frac{(x-x_0) \cdot (x-x_1)}{(x_2-x_0) \cdot (x_2-x_1)} y_2$$

次(抛物)值多项式原理如下式所示。

第二节 机械零件的三维 CAD 造型

商品化 CAD/CAM 软件中（UG 软件）实体模型的构造常常采用在计算机内存储一些基本体素（如长方体、圆柱体、球体、锥体、圆环体以及扫描体等），通过集合运算（布尔运算）生成复杂形体。

1、布尔运算的基本概念

如果一个实体是由两个或两个以上较简单的体素（Primitive）经过集合运算得到的那么这个实体的表示就是布尔模型(Boolean Model)。这种集合运算叫布尔运算，可以简单理解为布尔运算是在一物体上增加或减少一部分。如果 A、B 为两个实体， $C=A\langle OP\rangle B$ ，这里 $\langle OP\rangle$ 代表任一正则化布尔算子，那么 C 就是布尔模型。A、B、C 三者必须有相同的空间维数。为了简明起见，假定所有布尔运算都是正则化的，从而省略“正则的”一词。符号 $\langle OP\rangle$ 代表正则算子（布尔算子），它可以是 \cup （并）、 \cap （交）和 $-$ （差）等。布尔模型的一个重要特点是：布尔模型是一个过程模型（Procedural Model）。

假定从 A、B、C 三个实体的顶点坐标得知它们的大小、位置和方位，D 的布尔模型是 $D=(A\cup B)-C$ 。定义 D 的布尔语句没有定量地说明新产生的实体，仅仅规定体素的结合方式。也未说明新体素的顶点坐标，或有关新棱边和面的任何信息，可能知道的就是关于 A、B、C 三个体素的几何和拓扑信息，以及新实体 D 的构造方法。因此，布尔模型是过程模型，也可称作非求值模型。如果希望知道更多关于新实体的信息，则必须对布尔模型进行求值计算，例如，计算交线和交点、拓扑关系分类、分析运算得到的新元素的连通性，以确定该模型的拓扑特点，从而决定新的棱边和新的顶点。体素的结构表示就是将布尔算子直接转换成二叉树结构表示，在上述模型的二叉树中，其中，叶结点上为体素，每个内部结点及根结点上为布尔算子。

体素是如何构造的呢？在许多系统中，体素作为图模型存储。同时，这些体素模型的二叉树上的叶结点是可以缩放和定位的单元形体和参数化形体。体素也可以是有向曲面或半空间的布尔组合。有向曲面是指那种由其面上任何一点的法

向决定体素内部和外部的曲面。一个无界面将笛卡尔空间划分为两个无界区，每个无界区被称作半空间。一组特一的半空间通过布尔交可以形成一个三维实体。日本北海道大学开发 TIPS 造型系统就是通过布尔组合，由半空间定义的有向面来构造整个模型，每一个有向面均由 $f(x,y,z)=0$ 形式的方程给出。在有向面上其函数值为零，在实体内部函数值为正。这样，就可以把一个复杂的实体这义为有向面交的并集。其它系统，如著名 GMSolid 系统、PADL 系统（Rochester 大学研制）和 ROMULUS 系统（Evans and Sutherland 公司研制）都是用有界体素运算，在二叉树任一个结点上，两个有效实体相组合产生第三个有效实体。在这些系统中，即使相当复杂的布尔模型也能很快产生，布尔模型有非常简单、紧凑的数据结构。

2、布尔运算的基本步骤

设 A 和 B 是两个分别用边界表示 B-rep 法，描述的多面体，布尔运算 $C=A \langle OP \rangle B$ 的运算过程一般分为下面几个步骤逐渐完成。

（1）确定布尔运算两物体之间的关系

物体边界表示 B-rep 结构中的面、边、点之间的基本分类关系分别是“点在面上”、“点在边上”、“两点重合”、“边在面上”、“两边共线”、“两个多边形共面”等六种关系。先用数值计算确定“点在面上”的关系，其余五种磁系可以根据“点在面上”关系推导出来。当这些关系发生冲突时，就用揄的方法解决冲突。

（2）进行边、体分类

对 A 物体上的每一条边，确一对 B 物体的分类关系（ A 在 B 物体内、外、上面、相交等）；同样对 B 物体上的每一条边，确定对 A 物体的分类关系。

（3）计算多边形的交线

对于 A 物体上的多边形 PA 和 B 物体上的多边形 PB ，计算它们的交线。在布尔模型的边界求值计算方面，求交计算是关键一环。

（4）构造新物体 C 表面上的边

对于 A 物体上和 B 物体上的每一个多边形 PA 、 PB ，根据布尔运算的算子收集多边形 PA 的边与另一多面体表面多边形 PB 的交线以生成新物体 C 表面的边，如果多边形 PA 上有边被收集到新物体 C 的表面，则 PA 所在的平面半成为新物体 C 表面上的一个平面，多边形 PA 的一部分或全部则成为新物体 C 的一个或多个多边形。如果定义了两个物体 A 和 B 的完整边界，那么物体 C 的完整边界就是 A 和 B 边界各部分的总和。

(5) 构造多边形的面

对新物体 C 上的每一个面，将其边排序构成多边形面环。

(6) 合法性检查

检查体 C 的 B-rep 表示的合法性。

在设计零件时，设计过程是一个从粗到精不断细化的过程。在 UG 中零件的初始设计主要有两种：一种是直接生成一个三维实体，另一种方法是先设计二维草图或曲线轮廓，然后生成三维物体。在中间设计过程中，两种方法可以同时使用，而且很方便。

第三节 CAD/CAM 的综合设计

图形交互式数控自动编程是通过专用的计算机软件来实现的，是目前所普遍采用的数控编程方法。图形交互式自动编程系统就是应用计算机图形交互技术开发出来的数控加工程序自动编程系统，使用者利用计算机键盘、鼠标等输入设备以及屏幕显示设备通过交互操作，建立、编辑零件轮廓的几何模型，选择加工工艺策略，生成刀具运动轨迹，利用屏幕动态模拟显示数控加工过程，最后生成数控加工程序。现代图形交互式自动编程是建立 CAD 和 CAM 系统的基础上的，典型的图形交互式自动编程系统都采用 CAD/CAM 集成数控编程系统模式。



图 4-1 数控加工工作过程

一、数控编程的基本步骤

利用 UG 软件数控编程系统模式的强大功能在计算机上直接面向零件的几何图形以光标指点、菜单选择及交互对话的方式进行编程，其编程结果也以图形的方式显示在计算机上。其编程的基本原理及基本步骤大体上是一致的，归纳起来可分为五大步骤：

1、三维造型：就是利用三维造型 CAD 软件或 CAM 软件的三维造型、编辑修改、曲线曲面造型功能把要加工的工件的三维几何模型构造出来，并将零件被加工部位的几何图形准确地绘制在计算机屏幕上。与此同时，在计算机内自动形成零件三维几何模型数据库。它相当于 APT 语言编程中，用几何定义语句定义

零件的几何图形的过程，其不同点就在于它不是用语言，而是用计算机造型的方法将零件的图形数据输送到计算机中。这些三维几何模型数据是下一步刀具轨迹计算的依据。自动编程过程中，交互式图形编程软件将根据加工要求提取这些数据，进行分析判断和必要的数学处理，形成加工的刀具位置数据。

2、加工工艺决策：选择合理的加工方案以及工艺参数是准确、高效加工工件的前提条件。加工工艺决策内容包括定义毛坯尺寸、边界、刀具尺寸、刀具基准点、进给率、快进路径以及切削加工方式。首先按模型形状及尺寸大小设置毛坯的尺寸形状，然后定义边界和加工区域，选择合适的刀具类型及其参数，并设置刀具基准点。

3、刀位轨迹的计算机及生成：图形交互式自动编程的刀位轨迹的生成是面向屏幕上的零件模型交互进行的。首先在刀位轨迹生成菜单中选择所需的菜单项；然后根据屏幕提示，用光标选择相应的图形目标，指定相应的坐标点，输入所需的各种参数；交互式图形编程软件将自动从图形文件中提取编程所需的信息，进行分析判断，计算出节点数据，并将其转换成刀位数据，存入指定的刀位文件中或直接进行后置处理生成数控加工程序，同时在屏幕上显示出刀位轨迹图形。

4、后置处理：由于各种机床使用的控制系统不同，所用的数控指令文件的代码及格式也有所不同。为解决这个问题，交互式图形编程软件通常设置一个后置处理文件。在进行后置处理前，编程人员需对该文件进行编辑，按文件规定的格式定义数控指令文件所使用的代码、程序格式、圆整化方式等内容，在执行后置处理命令时将自行按设计文件定义的内容，生成所需要的数控指令文件。另外，由于某些软件采用固定的模块化结构，其功能模块和控制系统是一一对应的，后置处理过程已固化在模块中，所以在生成刀位轨迹的同时便自动进行后置处理生成数控指令文件，而无需再进行单独后置处理。

5、程序输出：图形交互式自动编程软件在计算机内自动生成刀位轨迹图形文件和数控程序文件，可采用打印机打印数控加工程序单，也可在绘图机上绘制出刀位轨迹图，使机床操作者更加直观地了解加工的走刀过程，还可使用计算机直接驱动的纸带穿孔机制作穿孔纸带，提供给有读带装置的机床控制系统使用，对于有标准通信接口的机床控制系统可以和计算机直接联机，由计算机将加工程序直接送给机床控制系统。（详细参考数控车床编程及加工实验）

自由形状建模的基本原则是：构造自由形状特征的边界曲线尽可能简单；一

般情况下，曲线阶数 ≤ 3 ；当需要曲率连续时，考虑使用5阶曲线；构造的自由形状特征的阶数 ≤ 3 ；尽可能避免使用高阶自由形状特征；曲率半径尽可能大，否则会造成加工困难和复杂形状；内圆角半径应略大于加工刀具的半径；避免构造非参数化特征；测量的数据点先生成曲线，再利用曲线构造自由形状特征（参数化特征）；根据不同部件的形状特点合理使用各种自由形状特征构造的方法；尽可能采用实体修剪，再挖空方法去建立薄壳零件；自由形状特征之间的圆角过度尽可能在实体上操作。

二、数控编程的分类：

1、手工编程

手工编程是指编制零件数控加工程序的各个步骤，即从零件图样分析、工艺处理、确定加工路线和工艺参数、几何计算、编写零件的数控加工程序单直至程序的检验，均由人工来完成。

2、APT语言自动编程

APT是一种自动编程工具（Automatically Programmed Tool）的简称，是一种对工件、刀具的几何形状及刀具相对于工件的运动等进行定义时所用的一种接近于英语的符号语言。把用APT语言书写的零件加工程序输入计算机，经计算机的APT语言编程系统编译产生刀位文件（CLDATA file），然后进行数控后置处理，生成数控系统能接受的零件数控加工程序的过程，称为APT语言自动编程。

3、CAD/CAM集成系统数控编程

CAD/CAM集成系统数控编程是以待加工零件CAD模型为基础的一种集加工工艺规划及数控编程为一体的自动编程方法。其中零件CAD模型的描述方法多种多样，适用于数控编程的主要有表面模型和实体模型，其中以表面模型在数控编程中应用较为广泛。

CAD/CAM集成系统数控编程的主要特点是零件的几何形状可在零件设计阶段采用CAD/CAM集成系统的几何设计模块在图形方式下进行定义、显示和修改，最终得到零件的几何模型。数控编程的一般过程包括刀具的定义或选择，刀具相对于零件表面的运动方式的定义，切削加工参数的确定，走刀轨迹的生成，加工过程的动态图形仿真显示、程序验证直到后置处理等，一般都是在屏幕菜单及命令驱动等图形交互方式下完成的，具有形象、直观和高效等优点。

第五章 机器人的结构分析

第一节 工业机器人的组成

工业机器人的组成一般可分为三大部分，即机械系统、控制系统和驱动系统。机械系统按控制系统的指令进行运动，动力由驱动系统提供。

机械系统又叫操作机（Manipulator），是工业机器人的执行机构。它由分成基座、腰部、臂部、腕部和手部。一般将操作机简化成由连杆、关节和末端执行件组成。连杆首尾相接，通过关节相联，构成一个开式连杆系的开端安装末端执行件。

控制系统一般由多 CPU 的单级计算机或两级计算机组成。按照所执行的功能，控制系统的计算机通常可分成两个部分：一部分是控制计算机，它在系统软件的支持下实现对应用软件的编译，相邻基点间的插补运算，各点的运动和动力学综合，对操作机和作业对象的信息采集处理，以及对整个系统的故障监测诊断和预报。另一部分是伺服控制器，它接受位移、速度及驱动的指令，实现对臂杆的加减速和闭环伺服控制。

操作机的驱动系统包括驱动器和传动机构，它们常和执行机构联成一体，驱动臂杆和载荷完成指定的运动。常用的驱动器有电机和液压、气动驱动装置等。

除上述三大部分外，现代机器人还应包括智能系统。它由感知和决策两部分组成。前者主要是传感器组，后者靠运行软件实现。

一、机器人机械设计和结构的特点

机器人机械设计的特点是由它的独特结构决定的。它和其他机器的设计相比，有许多不同之处。机器人独特的结构特点大致可以归纳为一下四点。

1、工业机器人操作机可以简化成各连杆首位相接、末端开放式的一个开式连杆系。

2、在组成操作机的开式连杆系中，每根连杆都具有独立的驱动器，因而属于主动连杆系。

3、连杆驱动扭矩的瞬态过程在时域中的变化是非常复杂的，且和执行件反馈信号有关。

4、连杆系的受力状态、刚度条件和动态性能都是随位姿的变化而变化的。

因此，一个好的机器人设计应当使其机械系统的抓重—自重比尽量大，结构的静态刚度尽可能好，并尽量提高系统的固有频率和改善系统的动态性能。

二、基本参数和特性

表示机器人特性的基本参数主要有工作空间、自由度、有效负载、运动精度、运动特性、动态特性和经济性指标等。

1、工作空间

工作空间是指机器人臂杆的特定部位在一定条件下所能到达空间的位置集合。由于工作空间的形状和大小反映了机器人工作能力的大小，因而它对机器人的应用是十分重要的。

2、运动自由度 (Degrees Of Freedom,DOF)

自由物体在空间有六个运动自由度，即三个移动自由度，三个转动自由度。连杆系的自由度可以用下式来表示，即

$$M = 6n - \sum m \cdot N_m$$

式中：M——连杆系的自由度数；

n——组成连杆系的连杆根数；

m——运动副引入的约束数；

N_m ——具有约束数为 m 的连杆根数。

机器人是一个开式连杆系，每个关节副只有一个自由度，所以通常机器人的自由度数就等于它的关节数。机器人具有的自由度数越多，它的功能就越强，应用的范围也就越宽广。目前工业生产中应用的机器人通常具有 4 个~6 个自由度。

3、有效负载 (Payload)

有效负载是指机器人操作机在工作时臂端可能搬运的物体重量或所承受的力或扭矩，它表示了操作机的负荷能力。

4、运动精度 (Accuracy)

机器人机械系统的精度涉及位置精度 (Position Accuracy)、重复位置精度 (Repeatability) 和系统分辨率 (Resolution)。

位置精度和重复位置精度决定了操作机臂端的最大位置误差，因而，它无论对于点位操作机器人或是连续路径运动机器人，都是十分重要的。

5、速度 (Speed)

速度和加速度是表明机器人运动特性的主要指标。

$$V_n = L / t_m, w_n = \phi / t_m$$
$$V_{ef} = L / t_{ef}, w_{ef} = \phi / t_{ef}$$

式中 L——实际移动距离；

ϕ ——实际转动角度；

t_m ——在移动距离 L 或转角 ϕ 时实际花费的时间，包括了加速、减速和以最大稳定速度运行的时间

t_e ——在行程终点等待振荡稳定的时间

机器人臂端移动的有效速度 V_{ef} 还可以用下面的经验公式来计算：

$$V_{ef} = \frac{k(L-L_0)^{0.5} \Delta^{0.25}}{W^{0.33}}$$

式中 k——由最大稳定速度 V_{max} 决定的系数；

L——行程 (m)；

L_0 ——0.02~0.08 (m)，它是机器人在加速和减速时间内经过的距离；

W ——可搬运的重量 (N)；

Δ ——定位误差 (mm)；

$L-L_0$ ——说明短距工作时有效速度比长距工作时要低。

6、动态特性

结构动态参数常用质量、惯性矩、刚度、阻尼系数、固有频率和振动模态来表征。

三、机器人机械结构的组成

由于应用场合的不同，机器人结构形式有多种多样，各组成部分的驱动方式，传动原理和机械结构也有各种不同的类型，通常根据机器人各部分的功能，其机械部分主要由下列各部分组成。

1、手部结构

机器人为了进行作业，在手腕上配置的操作机构，有时也称为手爪部分或末端操作器。如抓取工件的各种抓手、取料器、专用工具的夹持器等，还包括部分专用工具（如拧螺钉螺母机、喷枪、焊枪、切割头、测量头等）。

2、手腕结构

联接手部和手臂的部分。主要作用是改变手部的空间和将作业载荷传递到手臂。

3、手臂结构

联接机座和手腕部分。主要作用改变手部的空间位置，满足机器人的作业空间，将各种载荷传递到机座。

4、机座结构

机器人的基础部分。起支承作用，对固定式机器人，直接联接在地面基础上，对移动式机器人，则安装在移动机构上。

第二节 机器人的结构类型

对机器人的分类，可以从不同角度出发，有多种分法。按机器人的用途可分为：装配机器人、焊接机器人、搬运码垛机器人和通用机器人。按驱动方式可分为：气动式机器人、液压式机器人、电动式机器人等。还可以按照工作环境（如海洋机器人、壁面机器人、管道机器人等）、控制方法来进行分类。

一、常见的机器人结构类型

最常见的机器人结构类型主要有以下几种：

1、直角坐标型机器人

由三个互相垂直的直线移动关节分别作 x 向、y 向和 z 向移动关节组合而成。机器人手部在工作空间内的运动是由三个方向的直线运动复合而成，即位置的确定是直角坐标型式的机器人。

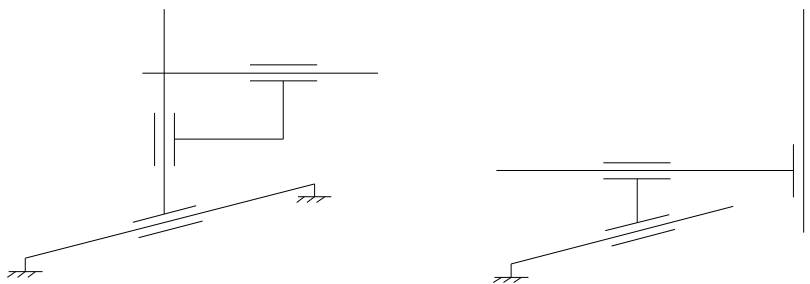


图 5-1 直角坐标型机器人机械结构

2、圆柱坐标型机器人

由一个升降直线运动关节（轴向），一个圆周旋运动关节（周向）和一个径向直线运动关节组合而成。手部在空间位置的确定主要是圆柱坐标型式的机器人。

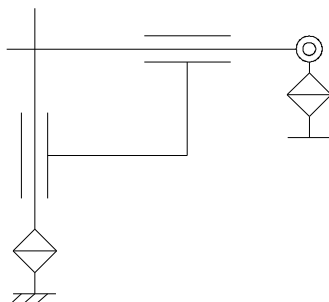


图 5-2 圆柱坐标型机器人机械结构

3、球坐标型机器人

由两个回转运动关节和一个直线运动关节分别作为方位旋转关节、俯仰旋转关节和径向直线运动关节组合而成。手部在空间位置的确定主要是球坐标型机型的机器人。

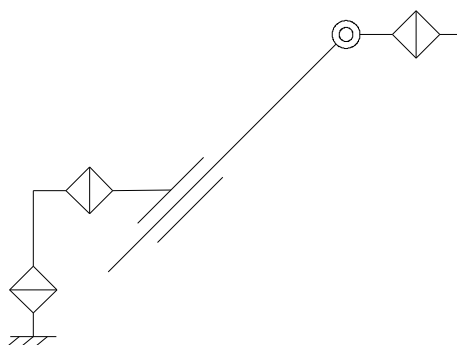


图 5-3 球坐标型机器人机械结构

4、水平多关节机器人

由两个回转轴线垂直于水平面的回转运动关节组成一个能在水平面上作平面运动的连杆机构，加上一个直线运动关节作垂直升降运动组合而成的多关节机器人。

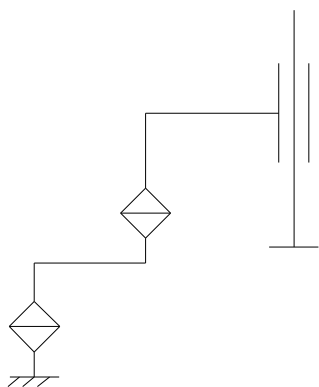


图 5-4 水平多关节机器人机械结构

5、垂直多关节机器人

由一个回转运动关节作方位运动，加上由两个回转轴线相互平行且平行于水平面的回转运动关节组成一个能在垂直平面上做平面运动的连杆机构，组合而成的多关节机器人。

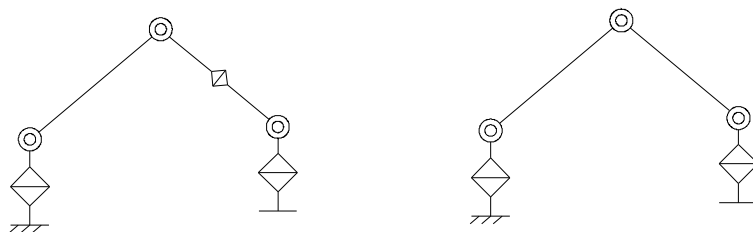


图 5-5 垂直多关节机器人机械结构

还有许多其他结构类型的机器人，上述五种是使用最广、最基本的结构类型。根据使用要求，同一种结构类型通过局部的演变，可形成不同的轴系配置方式。如直角坐标机器人有 $x-y$ 型、 $x-z$ 型、 $x-y-z$ 型、 $x-z-y$ 型等等。

二、位置与姿势

为了进行机器人的解析，首先需要对空间的位置与姿势加以定义。

位置就是从某某基准坐标系所看到的位置矢量 (x, y, z) 。进行机器人分析时，仅仅有位置矢量是不够的。人类抓持物体时，需要考虑对应不同物体时的抓持方向（从上面抓持还是从横向抓持等）。同样，对机器人来说，也必须明确指示机器人的手爪应从哪一个方向去抓持目标。一般来说，与位置一样，手爪的任意方向，也就是姿势可以用三要素 (α, β, γ) 的形式来表示。

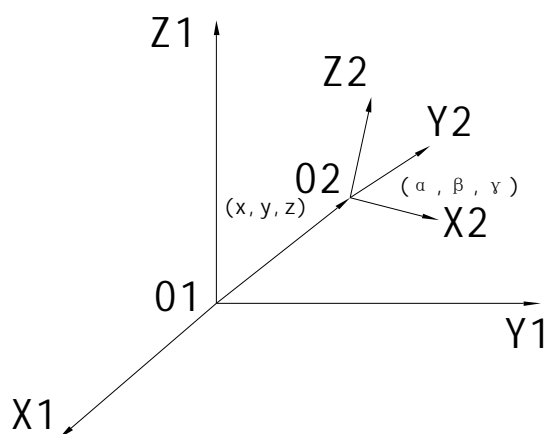


图 5-6 空间位置定义

图中所示为位置与姿势的概念。在基准坐标系 $O1-X1Y1Z1$ 中有个目标坐标系 $O2-X2Y2Z2$ 。用基准坐标系来表示目标坐标系时，若从基准坐标系的原点 $O1$ 指向目标坐标系的原点 $O2$ 的矢量为 (x, y, z) ，如果任意旋转 $O1-X1Y1Z1$ ，则用 (α, β, γ) 来表示姿势与用 $O2-X2Y2Z2$ 来表示姿势二者是一致的。

在机器人中，用位置矢量 (x, y, z) 加上表示姿势的三要素 (α, β, γ) 来表示位置和姿势。这是一个六维信息，为了与一般概念的“点”与“位置”加以区别，称之为 pose。

三、机器人的坐标系

表示机器人的位置与姿势时，需要定义一个作为基准的坐标系。为了表示机器人的动作，可以定义如下坐标系：

- 1，宇宙坐标系 这种坐标系与机器人无直接关系，可以以地面或作业平面为基准来设定坐标系。坐标原点和坐标轴由使用者决定。
- 2，基准坐标系 以机器人的基座地面为基准设定的坐标系，也称机器人坐标系。坐标原点由机器人的制造者决定。
- 3，机械界面坐标系 设定于作为手爪安装面的机械界面的坐标系，坐标原点为机械界面的中心点。
- 4，终端坐标系 设定于机器人手爪或手爪终端的坐标系。所谓手爪就是安装于机械界面的工具，因此也称为工具坐标系。

以上述坐标系为基础来表示机器人的位置和姿势。一般情况下，以宇宙坐标系作为基准坐标系来考虑终端坐标系的位置姿势。而多数情况下，宇宙坐标系与基础坐标系是同一坐标系。

四、正运动学与逆运动学

为了从几何上分析机器人的结构，可以用下图来表示。用这个图来进行各轴关节角度 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5,)$ 与机器人的末端（机械截面或手爪端）的位置姿势 (X, Y, Z, α, β) 之间关系的研究称为机器人运动学。从关节角度出发来求取末端的位置姿势称为正运动学；从末端姿势出发来求取关节角度称为逆运动学。

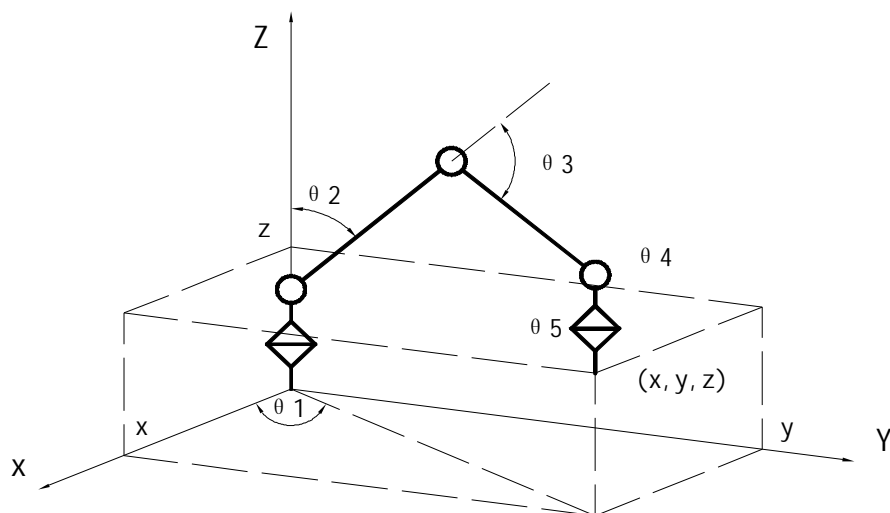


图 5-7 几何学中的机器人结构

五、水平多关节机器人的正运动学

图所示为 3 轴水平多关节机器人的结构图及关节角的定义。图中的坐标系为基础坐标系。机器人由沿水平方向的两各旋转轴和垂直方向的直线运动轴等三个轴构成。在水平方向的两个轴中，基础侧的为第一轴，末端侧的为第二轴，第一轴长度为 L_s ，第二轴长度为 L_e 。关节角度 θ_1 为从 X 轴到第一轴的水平夹角，关节角 θ_2 为从第一轴的延长线到第二轴的夹角，均取逆时针方向为关节角度的正方向，Z 轴为垂直方向的移动量，取机器人的基座底面为原点 O，向上的方向为正方向。根据图可以到处用关节角 (θ_1, θ_2, Z) 表示的求取末端位置的公式。

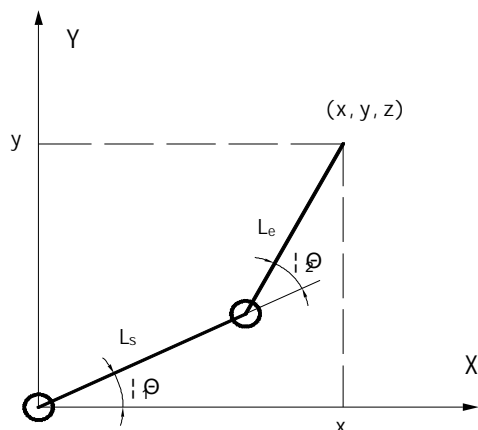


图 5-8 3 轴水平多关节机器人的结构图及关节角的定义

由图可以得到末端手爪位置 (x, y, z) 中的 (x, y) 可表示为：

$$x = L_s \cos q_1 + L_e \cos(q_1 + q_2)$$

$$y = L_s \sin q_1 + L_e \sin(q_1 + q_2)$$

由于 Z 轴为直线运动轴，因此可直接表示成：

$$z = Z$$

六、水平多关节机器人的逆运动学

下图所表示的是机器人的末端与关节角的关系。由图可知，对应末端位置 P，机器人的手臂形状有两种，一种是用实线表示的 OEP，另一种是用虚线表示的

OE'P。为了区别这两种形状，可以以人类的手臂作一下对比，则把 OEP 称为右手，把 OE'P 称为左手。这样一来，对于三轴水平多关节机器人，就可以导出用机器人末端位置 (x,y,z) 表示的求取关节角 (θ_1, θ_2, Z) 的公式。

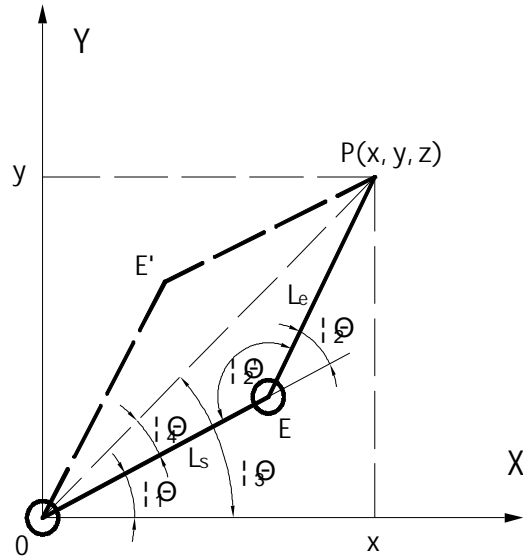


图 5-9 机器人的末端与关节角的关系

首先考虑的是关节角 θ_2 。在 $\triangle OEP$ 中， $\angle OEP = \theta_2' = \pi - \theta_2$ ，应用余弦定理，则：

$$2 OE EP \cos q_2' = OE^2 + EP^2 - OP^2$$

$$2 L_s L_e \cos q_2' = L_s^2 + L_e^2 - (x^2 + y^2)$$

所以

$$\cos q_2' = \frac{L_s^2 + L_e^2 - (x^2 + y^2)}{2L_s L_e}$$

$$q_2' = \cos^{-1} \frac{L_s^2 + L_e^2 - (x^2 + y^2)}{2L_s L_e}$$

$$q_2 = \pi - q_2'$$

这里还必须考虑前面所述的区别于右手和左手的两组解。由图可知，右手时 $\theta_2 \geq 0$ ，而左手 $\theta_2 < 0$ ，因此用上述式子求出的 θ_2 的取值范围为 $0 \leq \theta_2 < \pi$ ，而左手的 θ_2 应为负值。

关节角 θ_1 可作如下考虑，由图可知：

$$q_1 = q_3 - q_4$$

其中

$$q_3 = \tan^{-1}(y/x)$$

$$q_4 = \cos^{-1} \frac{L_s^2 + (x^2 + y^2) - L_e^2}{2L_s \sqrt{x^2 + y^2}}$$

由于 Z 轴为直动轴，因此仍有 $z = Z$ 。

第六章 机电一体化系统设计

第一节 概述

“机电一体化”是微电子技术向机械工业渗透过程中逐渐形成的一个新概念，是各相关技术有机结合的一种新形式。到目前为止，较为人们所接受的“机电一体化”的涵义是日本机械振兴协会经济研究所提出的解释：“机电一体化乃是在机械的主功能、动力功能、信息功能和控制功能上引进微电子技术，并将机械装置与电子装置用相关软件有机结合而构成系统的总称”。可以说“机电一体化”是机械技术、微电子技术相互交叉、融合（有机结合）的产物。它具有“技术”与“产品”两方面的内容，首先是机电一体化技术，主要包括技术原理使机电一体化产品（或系统）得以实现、使用和发展的技术；其次是机电一体化“产品”，该“产品”主要是机械系统（或部件）与微电子系统（或部件）相互置换或有机结合而构成的新“系统”，且赋予其新的功能和性能的新一代产品。

一、机电一体化系统的构成要素

机电一体化系统（产品）由机械系统（机构）、电子信息处理系统（计算机）、动力系统（动力源）、传感检测系统（传感器）、执行元件系统（如电动机）等五个子系统组成，如图 6-1 所示。通过传感器直接检测目标运动并进行反馈控制的系统为全闭环系统（如图 6-1a）。而通过传感器检测某一部位（如伺服电动机等）运动并进行反馈、间接控制目标运动的系统为半闭环系统（如图 6-1b）。

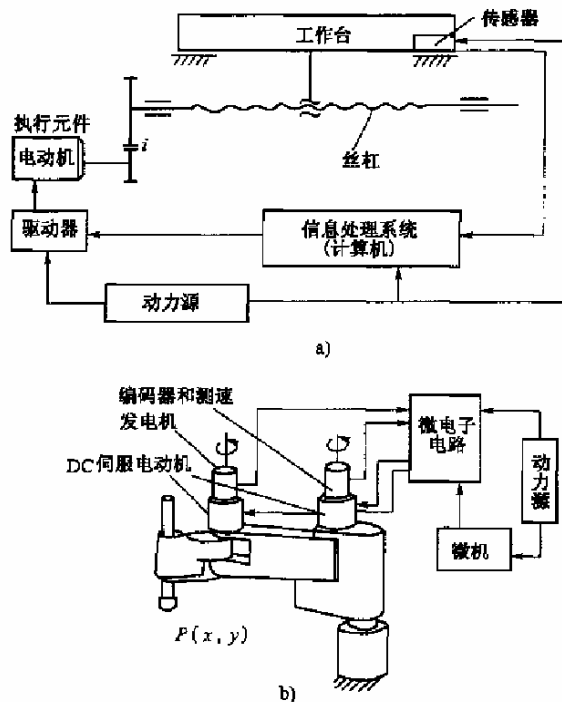


图 6-1 系统的产品构成

1、机械系统

包括机身、框架、机械传动和联接等机械部分

除对机械系统的一般要求外，其技术开发重点是模块化、标准化和系列化，便于机械系统的快速组合和更换

2、动力系统

为机电一体化产品提供能量和动力功能，去驱动执行机构工作以完成要求。

3、传感与检测系统信息处理及控制系统

体积小，便于安装与联接，检测精度高、抗干扰等。

4、信息处理及控制系统

信息处理速度快，输出可靠，系统的抗干扰能力强

5、执行机构

为机电一体化产品中最重要的组成部分。

第二节 机电一体化的稳态设计

机电一体化系统（产品）的设计过程是机电参数相互匹配、即机电有机结合的过程。机电伺服系统是典型的机电一体化系统。本章将以机电伺服系统为例，说明机电一体化系统设计的一般考虑方法。伺服系统中的位置伺服控制系统和速度伺服控制系统的共同点是通过系统执行元件直接或经过传动系统驱动受控对象，从而完成所需要的机械运动。因此，工程上是围绕机械运动的规律和运动参数对它们提出技术要求的。

在进行机电伺服系统设计时，首先要了解被控对象的特点和对系统的具体要求，通过调查研究制订出系统的设计方案。该方案通常只是一个初步的轮廓，包括系统主要元部件的种类、各部分之间的连接方式、系统的控制方式、所需能源形式、校正补偿方法，以及信号转换的方式等。

有了初步设计方案就要进行定量的分析计算，分析计算包括稳态设计计算和动态设计计算。稳态设计包括使系统的输出运动参数达到技术要求、执行元件（如电动机）的参数选择、功率（或转矩）的匹配及过载能力的验算、各主要元部件的选择与控制电路设计、信号的有效传递、各级增益的分配、各级之间阻抗的匹配和抗干扰措施等。并为后面动态设计中的校正补偿装置的引入留有余地。

通过稳态设计，系统的主回路各部分特性、参数已初步确定，便可着手建立系统的数学模型为系统的动态设计做好准备。动态设计主要是设计校正补偿装置，使系统满足动态技术指标要求；通常要进行计算机仿真，或借助计算机进行辅助设计。

通过上述理论设计计算，完成的还仅是一个较详细的设计方案，这种工程设计计算一般是近似的，只能作为工程实践的基础。系统的实际电路及实际参数，往往要通过样机的试验与调试，才能最后确定下来。这并不等于以上设计计算是多余的，因经过设计计算后确定的方案考虑了机电参数的有机结合与匹配，这对工程实践是必需的，有利于减少盲目性和加快样机的调试与电路参数的确定。

随着机电一体化技术的发展，机电一体化系统（产品）的自动化程度越来越高。为满足人们生活和生产安全、可靠地使用要求，在机电一体化有机结合分析与设计过程中，必须充分注意其可靠性、安全性设计要求。

一、负载分析

位置控制系统和速度控制系统的被控对象作机械运动时，该被控对象就是系统的负载，它与系统执行元件的机械传动联系有多种形式。机械运动是组成机电一体化系统的主要组成部分，它们的运动学、动力学特性与整个系统的性能关系极大。

1、典型负载

被控对象（简称负载）的运动形式有直线运动、回转运动、间歇运动等。具体的负载往往比较复杂，为便于分析，常将它分解为几种典型负载，结合系统的运动规律再将它们组合起来。使定量设计计算得以顺利进行。

所谓典型负载是指惯性负载、外力负载、弹性负载、摩擦负载（滑动摩擦负载、粘性摩擦负载、滚动摩擦负载等）。对具体系统而言，其负载可能是以上几种典型负载的组合，不一定均包含上述所有负载项目。在设计系统时，应对被控对象及其运动作具体分析，从而获得负载的综合定量数值，为选择与之匹配的执行元件及进行动态设计分析打下基础。

2、负载的等效换算

被控对象的运动，有的是直线运动，如机床的工作台 x 、 y 及 z 轴。机器人的臂部的升降、伸缩运动，绘图机的 x 、 y 方向运动；也有的是旋转运动，如机床主轴的回转、工作台的回转、机器人关节的回转运动等、执行元件与被往对象有直接联接的，也有通过传动装置联接的。执行元件的额定转矩（或力、功率）、加减速控制及制动方案的选择，应与被控对象的固有参数（如质量、转动惯量等）相互匹配。因此，要将被控对象相关部件的固有参数及其所受的负载（力或转矩等）等效换算到执行元件的输出轴上，即计算其输出轴承受的等效转动惯量和等效负载转矩（回转运动）或计算等效质量和等效力（直线运动）。下面以机床工作台的伺服进给系统为例加以说明。

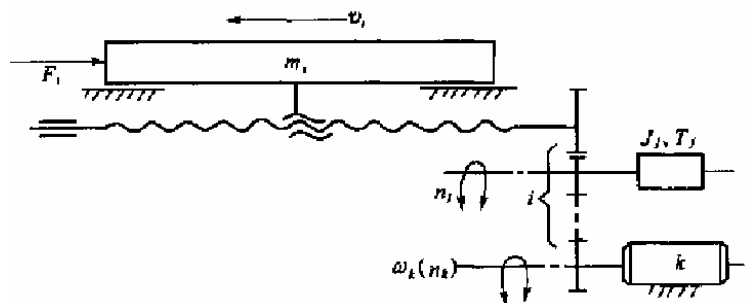


图 6-2 伺服进给系统示意

图 6-2 所示系统由 m 个移动部件和 n 个转动部件组成。 M_i 、 v_j 、 F_j 分别为移动部件的质量（kg）、运动速度（m/s）和所受的负载力（N）； J_i 、 n_i 、 T_i 分别为转动部件的转动惯量（ kgm^2 ）转速（ r/min ）和所受负载力矩（ $N.m$ ）

(1) 求等效转动惯量[J]

该系统运动部件的动能总和为： $E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m m_i \cdot v_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n J_j w_j^2$

设等效到执行元件输出轴上的总动能为： $E^k = \frac{1}{2} J^k w_k^2$

由于 $E = E^k$ ，故：

$$J^k = \sum_{i=1}^m m_i \left(\frac{v_i}{w_k} \right)^2 + \sum_{j=1}^n J_j \left(\frac{w_j}{w_k} \right)^2$$

用工程上常用单位时，可将上式改写为：

$$J^k = \frac{1}{4p^2} \sum_{i=1}^m m_i \left(\frac{v_i}{n_k} \right)^2 + \sum_{j=1}^n J_j \left(\frac{n_j}{n_k} \right)^2$$

式中： n_k ——执行元件的转速（r/min）

(2) 求等效负载转矩 T^k

设上述系统在时间 t 内克服负载所作功的总和为：

$$W = \sum_{i=1}^m F_i v_i t + \sum_{j=1}^n T_j w_j t$$

同理，执行元件输出轴在时间 t 内的转角为：

$$j_k = w_k t$$

则执行元件所作的功为：

$$W_k = T^k w_k t$$

由于 $W_k = W$

故：
$$T^k = \sum_{i=1}^m F_i \frac{v_i}{n_k} + \sum_{j=1}^n T_j \frac{w_j}{n_k}$$

二、执行元件的匹配选择

伺服系统是由若干元部件组成的，其中有些元部件已有系列化商品供选用。为降低机电一体化系统的成本、缩短设计与研制周期，应尽可能选用标准化元部件。拟定系统方案时，首先确定执行元件的类型，然后根据技术条件的要求进行综合分析。选择与被控对象及其负载相匹配的执行元件。下面以电动机的匹配选择为例简要说明执行元件的选择方法。

被控对象由电动机驱动，因此，电动机的转速、转矩和功率等参数应和被控对象的需要相匹配，如冗余量大、易使执行元件价格贵，使机电一体化系统的成本升高，市场竞争力下降；在使用时，冗余部分用户用不上，易造成浪费。如果选用的执行元件的参数数值偏低将达不到使用要求。所以，应选择与被控对象的需要相适应的执行元件。

例如，机床工作台的伺服进给运动轴所使用的执行元件（电动机）的额定转速 n (r/min) 基本上是所需最大转速，其额定转矩 T^k (N·m 或 N·cm) 应大于（考虑机械损失）所需要的最大转矩，即 T^k 应大于等效到电动机输出轴上的负载转矩与克服惯性负载所需要的转矩 $T_{\text{惯}} = J^k e_m$ 。（ e_m 为电动机升降速时的角加速度，

rad/s²)之和。

(1) 系统执行元件的转矩匹配

设伺服进给系统执行元件输出轴所承受的等效负载转矩(包括摩擦负载和工作负载)为 T^m 、等效惯性负载转矩为 $T_{惯}$ 。则电动机轴上的总负载转矩为

$$T_{\Sigma} = T^m + T_{惯}$$

考虑到机械的总传动效率 h 时, 则

$$T'_{\Sigma} = (T^m + T_{惯})/h$$

(2) 系统执行元件的功率匹配(直流、交流伺服电动机)

从上述可知, 在计算等效负载力矩和等效负载惯量时, 需要知道电动机的某些参数。在选择电动机时, 常先进行预选, 然后再进行必要的验算。预选电动机的估算功率 P (单位 W) 可由下式确定

$$P = \frac{(T^m + J^m e_m) n_{max} I}{9.55} = T_{\Sigma} w_{max} I$$

式中: n_{max} ——电动机的最高转速 (r/min);

w_{max} ——电动机的最高角加速度 (rad/s);

I ——考虑电动机、减速器等的功率系数。一般取 $I = 1.2 \sim 2$, 对于小功率伺服系统 I 可达 2.5

在预选电动机功率后, 应进行以下验算。

1) 过热验算。当负载转矩为变量时, 应用等效法求其等效转矩 T_{eq} , 在电动机励磁磁通 f 近似不变时

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}}$$

式中: t_1, t_2 ——时间间隔, 在此时间间隔内的负载转矩分别为 T_1, T_2, \dots 。则所选电动机的不过热的条件为

$$\begin{cases} T_N \geq T_{eq} \\ P_N \geq P_{eq} \end{cases}$$

式中: T_N ----- 电动机的额定转矩 (N.m);

P_N ----- 电动机的额定功率 (W);

P_{eq} ----- 由等效转矩 T_{eq} 换算的电动机功率 (W), $P_{eq} = (T_{eq} n_N)/9.55$, 其

中 n_N 为电动机的额定转速 (r/min)。

2) 过载验算。即应使最大负载转矩 $T_{\Sigma max}$ 与电动机的额定转矩 T_N 的比值不大于某一系数, 即

$$\frac{T_{\Sigma max}}{T_N} \leq k_m$$

式中： k_m ——电动机的过载系数，一般电动机产品目录中给出。

三、减速比的匹配选择与各级减速比的分配

减速比主要根据负载性质、脉冲当量和机电一体化系统的综合要求来选择确定，既要使减速比达到一定条件下最佳，同时又要满足脉冲当量与步距角之间的相应关系。还要同时满足最大转速要求等。当然要全都满足上述要求是非常困难的。

1、使加速度最大的选择方法

当输入信号变化快、加速度又很大时，应使

$$i = \frac{T_{LF}}{T_m} + \left[\left(\frac{T_{LF}}{T_m} \right)^2 + \frac{J_L}{J_m} \right]^{1/2}$$

2、最大输出速度选择方法。

当输入信号近似恒速，即加速度很小时，应使

$$i = \frac{T_{LF}}{T_m} + \left[\left(\frac{T_{LF}}{T_m} \right)^2 + \frac{f_2}{f_1} \right]^{1/2}$$

式中： f_1 ——电动机的粘性摩擦系数；

f_2 ——负载的粘性摩擦系数。

3、满足送进系统传动基本要求的选择方法。

即满足脉冲当量 d 、步距角 a 和丝杠基本导程 l_0 之间的匹配关系

$$i = \frac{al_0}{360d}$$

4、减速器输出轴转角误差最小原则。

$$\text{即 } \Delta j_{\max} = \sum_i^n \frac{\Delta j_k}{i_{(k-n)}} \text{ 最小}$$

5、对速度和加速度均有一定要求的选择方法。

当对系统的输出速度、加速度都有一定要求时，应按上述 1 条选择减速比 i ，然后验算是否满足 $iw_{L_{\max}} \leq w_m$ 式中 $iw_{L_{\max}}^*$ ($q_{L_{\max}}^*$) 的为负载的最大角速度。 $w(q_m^*)$ 为电动机输出的角速度。

根据设计要求通过综合分析，利用上述方法选择总转速比之后，就需要合理确定减速级数及分配各级的速比。

四、检测传感装置、信号转换接口电路、放大电路及电源等的匹配选择与设计

执行元件与机械传动系统确定之后需要根据所拟系统的初步方案，选择和设计系统的其余部分，把初步方案逐步具体化。各部分的设计计算，必须从系统总体要求出发，考虑相邻部分的广义接口、信号的有效传递（抗干扰措施）、输入/输出的阻抗匹配。总之，要使整个系统在各种运行条件下，达到各项设计要求。伺服系统的稳态设计就是要从两头入手，即首先从系统应具有的输出能力及要求出发，选定执行元件和传动装置；其次是从系统的精度要求出发，选择和设计检

测装置及信号的前向和后向通道；最后通过动态设计计算，设计适当的校正补偿装置，完善电源电路及其它辅助电路，从而达到机电一体化系统的设计要求。

检测传感装置的精度（即分辨力）、不灵敏区等要适应系统整体的精度要求，在系统的工作范围内，其输入/输出应具有固定的线性特性，信号的转换要迅速及时，信噪比要大，装置的转动惯量及摩擦阻力矩要尽可能小，性能要稳定可靠等。

信号转换接口电路应尽量选用商品化的集成电路，要有足够的输入/输出通道，不仅要考虑与传感器输出阻抗的匹配，还要考虑与放大器的输入阻抗符合匹配要求。

伺服系统放大器的设计与选择主要考虑以下几个问题：

1) 功率输出级必须与所用执行元件匹配，其输出电压，电流应满足执行元件的容量要求，不仅要满足执行元件额定值的需要，而且还应该能够保证执行元件短时过载、短时快速的要求。总之，输出级的输出阻抗要小，效率要高、时间常数要小。

2) 放大器应为执行元件（如电动机）的运行状态提供适宜条件。例如，为大功率电动机提供制动条件，为力矩电动机或永磁式直流电动机的电枢电流提供限制保护措施。

3) 放大器应有足够的线性范围，以保证执行元件的容量得以正常发挥。

4) 输入级应能与检测传感装置相匹配。即它的输入阻抗要大，以减轻检测传感装置的负荷。

5) 放大器应具有足够的放大倍数，其特性应稳定可靠便于调整。

伺服系统的能源（特别是电源）支持。在一个系统中，所需电源一般很难统一，特别是放大器的电源常常为适应各放大级的不同需要进行适应性设计。但是最关键的还是动力电源，它常常制约系统方案的形式。系统对电源的稳定度和对频率的稳定度都有一定要求，设计时要注意不要让干扰信号从电枢引入，所使用电源应具有足够的保护措施，如过电压保护、掉电保护、过电流保护、短路保护等。抗干扰措施有消波、隔离、屏蔽等。此外，要有为系统服务的自检电路、显示与操作装置。总之，系统设计牵涉的知识面较广，每一个环节均要给予充分的注意。

五、系统数学模型的建立及主谐振频率的计算

在稳态设计的基础上，利用所选元器件的有关参数，可以绘制出系统框图，并根据自动控制理论基础课程所学知识建立各环节的传递函数，进而建立系统传递函数。现以工作台闭环伺服进给系统为例，分析在不同控制方式下的传递函数的建立方法。

1-半闭环控制方式

图 6-3 为检测传感器装在丝杠端部的半闭环伺服控制系统。它的系统框图如图 6-4 所示。该图的传递函数为

$$G(s) = \frac{q_i(s)}{V_i(s)} = \frac{G_1 G_2 G_3 G_4}{1 + G_2 G_3 G_7 + G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{K_a K_A K_m / i_1}{s(1+T_m s) + K_A K_m K_v s + K_a K_A K_r K_m / (i_1 i_2)} \\
 &= \frac{K}{T_m s^2 + (1 + K_A K_m K_v) s + K K_r / i_2}
 \end{aligned}$$

式中： $K = K_a K_A K_m / i_1$

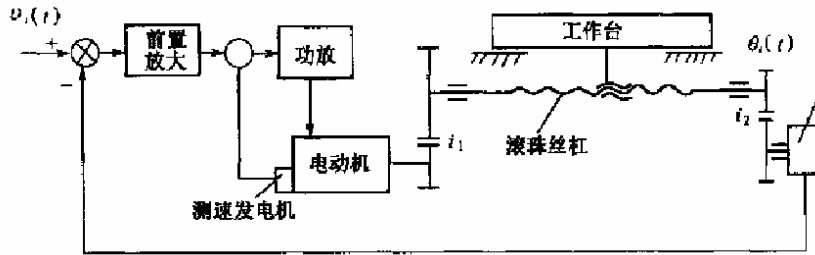


图 6-3 用滚珠丝杠传动工作台的伺服进给系统

2、全闭环控制方式

检测传感器安装在工作台动导轨上的直流伺服控制系统，如图 6-4 所示。其系统框图如图 6-5 所示。

图中， $G_j(s)$ 为机械传动系统传递函数； K_b 为位移传感器的传递函数，其余同图 2-5，则系统的传递函数为

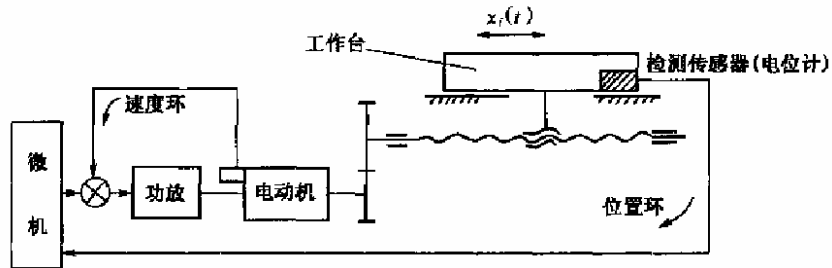


图 6-4 全闭环直流伺服控制系统组成

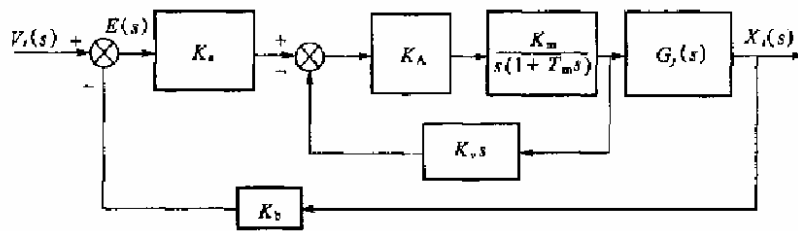


图 6-5 系统框图

机械传动系统的 $G_j(s)$ 传递函数的建立方法如下：

如图 6-5 所示，伺服进给传动系统由齿轮减速器、轴、丝杠副及直线运动工作台等组成。图中， $q_{mi}(t)$ 为伺服电动机输出轴转角（系统输入量）； $x_0(t)$ 为工作台位移（系统输出量）； i_1, i_2 为减速器的减速比； J_1, J_2, J_3 为轴 I、II、III 及其轴上齿轮的转动惯量， m 为工作台直线移动部件的总质量； B 为工作台直线运动的速度阻尼系数； l_0 为丝杠的基本导程（螺距）； K_1, K_2, K_3 为轴 I、II、III 的扭转刚度； K_4 为丝杠副及螺母座部分的轴向刚度； $T_{mi}(t)$ 为伺服电动机的输出转

矩。

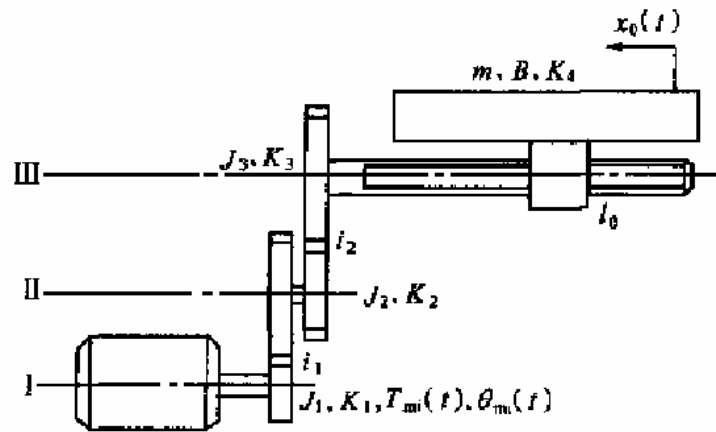


图 6-6 伺服进给机械传动系统示意

设 K_{III} 为 K_3 、 K_4 换算到轴 III 上的扭转刚度，则有

$$K_{III} = \frac{1}{\frac{1}{K_3} + \frac{1}{\frac{l_0 K_4}{2p}}} = \frac{l_0 K_3 K_4}{2p K_3 + l_0 K_4}$$

设 K 为等效到电动机轴上的总的扭转刚度，则有

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{\frac{K_2}{i_1^2}} + \frac{1}{K_{III} \left(\frac{1}{i_1^2 i_2^2}\right)}} = \frac{K_1 K_2 K_{III}}{K_2 K_{III} + K_1 K_{III} i_1^2 + K_1 K_2 i_1^2 i_2^2}$$

又有： $x_0(t)$ 等效到电动机轴 I 上的转角为 $i_1 i_2 \frac{2p x_0(t)}{l_0}$ ；等效到 III 轴上的转角为 $i_2 \frac{2p}{l_0} x_0(t)$ ； $x_0(t)$ 等效到 III 轴上的转角为 $\frac{2p}{l_0} x_0(t)$ 。 m 等效到 III 轴上的转动惯量为 $m \left(\frac{l_0}{2p}\right)^2$ 。 B 等效到 III 轴上的速度阻尼系数为 $B \left(\frac{l_0}{2p}\right)^2$ 。

设作用在轴 II 上的转矩为 $T_2(t)$ ，作用在轴 III 上的转矩为 $T_3(t)$ ，则有

$$K \left[\theta_{mi}(t) - i_1 i_2 \frac{2\pi}{l_0} x_0(t) \right] = T_{mi}(t)$$

$$T_{mi}(t) = J_1 \frac{d^2(i_1 i_2 2\pi x_0(t)/l_0)}{dt^2} + \frac{T_2(t)}{i_1}$$

$$T_2(t) = J_2 \frac{d^2(i_2 2\pi x_0(t)/l_0)}{dt^2} + \frac{T_3(t)}{i_2}$$

$$T_3(t) = [J_3 + m(l_0/2\pi)^2] \frac{d^2\left(\frac{2\pi}{l_0} x_0(t)\right)}{dt^2} + B(l_0/2\pi)^2 \frac{d(2\pi x_0(t)/l_0)}{dt}$$

消去 $T_{mi}(t)$ 、 $T_2(t)$ 、 $T_3(t)$ ，并进行 Laplace 变换，经整理后得到系统的传递函数为

$$\frac{X_i(s)}{q_{mi}(s)} = \frac{K}{[J_1 + \frac{J_2}{i_1^2} + \frac{J_3}{i_1^2 i_2^2} + \frac{(\frac{l_0}{2p})^2}{i_1^2 i_2^2}]s^2 + B \frac{(\frac{l_0}{2p})^2}{i_1^2 i_2^2} s + K}$$

故

$$\frac{X_i(s)}{q_{mi}(s)} = \frac{Kl_0 / (2pi_1^2 i_2^2)}{J_{eq}^m s^2 + B(\frac{l_0 i_1 i_2}{2p})^2 s + K}$$

式中：

$$J_{eq}^m = J_1 + \frac{J_2}{i_1^2} + \frac{J_3}{i_1^2 i_2^2} + \frac{(\frac{l_0}{2p})^2}{i_1^2 i_2^2}$$

3、工作台进给系统的主谐振频率

对于带非刚性轴的传动系统，上述完整的传递函数必然是高阶的。而在控制系统应用中，往往感兴趣的是机械传动系统的主谐振频率、现就其主谐振频率的求法分析如下：

在图 2-所示的机械传动系统中； $T_{mi}(t)$ 为电动机输出转矩（N·m）； $x_i(t)$ 为工作台位移(m)； i_1 、 i_2 减速比； K_1 、 K_2 、 K_3 为轴 I、II、III 的扭转刚度(N.m/rad)； $q_{mi}(t)$ 为电动机输出轴角位移(rad)； J_1 、 J_2 、 J_3 、为轴 I、II、III 上运动部件的转动惯量(kg.m²)， m 为工作台直线移动部件的总质量(kg)； l_0 为丝杠的基本导程（m）； J_{ea} 为轴 II、III 转动惯量以及工作台总质量 m 等效到电动机轴上的总转动惯量(kg.m²)； B_{eq} 为工作台直线运动速度阻尼系数 B 等效到电动机轴上的等效阻尼系数[N.m/(m/s)]； K 机械传动系统的总扭转刚度(N.m/rad)。由图 6-7 可知

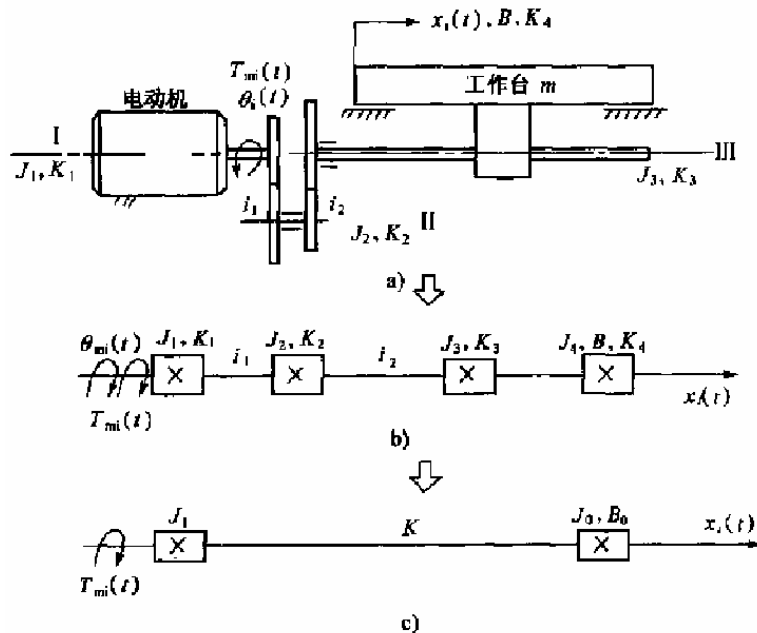


图 6-7 机械传动系统的简化

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2/i_1^2} + \frac{1}{K_3/(i_1^2 i_2^2)} + \frac{1}{K_4/\left(\frac{l_0}{2\pi i_1 i_2}\right)^2}}$$

$$= \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 l_0^2}{K_2 K_3 K_4 l_0^2 + K_1 K_3 K_4 l_0^2 i_1^2 + K_1 K_2 K_4 l_0^2 i_1^2 i_2^2 + K_1 K_2 K_3 i_1^2 i_2^2 (2\pi)^2}$$

$$J_{eq} = J_2/i_1^2 + J_3/(i_1 i_2)^2 + \left(\frac{l_0}{2\pi}\right)^2 m/(i_1 i_2)^2$$

$$B_{eq} = \left(\frac{l_0 i_1 i_2}{2\pi}\right)^2 B$$

则可写出简化系统的动态方程

$$\begin{cases} J_1 = \frac{d^2 \theta_{mi}(t)}{dt^2} = T_{mi}(t) - K \left[\theta_{mi}(t) - \frac{2\pi i_1 i_2}{l_0} x_i(t) \right] \\ J_{eq} \left(\frac{2\pi i_1 i_2}{l_0} \right) \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = -K \left[\left(\frac{2\pi i_1 i_2}{l_0} \right) x_i(t) - \theta_{mi}(t) \right] - B_{eq} \left[\left(\frac{2\pi i_1 i_2}{l_0} \right) \frac{dx_i(t)}{dt} \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} J_1 s^2 \Theta_{mi}(s) = T_{mi}(s) - K [\Theta_{mi}(s) - X'_i(s)] \\ J_{eq} s^2 X_i(s) = K [\Theta_{mi}(s) - X'_i(s)] - B_{eq} s X'_i(s) \end{cases}$$

式中, $X'_i = \frac{2\pi i_1 i_2}{l_0} X_i(s) = DX_i(s)$, 其中 $D = \frac{2\pi i_1 i_2}{l_0}$

根据式 6-1, 可画出简化系统的框图如图 6-8 所示。通过系统框图的简化可得系统的传递函数为

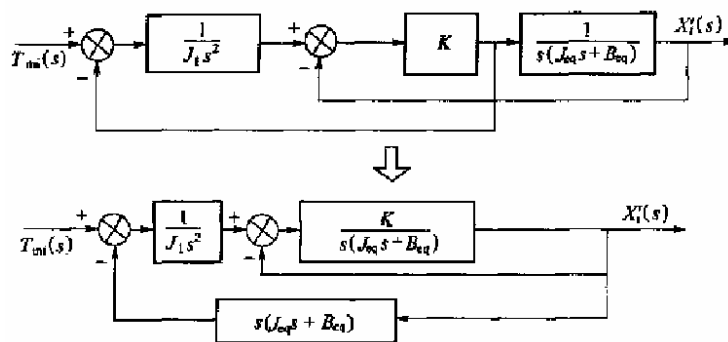


图 6-8 系统框图

$$\frac{X_i(s)}{T_{mi}(s)} = \frac{\frac{l_0}{2\pi i_1 i_2}}{s(J_{eq}^m s + B_{eq}) \left(\frac{J_1 J_{eq}}{K J_{eq}^m} s^2 + 2Z \sqrt{\frac{J_1 J_{eq}}{K J_{eq}^m}} s + 1 \right)} \quad (6-2)$$

式中: $\omega_n = \sqrt{\frac{K J_{eq}^m}{J_1 J_{eq}}}$ -----主谐振频率

从式 6-2 可以看出, 由于系统存在一个等效速度阻尼系数 B_{eq} , 说明该系统

不仅主谐振频率具有阻尼特性，且由一个纯积分环节转变为惯性环节。

第三节 机电一体化系统的动态设计

机电一体化系统的伺服系统的稳态设计只是初步确定了系统的主回路，还很不完善。在稳态设计基础上所建立的系统数学模型一般不能满足系统动态品质的要求，甚至是不稳定的。为此，必须进一步进行系统的动态设计。系统的动态设计包括：选择系统的控制方式和校正（或补偿）形式，设计校正装置，将其有效地连接到稳态设计阶段所设计的系统中去，使补偿后的系统成为稳定系统，并满足各项动态指标的要求。伺服系统常用的控制方式为反馈控制方式（即误差控制方式），也可采用前馈和反馈相结合的复合控制等方式。它们各具特点，需要按被控对象的具体情况和要求，从中选择一种适宜的方式。同样，校正形式也多种多样，设计者需要结合稳态设计所得到的系统的组成特点，从中选择一种或几种校正形式，这是进行定量计算分析的前提。具体的定量分析计算方法很多，每种方法都有其自身的优点和不足。而工程上常用对数频率法即借助波德（Bode）的图和根轨迹方法进行设计，这些方法作图简便，概念清晰，应用广泛。

对数频率法即波德图法，主要适用于线性定常最小相位系统。系统以单位反馈构成闭环，若主反馈系统不为 1（单位反馈），则需要等效成单位反馈的形式来处理。这是因为该方法主要用系统开环对数幅频特性进行设计，必须将各项设计指标反映到波德图上，并画出一条能满足要求的系统开环对数幅频特性，并与原始系统（稳态设计基础上建立的系统）的开环对数幅频特性相比较，找出所需补偿（或校正）装置的对数幅频特性。然后根据此特性来设计校正（或补偿）装置，将该装置有效地连接到原始系统的电路中去，使校正（或补偿）后的开环对数幅频特性基本上与所希望系统的特性相一致。这就是动态设计的一般考虑方法和步骤。

一、系统的调节方法

在研究机电伺服系统的动态特性时，一般先根据系统组成建立系统的传递函数即原始系统数学模型），不易用理论方法求解的可用实验方法建立。进而可以根据系统传递函数分析系统的稳定性、系统的过渡过程品质（响应的快速性和振荡）及系统的稳态精度。

当系统有输入或受到外界干扰时其输出必将发生变化，由于系统中总是含有一些惯性或蓄能元件，其输出量也不能立即变化到与外部输入或干扰相对应的值，也就是说需要有一个变化过程，这个变化过程即为系统的过渡过程。

当系统在阶跃信号作用下，过渡过程大致有如图 6-9 所示以下三种情况：①系统的输出按指数规律上升，最后平稳地趋于稳态值；②系统的输出发散，即没有稳态值，此时系统是不稳定的；③系统的输出虽然有振荡，但最终能趋于稳态值。

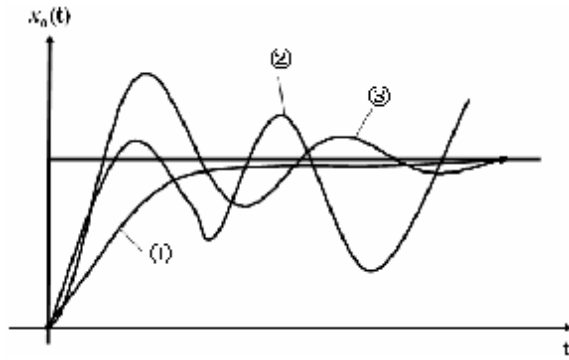


图 6-9 系统的输出特性图

系统性能主要通过稳定性、快速性和稳定性三大指标来描述，具体表征系统动态特性好坏的定量指标就是系统过渡过程的品质指标。从时域来描述包括：

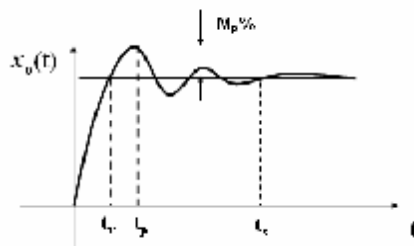


图 6-10 二阶系统单位阶跃响应

1、时域指标

在时域内，这种品质指标一般用单位阶跃响应过渡过程曲线（图 6-10）中的参数来表示，即：

- 1) 上升时间 t_r
- 2) 峰值时间 t_p
- 3) 调整时间 t_s
- 4) 超调量 $M_p\%$

图 6-10 所表示的系统是个稳定的系统，只有稳定的系统才能讨论系统的其它两个性能。其中 t_r 、 t_p 、 t_s 是表征系统快速性的指标，它们的值越小，就表示系统的快速性越好； $M_p\%$ 是表征系统平稳性指标，该值越小，表示系统的振荡越小，系统的平稳性越好。当系统的过渡过程结束后，其输出值达到与输入相对应的稳定状态，此时系统的输出值与目标值之差被称为稳态误差 e_{ss} ，其值的大小表示系统准确性，越小，系统的准确性越好。

2、频域指标

在频域中是用 Bode 图来表示的，包括

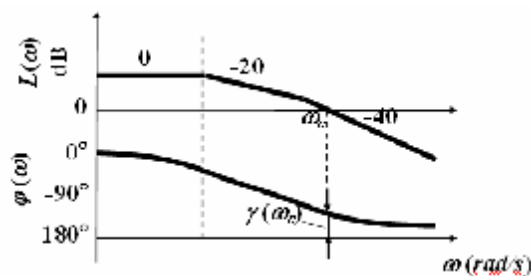


图 6-11 系统的频率特性图

- 1) 相位裕度 γ
- 2) 幅值裕度 K_g
- 3) 复现频率 ω_m 及复现带宽 $0 \sim \omega_m$
- 4) 谐振频率 ω_r 及谐振峰值 M_r
- 5) 截止频率 ω_b 及截止带宽 $0 \sim \omega_b$

相位裕度和幅值裕度表征系统的稳定性，当 $g > 0$ 和 $K_g > 1$ 时，系统稳定，

谐振频率和截止频率表征系统的快速性，频率越大，系统的快速性越好。

当系统不稳定或虽然稳定但过渡过程性能和稳态性能不能满足要求时，可先调节系统中的有关参数。如仍不能满足使用要求就需要进行校正（常采用校正网络）。所使用的校正网络多种多样，其中最简单的校正网络是比例-积分-微分调节器。简称 PID 调节器（P——比例、I——积分、D——微分）。

二、PID 调节器及其调节作用

简单的调节器由阻容电路组成。这种无源校正网络衰减大，不易与系统其它环节相匹配，目前常用的调节器是有源校正网络。它由运算放大器与阻容电路组成，其类型如图 6-12 所示。

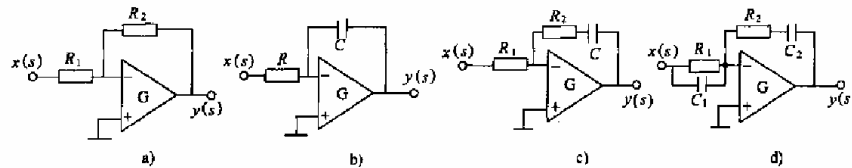


图 6-12 PID 调节器

1、比例（P）调节

比例调节网络如图 6-12a) 所示，其传递函数为 $G_K(s) = K_p$

它的调节作用的大小主要取决于增益 K_p （比例系数）的大小。

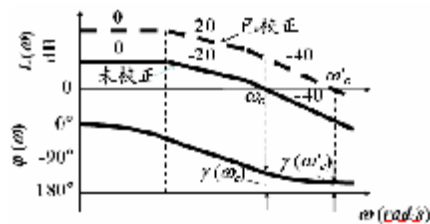


图 6-13- P 校正的调节特性

从图中可见，P 控制对系统性能的影响主要有 ($K_p > 0$):

- 1) 开环增益加大，稳态误差减小；
- 2) 幅值穿越频率增大，过渡过程时间缩短；
- 3) 系统稳定程度变差；

当 $K_p < 0$ 时，P 校正对系统的影响正好相反。因此只有原系统稳定裕量充分大时才采用比例控制。

2、比例-积分（PI）校正

校正函数为： $G(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$ ，该校正对系统性能的影响由图 6-14 可见

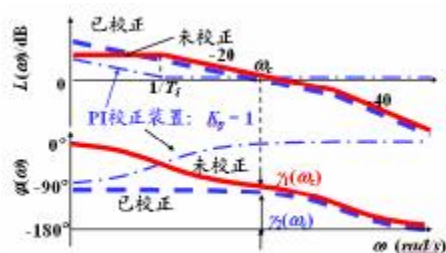


图 6-14 PI 校正对系统性能的影响

- 1) 系统型次提高，稳态性能改善。
 - 2) 相位裕量减小，稳定程度变差。
- 3、比例-微分 (PD) 校正

校正函数为： $G_c(s) = K_p(1 + T_d s)$ ，该校正对系统性能的影响主要有以下几点：

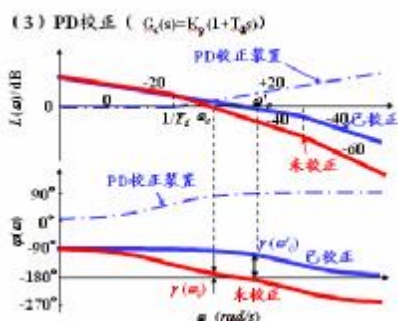


图 6-15 PD 校正对系统性能的影响

- 1) 相位裕量增加(因为 $j c(w) > 0$)，稳定性提高；
 - 2) w_c 增大，快速性提高；
 - 3) $K_p = 1$ 时，系统的稳态性能没有变化；
 - 4) 高频段增益上升，可能导致执行元件输出饱和，并且降低了系统抗干扰的能力。
- 4、比例-微分-积分 (PID) 校正

这种调节网络的组成如图 6-12d 所示，其传递函数为

$$G_c(s) = -K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

这种校正环节不但能改善系统的稳定性能也能改善其动态性能。但是，由于它含有微分作用，在噪声比较大或要求响应快的系统中不宜采用；PID 调节器能使闭环系统更加稳定，其动态性能也比用 PI 调节器时更好。

有源校正，通常不是靠理论计算而是用工程整定的方法来确定其参数的。大致做法如下：在观察输出响应波形是否合乎理想要求的同时，按照先调互 K_p 、后调 T_i 、再调 T_d 的顺序，反复调整这三个参数，直至观察到输出响应波形比较合乎理想状态要求为止（一般认为在闭环机电伺服系统的过渡过程曲线中，若前后两个相邻波峰值之比为 4: 1 时，则响应波形较为理想）。

