

内 容 提 要

本书分上下两册。上册第一章为概论；二、三章为逻辑代数、计数法和逻辑元件；四、五章为逻辑部件和运算部件；六、七、八章为专用控制机的位置及轨迹控制运算原理、运算控制器和输入。下册九、十、十一章介绍了各种典型拖动系统：开环系统、相位系统和数字比较系统；十二章到十五章、综合介绍了四台典型机床和加工中心机床的数字控制系统。

本书可供从事机床数字控制方面工作的有关人员和高等工业院校有关专业的师生参考。

机 床 数 字 控 制

下 册

《机床数字控制》编写组 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张15⁷/₈ 356千字

1982年5月第一版 1982年5月第一次印刷 印数：0,001—7,400册

统一书号：15034·2313 定价：1.65元

前 言

生产过程的自动化是工业现代化的重要标志之一。它对改善劳动条件、降低生产成本、提高产品质量和劳动生产率都有着非常显著的成效。

在大批量生产中,采用自动线、组合机床和各种自动化单机就可以较合理地解决自动化问题。但在改型频繁、精度高、零件形状又复杂的中小批量生产部门,却长时间没有找到一种满意的解决方法。“机床数字控制”技术的出现,为解决这个问题找到了一条新的途径。

《机床数字控制》是综合地应用了计算技术、自动控制、精密测量、电子技术和机床结构设计等各个领域里的最新成就而发展起来的。从五十年代初期出现以来,到今天不到三十年的时间已有了很大的发展。目前已用于控制车床、铣床、钻镗床、坐标镗床、冲床以及各种专用设备,如绘图机、测量机、钻铆设备等等。与此同时,有关“机床数字控制”的理论,也有了较快的发展。本书的目的是向读者系统地介绍目前已经成功地用于生产的有关“机床数字控制”方面的技术成就。

参加本书编写的有:谭益智、康学成、尉忠信、李楠、张民惠、徐南先、郑楚华、李志俊、杨文源、竺钦尧、龚浦泉、李相梁、沈远根、程志珊等同志。

由于我们的水平所限,书中一定存在不少缺点和错误,望读者批评指正。

《机床数字控制》编写组

目 录

第九章 步进式数字控制拖动系统

第一节 步进系统的工作原理	1
第二节 步进电机的原理、构造及性能	2
一、步进电机的工作原理	2
二、步进电机的类型及结构	3
三、步进电机的性能分析	6
第三节 步进电机和电液脉冲马达的使用特性	10
第四节 步进式拖动系统的设计方法及步骤	12
第五节 步进电机控制线路	18
一、加减速电路	19
二、环形分配器	21
三、功率放大器	23
第六节 提高步进系统精度的措施	25

第十章 相位数字控制拖动系统

第一节 测量反馈元件	28
第二节 相位数字控制拖动系统工作原理与分类	31
第三节 数字相位变换	33
一、数字相位变换原理	33
二、可逆回路	34
第四节 整形器与桥式移相器	35
一、整形与功率放大器	35
二、桥式移相器	37
第五节 鉴相器	38
一、二极管型鉴相器	39
二、门电路型鉴相器	41
第六节 直流放大器	43
第七节 提高相位系统送进速度均匀性	46
第八节 相位系统的稳定性	47
一、对系统的要求	47

二、稳定性的计算	49
三、相位系统的性能	53
四、提高相位系统稳定性的措施	55

第九章 具有绝对坐标控制的相位

系统简介	59
------	----

第十一章 数字比较系统

第一节 数字比较系统的结构	62
第二节 光电脉冲发生器	64
一、工作原理	64
二、光电脉冲发生器的性能	67
第三节 光电编码盘	67
第四节 数码-数字的转换	70
一、脉冲序列变换为数码的转换器	70
二、数码变换为数字脉冲序列的转换器	78
第五节 比较器	82
一、数码与数码的比较	82
二、脉冲数字比较器	87
第六节 电磁离合器	92
一、电磁离合器的分类	92
二、电磁离合器的结构和工作原理	93
三、电磁离合器的主要性能参数	93
四、电磁离合器常用的几种电器回路	95
五、摩擦片式湿式电磁离合器	97
六、摩擦片式干式电磁离合器	99

第十二章 TK-75 数字控制机

第一节 主要功能和总方框图	104
一、定距离移动 (G 功能)	104
二、进给速度 (F 功能)	104
三、M, S, T 功能	104
四、纸带穿孔	105
五、TK-75 控制机总方框图	107
第二节 输入部分	108
一、方框图	108
二、指令代码表	109

三、光电放大器	109
四、RD 发生器 (同步孔脉冲发生器)	110
五、输入暂存器	111
六、数字代码和文字代码的判别	111
七、数码读入脉冲发生器 (CH 发生器)	112
八、奇偶校验	113
九、文字寄存器及译码	113
十、指令寄存器	114
十一、读数机的起停控制	115
十二、信号源和清“O”信号	116
十三、输入部分的工作顺序图	117

第三节 分频器

一、分频器的基本工作原理	117
二、 x 、 y 判别线路	119
三、终点判断	120

第四节 进给速度发生器

一、托架移动速度发生器	120
二、进给速度的程编	120
三、六分频器和十分频器	121
四、 $\times \alpha$ 线路	122

第五节 自动循环

一、A 循环控制 (小循环控制)	122
二、C 循环控制 (大循环控制)	123
三、循环计数器的工作过程	123
四、加工铆钉的控制	125
五、等数线路	126

第十三章 简易数控车床控制系统

第一节 机床的改装及其结构

第二节 控制系统概述

一、控制原理	130
二、本控制机的基本功能	130

第三节 控制系统总方框图及工作

流程	132
----------	-----

一、总方框图	132
二、工作流程	134

第四节 部件工作原理

一、数码插销组	137
二、预清线路	138
三、启动线路	138
四、运算开关及主振线路	139

五、节拍发生器	140
---------------	-----

六、子程序发生器	140
----------------	-----

七、置“ Δ ”、置“ λ ”的选择电路	141
---	-----

八、执行译码电路	142
----------------	-----

九、倍频线路	143
--------------	-----

十、过冲计数器控制线路	144
-------------------	-----

十一、方向判别电路	145
-----------------	-----

十二、换刀比较符合线路	147
-------------------	-----

十三、暂停、终停、螺纹开关	148
---------------------	-----

第五节 加工产品举例

第十四章 数字程序控制铣床

第一节 概述

第二节 机床数字控制原理

一、直线插补原理	153
二、圆弧插补原理	154
三、象限及坐标平面处理	155
四、刀具半径补偿	157
五、加工指令	159
六、输入数据十翻二转换	165
七、基本运算的子程序表	165

第三节 逻辑结构

一、时标脉冲发生器	170
二、主控制器	171
三、运算器	176
四、运算终点判断	181
五、输入寄存器	185
六、反向间隙及定位误差的补偿	189

第四节 程序编制结构

一、程编格式	193
二、程编举例	194

第十五章 加工中心

第一节 SK-1403 系统概述

第二节 输入控制器

一、输入方框图简介	198
二、输入 (译码) 回路	199

第三节 主控制器

一、自动循环工作状态	204
二、非循环工作状态	205
三、停止操作	205

第四节 运算控制器	206	第七节 补偿控制器	221
一、主寄存器 (坐标值寄存器)	207	一、刀具补偿控制器	221
二、加减一运算电路	208	二、反向间隙补偿	222
三、S (程序) 计数器及其控制信号	210	三、螺距误差补偿	223
四、分配控制电路	212	第八节 刀库系统	223
第五节 输出控制器	213	一、概述	223
一、输出控制	214	二、刀库信息流程图	225
二、环形分配器	215	三、刀库刀具的编码	226
三、手动进给回路	216	四、刀库主控回路	228
第六节 进给控制器	218	五、T 指令的二进制译码	231
一、F ₁ 位寄存器和译码	218	六、取刀 (QD)、还刀 (GD) 寄存器	232
二、F ₂ 位寄存器和译码	218	七、刀库符合比较线路	233
三、进给脉冲发生器	221	八、自动换刀过程	234

第九章 步进式数字控制拖动系统

第一节 步进系统的工作原理

前面已经提到过步进式拖动系统。在此系统中,步进电机是主要执行元件。它的最大特点是每输入一个电流脉冲之后,就转过一定的角度,称之为步距角 α 。步距角 α 可按工作要求设计,如 0.375° , 0.75° , 1.5° , 3° 等等不同的角度。如果没有电流脉冲输入,步进电机的转子能稳定的停止在原有位置。实践证明,只要在步进电机的工作频带之内,输入一个脉冲转一个步距角 α 的对等关系,是相当可靠的。在数控拖动系统中,用步进电机做执行元件,可以直接组成简单的开环系统,不需要任何模拟变换及反馈,而达到较高的位置控制精度。

用步进电机直接拖动数控机床的滚动丝杠,使溜板箱产生运动的系统方框图如图 9-1 所示。

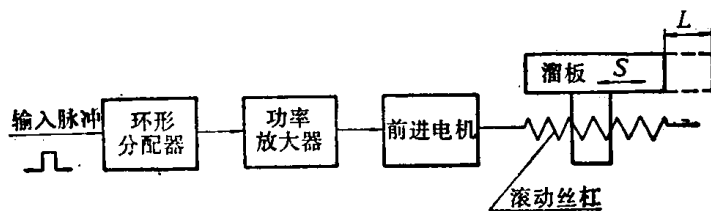


图9-1 步进式拖动系统方框图

在图 9-1 中,其他环节将在后面讨论。这里先介绍由步进电机带动滚动丝杠、螺母产生纵向溜板运动的情况。由于步进电机有上述特性,图 9-1 的系统具有以下几个特点:

- 1) 控制进入步进电机的脉冲数量,可以控制它的转角大小,经滚动丝杠、螺母,体现为纵向溜板的位移量 L ,即脉冲数量 $P_n \rightarrow$ 步进电机转角 $\Phi \rightarrow$ 溜板位移量 L 。
- 2) 控制进入步进电机的脉冲频率,可以控制它的转速快慢,经滚动丝杠螺母之后,体现为纵向溜板的进给速度 S 的大小,即脉冲频率 $f \rightarrow$ 步进电机转速 $\omega \rightarrow$ 溜板进给速度 S 。
- 3) 改变步进电机中各绕组的通电顺序,可以使步进电机正转或反转,从而改变溜板的运动方向。

在步进系统中,既然位移量 L 、进给速度 S 、运动方向都能控制,这就能满足点位控制、直线控制和曲线控制的要求。

步进式拖动系统是开环系统。它与一般的闭环系统比较,省去了检测、反馈、比较等元部件,结构简单,设计、调整、维修较方便,精度也能满足一定的要求。

在图 9-1 中,溜板是直接由步进电机拖动的,因此需采用功率步进电机。如果用功率小的伺服步进电机,则需通过由随动阀和油马达组成的液压扭矩放大器,才能带动溜板或工作台,通常都是把步进电机 $\rightarrow$ 随动阀 $\rightarrow$ 油马达装成一个部件,称为电液脉冲马达。电液脉冲马达的功率可达 20 马力。

第二节 步进电机的原理、构造及性能

一、步进电机的工作原理

步进电机的工作原理，是当某相定子激磁以后，它能吸引转子，使转子的极齿与定子的极齿对齐，因此它实际上是电磁铁的作用原理，如图 9-2 所示。

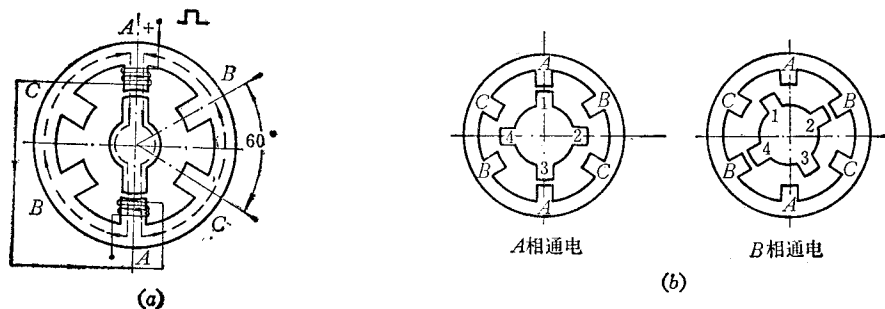


图9-2 最简单的反应式步进电机

图 9-2 (a) 是一种最简单的反应式步进电机，它有 A、B、C 三相，每相有两个磁极，转子也有两个磁极（两个齿）。当 A 相绕组通以直流电流时，转子的两极与 A 相的两极对齐，磁通回路如虚线所示。若 A 相断电，B 相通电，则转子沿顺时针转过 60° ，因此步距角 α 等于 60° 。如果控制线路能不停地按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \cdots$ 的顺序送入电流脉冲，就产生顺时针转动。如果通电顺序改变为 $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \cdots$ ，就得到逆时针转动。这种通电方式称为三相三拍。还有一种三相六拍的通电方式。它的通电顺序是：顺时针为 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A \rightarrow \cdots$ 。逆时针为 $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A \rightarrow \cdots$ 。

当 A 相通电转为 A、B 相同时通电时，转子的磁极将同时受到 A 相磁极和 B 相磁极的吸引力，因此转子的磁极只好停在 A、B 相磁极之间，这时它的步距角 α 等于 30° 。当由 A、B 相同时通电转为 B 相通电时，转子磁极再沿顺时针转 30° 并与 B 相磁极对齐。其余以此类推。采用三相六拍通电方式，可使步距角 α 缩小一半。

图 9-2 (b) 中的步进电机，定子仍是 A、B、C 三相，每相两极，但转子不是两个磁极而是四个。当 A 相通电时，是 1、3 极与 A 相的两极对齐；很明显当 A 相断电，B 相通电时，将是 2、4 极与 B 相两极对齐。这样一来，在三相三拍的通电方式中，步距角 α 等于 30° ，在三相六拍通电方式中，步距角则等于 15° 。

综上所述得知，步进电机的步距角 α 与定子绕组的相数 m ，转子的齿数 Z ，通电方式 K 有关，可用下式表示：

$$\alpha = \frac{360^\circ}{m \cdot Z \cdot K} \quad (9-1)$$

上式中，三相三拍， $K = 1$ ；三相六拍 $K = 2$ ；其他依此类推。

图 9-3 是北京微电机厂生产的 SB-3 型步进电机的原理图，它共有 ABC 三相定子绕组，每相有两个磁极，三相共六极，极与极之间相隔 60° ，每个定子极上均有五个齿（四个槽）。转子共有 40 个齿（40 个槽）。若通电为三相三拍，问步距角 α 等于多少？

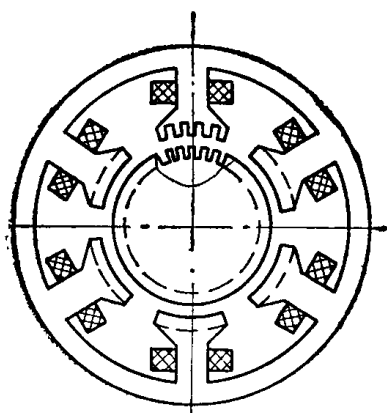


图9-3 SB-3型步进电机

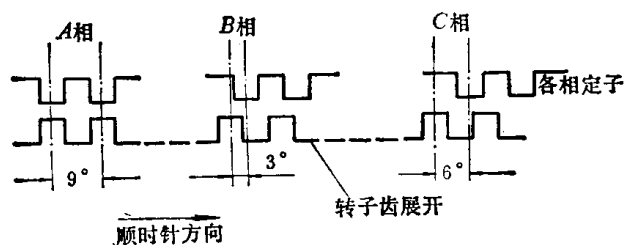


图9-4 步进电机的齿距分布

解: $m = 3$ $Z = 40$ $K = 1$ 代入 (9-1) 式得:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{3 \times 40 \times 1} = 3^\circ$$

看了图 9-3 之后, 一定会产生这样的疑问, 即转子齿增多之后, 各相定子齿与转子齿之间是怎样起作用的? 原来各相定子齿在圆周方向都以转子的周向齿距 t 为基准, 依次错开 $1/3$ 齿距。以 SB-3 型步进电机为例, 参看图 9-4。转子共有 40 个齿, 故齿距为:

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

当转子齿与 A 相定子齿对齐时, 转子齿与 B 相定子齿差 $\frac{1}{3}$ 齿距, 即 3° ; 与 C 相定子齿差 $\frac{2}{3}$ 齿距, 即 6° 。这样一来, 当定子由 A 相通电改为 B 相通电时, 转子即向前转动一个步距角 α ($\alpha = 3^\circ$), 余依此类推。这种步进电机称为减速反应式步进电机, 所谓反应式是其力矩由于纵横轴磁阻不相等而产生, 即当某相定子激磁后, 转子齿力求与该相定子齿对齐。所谓减速是指定子激磁后的磁场转动速度大于转子的转动速度。例如在图 9-3 中, 每来一个脉冲, 定子空间转过 60° , 而转子只转过 30° 。

二、步进电机的类型及结构

步进电机从五十年代以来, 发展很快, 种类很多, 但其基本原理都是相同的。

若按产生力矩的原理来分, 则有:

- a. 反应式: 转子上无绕组, 定子绕组激磁后, 产生反应力矩;
- b. 激磁式: 定子与转子均有绕组或磁钢, 由电磁力矩产生步进运行。

若按输出的力矩大小来分, 则有:

- a. 功率的: 输出力矩在 1 公斤·米以上, 能直接驱动工作台;
- b. 伺服的: 输出力矩在几百~几千克·厘米, 只能带动小负载, 加上液压扭矩放大器, 可驱动工作台。

若按定子和转子的数量分, 则有:

- a. 单定子式; b. 双定子式; c. 三定子式; d. 多定子式。

若按其构造来分, 则有:

a. 径向分相式; b. 轴向分相式 (多段)。

还有很多分类方法, 不一一细述。

图 9-3 中 SB-3 型步进电机是单定子, 径向分相, 反应式伺服步进电机。

图 9-5 是上海跃进电机厂生产的五定子, 轴向分相, 反应式伺服步进电机, 型号是 SB-58-1。定子和转子都有五段, 是轴向分布的。由于采用了轴向分相, 定子的齿形 很像 一个内齿轮, 它由硅钢片叠成。每相定子中夹有一个环形绕组, 转子由硅钢制成, 也有五段, 用黄铜皮隔开绝磁, 它的形状像一个外齿轮。从图 9-6 中可以看出, 在每一相环形绕组中, 磁力线由定子及转子的径向和轴向构成回路。

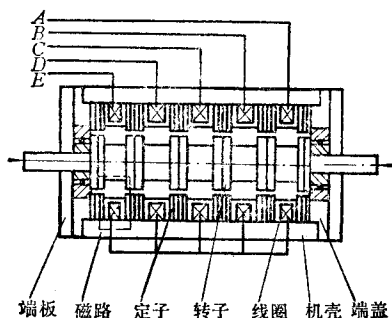


图9-5 五定子, 轴向分相, 反应式伺服步进电机

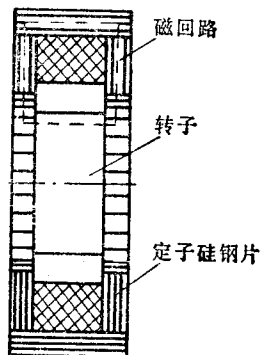


图9-6 环形绕组的磁回路

SB-58-1 型步进电机, 定子和转子都有 16 个齿, 故齿距 $t = \frac{360^\circ}{Z} = \frac{360^\circ}{16} = 22.5^\circ$,

因为它有 A、B、C、D、E 五相, 故每相定子齿在空间需错开 $\frac{1}{5}$ 齿距, 也就是说在五

相五拍通电时, 步距角 $\alpha = \frac{t}{5} = \frac{22.5^\circ}{5} = 4.5^\circ$ 。在五相十拍通电时, 其 $\alpha = 2.25^\circ$ 。

轴向分相的步进电机, 可以在定子上错齿, 也可以在转子上错齿。对于五相的步进电机, 它的通电方式更多一些, 例如:

$$\begin{aligned} A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \cdots \cdots \\ AB \rightarrow BC \rightarrow CD \rightarrow DE \rightarrow EA \cdots \cdots \end{aligned} \quad K = 1$$

$$\left. \begin{aligned} A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CD \rightarrow D \\ \rightarrow DE \rightarrow E \rightarrow A \cdots \cdots \\ AB \rightarrow ABC \rightarrow BC \rightarrow BCD \rightarrow CD \rightarrow CDE \\ \rightarrow DE \rightarrow DEA \rightarrow EA \rightarrow EAB \rightarrow AB \cdots \cdots \end{aligned} \right\} K = 2$$

目前用得最多的一种是二相、三相激磁的十拍运行方式。这样作不仅能使 $K = 2$, 步距角 α 减小一半, 而且能改善步进电机的运行性能。

我国使用的步进电机, 除了上面介绍的反应式步进电机之外, 还有永磁式步进电机, 永磁反应式步进电机。图 9-7 是永磁式步进电机。定子由硅钢片叠成, 图中是三相绕组, 转子是有一定极对数的磁铁。优点是结构简单, 动态稳定性较好。缺点是转子极对数较

少，多了加工有困难，因而步距角 α 大，频率提不高。

图 9-8 是转子带有磁钢的永磁式反应式步进电机，它兼有两者的优点，既能获得小的步距角 α ，又能改善动态稳定性。

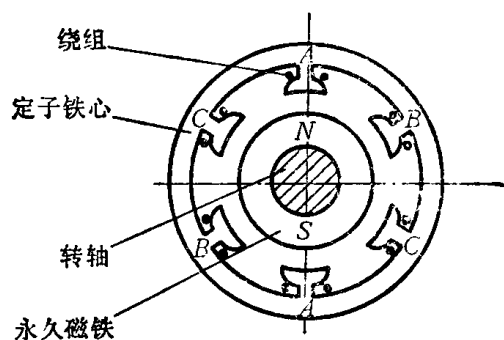


图9-7 永磁式步进电机

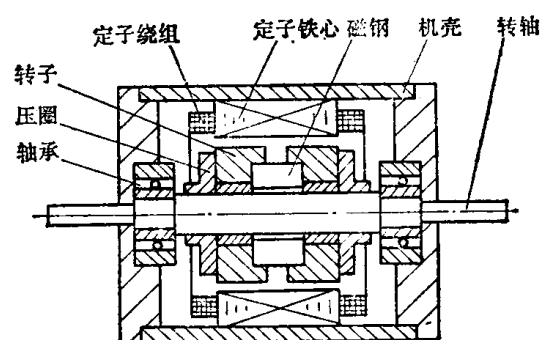


图9-8 永磁式反应式步进电机

表 9-1 是我国生产的部分步进电机的型号和技术参数。

表9-1 国产步进电机的技术参数

电机型号	电压 V	电流 A	相 数	步距角 α	负载力矩 克·厘米	启动频率 步/秒	外形尺寸 直径×长度 毫米	备 注
SB1-2D-50	24	2	2	90°	50	50	φ53.5×16	以上北微产品
SB2-3B-150	24	2	3	3°/6°	150	500	φ44×44	
SB3-3B-500	28	3	3	1.5°/3°	500	800	φ85×60	
SB3-3B-1500	28	5	3	1.5°/3°	1500	1500	φ85×122	
SB-3D-2000	28	5	3	1.5°/3°	2000	400	φ85×122	
SB3G-3D-2000	28	3	3	1.5°/3°	2000	100	φ70×100	
SB3-6D-2000	28	2.5	6	0.75°/1.5°	2000	2000	φ70×110	
SB3-6D-2500	28	2.5	6	0.75°/1.5°	2500	2000	φ70×110	
SB4-4B-1000	28	5	4	1°11'/2°22'	1000	2000	φ90×118	
SB5A-3D-150	28	0.8	3	15°	150	160	φ60×70	
SB5B-3D-300	28	2	3	15°	300	270	φ60×70	
SB5G-3D-200	28	2	3	60°	200	60	φ66×80	
SB6-3D-3000	28	3	3	1.5°/3°	3000	600	φ70×106	
XB1-6B-5000	110	5	6	1.5°/3°	5000	1500	φ132×164	
XB1-6D-10000	110	5	6	1.5°/3°	10000	1200	φ132×164	
XB1G-60-20000	110	5	6	1.5°/3°	20000	1000	φ132×210	以上上仪出品
FB36	24	1.5	3	1.5°/3°	100	50	φ36×60	
FB45	24	1.5	3	1.5°/3°	300	1000	φ45×56	
FB90	24	3.5	4	0.5°/1°	2500	1000	φ90×90	
FB110	110	1	4	50°/1°40'	3500	800	φ110×172	
BF159075	30	4	3	1.5°/3°	1500	1000	φ75×75	以上常微出品
BF301045	24	2.5	3	1.5°/3°	350	1000	φ45×51	
BF180475	24	3	3	1.5°/3°	1200	1000	φ75×53	
BF090411	30	4	4	0.75°/1.5°	8000	300	φ110×140	
SB-58-1	60	3.5	5	2.25°/4.5°	2500	2500	φ58×126	
GB1-6D-1	110	6	6	0.75°/1.5°	1公斤·米	1000	φ186×186	功率步进机
GB1-6D-5	110	8	6	0.375°/0.75°	5公斤·米	160	φ350×354	功率步进机

三、步进电机的性能分析

步进电机的性能可从静态特性和动态特性来研究。

1. 静态特性

这是指在步进电机的某一相定子中, 通入恒定的直流电流, 转子不旋转时的各种特性。可以从下列几方面来研究:

① 静转矩 M_j 和失调角 θ 间的关系。从图 9-9 可看出, 当步进电机上某相定子绕组激磁之后, 转子齿将力求与定子齿对齐, 使磁路中的磁阻最小, 这就是图中最上部的情形。这时定子齿 1 与转子齿 1' 对齐, 气隙中的磁力线最短, 如果我们将磁力线想像成“橡皮筋”, 则此时橡皮筋处于放松状态。当转子齿 1' 与定子齿 1 对齐时, 我们称失调角为零。图的下部是静力矩 M_j 与失调角 θ 之间的曲线关系。我们看到当失调角等于零时, 静转矩 M_j 也等于零。因为这时橡皮筋处于放松状态。换句话说,

只要在转子上稍为加一点负载力矩 M , 就能使转子偏离平衡位置, 产生失调角 θ , 即转子齿 1' 和定子齿 1 不再对齐。但一有失调角 θ 之后, 步进电机就产生一个静转矩 M_j , 这个 M_j 力图把转子拉回到原来的平衡位置, 使失调角 θ 等于零。所以失调角 θ 是有了负载力矩 M 以后的产物, 这时静转矩 M_j 等于负载力矩 M 。 M_j 、 M 、 θ 三者是相互联系、同时并存的。

根据理论推导和实验测定, 静转矩 M_j 与失调角 θ 之间有类似于正弦曲线的关系。

失调角有两种表示方法, 一种是机械失调角 θ , 一种是电气失调角 θ_e , 从电工学中知道, 两者之间的关系为:

$$\theta_e = p \cdot \theta = \frac{Z}{2} \cdot \theta \quad (9-2)$$

式中 p ——极对数;

Z ——齿数, $Z = 2p$ 。

或者说

$$\theta = \frac{2}{Z} \theta_e \quad (9-3)$$

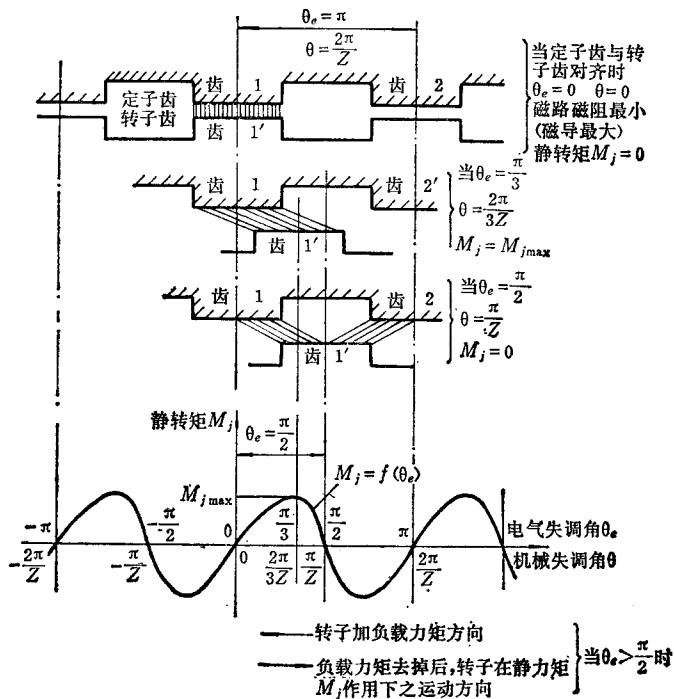


图9-9 静转矩 M_j 和 θ 之间的关系

失调角 θ 是有了负载力矩 M 以后的产物, 这时静转矩 M_j 等于负载力矩 M 。 M_j 、 M 、 θ 三者是相互联系、同时并存的。

在图 9-9 中, 转子齿 1' 与定子齿 1 对齐时, 取为零, 则当齿 1' 与齿 2 对齐时, 电气失调角 θ_e 等于 π , 机械失调角 θ 等于 $-\frac{2}{Z}\pi$ 。当齿 1' 与齿 3 (图中未画出) 对齐时, 电气失调角 $\theta_e = 2\pi$, 机械失调角 $\theta = -\frac{4}{Z}\pi$ 。从图中可看出, 当 $\theta_e = \frac{\pi}{2}$ 时, 转子齿 1' 对准定子齿 1 与齿 2 中的齿间, 磁阻最大, 两边都拉它, 互相抵消, 因此 $M_j = 0$, 这个位置是一个不稳定的中间转换点, 转子齿 1' 既可转向定子齿 1, 也可转向定子齿 2。

如果在逆时针方向加一个负载力矩 M , 则得到相应的一个 $-M_j$, 只要 $-\theta_e < -\frac{\pi}{2}$, 负载力矩 M 去掉之后, 转子齿 1' 将与定子齿 1 对齐, 即回到原平衡位置。

静转矩 M_j 与失调角 θ_e 之间的函数关系, 可近似地表示为:

$$M_j = 510(IW)^2 \frac{Z}{2} \Delta\lambda \sin 2\theta_e \quad (9-4)$$

若用机械失调角 θ 表示, 则为:

$$M_j = 510(IW)^2 \frac{Z}{2} \Delta\lambda \sin Z\theta \quad (9-5)$$

上两式中:

I ——通入定子绕组中的电流;

W ——绕组匝数;

Z ——转子齿数;

$\Delta\lambda$ ——磁导的增量;

θ_e ——电气失调角;

θ ——机械失调角。

从上式中可看出, 要增大步进电机的静转矩, 可以增大绕组的安匝数 IW , 其结果是使体积增大。也可以增加转子齿数, 同样也会增大体积, 当然 Z 增大之后, 还可以减小步矩角 α 。至于 $\Delta\lambda$, 则决定于定子齿和转子齿的构造形式。

如果按上述公式来计算, 最大静转矩 $M_{j,\max}$ 在电气失调角 θ_e 等于 $\frac{\pi}{4}$ 时产生, 因为这时 $\sin 2\theta_e$ 等于 1, 与图 9-9 实验曲线略有出入。

② 起动力矩 M_s 。设有三相反应式步进电机, 按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow \dots$ 顺序通电, 则转子每次转过 $\frac{1}{3}$ 齿距, 因每个齿距的电气角为 π 弧度, 故各相的 $M_j - \theta_e$ 曲线在相位上差 $\frac{\pi}{3}$ 。

在图 9-10 中, 画出了各相定子齿和转子齿在空间的相对位置, 图的下部有三条曲线 M_A 、 M_B 、 M_C , 它们表示各相的 $M_j - \theta_e$ 曲线, 形状完全一样, 只是在相位上差 $\frac{\pi}{3}$ 。先假定 A 相通电, 这时 M_A 曲线起作用, 由于步进电机上有一定的负载力矩 M_L , 故转子与定子间有一定的失调角 θ'_{e2} 。如果 A 相断电, B 相通电, 我们从 M_B 曲线上看到, 对应于失调角 θ'_{e2} 的 B 相的静转矩为 M'_2 , 因为 $M'_2 > M_L$, 故转子齿 Z' 能移到 1 点, 即向左走一步与 B 相定子对齐。如果 A 相通电时, 负载力矩为 M_L , 对应的失调角为 θ_{e1} , 当 A 相断电, B 相通电时, B 相的静力矩只有 M'_1 , 因为 $M'_1 < M_L$, 这时不仅转子带不动负载向左到达 1 点, 反而在负载力矩 M_L 作用下向右退到 b' 点附近, 本来应该进一步, 现在反而退了两

步，总共丢了三步。

曲线 M_A 和 M_B 的交点所对应的静转矩 M_q ，是最大起动力矩，其对应的失调角为 θ_q ，若外加负载力矩 $M < M_q$ ，则能起动工作，若 $M > M_q$ ，则步进电机不能起动工作。

在步进电机原有的构造条件下，能不能提高起动力矩 M_q 呢？我们发现如果改为两相同时通电，即 $AB \rightarrow BC \rightarrow CA \rightarrow AB \rightarrow \dots$ ，则由 M_A 和 M_B 组合而成的新曲线 $M_A + M_B$ ，其幅值一定比单

条的 M_A 或 M_B 大一些，从而可以提高 M_q 。另一措施是增加定子相数，由三相增为四、五、六相，这样各条曲线之间的相位差将缩小为 $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{\pi}{5}$ 、 $\frac{\pi}{6}$ ，也就是曲线与曲线之间挤得紧了，起动力矩 M_q 也会相应增大。

③ 稳定工作区。所谓稳定工作区是步进电机不丢步的工作能力。从图 9-10 可以看出，当 A 相通电时，在 $\theta_e = -\frac{\pi}{2} \sim +\frac{\pi}{2}$ 这一段，即由 $a''-a'$ 之间是静稳定区，也就是说，去掉负载之后，转子齿 Z' 都要回到原来的平衡位置即零点。对于 B 相来说，其稳定区仍是 $\pm \frac{\pi}{2}$ ，但相对于原来坐标左移了一个 α_e 的数值，可看成：

动稳定区

$$\theta_{ed} = \begin{cases} +\frac{\pi}{2} + \alpha_e \\ -\frac{\pi}{2} + \alpha_e \end{cases} \quad (9-6)$$

这里 α_e 是电气步距角，图中等于 $-\frac{\pi}{3}$ ，因为我们假定通电顺序是 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow \dots$ ，转子逆时针转动，故取负值。

2. 动态特性

先研究步进电机的一步特性，在工作频率较低时，步进电机基本上是走完一步再走一步。在图 9-11 中，假定 A 相通电时，转子轴上承受向左的（逆时针）负荷力矩 M_L ，其对应的失调角为 θ_M ，也就是转子齿与 A 相定子齿不在平衡位置 1 对齐，而是左移到点 2 上。当 A 相断电， B 相通电时，步进电机的转子应向右走一步，相当于电气步距角 α_e ，按理应该从 1 点走到 1' 点，由于有负载力矩 M_L 的作用，现在是从 2 点起步。在由 A 相转移到 B 相的一瞬间，当失调角为 θ_M 时， B 相的静力矩为 M_b ，显然 $M_b > M_a$ 。也就是往右拉的力矩超过了往左的负载力矩。这当然是好事，因为步进电机转子有一定的转动惯量 J ，它的

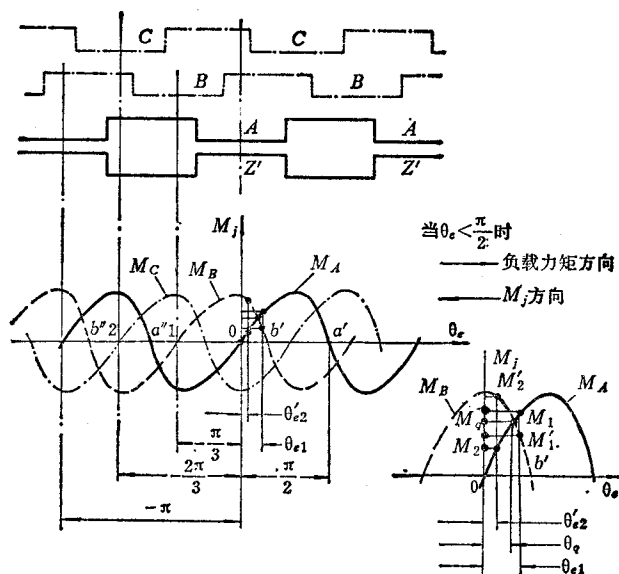


图 9-10 起动力矩 M_q

负载也有转动惯量，我们可以把它折算到步进电机的轴上去，设为 J_z ，并令 $J_0 + J_z$ 等于 J 。当转动惯量 J 一定时，往右作用的力矩愈大，转子的动作愈快，而且是加速的。由于转动惯量在起作用，往往会冲过头，不仅过 $2'$ 点，甚至可以超过 $1'$ 点，这种现象称之为超调，过头的部分 α_1 叫超调量。从图 9-11 可以看出，过了 $1'$ 点之后， B 相磁场的静态力矩要和负载力矩 M 一起把转子向左拉，结果又冲过头，但第二次超调量 α_2 比第一次的超调量 α_1 要小得多，这样来回摆几次之后，在 $2'$ 点停下来。在转子由起动—加速—振荡—静止的过程中，还有阻尼力矩在参加作用。例如，当转子带动随动阀的阀芯旋转时，阀芯与阀套之间的粘性摩擦力矩与运动速度成比例，其方向始终与转子的运动方向相反。图 9-11 的下部曲线，称为步进电机运行时的过渡过程。纵坐标 θ 应该是机械失调角，横坐标 t 是时间。根据动力学原理可以列出一部运行时的微分方程式为：

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + K \frac{d\theta}{dt} + M = M_b \quad (9-7)$$

式中 J ——是转子上的转动惯量；

$\frac{d^2\theta}{dt^2}$ ——表示角加速度；

K ——是阻尼系数；

$\frac{d\theta}{dt}$ ——是角速度；

$K \frac{d\theta}{dt}$ ——表示摩擦力矩；

M ——负载力矩；

M_b —— B 相磁的作用力矩，它是 θ 的函数；

θ ——机械失调角；

t ——时间。

把这个微分方程解出来，就得到 $\theta - t$ 之间的过渡过程曲线。这里有几个名词要说明一下，它们能表示动态过程的特点：

超调量——图中指 α_1 ；

振荡次数 n ——图中为两次（两个周期）；

时间常数 T ——从起始点开始作一切线，此切线与最终位置 $2'$ 之交点所对应的时 间，

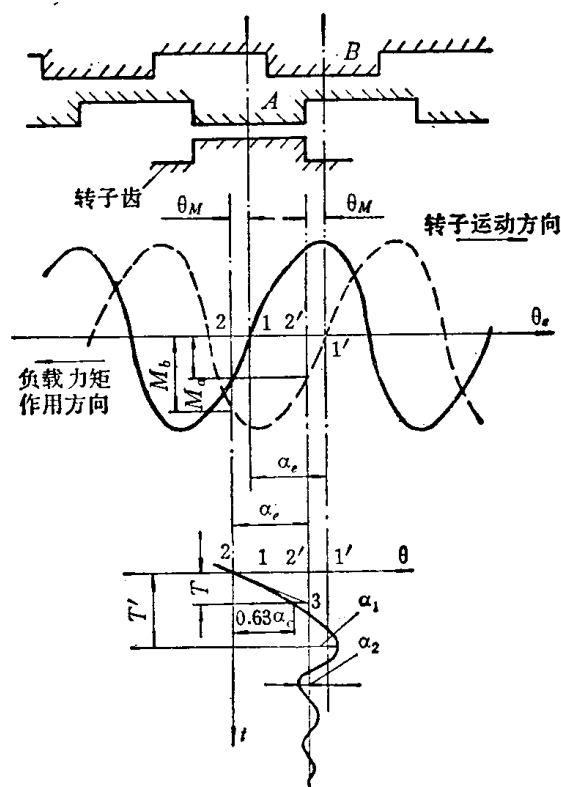


图 9-11 步进电机的一步特性

它体现了上升过程的快慢,在此时间 T 内,转子走过步距角 α_s (即 $22'$ 段) 的 63%。

我们不希望步进电机有振荡过程,因为它会影响加工质量,甚至引起系统的振动,而希望它单调的上升,即超调量 α_1 和振荡次数都等于零或者尽量的小。这一点可以通过合理地设计系统,增加步进电机的阻尼等办法来达到。

当脉冲频率增加时,例如若两相之间的电流切换时间小于 T' 时,则步进电机来不及回头又往前拉了,这就是步进电机的连续运转状态。

从图 9-11 可以看出,步进电机在每走一步时,都有振荡现象,它有一个自振频率 f_0 ,在工作过程中,如果输入脉冲频率也等于 f_0 ,就要产生共振,使超调量增大,超出动稳定区引起丢步。防止的方法是增加定子相数,改变通电方式,使动稳定区增大。

第三节 步进电机和电液脉冲马达的使用特性

从使用角度来看,我们最关心的是步进电机和电液脉冲马达的如下特性:

1) 输出功率 N : 随功率步进电机和伺服步进电机而不同,但在一般产品目录中不单独列出,而往往给出输出扭矩。

2) 步距角 α : 每输入一个脉冲,步进电机的转角。

3) 最高工作频率 $f_{\max}$: 步进电机在连续运转时,能接受的最高工作频率,单位为赫,即每秒钟内能接受的最高脉冲数。 $f_{\max}$ 直接影响到工作台移动时的最大速度。

对电液脉冲马达来说,它表示电液脉冲马达在 $\frac{1}{3}M_{\max}$ 下 ($M_{\max}$ 为最大负载转矩),所能达到的最高转速,及其对应的连续输入给步进电机的最高频率。例如,对 DMY2.5-A 型电液脉冲马达,其最高速可达 2000 转/分,此时的最高频率为 8000 赫。显然这里不仅要考虑步进电机可能接受的最高频率,还要考虑到电液脉冲马达控制滑阀的可靠工作能力。

必须指出,最高工作频率是不能突然加上去的。因此在控制电路上,要考虑到使转速逐渐加大到最大值,或由最大值逐渐减小到所需要的速度。

4) 突跳频率 f_q : 突跳频率又称起动频率,它是步进电机由静止状态,突然起动到稳速时所允许的最大脉冲频率。它体现为工作台运动的灵敏性。很显然,起动频率与步进电机的惯性、负载有密切关系,惯性量 J 增大, f_q 要减低,如图 9-12(a) 所示。

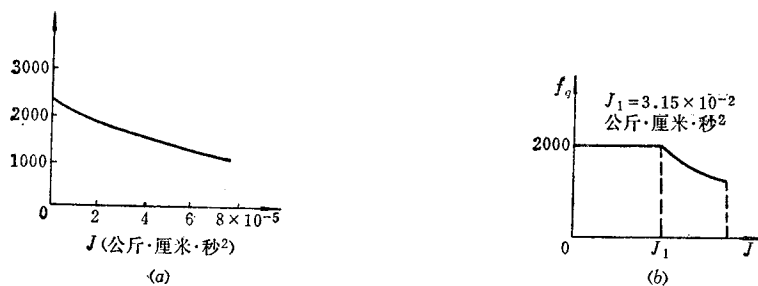


图 9-12 起动频率与惯性负荷之间的关系

对于电液脉冲马达来说,突跳频率的大小,主要指步进电机的突跳频率。单就液压系统而言,突跳频率还可达到更高的数值。同样电液脉冲马达的频率也与其惯性量及负载有

直接关系。如 DMY-1.5A 型电液脉冲马达，当所驱动的惯性负载小于 J_1 时，突跳频率可达 2000 赫。而当惯性负载大于 J_1 时，随着惯性负载的增加，突跳频率将急剧下降。如图 9-12(b) 所示。

5) 输出扭矩 M_a ：它是指步进电机所能带动的负载转矩，其单位是克·厘米或公斤·米。 M_a 与脉冲频率有关。脉冲频率增高之后，定子绕组中的激磁电流来不及升上去，从而使输出扭矩 M_a 降低，如图 9-13(a) 所示。

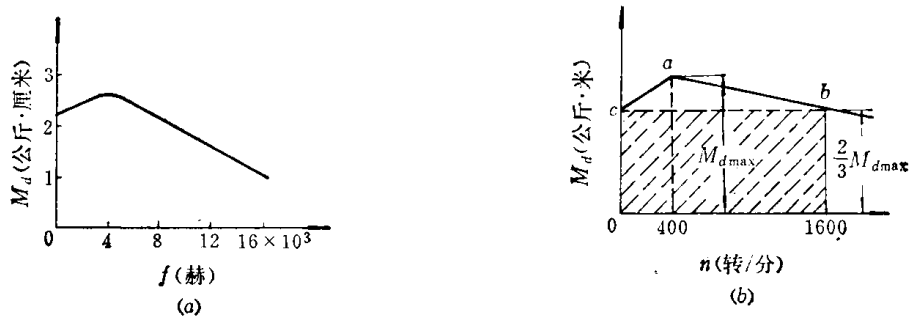


图9-13 输出转矩与频率（或转速）的关系

对电液脉冲马达来说，此转矩就是油马达的输出转矩，它随油马达的转速（此转速与步进电机的输入脉冲频率成正比）变化而变化，两者之间的关系如图 9-13(b) 所示。此曲线为 DMY-2.5A 的实验曲线。即当油源压力为 63 公斤/厘米^2 ，在最大输出扭矩 $M_{\max}$ 为 2.5 公斤·米时，其转速为 400 转/分。此时步进电机接受的频率为 2000 赫。实验表明，实际输出扭矩 $M_{a\max}$ 在图中 a 点左边，因而 M_a 随转速减小而减小。这是因为油马达在低转速时，阀芯相对于阀套的开口量小，油液流经油马达时，压力损失较大，即油马达高低压两油腔压力差较小，所以油马达输出扭矩就小。而在 a 点的右边， M_a 随转速 n 的增大亦减小。这是因为通过油路的流量加大，流速加大，使沿流程的损失加大，同样使高低腔的压力差减小，使油马达输出的扭矩也减小。因此从使用的可靠性出发，一般电液脉冲马达的实际使用范围是在 b c 连线以下，这时输出扭矩为 $M_{\max}$ 的三分之二。

对调整、对刀、定位较频繁的数控机床，对电液脉冲马达的低速负载特性要特别注意。因为在这些工作过程中，往往要发出单个脉冲，使工作台移动很小的距离，这时因为滑阀的开口量很小，若低速负载特性不好，往往会由于流程的损失和泄漏造成丢步和“闷车”的现象。

6) 转角误差 δ_a ：通常转角误差为 $\pm 0.2\alpha$ ，其中 α 为步距角。 δ_a 对电液脉冲马达来说，它是指输入一个控制脉冲时，油马达所转动的角度的精度。对 DMY-A 型电液脉冲马达来说，一般为 $0.2^\circ \sim 0.4^\circ$ 。

7) 允许负载的转动惯量 J_a ：这是指整个系统折算到步进电机轴上的转动惯量，也包括转子本身的转动惯量。

8) 加减速特性：它表示步进电机在加减速过程中，控制脉冲频率的变化与时间的关系。通常是以步进电机加减速时间常数来衡量。时间常数愈小，输出转速的转换愈快。

第四节 步进式拖动系统的设计方法及步骤

进行系统设计时，可按以下步骤进行。

1) 根据加工精度要求确定脉冲当量 δ_p (毫米/脉冲)。脉冲当量小可提高加工精度，但使系统复杂。一般加工精度在 0.1~0.02 毫米的数控铣床，钻镗床， δ_p 可选为 0.01 毫米/脉冲。精度要求较高的坐标镗床、钼丝锯等数控机床，可选 δ_p 为 0.001~0.0025 毫米/脉冲，以保证 0.01~0.005 毫米的控制精度。

2) 根据进给功率 N_f ，选定步进电机类型。例如加工直径为 400 毫米的数控车床，其溜板可用功率步进电机直接带动，也可以用电液脉冲马达来驱动。

3) 根据快速进给速度 S_k 确定步进电机之最高工作频率 f_{max} 。

$$f_{max} = \frac{1000}{60\delta_p} S_k \quad (9-8)$$

例如：设脉冲当量 $\delta_p = 0.01$ 毫米/脉冲

$S_k = 2$ 米/分，求 f_{max}

$$f_{max} = \frac{1000}{60\delta_p} S_k = \frac{1000 \times 2}{60 \times 0.01} = 3.33 \text{ 千赫}$$

4) 根据走刀抗力 P_s 及摩擦力 P_f 确定步进电机转轴上的负载力矩 M_d ，如图 9-14 所示。

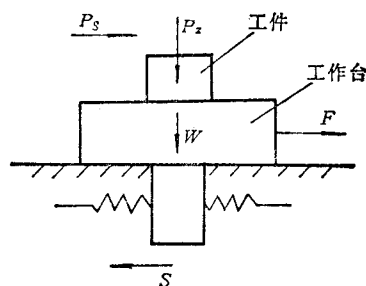


图9-14 工作台受力分析

$$P_f = \mu (W + P_z), \text{ 公斤}$$

式中 W ——工作台重量（包括工件、夹具的重量在内）公斤；

μ ——摩擦系数，可按表 9-2 查用；

P_z ——垂直方向的切削力，公斤。

表9-2 各种导轨材料的摩擦系数值

导轨种类	导轨材料	工作状态	摩擦系数 μ
滑动导轨	铸铁-铸铁	起动时	0.16
		低速时	0.1~0.12
		润滑良好快速	0.05~0.08
滚动导轨	铸铁导轨-滚柱		0.005~0.02
	滚珠		一般取 0.01
	淬火钢导轨-滚柱		0.03~0.008
滚珠			
静压导轨	铸铁-铸铁		0.0005左右