

插补原理

沈阳机电学院 李恩林 编著

机械工业出版社

插 补 原 理

沈阳机电学院 李恩林 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书论述数控机床用的各种插补原理。内容有：数字脉冲相乘法、逐点比较法、最小偏差法、数字积分法、目标点跟踪法、单步追踪法、高次曲线插补法、更高次曲线插补法、加密判别和双判别插补法，还有信息输入、插补运算的控制、偏差计算公式的实现以及刀具半径自动偏移计算等。此外，还简要介绍了用微型机实现插补计算的程序。

本书可供从事数字控制技术和控制机研制及计算机应用方面的工程技术人员阅读，高等院校有关专业师生也可参考。

插 补 原 理

沈阳机电学院 李恩林 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $10^{2/16}$ · 字数 264 千字

1984 年 3 月北京第一版·1984 年 3 月北京第一次印刷

印数 0,001—6,500 · 定价 1.55 元

*

统一书号：15033·5548

前 言

数字控制技术是自动化的一种主要手段，它综合了计算机、自动控制和精密测量等方面的新成就，是一门新的学科。数控机床的出现，为生产过程自动化和电气化开辟了广阔的前景。它是改变生产方式、减轻劳动强度、提高生产率和产品质量的重要而强有力的工具。

数控机床之所以能有条不紊自动地工作，原因之一是控制机能进行插补运算，能简单又方便地加工出形状复杂的工件。插补的方式，直接影响到数控机床的性能和指标以及产品的质量。

编写本书的目的，是为了适应数控机床发展的需要，提供可采用的插补方式，以充分发挥控制机的作用。

由于本人水平与经验所限，书中一定存在有不少缺点，甚至错误，恳请读者批评指正。

李恩林

目 录

前言

第一章 控制机发展的基本概况 1

1-1 控制机的基本概念 1

1-2 控制机的发展趋势 3

1-3 控制机的类别 7

第二章 数字脉冲相乘法插补原理 10

2-1 数字脉冲相乘法的基本原理 10

一、概述 10

二、分频器 10

三、数字脉冲相乘法基本原理 14

2-2 单坐标插补原理 18

2-3 两坐标插补原理 18

2-4 多坐标插补原理 21

2-5 中和电路 21

2-6 数字脉冲相乘法插补速度分析 24

一、直线插补的插补速度 24

二、空间直线插补的插补速度 25

2-7 数字脉冲相乘法稳速控制 26

一、按速度比例系数(FRN)选择速度代码F 26

二、用进给脉冲源控制指令脉冲输出 27

2-8 总体逻辑结构 29

2-9 数字脉冲相乘法插补的误差 31

第三章 逐点比较法插补原理 35

3-1 概述 35

3-2 直线插补 36

一、加工偏差公式 36

二、偏差计算 38

3-3 直线插补的计算程序及逻辑图 41

3-4 圆弧插补 46

一、加工偏差公式	46
二、偏差计算	47
3-5 圆弧插补的计算程序及逻辑图	51
3-6 插补计算与顺圆、逆圆、象限的关系	55
3-7 逐点比较法典型逻辑电路	62
3-8 过象限指令的自动修改	64
一、检零	65
二、指令的修改	68
三、变补	69
3-9 终点判断	71
3-10 逐点比较法插补速度分析	74
一、直线插补的合成速度	74
二、圆弧插补的合成速度	75
3-11 逐点比较法的稳速控制	75
第四章 最小偏差法插补原理	81
4-1 直线插补	81
一、第一种插补方法	81
二、第二种插补方法	86
三、插补运算表	87
4-2 圆弧插补	91
一、第一种圆弧插补法	91
二、第二种圆弧插补法	99
三、误差分析	101
4-3 空间直线插补	104
4-4 进给速度控制	105
第五章 数字积分法插补原理	107
5-1 数字积分器的构成	107
一、概述	107
二、基本原理	107
5-2 直线插补	112
一、数字积分法直线插补	112
二、比值积分法直线插补	116

5-3 圆弧插补	119
5-4 空间直线插补	124
一、空间直线插补原理	124
二、空间直线插补的逻辑电路	127
5-5 减小插补误差的方法	128
5-6 溢出和终点判断	133
一、溢出	133
二、终点判断	134
5-7 左移规格化	135
一、直线插补的左移规格化	135
二、圆弧插补的左移规格化	143
5-8 缓冲寄存器	143
一、用 J-K 触发器组成的缓冲寄存器	145
二、用 R-S 触发器组成的缓冲寄存器	146
5-9 积分法插补速度分析	147
一、直线插补的插补速度	147
二、圆弧插补的插补速度	149
三、空间直线插补的插补速度	150
四、左移规格化引起的速度变化	152
5-10 稳速控制	152
一、比值积分法的稳速控制	152
二、数字积分法的稳速控制	154
第六章 目标点跟踪法插补原理	158
6-1 直线插补	158
6-2 圆弧插补	159
6-3 各种二次曲线插补	161
6-4 插补运算流程图	164
6-5 向复合曲线方面的扩展	169
第七章 单步追踪法插补原理	172
7-1 直线插补	172
7-2 圆弧插补	179
7-3 单步追踪法插补计算与顺圆、逆圆、象限的关系	182

第八章 高次曲线插补原理	189
8-1 高次曲线插补的描述	189
8-2 抛物线插补	191
8-3 任意二次曲线的插补	195
8-4 三次曲线插补原理	203
一、数字积分法的扩展	203
二、理想脉冲分配法插补三次多项式曲线	205
8-5 更高次曲线插补原理	212
8-6 用计算机实现插补的软件	219
一、应用高级语言的软件	220
二、应用机器语言的软件	222
第九章 加密判别和双判别插补原理	229
9-1 加密判别插补原理	229
一、加密判别插补原理的判别式	229
二、加密判别插补逻辑图	230
9-2 双判别插补原理	233
9-3 双判别插补原理判别式	233
第十章 插补器的信息输入	236
10-1 概述	236
10-2 信息输入	236
一、手动输入	236
二、光电输入	237
10-3 信息的编码和传送	244
一、信息的编码	244
二、信息的传送	247
10-4 信息的输入	248
10-5 输入检查	252
一、代码检查	252
二、奇偶横校验	253
三、奇偶纵校验	256
10-6 信息的译码	256
一、数字代码	257

二、速度代码	258
三、坐标平面	258
四、指令代码	258
五、曲线代码	260
10-7 十翻二运算	261
第十一章 插补运算的控制	264
11-1 控制器结构	264
11-2 时标脉冲发生器	267
11-3 时序脉冲分配器	269
11-4 运算脉冲发生器	274
11-5 节拍脉冲发生器	279
11-6 节拍脉冲启动器	280
11-7 进给脉冲发生器	282
第十二章 偏差计算公式的实现	283
12-1 输入运算步骤	283
一、直线插补的输入运算	283
二、圆弧插补的输入运算	285
12-2 插补运算中所用的主要逻辑部件	286
一、半加器	286
二、全加器	286
三、半减器	287
12-3 插补计算公式的实现	288
一、 $x + 1 \rightarrow x$ (或 $y + 1 \rightarrow y$) 的运算	288
二、 $F + x \rightarrow F$ (或 $F + y \rightarrow F$) 的运算	291
三、乘 2 运算	292
四、 $F + 2x + 1 \rightarrow F$ (或 $F + 2y + 1 \rightarrow F$) 的运算	294
五、减法运算	294
第十三章 刀具半径自动偏移计算	301
13-1 刀具半径自动偏移计算问题的提出	301
13-2 刀具半径自动偏移计算原理	301
13-3 刀具偏移指令	305
一、U 指令	305

二、M指令	305
三、T指令	305
四、Z指令	305
五、W指令	306
13-4 光滑轮廓线的刀具半径自动偏移计算	306
一、圆弧	306
二、直线	307
13-5 非光滑轮廓线的刀具半径自动偏移计算	308
13-6 自动偏移计算的逻辑运算框图	309
参考文献	314

第一章 控制机发展的基本概念

1-1 控制机的基本概念

随着我国四个现代化的需要，机械产品的形状和结构不断地改变，这就要求机床设备具有较大的灵活性和通用性，以适应生产对象的频繁变化。特别是象宇航、人造卫星、导弹、船舰、武器生产等国防工业部门，一些批量不大、改型频繁、精度要求高、形状又很复杂的零件的加工，如何降低劳动强度，提高产品质量和生产效率，成为迫切需要解决的问题。为此，机械加工方法和机床设备必须作相应的变化。另外，不断提高机床的生产效率和自动化程度，始终是机床工业发展的重要方向之一。

数字控制机床（简称数控机床）是近三十多年来新发展起来的一种高效自动化机床，是机床自动化方面一个新的、重要的发展方向。它的出现，为解决上述问题提供了广阔的前景。

数控机床就是把对机床的各种操作（如主轴起停、换刀、冷却液的开关等）、操作要求（如主轴转速、进给速度等）和控制的尺寸（如轨迹等）都用数字的形式表示出来，把这些数字通过信息载体（如穿孔纸带、穿孔卡、磁带等）送给专用的电子计算机（或称控制机），经过计算机的运算，发出各种指令，控制机床按照人们预先要求的操作顺序依次动作，自动地进行加工。数控机床是随着电子计算机和电子技术的发展而产生的，并综合地应用了计算技术、自动控制、精密测量等方面的新成就而使电子技术与机械制造完美地结合起来。

控制机就是一台专用的电子计算机，是数控机床的核心部分。数控机床与普通机床不同，除了主机外，还有一台控制机。它是用一种完全新型的办法来工作的。首先将图纸上要加工的形状用直线、圆弧、抛物线或高次曲线进行分段，按各段程序的指令和

数据编写程序单,然后用穿孔机把它打在穿孔带上,把这条穿孔带装到控制机的光电阅读机上,启动以后控制机开始工作,逐段进行输入计算和插补计算,计算结果以脉冲形式去控制伺服机构,驱动机床,使刀具和工件作精确的符合图形各段程序要求的相对运动,从而加工出所需要的零件。

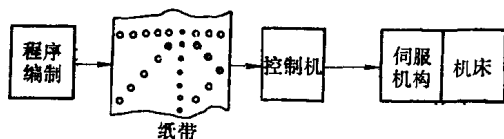


图1-1 数控机床框图

图1-1是数控机床框图。它包括:程序编制、纸带、控制机、伺服机构和机床(或其它生产机械)。

为使刀具与工件表面的相对运动轨迹符合工件轮廓的要求,数控机床是采用逼近轮廓的方式,比如在 xy 平面中加工一段直线 OA (图1-2),不是直接从坐标原点 O 严格不变地直接走到 A 点,而是控制机产生一系列脉冲,每一个脉冲通过伺服机构控制机床工作台或工件沿 x 轴或 y 轴走一步。这一步的相当位移量,称为脉冲当量。用阶梯折线从 O 点逼近到 A 点,逼近的误差大小不同,图1-2中列举①、②、③三种逼近 A 点的情况。显然,第①种逼近的误差最小,即阶梯折线分段越密,逼近得越真实。控制机的主要功能是进行插补计算。具体地说,插补计算就是控制机根据输入的基本数据,通过计算,把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脉冲。对应着每一个进给脉冲,机床在相应的坐标方向上移动一个脉冲当量的距离,而将工件加工出所需轮廓的形状。所以说,插补就是在一个线段的起点和终

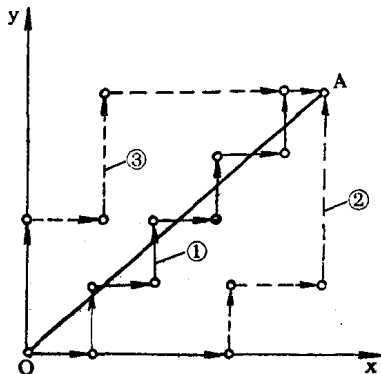


图1-2 阶梯折线逼近直线

主要功能是进行插补计算。具体地说,插补计算就是控制机根据输入的基本数据,通过计算,把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脉冲。对应着每一个进给脉冲,机床在相应的坐标方向上移动一个脉冲当量的距离,而将工件加工出所需轮廓的形状。所以说,插补就是在一个线段的起点和终

点之间进行“数据密化”的工作，用一个个脉冲的输出把起点和终点之间的空白填补起来，且逼近的误差值要小于一个脉冲当量。能进行插补运算的装置叫作插补器。插补器所具备的功能如下：

(1) 能进行插补运算，按给定的程序数据产生一定的函数曲线，并以增量的形式向各坐标连续输出，控制机床刀具相对于工件的连续运动。插补运算所需的数据应最少，插补结果没有累积误差。

(2) 能按照一定的比例关系自动地控制各坐标的运动速度，保持沿曲线的切向走刀速度不变。

(3) 能进行刀具半径的自动偏移计算，自动地由工件轮廓算出刀具中心的运动轨迹。

(4) 能产生机床加工过程中必需的辅助操作机能，例如主轴和冷却泵的起停、中断控制等。

能进行直线方程运算的插补器称直线插补器。同理还有圆弧插补器、抛物线插补器和高次曲线插补器。由于直线是一次方程，圆弧和抛物线是二次方程，高次曲线是高次方程，因此又有一次插补器，二次插补器和高次插补器之称。实际上，工件图形可能是一个任意曲线，而控制机只能进行直线、圆弧、抛物线和高次曲线插补，因此我们往往将这个任意曲线分成若干小段，其分段的分界点叫基点（如图 1-3 中的 B、C、D 等），然后在两基点

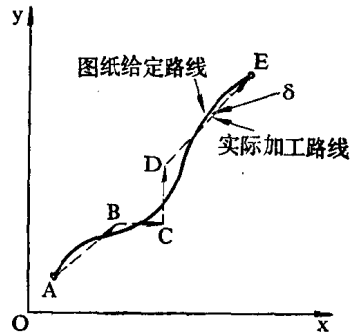


图1-3 任意曲线分段插补

间再用直线、圆弧、抛物线或高次曲线去逼近它，使插补的线段与图纸给定的线段误差小于一个脉冲当量 δ 。

1-2 控制机的发展趋势

世界上第一台数控机床是美国人帕森斯(PARSONS)在麻省

理工学院的协助下于 1952 年研制成功的。当时是控制三坐标铣床，使用的元件是电子管，采用数字脉冲相乘法插补原理。继此之后，近三十年来各国都在大力开展数控机床的研制工作，并取得了很大的进展。我国从 1958 年开始进行研制，在发展全功能数控机床的同时，又推广了简易数控，在插补理论的研究工作中，我国也取得了相当大的成就。今后数控机床的发展趋势是：

1. 加工中心化(MC)

加工中心机床又名自动换刀数控机床，它的最大特点是机床上有储存各种刀具的刀具库和自动换刀装置，并能自动转换工件的位置。这样就可以使工件在一次装卡条件下完成钻、镗、绞孔、攻丝和铣平面等工作，最适于加工箱体类外壳零件，可以提高工效几倍甚至十几倍。

2. 计算机控制系统(CNC)和直接数控系统(DNC)

随着生产的发展，要求数控系统具有更大的灵活性，特别是中小型工厂希望数控系统既能用于车床控制，也能用于镗铣床、加工中心等机床的控制，还要求数控系统价格低廉。电子工业的发展，使中小型通用计算机的价格降低，产量也急剧增加，这样就出现了采用通用计算机控制机床的系统，使控制系统具有很大的灵活性。

计算机控制系统的特点是用一台小型通用计算机来控制一台机床。在常规数控系统中，要扩大控制机的功能和应用范围，就必须更换和附加一定数量的插件板和修改框架接线。这项工作对于用户来说，往往十分麻烦，有时很困难，甚至是很难办到的。采用计算机控制系统，则很容易达到上述要求。例如计算机控制的两坐标车床，如果要把它改装成控制五坐标的加工中心，那么，只要另外插上三个伺服回路的插件板，在操作面板上增加一些必要的开关，然后向计算机的存储器写入加工中心用的操作程序就行了。

直接控制系统的特点是利用一台中央通用计算机集中地控制一群机床。计算机的作用是指挥每一台机床的操作，向它们提供

必要的控制用数据。这种由一台计算机控制多台机床的系统又称为群控系统。

3. 微型化

随着大规模集成电路的发展,用几片集成电路就可组成一台控制机。特别是微型计算机的发展,用微型计算机来代替控制机已成为现实。将使控制机由硬件逻辑过渡到微型机数控(MNC)。

4. 自动编程及简易编程语言

在使用数控机床中的一个很关键的问题是能否及时而正确地编制好加工用的程序。简单零件的程序编制可以由人工完成,但对于形状比较复杂的零件,数字运算的工作量大,花费时间长,且容易出错。因此需要由通用计算机来帮助编制程序,即自动编程。为此,国外发展了各种自动化编程语言,如APT,EXAPT等。自动编程的主要工作量由计算机完成,而人工只需根据零件图纸及加工工艺要求,按程序语言填写源程序单,通过计算机来帮助编程。这样效率高,差错少,出错后也容易查找和修改。将自动编程得到的穿孔纸带,再输入到自动绘图机中便得到了工件的图形,从而进行自动检验。虽然APT语言是使用最广的,但它需要使用容量64k以上的大型计算机,对中小工厂不适用。为此,各国着手研究简化编程问题,发展了简易编程语言。如法国ADEPA研制的PROMO语言系统,基本设备只需一台电传打字机和一台存储容量为8~16k的小型计算机。编程时用键盘或纸带阅读机输入数据,计算机自动进行刀具轨迹运算,自动打出控制纸带。这种语言可以处理机械加工中大部分零件的编程问题。

为了进一步简化编程工作,近来国外发展了由图纸直接编程的技术,采用一种自动曲线跟踪和编程设备ALTape,将零件图放在这种设备的工作台上,编程时,用一个装有电视摄像机和光学元件的跟踪头对图上的曲线连续跟踪,通过计算机将所得信息瞬时数字化并计算出走刀轨迹。这种方法特别适用于不易用数学定义的平面零件。

近来还发展一种小型编程用计算机,主要用来编制由直线、

圆弧组成的平面零件。只要向计算机输入少量描述零件几何外形和走刀顺序、刀具尺寸等指令，即可计算出零件实际轮廓的等距线，并打在纸带上。然后再输入少数工艺参数指令作后置处理，即可打出直接插补系统所用的程序纸带。并可通过与计算机连接的绘图仪来检验纸带是否正确。

除此之外，也已制成用语言直接编程的系统，该系统可接受简单的指令，如钻、切割、 xy 坐标等，自动编成代码并输出到穿孔纸带。编程前先按下训练码按钮，操作人员用计算机词汇重复指令十次，这些指令由系统处理，存储在计算机存储器中。操作时按下声音识别按钮，并对系统说话，计算机分析这些声音，和以前存储的词汇对比，将指令打入穿孔纸带。

5. 自适应控制系统

自适应控制是将机床加工过程中的一些参数（例如加工材料的性能、切削力、切削温度、主轴扭矩等）反馈至控制机中，控制机根据加工条件、加工材料等的变化自寻最优的加工用量，使加工始终处于对机床和工件都较合适的最佳状态。这种方式的优点是可以在编程人员没有考虑到的加工过程发生各种变化时，机床自动维持最高生产率，例如刀具磨损时可自动补偿，当刀具变钝而切削力增加时进给速度会自动降低；而当刀具暂时离开工件时，可暂时加快进给速度，直至刀具进入另一材料为止。简而言之，凡能测量实际加工过程的特性，并能利用其测量结果来校正控制机的输入值的系统就是自适应控制系统。

6. 改革伺服驱动系统

六十年代中期以前，数控机床大部分采用电液伺服驱动系统。六十年代末期就已被电气伺服驱动系统（步进电机）所取代。七十年代以来开始采用宽调速直流伺服电机的伺服系统。这种伺服系统的优点是调速范围宽（可达1:30000）、过载能力强（最大力矩为额定力矩的5~10倍）和低速扭矩大，可直接驱动丝杠，取消齿轮减速箱，从而大大简化机床结构以及安装维护方便等。对机床的进给机构可以给出极快的定位速度和较高的定位精度。近

年来国外又发展了功率晶体管脉宽调制 (PWM) 宽调速直流伺服系统, 可使位置回路增益和响应频率进一步提高, 使机床具有更快的定位速度和更高的加工精度。

另一方面, 可用大功率晶体管器件做成高频逆变器, 以取代直流电机的电刷, 使异步电动机在很大范围内进行调速。交流伺服系统的优点是无整流子、无电刷、维护简便、调速范围广、高转矩、低惯量, 既可用于开环控制, 也可加上检测装置组成闭环伺服系统。

1-3 控制机的类别

控制机的种类虽然很多, 但可以按下述五个原则进行分类:

1. 按加工轨迹来分

(1) 点位数控系统

点位数控系统是对给定的中心点进行自动定位, 工作台运动期间不进行切削加工, 工作台到达位置后才进行加工。工作台在运动中刀具与工件不接触, 运动路线不影响加工情况。如数控钻床、数控镗床和数控冲床等均属点位数控系统。

(2) 直线数控系统

直线数控系统能控制刀具沿某一个坐标轴进行加工。用于钻床、镗床、铣床、车床和加工中心机床, 能进行孔的中心定位和直线切削 (如加工台阶轴)。

(3) 连续 (轮廓) 数控系统

连续数控系统也称轮廓数控系统, 这种系统的特点是能进行插补计算。在加工过程中, 刀具对工件连续不断地作相对运动, 对刀具的运动轨迹要严格控制, 以满足加工各种几何形状的成型零件的要求。如数控铣床、数控车床和数控磨床等均属连续数控系统。

2. 按运算方式来分

(1) 数字脉冲乘法器 (MIT)

(2) 逐点比较法