

现代机电控制系统

# 现代机电控制系统

李诚人等 编著

**MMCS**

Modern Mechatronics Control System



西北工业大学出版社



士

T1-39

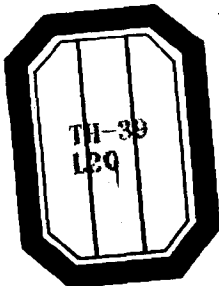
465592

# 现代机电控制系统

李诚人 李启瑞 编著  
王森 王宁



00465592



西北工业大学出版社  
1999年11月 西安

## (陕) 新登字 009 号

**【内容简介】** 本书介绍了现代制造业普遍使用的几种机电控制系统,包括数控系统、可编程控制系统、生产线控制和物流控制系统等。在数控系统中,提出了实时操作系统概念以及用信息流方法分析闭环和开环数控系统的原理。另外,数控化改造、数控生产线控制和物流自动化等内容在目前出版物中尚不多见,值得借鉴。

本书适合现代制造业从事机电控制的工程技术人员使用,也可作为相关专业本科生、研究生的专业教材。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

现代机电控制系统/李诚人等编著. -西安:西北工业大学出版社, 1999. 11  
ISBN 7-5612-1170-8

I. 现… II. 李… III. 机电一体化-控制系统 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 48644 号

\*

©1999 西北工业大学出版社出版发行

(邮编: 710072 西安市友谊西路 127 号 电话: 8491147)

全国各地新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

\*

开本: 787 毫米×1 092 毫米 1/16 印张: 15. 125 字数: 368 千字

1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1—4 000 册 定价: 22. 00 元

购买本社出版的图书, 如有缺页、错页的, 本社发行部负责调换。

# 前 言

70年代末，当我开始接触计算机数控这一典型机电控制系统的时候，世界上第一套CNC A-B 7300系统还刚问世不久。80年代初在做硕士论文时，我们有3位“老五届”的室友在彭炎午教授指导下以分析7300系统软件为题，整整花了一年半时间，方才把CNC的原理搞清楚。后来，我和吴武贤先生将分析报告整理出来，形成《机床计算机数控》正式出版。转眼间，该书出版已10年。10年间，现代机电控制技术有了飞速发展，出现了以计算机集成制造(CIM)为代表的高新技术。机电一体化装置已从单机的机电自动化向开放、集散、智能的信息化和网络化发展。因此，本书在吸取《机床计算机数控》一书成果的时候，重新以信息化、系统化的眼光加以审视，着重在基本原理、系统结构、总体分析方面予以加强，以期得到一个计算机数控的整体概念。本书在编排上仍以数控系统作为主线来安排，通过对这个典型的机电系统的剖析以了解现代机电控制系统的基本知识。

除了数控系统以外，本书还增加了可编程控制系统、生产线控制和物流控制系统。被称为“第二类生产”的物流系统是近几年在国内迅速发展起来的机电控制系统，具有现代机电控制的明显特征。

本书第一章集中了计算机数控的一些基本问题，包括数控机床的集成技术、工艺基础、软件基础和控制基础。其中，软件基础部分首次提出数控实时操作系统的概念，对于系统的掌握数控原理有很大价值。随着CIM技术的发展，本章最后一节讨论了集成制造环境下的数控系统，指出目前流行的数控系统存在的不足之处及未来的发展方向。

第二章讲述了计算机数控的整体硬件结构。“硬件是基础，软件是灵魂”，从总体角度上讲清数控机床的硬件结构对理解数控系统原理会有极大的帮助。

第三、四章是全书的重点，主要讲述数控机床主运动（即坐标轴运动）的信息流动，首次从信息流角度分析了闭环和开环数控系统的原理。如果说第二章是从硬件角度讲述数控原理，那末这两章主要从软件角度分析数控机床的工作机理。如将两者结合起来，将对掌握全书的内容起决定性作用。

第五章可编程控制器主要分析辅助运动的工作原理。

第六章数控化改造是目前在国内兴起的新领域，通过本章的学习可以加深对数控系统基本原理的理解，亦是总体分析及应用的一个实例。

第七章讨论了数控生产线的控制与管理，这方面的论著较少，在此仅起一个抛砖引玉的作用，想引起同行的关注。

第八章讨论了物流系统的组成、控制和管理。

本书由李诚人主编，其中，第二章、第六章编写人为李诚人、李启瑞、王森；第八章编写人为李诚人、王宁；其余各章均由李诚人编写。

在此要感谢昆明船舶设备集团有限公司物流所为第八章的编写提供大量资料和图片。感谢研究生黄新明、朱志伟、杨琳怡，第七章主要根据他们的硕士论文编写而成。在此还要感谢《机床计算机数控》的另一作者吴武贤先生，本书从《机床计算机数控》一书中吸取许多有益思想和内容。西北工业大学 3451 班王学根、王力虎、王武民在本书计算机绘图中给予大力协助，在此一并致谢。书中如有疏漏和错误，恳请读者批评指正。

本书的编写和出版，一直得到西北工业大学出版社的热情支持，特别要感谢王夏林先生在策划组织和出版本书中付出的辛勤劳动。

李诚人

1999年6月于西北工业大学

Tel: (029) 8491413

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第一章 计算机数控的理论基础</b> .....  | 1   |
| § 1-1 数控机床集成技术 .....         | 1   |
| § 1-2 工艺基础 .....             | 4   |
| § 1-3 控制基础 .....             | 7   |
| § 1-4 软件技术基础 .....           | 23  |
| § 1-5 集成制造环境下的数控系统 .....     | 33  |
| <b>第二章 计算机数控的硬件结构</b> .....  | 36  |
| § 2-1 总体框图 .....             | 36  |
| § 2-2 数控柜和伺服、机床电气柜的联系 .....  | 44  |
| § 2-3 面板、键盘和 RS 232 .....    | 51  |
| § 2-4 机械结构 .....             | 56  |
| <b>第三章 闭环系统信息流</b> .....     | 67  |
| § 3-1 零件加工程序 .....           | 67  |
| § 3-2 译码 .....               | 70  |
| § 3-3 数据处理 .....             | 73  |
| § 3-4 插补 .....               | 81  |
| § 3-5 伺服控制 .....             | 84  |
| <b>第四章 开环系统信息流</b> .....     | 89  |
| § 4-1 速度计算和插补程序 .....        | 89  |
| § 4-2 开环伺服系统 .....           | 99  |
| § 4-3 开环系统的信息流 .....         | 115 |
| § 4-4 经济型数控的闭环控制 .....       | 116 |
| <b>第五章 可编程控制器 (PC)</b> ..... | 126 |
| § 5-1 概述 .....               | 126 |
| § 5-2 数控机床用 PC 的工作原理 .....   | 127 |

---

|             |                         |            |
|-------------|-------------------------|------------|
| § 5-3       | 典型的专用型 PC 指令和应用 .....   | 129        |
| § 5-4       | PC 编程的过程 .....          | 143        |
| § 5-5       | PC 软件分析 .....           | 146        |
| <b>第六章</b>  | <b>数控化改造 .....</b>      | <b>149</b> |
| § 6-1       | 改造背景 .....              | 149        |
| § 6-2       | 机电匹配计算 .....            | 151        |
| § 6-3       | 功能确定及分布 .....           | 154        |
| § 6-4       | 可编程控制器软硬件开发 .....       | 157        |
| § 6-5       | 机床参数确定 .....            | 168        |
| § 6-6       | 调试 .....                | 170        |
| <b>第七章</b>  | <b>数控生产线控制及管理 .....</b> | <b>171</b> |
| § 7-1       | PCBA 生产线工艺简介 .....      | 171        |
| § 7-2       | PCBA 生产线的关键设备 .....     | 176        |
| § 7-3       | 生产线平衡 .....             | 184        |
| § 7-4       | 机器运动的优化 .....           | 196        |
| <b>第八章</b>  | <b>物流控制系统 .....</b>     | <b>209</b> |
| § 8-1       | 物流系统的组成 .....           | 210        |
| § 8-2       | 物流系统的控制与管理 .....        | 222        |
| § 8-3       | 物流系统开发实例 .....          | 227        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>            | <b>236</b> |

# 第一章 计算机数控的理论基础

## § 1-1 数控机床集成技术

数控机床是一种机电一体化的数字控制自动化机床。它是对输入的零件加工程序进行处理并输出，从而加工出合格零件的机床。

零件加工程序的形成目前主要有 3 个途径。第一个途径是由工艺人员（数控编程人员）手工编程。这是目前大量采用的主要方式。它是由工艺人员根据图纸按照规定的代码及格式进行编制，工作量较大。第二个途径为采用 APT 这一类语言编程，可称为半自动编程。第三个途径为 CAD/CAM 的图像编程技术，可称为交互式自动编程。未来的发展应该是集成的 CAD/CAPP/CAM 系统，交互式人工干预大为减少，才称得上真正的自动编程。

数控机床按不同的划分标准有许多类。其外观亦千变万化。但从其结构划分不外乎数控系统 CNC（包括可编程控制器 PLC）、伺服系统及机床本体三大部分。数控系统包括一台或多台计算机（含可编程控制器）以及相应接口板，还包括显示器、面板等是中央控制机构。伺服系统包括交、直流系统及电机、反馈元件等，是坐标轴及主轴运动的执行机构。第三部分是机床本体、含床身、导轨、冷却、润滑、液压、气压传动以及刀库等。另外还应包括相应电气部分如电源、继电器、空气开关等。这三大部分一般是由不同的公司或制造厂生产，最后由机床厂将三者集成起来，成为一台完整的数控机床。

值得一提的是可编程控制器，早期的数控机床是没有可编程控制器的。它们依靠继电器逻辑来实现相应的功能。主要是 M、S、T 功能即主轴夹紧、放松，机床起动、停止，换刀，冷却，润滑等辅助功能。这些功能相对于坐标轴运动控制（伺服系统），其实时性要差一些。由于继电器逻辑是一种硬接线系统，布线复杂，体积庞大，更改困难，故障率较高。现代数控机床一般均采用可编程控制器。大大减少继电器数量，布线简单，更改功能方便。目前可编程控制器和数控系统已合为一体，大部分由数控系统制造商提供。

目前，我们看到的数控机床包括 3 个部分，见图 1-1。

所谓数控机床的集成技术是指这 3 个部分是如何集合到一起的。一般



而言,数控系统的制造厂负责制造 CNC 和 PLC。伺服系统制造厂负责伺服系统制造。机床厂在组装数控机床时购买 CNC (PLC) 系统及伺服系统,将其安装到本厂生产的机床上,从而形成数控机床交给最终用户。但是一些大的数控系统制造商例如日本 FANUC、德国西门子、美国 A-B 公司等,他们既生产 CNC (PLC) 系统又生产伺服系统。这样可给机床厂配套选择时提供方便,也有一些机床厂他们自己制造 CNC 和 PLC 系统装配在自己的机床上,这样给调试提供了便利。

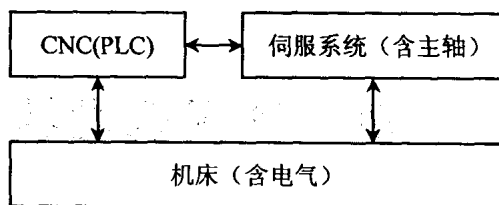


图 1-1 数控机床的结构组成

作为一般情况,机床厂在集成机床本体、CNC (PLC) 和伺服系统时应解决什么问题呢?

(1) 机床和伺服系统匹配。主要根据数控机床所需的功率,扭矩等动力要素以及电机和机床的安装尺寸等机械要素加以选择。详见第六章 § 6.2。

(2) 机床和 PLC 的匹配,这部分工作较复杂。PLC 在数控机床上是作为 CNC 和机床之间的软接口,负责处理 M. S. T 功能,亦统称为辅助功能。这是相对于坐标轴运动这个主功能而言的。PLC、CNC 和机床之间的关系见图 1-2。

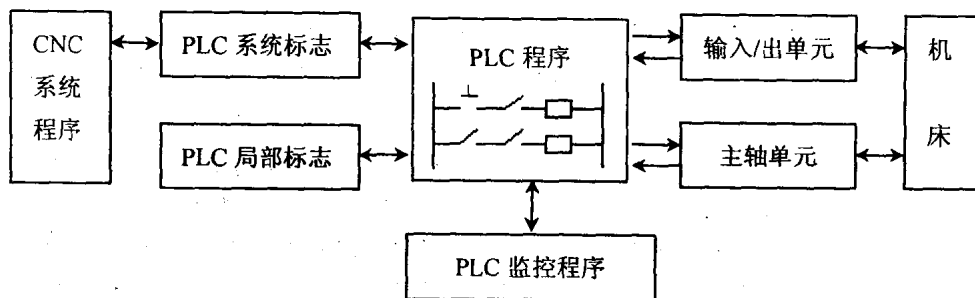


图 1-2 PLC、CNC 和机床之间的关系

图 1-2 中,在 CNC 系统程序和机床之间的均属于 PLC 范围。PLC 实质上亦是一台计算机,有的是和 CNC 共用一个 CPU,有的则各自有独立的 CPU。当数控系统制造商将 PLC 提供给机床厂或最终用户(例如数控改造时,最终用户直接向数控系统制造商订购 CNC 和 PLC 系统)时,他们并不知道该机床上各种辅助功能究竟有哪些,有多少。一般而言,机床厂或最终用户需要自己独立或在数控制造商指导下完成 PLC 程序的编制。最后插入到 CNC 系统程序中,完成 PLC 和机床、CNC 的集成,并最终形成一台可供使用的数控机床。这部分工作无论是对机床厂或最终用户而言在集成或改造时都是比较大的工作量。PLC 的监控程序主要是指 PLC 源程序(例梯形图等)的编译、显示、编辑等。对有的数控系统而言是常驻内存。有的则位于上位机,各不相同。有的数控系统则不保存这些监控程序,只准运行,不能显示亦不能修改。

(3) 操作面板制作。数控机床的操作面板一般有两块。一块是 CNC 操作面板,由数控系统制造商提供和 CRT 做在一起;另一块是机床操作面板由机床厂或最终用户制作。CNC 面板一般不占用 PLC I/O 点数。而机床操作面板是要占 I/O 点数的。一般而言,我们看到的数控机床上这二块面板已集成在一起。

大家知道数控机床实际上是一种计算机位置控制系统。它是通过刀具和工件之间的相对位置运动加工出理想的零件。而这种相对运动是通过坐标轴的伺服系统来实现的。因此，伺服系统实现了数控机床的主运动。目前，计算机控制这个伺服系统的采样周期一般在 10 ms 左右，是一个强实时系统。相对于这个主运动，PLC 实现的辅助运动其实时性要差一些，例如工件的夹紧、放松、换刀、主轴启停、冷却、润滑等。辅助功能不需要毫秒级的响应。坐标轴伺服系统的强实时功能和 PLC 实现的辅助功能形成了数控机床的两类不同的信息流如图 1-3 所示。

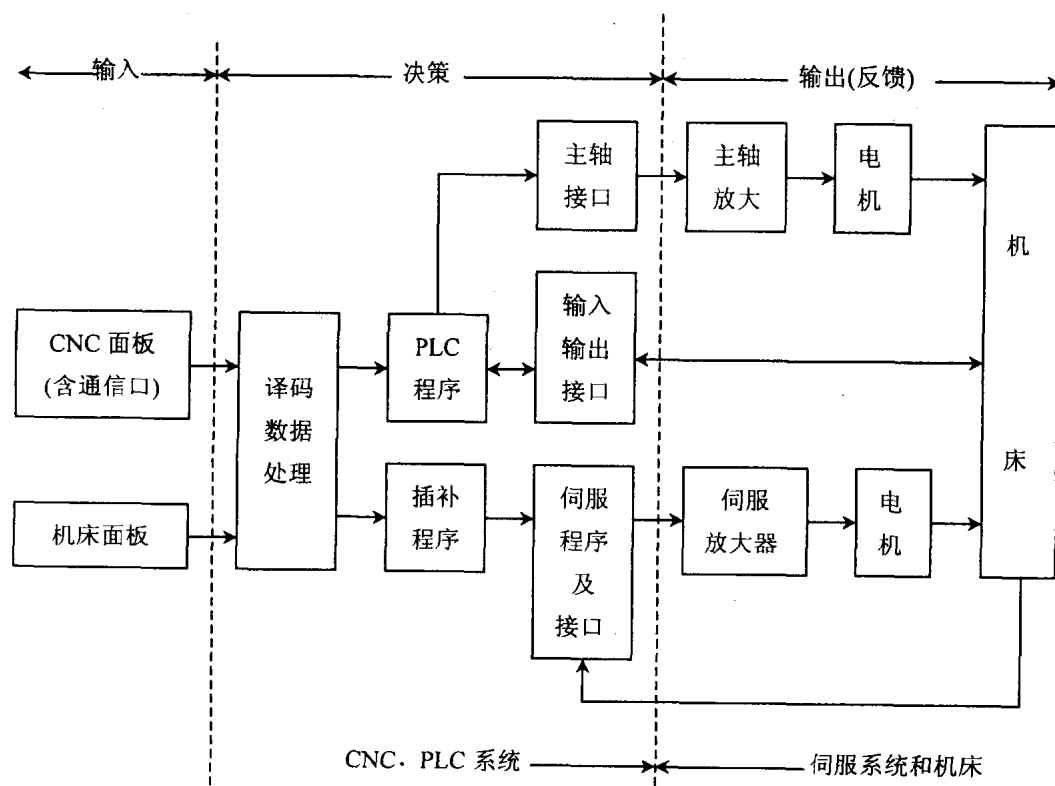


图 1-3 主运动及辅助功能两类信息流

图 1-3 中，决策部分和输出（反馈）部分的分界线恰好是数控系统和伺服及机床的分界线。其中的机床面板在功能上属于数控机床的输入部分，但在电气连接上，它是通过输入/出接口进入 PLC 程序再对整个数控系统进行控制的。图 1-3 中上半部是属于辅助功能范畴。而下半部属于主运动范畴。这两种不同的信息流构成数控机床基本原理的两个方面。辅助功能是为主运动服务的。有的在主运动之前先发生例如夹紧、润滑、冷却；有的在主运动后发生如放松等。当叙述数控机床的集成技术时，机床电气部分往往被忽略。所谓机床电气是指变压器、直流电源，空气开关，执行继电器，接线端子等。这部分电气元件及线路对于提供动力，保护电机，抗干扰，排除故障等方面起着十分重要的作用。随着大规模集成电路以及印制板装配技术的不断提高，CNC 系统和 PLC 系统本身的线路板故障率越来越低。数控机床的维修人员对于机床电气部分的重视程度越来越高。因为从中可以直接反映出机械、液压、电气系统的故障状态。测试也比较直观和方便。机床电气部分一般而言是由机床厂负责配置并

安装，主要和 PLC 及伺服部分配合使用。第二章中我们将比较详细地分析机床电气的组成和原理。

## § 1-2 工艺基础

数控机床和普通机床都能进行零件加工。其主要区别在于前者是用数字进行控制，而后者是人直接操作的。不论何种机床实际上都是一种位置控制系统。因此，当谈到工艺基础时，首先必须涉及的是坐标系。普通机床上没有零点，加工零件时实际上是操作者依据相对坐标系原理进行的。而对数控机床而言必须建立绝对零点或相对零点（参考点），并依此确立坐标系，机床才能依据数字指令准确进行加工。那末数控机床的坐标系是如何建立起来的呢？

图 1-4 是某数控车床加工叶轮的示意图。

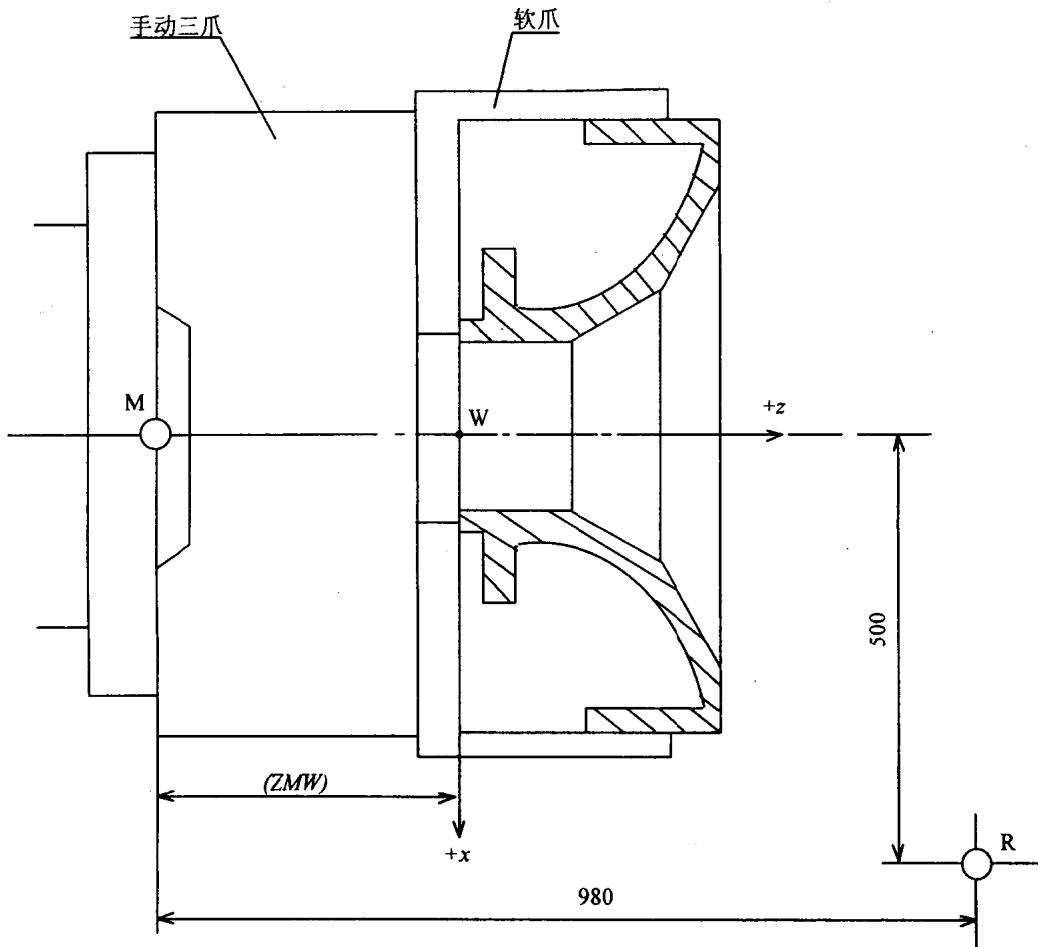


图 1-4 某数控车床加工零件示意图

图 1-4 中，M 是该数控车床绝对零点。R 为参考点，它和 M 之间的距离记为  $500\text{ mm} \times 980\text{ mm}$ ，此为机床参数。从图中可见 M 是不可接近的，我们所谓的“回零”实际上就是回 R

点。大家知道，在正式进行数控加工前，刀架必须先回零（对铣床而言，是工作台回零），即回参考点 R。刀架回零以后，刀架在机床坐标系中的位置就确定了。图 1-4 中 W 是工件零点，亦称编程零点。W 和 M 之间的距离 ZMW 是已知的，在加工前必须先确定下来。工件和刀架在机床坐标系中的位置确定以后，剩下的就是刀尖的位置。因为当机床加工零件时，是依靠刀尖切削工件完成的。

数控机床一般配有对刀仪，其目的是为了确定刀尖在机床坐标系中的确切位置。本例中，对刀仪位于机床某一位置，当需要对刀时，将刀架移动到离对刀仪中心有固定的地点进行对刀。本例中，对刀仪中心和刀架中心 F 之间的距离记为  $350\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ 。刀架、对刀仪和对刀的原理分别见图 1-5、图 1-6 和图 1-7。

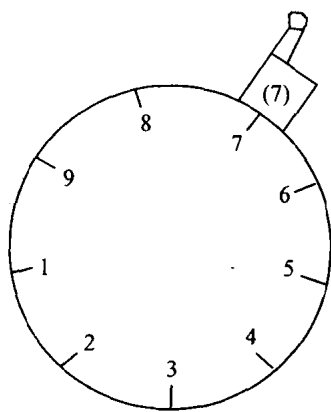


图 1-5 刀架示意图

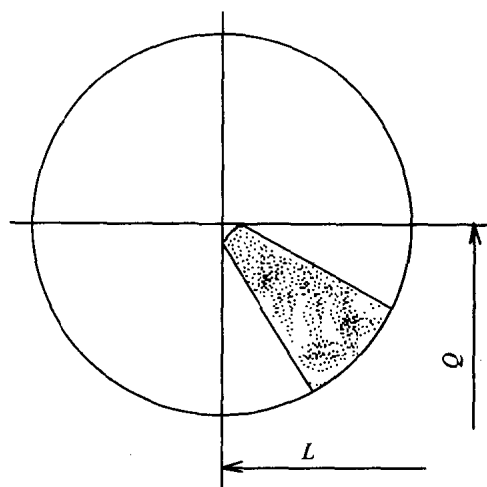


图 1-6 对刀仪示意

图 1-7 中可见对刀值  $L=286$ ， $Q=530$ ，减去 350 得到刀尖距 F 点的距离分别是  $I=-64$ ， $K=180$ 。I 和 K 这两个值是数控系统在加工前必须知道的参数。每次加工前刀架中心 F 回零（R 点），由于 I、K 两值已定，那末刀尖在机床坐标系中的位置就惟一确定了。I 和 K 值可以用键盘送入刀补表，有的亦可在零件加工程序中送入。

以上为数控车床的对刀原理。对刀仪也可以是独立的，并不附属于某一机床。对铣床和加工中心而言，在将刀具装到主轴或刀库之前必须在对刀仪上测定刀长（刀前端至刀柄校准面的距离）和刀具半径，并将这些值事先输入刀补表，作为刀具参数，以便在编制零件加工程序时使用。

大家知道，数控车床的刀架上有许多把刀，如果要想让程序员都考虑每一把刀的长度去编制零件加工程序，那是很麻烦的事。事实上，工艺编程人员当程序编制时只考虑刀架中心 F 的运动，刀尖的运动补偿由数控系统自动进行。另外，刀尖半径的补偿也由数控系统自动进行。这样，编程路线的确定就简单多了，即把刀具看成一个点。其原理见图 1-8。

本次加工的是叶轮端面和内孔，只用一把镗刀即可。其加工路线为 1—2—3—3'—4—4'—5—6—7—R。接下来的任务为程序编制。

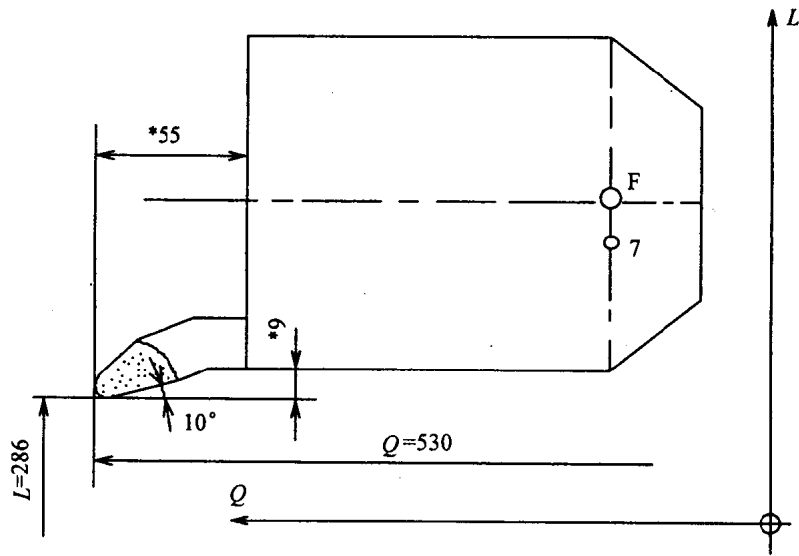


图 1-7 数控车床对刀原理

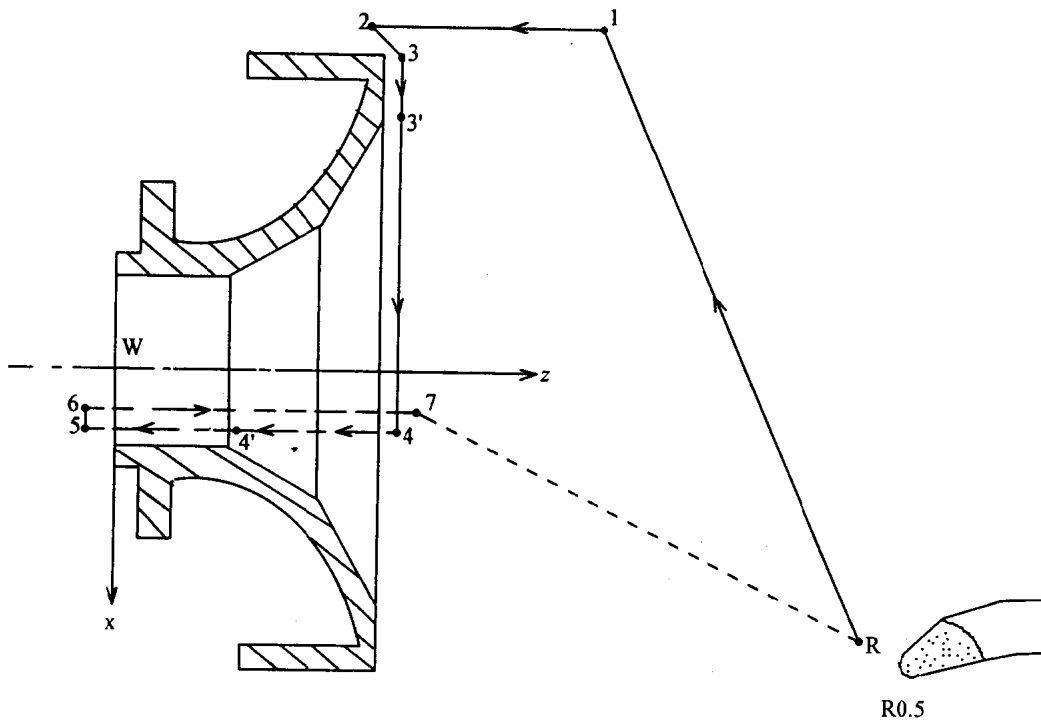


图 1-8 当加工路线确定时将刀具看成一点 R

下面谈一下机床回零（参考点）的硬件处理过程。数控机床在各坐标轴方向均安排有回零开关。当工作台（或刀架）回零时压上此开关，此时 CNC 系统检测到该信号后立即减速，同时搜索位置反馈元件（例如光电编码器）的电气零点，即每转一个脉冲的零位信号。一旦

检测到此信号，CNC 立即发出停止信号，并以此作为机床参考点。由于机床参考点的精度直接影响加工精度，因此该参考点的精确度需经常加以校准。机床参考点的补偿值亦是机床参数之一。

除了上述机床参考点以外，数控机床一般均有设定零点功能。即把任意一点设定为零点。这在编程和加工时特别有用。例如图 1-4 中 R 为参考点，当编程时可以将 R 作为零点。但是 W 点是零件的编程零点，图纸上标注的尺寸均以 W 作为参考点。因此如果将 W 点作为加工时的零点将给程序编制带来方便。当加工程序开始时编一个 G54，而 G54 的具体尺寸（即 W 点的坐标）可事先输入到零点偏置表内。目前 W 点的零偏值为 (0, ZMW)。接下来加工程序的编制即以 W 点作为零点就十分方便了。

工艺基础的另一个问题是数控系统内的几何模型。较早一些的数控系统只有直线和圆弧两种几何模型。随着数控系统功能不断增强，开始出现二次曲线、螺旋线、样条曲线等几何模型，即数控系统本身能处理这些信息，不需要 CAD/CAM 软件系统的帮忙。但是随着几何模型复杂性增加，数控系统的负担越来越重。这就导致多处理机数控系统以及用个人计算机 (PC) 实行数控的发展。最典型的是德国西门子的 Siemens 840，由个人计算机、CNC 和 PLC 三大部分组成。在个人计算机上有 CAD/CAM 功能，为没有编程站的单位提供方便。但是，从发展的观点看，在车间一级的设备控制器上均配有 CAD/CAM 功能实在是一种浪费。理想状态应该是在 CAD/CAM 中心配有自动编程功能，将编制完的零件加工程序通过通信网传送到 CNC 控制器。CNC 只要配有最简单的直线、圆弧插补机能即可。我们认为在 CNC 端不断增加几何模型的复杂性，对于 CIM 而言并不是一种发展方向。CNC 的模型应该变得简单并且标准化。而应该将大部分几何模型的处理功能集中到 CAD/CAM 软件中去。

### § 1-3 控制基础

如果抛开数控系统的辅助功能，那末一个零件加工程序在数控系统内部经历译码、数据处理、插补及伺服输出这几个环节如图 1-9 所示。

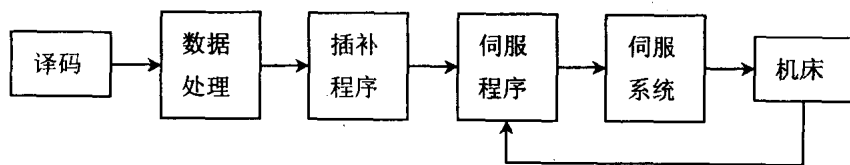


图 1-9 数控机床主回路

所谓译码即是将字符串格式的零件加工程序转化为计算机内的二进制格式并在标志单元存储。数据处理主要是进行插补前的准备，例如半径补偿（将零件轮廓转化为刀具中心的轨迹）和速度计算（即根据编程 F 值，计算采样周期内的步长）。插补程序主要功能为计算出每个坐标在一个采样周期内的位移增量，作为进给命令。伺服程序主要功能为跟随误差计算并转化成速度命令送到伺服系统去执行。

从控制论的角度出发，关心的是数控系统内的一个环路图。插补程序之前仅仅是一种数据处理，并不影响环路特性。数据处理从本质上说是代码在存储器中的传递和转换。计算机

数控技术诞生至今已有 20 多年, 计算机数控技术的发展是从两个方面同时进行的。一个是代码的传递和转换, 另一个就是环路特性的提高。高速通信及网络技术, CAD/CAM 技术, 插补技术等应看作是第一方面的范畴。而伺服系统的演变, 采样控制, 全数字式环路的出现, 各种精度补偿技术的诞生则可以看作第二方面的成果。在数控系统内, 代码的传递和转换, 其结果是以采样周期内的坐标轴增量值进入环路图的。

下面我们研究环路控制原理和交、直流伺服系统。对闭环和半闭环伺服系统, 主要有直流和交流两类。在 70 年代到 80 年代中期, 直流伺服系统还占优势。80 年代中期以后, 随着微机技术、控制技术和电力电子技术的发展, 交流伺服系统逐渐占上风, 成为数控机床伺服系统的主流。但是在我国各企业里, 这两种伺服系统都在广泛的使用着。

### 一、控制原理

对于交直流伺服系统, 从控制论的角度来看, 它们是十分相似的。如果将伺服系统分成伺服放大器和电机两部分, 那末两者亦是类似的, 只是伺服放大的原理及电机的原理不同罢了。我们可以将 CNC 系统简化成图 1-10。

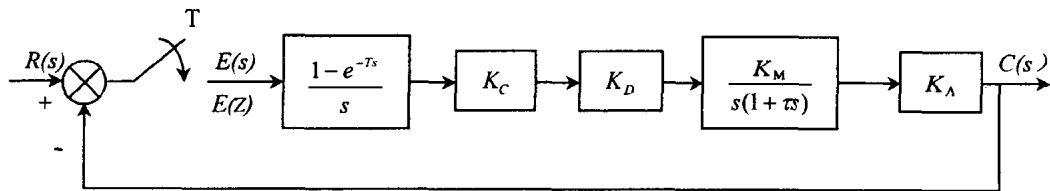


图 1-10 CNC 系统简图

图 1-10 中  $R(s)$  和  $C(s)$  分别为系统输入和输出的拉氏变换。表示位置指令和机床实际位置, 其中位置指令是插补程序的输出。 $E(s)$  是跟随误差的拉氏变换。 $T$  表示采样开关, 即每隔一个采样周期闭合一次。 $(1 - e^{-Ts})/s$  是零阶保持器, 即输出缓冲器的传递函数。在一个采样周期内, 其输出值保持不变。 $K_C$  是计算机软件增益。 $K_D$  是数模转换增益。 $K_M/[s(1 + \tau s)]$  是伺服系统包括伺服放大器、交直流电机、传动链等的传递函数, 是一个二阶环节(经简化)。零阶保持器中的  $T$  为采样周期, 以毫秒计。伺服系统的传递函数中  $K_M$  为速度环增益,  $\tau$  为电机的时间常数。

由图 1-10 可以看出:

(1) 数控系统的运动是根据指令位置 and 实际位置之差来控制的, 是典型的误差随动系统。只要有误差, 则数控机床就运动。误差消失, 则机床运动停止。这里需要指出的是误差控制和加工误差两者的区别。前者指的是实际位置和指令位置在时间含义上存在误差, 而后者指的是被加工零件存在的物理误差。

(2) 根据香农采样定理, 当采样频率大于二倍以上的系统带宽时(即数控机床位置环带宽)采样系统就可以复现连续系统的信号。一般数控机床位置环的典型带宽为 20 Hz 左右。普遍认为 100 Hz 的采样频率是一个典型值, 即 10 ms 的采样周期既不致丢失信息, 又给计算机留有充分的处理时间。

(3) 根据控制理论, 在图 1-10 中, 由于采样开关  $T$  的存在, 使得误差信号  $E$  从连续变为离散, 其频谱将从图 1-11 变成图 1-12。如存在图 1-13 所示的理想低通滤波器, 则可以将连续

信号恢复过来,经分析零阶保持器基本上具备低通特性,其频率特性如图 1-14 所示。

由图 1-14 可见,零阶保持器在低频段内( $\omega < \omega_s = 2\pi/T$ )近似于理想低通滤波器,但其幅频特性的高频部分,也不衰减为零。因而,采样信号的高频分量尚能部分地通过,引起微小的波纹分量。另外,从相位上看,零阶保持器是一个相位滞后元件,相位滞后  $-\omega T/2$ 。从时域上看,滞后  $T/2$ 。该动态滞后效应增加了系统不稳定因素,但只要采样周期  $T$  与其余系统元件时间常数相比,相对地小,那末这种滞后效应就可以忽略。

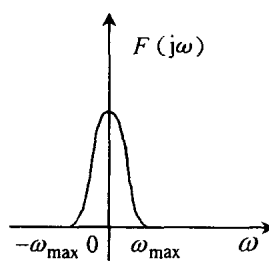


图 1-11 连续信号频谱

经过零阶保持器滤波以后,我们可以认为 CNC 系统可以复现连续系统的信号。现在我们用连续系统的分析方法来分析这个误差信号  $E$ 。

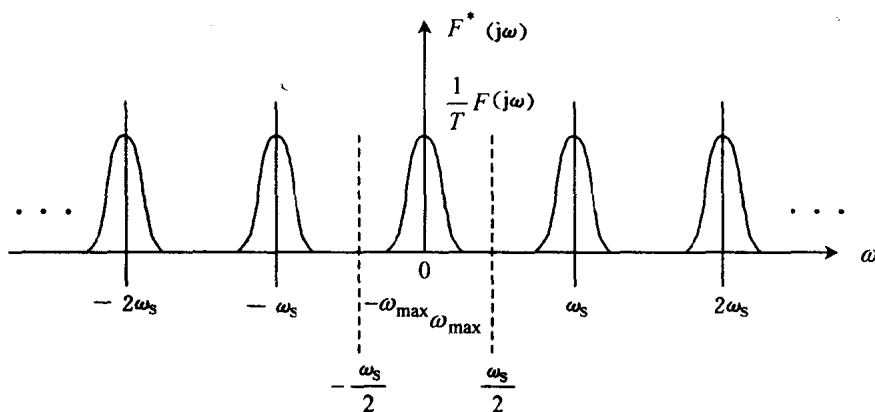


图 1-12 采样信号频谱

CNC 系统可简化为一个二阶环节。其开环传递函数  $G(s)$  为

$$G(s) = \frac{K_v}{s(1 + \tau s)}$$

式中  $K_v = K_C K_D K_M K_A$ ;  $\tau$  为电机时间常数。

闭环传递函数  $\varphi(s)$  为

$$\varphi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{\frac{K_v}{s(1 + \tau s)}}{1 + \frac{K_v}{s(1 + \tau s)}} = \frac{K_v}{\tau s^2 + s + K_v}$$

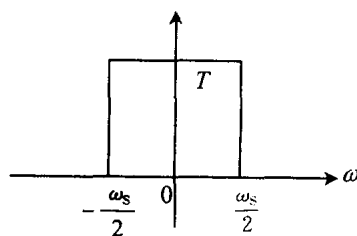


图 1-13 理想低通滤波器

根据拉普拉斯终值定理可以求出稳态误差  $E$ 。并以输入  $R(t) = V \cdot t$  (即直线) 为例。

$$\begin{aligned} E &= E(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} s \cdot E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot (R(s) - C(s)) = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot R(s) \left( 1 - \frac{K_v}{\tau s^2 + s + K_v} \right) = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot R(s) \cdot \frac{\tau s^2 + s}{\tau s^2 + s + K_v} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{V}{s^2} \cdot \frac{\tau s^2 + s}{\tau s^2 + s + K_v} = \end{aligned}$$



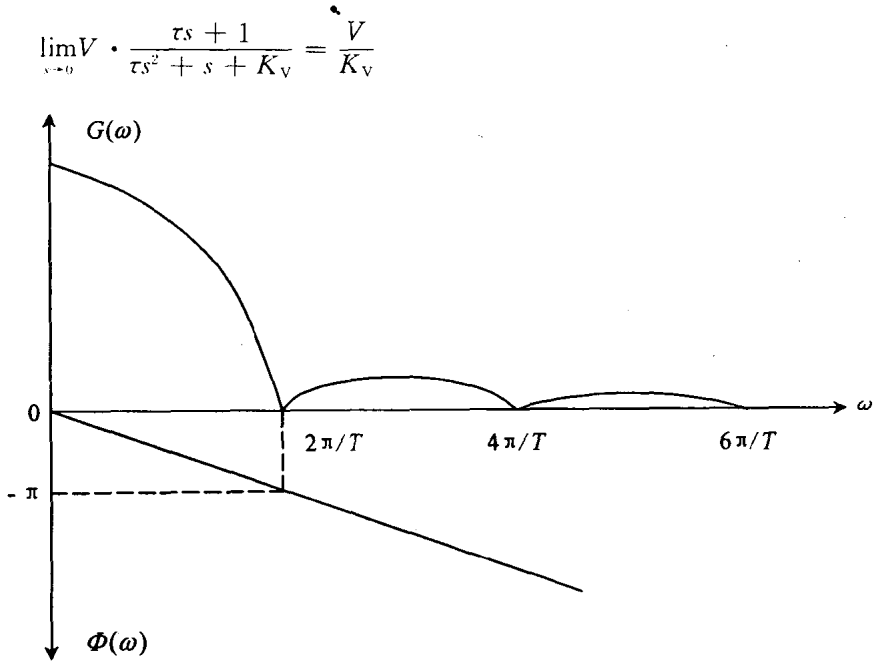


图 1-14 零阶保持器频率特性

$E = \frac{V}{K_v}$  这个公式表示误差信号  $E$  和编程速度  $V$  (编程时写作  $F$ ) 以及开环增益  $K_v$  的关系。这个公式是计算机数控中最基本的一个公式。该公式可用图表示,如图 1-15 所示。图 1-16 为速度响应曲线。图 1-15 中 1 为命令位置曲线,2 为实际位置曲线。

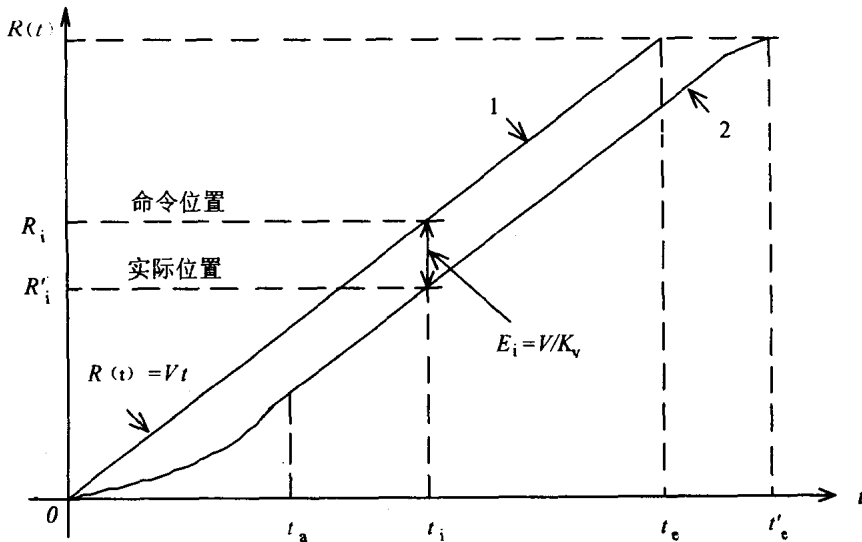


图 1-15 CNC 的位置环稳态误差

数控系统的开环增益  $K_v$  是一个重要参数。开环增益大,则在相同输入速度时,跟随误差小;当开环增益增大时对系统的稳定性不利。开环增益小,则相应的跟随误差变大,但系统易于稳定,调整也容易。为兼顾稳定性和精度指标, $K_v$  典型值可选  $0 \sim 30$ 。