

数控机床的精度与可靠性

ТОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ СТАНКОВ О ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

〔苏〕 А. С. 普罗尼科夫 等著

.0213

机械工业出版社

数控机床的精度与可靠性

〔苏〕 A. C. 普罗尼科夫 等著

李昌琪 遇立基 译



机械工业出版社



B 417920

目 录

序言 (A. C. 普罗尼科夫).....	1
数控机床的特性与结构特点 (B. C. 斯特洛杜波夫).....	3
数控机床的精度及其检验方法 (B. C. 斯特洛杜波夫、 M. C. 乌科洛夫).....	47
提高数控机床精度的方法 (B. C. 斯特洛杜波夫).....	64
机床工艺可靠性的一般模型 (A. C. 普罗尼科夫).....	97
数控机床工艺可靠性的试验方法 (A. C. 普罗尼科夫).....	110
机床工艺可靠性预报 (A. C. 普罗尼科夫).....	123
具有直角数控系统的铣床的研究 (B. M. 德米特里 耶夫)	134
具有轮廓数控系统的车床的研究 (B. M. 德米特里 耶夫)	157
具有位置数控系统的多工序机床的研究 (B. C. 斯特 洛杜波夫)	176
具有轮廓数控系统的铣床的研究 (M. C. 乌科洛夫).....	190
多工序车床的研究 (A. C. 普罗尼科夫)	226
工艺可靠性的控制 (A. C. 普罗尼科夫)	244
参考文献	256

序 言

(A.C. 普罗尼科夫)

在工艺装备中，数控机床占有特殊的地位。它们是未来工艺系统的雏形，那时人们将利用电子计算机的极广泛功能来控制和处理信息，利用机床制造和机械加工的成就来实现工艺过程，因而就可创造出灵活的、高生产率的和精密的工艺装备。

苏联在最近提出了大力增产数控机床特别是自动换刀多工序数控机床的任务，同时还必须大力提高这些现代化高度发展的机器的技术水平、质量、可靠性和寿命。

数控机床发展迅速，目前正广泛推广运用。在很多工业部门使用了数千台各种类型的数控机床。

已经生产的布局各异、结构改进的数控机床，其质量在短期内得到了进一步提高。机床配备了用微电子元件制作的新的数控装置。机床的电子计算机控制得到越来越广泛的应用。

现代数控机床具有广泛的工艺可能性和很高的自动化程度。但是数控机床的有效使用有一系列特殊困难，这包括：机床本身复杂；机床工作时机械、液压、电气和电子系统相互影响；因为要加工种类繁多的零件，工况各式各样；控制系统影响机床参数，等等。

苏联和外国生产和使用数控机床的经验表明，数控机床的首要问题之一是获得规定的加工精度和高度的可靠性。同时，特别重要的是不仅机床的原始性能高，而且要在长期使用过程中保持这些性能，因此保证数控机床的工艺可靠性就成为重要的问题。工艺可靠性是指在要求规定期限内和规定的生产率下保持加工质量和实现机床用途所决定的工艺过程的性能，

保证机床特别是配备数控系统的机床工艺可靠性达到要求的水平是极其复杂的课题。因为尚在使用的早期阶段或在试验样机时，就要回答机床在其长期使用过程中性能将如何变化和新机床主要输出参数可靠性的储备如何。在机床设计阶段回答这些问题更要困难，因为机床全部主要性能必须事先计算或确定，而在使用过程中这些性能的变化也要事先预报。

上述课题的解决，只能依据描述机床参数随时间变化过程的模型与考虑机床参数函数的关系和概率的状况。

作者曾试图根据机床工艺可靠性的这种模型，拟定一些研究和评价不同形式的数控机床工作能力的方法，这些方法考虑到这些先进设备的特点。所进行的研究表明，即使在只有试验样机或使用初始阶段的机床的情况下，不仅可以估价机床的初始参数，而且可以获得一定的可靠性特性（例如，输出参数的可靠性储备）。利用有关降低机床起始精度磨损过程的信息，根据用预测方法所作的计算可以评价工艺可靠性的其他特性，例如机床的精度储备和与其相应的机床无故障工作的概率。

数控机床的特性与结构特点

(B.C.斯特洛杜波夫)

数控机床的基本形式 人们通常把金属切削机床的数字程序控制理解为按照程序进行控制，该程序是用字母-数字码给出，并且是一种用一定的语言书写，能够保证机床各工作部件规定动作的指令顺序。数控机床和带有一般自动控制系统机床的原则区别在于控制程序的给定和计算方法以及控制机床工作部件的程序传递方法的不同。

在带有一般自动控制系统的机床中，控制程序用实际的模拟形式（凸轮、靠模、撞块、钻模板和其他方式）来体现，它们也就是程序载体。这种给定控制程序的方法有两个主要的缺点。第一个缺点是零件图的信息从数字的（离散的）和单值的形式变为模拟的形式（如凸轮、靠模曲线的形式）。这会导致在制造凸轮、靠模和把行程撞块安装在直尺上时，以及程序载体实际磨损时引起误差。第二个缺点是难以在机床上调整这些程序载体，这要消耗很多时间和资金，因此，在大多数情况下采用一般的自动控制系统来实现成批，特别是小批生产的自动化是效率不高的。

在为数控机床准备控制程序，直至把程序传送给机床工作部件的过程中，我们都要和数字（离散）式的信息打交道，这些信息是直接零件图获得的。在数控机床上，切削刀具相对被加工毛坯的运动轨迹是以刀具的一系列顺序位置来表现的，每一个位置由一个数决定。在数控机床上，我们有可能不通过运动链，而按照用数字形式给定的程序控制机床工作部件各个独立坐标的位移来获得这些工作部件的复杂运动。可以增加同时控制的坐标数目，这是数控机床本质上完全新颖的一个特点。这个特点使人们

有可能创造出原理上新颖的机床布局，从而在自动控制的条件下，获得广泛的工艺可能性。

人们可以使用各种符号（数字、字母、关系符），以文件或表格形式给出控制程序编码并在穿孔带上穿孔，或者直接从控制台把程序送入数控装置中记忆下来。人们可以期望以任何规定的精度给出控制程序，并指定控制程序为机床工作机构任意一个所要求的运动规律服务。

信息具有抽象和单值的性质，它在从图纸到机床工作机构的全程内传送。这就有可能在数控机床上使用数学方法来准备控制程序，利用电子计算机使其计算和编制过程自动化，并且在必要时能集中进行。

使用电子计算机可以选择最合理的加工过程（工序的顺序、切削用量等），可以使劳动强度降低，准备控制程序的过程和整个生产准备过程加快。使用数控机床的经济效益不仅可以减少加工时间，而且还可以加强各个单独的生产环节之间的信息联系和加快信息流的处理，从而使整个工艺过程得到强化。使用数控机床还可以减少对高度熟练的机床工人的需求，也有可能采用多机床操作。

从使用数控机床的经验可以确定^[31]，劳动消耗的节约可达25~80%，一台数控机床可以代替3~8台普通机床。大大增加了机动时间（达到60~75%），生产准备时间缩短了50~70%，而零件总的制造时间缩短了50~60%。设计和制造工艺装备的成本节约了30~80%，光整工序的数目和成本减少了 $\frac{3}{4} \sim \frac{7}{8}$ ，有可能提高零件的加工精度。

但是必须指出，为了获得所述的数控机床的效益，需要进行事先的技术经济计算，以便决定采用哪种型式的数控机床更适合于目的性，并且还需要采取一些组织措施，以便保证机床的负荷饱满和最大限度地利用其各种可能性。还必须考虑数控机床非常复杂和高昂的成本以及它对调整工、特别是数控装置操纵人员熟

练程度的高度要求和准备控制程序所花费的大量时间。

当使用数控机床时，可以把机床工人在保持高度机动性的条件下，高质量和高生产率地完成加工工序的作用转移给数控系统。但这时为了考虑和补偿所产生的加工误差而进行干预的可能性将受到很大限制。因此，虽然数控机床的传动链比普通万能机床简单得多，但对其制造精度及其以后的工作精度要求却较高。重要的是不仅要保证数控机床初始时的高精度，而且要在规定的使用期限内保持其精度，这正是表征机床工艺可靠性的指标。

必须注意，机床和数控装置组成一个统一的工艺综合体，在早期该综合体的可靠性和质量由机床本身及数控装置的可靠性和质量来决定。

现代数控机床（图1）由机床本身及数控系统组成。数控系统的基本部分是：数控装置、机床工作机构的进给传动装置和安装在每一个控制坐标上的测量传感器。数控装置用于把控制作用根据控制程序输出给机床工作机构。数控装置由一组电子线路板组成，这些电子线路板对以穿孔带形式或手动方式从控制台输入给装置的信息进行计数、记忆、转换、计算，并把信息传递给机床的驱动电机与其自动循环系统，还可用于故障诊断等（第16页）。

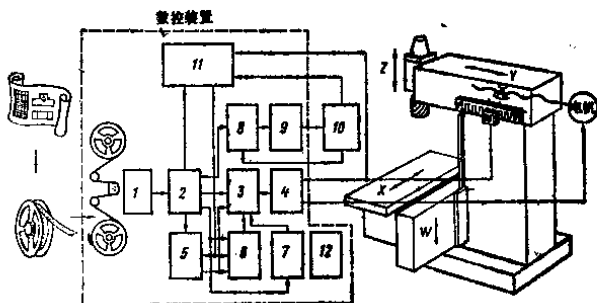


图1 数控机床的构成原理图

工作机构的进给传动由驱动电机、电机的控制系统和运动环节组成。数控机床工作机构的位移精度决定于所采用的进给传动控制系统：开环系统（没有被控工作机构实际位移的测量系统）或闭环系统（带有测量系统）。在第二种情况下，机床每一控制坐标实现控制信号的精度是用测量传感器检测的。这种检测的精确度在很大程度上决定于测量传感器的型式、结构和在机床上的安装位置。

这样，数控机床工作时，大量机械的、液压的、气动的、电气的和电子的机构与元件相互影响，零件加工所规定的控制程序的执行精确度在很大程度上决定于这些机构和元件正确的和可靠的动作。

数控机床可以配备三种形式的数控系统：位置的、轮廓的和综合的系统。由于数控机床工艺可能性和自动化程度的不断提高，综合数控系统获得了最广泛的应用。现代数控系统是用微处理器或微型电子计算机构成的，这就大大提高了数控机床的生产率和可靠性。目前存储的容量日渐增加，可以保证在存储器中存储几个程序，根据需要可以使用其中的任何一个程序；还可以保证手动输入程序和在进行加工过程中进行汇编的作业编程，并可借助自动子程序减少程序容量。采用这种数控系统可以补偿机床的系统误差和工艺参数的变化，进行机床和数控装置的故障预报。

目前已经研制了并在工业中正在使用着数量众多的、具有各种不同工艺用途的数控机床：车床、铣床、钻-镗床、磨床等等。出现了名叫多工序的、具有广泛的工艺可能性和高度自动化水平的新型数控机床（加工中心）。

目前应用最广的是数控车床、数控铣床、数控钻-镗床和多工序数控机床。

数控车床现有下列几种型式：中心式、卡盘-中心式和端面式。卡盘-中心式数控车床获得最广泛的应用。在装有轮廓数控系统的数控车床上可以加工各种各样复杂外形的工件。同时在两个坐标 X 和 Z 的方向控制刀架位移（图2 a）。在机床上完成切螺

纹的工序时，还可以控制主轴回转角度。

数控车床除了水平布局外，还有刀架倾斜或垂直布置的布局（图2 6）。为了扩展数控车床的工艺可能性，可以采用一个或两个回转刀架。

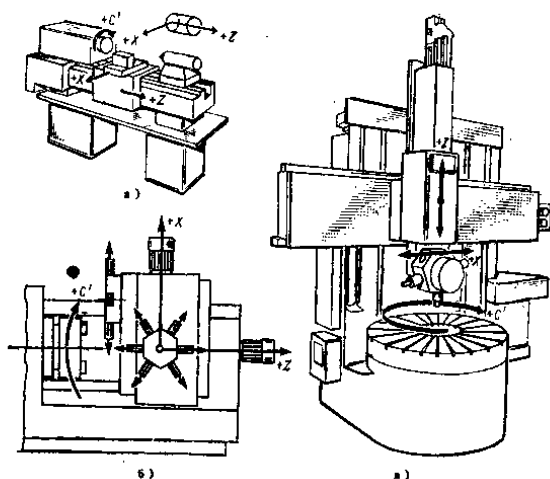


图2 数控车床

目前正在生产许多数控车床。例如16K20Φ3、1Π732Φ3、1Π717Φ3车床等。立式的（图2 6）和多轴数控车床（例如，1512Φ3型、1734Φ3型等）的生产也在增加。

数控车床进一步发展的特点是增加主运动传动功率，作为这种传动采用可控硅控制的直流电机。随着主轴转速上限的提高，主轴转速范围正在扩大。所有这一切使人们有可能采用高生产率的刀具，用大的切削用量进行加工。可以使用大扭矩直流电机伺服驱动作为刀架的进给传动。

数控铣床用于加工具有复杂的平面或立体曲线轮廓的零件，

由轮廓数控系统沿三个或更多个坐标控制工作机构同时运动。在数控铣床上可以用端铣刀和指状铣刀铣削，也可以打中心孔、钻孔、铰孔、扩孔，在个别情况下还可以镗孔。可以进行逆铣和顺铣。铣床可以有手动换刀和自动换刀。在后一种情况下，刀具放在转塔头上（例如，6P13PΦ3、ΦΠ-17CMH 等）或者刀具库中（例如，ЛΦ260MΦ3、6560MΦ3 等）。

数控铣床有立式主轴和卧式主轴的布局（图3）。数控铣床有：带十字工作台的、悬臂式的（图3a），带可动滑枕（横向移动）和主轴箱的、只能作纵向移动的工作台的（图3б）、带静止或可移动横梁的双柱龙门式的（图3в）几种型式。6P13Φ3、ГΦ1700C2、6520Φ3、6M13ГН-1、ΦΠ-7 等是三坐标控制的数控铣床的例子。

四坐标（三个直线坐标和一个回转坐标—带回转工作台）和五坐标（图3г）控制的铣床结构最为复杂，它们用于加工复杂的、立体（轮廓）的零件。例如，四坐标铣床 ΠΦΠ-5 以及五坐标铣床 ΦΠ-11 和 ΦΠ-14 就是这种铣床。

在数控车床和数控铣床中，切削刀具的运动规律是由工作机构沿着两个、三个和更多的坐标以切削用量规定的速度同时运动形成的。因此，沿一个坐标运动轨迹的偏差或故障将导致整个运动规律的变化并造成零件轮廓加工的误差。

在这些机床上零件是在携带刀具和毛坯的工作机构运动时进行加工的。切削力对进给传动元件、导轨和机床其他机构的作用会引起弹性变形、振动、磨损加剧和热变形，这些综合的结果也会使运动的最终规律发生变化。

数控钻床和镗床（图4），与一般的万能机床不同，它可以达到更高的加工生产率，因为校准刀具位置的时间损失、在加工过程中测量的时间损失、空行程时移动机床可动部件的时间损失都降低了。在主轴上切削刀具所用的机械夹紧和放开的时间也可以缩减。

为了加快寻找在机床旁边的所需要的刀具，一般可装设回转

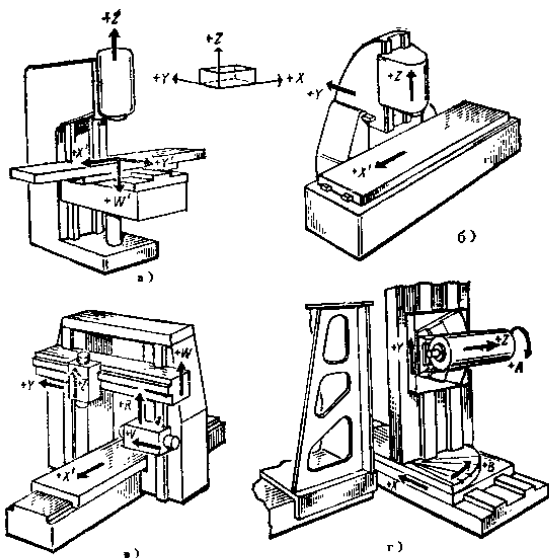


图3 数控铣床

a) 立式悬臂铣床 b) 单柱龙门铣床 c) 带有静止或可移动横梁
的双柱龙门式铣床 d) 卧式铣床

刀具架。使用这种刀具架可以防止精密切削刀具偶然折断和擦伤。

许多钻床和镗床有安装各种切削刀具（例如，带有六位转塔头的数控立式钻床 2P135Φ2）的转塔头（图4a）（六位或者八位的）。转塔头一般可以向两个方向回转到任意一个位置。为了安装数量多的刀具可以采用带机械手的刀具库。

在数控钻床和镗床上，需要控制工作机构空行程的精确调整位移（定位）。因此对机床零件加工和机构的力作用只有在调整 and 夹紧可移动的工作机构之后才能进行。所以重要的是在空行程

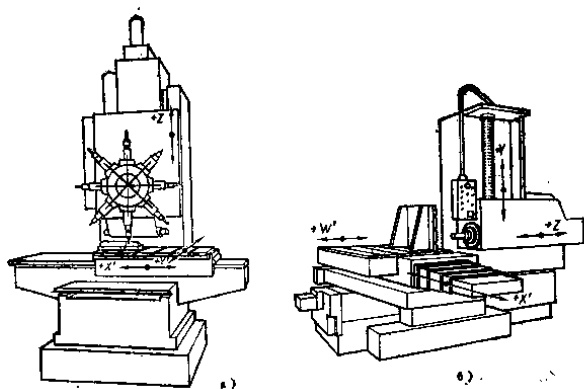


图4 数控钻床与镗床

a) 带转塔头的钻床 b) 卧式镗床

时间最小的情况下实现精确定位。

在数控多工序机床上把工序的集成化提到首要的位置，这样可以取代各个单工序。在这些机床上，一次安装毛坯就可以完成需要车削、铣削、钻削、镗削、切螺纹和其他工序的复杂零件的加工（图5a）。

多工序机床装备有综合数控系统，可以按定位规范进行工作，也可以进行零件的轮廓加工。经常是沿四个坐标进行控制（三个直线的和一个回转的坐标）。

由于能自动交换安放在转塔头或刀具库（容量有时超过100把刀）中的切削刀具和自动交换带有毛坯及成品零件的随行工作台，机床工作机构在空行程时能快速定位（达 15 m/min ），和采用大扭矩小惯量直流电机使反向和开停时间缩短，所有这些有可能在使用数控多工序机床时大大增加机动时间（达60~75%）和缩减空行程时间。

由于不需要重新安装毛坯就可以从四个方面和在不同的角度

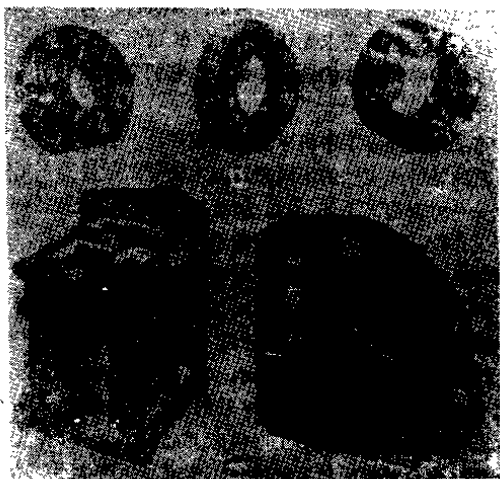
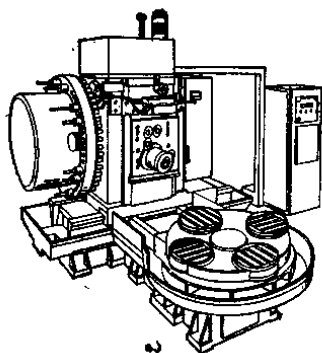


图 5 数控多工序机床和典型零件

a) 机床简图 b) 旋转体形式的零件 c) 箱体零件

进行钻、铣和镗削加工，所以就有可能提高加工精度和生产率，大大削减夹具的数量和成本，并且有可能加工那些甚至在几台普通万能机床上都很难加工的零件。由于可以立即更换带有事先调整好的切削刀具的整个刀具库，以及可以预先把控制程序存储在现代数控装置中并可以在以后快速调用程序（不需使用穿孔带）所以使得机床调整时间缩短。

由于增大了主运动驱动功率和采用大切削用量进行加工，使用多刃刀具、大直径的铣刀和镗杆、多刀头，加工规范的优化，所以直接加工零件的时间就缩短了。

考虑到数控多工序机床自动化程度很高和巨大的复杂性，对机床的可靠性和工作精度，以及在使用过程中规定精度的保持性都提出很高的要求。

近年来，研制和使用了一些数控多工序机床。根据被加工零件的类型可以把这些机床分为两组：a 旋转体式零件的机床，这些零件的加工包含要求毛坯回转的车削工序（图 56）；b 箱体、平板等形式零件的铣-钻-镗床，它们要求加工平面和钻孔（图 57）。

第二组数控多工序机床使用比较广泛，它有立式主轴的，而更经常的是卧式主轴的不同布局。主轴立式配置的多工序机床用于从一个方面加工毛坯（板、盖等）。主轴水平配置的机床带有回转工作台，可以从四个方面和不同的角度加工零件。这就保证可以在毛坯的一次安装中完成最多的工序。

许多现代数控多工序机床，按其本身精度来说接近于坐标镗床。例如，在 Mitsui Seiki 公司（日本三井精机）的 HP4 型机床上，当分辨值为 0.001mm 时，X、Y、Z 轴上长度 300mm 的定位精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ ，X、Y 轴的重复性为 $\pm 0.005\text{mm}$ 。

必须指出，在数控多工序机床上把工序进一步集中会使机床复杂化，这会对机床精度特性和工作可靠性产生不利的影响，并使机床成本增加。由于在这些机床上零件的加工要依次地用安装在刀具库里的每一把刀具来进行，因此很难进一步提高这些机床

的生产率。采用多刀头加工毛坯的机床是例外。

多工序机床应该有效地在主轴转速和工作进给的宽广范围内工作，这会导致作用在机床零件和机构上力的负载产生巨大的波动。机床的主轴、进给传动和其他机构应该考虑不仅能用各种各样的刀具完成粗加工工序（主轴转速相对较低，切削力相对较大），而且要能完成精密的光整工序（主轴转速高、切削力小）。这使得设计和使用这些机床的任务大大复杂化，因此必须进一步提高机床的刚度、抗振性、耐磨性、工作机构位移精度，把机床的热变形减至最小，而保证这种机床高度的工艺可靠性的任务也是相当困难的。

数控多工序机床的进一步发展是在这基础上研制所谓数控加工系统，这种系统可以单独使用或者与自动化的生产系统（自动生产线）一起使用，它是由电子计算机控制的。

数控加工系统（图6）一般是由三部分组成：零件加工部分4（就是机床本身），这是基本的部分；刀具的调整、保存和向机床输送部分3（即单独刀具、可换刀具库和可换主轴头）以及毛坯的安装和向加工区输送与成品零件的反向输送的部分2。

除了刀具的自动交换（如同在一般的数控多工序机床上一样）以外，在数控加工系统中，以单独的主轴头形式，主轴部件也可以交换（图7）。主轴头可以保存在头库1（见图6）内并自动地安装到机床上。当联入生产线时，主轴头可用专用的传送装置送往机床。作为一个例子，图8表示在数控加工系统“三菱-Burr 交换中心 TC-11”中主轴头交换的过程。所有的可换主轴头都保存在具有六个位置 I-VI 的大头库4和具有三个位置的小型中间回转头库1中。

在小型头库的一个位置上经常保存着一个常规的主轴头3。当这个主轴头处在工作区时，刀具库2中的刀具就被安装上去。在其他两个位置上安装从头库1来的新主轴头和从机床上卸下来的主轴头。

在可换主轴头上安装着特别笨重的大尺寸刀具（大直径铣刀、

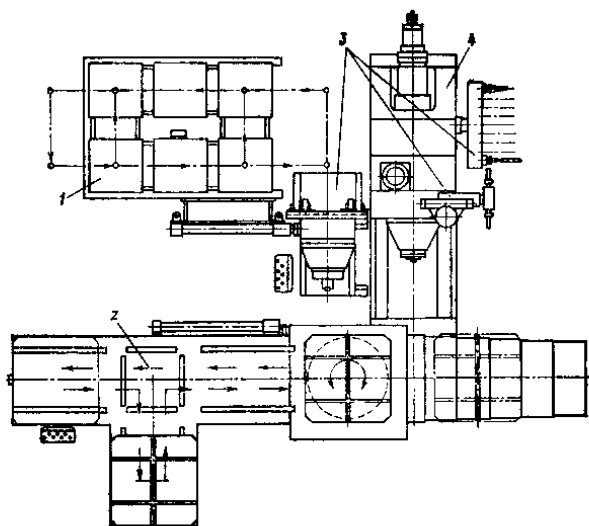


图6 Diag公司(联邦德国)
生产的 TC22 型数控加工系统的平面图

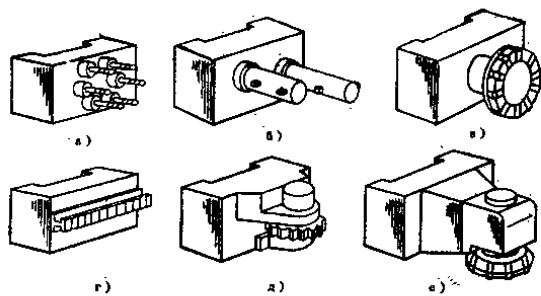


图7 可换主轴头

а) 多主轴的 б) 专用镗削的 в) 铣削的 г) 拉削的
д) 铣槽的 е) 角度铣削的