

四轴数控加工 实例详解

曹怀明 宋燕琴 主编

SIZHOU SHUKONG JIAGONG
SHILI XIANGJIE



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

四轴数控加工实例详解

主 编 曹怀明 宋燕琴
副主编 刘加勇 尚建伟
参 编 朱金玲 孙淑君
主 审 姜艳芳

机械工业出版社

本书介绍了四轴数控加工的基本知识及常用的四轴数控加工软件 Mastercam Mill V9.1 和 Cimatron E 9.0, 并通过大量四轴数控加工案例介绍了具体的加工方法。本书大部分案例来自生产一线, 为工厂中的实际典型零件的加工, 如圆柱凸轮轴的加工、笔筒的设计及加工、套筒螺旋钻孔加工、螺旋柱(轴)的加工、箱体类零件的加工、圆柱螺旋齿轮的加工和流量计转子的加工。读者可参考书中的案例所给出的加工工艺及方法, 完成类似零件的编程加工。

本书可作为企业数控加工技术人员的学习用书, 也可作为职业院校数控多轴加工的实训教材及数控大赛的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

四轴数控加工实例详解/曹怀明, 宋燕琴主编. —北京: 机械工业出版社, 2012. 4

ISBN 978-7-111-38040-5

I. ①四… II. ①曹…②宋… III. ①数控机床—程序设计
IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 070362 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 郎 峰 责任编辑: 邓振飞

版式设计: 霍永明 责任校对: 王 欣

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

148mm × 210mm · 7.25 印张 · 242 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-38040-5

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版



前 言

随着我国加工制造业的崛起，我国已逐步成为世界加工制造中心，数控技术也得到了广泛应用和发展。近年来，多轴数控加工技术在我国也有着快速的发展，在第四届全国数控技能大赛中，四、五轴加工中心加工已经单独作为一个比赛单元，更突显了多轴数控加工技术的重要性。本书正是在这样的背景下编写完成的。

本书从实际应用的角度系统地介绍了四轴加工的理论知识和操作实例。全书共分9章，第1章、第2章为基础知识，内容涉及四轴数控机床常见类型、数控回转工作台、典型四轴数控机床技术参数及Mastercam mill v9.1和Cimatron E 9.0软件的介绍等内容。第3章到第9章为加工案例，案例大部分来自生产一线，如圆柱凸轮轴的加工、笔筒的设计及加工、套筒螺旋钻孔加工、螺旋柱（轴）的加工、箱体类零件的加工、圆柱螺旋齿轮的加工和流量计转子的加工，也有作者在生产教学中总结的一些课题，作为知识扩展内容放在部分章节后面，以方便读者理解和掌握更深层次的知识。本书内容全面，通俗易懂，知识讲解循序渐进，并以图文对照的方式进行编写，使读者更易理解，适合具有一定四轴数控加工基础的数控加工技术人员学习和参考。

全书由曹怀明、宋燕琴任主编，刘加勇、尚建伟任副主编，朱金玲、孙淑君参加编写，娄艳芳任主审。在本书的编写过程中，思美创（北京）科技有限公司杨玉玲、聂荣森高级工程师提供了大量技术指导，在此深表感谢。

由于编者的水平和经验所限，书中难免出现欠妥和错误之处，恳请读者指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章	四轴数控加工概述	1
1.1	四轴数控机床常见类型	1
1.2	数控回转工作台	2
1.3	典型四轴数控加工机床技术参数	5
第 2 章	常用多轴加工 CAD/CAM 软件介绍	19
2.1	Mastercam Mill v9.1	19
2.2	Cimatron E 9.0	38
第 3 章	圆柱凸轮轴的加工	50
3.1	加工任务概述	50
3.2	制定工艺方案	51
3.3	准备加工模型	53
3.4	设定刀具、材料	57
3.5	创建刀具路径	57
3.6	加工仿真及后置处理	64
3.7	实际加工	67
3.8	知识扩展	72
第 4 章	笔筒的设计及加工	75
4.1	加工任务概述	75
4.2	制定工艺方案	76
4.3	准备加工模型	78
4.4	设定刀具、材料	81
4.5	创建刀具路径	83
4.6	加工仿真	89
4.7	后置处理	91
第 5 章	套筒螺旋钻孔加工	95
5.1	加工任务概述	95

5.2	制定工艺方案	95
5.3	准备加工模型	96
5.4	设定刀具、材料	97
5.5	创建刀具路径	99
5.6	加工仿真及后置处理	103
5.7	知识扩展	106
第6章	螺旋柱（轴）的加工	112
6.1	加工任务概述	112
6.2	制定工艺方案	112
6.3	准备加工模型	113
6.4	设定刀具、材料	115
6.5	创建刀具路径	116
6.6	加工仿真及后置处理	122
第7章	箱体类零件的加工	126
7.1	加工任务概述	126
7.2	制定工艺方案	127
7.3	设计工装	130
7.4	零件各坐标系的确定	131
7.5	导入零件及建立各坐标系	135
7.6	创建刀具路径	138
7.7	加工仿真及后置处理	153
7.8	知识扩展	156
第8章	圆柱螺旋齿轮的加工	159
8.1	加工任务概述	159
8.2	制定工艺方案	159
8.3	准备加工模型	160
8.4	创建刀具路径	167
8.5	加工仿真及后置处理	183
8.6	知识扩展	188
第9章	流量计转子的加工	190
9.1	加工任务概述	190
9.2	制定工艺方案	190
9.3	准备加工模型	191

9.4 创建刀具路径	194
9.5 加工仿真及后置处理	221
参考文献	225

第1章 四轴数控加工概述

1.1 四轴数控机床常见类型

所谓四轴机床即为：一台机床上至少有4个坐标，分别为3个直线坐标和1个旋转坐标。四轴数控机床分为立式和卧式两种，都带有一个回转工作台，如图1-1所示。四轴加工的运动坐标除了三个线性移动轴X、Y、Z外，还有一个旋转轴。这个旋转轴可以是绕X轴旋转的A轴，也可以是绕Y轴旋转的B轴，或绕Z轴旋转的C轴。由于数控机床的主轴为Z轴，如果工作台绕Z轴回转，则不能改变主轴的运动方向，所以，对于四轴数控机床来说，其运动轴的配置只能为：(X、Y、Z、A)或(X、Y、Z、B)两种。图1-1a为(X、Y、Z、B)配置的卧式四轴数控机床(卧式加工中心)示意图，该类机床适合加工箱体类零件，例如各种减速箱、阀体以及需多面加工的零件等。图1-1b为(X、Y、Z、A)配置的立式四轴数控机床(立式加工中心)示意图。

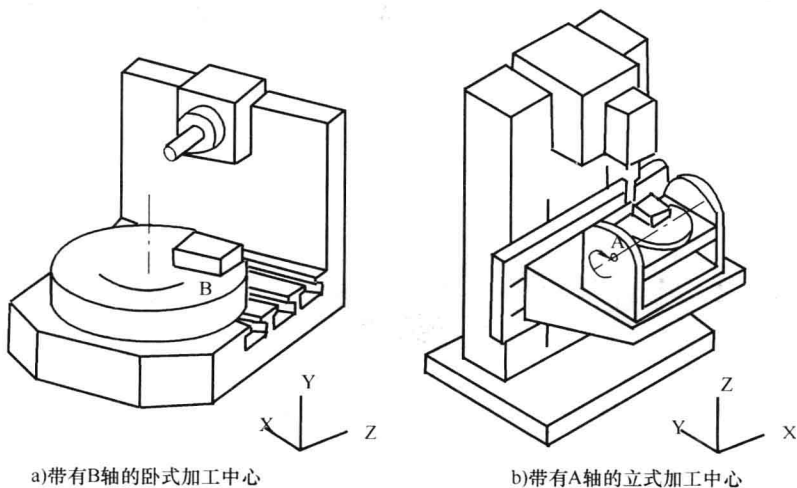


图 1-1 四轴数控机床示意图

1.2 数控回转工作台

数控回转工作台的出现,为加工中心和数控铣床提供了回转坐标,通过第四轴、第五轴驱动回转工作台或分度头实现精密角度的等分、不等分或连续的回转加工,完成复杂曲面的加工,使机床的加工范围得以扩大。

1. 数控回转工作台的分类

数控回转工作台按照不同分类方法大致可分为以下几大类:

1) 按照分度形式不同可分为等分回转工作台和任意分度回转工作台。

2) 按照驱动方式不同可分为液压回转工作台(图 1-2a)和电动回转工作台(图 1-2b)。

3) 按照结构形式不同可分为水平回转工作台(图 1-2a)、立卧回转工作台(图 1-2b)、立式回转工作台(图 1-2c)和可倾回转工作台。

4) 按照回转轴轴数不同可分为单轴回转工作台(图 1-2a、b、c、f)、可倾回转工作台、两轴联动回转工作台(图 1-2d)和多轴并联回转工作台(图 1-2e)。

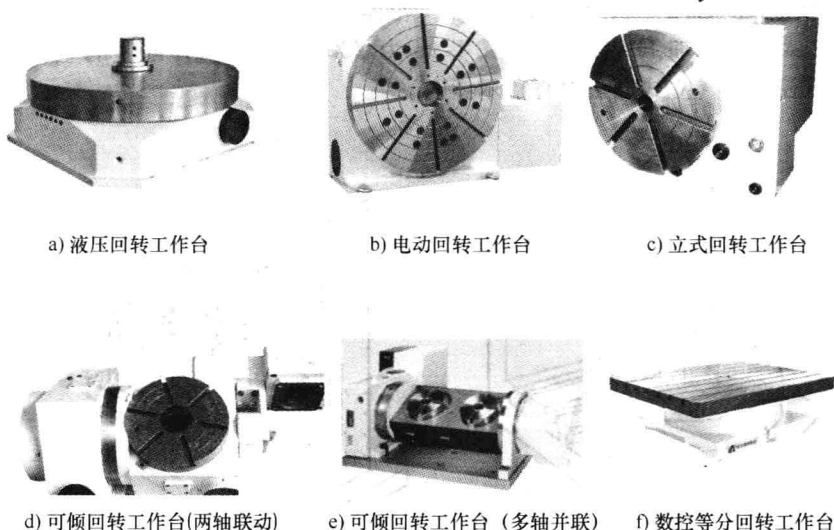


图 1-2 数控回转工作台的分类

数控立式回转工作台(图 1-2c)是各类数控镗铣床和加工中心的理

想配套附件，主轴以水平方式安装于主机工作台上，用作主机的第四轴，并在主机相关控制系统控制下，完成各种分度回转工作。工作台上可安装板、盘或其他形状比较复杂的被加工零件，也可利用与之配套的尾座安装棒、轴类被加工零件，实现等分的和不等分的孔、槽或者连续的特殊曲面的加工，且能保证很高的加工精度。

数控可倾回转工作台主要用于数控机床上，可利用原机床的两个控制坐标控制工作台的回转和倾斜，也可直接利用与回转工作台配套的数控装置与机床联接完成所需的工作循环。它可以完成任意角度的孔、槽、平面类零件的加工，以及曲线、凸轮等的加工，并可达到较高的加工精度。另外也可用于非数控钻、铣、镗类机床上，独立完成等分和不等分的角度分度工作。

2. 数控回转工作台的结构

数控回转工作台从结构上可以分为以下几个部分：驱动、传动、分度定位、夹紧等机构。数控回转工作台通过传动部分，将由系统控制的驱动力传递到需转动某一角度的工作台台面，实现数控回转工作台的分度转位，如图1-3所示。

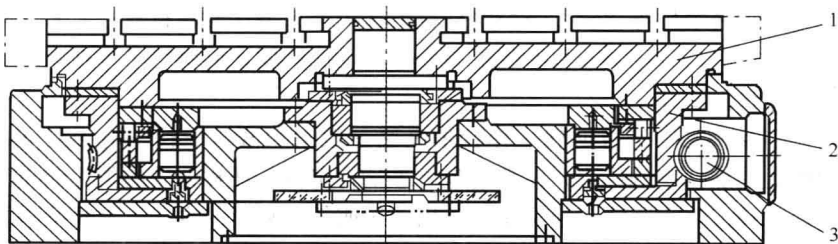


图 1-3 数控回转工作台结构图

1—回转工作台台面 2—蜗轮 3—双导程蜗杆

(1) 驱动 液压回转工作台通过齿条驱动齿轮或液压马达驱动齿轮的方式进行动力提供，而电动回转工作台则采用伺服电动机提供动力。

(2) 传动 传动有齿条齿轮传动、蜗杆传动等方式。电动回转工作台一般是通过一对齿轮（或者是用联轴器直接与蜗杆相连）将电动机动力传递到蜗杆，带动工作台进行分度。液压回转工作台，采用液压马达驱动的传动结构类似于电动回转工作台；采用齿轮齿条的，则是通过由活塞驱动的齿条带动与之啮合的与台面相对固定的齿轮进行分度。

(3) 分度定位 等分回转工作台一般采用端齿盘分度定位，任意分度回转工作台一般采用高精度蜗杆蜗轮分度定位。采用端齿盘分度定位的

回转工作台，又有两联齿盘和三联齿盘之分。两联齿盘分度定位的结构相对简单，动、定两个齿盘直接啮合，分度运动时，动、定齿盘首先进行“脱开—啮合”运动，这一运动表现在回转工作台台面上有一定量的抬起动作，台面的抬起量与定齿盘和动齿盘的相对运动量相一致。三联齿盘分度定位在结构上比两联齿盘复杂，动、定齿盘不直接进行啮合，而是通过一公用齿盘进行啮合过渡，齿盘的啮合与脱开运动是通过公用齿盘的移动来完成的，公用齿盘的抬起不表现在回转工作台的台面上。也就是说采用三联齿盘分度定位的回转工作台，运行过程中台面不需抬起，但啮合刚性比两联齿盘结构稍差。

采用端齿盘分度定位的等分回转工作台，其分度定位端齿盘包括向心齿、直齿、弧面齿等形式，为达到高精度的分度，端齿盘一般采用淬硬钢齿面磨削的工艺方法加工，产品可达到高刚性与高精度的要求，但其分度等分数受齿盘齿数的限制。

采用蜗杆蜗轮分度的回转工作台，分度元件为蜗杆副，蜗杆有圆柱蜗杆（单头单导程蜗杆、单头双导程蜗杆、多头蜗杆）和直线环面蜗杆以及平面包络蜗杆等形式。一般蜗杆材料选用淬火钢，蜗轮材料一般采用耐磨铜合金。其分度等分数不受限制，分度定位精度直接决定于蜗杆与蜗轮的加工精度。

（4）夹紧 等分回转工作台的夹紧一般采用液压机构，给相互啮合的齿盘施加一定的压力，使端齿盘可靠啮合定位。任意分度的数控回转工作台，较多采用胀紧套或夹紧瓦，用液压或气压夹紧的方式，夹紧可靠性比较高。

3. 评测数控回转工作台的几项指标

评测数控回转工作台的主要指标有：分度精度和重复定位精度、精度保持性、承载能力、密封性能、足够的夹紧力和回转定位速度。表 1-1 所示为某型号数控回转工作台的技术参数。

表 1-1 数控回转工作台技术参数

序号	项目	HLTK16250B	HLTK16315B	HLTK16500B
1	工作台直径/mm	$\phi 250$	$\phi 315$	$\phi 500$
2	工作台面垂直时的中心高/mm	160	210	310
3	中心定位孔尺寸/mm	$\phi 30H6 \times 22$	$\phi 40H6 \times 25$	$\phi 60H6 \times 25$

(续)

序号	项目		HLTK16250B	HLTK16315B	HLTK16500B
4	定位键宽度/mm		18	18	22
5	工作台面 T 形槽宽度/mm		12	14	18
6	蜗杆副传动比		1:90	1:90	1:150
7	总传动比		1:180	1:180	1:180
8	工作台最高转速/(r/min)		8.3	8.3	11.1
9	最小设定分度单位		0.001°	0.001°	0.001°
10	工作台质量/kg		110	200	325
11	伺服电动机功率/kW		≥0.8	≥0.8	≥1.4
12	分度定位精度		30"	25"	20"
13	最大载荷量/kg		150	175	300
14	重复定位精度	正转	6"	6"	6"
		反转			
15	回转工作台夹紧油腔可承受的最大油压/MPa		1.5	1.5	1.5

1.3 典型四轴数控加工机床技术参数

1.3.1 具有 A 轴的立式加工中心

1. 基本参数

图 1-4 所示为某机床厂生产的型号为 VTC-200B 的四轴 (A 轴) 立式加工中心, 该机床附加了一个旋转轴数控回转工作台来实现四轴联动加工, 即所谓“3+1”形式的四轴联动机床。由于以立式加工中心作为主体, 所以数控回转工作台只能算是机床的一个附件。这类机床的优点有以下几点:

- 1) 价格相对便宜。由于数控回转工作台是一个附件, 所以用户可根据需要选配。
- 2) 装夹方式灵活。用户可以根据工件的形状选择不同的附件, 既可



图 1-4 VTC-200B 型四轴（A 轴）立式加工中心

以选择自定心卡盘装夹，也可以选择单动卡盘或者花盘装夹。

3) 拆卸方便。用户在利用三轴加工大工件时，可以把数控回转工作台拆卸下来。当需要时可以很方便地把数控回转工作台安装在工作台上进行四轴联动加工。

表 1-2 所列，为 VTC-200B 型四轴（A 轴）立式加工中心的技术参数。

表 1-2 VTC-200B 型四轴（A 轴）立式加工中心的技术参数

项目		技术参数
移动量	X 轴行程（主轴左右）	1120mm
	Y 轴行程（主轴前后）	510mm
	Z 轴行程（主轴上下）	510mm
	工作台上面对主轴端面的距离	180 ~ 690mm
	主轴前面到主轴中心的距离	510mm
工作台	工作台尺寸	1460mm × 510mm
	工作台最大载荷量	800kg
	工作台上面的形状	5 个 18mmT 形槽，间距为 100mm

(续)

项目		技术参数
机床精度	定位精度	$\pm 0.005\text{mm}$
	重复定位精度	$\pm 0.0015\text{mm}$
主轴	主轴最高转速	10000r/min
	主轴挡位数	无级
	主轴锥孔	7:24, 莫氏锥度 No. 40
	主轴轴承内径	$\phi 70\text{mm}$
	主轴加速特性 (0 ~ 10000r/min)	1.8s
进给速度	快速进给速度 (X, Y, Z)	30000mm/min
	切削进给速度 (MAZACC-2D, 或带 3D 选项)	1 ~ 8000mm/min 1 ~ 30000mm/min
自动换刀装置	刀柄形式	BT40
	刀具数量	24 (选项: 30)
	刀具最大直径/长度/质量	$\phi 80\text{mm}/350\text{mm}/8\text{kg}$
	刀具最大直径 (相邻刀位无刀具)	$\phi 110\text{mm}$
	刀具选择方式	MAZATROL 随机存储方式
	刀具交换时间 (切削 - 切削) / (刀 - 刀)	4.7s/1.5s
所需动力源	主轴电动机 (10min/30min/连续)	AC 15kW/11kW/7.5kW
	冷却电动机功率	0.18kW
	电源 (带选项时不同)	21.7kV · A
	空压源	140L/min
机床外形尺寸及重量	机床高度	2664mm
	占地尺寸	2972mm × 2925mm
	机床净重 (含数控装置)	6100kg

2. VTC-200B 型加工中心的基本操作

(1) 坐标轴的定义 (表 1-3、图 1-5) 坐标轴是在假设操作者位于机床前面的情况下定义的。

(2) 操作面板各键含义 机床共有 4 个操作面板, 如图 1-6 所示。

1) 刀库操作面板 (图 1-7、表 1-4)。用于从刀库中取、放刀具。

表 1-3 坐标轴的定义

X 轴	工作台左右运动。正向 (+): 工作台向右运动; 负向 (-): 工作台向左运动
Y 轴	主轴前后运动。正向 (+): 主轴向后运动; 负向 (-): 主轴向前运动
Z 轴	主轴上下运动。正向 (+): 主轴向上运动; 负向 (-): 主轴向下运动

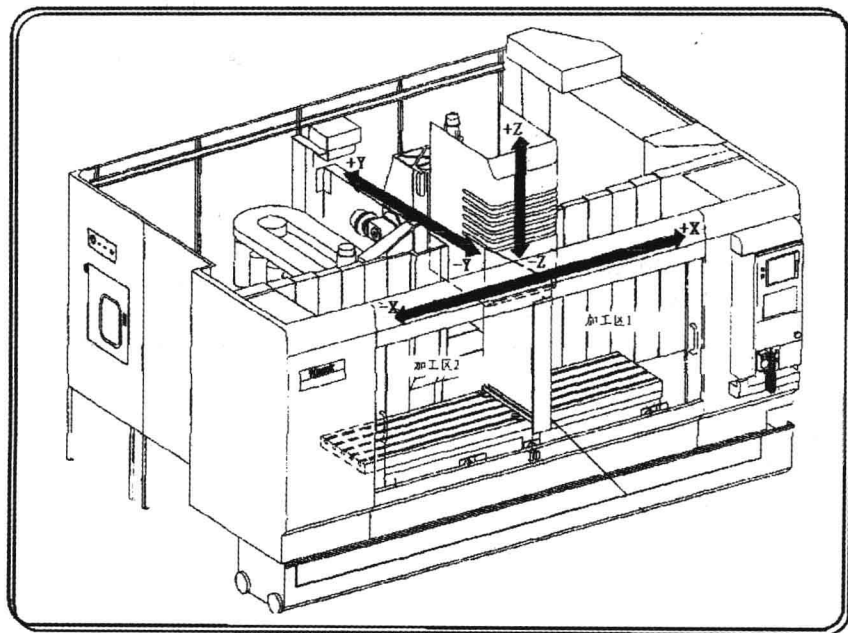


图 1-5 VTC-200B 机床坐标轴的定义

2) 辅助操作面板 (图 1-8、表 1-5)。用于控制 NC 操作面板上的开关所控制功能之外的动作。

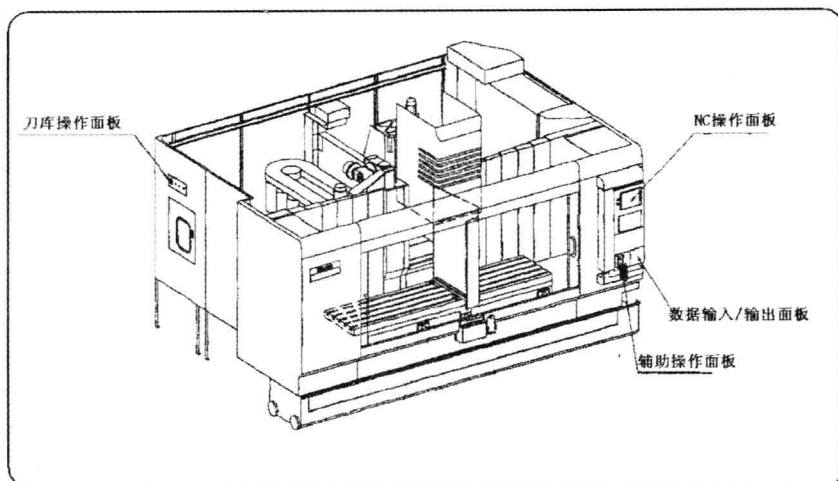


图 1-6 VTC-200B 机床操作面板

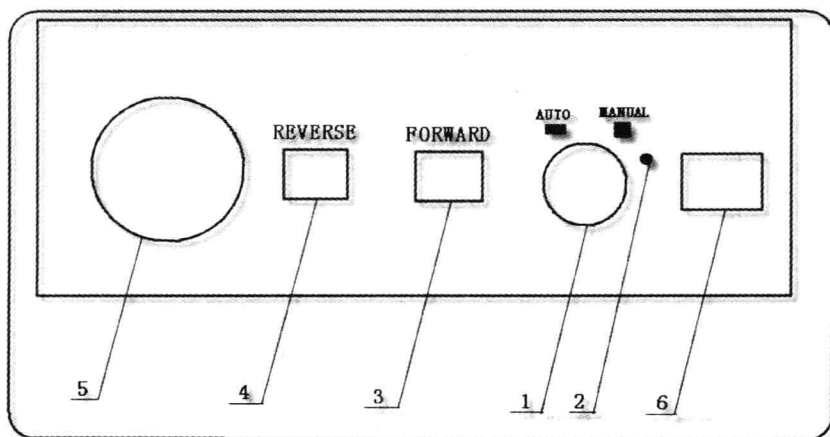


图 1-7 VTC-200B 刀库操作面板

表 1-4 刀库操作面板

序号	名 称	功 能
1	刀具选择开关	开启刀库手动操作或中止刀库手动操作
2	“MANUAL” 手动指示灯	当刀具选择开关位于“MANUAL”手动位置时, 指示灯亮 如果机床处于静止状态(刀库手动操作中), 指示灯闪烁
3	“FORWARD” 正转按钮	刀库正向旋转。如果按钮保持按下, 刀库连续旋转。只有当满足如下条件时, 按钮才有效: 1. 刀具选择开关位于“MANUAL”手动位置 2. “MANUAL”手动指示灯亮或闪烁 3. 刀库门关闭
4	“REVERSE” 反转按钮	刀库反向旋转。除刀库旋转方向不同之外, 其他功能与正转按钮相同
5	紧急停止按钮	用于在紧急情况下立即停止机床。在执行了误操作、观察到异常噪声、将要发生碰撞或其他危急情况时, 按下此按钮
6	刀库门开锁开关	打开刀库的门

注: 运行(主轴旋转, 进给轴运动, 刀库旋转等)停止时, 刀具选择开关只能位于“MANUAL”手动位置。

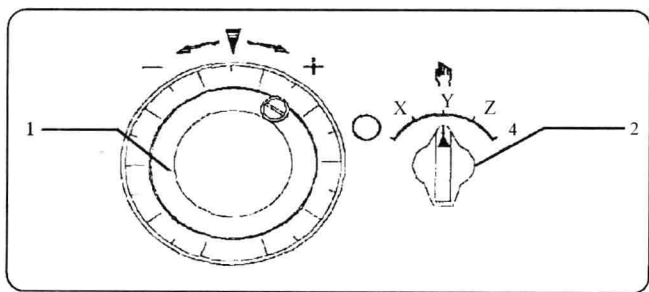


图 1-8 VTC-200B 辅助操作面板

3) 数据输入/输出面板。用于外部数据的输入/输出。

4) NC 操作面板(图 1-9、图 1-10、表 1-6)。用于选择显示画面、输入数据和运行条件及运行其他与 NC 有关的操作。NC 操作面板上同时还有直接用于手动操作的开关。