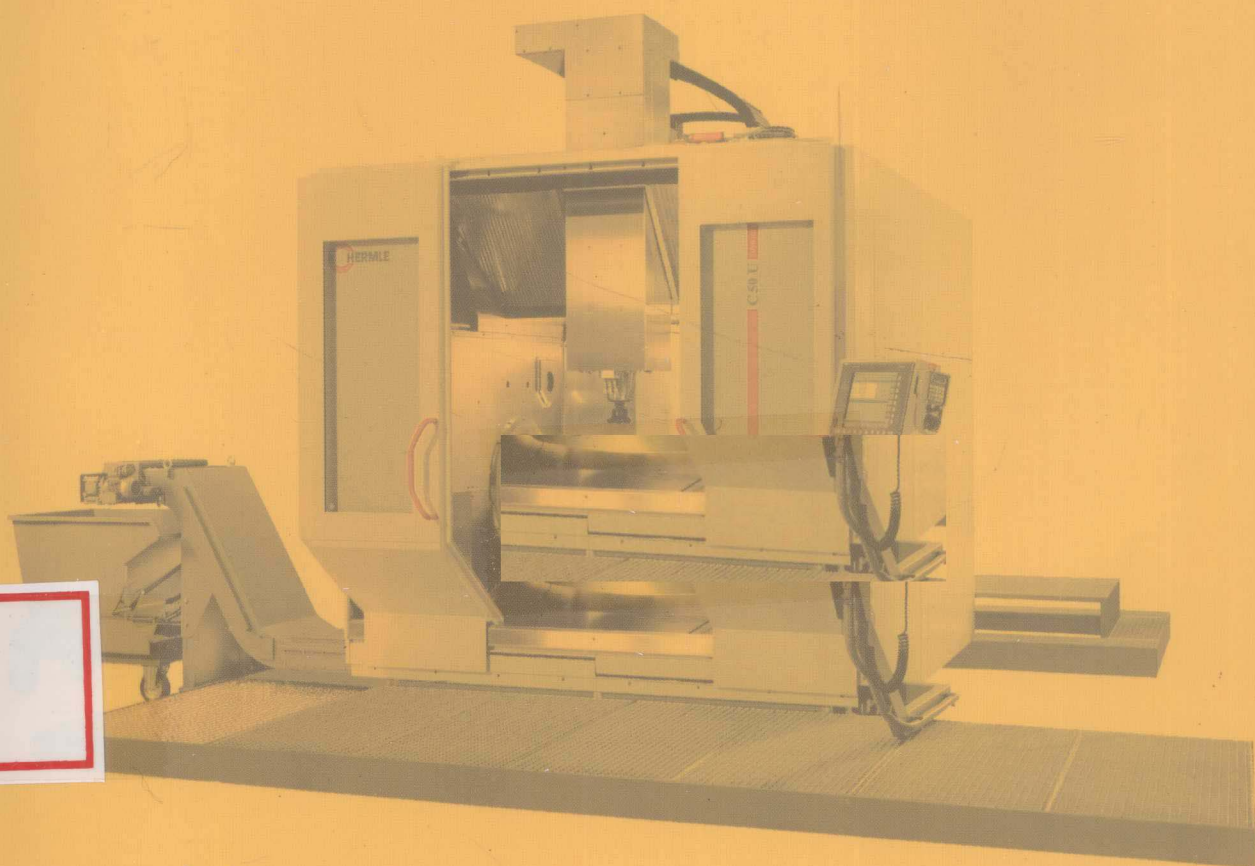




全国数控技能大赛多轴培训选用教材  
全国现代制造技术远程培训教材

# 数控机床多轴加工技术 实用教程

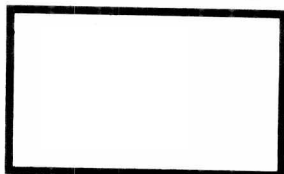
主 编 宋放之  
副主编 童华强 宋小春  
主 审 金福吉



清华大学出版社



全国数控技能大赛多轴培训选用教材  
全国现代制造技术远程培训教材



# 数控机床多轴加工技术 实用教程

主 编 宋放之  
副主编 童华强 宋小春  
主 审 金福吉

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是人力资源和社会保障部等六部委主办的全国数控技能大赛参考用书,也是一本专门介绍数控机床多轴加工技术的教材。本书分为上、下两篇。上篇主要介绍多轴加工所用到的数控机床结构、数控系统功能、多轴加工工艺、编程和仿真软件。下篇主要介绍多轴加工典型案例。这些典型零件包括有多面体的定向加工、圆弧面上的钻孔加工、圆柱面上螺旋槽的加工、叶片零件的加工、叶轮零件的加工以及车铣复合加工。这些零件都具有一定的代表性,同时也是数控技能大赛的考试要素。

本书的特点是:读者参考书中案例所给出的工艺路线和方法、输入案例中给出的数控程序,就能够加工出案例中的工件。对于暂时没有五轴机床的读者而言,也可以根据书中介绍的 Vericut 软件进行仿真加工,或者是学习和了解多轴加工的基本理念。本书不仅可以作为职业院校数控多轴加工的实用教材,而且可以用作在岗技术工人的参考用书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

数控机床多轴加工技术实用教程/宋放之主编. --北京:清华大学出版社,2010.4  
ISBN 978-7-302-22295-8

I. ①数… II. ①宋… III. ①数控机床—加工—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 054947 号

责任编辑:庄红权

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:17.5

字 数:418千字

版 次:2010年4月第1版

印 次:2010年4月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:28.00元

产品编号:036531-01

## Preface

机械工业是装备制造业最重要的组成部分,我国机械工业的重要产品产量已经居世界前列,其中40%左右的产品达到世界先进水平,20%左右的产品掌握了关键核心技术。当前我国数控产业的产品结构不断优化,技术含量增加明显,每年高精、高速、五轴联动等高档数控机床的生产都超过千台。船用曲轴、大型叶片、整体叶轮等国际高难度零部件,我国都可以依靠自主知识产权的数控设备进行加工。我国的数控机床正处于新的历史发展阶段。

2009年我国数控机床产量接近13万台。然而数控机床的发展与数控技能人才是紧密结合的,根据不同时期经济发展的需求,中国每年数控机床操作人才短缺30万人左右。这是制约中国数控机床发展的重要瓶颈。另外,随着数控机床的发展,中国适应这种技术发展的复合型人才的需求量也在不断加大。由于数控机床操作人才的短缺,很多工厂在购买机床的时候首先考虑的是有没有人操作,有没有人来维修,这些机床日常检测怎么办。要想摆脱数控人才短缺的困境,当前就要制订一个长短结合的规划。从长远的角度考虑,要在大学、中专、技校等不同层次学校开设这些方面的专业课程,培养这方面的专业人才。另外,还要建立一个短期培训体制,对有一定基础的企业在岗工人进行培训,提高他们的操作水平。

从2004年以来人力资源和社会保障部等六部委连续成功地举办了三届全国数控技能大赛。这是一项贯彻落实党中央、国务院关于装备制造业发展的若干意见和有关高技能人才的文件精神的具体措施。大赛的成功举办,对进一步深化职业教育改革,提高职业教育质量,增强职业教育的吸引力也有着重要的作用。通过开展数控技能大赛、职业技能鉴定、数控技能培训等多种形式,加速实现高技能人才培养的目标任务。

2010年举办的第四届全国数控技能大赛中增加了多轴加工技术,这是从三轴加工技术向更为复杂的多轴加工技术的突破。为了更好地使职工、教师和学生了解多轴加工技术,第四届全国数控技能大赛组委会取百家之长、博众家之采,精心为选手推出了《数控机床多轴加工技术实用教程》一书。目的只有一个,那就是要促进人才技术的提升,为高技能人才成长营造浓厚的社会氛围,开辟快速、便捷的绿色通道。



通过书中的实际案例可以看出编者为此付出的辛勤劳动。我相信这本书的出版一定能给参加全国数控技能大赛的选手带来收获。同时,也相信这本书一定可以在数控技能培训与教学,以及高技能人才培养中发挥出更好的作用。

2010.3

## Foreword

当前在我国工业生产领域中,先进制造业水平正处于大发展时期。其中数控机床的制造尤为突出。目前企业和工厂急需高素质的数控技能人才。为了使人才培养的发展与时俱进,并且适应企业实际所需,2004年以来人力资源和社会保障部等六部委主办的全国数控技能大赛已经成功举办了三届。通过数控技能竞赛来选拔和培训数控高技能人才,是一项贯彻、落实党中央、国务院促进装备制造业技术发展策略和大力发展职业教育方针的重要措施。2010年第四届全国数控技能大赛即将举行,本届大赛的显著特点是增加了数控机床多轴加工技术,从而实现数控技能竞赛从三轴加工到多轴加工零的突破,使技能大赛的技术水平得以提高。

为了能够适应数控多轴加工的技术需要,同时也是为了满足第四届数控技能大赛所需,第四届全国数控技能大赛组委会和全国现代制造技术远程培训工作委员会委托北京市斐克科技有限责任公司(全国数控技能大赛承办单位),组织编写了《数控机床多轴加工技术实用教程》一书。该书重点介绍了典型多轴数控机床结构、国内典型数控系统的多轴控制功能、典型多轴加工的编程软件和仿真软件、多轴加工的工艺特点以及典型的多轴加工案例。读者参考书中案例所给出的工艺路线和方法、输入案例给出的数控程序,就能够加工出案例中的工件。对于暂时没有五轴机床的读者而言,也可以根据书中介绍的 Vericut 软件进行仿真加工,或者是学习和了解多轴加工的基本理念。

本书由北京航空航天大学机械学院宋放之老师主编,北京工业技师学院童华强院长和华南理工大学宋小春老师为副主编。参加编写的人员有北京工业技师学院的朱永亮、张军、杨轶峰、王展超等各位老师,北京数码大方科技有限公司(CAXA 软件)的谢小星高级工程师,英国 Delcam(中国)有限公司的翟万略技术总监、杨书荣高工和林洋高工,北京市斐克有限责任公司的李海霞老师和熊军权老师,沈阳黎明发动机公司的张鹏辉高级工程师,湖南大学机械与运载工程学院朱克忆老师,广州市高级技工学校杨伟明老师,北航工程训练中心的杨伟群教授以及北京新吉泰软件有限公司的孙红花工程师。北京机床研究所金福吉副总工艺师担任本书的主审。

在本书的编写过程中得到了北京市斐克科技有限责任公司、北京数码大方科技有限公司(CAXA 软件)、武汉华中数控股份有限公司、广州数控设备有限公司、沈阳机床

集团、北京机电院、北京新吉泰软件有限公司、英国 Delcam(中国)有限公司、瑞士 GF 阿奇夏米尔集团中国区市场部、德国贝托特·哈默机械制造股份公司的大力支持与帮助,在此一并致谢。

由于篇幅所限,书中很多案例的详细建模过程以及一些其他案例未能详尽描述。如有需要了解与教材学习配套的相关内容,请读者登录 [www.cmmtt.com](http://www.cmmtt.com) 网站查询。

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。欢迎读者在上述网站论坛中共同讨论数控多轴加工技术。

编者

2010年3月

### 第一篇 多轴数控加工基础篇

<b>第 1 章 多轴机床的常见类型</b> .....	3
1.1 三轴立式加工中心附加数控转台的四轴联动机床 .....	3
1.2 三轴立式加工中心附加可倾斜式数控转台的五轴联动机床 .....	6
1.3 四轴立式加工中心附加数控转台的五轴联动机床 .....	7
1.4 具有 B 轴的卧式加工中心(四轴) .....	11
1.5 五轴联动数控铣床(加工中心).....	12
1.5.1 双摆台式的五轴联动铣床 .....	12
1.5.2 双摆头的五轴联动机床 .....	21
1.5.3 一摆头一摆台的五轴联动机床 .....	23
1.6 车铣复合机床.....	24
<b>第 2 章 多轴机床的常用数控系统</b> .....	26
2.1 华中 HNC-08 多轴数控系统的编程 .....	26
2.1.1 HNC-08 系统的编程基础 .....	26
2.1.2 HNC-08 系统的 G 指令代码 .....	27
2.1.3 HNC-08 系统的插补指令 .....	30
2.1.4 HNC-08 系统的状态指令 .....	40
2.1.5 HNC-08 系统中高速高精模式(G05.1) .....	47
2.1.6 HNC-08 系统中五轴加工功能 .....	48
2.2 广数 GSK 25i 多轴数控系统的编程 .....	50
2.2.1 GSK 25i 系统编程基础 .....	50
2.2.2 准备功能 G 代码 .....	52
2.2.3 固定循环 G 代码 .....	59
2.2.4 辅助功能 M 代码.....	63
2.2.5 主轴控制(S5 位模拟).....	63
2.3 飞阳 C0 多轴数控系统的编程 .....	64
2.3.1 编程功能 .....	64
2.3.2 刀具长度和半径补偿 .....	78





2.3.3	程序旋转 .....	81
<b>第3章</b>	<b>多轴加工应用技术研究 .....</b>	<b>84</b>
3.1	多轴加工的理解 .....	84
3.2	多轴加工的目的 .....	85
3.3	多轴加工的特点 .....	89
3.4	典型多轴加工零件的工艺方法分析 .....	91
3.4.1	实例分析 1 .....	92
3.4.2	实例分析 2 .....	93
3.4.3	实例分析 3 .....	94
<b>第4章</b>	<b>CAM 软件的多轴功能 .....</b>	<b>100</b>
4.1	CAXA V2008 制造工程师多轴加工功能简介 .....	100
4.1.1	四轴曲线加工 .....	101
4.1.2	四轴平切面加工 .....	105
4.1.3	叶轮粗加工 .....	107
4.1.4	叶轮精加工 .....	109
4.1.5	五轴 G01 钻孔 .....	113
4.1.6	五轴侧铣 .....	114
4.1.7	五轴等参数线 .....	116
4.1.8	五轴曲线加工 .....	117
4.1.9	五轴曲面区域加工 .....	118
4.1.10	五轴转四轴轨迹 .....	119
4.1.11	五轴定向加工 .....	121
4.2	Delcam PowerMILL 五轴加工软件简介 .....	121
4.2.1	PowerMILL 高效粗加工 .....	122
4.2.2	PowerMILL 五轴加工功能 .....	124
4.2.3	PowerSHAPE Pro 三合一混合造型设计系统 .....	130
4.3	VERICUT 仿真软件功能模块简介 .....	131

## 第二篇 多轴数控加工应用篇

<b>第5章</b>	<b>教学案例一：多面体基座加工 .....</b>	<b>137</b>
5.1	学习任务：肋板类零件的加工 .....	137
5.2	学习目标和加工条件 .....	138
5.3	解决方案 .....	138
<b>第6章</b>	<b>教学案例二：圆弧面钻孔 .....</b>	<b>173</b>
6.1	大圆弧多面体钻孔 .....	173
6.1.1	学习任务：大圆弧多面体钻孔 .....	173

6.1.2	学习目标 and 加工条件	174
6.1.3	解决方案	174
6.2	圆柱面钻阵列孔	181
6.2.1	学习任务: 圆柱面零件的阵列孔加工	181
6.2.2	学习目标 and 加工条件	181
6.2.3	解决方案	182
<b>第 7 章</b>	<b>教学案例三: 圆柱凸轮的加工</b>	<b>186</b>
7.1	学习任务: 柱面螺旋槽的加工	186
7.2	学习目标 with 加工条件	187
7.3	解决方案	187
<b>第 8 章</b>	<b>教学案例四: 叶片零件的编程 with 加工</b>	<b>199</b>
8.1	学习任务	199
8.2	学习目标 and 工作条件	199
8.3	解决方案	199
<b>第 9 章</b>	<b>教学案例五: 多面体定向加工</b>	<b>209</b>
9.1	学习任务: 多面体零件加工	209
9.2	学习目标 and 工作条件	209
9.3	解决方案	210
9.4	扩展知识: PowerMILL 系统应用于多轴加工的特色功能	240
<b>第 10 章</b>	<b>教学案例六: 叶轮加工</b>	<b>246</b>
10.1	学习任务: 叶轮的加工方法	246
10.2	学习目标 with 加工条件	246
10.3	解决方案	246
<b>第 11 章</b>	<b>教学案例七: 车铣复合件加工</b>	<b>257</b>
11.1	学习任务: 车铣复合类零件加工	257
11.2	学习目标 and 加工条件	257
11.3	解决方案	258

# 第 一 篇

## 多轴数控加工基础篇

第 1 章 多轴机床的常见类型

第 2 章 多轴机床的常用数控系统

第 3 章 多轴加工应用技术研究

第 4 章 CAM 软件的多轴功能



# 第1章

## 多轴机床的常见类型

所谓多轴数控机床是指在一台机床上至少具备第4轴。如四轴数控机床有3个直线坐标轴和1个旋转坐标轴,并且4个坐标轴可以在计算机数控(CNC)系统的控制下同时协调运动进行加工。五轴数控机床具有3个直线坐标轴和两个旋转坐标轴,并且可以同时控制、联动加工。与三轴联动数控机床相比较,利用多轴联动数控机床进行加工的主要优点如下。

(1) 可以一次装夹完成多面多方位加工,从而提高零件的加工精度和加工效率。

(2) 由于多轴机床的刀轴可以相对于工件状态,而改变,刀具或工件的姿态角可以随时调整,所以可以加工更加复杂的零件。

(3) 由于刀具或工件的姿态角可调,所以可以避免刀具干涉、欠切和过切现象的发生,从而获得更高的切削速度和切削宽度,使切削效率和加工表面质量得以改善。

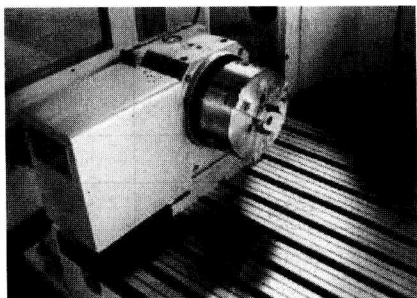
(4) 多轴机床的应用,可以简化刀具形状,从而降低刀具成本。同时还可以改善刀具的长径比,使刀具的刚性、切削速度、进给速度得以大大提高。

(5) 在多轴机床上进行加工时,工件夹具较为简单。由于有了坐标转换和倾斜面加工功能,使得有些复杂型面加工,转变为二维平面的加工。由于有了刀具轴控制功能,斜面上孔加工的编程和操作也变得更加方便。

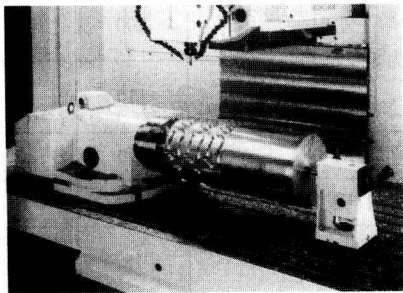
由于增加了旋转轴,所以与三轴数控机床相比,多轴机床的刀具或工件的运动形式更为复杂,主要有以下几种形式。

### 1.1 三轴立式加工中心附加数控转台的四轴联动机床

如图1-1所示,这类机床是在三轴立式数控铣床或加工中心上,附加具有一个旋转轴的



(a)



(b)

图 1-1 数控转台

(a) 数控转台安装在工作台上的情况; (b) 数控转台装夹工件的情况

数控转台来实现四轴联动加工,即所谓 3+1 形式的四轴联动机床。由于以立式铣床或加工中心作为主要加工形式,所以数控转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。由于数控转台是一个附件,所以用户可以根据需要选配。

(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,既可以选择三爪自定心卡盘装夹,也可以选配四爪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,可以把数控转台拆卸下来。当需要时,可以很方便地把数控转台安装在工作台上进行四轴联动加工。

数控转台的品牌和规格比较多,表 1-1 所示为某型号数控转台的技术参数。

表 1-1 数控转台的技术参数

项 目		TK13160E	TK13200E	TK13250E	TK13315E	TK13345E	TK13800E	TK13900E	
1	工作台面直径/mm	φ160	φ210	φ250	φ315	φ400	φ500	φ630	
2	工作台中心/mm	135	140	160	210	260	310	400	
3	工作台总厚度/mm	170	180	190	210	250	290	350	
4	中心定位孔直径/mm	φ20H6×18	φ25H6×20	φ30H6×22	φ40H6×25	φ50H6×28	φ60H6×25	φ70H6×28	
5	定位键宽度/mm	14	14	18	18	18	22	22	
6	工作台 T 形槽宽度/mm	4~12	4~12	6~12	6~14	6~14	6~18	6~18	
7	传动比	1:80	1:90	1:90	1:90	1:120	1:150	1:120	
8	总传动比	1:90			1:180				
9	工作台最高转速/(r/min)	16.6	16.6	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	
10	设定最小分度单位	0.001°							
11	电机(用户自备) 带 2000 脉冲编 码器	功率/kW	≥0.9	≥0.9	≥0.8	≥0.8	≥1.1	≥1.4	≥1.4
		扭矩/ (N·m)	≥3	≥3	≥5	≥5	≥10	≥12	≥12
12	分度精度	40"	30"	30"	25"	20"	20"	20"	
13	重复精度	8"	8"	6"	6"	6"	6"	4"	
14	刹紧力矩	油压刹紧 /15×10 <sup>5</sup> Pa	300	450	1000	1600	2000	2800	4000
		气压刹紧 /5×10 <sup>5</sup> Pa	110	150	300	500	650	800	1500
15	水平承载/kg	200	200	250	350	500	600	800	
16	立式承载/kg	75	75	150	175	300	350	400	
17	允许最大惯量(重直使用时)/(kg·cm·s <sup>2</sup> )	15	15	16.4	55.4	55.4	100	200	
18	最大允许驱动力矩/ (N·m)	90	90	300	700	1200	1700	3000	
19	转台重量/kg	55	75	110	200	325	650	1125	

### 【注意】

(1) 这类机床的数控系统一定具有第 4 轴的驱动单元,同时具备控制四轴联动的功能。如果只有 3 个伺服系统,是不能做到四轴联动的。

(2) 数控转台的尺寸规格会影响原有机床的加工范围。用户要根据被加工的工件尺寸合理选择数控转台的尺寸规格。

(3) 数控转台及伺服系统参数设定要满足四轴联动要求。

立式加工中心可选用沈阳机床厂的 VMC850E 机床,如图 1-2 所示。该机床的特点是结构紧凑、性价比高,其技术参数如表 1-2 所示。

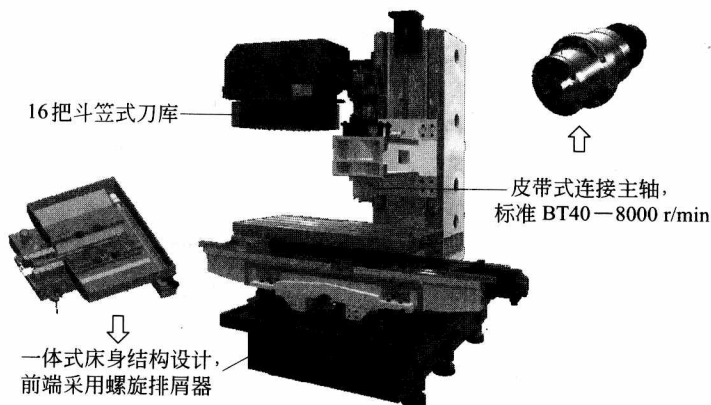


图 1-2 VMC850E 立式加工中心的机构示意图

表 1-2 VMC850E 立式加工中心的技术参数

项 目		单 位	技 术 参 数
工作台	工作台尺寸	mm	1000×500
	T 形槽尺寸	mm	18×5
	允许最大载荷	kg	600
工作范围	行程(X/Y/Z)	mm	850/500/540
	主轴端面最大距离	mm	690
	主轴端面最小距离	mm	150
主轴	主轴锥柄		7:24(BT40)
	主轴转速	r/min	8000
	主电机扭矩	N·m	35.8
	主电机功率	kW	7.5/11
进给	快速移动速度(X/Y/Z)	m/min	32/32/30
	进给速度	m/min	20



续表

项 目		单 位	技 术 参 数
刀库	刀库形式		斗笠式
	刀具数量	把	16
	换刀时间	s	7
定位精度	执行 JISB6330 标准	mm	±0.005/300
	执行 JB/T8771.4 标准	mm	0.02/0.015/0.015
重复定位精度	执行 JISB6330 标准	mm	±0.003
	执行 JB/T8771.4 标准	mm	0.012/0.01/0.01
电器总容量		kV·A	20
气源压力		MPa	0.5~0.7
机床轮廓尺寸及重量	占地面积(长×宽)	mm	3150×2400
	机床高度	mm	3000
	主机重量	kg	5200
控制系统			FANUC

## 1.2 三轴立式加工中心附加可倾斜式数控转台的五轴联动机床

如图 1-3 所示,这类机床是在三轴立式数控铣床或加工中心上,附加具有两个旋转轴的可倾斜式(摇篮式)数控转台来实现五轴联动加工,即所谓 3+2 形式的五轴联动机床。如果机床的数控系统具有 5 个伺服单元,同时具备控制五轴联动的功能,用户只要安装上可倾斜式数控转台,即可进行五轴联动的数控加工。如图 1-4 所示的是某种型号的可倾斜式数控转台。使用时一般是平放在立式数控铣床或立式加工中心的工作台面上,各个坐标轴的定义如图 1-5 所示。这类机床的优点和需要注意的方面与 3+1 形式的四轴联动机床相类似,具体如下。

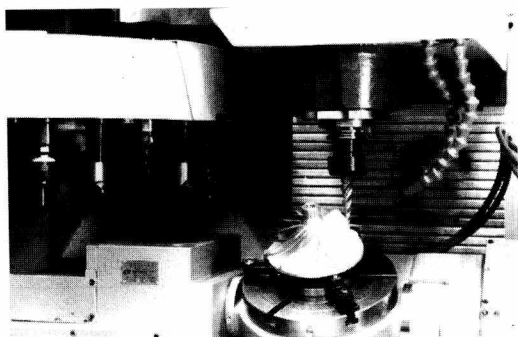


图 1-3 安装可倾斜式数控转台的五轴联动机床



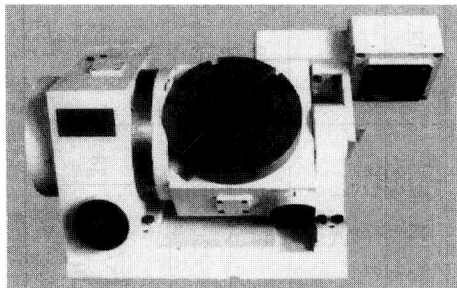


图 1-4 可倾斜式数控转台

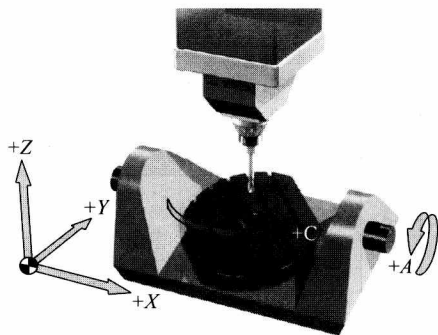


图 1-5 可倾斜式数控转台坐标轴示意图

(1) 机床的数控系统必须具有五轴联动的功能。

(2) 当立式数控铣床或加工中心安装了可倾斜式数控转台以后,受转台自身高度的影响,可用于加工的  $Z$  轴行程就减小了。用户在使用时,除了要考虑被加工零件的高度以外,还要考虑刀具的长度。

(3) 数控转台通常需要压缩空气给锁紧装置提供动力,所以要备有气源。

(4) 为实现五轴联动功能,安装可倾式数控转台后,数控系统最小设定单位:直线轴  $0.0001\text{ mm}$ ,旋转轴  $0.0001^\circ$ 。

表 1-3 所示是某型号可倾斜式数控转台的技术参数。

### 1.3 四轴立式加工中心附加数控转台的五轴联动机床

这类立式数控铣床或加工中心的标准设计就是立铣头可以围绕  $Y$  轴旋转,即机床具有  $B$  轴。使用时附加具有一个旋转轴的数控转台,来实现五轴联动加工。这就是所谓  $4+1$  形式的五轴联动机床。

如图 1-6 所示,XKR400 是北京机电院生产的五轴联动加工中心。该机床具有可以摆动的  $B$  轴和可以  $360^\circ$  任意分度的  $C$  轴。

XKR400 五轴联动加工中心是为满足叶轮加工的需要,而设计开发的五轴数控机床,机床配置  $X,Y,Z$  三个直线轴和  $B,C$  两个回转轴。机床主要用于中、小型叶轮的加工,三维复杂曲面的加工,以及凸轮、模具、箱体、阀体和盘类零件的加工,适用于机械、航空、汽车、模具等行业。该机床的特点如下。

(1) 具有大功率高速电主轴。机床采用德国西门子高精度电主轴,功率达到  $12\text{ kW}$ ,最高转速可达  $12000\text{ r/min}$ 。

(2) 具有大扭矩、高精度的回转轴。机床的  $B,C$  回转轴均采用精密角度编码器闭环控制,确保高回转精度。 $B$  轴采用德国西门子力矩电机直接驱动,响应快,无间隙传动。 $B$  轴输出额定扭矩为  $600\text{ N}\cdot\text{m}$ ,最大扭矩为  $1200\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

(3) 树脂砂铸造的优质铸铁基础件、高刚性高精度的直线滚柱导轨以及高刚性的精密传动元件使机床刚性大大提高。

(4) 机床自动换刀装置采用无机械手换刀,可进行任意选刀。可进行连续加工。