



高速加工机床的选购与性能评价

广东工业大学机电学院 (广州 510080) 周 莉 王成勇

1. 前言

高速加工技术不仅可缩短零件的切削加工时间, 提高生产效率, 降低生产成本, 还可获得高的加工精度和表面加工质量, 省去传统加工工艺中的车、铣等后续精加工工序。高速加工机床已成为厂家为提高生产效率、满足零件高精度及高表面质量要求而竞相采用的重要加工手段之一。目前国内国际市场上推出的高速加工机床品种繁多, 性能各异, 如何合理地选择既满足使用要求, 价格又适宜的高速加工机床, 对于机床使用厂家合理投资, 提高设备资源的利用率是十分重要的。

影响高速加工机床使用性能的因素有很多, 包括加工目的 (如: IT 行业模具加工、铝合金加工、石墨电极加工、铸锻模具加工、高温铝合金零件加工等)、高速主轴、刀具系统、CNC 控制系统和 NC 编程策略等。本文根据国内销售的若干知名品牌高速加工中心的机床资料分析, 以及在选购高速加工机床的一些经验, 重点从高速加工工艺过程各重要环节, 包括工件材料、刀具、工艺流程、工件加工质量等, 对高速主轴系统、进给系统、机床结构、温控系统、CNC 控制系统、冷却系统和刀具系统等合理化选用问题进行分析并简单介绍了整机性能的评价方法。

2. 高速加工机床的合理选用

选择机床的品牌及规格时, 不仅要考虑机床的技术性能及加工能力, 确定机床的标准配置和选购件对于精确估算投资成本也是非常重要的。选择高速加工机床主要有以下四个重要环节。

(1) 机床选型 高速加工机床选型时, 可对照各机床厂家所提供的机床规格参数说明 (如表 1), 从实际需要出发, 对以下各因素进行综合考虑: 机床的型式 (立式、卧式或其他) 和结构、机床大小 (工作台尺寸)、高速主轴系统 (转速、功率和结构型式)、进给系统 (进给速度和加速度)、刀柄系统 (接口型式及刀库性能)、高速 CNC 控制系统 (联动轴数)、温度控制系统、冷却润滑系统 (冷却方式)、切屑处理系统 (对于加工过程产生微细粉屑

的应用场合尤为重要) 等等。

①高速主轴系统 高速主轴单元是高速加工机床的核心部件, 高转速下主轴的刚性、动态特性、轴承及冷却系统等都对高速主轴的使用性能有着重要影响。目前高速加工机床的主轴部件通常采用如图 1 所示的内装式电主轴, 采用传统的皮带和齿轮传动的主轴系统最高转速不超过 15 000 r/min, 显然无法满足高速加工的高速高精度要求。高速主轴的转速和功率应根据本公司生产零件的实际需要来决定, 通过工件材料 (如图 2)、刀具材料、工件的生产工艺流程等等来确定加工所需的最大转速和功率, 以免造成投资浪费。此外, 极高转速主轴的输出扭矩通常也相对较小, 并不适合于重切削, 对使用条件也有较多限制, 所以切不可盲目追求高转速主轴。高速加工的主轴转速通常应不低于 8 000

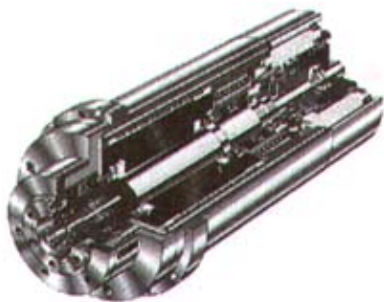


图 1 内装式电主轴

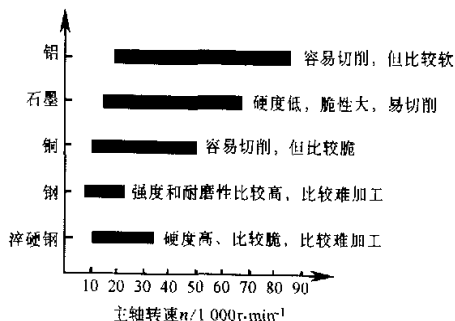


图 2 工件材料与机床转速范围



r/min; 并且主轴应可满足长时间高速运转工作, 轴冷却系统, 以减小主轴的热变形。而且精度高, 刚性好, 运行平稳; 应具备高效的主

表 1 部分日本和欧洲高速加工机床规格对照表

机 型		SMM2500	RP800	V56	YDM850V	MF-46VA	VCP800	DMC70V hi-dyn
		MAZAK	Roeders	MAKINO	YASDA	OKUMA	MIKRON	DMC
技术参数	转速 $/r \cdot \min^{-1}$	25 000	36 000	20 000	20 000	15 000	42 000	18 000
	功率/kW	AC22/18.5	17/25	AC18.5/15	AC15/18.5	AC15/11	14	AC10/15
加工范围	X/mm	1 020	800	900	800	762	700	700
	Y/mm	510	600	550	525	560	550	550
	Z/mm	460	400	450	350	460	450	500
工作台 a/mm × b/mm		1 200 × 550	900 × 700	1 050 × 550	900 × 600	760 × 460	900 × 550	900 × 550
主轴锥度		40; HSK63A	HSK50	40	40	40; HSK-63A	HSK-40E	HSK-E 50
进给速度 $/m \cdot \min^{-1}$	快进速度	50	60	20	5	40 (7; 32)	22	50
	工作速度	50	60	20	5	32	15	50
数控系统		Mazatrol Fusion 640	Roeders RMS6	Professional 3	Fanuc 16i-MA	OSPUI100M	Heidenhain iTNC430	Heidenhain iTNC 530
定位精度/mm		± 0.002 5		± 0.001 5		± 0.001	0.008 (DIN/ISO 230)	0.008 (VDI/DCQ)
刀库/支		30	30	15	30	20	12	30
机床重量/kg		8 100	13 000	10 300	10 000	9 700	6 500	10 300

②高速进给系统 高速进给系统主要有高速高精度滚珠丝杠传动和直线电机传动两种方式。高速进给系统必须满足高速度、高加速度、高精度、高可靠性和高安全性的性能要求。直线电机进给系统是高速进给系统的理想方式。为实现大的进给速度和加速度, 直线电机已越来越多地被采用。但由于直线电机价格比较昂贵, 且实际应用技术尚不完善, 因此目前多数中低档高速机床仍采用技术成熟、成本较低的高速高精度滚珠丝杠进给系统。但滚珠丝杠传动进给速度和加速度不高 (通常进给速度 $\leq 60m/min$, 加速度 $\leq 1g$), 存在刚性差, 热变

形、噪声和磨损严重等问题。为满足高速加工需要, 进给速度通常应不低于 $20m/min$; 宜采用小运动惯量轻质移动部件, 以实现高加速度。

③机床结构 目前高速加工机床多采用龙门式立柱型对称结构, 可提高机床的承载能力和刚性, 增强机床的耐冲击性和抗振性, 降低机床的固有振动频率, 减小机床因热变形所造成的几何误差。此外还有其他一些机床结构形式可供选择, 例如: 箱型结构、高床身结构、防尘密封结构等, 如图 3 所示。高速加工机床的结构应确保机床的承载能力、高刚性、热稳定性、耐冲击性和抗振性等。



图3 机床结构型式

④刀柄系统 高速加工刀柄系统必须满足刚性好、传递扭矩大、体积小、动平衡性好、高速下切削振动小,装夹刀具后能够承受高的加减速度和集中应力。目前高速加工常用的刀柄形式主要是常规7/24锥度刀柄(ISO、BT、SK等)、BBT刀柄和HSK刀柄等。常规7/24锥度刀柄为单锥面定位结构,径向定位精度不高,由于高速下受离心力和热效应影响大,重复定位精度不稳定,应用转速通常不超过12 000 r/min。BBT刀柄与主轴的锥面及端面同时接触,保持力矩更大,刚性更强,具有较高的跳动精度和重复精度。HSK刀柄采用中空短锥双重定位结构,径向和轴向刚性好,转动惯量小,定位精度和重复定位精度高,高速时的夹紧力大,非常适合于高速加工。

⑤冷却润滑系统 高速加工机床的冷却润滑系统对于机床的使用性能、加工精度、表面加工质量和刀具使用寿命等等都有着重要的影响。高速加工机床的冷却系统通常有冷却液冷却、油雾冷却、干空气冷却及主轴和刀具通孔高压内冷却等形式。冷却系统的冷却方式(冷却液冷却和空气冷却)和喷射压力大小对于切削力和刀具磨损影响显著。根据

工件材料的不同,应选用与其相匹配的冷却系统和喷射压力,才能获得高的加工精度和表面加工质量。

⑥切屑处理系统 常用的高速机床切屑处理系统主要有螺旋式、刮板式、铰链式、带式自动排屑器以及抽屉式集屑箱等形式,应满足排屑效率高的要求。用于粉尘加工,尤其是石墨加工的高速机床必须具备高效的内置抽尘装置。

(2) 高速CNC控制系统的选择 选用高速加工机床时,CNC控制系统必须具备以下基本功能:待加工轨迹监控进给速度控制超过100个程序段;易于改型,比如夹紧调整或五轴转换;可消除各轴线的轮廓误差,提高走刀精度;通过走刀路径或轴线方向上的扭矩衰减来降低机床磨损;刀具修正,比如刀具长度、半径修正;自动光顺走刀路径;机械误差补偿;机床的安全操作等等。

高速切削有着不同于传统数控加工的特殊工艺要求,要求能快速形成刀具路径,走刀路径应圆滑,少拐点,程序算法应保证高精度,确保合理的进给速度,避免刀具振动等。因此,高速切削的数控系统必须要求运算速度快,工作稳定性好,并具有相应的高速高精度控制功能。比如:NURBS插补、加工残余分析,待加工轨迹监控,尖点控制,自动防过切保护,补偿功能等等。目前,市场上许多适合于高速加工的数控系统都具有以上控制功能,比如:FANUC16i、SIEMENS 840D、Heidenhain TNC 430/530、Mazak Fusion 640、Roders RP 800的RMS 6等控制系统。但是有许多高速加工机床的标准配置并未包含这些高速控制功能,而是作为选购件另行报价,因此机床用户可按照使用需求来配置高速CNC系统。

(3) 机床精度 高速加工机床精度包括机床的位置精度、几何精度和加工精度,但是选择高速加工机床时,一般不可能通过实际的高速加工过程和检测手段来检测几何精度和加工精度,因此,仅能通过机床广告上给出的机床定位精度和重复定位精度的数值来对机床精度进行初步判定。高速加工机床的位置精度主要取决于数控系统和机械传动误差,可反映机床各轴在数控系统驱动下所能达到的位置精度。目前,国内市场上的高速加工机床的位置精度没有统一的检测标准,欧洲机床通常采用DIN或VDI/DGQ标准,日本机床一般采用JIS标



准,台湾机床采用 CNS (台湾标准),国产机床现在采用 GB 标准。从数值上看,欧洲机床的标准精度指标比其他同类机床的指标要高 1.5~2 倍,因此,衡量机床精度时必须弄清楚各精度指标的定义,才能准确地了解机床的实际精度。

(4) 其他 机床维护及保养特性、操作安全性、控制系统的适应性、以及机床销售公司所能够提供的售后服务及应用支持也必须予以重视。购买高速加工中心的招标书的技术参数可参考表 2 所列各项来具体确定。注意:技术规格中标注“★”号的为关键技术参数,对这些关键技术参数的任何偏离都将导致废标。

表 2 高速加工机床的技术参数及要求

机床规格		主轴最高转速 (★)、主轴功率 (★) X-Y-Z 轴快速进给速度 (★)、X-Y-Z 轴切削进给速度 (★) X-Y-Z 轴进给加速度 (★) 定位精度 (★)、重复定位精度 (★) 床身材料、工作台尺寸 (长×宽)、工作台承重 轴位移量 (X、Y、Z 轴)、主轴鼻端至工作台面距离 刀库容量、最大刀具直径和长度、刀柄、换刀时间
数控系统	基本功能	数控系统类型、内存容量、控制轴数、插补功能、补偿功能、自诊断功能、编程功能、显示功能、控制功能、测量功能等
	高速加工控制功能	NURBS 插补、加工残余分析、待加工轨迹监控、尖点控制、自动防过切保护等
附件配置		主轴循环冷却系统、冷却系统、润滑系统、工作灯、安全保护系统、油雾收集装置、主轴吹气装置、自动刀长测量装置、冷却液恒温制冷装置等

3. 高速加工机床整机性能评价

科学合理地进行机床整机性能评价是选购高速加工机床的重要环节。整机性能评价主要指的是机床的几何精度、位置精度和加工精度等各项指标的

综合测试评定。用户可根据精度要求的程度高低来选择合适的机床性能评价方法。

一般用户仅需采用简单的试切法便可满足使用要求。即在选择高速加工机床之前,用户综合考虑本公司的产品种类、生产计划和购买能力,从自身的实际需要出发,选择一两种典型产品作为将来进行机床工作性能验收的试件,通过加工时间或加工质量(形状精度、位置精度和加工表面质量)来衡量该机床的收益性;或采用美国 NAS 公司开发的标准化“圆形—菱形—方形”试验(CMTBA)来测定机床的工作精度,为公司的投资决策提供重要信息。

但是对于产品加工精度要求较高的用户,仅通过加工有代表性的典型零件来决定机床能否通过验收,往往是不够的。此时,机床的整机性能还必须通过几何精度和位置精度检验,以及动态性能测试来进行动态性能评定,且测试条件应基本符合用户的实际加工条件,才能得出真实的机床工作性能验收结果。

高速加工机床的几何精度主要包括直线度、垂直度、平面度、俯仰与扭摆和平行度等,位置精度主要指的是定位精度、重复定位精度和微量位移精度。目前用于检测机床几何精度和位置精度检测的传统方法,如精密水平仪、千分表、准直仪、步距规、电子测微仪等,通常需要人工操作和手工数据处理,且检测精度低,只适用小型机的精度检测。此外,用于测试工作精度的 NAS 标准件试切也只能用于证实机床功能正常,而不能检定机床能否达到精度指标。现在国际上常用的高精度检测设备和校准技术是采用激光干涉仪或球杆仪来进行数控机床精度检定。例如,英国 REINSHAW 公司的 MI10 激光干涉仪,可用于测量和诊断各种几何尺寸的机床的几何精度、定位精度以及进行动态性能检测,精度比传统技术至少高十倍以上,还可进行自动数据采集,避免了人工计算,并可按照国际标准和我国标准来进行统计分析。该公司的 QC10 球杆仪可用于机床的两轴联动精度快速检测及机床故障分析。球杆仪现在已被国际机床检验标准如 ISO230、ANSI B5.54 推荐采用,机床用户可采用球杆仪测试以取代 NAS 试件工作精度检验,也可在球杆仪检测好机床后再切试件。

(收稿日期:20030728)