

基于多零件工序族工艺规划的 机床产品构型综合设计

黄 华¹ 靳 岚¹ 芮执元¹ 苟卫东²

1. 兰州理工大学, 兰州, 730050 2. 青海一机数控机床有限责任公司, 西宁, 810018

摘要:针对机床产品的定制问题,以基本工艺元为基础将多零件工序族进行组合,建立了工艺和机床结构的映射关系,建立了机床的运动功能模型并计算完成工序族所需要的运动范围,制定了机床的运动学图谱并根据约束条件进行选择,使机床的工艺能力在多零件工序组合的加工需求变化范围内,从而实现机床的定制柔性。工艺聚类和排序为实现以工艺能力为导向的机床结构设计提供了依据,保证了设计的定制性,最后以实例进行了说明。

关键词:工艺元;多零件;工序族;构型综合

中图分类号: TG502.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.05.008

Structure Configuration Synthesis of Machine Tools Based on Process Planning of Multi-parts

Huang Hua¹ Jin Lan¹ Rui Zhiyuan¹ Gou Weidong²

1. Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou, 730050

2. Qinghai No. 1 Machine Tool Co., Ltd., Xining, 810018

Abstract: A process family of multi-parts was clustered based on the process units to set up the mapping relation between process and structure of the custom machine tool. A kinematic model was established, the moving range was computed and moving style was selected by constraint conditions to make the machining ability satisfy the process requirements of multi-parts, and the flexibility of the machine tool was obtained. The cluster and arrangement of the process lay the foundation for the machine tools customization design and a case was used to illustrate the method.

Key words: process unit; multi-part; process family; structure configuration synthesis

0 引言

机床行业面临着激烈的竞争,实现机床产品开发效率与开发质量的统一,是企业追求的目标。因此,根据待加工零件的工艺需求,为用户量体裁衣,开发既无太多冗余功能又具有一定柔性的机床产品,成了当务之急。机床结构构型综合属于概念设计阶段,机床的构型配置大体上决定了它的刚度、精度和动态特性^[1]。目前对于机床结构构型的描述方法有有向结构图法^[2],它的节点和有向边分别代表机床的结构模块和作用力的流向。基于上述成果,有研究者又提出了一种产生机床所有可能构型配置的方法,并给出了机床的基本模块以及约束条件和基本特征^[3]。工艺规划是连接工件和机床运动结构配置的桥梁,文献^[4]根据待加工零件的尺寸、形状、加工精度、工作效率以及工艺特征之间的交叉关系、逻辑关系,确定机床所需的最少运动轴数、工作台所需的最小旋转角度。文献^[5]提出在工序需求的变化驱动

下,从对给定零件族所有加工工序的划分以及识别同一可重构机床需完成的工序族入手,利用旋量方法将工序族的加工信息转换为机床所需执行的一系列运动,并确定为完成这一系列运动机床必须具备的基本功能,利用图论确定一系列可选择的机床结构配置。Moon 等提出了一种基于螺旋理论的方法^[6],从刀位数据文件中抽取加工任务来完成机床运动配置,包括其运动轴数目和运动范围。这种方法非常复杂,需要以大量的矩阵运算为基础。

目前,机床结构的构型综合一般只关注于运动的可行性^[2],而缺乏根据零件工艺的针对性设计,因此本文针对多零件工序族进行工艺分析,包括单一零件和多零件的工艺聚类和排序,机床构型综合针对工序族进行,使机床具有一定范围内的定制柔性。

1 基于工艺的机床结构构型综合设计原理

工艺规划是零件特征和机床结构设计连接的桥梁,这三者间的互相联系如图 1 所示。可以看

收稿日期:2012-08-10

基金项目:国家科技重大专项(2010ZX04001-032);甘肃省自然科学基金资助项目(1308RJYA086)

出,面向机床结构设计的工艺规划需要完成以下几个任务:①为加工特征选择加工方法,形成工步,根据特征的逻辑关系对工步排序;②将相邻或相近的工步聚合为工序;③对工序进行排序,为下一步机床运动链的设计奠定基础;④计算工作节拍,确定其是否与生产纲领相符。

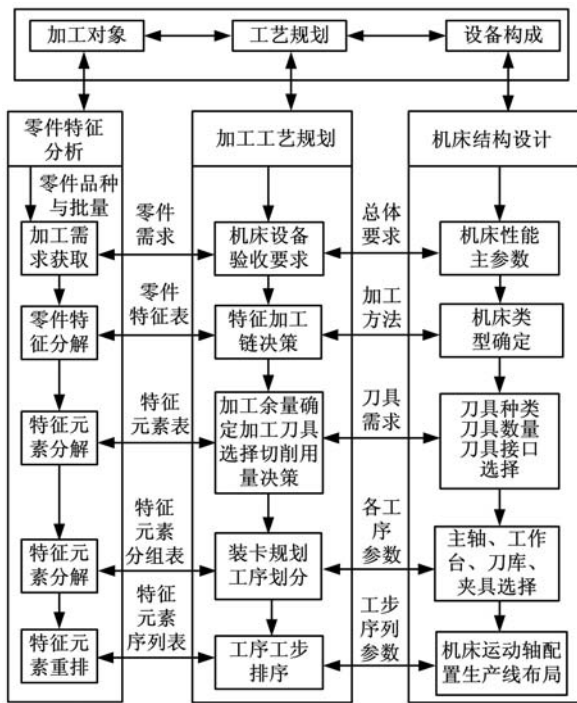


图1 零件—工艺—机床三者映射关系

经过工艺聚类 and 机床结构映射,在机床的功能和结构之间建立映射关系,得到机床的运动功能需求,获得能够满足加工需求的机床结构。确定机床结构时主要考虑所加工工件的大小、形状、加工精度以及工作效率等。构型综合包括运动轴数目、运动范围和主轴方向的确定。在机床运动方式确定以后,可以建立其相对应的运动图谱,每一种运动图谱对应一种机床结构布局方案,最后综合考虑成本、工件规格确定结构布局的最终方案,总体思路如图2所示。

2 基于工艺元的多零件工序族工艺规划

工序族的划分和识别决定了构成生产线的每一机床需完成的一系列工序,从而决定了机床的功能结构和配置,而每个工序族的需求变化范围和相似程度决定了相应机床的工艺能力。本文提出以工艺元为基本单位的工序组合方法,得到一系列可选择的工序组合合并方案,并对合并方案中的工序组合及工序组内的工艺元进行排序。工艺过程的设计可以概括为分解、匹配、合并3个步骤。

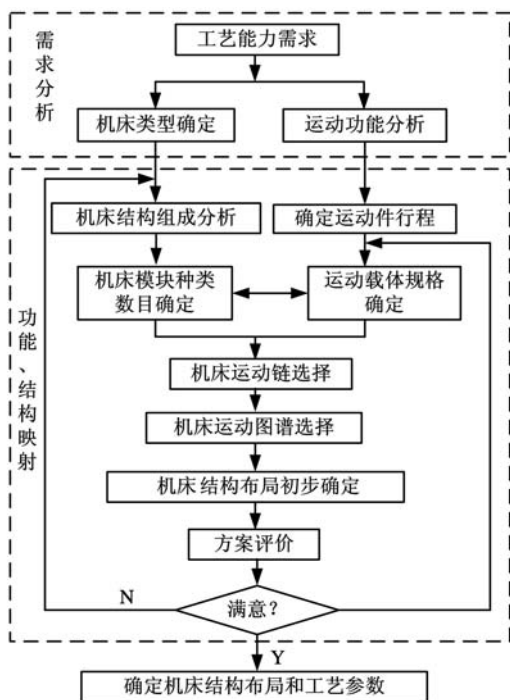


图2 机床结构构型综合设计流程

(1)分解,指将零件分解为一系列基于特征的工艺信息,将每一个零件特征对应的工艺链拆分,转化为功能独立的以工步为核心的工艺元,如表1所示,并计算各工艺元的距离,建立数据矩阵,计算相异度矩阵,确定聚类粒度,最终得出工艺路线聚类分组的结果,结果形式如表2所示。表1中 $pe_1 \sim pe_n$ 表示工艺元集合的序号,每行代表一条完整的特征工艺链, pe_{ij} 为对应于特征 i 的第 j 个工艺元,表2中, OP_{ij} 代表第 i 个工件 $Part_i$ 的第 j 道工序,由特征工艺链集合 pe_k 组成。

表1 特征工艺链实例

工艺元序号	零件代号	特征代号	特征工艺链
pe_1	Part1	Feat1	$pe_{11} pe_{12} \dots pe_{1j}$
pe_2		Feat2	$pe_{21} pe_{22} \dots pe_{2j}$
\vdots		\vdots	\vdots
pe_n		Featn	$pe_{n1} pe_{n2} \dots pe_{nj}$

表2 工艺路线实例

工序序号	零件代号	工艺路线
OP11	Part1	$pe_1 pe_2 \dots pe_n$
OP12		$pe_1 pe_2 \dots pe_m$
\vdots		\vdots
OP1n		$pe_1 pe_2 \dots pe_k$
OP21	Part2	$pe_1 pe_2 \dots pe_j$
\vdots	\vdots	\vdots
OPnl	Partn	$pe_1 pe_2 \dots pe_v$

(2)匹配。根据加工约束和设计要求,为零件的每个特征寻求相应的加工方法、工装和切削参数,具体表现在特征与工艺链的一一对应。

(3)合成。综合零件各特征的加工操作,将之

排序、合成为工步序列,最终得到零件的工艺规程。合成包含聚类分析,包括相似加工特征和相似加工方法的聚类,以及相似工作单元状态模型的聚类^[7]。

在单零件工序合成的基础上,将多零件工序聚类成工序族^[5],如表 3 所示,MOCi 表示多零件相应工序聚类成工序族,OPij 表示第 i 个零件的第 j 个工序。

表 3 聚类工序族

工序族序号	零件代号	工序
MOC1	Parti	OPi1 OPi2 ... OPij ... OPj1 OPj ... OPkn
	Partj	
	⋮	
	Partk	
MOC2	Partm	OPm OPm2 ... OPmj ... OPn1 OPnj ... OPkn
	Partn	
	⋮	
	Partk	
⋮	⋮	⋮
MOCm	Partk	OPk1 OPk2 ... OPkj ... OPn1 OPnj ... OPfn
	Partn	
	⋮	
	Partf	

工艺元聚类的目的是:根据用户的约束条件,将零件特征的非线性结构有序分割成不同工序完成的部分,进而决定各工序的工作状态和加工内容,包括各工序加工所需的刀具、切削参数、运动行程及成形运动方式,作为机床结构设计的依据。

3 机床结构基本功能的确定

在获得工序族的基础上,为了确定机床的设计参数,需要根据给定工序族的加工信息,通过计算刀具相对工件从一个位置到另一个位置的变换,获得为完成给定工序族的机床所需执行的一系列运动,从而确定机床的基本功能。这个过程包括两个步骤:①完成工序族机床所需运动的计算;②机床基本功能的运动学建模。

3.1 完成工序族机床所需运动的计算

对于同一机床需完成的工序族,从工艺规划中可获得该工序族的加工信息,包括加工方法、参数、时间、装夹定位、刀具位置(加工每个特征的刀具位置)、刀具及其运动路径。表 4 给出了需在同一机床上完成某型号缸体和缸盖加工的工序族信息(由于篇幅所限,只列出局部信息)。

由刚体运动理论,刚体从一个位置到另一个位置的变换矩阵为

$$T = T_1 T_2^{-1} \quad (1)$$

式中, T_1 、 T_2 分别为从原点到位置矢量 r_1 和 r_2 的齐次变换矩阵。

表 4 工序的加工信息

单位:毫米、牛顿、秒;零件 A:缸盖;材料:铸铁;初始位置:(0,0,0,400,65,0)	单位:毫米、牛顿、秒;零件 B:缸体;材料:铸铁;初始位置:(0,0,0,220,75,0)
工步 1:粗铣进气面 加工方法:粗铣;刀具号:4017;主轴速度:637;进给速度:891;首位置:(0,0,0,400,65,-135);进给运动:(0,0,0,400,475,-135);定位运动:(0,0,0,400,475,-115)	工步 1:铣顶面 加工方法:半精铣;刀具号:1001;主轴速度:637;进给速度:763;首位置:(0,0,0,220,75,-65);进给运动:(0,220,520,-65);定位运动:(0,0,0,220,75,-65)
工步 2:粗铣排气面 加工方法:粗铣;刀具号:4017;主轴速度:637;进给速度:891;首位置:(0,0,0,400,65,-135);进给运动:(0,0,0,400,475,-135);定位运动:(0,0,0,400,475,-115)	工步 2:镗工艺销孔 加工方法:镗;刀具号:1008;主轴速度:2768;进给速度:276.8;首位置:(0,0,0,62.25,0,-135);进给运动:(0,0,62.25,0,-148);定位运动:(0,0,0,275,65,-135)
工步 3:精铣进气面 加工方法:精铣;刀具号:4018;主轴速度:612;进给速度:875;首位置:(0,0,0,400,65,-135);进给运动:(0,0,0,400,475,-135);定位运动:(0,0,0,400,475,-115)	工步 3:钻曲轴孔 加工方法:精铣;刀具号:3009;主轴速度:2894;进给速度:868;首位置:(0,0,0,434,98.25,0);进给运动:(0,0,0,434,98.25,-15);定位运动:(0,0,0,523,98.25,0)

根据工序族的加工信息,首先按照式(1)计算每道工序中刀具相对工件的所有运动。例如,根据表 4 的刀具位置信息,计算零件 A 的工步 1 中刀具相对工件的第一个运动(定位运动) T_{A1} 为

$$P_{A0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 400 \\ 0 & 1 & 0 & 65 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P_{A1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 400 \\ 0 & 1 & 0 & 65 \\ 0 & 0 & 1 & -135 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{A1} = P_{A0}^{-1} P_{A1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -135 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

P_{A0} 和 P_{A1} 分别表示刀具的起始位置和首位置,该运动可用旋量表达^[5] 为

$$T_{A1} = (0 - \epsilon 135)((1,0,0)^T + \epsilon(0,0,0)^T)$$

依此类推可得到各工序所有刀具相对工件的运动,把具有相同螺旋角和线距的运动进行合并,从而得到完成工序族各工序加工机床所需执行的运动。以表 4 的工序族加工信息为例,合并工序族各工序所有刀具相对工件的运动,其结果见表 5。由于同一工序族的所有工序需在同一机床上完成,因此需要将上述合并得到的不同零件、不同工序加工所需的运动整合,以简化机床结构。这里把具有相同螺旋角和线距的运动合并,得出为完成工序的运动行程。对表 5 中所有工序的运动进行整合,其结果见表 6,得到为完成给定的工序族机床最终需要执行的一系列运动的最大范围。

表 5 工序族加工信息

零件 A	零件 B
工步 1: 定位运动: $T_{A1} = (-135, 0, 0)(0 + \epsilon_1)((1, 0, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 进给运动: $T_{A2} = (0, 410, 0)(0 + \epsilon_1)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 定位运动: $T_{A3} = (0, 0, -20)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$	工步 1: 定位运动: $T_{B1} = (0, 0, -65)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 进给运动: $T_{B2} = (0, 445, 0)(0 + \epsilon_1)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 定位运动: $T_{B3} = (0, -445, 0)(0 + \epsilon_1)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$
工步 2: 定位运动: $T_{A1} = (\pi/2 + \epsilon_0)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ $T_{A2} = (-135, 0, 0)(0 + \epsilon_1)((1, 0, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 进给运动: $T_{A3} = (0, 410, 0)(0 + \epsilon_1)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 定位运动: $T_{A4} = (0, 0, -20)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$	工步 2: 定位运动: $T_{B1} = (-137.75, 0, 0)(0 + \epsilon_1)((1, 0, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ $T_{B2} = (0, -75, 0)(0 + \epsilon_1)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ $T_{B3} = (0, 0, -65)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 进给运动: $T_{B4} = (0, 0, -13)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 定位运动: $T_{B5} = (0, 0, 13)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$
工步 3: 定位运动: $T_{A1} = (-\pi/2 + \epsilon_0)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ $T_{A2} = (-135, 0, 0)(0 + \epsilon_1)((1, 0, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 进给运动: $T_{A3} = (0, 410, 0)(0 + \epsilon_1)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 定位运动: $T_{A4} = (0, 0, -20)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$	工步 3: 定位运动: $T_{B1} = (214, 0, 0)(0 + \epsilon_1)((1, 0, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ $T_{B2} = (0, 23.25, 0)(0 + \epsilon_1)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 进给运动: $T_{B3} = (0, 0, -15)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ 定位运动: $T_{B4} = (0, 0, 15)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$ $T_{B5} = (89, 0, 0)(0 + \epsilon_1)((1, 0, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$

表 6 为完成给定工序族机床所需执行运动的最大范围

定位运动: $T_{A1} = (300, 0, 0)(0 + \epsilon_1)((1, 0, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$
进给运动: $T_{A2} = (0, 445, 0)(0 + \epsilon_1)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$
定位运动: $T_{A1} = (0, 0, 148)(0 + \epsilon_1)((0, 0, 1)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$
定位运动: $T_{A1} = (\pm \pi/2 + \epsilon_0)((0, 1, 0)^T + \epsilon(0, 0, 0)^T)$

3.2 机床基本功能的运动学建模

机床基本功能的运动学模型由一组运动旋量(变换)和初始变换构成,即 $T = T_1 T_2 \dots T_n T_0$ 。其中, T_i 表示机床所需执行的第 i 个运动, T_0 是刀具坐标相对工件坐标的初始变换矩阵。根据表 6,本文中机床基本功能的运动学模型为

$$T = T_1 T_2 T_3 T_4 T_0 \quad (2)$$

式(2)表示为完成给定的工序族,机床需要具备 4 个运动自由度,依次是沿 X 坐标轴的移动、沿 Y 坐标轴的移动、沿 Z 坐标轴的移动和绕 X 坐标轴的转动。假定在该工序族中,工件的装夹面为 B 面,并初步确定机床为带 NC 转台的三轴联动卧式加工中心,将工件坐标系转化为机床坐标系,可知机床应该提供的运动为:刀具相对于工件的 X、Y、Z 轴移动以及绕机床 X 轴的转动。

基于工艺的运动轴配置设计求出的是工件和刀具的相对运动,包括 3 个直线运动轴和一个旋转轴的组合运动,所有的运动都是可以添加在工件侧或刀具侧的,如此会有很多运动功能方案^[8]。运动功能方案可用运动功能式表达,如 W/XYZC_p/T。其中 W、T 分别表示工件和刀具,

该方案共有 4 个运动,3 个直线进给运动(X、Y、Z)和一个回转主运动(C_p),从工件至刀具其相对运动的顺序依次为 X、Y、Z 和 C_p。用运动功能分配式来描述运动分析方案,以机床基础件为“地”,用“.”表示,其左侧的运动由工件完成,右侧的运动由刀具完成。接地的位置不同,则运动分配方案不同。例如:W/XY.ZC_p/T 为 W/XYZC_p/T 的运动分配方案之一。对同一种运动功能分配方案而言,又可以有不同的机床布局方案,如立式、卧式、斜式、龙门式等。运动功能方案选择的目的是根据工件的大小、复杂度、设计和制造的成本等约束条件选择最合理的方案。

由设计经验知,切削加工对机床运动的实现方式存在以下约束:①回转运动一般由刀具实现;②如果工件相对于动力头太重,一般应由动力头带动刀具实现;③刀具的回转运动轴线需与工件的直线运动垂直;④运动链尽量分散。按照以上约束条件对理论上可能的实现方式进行必要的去除后可得到余下的实现方式,具体运动学图谱见图 3^[8]。

根据精度、设计制造的方便性、结构布局的紧凑性、方案创新性和成本等要求,从中选择合适的运动方案。例如,在本文中,要求工件质量较轻、加工精度较高、布局紧凑,因此选择的运动图谱及其结构简图如图 4 所示。

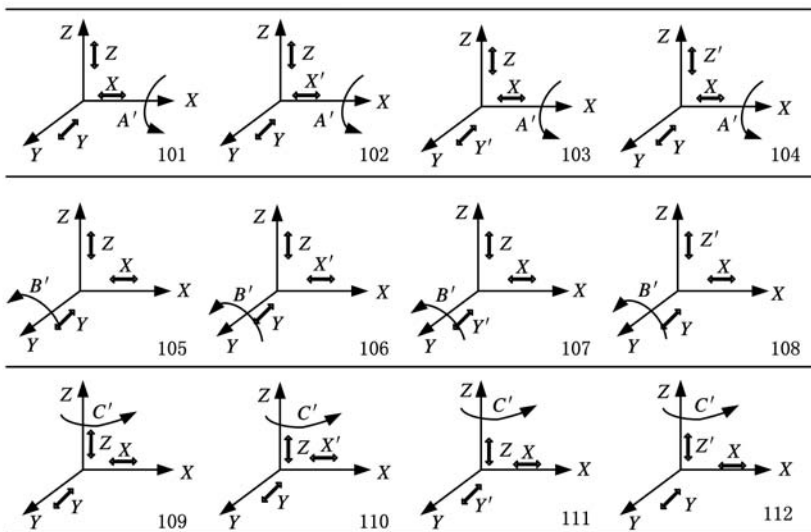


图 3 W/XYZC_p/T 的运动图谱

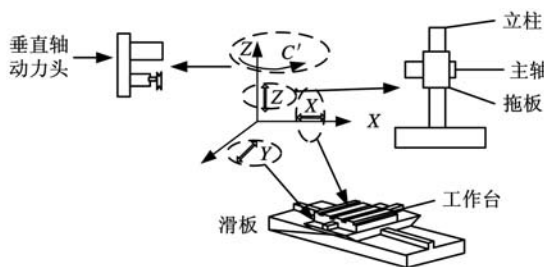


图 4 机床运动图谱及其结构简图

表 8 缸体工艺过程信息

工序号	主要加工内容	定位方式
OP1	两端面粗加工,左侧面加工,油道孔加工,凸轮轴孔粗加工	1、4 缸孔和轴承盖安装面两点,轴承盖安装面侧面一点,以及 2、3 缸孔的中间孔做为毛坯基准点定位
OP2	底面和前端面半精加工,曲轴孔及油槽/端面,工艺销孔,轴承盖安装面粗加工	左侧面和两个工艺销孔定位
OP3	顶面半精加工,缸孔粗加工,斜孔	前端面和底面,以及底面一个销孔定位
OP4	右侧面加工,螺纹孔,斜油孔	前端面和两个销孔定位
OP5	轴承盖安装面精加工,底面精加工,挺杆孔加工,凸轮轴孔压衬套前精加工,工艺销孔扩孔	左侧面和两个销孔定位
OP6	精加工曲轴孔,凸轮轴衬套孔,4 个缸孔,顶面和两端面精加工,止推面以及各端面的工艺孔加工	底面和两个销孔定位
OP7	珩磨	底面和两个销孔定位

表 9 多零件工序族聚类

工序族	缸盖	缸体
MOC 1	OP1	
MOC 2	OP2	
MOC 3	OP3	OP1, OP3, OP4
MOC 4	OP4	OP2, OP5, OP6
MOC 5		OP7

4 实例研究

某机床企业需要开发用于发动机缸体和缸盖加工的高速高精度加工中心,用户要求的多样化导致缸体和缸盖在材质、尺寸、形状上面有区别;工艺的多样性和不同的精度指标都导致机床结构配置的不同;分析得到如下所示的工艺路线:OP1→OP2→OP3→OP4,如表 7 所示。

表 7 缸盖工艺过程信息

工序号	主要加工内容	定位方式
OP1	气缸盖顶面及各孔加工	底面定位,底面朝下,卧式放置
OP2	气缸盖底面精加工及各孔加工	顶面及两个销孔定位,底面朝上,卧式放置
OP3	气缸盖前后面精加工及各孔加工	底面以及底面销孔定位
OP4	气缸盖进气、排气面及各孔加工,顶面各孔精加工	底面及两个销孔定位,底面定位,顶面加工,前面向上、立式放置

同理,本文对另一待加工的零件——某型号的龙门式缸体进行以工艺元为基础的工艺规划,表 8 是缸体的工艺过程信息。

按照多零件工序的匹配算法,以带 NC 转台的加工中心为设计目标,可以将缸盖和缸体的工序合并为表 9 所示的 5 个工序族。

由此,得到了需要在同一台机床上完成的多个工序的集合,后续工作就是在某一工序族工艺能力要求的范围内设计机床结构。以 MOC4 工序族中各工序的工艺能力要求为例,完成给定的工序族机床需要具备的功能需求如图 5 所示。考虑在该工序族中,工件的装夹面为 B 面,并初步确定机床为带转台的三轴联动卧式加工中心,将工件坐标系转化为机床坐标系,可知机床应该提供的运动为:刀具相对于工件的 X、Y、Z 轴移动,以及绕机床 X 轴

的转动。立足于现有技术基础,面向设计、制造过程的成本、技术难度和工件的复杂性,考虑到工件质量较轻、加工精度较高、布局紧凑要求,选择图 6 所示的机床结构,设计参数见表 10。

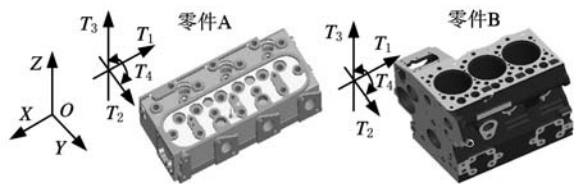


图 5 完成给定的工序族机床需要具备的功能

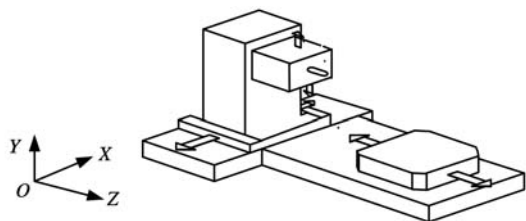


图 6 机床结构简图

表 10 机床设计需求参数

基本特征	机床类型		结构框架	运动轴数	基本运动方式		有无 NC 转台	
	加工中心	卧式	三轴联动	定位精度	主轴转速	工作台尺寸		
工艺指标	X 轴行程 (mm)	Y 轴行程 (mm)	Z 轴行程 (mm)	刀库容量 (把)	换刀时间 (s)	定位精度 (mm)	主轴转速 (r/min)	工作台尺寸 (mm)
	700~800	600~700	400~550	10~20	5~9	0.005~0.006	40~7000	400~600
模糊指标	总重	成本	体积	外观	平均无故障率	噪声		
	一般	一般	较好	一般	好	较好		

最终设计得到的产品外观和三维模型如图 7 所示。该加工中心适合于零件的铣、钻、镗、铰、攻丝等工序高精、高速的加工,广泛应用于汽车、内燃机、航空航天、家电、通用机械等行业。

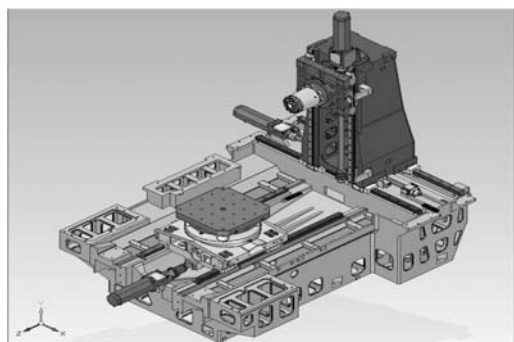


图 7 原型机床 HMC40 模型

5 结束语

本文针对目前机床产品开发模式的不足,分析了面向机床结构设计的零件工艺规划的特点,以特征工步为基本工艺元,将单零件的工艺元聚类形成基本工艺序列,将多零件的基本工艺序列聚类成工序族,计算完成工序族所需的运动方式和运动能力,为机床结构设计提供了导向文件。以一台加工

中心的开发过程为例进行了说明,表明基于零件工艺的机床产品设计能够保证设计的定制性。

参考文献:

[1] 何耀雄,徐起贺,周艳红.任意结构数控机床机构运动学建模与求解[J].机械工程学报,2002,38(10):31-36.
He Yaoxiong, Xu Qihe, Zhou Yanhong. Kinematic Model and its Solution for NC Machines of Arbitrary Configuration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10):31-36.

[2] 刘建慧,邹慧君,颜鸿森.五轴铣床运动链设计与构型综合[J].中国机械工程,2006,17(8):788-792.
Liu Jianhui, Zou Huijun, Yan Hongsen. Five-axis Milling Machine Kinematic Chain, Design and Structure Configuration Synthesis[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(8):788-792.

[3] Moon Y M. Reconfigurable Machine Tool Design: Theory and Application[D]. Michigan: University of Michigan, 2000.

[4] Shabaka A I, Elmaraghy H A. Generation of Machine Configurations Based on Product Features [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2007, 4(20): 355-369.

[5] 许虹.可重构机床设计理论与方法研究[D].杭州:浙江大学,2003.

[6] Son Sungyong. Design Principles and Methodologies for Reconfigurable Machining Systems [D]. Michigan: University of Michigan, 2000.

[7] 刘书暖,张振明,田锡天,等.基于聚类分析法的典型工艺路线发现方法[J].计算机集成制造系统,2006,12(7):996-1001.
Liu Shunuan, Zhang Zhenming, Tian Xitian, et al. Knowledge Discovery Method for Typical Process Sequence Based on Clustering Analysis [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2006, 12(7):996-1001.

[8] 王日君,张进生,葛培琪.基于运动学图谱的数控机床设计方法[J].制造技术与机床,2009,22(3):72-76.
Wang Rijun, Zhang Jinsheng, Ge Peiqi. Design Method of NC Machine Tool Based on Kinematics Spectrum [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009, 22(3):72-76. (编辑 袁兴玲)

作者简介:黄 华,男,1978 年生。兰州理工大学机电工程学院讲师、博士。主要研究方向为制造系统及其自动化。获省级科技进步三等奖 2 项。发表论文 10 余篇。靳 岚,女,1972 年生。兰州理工大学机电工程学院副教授。芮执元,男,1962 年生。兰州理工大学机电工程学院教授、博士研究生导师。苟卫东,男,1963 年生。青海一机数控机床有限责任公司总工程师、高级工程师。