

面向零件群加工的可重构制造工艺设计方法^{*}

张广鹏 胡绪东 张新原 彭立立
(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

【摘要】 将可重构制造工艺方案设计与可重构机床结构特点相结合,以所建立的工序单元、工序段概念为出发点,通过对零件族加工信息的程式化处理,建立了加工信息矩阵,给出了工序单元创建方法和工序段方案的划分方法,通过交叉双向组配方式获得了多种满足加工要求的工艺方案;以所建立的工艺方案相似性判定模型为基础,找出可供可重构机床结构重构的合理工艺方案,为实现零件群内部加工柔性化提供了科学依据。最后以发动机缸盖零件群加工工艺设计为例,验证了方法的有效性。

关键词: 可重构工艺规划 可重构制造 可重构机床 工艺方案

中图分类号: TP391.72; TG50 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0188-07

Process Designing Method of Reconfigurable Manufacturing for Part Family

Zhang Guangpeng Hu Xudong Zhang Xinyuan Peng Lili
(School of Mechanical Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract

Reconfigurable manufacturing process design was combined with characteristics of reconfigurable machine tools. Beginning with the proposed process unit and process section, the processing information matrix was built through the processing information formulation. Then the processing unit was established and the division method of process section was proposed. Through the cross two-way method, a variety of process schemes which meet the reconfigurable manufacturing requirements were obtained. Based on the similarity judgment model of processing plan, the reasonable processing schemes for the reconfiguration of reconfigurable machine tools were found out, which provided scientific basis for realizing the manufacturing flexibility in part family. Finally, an example of processing design for the cylinder front covers family was given to verify the validity of the proposed processing method.

Key words Reconfigurable manufacturing process planning, Reconfiguration manufacturing, Reconfigurable machine tools, Process scheme

引言

可重构制造(reconfigurable manufacture, 简称RM)是一种可有效解决目前批量加工行业中高效低成本加工与生产柔性之间矛盾的制造模式^[1],它是通过由可重构机床(reconfigurable machine tools, 简称RMT)所构成的可重构制造系统(reconfigurable

manufacture system, 简称RMS)来实现其功能。RMS是针对某一种零件定制加工功能,但可在同一零件族(由相似加工特征零件所组成)内部根据加工需求进行其结构与功能的重构^[1],可以看出,RMS及RMT的功能配置与方案重构的主要依据是被加工零件群的工艺方案^[2],因此研究面向零件群的可重构制造工艺设计方法对合理实现RMS及RMT具有

收稿日期: 2012-01-06 修回日期: 2012-02-13
^{*} 国家自然科学基金资助项目(50875208)
作者简介: 张广鹏,教授,博士生导师,主要从事可重构机床设计方法、机床CAD/CAE研究,E-mail: gpzhang@xaut.edu.cn

重要意义。

目前对面向可重构制造的加工工艺研究并不多。文献[3]采用0-1整数规划方法进行可重构工艺方案优化。文献[4]运用图论方法构造了RMS工艺路线的有向网络模型,并以普通机床组成的生产线为例进行了工艺路线优化设计。文献[5~6]对面向RMT设计的零件族工序组合问题进行了研究。上述研究对可重构制造工艺设计研究起到了积极推动作用,但目前还缺乏一个系统化的可重构制造工艺规划设计方法。

可重构机床是根据被加工零件的工艺方案定制功能,被加工零件的工艺方案将直接影响RMT的结构布局与整机性能,因此在RMT方案设计(方案重构)阶段,找出所有能满足加工需求的零件加工工艺方案将对科学规划RMT重构方案具有重要意义。本文从RMT的结构特点出发,探讨被加工零件群工艺方案制订方法,并以发动机缸盖零件群加工为例进行应用。

1 零件族加工信息处理方法

RMT具有模块化结构,且模块功能自治^[1],从而保证RMT结构与功能的快速重构。每个功能模块完成一定加工功能(工序任务),功能模块中执行部件可能是一个主轴头,也可能是一个多轴箱。每台RMT上的执行部件有多个,采用并行加工方式,可以达到专机的高效率加工。基于上述RMT的结构与功能特点,本文通过建立工序单元和工序段的概念规划被加工零件群的工艺方案,其中工序单元对应每台RMT上的一个执行部件(一个主轴头或多轴箱),由多个相关工序单元组合形成一个工序段,将对应一台RMT完成的工序内容(图1)。

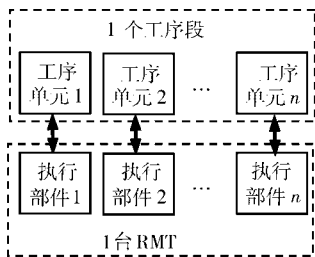


图1 可重构机床及其加工工艺的对应关系

Fig.1 Relational graph between RMT and its machining process

可重构制造解决的是一个特定零件群内部的加工柔性^[2],该零件群的加工工艺、加工特征具有一定的相似性,这样才能保证RMT通过较少量的结构与功能调整,来满足零件群内部新的加工需要。在进行RMT结构与功能方案重构时,有必要找出所有能满足加工需求的工艺方案,这样才能为搭建合理

的RMT重构方案提供足够依据。

为了使RMT能够快速满足零件群内部加工柔性的转换,有必要建立具有统一规范的基于计算机平台的零件群可重构制造工艺规划方法,以便于快速设计出面向可重构的制造工艺。为此首先需要对零件群中各零件加工特征、技术要求、毛坯状况等进行分析,并对每一个零件建立包括加工特征、尺寸、方位、公差、加工基准、加工方法等信息表达矩阵来描述被加工零件的加工信息。

加工信息矩阵为 $L \times 14$ 矩阵,其中 L 表示加工工序特征总数。某加工工序特征的相关加工信息用该矩阵一行元素表达,即 $C_j^i = \{D_0, D_1, \dots, D_{13}\}$,其中, D_0 为自然顺序号,代表该加工特征序号; D_1 为方位代码($D_1 = 1, 2, \dots, 7$,代表6个方位及斜向方位); D_2 为特征类型代码(1为平面,2为孔,3为螺纹孔,...); D_3 为工序类型(11为粗铣,12为半精铣,13为精铣;21为粗镗,22为半精镗,23为精镗;31为钻,32为扩,33为铰,34为攻;41为粗磨,42为精磨,43为研磨;51为拉,52为刮;61为粗车,62为精车;71为刨,...); D_4, D_5, D_6 分别为加工时定位基准,用 D_0 代码表示; D_7, D_8, D_9 分别为该加工特征在总体坐标系中的 X, Y, Z 坐标; D_{10} 为采用多轴箱时对应最小主轴孔径; D_{11} 为在本加工特征之前必须完成的加工特征(简称加工顺序号,用加工特征序号表示),代表加工顺序信息。 D_{12} 为同源加工特征编号。本文的“同源加工特征”是指完成最终加工特征所需的系列加工工序特征,例如,某螺纹孔(最终加工特征)要经过钻、攻两道工序才能完成,故该螺纹孔所衍生的钻孔加工特征、攻丝加工特征为同源加工特征。同源加工特征一般用同一坐标位置表达。同源加工特征编号就是最终加工特征的自然编号。 D_{13} 为某一同源加工特征中的顺序号,如螺纹孔加工中的钻孔加工特征的 D_{13} 为1、攻丝加工特征的 D_{13} 为2。

上述所建立的零件群中加工信息矩阵,将作为后续加工工序单元、工序段及加工工艺方案制定的依据。

2 建立工序单元

针对上述零件加工信息矩阵,分两步建立工序单元,第一步将同方位、同工序类型、使用同一加工基准者进行自然合并,形成自然合并工序单元,对于加工尺寸相同或接近者优先组成自然合并工序单元;第二步对自然合并工序单元再合并,形成工序单元。因此一个工序单元可能包括一个工序特征(对应一个主轴头),也可能包括多个工序特征(对应一

个多轴箱)。多轴箱所对应的工序单元创建过程为:

(1)采用检索方式将加工信息矩阵中同方位、同工序类型、使用同一加工基准的工序特征进行合并,并检验是否满足多轴箱条件。符合上述条件者便形成自然合并工序单元 $F_j = \{D_0, \dots\}_j$, 其中 D_0 为属于 F_j 的加工特征序号; j 为自然合并工序单元序号。为了描述方便,简写自然合并工序单元 $F_j = \{D_0\}_j$ 。

(2)将同一方位、可使用同一工艺基准、非同源加工特征、进给切削用量差异不大、能够满足多轴箱条件的自然合并工序单元进行合并。本文将粗镗孔、精镗孔与钻孔、扩孔、铰孔、攻丝等工序内容合并,这些工序之间的干扰不大,可通过一个多轴箱来完成,故可合并到同一工序单元中。在第2次合并中要注意:

①第2次合并是在非同源加工特征自然合并工序单元之间进行。由于同源加工特征是按顺序加工,故同源加工特征之间是不能合并的。合并对象为同一方位的孔类或面类加工特征的各自合并。

②需要对第2次合并的自然合并工序单元进行工艺基准融合判定,不满足工艺基准融合条件者将不能进行再次合并,将直接作为工序单元处理。对于两自然合并单元 F_i, F_j , 存在如下3种情况的加工基准融合判据:

判据 1: $\forall \varphi \in \{D_4, D_5, D_6\}_j, \exists \varphi \in \{D_4, D_5, D_6\}_i$, 则 F_i, F_j 的基准相同,直接合并。

判据 2: $\forall \varphi \in \{D_4, D_5, D_6\}_j, \exists \varphi \in \{D_4, D_5, D_6\}_i$ 或 $\varphi \in \{D_0\}_i$ 或 $\varphi \in \{D_0\}_k$ (这里 $\{D_0\}_k$ 为与 F_i 同源的合并单元 F_k 中加工特征编号), 则 F_i 与 F_j 可以合并,并且 F_i 的基准将作为 F_i, F_j 合并后的工序单元的基准。

判据 3: $\forall \varphi_i \in \{D_4, D_5, D_6\}_j, \varphi_i \in \{D_4, D_5, D_6\}_i, \exists \varphi_i = \varphi_j$ 或加工特征 φ_i, φ_j 具有相同的加工基准,则 F_i 与 F_j 可以合并,并且以位置公差要求高者的加工基准作为合并后工序单元加工基准。

对于某些加工位置精度要求较高者,通过“加工基准融合判据3”确定的工艺基准还需做进一步的尺寸链计算检验。

③自然合并工序单元合并后的工序单元的加工程序与合并状况有关,本文采用树状图方式找出工序单元。如图2所示的2个非同源加工特征合并,当粗镗孔与钻孔合并时,精镗孔才可能与扩孔或铰孔合并,这样就可以获得3种不同合并方式。

从图2可以看出,经过第二步合并将产生多种不同组合方式的工序单元,各自然合并工序单元本

身所要求的加工顺序不同,经过不同合并方案所产生的工序单元加工顺序要根据在工艺路线中的顺序来确定,一般按照靠后原则确定出工序单元加工顺序号。

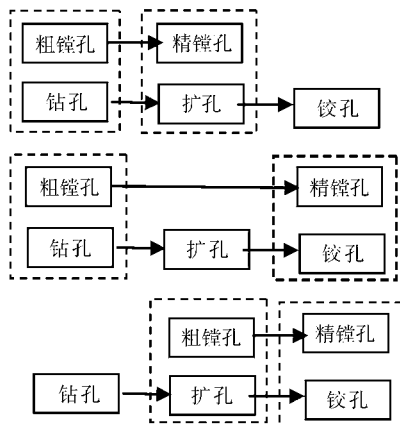


图2 非同源加工特征合并

Fig. 2 Merger of nonhomologous machining features

3 工序段划分

同一工序段中的加工内容通过一台 RMT 来完成,并通过并行加工方式完成。因此同一个工序段中工序单元之间不能相互干扰,且具有相同的加工基准,在划分工序段方案时遵循以下原则:

(1)同一工序段中工序单元的切削力差异不宜太大。例如,粗加工切削力较大的工序单元不宜与精加工放在同一工序段;铣削不宜与镗孔、钻孔等轻切削工序单元组合在一个工序段中。

(2)同一工序段中工序单元的加工基准要符合“基准相容原则”,保证工序段中工序单元具有统一加工基准,可以在一次装夹下完成工序段中各工序单元加工。

对于工序单元 E_i, E_j , 其加工基准分别是 $\{G\}_i, \{G\}_j$, 所包括加工特征集合分别为 $\{D_0\}_i, \{D_0\}_j$, 有基准相容原则 1: $\forall \varphi \in \{G\}_j, \exists \varphi \in \{G\}_i$ 或 $\varphi \in \{D_0\}_i$ 或 φ 的加工基准 $\in \{G\}_i$, 则 E_i 与 E_j 可以组合成一个工序段,且 E_i 的加工基准将作为该工序段加工基准。

对于以自为基准为特征的加工工序,如铰孔、攻丝等,有基准相容原则 2: 若 $\{G\}_i, \{G\}_j$ 的加工基准符合“基准相容原则 1”, 则该以自为基准为特征的加工工序可以组合成一个工序段。

在符合上述组配工序段的基本原则基础上,将不同方位的工序单元按照各自的加工顺序排列,然后进行双向顺序组配形成工序段方案,这时会产生多种不同的工序段方案。

最后对组配后的工序段方案进行基准相容原则检验及方案评判(对于加工精度要求较高的工序段

还需要进行尺寸链验算),将确定出的合理工序段方案作为工艺方案生成的基本元素。

4 可重构制造工艺方案生成

前已述及,在建立工序单元时产生了多种工序单元方案,同时在划分工序段时也会产生多种方案,因此将会产生多种不同的工艺方案。以工序段为基本元素进行可重构制造工艺方案规划,主要步骤为:①将面类、孔类加工在不同方位的工序段方案分别按其加工顺序排列。②将不同方位按加工顺序排列的工序段方案进行交叉双向组配,分别形成面类及孔类加工工艺方案。③将面类及孔类加工工艺方案进行组合排列,形成纯加工工艺方案。④将热处理、检验及辅助等工序按技术要求合理插入纯加工工艺方案中,形成零件的加工工艺路线方案。⑤以加工信息矩阵中的加工顺序信息为依据,对所形成的零件的加工工艺路线方案进行工艺方案合理性检验,剔除不满足加工顺序的工艺方案。

5 可重构制造工艺方案选择

基于工序单元和工序段的概念,获得了多种不同的被加工零件的工艺方案,为 RMT 结构方案重构及功能配置选择合理工艺方案提供依据。由于 RMT 是在被加工零件族内部具有加工柔性,因此从 RMT 可快速从一种零件工艺方案转换为另一种零件加工方案角度出发,通过分析比较得出具有相似性的零件群工艺方案作为 RMT 重构的依据,这样可以保证 RMT 以最少的模块更换实现 RMT 加工功能的转换。

本文从工艺方案布局、工序段及工序单元的内容等方面进行工艺方案相似性比较,设零件 1 工艺方案 A 的工序段数量为 K_A ,零件 2 工艺方案 B 的工序段数量为 K_B ,工艺方案 A 与 B 中相对应(具有相似性)工序段数量为 m ,则工艺方案 A 与 B 相似度 S 为

$$S = \frac{1}{K_A + K_B - m} \sum_{i=1}^m \alpha_i \tag{1}$$

其中
$$\alpha_i = \frac{1}{L_A + L_B - n} \sum_{j=1}^n \beta_j \tag{2}$$

式中 α_i ——工艺方案 A 与 B 中对应工序段 E_A 与 E_B 之间的相似系数

L_A ——工序段 E_A 中的工序单元数量

L_B ——工序段 E_B 中的工序单元数量

n ——工序段 E_A 与 E_B 中相对应(具有相似性)工序单元段数量

β_i ——工序段 E_A 与 E_B 中对应工序单元之间的相似系数

由于被加工零件群中的各零件具有相似性,在总体坐标系中,可根据相应方位的工序单元之间的相似性,从工序类型、工序特征数量、工序特征所在空间位置等方面进行判断,步骤如下:

(1)若同为铣削工序特征(面类加工),其相似系数 $\beta_j = 1$ 。

(2)若同为孔类加工,工序单元所包括的工序特征数量可能有多,这时工序单元之间的相似系数为

$$\beta_j = \frac{k}{H_A + H_B - k} \tag{3}$$

式中 H_A ——属于工序段 E_A 的工序单元中工序特征数量

H_B ——属于工序段 E_B 的工序单元中工序特征数量

k ——2 个工序单元中相对应(相似)工序特征数量

通过上述方法确定出 2 种零件的某工艺路线方案的相似性,并以量化形式表达,将相似系数较大者作为 RMT 重构的候选工艺方案。

6 应用实例

以某系列发动机缸盖中的 2 种零件加工为例,应用本文方法建立可重构制造加工工艺方案,并进行加工方案转换的讨论。图 3 分别为被加工零件 1、零件 2 的外观图,1~6 分别表示 6 个方位,零件 1 中面加工特征用 M 表示,孔加工特征用 K 表示;零件 2 中面加工特征用 N 表示,孔加工特征用 J 表示。毛坯为铝合金。

(1)建立表 1、2 所示 2 种零件的加工信息矩阵,限于篇幅,表中省略了部分加工信息。

(2)通过检索方式,将同方位、同工序类型、使用同一加工基准的加工特征合并,并进行多轴箱条件判断,建立如表 3、4 所示的自然合并工序单元。

例如,零件 1 中的 1 方位 5、7、9、10 粗镗孔可形成自然合并工序单元 $F_4 = \{5, 7, 9, 10\}_4$,其中 5、7 工序针对同轴孔系,并行加工时可采用复合刀具;6、8 精镗孔加工形成自然合并工序单元 $F_5 = \{6, 8\}_5$;按照“加工基准融合判据”得到相应的加工顺序号(用自然合并工序单元序号表示),加工基准及自然合并工序单元所包含的加工特征编码用原始加工信息序号(加工信息矩阵行号)表示。

(3)对非同源自然合并工序单元进一步合并形成工序单元。按照同方位的面类、孔类加工及基准工序特征加工分开合并的原则,对于零件 1 来说,方位 1 孔类加工中 4、5 分别可与 12 合并,采用树状图

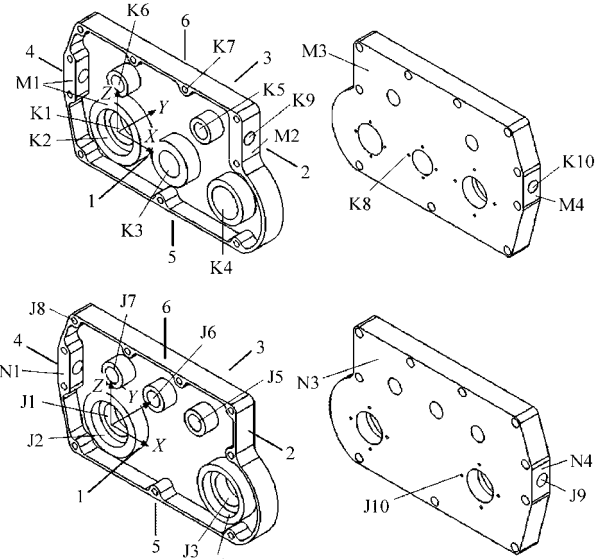


图3 被加工零件群
Fig.3 Processed part family

方式描述自然合并工序单元合并过程,括弧内为工序单元,各工序单元之间用“—”隔开;4与12加工顺序号一致,故合并后加工单元(4+12)加工顺序号为3;5与12加工顺序号不同,按照靠后原则,加工单元(5+12)加工顺序号为4。

- 3—(4+12)—5
- 4—(5+12)
- ①
- ②

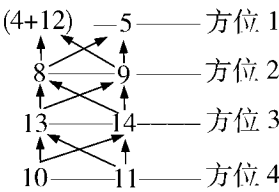
本例采用一面两销定位方式作为统一的加工基准(基准转换验证省略),因此工序单元的加工基准是相同的。

零件2在方位1孔类加工中合并所得工序单元为

- 3—(4+9)—5
- 4—(5+9)
- ①
- ②

(4)将不同方位的加工单元进行分类组合划分出工序段,再依据基准相容条件进行工序段方案检验,确定出合理的工序单元方案。

对于零件1来说,4个方位的孔类加工工序单元除了工序单元3作为基准加工必须先完成外,孔类加工的其他工序单元按顺序排列为



经过上述双向顺序组配形成零件1孔类工序单元组合出工序段方案,方括弧中工序单元组成一个工序段方案,部分工序段方案为

- [(4+12),8,13,10]—[5,9,14,11]
- [(4+12)]—[5,8,13,10]—[9,14,11]
- ①
- ②

- [(4+12)]—[8,13,10]—[5]—[9,14,11]
- [(4+12),8]—[5,9]—[13,10]—[14,11]
- [(4+12),8]—[5,9,13,10]—[14,11]
- [(4+12),8,13]—[5,9,14,10]—[11]
- ③
- ④
- ⑤
- ⑥

同样的方法,对零件1面类加工所组合出的工序段方案为

- [1]—[2]—[6,7]
- [1]—[2,6,7]
- [1]—[2,6]—[7]
- [1]—[2,7]—[6]
- ⑦
- ⑧
- ⑨
- ⑩

上述4种工序段方案中,6、7工序单元的定位基准是1、3、4工序特征,而3、4工序特征的定位基准是2工序特征,因此,在这里[2,6,7]不能组成工序段方案,只有⑦工序段方案可用。

零件2除了工序单元3作为基准加工必须先完成外,孔类加工的其他工序单元组合出的部分工序段方案为

- [(4+9),7,10]—[5,8,11]
- [(4+9),10]—[5,11,7]—[8]
- [(4+9)]—[5,10,7]—[11,8]
- [4,10,7]—[(5+9),11,8]
- ①
- ②
- ③
- ④

零件2面类加工工序单元组合出的工序段方案为

- [1]—[2]—[6]
- [1]—[2,6]
- ⑦
- ⑧

上述2种工序段方案中,2工序单元是6工序特征的定位基准的加工基准,因此,在这里[2,6]不能组成工序段方案,只有⑦工序段方案可用。

(5)工艺方案的生成。将得到的面类及孔类加工特征工序段方案进行交叉排列,形成多种工艺路线方案(限于篇幅本文不考虑热处理及辅助工序),然后基于加工信息矩阵中的加工顺序信息对工艺方案进行检查,剔除不合理方案。

零件1的部分工艺路线方案如下,其中方案②、③属于顺序不同时的工艺路线方案。

- [1]—[2]—[3]—[6,7]—[(4+12),8,13,10]—[5,9,14,11]
- [1]—[2]—[3]—[6,7]—[(4+12)]—[5,8,13,10]—[9,14,11]
- [1]—[2]—[3]—[(4+12)]—[6,7]—[5,8,13,10]—[9,14,11]
- [1]—[2]—[3]—[6,7]—[(4+12)]—[8,13,10]—[5]—[9,14,11]
- [1]—[2]—[3]—[6,7]—[(4+12),8]—[5,9]—[13,10]—[14,11]
- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤

[1]—[2]—[3]—[6,7]—[(4 + 12),8]—[5,9,13,10]—[14,11]	⑥
[1]—[2]—[3]—[6,7]—[(4 + 12),8,13]—[5,9,14,10]—[11]	⑦
零件 2 的部分工艺路线方案为	
[1]—[2]—[3]—[6]—[(4 + 9),7,10]—[5,8,11]	①
[1]—[2]—[3]—[6]—[(4 + 9),10]—[5,11,7]—[8]	②
[1]—[2]—[3]—[6]—[(4 + 9)]—[5,10,7]—[11,8]	③
[1]—[2]—[3]—[6]—[4,10,7]—[(5 + 9),11,8]	④
[1]—[2]—[3]—[6]—[4,10]—[(5 + 9),11,7]—[8]	⑤
[1]—[2]—[3]—[6]—[4]—[(5 + 9),10,7]—[11,8]	⑥

表 3 零件 1 自然合并工序单元
Tab.3 Natural merger process units of part 1

序 号	方 位	定位基准		顺 序	包含加工特征	备注
1	1	0(M3)	0	0	0	1
2	3	1	0	0	1	2
3	1	2	0(K1)	0(K3)	2	3,4
4	1	2	3	4	3	5,7,9,10 粗镗孔
5	1	2	3	4	4	6,8 精镗孔
6	2	1	3	4	3	11 铣面
7	4	1	3	4	3	12 铣面
8	2	2	3	4	6	13 钻孔
9	2	2	3	4	8	14 铰孔
10	4	2	3	4	7	15 钻孔
11	4	2	3	4	10	16 铰孔
12	1	2	3	4	3	17~26 钻 10-φ10
13	3	1	3	4	3	27~38 钻 12-M5 底孔
14	3	1	3	4	13	39~50 攻 12-M5

表 4 零件 2 自然合并工序单元 Tab.4 Natural merger process units of part 2							
序 号	方 位	定位基准		顺 序	包含加工特征	备注	
1	1	0(M3)	0	0	0	1	
2	3	1	0	0	1	2	
3	1	2	0(K1)	0(K3)	2	3,4,14	
4	1	2	3	4	3	5,7,9,11	粗镗孔
5	1	2	3	4	4	6,8,10,12	精镗孔
6	4	1	3	4	3	13	铣面
7	4	2	3	4	3	15	钻孔
8	4	2	3	4	7	16	铰孔
9	1	2	3	4	3	17~26	钻 10-φ10
10	3	1	3	4	3	27~34	钻 8-M5 底孔
11	3	1	3	4	13	35~42	攻 8-M5

(6)工艺方案的选择。

将零件 1 与零件 2 之间的工艺方案两两进行相似性比较,利用本文建立的相似性计算公式得到相应的相似度,相似度最高者将作为 RMT 重构候选工艺方案。限于篇幅,仅列出零件 1 的方案①与零件 2 的 4 种方案①~④之间的相似度分别为:0.83、0.62、0.60 和 0.77。可以看出,零件 1 中的方案①与零件 2 的方案①相似度较大,该 2 种方案可以作为 RMT 重构的候选工艺方案。

7 结 论

(1)基于所建立的工序单元、工序段概念,将被加工零件的工艺方案规划与 RMT 的结构与功能特点联系起来,为 RMT 方案重构提供合理的加工工艺方案,实现了可重构制造工艺的规范化设计。

(2)通过建立工序单元和进行工序段划分,可以找出多种满足加工需求的可重构制造工艺方案,为可重构制造工艺方案的优选提供了依据。

(3)通过建立零件群中各零件工艺方案相似性比较模型,从量化角度评选出 RMT 重构所需的工艺方案。

参 考 文 献

1 Kreon Y, Heisel U, Jovane F, et al. Reconfigurable manufacturing systems [J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 1999,48(2):527~540.

2 Chen Li, Xi Fengfeng, Macwan Ashish. Optimal module selection for preliminary design of reconfigurable machine tools [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(1): 104~115.

3 Azab A, ElMaraghy H A. Mathematical modeling for reconfigurable process planning original research article [J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2007, 56(1): 467~472.

4 金哲, 宋执环, 杨将新. 可重构制造系统工艺路线与系统布局设计研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(1): 7~12. Jin Zhe, Song Zhihuan, Yang Jiangxin. Process route and layout design method for reconfigurable manufacturing systems [J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(1): 7~12. (in Chinese)

(下转第 206 页)

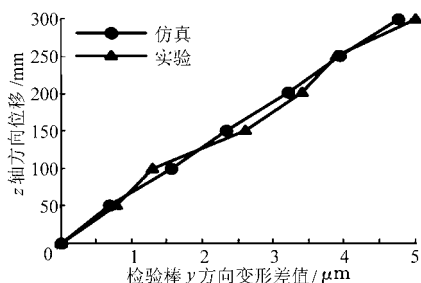


图9 位移变化对变形差值影响的仿真与实验曲线

Fig. 9 Deformation of each displacement in simulation and experiments

过程中,检测棒测量点变形逐渐向工作台外侧偏转,其值约为 $5\ \mu\text{m}$ 。仿真数据和实验数据相对误差的绝对值在 10% 以内,验证了静刚度模型的有效性。

4 结论

(1) 运用弹性力学中赫兹接触理论,对直线导轨的横向刚度、垂向刚度和滚珠丝杠副的轴向刚度进行了分析,建立了双丝杠结合部的静刚度模型。

(2) 以 VH1100 型高速立式加工中心为研究对象,对其结合部静刚度进行了计算。在此基础上研究了直线电动机法向力对刀具点变形的影响。刀具点变形逐渐向工作台外侧偏转,其值约为 $5\ \mu\text{m}$ 。

(3) 将刀具点变形仿真数据与实验数据进行对比,相对误差绝对值小于 10%,证明了静刚度模型的有效性。

参 考 文 献

- Ebrahimi M, Whalley R, Abdul-Ameer A A. Hybrid modelling of machine tool axis drives [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(14): 1 560 ~ 1 576.
- Wu J S S, Chang J C, Hung J P. The effect of contact interface on dynamic characteristics of composite structures [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2007, 74(6): 454 ~ 467.
- Wei C C, Lin J F. Kinematic analysis of the ball screw mechanism considering variable contact angles and elastic deformations [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2003, 125(4): 717 ~ 733.
- Dequidt A, Castelain J M, Valdes E. Mechanical pre-design of high performance motion servo mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(8): 1 047 ~ 1 063.
- Ebrahimi M, Whalley R. Analysis, modeling and simulation of stiffness in machine tool drives [J]. Computers and Industrial Engineering, 2000, 38(1): 93 ~ 105.
- Varanasi K K, Nayfeh S. The dynamics of lead screw drives: low-order modeling and experiments [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004, 126(2): 388 ~ 396.
- Zhang G P, Huang Y M, Shi W H, et al. Predicting dynamic behaviors of a whole machine tool structure based on computer-aided engineering [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(7): 699 ~ 706.
- 尹宜勇, 祝莉平, 贾志新, 等. 永磁直线同步电机法向力对机床结构变形的影响 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 219 ~ 223.
Yin Yiyong, Zhu Liping, Jia Zhixin, et al. Structure deformation of machine tools caused by permanent magnet linear synchronous motor's normal force [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 219 ~ 223. (in Chinese)

(上接第 194 页)

- Ling C, Yip-Hoi D, Koren Y. Operation clustering in process planning for reconfigurable machining systems design [C] // Proceedings of the 2000 Japan-USA Flexible Automation Conference, Michigan, 2000: 23 ~ 26.
- 许虹, 唐任仲, 程耀东. 面向可重构机床设计的工艺规划技术研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(11): 1 496 ~ 1 501.
Xu Hong, Tang Renzhong, Cheng Yaodong. Study of process planning techniques for reconfigurable machine tool design [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(11): 1 496 ~ 1 501. (in Chinese)
- 黄华, 李爱平, 徐立云. 可重构机床模块划分研究 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 198 ~ 204
Huang Hua, Li Aiping, Xu Liyun. Modular division oriented to reconfigurable machine tools [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 198 ~ 204. (in Chinese)