

# 基于多工序制造过程的零件加工特征演变始态网络建模与分析

张富强<sup>1</sup>, 何见停<sup>2</sup>, 苏进展<sup>1</sup>

(1. 长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室, 西安 710064; 2. 郑州机械研究所, 郑州 450052)

**摘要:** 为了实现各个加工特征形状和精度逐步满足质量技术要求, 首先, 对零件加工特征进行分类, 对多工序制造过程中的各加工特征关联关系进行定义. 然后, 将零件加工特征映射为网络的节点, 特征之间的关联关系映射为网络的边, 构建了零件加工特征演变始态网络 (machining-feature-oriented initial evolution network, MF-IEN), 并通过度数和介数等统计指标对其耦合状态进行分析. 最后, 通过具体案例验证了方法的可行性. 本研究揭示了零件多工序制造过程的加工特征演变规律, 为有效辨识关键状态参数提供理论支持.

**关键词:** 加工特征; 多工序制造; 拓扑建模; 始态网络

中图分类号: TH 16

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)06-0833-07

doi: 10.11936/bjntxb2016030009

## Modeling and Analyzing of a Machining-feature-oriented Initial Evolution Network Based on Multi-stage Manufacturing

ZHANG Fuqiang<sup>1</sup>, HE Jianting<sup>2</sup>, SU Jinzhan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In multi-stage manufacturing, it is essential to meet the quality requirements of form and precision for machining features. First, the classification of machining features was carried on, and the association relationships among machining features were defined. Then, machining features were mapped into the network nodes; and the association relationships among machining features were mapped into the network edges. A machining-feature-oriented initial evolution network was established and degree/betweenness were used to analyze the network performance. Finally, a case study was used to verify the proposed method. It is expected that this study can reveal the evolution rule of machining features in multi-stage manufacturing, and provide a theoretical support for identifying the key machining state parameters.

**Key words:** machining features; multi-stage manufacturing; topology modeling; initial network

加工特征是具有有一定几何形状、工程意义和加工要求的一组信息的集合, 是构造零件几何形状和零件信息模型的基本单元<sup>[1]</sup>. 零件的制造过程具有复杂性特征, 一方面是零件结构多样, 如发动机箱体

零件由较高精度的支承孔、孔系和平面, 还有精度较低的紧固孔、油孔、油(水)槽等特征组成; 另一方面是特征的加工需要经过多道工序完成, 如孔加工需要“钻—扩—铰”等多道工序完成从粗加工、半精加

收稿日期: 2016-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605041); 陕西省自然科学基金资助项目(2015JQ5162)

作者简介: 张富强(1984—), 男, 讲师, 主要从事离散制造系统的建模与优化方面的研究, E-mail: fqzhang@chd.edu.cn

工到精加工状态的转变,才能获取满足定位或装配要求的尺寸精度、位置精度和表面粗糙度的要求.因此,零件多工序制造过程就是各个特征的形状和精度逐渐满足质量技术要求的过程,加工特征之间的耦合状态与最终零件质量密切相关<sup>[2]</sup>.

在 CAD/CAPP/CAM (computer aided design, CAD/computer aided process planning, CAPP/computer aided manufacturing, CAM) 领域,基于特征视角对零件或零件族进行形式化描述,是一种很流行的方法<sup>[3]</sup>.王大康等<sup>[4]</sup>采用特征造型技术对回转类零件进行了建模,将零件各种形状特征要素的尺寸、公差、表面粗糙度等几何信息与加工信息集成描述.同样,李双跃等<sup>[5]</sup>采用特征映射技术描述了零件结构特征与加工特征、加工特征与加工方法特征、加工方法与制造工艺资源特征的映射关系和模糊决策方法.此外,Manafi等<sup>[6]</sup>和 Shah等<sup>[7]</sup>研究了从零件设计阶段转换成制造阶段的特征辨识问题.综上所述,目前的文献主要聚焦于零件的特征定义、分类和辨识问题,而对多工序制造过程中零件加工特征之间的耦合状态的研究较少.本文以零件多工序制造过程为研究对象,提出加工特征演变态网络的概念,并采用复杂网络分析理论<sup>[8-9]</sup>对加工特征的初始耦合状态进行分析,为揭示多工序制造过程中加工特征的演变规律提供了基础.

## 1 零件加工特征分类

从加工制造的角度,零件的加工特征类型分为主特征和辅特征.主特征是用于构造零件的总体几何结构形状的特征;辅特征是对主特征或其他辅特征局部修饰和补充<sup>[10]</sup>.典型的主加工特征包括:平面(通平面、台阶面等)、外圆(圆柱、圆台、圆锥等)、孔(通孔、盲孔、阶梯孔、螺纹孔等)、槽(T型槽、U型槽、V型槽、燕尾槽、直槽、圆槽、矩形槽等)等;辅助加工特殊特征包括:倒角、中心孔、滚花等.在加工过程中,主特征与辅特征之间为从属关系.主特征首先加工成零件的主体形状骨架,是辅助特征的载体;而辅特征依附于主特征或其他辅特征之上,形成零件的次要几何形状.

## 2 多工序制造过程

为了达到最终的设计要求,加工特征的成形需要经过多道工序制造完成.多工序制造过程会使加工特征的精度发生变化,在不同的制造工序,加工特征所达到的状态也会不同.如外圆表面加工中,若

加工工序是“粗车—半精车—磨削”,最终可达到加工精度 IT6~7,随着工序的变化,加工精度从最初的 IT12 变化到 IT6~7,外面表面也从最初的毛坯演变成最后的成品.因此,多工序制造过程中加工特征的演变包括特征形状变化和特征精度变化,特征随加工精度的演变关系如图 1 所示.其中,横坐标表示不同的加工特征类型,纵坐标表示不同的加工精度等级;图中虚线表示在加工过程中特征演变,箭头表示特征演变的方向;A~D 表示随加工精度的变化,特征对应的不同状态.

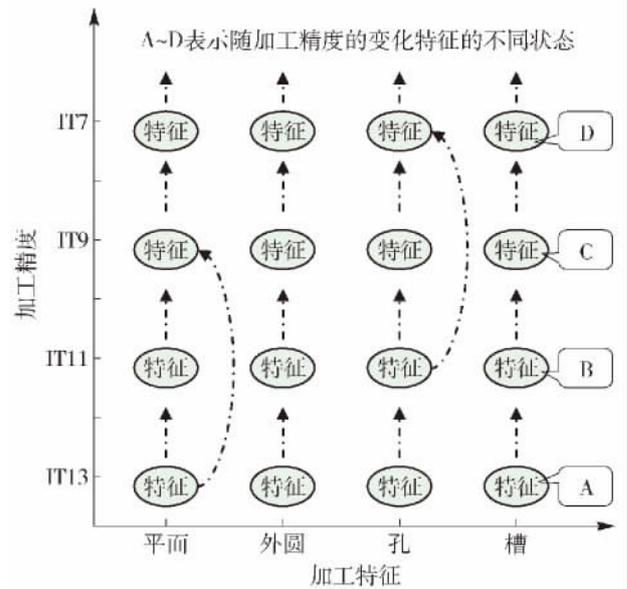


图 1 特征随精度的演化

Fig. 1 Evolution of machining features with precision

## 3 加工特征关系描述

在多工序制造过程中,零件加工特征之间的关联关系并不是单一的,各工序对应的加工特征存在着基准、演变和位置约束等关系使得各工序彼此相互影响.具体描述如下:

### 3.1 基准关系

在零件的制造过程中,一个特征的加工要以其他特征为定位基准,特征之间的这种关系称为基准关系.以一个平面的加工为例说明特征间的基准关系.若特征面 A 与 B、C 之间有垂直度要求,则在加工特征面 A 时,应以特征面 B、C 为定位基准对其进行加工.所以特征面 A 与特征面 B、C 之间构成了基准关系,如图 2 所示.

### 3.2 演变关系

演变关系是针对某个具体特征从开始加工到最终完工所对应的中间状态而言.因为一个特征通常

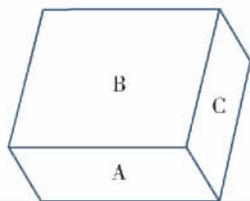


图 2 特征基准关系

Fig. 2 Reference relationship between machining features

需要经过多道工序加工才能达到技术质量要求,在最终加工完成之前的各工序上此特征对应的状态称之为中间加工特征状态;而此特征对应的不同中间加工特征状态按照加工的先后次序就构成了演变关系。如孔的加工随着工序“钻—扩—粗铰—精铰”的变化,孔特征的尺寸和精度也随之发生变化,这样孔从最初的毛坯状态到最终的高精度孔状态的演变就构成了零件加工特征演变关系,如图 3 所示。

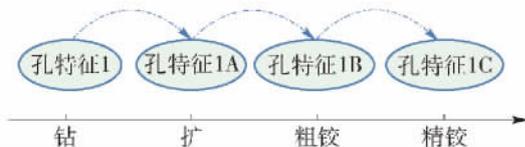


图 3 特征的演变关系

Fig. 3 Evolution relationship between machining features

### 3.3 依附关系

当一个辅特征从属于一个主特征或另一个辅特征时形成依附关系。圆柱倒角特征 B 与圆柱特征 A 间的关系就是依附关系,如图 4 所示。

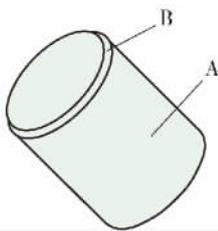


图 4 圆柱体的倒角特征

Fig. 4 Chamfering feature attached to cylinder surface

## 4 零件加工特征演变始态网络的建模与分析

零件加工特征演变始态网络(machining-feature-oriented initial evolution network, MF-IEN)构建及分析的流程如图 5 所示。首先,对零件加工特征的分解;然后,对各加工特征的基准关系、演变关系和依附关系等进行定义,通过确定邻接矩阵来构建加工特征演变始态网络;最后,采用节点度和节点介数等统计参数对网络特性进行分析。

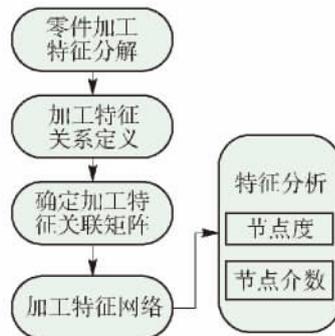


图 5 零件加工特征演变始态网络构建及分析流程

Fig. 5 Flow chart of modeling and analyzing the MF-IEN

### 4.1 MF-IEN 构建

零件加工特征演变始态网络模型可描述如下:

定义 1 零件的加工特征定义为网络的节点  $v$ , 特征之间的关联关系(即基准关系、演变关系、依附关系)定义为网络的边。

定义 2 如果特征  $v_j$  以特征  $v_i$  为基准,则网络的边的方向为  $v_i \rightarrow v_j$ ; 如果特征  $v_j$  是由  $v_i$  演变而来,则网络的边的方向为  $v_i \rightarrow v_j$ ; 如果辅助特征  $v_j$  依附于主特征  $v_i$ ,则网络的边的方向为  $v_j \rightarrow v_i$ 。

定义 3 零件加工特征演变始态网络的邻接矩阵表示的是加工特征之间的关联关系。

基于上述定义,一个二元组被用于描述零件的特征演变网络模型  $G^{MFF} = (V, E)$ 。其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  为零件的加工特征集,元素  $v_i (i = 1, 2, \dots, m)$  表示零件的各道工序、工步对应的加工特征;  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  为零件的加工特征边集,元素  $e_i (i = 1, 2, \dots, n)$  表示各个加工特征之间的关联关系。为了便于计算机进行分析处理,采用特征的邻接矩阵  $A$  来表示特征之间的基准、演变、依附关系。矩阵元素值用 0 和 1 表示,特征间若存在关联关系,则矩阵元素取值为 1,否则为 0。根据特征关系的邻接矩阵便可以得到特征演变网络图,通过构建的网络图可以获取特征演变网络中各特征间关联耦合情况。

### 4.2 网络分析

采用复杂网络理论,对上述构建的加工特征演变始态网络的结构属性作如下定义<sup>[11-12]</sup>。

1) 节点度(degree): 节点  $i$  的度  $k_i$  指所有与节点  $i$  连接的边数,即

$$k_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

式中  $a_{ij}$  表示邻接矩阵  $A$  中第  $i$  行第  $j$  列的元素。因为网络中节点度不会超过  $n - 1$  个,所以归一化度指标定义为

$$k_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

特征演变网络中节点的度表示在零件加工特征演变始态网络中该节点所代表的特征与其他特征的关联关系的多少以及在网络中的重要性,这个数值越大说明这个特征与其他特征之间的关联关系越多,在网络中越重要,反之越少,越不重要.关联关系的多少和节点的物理属性有很大关系,例如某特征在其他多个特征的基准特征或演变的基础特征,则该特征的度值就会比较大,反之比较小.节点度值的大小在一个方面反映了节点的局部重要性.

2) 节点介数 (betweenness): 节点  $i$  的介数  $b_i$  指网络中最短路径经过点  $i$  的比率,有

$$b_i = \sum_{j \neq k} \frac{b_{jik}}{b_{jk}} \quad (3)$$

式中:  $b_{jk}$  表示网络中节点  $j$  到节点  $k$  之间的最短路径的数量;  $b_{jik}$  表示节点  $j$  经过节点  $i$  到节点  $k$  的最短路径的数量.

由于点  $j$  到点  $k$  之间所有可能的最短路径数量为  $(n-1)(n-2)$ , 因此节点  $i$  的归一化介数  $B_i$  为

$$B_i = \frac{1}{(n-1)(n-2)} b_i \quad (4)$$

式中  $n$  表示节点的数量.

在零件加工特征演变始态网络中,经过某节点特征的最短路径越多,即该节点的介数越大,说明该特征连接两特征的可能性越大,在零件加工特征演变始态网络中的作用和影响力越大.

以上定义了对构建的加工特征演变始态网络进行分析时使用的属性参数,这2个参数从系统宏观结构统计特性方面揭示了节点的重要性.在考虑具体加工特征节点时,需要将宏观结构统计参数(度数、介数)与节点的微观物理属性(如定位基准、精细加工特征)相结合进行综合分析,才能获得更有工程实用价值的评判结论.

## 5 案例研究

轴类零件是机器设备中的主要零件之一,用于支承传动件(齿轮、带轮和离合器等)和传递扭矩.本文以某变速箱的输出齿轮轴加工过程为例,来验证所提出的零件加工特征演变始态网络建模和分析方法的可行性.该轴的工艺包括锻件—粗车—调质—半精车—滚齿—渗碳淬火—精车—磨削—铣键槽—磨齿.齿轮轴的材料为 20CrNi2MoA,锻件毛坯如图 6 所示.以粗车工序为例进行了网络建模与分析,具体的粗车工序如图 7 所示,加工工艺如表 1 所示.

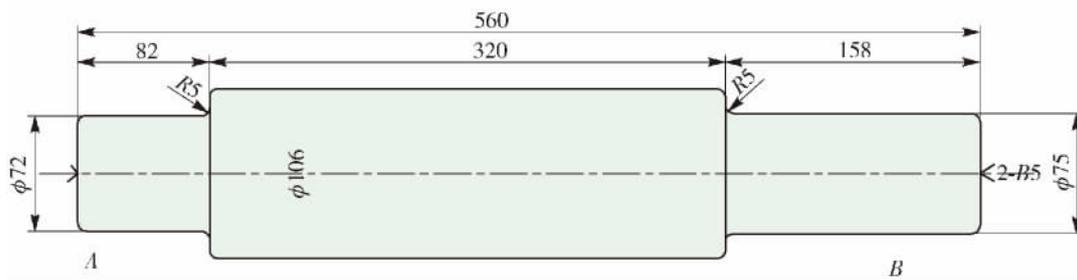


图 6 齿轮轴的锻件毛坯图

Fig. 6 Blank drawing of the gear shaft

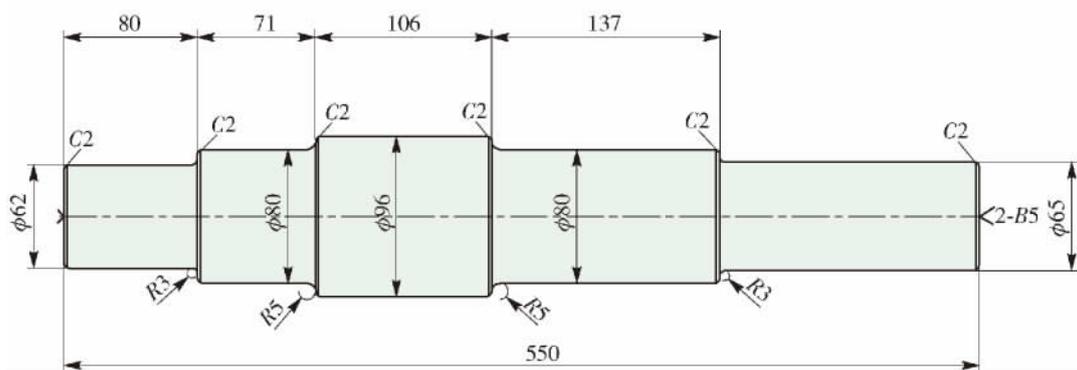


图 7 粗加工阶段的齿轮轴工序

Fig. 7 Procedure drawing of gear shaft in the rough machining stage

表 1 齿轮轴的粗加工阶段工艺路线

Table 1 Process route of gear shaft in rough machining stage

工序名	工步号	工序描述
粗车	1	三爪卡盘卡住 A 端轴径 $\phi 72$ 处, 车 B 端面及轴径 $\phi 75$
	2	用中心钻做 B 端的中心孔
	3	掉头, 三角卡盘卡住 B 端直径 $\phi 75$ 处, 车 A 端面及轴径 $\phi 72$
	4	用中心钻做 A 端面的中心孔
	5	中心孔定位, 车出 A 端轴径 $\phi 62$
	6	A 端第 1 倒角 C2 车出
	7	中心孔定位, 车出 A 端轴径 $\phi 80$
	8	A 端第 2 倒角 C2 车出
	9	中心孔定位, 车出 A 端轴径 $\phi 96$
	10	A 端第 3 倒角 C2 车出
	11	掉头, 中心孔定位, 车出 B 端轴径 $\phi 80$
	12	B 端第 2 倒角 C2 车出
	13	中心孔定位, 车出 B 端轴径 $\phi 65$
	14	B 端第 1 倒角 C2 车出

其具体分析过程如下:

1) 对零件的加工特征进行编码. 编码规则为: 主特征 ID + 辅特征 ID + 加工次数 ID. 其中, 初始状态的加工次数 ID 定义为 00. 例如, 010301 表

示主特征为 A 端轴颈/辅特征为左端倒角的第 1 次加工. 零件的加工特征标识如图 8 所示; 根据工艺文件, 齿轮轴粗加工阶段的加工特征编码如表 2 所示.

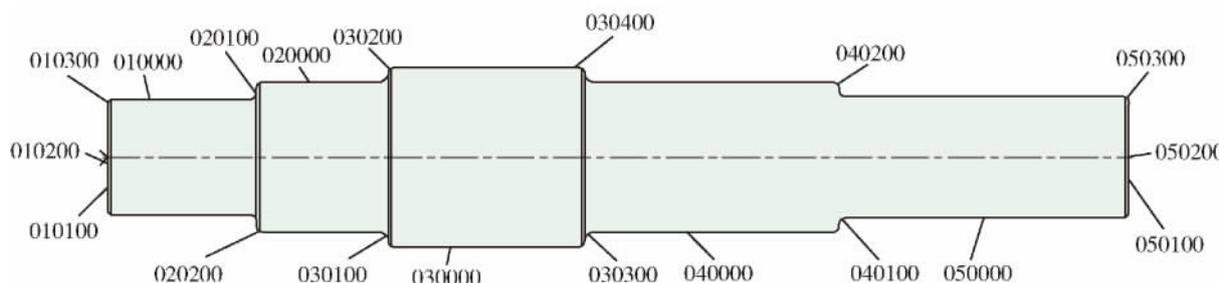


图 8 齿轮轴的加工特征标识

Fig. 8 Machining feature identification of the gear shaft

表 2 齿轮轴的粗加工阶段加工特征编码

Table 2 Machining feature coding of gear shaft in rough machining stage

工序名	工步号	加工特征 ID	定位基准 1	定位基准 2
粗车	1	050101	010000	
		050001	010000	
	2	050201	010000	
		010101	050001	
	3	010001	050001	
		010201	050001	
	4	010002	010201	050201
	5	010301	010201	050201
	6	020001	010201	050201
	7	020201	010201	050201
	8	030001	010201	050201
	9	030201	010201	050201
	10	040001	010201	050201
	11	030401	010201	050201
12	050002	010201	050201	
13	050301	010201	050201	

2) 零件粗加工阶段的邻接矩阵  $A$  的部分数据如表 3 所示。

3) 依据零件的邻接矩阵 构建出的加工特征演

变始态网络图 如图 9 所示。

4) 通过邻接矩阵分析特征演变网络个体的节点度、介数,其分析的部分结果如表 4 所示。

表 3 邻接矩阵  $A$  的部分数据

Table 3 Partial adjacency matrix  $A$

特征 ID	050101	050001	050201	010101	010001	010201	010002	020101	010301
050101	1	0	0	0	0	0	0	0	0
050001	0	1	0	1	1	1	0	0	0
050201	0	1	1	0	0	0	1	1	1
010101	0	0	0	1	0	0	0	0	0
010001	0	0	0	0	1	0	1	0	0
010201	0	0	0	0	1	1	1	1	1
010002	0	0	0	0	0	0	1	0	0
020101	0	0	0	0	0	0	0	1	0
010301	0	0	0	0	1	0	0	0	1

表 4 特征演变网络部分计算结果

Table 4 Partial calculated results of MF-IEN

序号	度数(排名前 10)			介数(排名前 10)		
	特征 ID	绝对值	相对值	特征 ID	绝对值	相对值
1	010201	18	0.46	010000	77.0	5.20
2	050201	17	0.44	050201	61.0	4.12
3	010000	9	0.23	010201	33.0	2.22
4	050001	6	0.15	050001	13.5	0.91
5	030001	6	0.15	030101	13.0	0.88
6	010001	5	0.13	020101	8.0	0.54
7	040001	5	0.13	030100	6.0	0.40
8	050002	5	0.13	010101	5.0	0.34
9	050000	5	0.13	050101	4.5	0.30
10	010301	4	0.10	050002	4.5	0.30

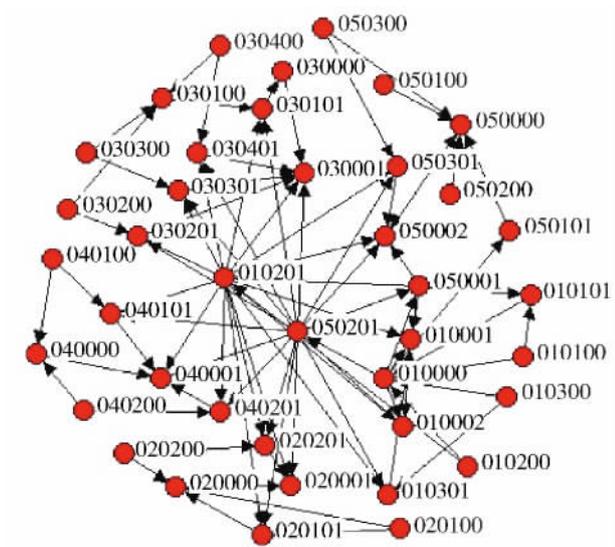


图 9 齿轮轴的加工特征演变网络

Fig. 9 Machining-feature-oriented initial evolution network of the gear shaft

从表 4 可以看出,010201、050201、010000、050001 等节点的度值和介数值比较大,其代表的加工特征是两端的轴颈及中心孔,它们是特征演变网络中的关键元素,在制造过程中是重要的加工特征或基准特征,在制造过程中要对这些特征的几何量以及加工这些特征的设备的工况量进行重点监控。

## 6 结论

1) 以零件多工序制造过程为研究对象,通过对零件加工特征分类以及各加工特征间关联关系的描述,构建了零件加工特征演变始态网络。

2) 通过度数和介数等宏观结构特性参数对加工特征的耦合状态进行了描述,并与节点的微观物理属性进行了综合分析评估了节点的重要性。

3) 最后的案例验证了所提出方法的可行性,

为揭示零件多工序制造过程的加工特征演变规律奠定了基础,为有效辨识关键状态参数提供理论支持.

#### 参考文献:

- [1] 邵新宇,蔡立钢. 现代 CAPP 技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2004: 49-65.
- [2] 刘道玉,江平宇. 基于误差传递网络的工序流波动分析[J]. 机械工程学报,2010(2): 14-21.  
LIU D Y,JIANG P Y. Fluctuation analysis of process flow based on error propagation network [J]. Journal of Mechanical Engineering,2010(2): 14-21. (in Chinese)
- [3] DEJA M, SIEMIATKOWSKI M S. Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 24(4): 831-846.
- [4] 王大康,刘永峰,曹然,等. 基于特征的零件信息建模[J]. 北京工业大学学报,2003,29(4): 391-395.  
WANG D K, LIU Y F, CAO R, et al. Characteristic information modeling of gyratory parts [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2003, 29(4): 391-395. (in Chinese)
- [5] 李双跃,龙红能,殷国富,等. 基于特征的制造工艺资源建模与检索方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(6): 1061-1065, 1070.  
LI S Y, LONG H N, YIN G F, et al. Manufacturing process resource modeling & retrieval method based on features [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2007, 13(6): 1061-1065, 1070. (in Chinese)
- [6] MANAFI D, NATEGH M J, PARVAZ H. Extracting the manufacturing information of machining features for computer-aided process planning systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016: doi 0954405415623487.
- [7] SHAH J J, MANTYLA M, NAU D S. Advances in feature based manufacturing[M]. Amsterdam: Elsevier, 2013: 1-14.
- [8] 刘建香. 复杂网络及其在国内研究进展的综述[J]. 系统科学学报,2009,17(4): 31-37.  
LIU J X. Complex network and review of domestic research [J]. Journal of System Science, 2009, 17(4): 31-37. (in Chinese)
- [9] 张富强,江平宇. 复杂网络理论在离散车间生产过程的应用研究综述[J]. 工业工程,2016,19(6): 1-8.  
ZHANG F Q, JIANG P Y. A complex network theory application research for production process in a discrete manufacturing floor [J]. Industrial Engineering Journal, 2016, 19(6): 1-8. (in Chinese)
- [10] 刘雪梅,周易,黄剑锋,等. 基于制造资源的复杂箱体零件加工特征识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(12): 3166-3173.  
LIU X M, ZHOU Y, HUANG J F, et al. Machining feature recognition method for complicated boxy parts based on manufacturing resources [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(12): 3166-3173. (in Chinese)
- [11] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006: 75-93.
- [12] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, et al. Complex networks: structure and dynamics [J]. Physics Reports, 2006, 424(4): 175-308.

(责任编辑 杨开英)