DOI: 10.3901/JME.2018.03.160

基于加工意图的机加工工艺知识重用方法研究*

常智勇¹ 陶礼尊¹ 李佳佳² 席增飞¹

(1. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 西安 710072;

2. 西安航天发动机厂 西安 710100)

摘要: 为了解决目前工艺知识重用方法存在的问题, 强化工艺知识重用时工艺员的主观能动性, 满足工艺员对工艺知识的个性化、多元化需求, 以 MBD 工序模型几何演变过程中蕴含的工艺知识为研究对象, 提出基于加工意图的工艺知识重用方法。给出了加工意图的建模方法, 加工意图的几何演变、工艺语义信息的捕捉方法以及加工意图的降维处理方法。提出多属性融合的加工意图与 MBD 工艺知识元的相似性加权评价方法, 并进行了实例验证。

关键词: 工艺知识; 加工意图; 知识重用; 相似性度量

中图分类号: TG156

The Measure and Search Method of Process Knowledge Element Based on Machining Intent

CHANG Zhiyong¹ TAO Lizun¹ LI Jiajia² XI Zengfei¹

(1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of

Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100)

Abstract: In order to resolve the problems of current process knowledge reuse methods, strengthen the initiative and meet the personalized, diversified demands of crafts in the research of process knowledge reuse process, process knowledge contained in geometric evolution of MBD process model is as an object, process knowledge reuse method based on machining intent is proposed. Modeling methods, geometric evolution and process semantic information capture methods, dimensionality reduction method of machining intent are given. Finally, a integration of multi-attribute similarity measurement method between machining intent and MBD process knowledge unit is proposed, the example of verification is also given.

Key words: process knowledge; machining intent; knowledge reuse; similarity measurement

0 前言

工艺知识对现代企业快速开发新产品、保证产品质量、增强创新能力和提高综合竞争力具有重要的影响, 是企业重要的智力资源^[1]。而基于 MBD(Model based definition)技术的工艺设计方法使得 CAPP 三维化成为了必然的趋势。因此, 在 MBD 三维工艺环境下, 开展应用效能更高的工艺知识重用方法, 就变的迫切且具有重要的现实意义。

目前, 知识重用的方法主要包括基于文本的检索和基于内容的检索。基于文本的检索是采用文字

或文字内涵的语义作为检索条件, 在工艺设计的知识重用中有广泛应用。但文本属于低维信息, 作为检索条件不能完全表达高维的知识需求, 因此基于内容的检索方式逐渐成为研究热点。基于内容的检索主要包括基于形状检索和基于标注语义的检索。具体到机加工工艺知识的重用领域, 基于形状和基于拓扑结构的检索方式成为了主流。利用频谱分析、图论^[2-3]、降维等方法将零件模型或加工特征依据形状或者拓扑转化为可度量的数学模型, 在“相似结构有相似工艺”的假设下比较零件模型与已有工艺模型之间的相似程度以检索相似的工艺实例。虽然几何结构可能蕴含比文本更高维的知识需求, 但其粒度大、难以反映设计者对局部特征的多元化知识需求; 基于标注语义的检索方式将几何结构与其上蕴含的工艺语义标注信息相结合, 形成了更高维的

* 国家自然科学基金(51375395)、中国博士后科学基金(2014M552484)和陕西省自然科学基金(2016JM5040)资助项目。20161225 收到初稿, 20170826 收到修改稿

检索方式^[4], 但仍未解决知识粒度大的问题。近年来, 有学者提出了零件工序模型序列的几何演变信息才是工艺知识的直接载体这一基本观点, 并探讨了几何演变驱动下的零件级的工艺相似性度量方法^[5]和特征级的工艺相似性度量方法^[6]。这些方法虽然将工艺知识细化到了零件结构特征形成过程中的几何演变环节, 解决了传统方法总是将工艺知识与零件最终结构相固化而带来的知识粒度较大的问题, 但总的来说还停留在被动的知识重用层面上, 忽视了设计者的主观需求也是影响工艺重用的一个重要因素, 进而可能导致知识的重用效能降低。

事实上, 机加工工艺设计的目标是由毛坯到零件产品的动态过程, 设计者的隐性加工意图也蕴含在对加工动态过程的构思中^[7], 这种更高维的加工意图显然比上述研究都更能反映工艺知识检索的本质需求。为了解决目前工艺知识重用方法存在的问题, 本文以 MBD 工艺模型几何演变过程中蕴含的工艺知识为对象, 从加工过程的几何演变及其所附带的工艺语义这两个角度给出了 MBD 工艺知识元的表达形式, 并进一步研究以加工意图作为检索条件的工艺知识重用新模式。

1 基于加工意图的工艺知识重用方法

1.1 MBD 工艺知识元

本文以 MBD 工序模型几何演变过程中蕴含的工艺知识为研究对象。如图 1 所示, 以具有完备工艺信息的 MBD 工序模型为基础, 捕捉工序模型动态几何演变过程中蕴含的高维工艺信息, 具体则包括工序模型的几何演变信息及其所附带工艺语义信息。然后再对这些捕捉到的高维工艺信息进行降维处理, 进而得到低维、非线性的工艺知识。

图1 MBD技术的工艺知识发现过程

将工艺知识细化到零件特征结构形成过程中的几何演变环节, 使知识不再与零件或其上的结构特征相固结, 知识的粒度明显减小, 知识在重用时也更加具有灵活性和适用性^[8]。工艺知识元与零件加工过程中的一道工序相对应, 表示的是该道工序的基本工艺内容。零件的机加工工艺过程可以看作是由若干个工序按照一定的顺序排列组成, 即由若干个工艺知识元按照零件加工的逻辑顺序组织排列得到。

本文从 MBD 工序模型几何演变过程中蕴含的工艺知识角度出发, 定义工艺知识的基本单元——MBD 工艺知识元。MBD 知识元解决了知识粒度大的问题, 是后续工艺知识重用方法研究的基础。

MBD 工艺知识元(Process knowledge unit, PKU)的矢量表达形式

$$PKU=[ID, G, P] \quad (1)$$

式中, ID 为工艺知识元在工艺知识库中的编号; G 为相邻两道工序模型的几何演变信息; P 为 MBD 工艺知识元的工艺语义信息。

$$G = p_{m-i} - p_{m-i+1} \quad (2)$$

式中, p_{m-i} 和 p_{m-i+1} 分别为第 i 道工序的工序模型与第 $i+1$ 道工序的工序模型。

P 是从 MBD 工序模型中取最具代表性的几个信息: 尺寸、公差和表面粗糙度

$$P = \{d_i, t_i, r_i\} \quad (3)$$

式中, P 为依附于第 i 道和 $i+1$ 道工序模型间的几何演变 G 的工艺语义信息; d_i 为几何演变的最大尺寸, 反映加工特征的几何尺度信息; t_i 为加工特征各面公差等级的最高值; r_i 为加工特征的表面粗糙度。

G 的捕捉、降维处理和后文加工意图几何演变的捕捉、降维处理方法相同。 P 的获取、降维处理和后文加工意图工艺语义的获取、降维处理方法相同。

对于 MBD 工艺知识元模型中的信息, 可以分别通过工艺知识网和关系数据库的模式进行存储和管理。文献[6]中借鉴复杂网络的相关理论和方法对工序模型的几何演变信息进行了存储和管理, 其所建立的工艺知识网在本质上就等同于工艺知识库。本文分别应用文献[6]中方法和关系数据库来对 PKU 中的 G 和 P 进行存储, 这里不再赘述。

1.2 加工意图

加工意图(Machining intent, MI)是工艺员在拿到一个新零件后对其工艺设计过程产生的大体设计思路, 是对零件关键尺寸加工顺序安排的思考。加工意图反映了零件关键尺寸的加工过程, 可以被看作是后续进行零件详细工艺设计时的一个参照“草稿”。

即使面对相同的零件, 不同的工艺员可能会有不同的加工意图, 不同的加工意图蕴含着不同的工艺设计思路, 而不同的工艺设计思路在工艺知识重用时就会有不同的知识需求。因此, 基于加工意图的工艺知识重用过程强化了工艺员的主观能动性, 反映了工艺员对于工艺知识的个性化、多元化需求, 是更贴近工艺知识检索需求的新模式。

1.3 基于加工意图的工艺知识重用方法

加工意图是工艺员抽象的工艺设计思维, 具有

高维、隐性、抽象等特点, 要实现基于加工意图的工艺知识重用, 首先就需要对加工意图进行建模, 构建出高维的加工意图模型; 其次, 对高维的加工意图模型和 MBD 工艺知识元进行降维处理, 获得低维、可比较的形式; 最后, 建立低维的加工意图模型与 MBD 工艺知识元间的相似性度量算法, 实现工艺知识的检索重用。

2 加工意图的建模及降维处理

2.1 MBD 工艺知识元加工意图的建模

加工意图建模方法: 在空间维度上构建加工特征语义标注模式; 在时间维度上构建加工特征序列语义标注模式。

(1) 在空间维度上构建加工特征语义标注模式。在空间维度上构建加工特征语义标注是为了反映工艺人员对保证零件关键尺寸加工状态的构思。

定义 1: 关键工序模型(Key step process model, KPM), 是指零件从开始加工到加工完成过程中所经过的中间状态的三维模型, 这里的加工过程是工艺人员对零件加工过程的大体构思。

在关键工序模型中, 尺寸信息反映零件关键尺寸的加工状态, 而公差/表面粗糙度则与制造特征加工方法的选择密切相关。因此, 选择零件关键尺寸及其公差和表面粗糙度加工要求作为关键工序模型的工艺语义信息。关键工序模型由工艺员根据自己的加工意图确定, 以人机交互的方式输入到三维 CAD 系统中。

(2) 在时间维度上构建加工特征序列语义标注模式。

在时间维度上构建加工特征序列语义标注模式, 即构建关键工序模型序列, 是为了反映工艺人员对零件关键尺寸加工先后次序安排的构思。不同的加工意图体现为不同的关键工序模型序列, 而不同的关键工序模型序列映射为不同的加工意图。将关键工序模型序列(Model sequence, MS)表示为

$$MS = \{M_1, M_2, \dots, M_k\} \quad (4)$$

式中, k 为关键工序模型序列中包含的模型个数; M_1 、 M_2 、 $\dots$ 、 M_k 为关键工序模型序列中的关键工序模型。

工艺人员根据自身的加工意图, 以人机交互的方式在三维 CAD 系统中完成对 MS 的构建。

2.2 高维加工意图检索模型

工艺员的加工意图蕴含在关键工序模型序列的动态演变过程中, 模型序列的几何演变信息、几何

演变的工艺语义信息一起构成具体的、形象化后的高维加工意图。高维加工意图(High-dimensional machining intent, HMI)的矢量表达形式

$$HMI = [G_H, P_H] \quad (5)$$

或

$$HMI = [G_{H_i}, P_{H_i} | i = 1, 2, \dots, k-1] \quad (6)$$

式中, G_H 为关键工序模型序列的几何演变集合; P_H 为关键工序模型序列的几何演变对应的工艺语义信息集合。

$$G_H = \{G_{H1}, G_{H2}, \dots, G_{Hk-1}\} \quad (7)$$

式中, $G_{H_i} (1 \leq i \leq k-1)$ 为模型序列中相邻两个关键工序模型间的几何演变信息。

$$P_H = \{P_{H1}, P_{H2}, \dots, P_{Hk-1}\} \quad (8)$$

式中, $P_{H_i} = \{D_i, T_i, R_i\} (1 \leq i \leq k-1)$ 是依附于 G_{H_i} 的工艺语义信息; P_{H_i} 中的包含三个元素: D_i 为零件的关键尺寸, T_i 是对应尺寸的公差要求, R_i 为该道工序的加工粗糙度要求。

2.3 高维加工意图的降维处理

对 HMI 进行降维处理, 使之转变为可以与 MBD 工艺知识元进行比较的形式, 是进行工艺相似性检索和重用的前提。而 HMI 降维处理的前提是准确捕捉到工艺员加工意图模型中的几何演变信息和工艺语义信息。

2.3.1 高维加工意图的几何演变、工艺语义捕捉

(1) 几何演变捕捉。

几何演变的捕捉方法: 将关键工序模型中相邻两个模型存为 STL 格式; 然后以重建三角面片拓扑关系的 STL 文件为数据源, 应用改进形状分布算法 D_1 距离来构建模型各表面的形状分布直方图; 接着对直方图进行保形插值, 拟合得到形状分布曲线; 最后通过对曲线进行相似性度量来获取相邻两个模型的几何演变。对 MS 中的所以前、后相邻工序模型重复上述方法, 即可得到高维加工意图的几何演变信息集合。

STL 文件简单, 易读取, 且其表示模型不失真, 有较高精度。当前流行的 CAD 软件几乎都具备 STL 文件接口^[9], 通过在 CAD 系统中进行相应的设置, 就可以获得与模型逼近精度较高的 STL 文件。因此, 本文在用形状分布算法表征模型表面形状分布时, 以 STL 文件作为数据来源。但是由于 STL 文件数据的冗余性和面片的无序性^[10], 本文在对 STL 文件中的三角面片拓扑关系进行重建的基础上, 提出了改进形状分布算法 D_1 距离来构建关键工序模型各表

面的形状分布直方图。

STL 文件中三角面片拓扑关系的建立方法: 当模型表面是平面时, 寻找法矢相同且共边的三角面片^[11], 得到属于同一平面的所有三角面片; 当模型表面不是平面时, 计算每个三角面片和与其共边的 3 个三角面片的法矢夹角, 若角度小于某一阈值(一般选阈值为 20°), 则认为该相邻面片与此面片共面, 否则不共面^[8]; 按照上述方法遍历模型所有表面, 得到模型每个面包含的所有三角面片。

改进形状函数 D_i 距离: STL 文件中三角面片内心到模型形心的距离。改进形状函数 D_i 距离避免了因为数据冗余而造成的 STL 文件处理过程较复杂且耗时的缺陷。

在模型表面的形状直方图中, 横坐标取 STL 模型表面的所有三角面片的改进形状函数 D_i 距离或距离区间, 纵坐标取某一距离或距离区间内包含的三角面片内心的频数。对直方图保形插值拟合得到形状分布曲线, 通过曲线的相似性度量, 计算得到两个三维模型对应表面的相似性, 从而得到相邻两个关键工序模型间的几何演变。曲线的相似性度量不作为本文的研究内容, 这里不再赘述。

(2) 工艺语义捕捉。

HMI 的工艺语义信息捕捉通过 CAD 系统的应用程序接口来实现。

2.3.2 高维加工意图几何演变、工艺语义的降维处理

几何演变、工艺语义的降维处理过程如图 2 所示。

图2 高维加工意图的降维处理

(1) 几何演变的降维处理。

用属性邻接图 $AAG=\{V, E, \alpha, \beta, \gamma\}$ 对零件模型

的几何拓扑信息进行描述。其中, V 为图中节点的集合, 节点代表模型的表面, 对于模型的任意一个表面 f_i , 都有唯一的节点 $n_i \in V$ 与之对应; E 为图中弧(或边)的集合, 弧(或边)代表表面之间的邻接关系, f_i, f_j 相邻, 弧为实线, f_i, f_j 不相邻, 弧为虚线, 对于模型中任意的一对表面 f_i, f_j , 都有唯一的弧 $e_i \in E$ 与之对应; α 代表模型中面的属性集, 如面的类型(平面、圆柱面等)、面积、法矢等; β 表示模型中边的属性集, 包括边的类型(直线、圆弧等)、长度等; γ 表示几何对象的关联属性集, 如两个面相邻、平行。图 3 是一个轴零件的属性邻接图描述实例。

(a) 轴的三维模型

(b) 轴三维模型的属性邻接图

图3 轴零件的属性邻接图表示

在获得零件模型的属性邻接图后, 就可以应用图的相似性度量算法来比较零件几何结构信息的相似性。传统属性邻接图的相似性比较方法主要有基于图的邻接矩阵和基于图的编辑距离等方法。基于图的邻接矩阵的算法比较效果不好^[12], 而计算图的编辑距离又是一个 NP-Hard 问题^[13]。近年来, 基于字符串相似性度量的比较方法成为了研究热点, 取得很多研究成果, 如基于编辑距离的相似性度量方法^[14]。考虑到度量字符串的相似性比直接度量图的相似性要简单, 所以本文先将属性邻接图映射转换为具有唯一性的字符串, 然后通过度量字符串的相似性来完成对几何演变相似性的计算。

属性邻接图映射为字符串的方法: 根据三维模型的属性定义一个排序函数, 对属性邻接图中的顶点排序, 得到顶点的唯一排序序列; 对顶点间的关

系集进行定义,并进一步将顶点排序后的属性邻接图表示为字符串^[15]。

(2) 工艺语义的降维处理。

工艺语义信息的降维处理通过对其量化处理来实现。以尺寸公差为例,其量化处理可根据获取到的尺寸公差来确定其公差等级:然后对照标准公差数值表,根据公称尺寸和公差值来反推得到标准公差等级。

2.3.3 低维非线性加工意图

按照前两节给出的方法,对 HMI 的几何演变和工艺语义信息分别进行降维处理,得到低维、非线性加工意图。参照 MBD 工艺知识元和 HMI 的矢量表达给出低维、非线性加工意图(Lower-dimensional machining intent, LMI)的矢量表达

$$\text{LMI} = [S_L, P_L] \quad (9)$$

或

$$\text{LPI} = [(S_{L1}, P_{L1}), (S_{L2}, P_{L2}), \dots, (S_{Lk-1}, P_{Lk-1})] \quad (10)$$

式中, S_L 为表达关键工序模型序列几何演变信息的字符串集合; S_{Li} 为字符串集合中的第 i 个字符串,表达第 i 个和第 $i+1$ 个关键工序模型间的几何演变; P_L 为降维后的工艺语义信息集合; P_{Li} 为 P_L 中的第 i 个元素,表达 S_{Li} 对应的工艺语义信息。

$$S_L = \{S_{L1}, S_{L2}, \dots, S_{Lk-1}\}$$

$$P_L = \{P_{L1}, P_{L2}, \dots, P_{Lk-1}\}$$

$$P_{Li} = \{D_{Li}, T_{Li}, R_{Li}\} \quad 1 \leq i \leq k-1 \quad (11)$$

在 P_{Li} 中, T_{Li} 为高维加工意图中的尺寸公差值; T_{Hi} 对应的尺寸公差等级。

3 加工意图与 MBD 工艺知识元的相似性度量

基于加工意图的工艺知识重用就是将加工意图作为检索条件,以工艺知识库中的 MBD 工艺知识元作为检索对象,通过二者之间的相似性度量来实现检索重用。低维、非线性的加工意图 LMI 与 MBD 知识元间的相似性度量可以简单描述为:遍历 $\text{LMI} = [S_L, P_L]$ 或 $\text{LMI} = [S_{Li}, P_{Li} | i=1, 2, \dots, k-1]$ 的每一项 I_i (记 $I_i = \{S_{Li}, P_{Li}\}$), 并用其在工艺知识库中进行检索,得到与之最相似 MBD 工艺知识元。本文只给出 LMI 中的单项 $I_i = \{S_{Li}, P_{Li}\}$ 与单个 MBD 工艺知识元的相似性度量方法,重复应用相同的方法就可以得到与 LMI 中所有项都匹配的 MBD 工艺知识元集合,即工艺知识库中和 LMI 相似的所有

MBD 工艺知识元。

LMI 单项 I_i 与 MBD 工艺知识元的相似性度量分为几何演变信息的相似性度量和工艺语义信息的相似性度量两部分。

3.1 几何演变信息的相似性度量

通过降维处理 MBD 工艺知识元的几何演变信息,使其转化为可以和 LMI 进行相似性比较的字符串。编辑距离算法通常被用于字符串的快速匹配,是一种经典而广泛使用的方法^[16]。但是,由于本文要进行相似性度量的字符串包含了几何演变的几何和拓扑信息,原始的编辑距离并不适用。因此,本文采用改进编辑距离字符串相似性度量方法^[15]来实现对几何演变信息的相似性度量。

为了便于描述基于改进编辑距离的字符串相似性度量方法,将 I_i 中表示几何演变的字符串 S_{Li} 记为 S_1 ,将表示 MBD 工艺知识元中几何演变的字符串 S 记为 S_2 ,字符串 S_1 、 S_2 的长度分别为 m 、 n 。建立 S_1 、 S_2 的关系矩阵 $ED = [D_{ij}]_{(m+1) \times (n+1)}$ 。 D_{ij} 可以根据下式进行迭代计算

$$D_{ij} = \min \begin{cases} D(i-1, j-1) + R(S_1 \langle i \rangle \rightarrow S_2 \langle j \rangle) \\ D(i-1, j) + R(S_1 \langle i \rangle \rightarrow \Lambda) \\ D(i, j-1) + R(\Lambda \rightarrow S_2 \langle j \rangle) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $S_1 \langle i \rangle$ 为字符串 S_1 中的第 i 个字符; $S_2 \langle j \rangle$ 为字符串 S_2 中的第 j 个字符; R 表示代价函数, $R(S_1 \langle i \rangle \rightarrow S_2 \langle j \rangle)$ 代表将字符串 S_1 中的第 i 个字符 $S_1 \langle i \rangle$ 用字符串 S_2 中的第 j 个字符 $S_2 \langle j \rangle$ 替换付出的代价, $R(S_1 \langle i \rangle \rightarrow \Lambda)$ 代表删除字符串 S_1 中的第 i 个字符 $S_1 \langle i \rangle$ 所付出的代价, $R(\Lambda \rightarrow S_2 \langle j \rangle)$ 表示字符串 S_1 中插入字符串 S_2 中的第 j 个字符 $S_2 \langle j \rangle$ 所付出的代价。

在迭代得到字符串 S_1 和 S_2 间编辑距离 D_{mn} 后,就可以利用式(13)^[17]来度量字符串间的相似度。

$$\text{Sim}(S_1, S_2) = 1 - \frac{D_{mn}}{m+n} \quad (13)$$

$0 \leq \text{Sim}(S_1, S_2) \leq 1$, $\text{Sim}(S_1, S_2) = 0$ 表示 S_1 和 S_2 完全不相似, $\text{Sim}(S_1, S_2) = 1$ 表示 S_1 和 S_2 完全相等。字符串 S_1 和 S_2 的相似度也就反映了 LMI 和 MBD 工艺知识元中的几何演变信息的相似度。

3.2 工艺语义信息的相似性度量

LMI 单项 $I_i = \{S_{Li}, P_{Li}\}$ 中的工艺语义信息 P_{Li} 和 MBD 工艺知识元中工艺语义信息 P 的相似性包括尺寸、尺寸公差以及表面粗糙度的相似性这三个部

分。三者的相似度 $\text{Sim}(D_{Li}, d)$ 、 $\text{Sim}(T_{Li}, t)$ 、 $\text{Sim}(R_{Li}, r)$ 都可根据下式计算

$$\text{Sim}(x_1, x_2) = 1 - \frac{|x_1 - x_2|}{\max(x_1, x_2)} \quad (14)$$

式中, x_1 表示 P_{Li} 中的尺寸值、尺寸公差等级、表面粗糙度值; x_2 表示工艺知识元中 P 包含的尺寸值、尺寸公差等级、表面粗糙度值。

和 $\text{Sim}(S_1, S_2)$ 的性质类似, 尺寸、尺寸公差以及表面粗糙度的相似性也满足: $0 \leq \text{Sim}(D_{Li}, d)$, $\text{Sim}(T_{Li}, t)$, $\text{Sim}(R_{Li}, r) \leq 1$ 。

3.3 多属性融合的工艺知识元相似性度量

综合考虑几何演变信息的相似性和工艺语义信息的相似性, 给出多属性融合的 LMI 与 MBD 工艺知识元间的相似性加权评价模型。LMI 单项 I_i 与 MBD 工艺知识元 PKU 的相似度记为 Sim 。

$$\text{Sim} = w_G \text{Sim}(S_{Li}, S) + w_D \text{Sim}(D_{Li}, d) + w_T \text{Sim}(T_{Li}, t) + w_R \text{Sim}(R_{Li}, r) \quad (15)$$

式中, $\text{Sim}(S_{Li}, S)$ 表示 I_i 中的字符串 S_{Li} 与 PKU 中

的字符串 S 的相似度; $\text{Sim}(D_{Li}, d)$, $\text{Sim}(T_{Li}, t)$, $\text{Sim}(R_{Li}, r)$ 分别为 I_i 和 PKU 中包含的尺寸、尺寸公差以及表面粗糙度等信息的相似度; w_G , w_D , w_T , w_R 分别为 $\text{Sim}(S_{Li}, S)$, $\text{Sim}(D_{Li}, d)$, $\text{Sim}(T_{Li}, t)$, $\text{Sim}(R_{Li}, r)$ 对应的权重。关于权重设置的一个启发式原则是高层制造语义信息不小于低层的几何形状信息^[18], 即 $w_T + w_R \geq w_G + w_D$, 且 $\sum_{TRGD} w = 1$ 。各个权重的具体取值需要根据不同企业工艺设计工作的经验来确定。

同样的, $0 \leq \text{Sim} \leq 1$ 。给定一个阈值 ε , 若 $\text{Sim} > \varepsilon$, 则认为 I_i 与 PKU 相似; 否则, 不相似。

应用式(15)对 LMI 中的每一项与工艺知识库中的 MBD 工艺知识元进行相似性度量, 就可得到与 LMI 相似的 MBD 工艺知识元的集合, 即 $\{PKU_{1q_1}, PKU_{2q_2}, \dots, PKU_{k-1q_{k-1}}\}$ 。

对于 PKU_{ij} ($i=1, 2, \dots, k-1; j=1, 2, \dots, q_i$), q_i 为和 LMI 分量 I_i 相似的 MBD 工艺知识元的个数。LMI 与 MBD 工艺知识元的相似性度量过程如图 4 所示。

图 4 LMI 与 MBD 工艺知识元的相似性度量过程

4 实例验证

阶梯轴零件是机械产品中的常用零件, 其加工过程更是包含了车削、铣削、钻削和磨削等常见的机加工序, 其工艺过程具有典型性和代表性。因此, 本文选择阶梯轴零件作为研究对象来进行实例验证, 如图 5 所示。图中未注明公差都采用标准公差 IT7。

设某工艺员根据自己对图 5 所示阶梯轴零件的加工意图, 构建出了如图 6 所示的关键工序模型序列。

图 5 阶梯轴

使用第 2.3.1 节的方法捕捉图 6 中关键工序模型序列的几何演变; 使用第 2.3.2 节的方法将几何演变

集合中的元素分别表示为属性邻接图,并应用排序函数 $R(V)$ 对各属性邻接图的顶点重新排序,结果如图7所示。其中, G_{H1} 、 G_{H2} 、 G_{H3} 分别表示图6a、6b间,图6b、6c间,图6c、6d间的几何

演变; G_{a1} 、 G_{b1} 、 G_{c1} 分别是对几何演变 G_{H1} 、 G_{H2} 、 G_{H3} 的属性邻接图表示; G_{a2} 、 G_{b2} 、 G_{c2} 分别是对 G_{a1} 、 G_{b1} 、 G_{c1} 的顶点进行重新排序后生成的新属性邻接图。

图6 关键工序模型序列

图7 关键工序模型序列几何演变的属性邻接图表示

使用第2.3.1节的方法捕捉图6中模型序列的工艺语义信息。使用第2.3.2节的方法对捕捉到的工艺语义信息进行降维处理。结果如表1所示。

表1 几何演变对应的工艺语义信息

几何演变	几何演变对应的工艺语义信息		
	尺寸/mm	精度(IT)	表面粗糙度/ μm
G_{H1}	80	7	1.6
G_{H2}	150	7	3.2
G_{H3}	80	7	3.2

最终得到的低维、非线性加工意图表示为

$$\text{LMI} = [(S_{L1}, P_{L1}), (S_{L2}, P_{L2}), (S_{L3}, P_{L3})] \quad (16)$$

$$S_L = \{S_{L1}, S_{L2}, S_{L3}\} = \{AbBB\infty BBbC, A\infty AAaBB\infty B, A\infty AAaBB\infty B\} \quad (17)$$

$$P_L = \{P_{L1}, P_{L2}, P_{L3}\} \quad (18)$$

这里仅以LMI中的第一个分量(S_{L1}, P_{L1})为例来进行相似性度量的验证。设要和LMI的第一个分量进行相似性度量的MBD工艺知识元为

$$\text{PKU} = [ID, G, P, Q] =$$

$$[ID, AaBBbBBbC, (60, 6, 3.2), Q] \quad (19)$$

按照式(13)计算得到 $\text{Sim}(S_{L1}, S) = 87.2\%$, 按照式(14)计算得 $\text{Sim}(D_{L1}, d) = 75\%$, $\text{Sim}(T_{L1}, t) = 85.7\%$, $\text{Sim}(R_{L1}, r) = 50\%$ 。

根据式(15)计算式(16)中LMI的第一个分量(S_{L1}, P_{L1})和式(19)MBD工艺知识元PKU的相似度。取4个分量的权重分别为: $w_G = 0.3$, $w_D = 0.2$, $w_T = 0.3$, $w_R = 0.2$ 。

$$\begin{aligned} \text{Sim} = & w_G \text{Sim}(S_{Li}, S) + w_D \text{Sim}(D_{Li}, d) + \\ & w_T \text{Sim}(T_{Li}, t) + w_R \text{Sim}(R_{Li}, r) = 76.9\% \end{aligned} \quad (20)$$

给定阈值 ε 为 65%, $\text{Sim} > \varepsilon$ 。此判定 (S_{Li}, P_{Li}) 和给定的 PKU 相似。

5 结论

(1) 以 MBD 工序模型几何演变过程中蕴含的工艺知识为研究对象, 考虑了动态、关联的演变过程中的知识, 从加工过程的几何演变及其所附带的工艺语义这两个角度给出了 MBD 工艺知识元的表达形式, 解决了工艺知识粒度大的问题。

(2) 对加工意图进行了建模, 并提出了基于加工意图的工艺知识重用方法, 从而有效强化了工艺员的主观能动性在工艺知识重用过程中的作用, 更好地满足了工艺员对于知识的个性化和多元化需求。

(3) 提出了加工意图与 MBD 工艺知识元间相似性度量方法, 实现了对工艺知识的检索和重用。

参 考 文 献

- [1] 刘书媛. 工艺知识发现与重用技术[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
LIU Shunuan. Process knowledge discovery and reuse technology[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [2] 皇甫中民, 张树生, 闫维恒. 鱼群启发的三维 CAD 模型聚类与检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(8): 1373-1382.
HUANGFU Zhongmin, ZHANG Shusheng, YAN Luoheng. 3D CAD model clustering and retrieval inspired by fish swarm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(8): 1373-1382.
- [3] 仇铮. 基于图论的三维 CAD 模型检索技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
ZHANG Zheng. 3D CAD model retrieval based on graph theory[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [4] CHANG H C, DONG L, LIU F X, et al. Indexing and retrieval in machining process planning using case-based reasoning[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2000, 14(1): 1-13.
- [5] 胡淑慧, 杨海成, 张招建, 等. 三维工序模型几何演变序列的相似性度量[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(7): 1176-1183.
HU Shuhui, YANG Haicheng, ZHANG Zhaojian, et al. Similarity measure of the geometry change sequence of three-dimensional process model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(7): 1176-1183.
- [6] 李春磊, 莫蓉, 常智勇, 等. 几何演变驱动的机加工工艺知识表示与推送[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6): 1434-1446.
LI Chunlei, MO Rong, CHANG Zhiyong, et al. Knowledge representation and push of machining process driven by geometric variation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(6): 1434-1446.
- [7] 王英伟, 莫蓉, 万能. 多粒度机械加工设计意图建模方法研究[J]. 工具技术, 2014, 48(6): 31-35.
WANG Yingwei, MO Rong, WAN Neng. Multi-granularity modeling method of machining design intent[J]. Tool Engineering, 2014, 48(6): 31-35.
- [8] 刘晨, 殷国富, 龙红能. 制造工艺知识粒度描述方法与获取算法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(10): 1966-1973.
LIU Chen, YIN Guofu, LONG Hongneng. Description and discovery method of manufacture process knowledge granularity[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(10): 1966-1973.
- [9] 肖棋, 林俊义. STL 文件格式在反求造型中的应用[J]. 华侨大学学报, 2006, 27(3): 284-287.
XIAO Qi, LIN Junyi. The application of STL file format in reverse engineering[J]. Journal of Huaqiao University, 2006, 27(3): 284-287.
- [10] 纪峰, 李占利. 基于 STL 文件的拓扑重构新方法[J]. 湖南科技学院学报, 2006, 27(5): 154-157.
JI Feng, LI Zhanli. A novel method for the topological reconstruction based on STL files[J]. Journal of Hunan University of Science & Engineering, 2006, 27(5): 154-157.
- [11] 王建新, 王从军, 黄树槐. 基于 STL 文件格式的线框模型算法的研究与实现[J]. 机械与电子, 2002(3): 28-30.
WANG Jianxin, WANG Congjun, HUANG Shuhuai. Research and implement on the algorithms of the wireframe based on the STL format[J]. Machinery & Electronics, 2002(3): 28-30.
- [12] MCWHERTER D T, PEABODY M, REGLI W C, et al. Solid model databases: Techniques and empirical results[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2001, 1(4): 300-310.
- [13] BUNKE H. On a relation between graph edit distance and maximum common subgraph[J]. Pattern Recognition Letters, 1997, 18(9): 689-694.
- [14] WAGNER R A, FISCHER M J. The string-to-string correction problem[J]. Journal of the ACM, 1974, 21(1): 168-173.

- [15] 张欣, 莫蓉, 石源, 等. 基于字符串度量的 CAD 模型相似性比较算法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(20): 2435-2440.
ZHANG Xin, MO Rong, SHI Yuan, et al. String-based CAD models similarity assessment algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(20): 2435-2440.
- [16] 姜华, 韩安琪, 王美佳, 等. 基于改进编辑距离的字符串相似度求解算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(1): 222-227
JIANG Hua, HAN Anqi, WANG Meijia, et al. Solution algorithm of string similarity based on improved levenshtein distance[J]. Computer Engineering, 2014, 40(1): 222-227.
- [17] 周汉平. Levenshtein 距离在编程题自动评阅中的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2001, 28(5): 209-212.
ZHOU Hanping. Study on application of levenshtein distance in programming test automatic scoring[J]. Computer Applications & Software, 2011, 28(5): 209-212.
- [18] 黄瑞, 张树生, 白晓亮, 等. 融合制造语义的三维 CAD 模型检索方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 1177-1185.
HUANG Rui, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang, et al. Manufacturing semantics based 3D CAD model retrieval method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 1177-1185.
- 作者简介: 常智勇(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为网络 CAD、CAGD、数字化制造。
E-mail: changzy@nwpu.edu.cn

第 7 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

混合润滑状态下表面织构的建模和设计研究

作者: 张辉

毕业学校: 西安交通大学

指导教师: 董光能 Meng HUA K S CHIN

结构化技术指的是在微纳米尺度下, 通过物理或化学方法在机械滑动支承表面加工凹坑、沟槽或凸起结构。近二十年来的研究表明, 结构化表面可以显著改善机械配副的摩擦学特性, 因此工程中得到了广泛应用。然而, 现行的结构设计方法往往基于试错法或经验。对于结构设计准则, 特别是在混合润滑状态下织构设计准则相当缺失。相关文献中几乎找不到公认的织构设计准则。因此, 本文旨在建立计算凹形织构在混合润滑状态下摩擦学特性的数学模型, 进而研究织构非规则形状和排布对其摩擦学特性的影响。

通过用平均流量雷诺方程和 K-E 弹性接触模型分别计算凹形结构化表面的流体动压作用和微凸体接触状态, 由此建立织构混合润滑模型。并通过实验验证了该模型的有效性。利用该混合润滑模型计算圆坑织构的摩擦系数, 得到了相应的斯特利贝克 (Stribeck) 曲线。计算结果证明了凹形结构化表面具有减小摩擦和磨损的作用。织构产生的流体动压效应, 有助于增加油膜厚度, 从而减少微凸体的接触, 这是结构化表面减摩作用的主要机理。研究通过对比圆形、正方形、三角形织构在几种不同滑动方向上的摩擦学特性, 发现三角形织构在某个滑动方向下具有最小的摩擦系数。研究还探讨了圆坑织构的几何参数如直径、深度、间距等的影响, 从而得到了在某特定工况下一系列较优的织构参数。此外, 本文还对滑移边界条件下雷诺方程进行了改进, 强调了滑移长度随剪切率线性变化的函数关系。通过该边界滑移模型, 计算了滑移表面对径向滑动轴承摩擦学性能的影响。

以获得优良的表面摩擦学性能为目标, 利用遗传算法分别在单方向运动和往复运动条件下对凹形织构的不规则形状进行了优化。得到了几种典型的织构形状, 如: 子弹形和鱼形织构适于单方向运动, 椭圆形和梭形织构适于往复运动。这些优化得到的织构形状具有优于普通圆形织构的摩擦学特性。通过对油膜流体动压云图的分析, 证明了优化得到的织构形状可以产生更高的流体动压力, 这是它们具有更好摩擦学特性的主要机理。通过实验进一步验证了相对于普通圆形织构, 优化得到的织构形状具有更低的摩擦系数, 并且该优势在高速低载条件下更为显著。

通过旋转运动和往复运动销盘实验得到具有五种布拉维点阵排布结构化表面的摩擦系数, 从而研究织构排布对摩擦学特性的影响。旋转运动条件下, 六方织构排布具有最小摩擦系数。往复运动条件下, 斜方织构排布在低载高频工况下具有最低摩擦系数。此外实验表明, 旋转对称阶数和垂直于运动方向上的织构比面积可用于描述织构排布在旋转运动和往复运动中的作用。通过对这两个参数和不同织构排布的摩擦系数进一步对比分析, 在某种程度上解释了实验结果中可能存在的机理。

本文在织构建模和设计研究中有一定的突破, 提出了织构几何尺寸、形状、排布等相应的设计理论和方法。这为织构在机械摩擦副上的设计和应用, 提供了更为全面的理论支持。