

PCD 车刀智能选择研究

张宇,沈春根,高宗飞,马殿文

江苏大学

摘要: 以 Al7075-T6 为加工对象,以切削力、表面粗糙度和加工效率为优选目标,对 PCD 车刀切削过程中刀具智能选择进行研究。基于 MySQL 8.0 建立刀具智能选择平台数据库结构,确定 PCD 刀具优选目标,建立刀具优选模型和约束条件处理,完成 PCD 车刀车削 Al7075-T6 智能选刀平台的界面开发,并介绍了智能选刀过程与结果的应用实例。

关键词: PCD 车刀;数据库;优选目标;智能选刀

中图分类号: TG712;TH164

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.04.011

Research on Intelligent Selection of PCD Turning Tool

Zhang Yu, Shen Chungen, Gao Zongfei, Ma Dianwen

Abstract: Taking Al7075-T6 as the processing object, and taking cutting force, surface roughness, and processing efficiency as the preferred targets, the intelligent selection of tools in the cutting process with PCD turning tools is studied. Based on MySQL 8.0, the database structure of the intelligent tool selection platform is established, the PCD tool selection target is determined and the tool selection model and constraint conditions are established. Finally, the interface development of the PCD turning tool Al7075-T6 intelligent tool selection platform is completed and the application examples of intelligence tool selection process and results are introduced.

Keywords: PCD turning tool; database; optimization target; intelligent tool selection

1 引言

随着航空航天技术以及汽车制造技术革新的脚步加快,对重要零部件的精度和质量的要求也逐渐提高,超硬刀具在现代制造加工中的使用比例越来越大。然而在 PCD 刀具实际切削加工中,大多数工程人员缺乏完善的理论知识体系,加工所选的刀具参数往往是依据长时间积累的经验,具有很强的主观性,不能很好地保证零件的加工质量。

为实现根据用户实际加工工况,为用户推荐合适的刀具选择方案,国外知名刀具生产商陆续推出智能选刀软件,提高了制造加工的精度、质量与效率,而国内关于智能选刀的研究相对落后很多^[1]。因此,为了实现我国高端制造赶超国外的目标,推动国内制造业的效率、质量以及竞争力的提高,同时也为我国工具制造企业提供产品开发所需应用数据支持,有必要对刀具的智能选择进行研究。

2 建立切削关系数据库

建立加工关系数据库,有利于改善切削加工工作的管理,使管理更系统、规范和智能,提高加工制

造企业的加工管理效率^[2]。建立 PCD 车刀车削加工关系数据库也是 PCD 车刀优选系统开发的基础,要求该数据库查询速度快、操作界面友好以及与选刀平台具有良好的兼容性。

2.1 关系数据库

关系数据库一般是由逻辑模式、外模式以及内模式三种模式组成数据库系统的结构^[3]。逻辑模式的主要作用是对数据库中的数据之间的逻辑关系以及数据类型与联系进行详细描述,且对数据的安全性和完整性进行了定义,用户既可以通过外模式观察数据之间的逻辑关联与数据观点,也可以对数据进行编辑或者对数据进行解释说明;内模式的主要功能是定义数据的物理组织方式和所在存储空间的大小,并将数据保存在存储介质,同时记住查询数据的路径,方便用户查询;关系数据库系统一般具有数据结构化、数据易扩充、数据独立性强、数据的共享程度高以及管理统一等优点,用户可快速理解关系数据库的结构和模型含义,故被广泛使用^[4]。

本系统基于 MySQL 8.0 软件建立 PCD 车刀切削加工关系数据库。MySQL 8.0 是基于 Windows 环境开发的数据库编译工具,具有查询快、工具完整丰富、开发界面友好等优点,且兼容性良好^[5],很大程

度上满足了开发者在计算机上完成数据库应用开发的需求。

2.2 设计车削关系数据库结构

车削关系数据库由多个数据分库组成,主要分为以下几种:由车削参数(进给量、切削深度、切削速度)等组成的车削加工数据分库;由刀具材料、几何参数、加工用途(铣刀和车刀等)等组成的刀具数据分库;由工件外形、工件材料、加工特征类型(圆柱面、圆柱端面 and 矩形沟槽等)、工艺类型(粗加工、半精加工以及精加工等)等组成的工件数据分库;还有用户管理、数据库管理等数据分库。PCD 刀具车削超硬铝合金智能选刀平台数据库结构图如图 1 所示。

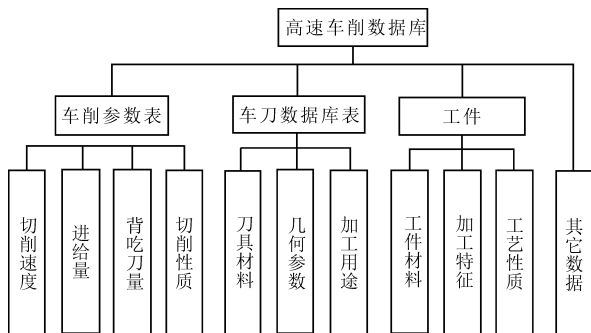


图 1 智能选刀平台数据库结构

2.3 车削关系数据库 E-R 实体联系模型

设计关系型数据库的关键在于将各概念结构与其子数据库进行关联。一般采用 E-R(实体-联系模型)图来表示它们之间的关联。E-R 图可以将整个数据库系统中的各种联系表示出来,其中包括实体之间的联系(如工件特征与加工方法)、实体与属性的联系(如工件特征与精度特征)等^[6]。

E-R 模型不能用来定义或编写数据,只用于描述各种数据之间的关联方式,因此,确切地说 E-R 模型是一种用来表达数据概念的模型。E-R 模型可以将现实的各种数据快捷转换成抽象的数据模型,并建立各数据之间联系,因此也被称为将现实中各种数据转换成抽象数据模型的桥梁。

E-R 图中,通常使用特定的图形框来表示不同的含义。在工件与刀具搭配的 E-R 图中,矩形框来表示实体,如工件特征、加工方法等;使用菱形框来表示两个实体之间的关联,如工件特征与加工方法之间的联系为选择;使用椭圆框表示实体的属性,如工件特征属性:材料特征、精度特征等;使用短线来表示实体与属性、实体与实体之间的关联。图 2 为切削加工的 E-R 图。

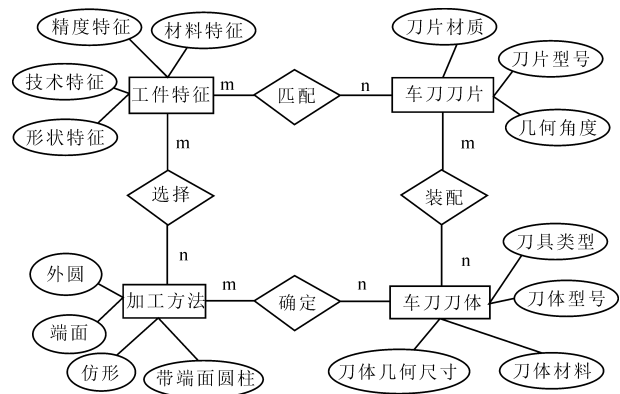


图 2 切削加工 E-R 图

3 智能选择平台的方案

智能选刀平台总体方案设计是刀具智能选择的基础,可以明确 PCD 车刀智能选刀平台的功能实现方式以及开发任务,从整体上对智能选刀平台的开发任务、功能实现方式以及所需要的相关知识储备进行考虑。

3.1 PCD 车刀平台功能设计

PCD 车刀智能选择平台可在工件特征分析的基础上快速选择合适的刀具,刀具选择平台可以根据工件材料、加工特征和加工需求(加工方式、加工要求等)等信息推荐合适的切削参数和合适的切削刀具;该平台还具有查询刀具的详细信息等功能。PCD 刀具选择平台的功能见图 3。

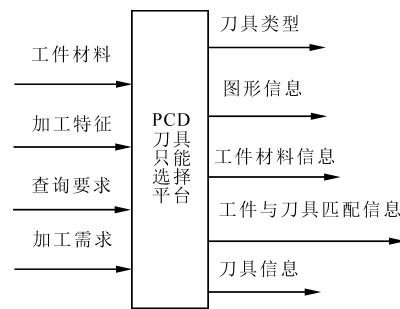


图 3 智能选刀平台功能

3.2 选刀平台需要的开发任务

智能选刀平台的开发任务包括用户操作使用的界面设计、提取工件的加工特征和加工需求以及确定优选目标等。

(1) 平台界面设计

本着方便用户使用、降低对用户专业知识储备要求的原则进行选刀平台的界面设计开发。设计平台界面时,通过设置图形、表格、文本框以及按钮等来实现简洁大方的交互界面,用户通过平台界面上的提示信息来实现智能选刀平台的运行,从而满足

用户的需求。

(2) 数据库的建立

数据库是开发刀具智能选择平台的基础,使用关系型数据库完成本刀具智能选择平台中的数据库制作,其数据库包括:刀具信息库、切削数据库、加工方法库以及工件材料库等,数据库不仅是实现刀具优选的基础,也方便用户进行查询。

(3) 提取加工特征

实现 PCD 车刀智能选择的关键在于平台能够准确识别工件的加工特征,并根据识别的加工特征结合加工需求来完成刀具优选,其中加工特征主要为待加工工件的材料、形状以及尺寸特征,加工需求包括加工方式、加工要求等。

(4) 优选目标定制

PCD 刀具车削 Al7075-T6 超硬铝合金时,用户所追求的目标可能不一样,使其对优选结果的选择也不一样。比如,用户对切削效率要求更高时,要在条件允许的情况下尽量选用较大的进给量和切削速度。确定刀具优选目标并建立优选目标函数是搭建智能选刀平台的关键技术,以提高车削加工效率、降低切削力以及表面粗糙度为优选目标。

4 优选目标研究

确定刀具优选目标以及建立优选目标函数是搭建智能选刀平台的核心,PCD 车刀车削 Al7075-T6 超硬铝合金的刀具优选目标为:表面粗糙度、加工效率和切削力,因此选择合适的多目标优选方法可以增大智能选刀平台选刀结果的合理性。

4.1 优选目标确定

由文献[7,8]得知,切削参数(切削深度 a_p 、切削速度 v 、进给量 f)对粗糙度的影响程度十分显著。切削参数与表面粗糙度之间存在相应的关系,表面粗糙度原始目标函数为

$$Ra = C a_p^{x_F} f^{y_F} v^{z_F} \quad (1)$$

式中, C 由加工材料和切削条件决定, $C = 10^6$; x_F , y_F , z_F 分别为切削用量的指数。

使用 MATLAB 软件中的 regress() 函数,基于试验数据对表面粗糙度原始目标函数进行线性回归分析,确定将此目标函数运用于 PCD 车刀车削 Al7075-T6 超硬铝合金时的具体参数,分析结果如表 1 所示。

表 1 表面粗糙度目标函数模型回归分析结果

b	x_F	y_F	z_F	F	r^2
0.8623	0.0416	1.124	-0.0175	433.2656	0.963

PCD 车刀车削 Al7075 - T6 的表面粗糙度目标函数为

$$Ra = 7.2828 a_p^{0.0416} f^{1.124} v^{-0.0175} \quad (2)$$

通常情况下,金属切削时的材料最大去除率可以表示为

$$Q = 1000 a_p f v \quad (3)$$

PCD 车刀车削 Al7075-T6 超硬铝合金属于精加工工序,即切削过程中一次性切去所有的加工余量,故适合本文的切削效率表达式应当去掉切削深度这一变量,综上,Al7075-T6 超硬铝合金的切削效率 S 的表达式为

$$S = 1000 f v \quad (4)$$

将切削力分为切向力、径向力和轴向力,根据试验结果得知,切削加工过程中,切削参数的不同导致三向切削力在切削合力中的权重不停变化,既不存在某向切削力始终保持最大,也不存在某向切削力远超过其他两个,因此需要计算三向切削力的切削合力,而计算切削合力的原始目标函数为^[7-9]

$$F = C_F a_p^{x_F} f^{y_F} v^{z_F} \quad (5)$$

式中, C_F 由加工材料和切削条件决定; x_F , y_F , z_F 分别为切削用量的指数。

同理,基于试验数据对切削力原始目标函数进行线性回归分析,确定原始目标函数中的各参数值。此处对分析结果不再赘述,得到的切削合力的目标函数为

$$F = 101.6015 a_p^{0.7993} f^{0.5983} v^{0.0546} \quad (6)$$

综上所述,PCD 刀具车削超硬铝合金刀具优选的目标函数为

$$\begin{cases} \min f_1(X) = 7.2828 a_p^{0.0416} f^{1.124} v^{-0.0175} \\ \min f_2(X) = 1000 f v \\ \min f_3(X) = 101.6015 a_p^{0.7993} f^{0.5983} v^{0.0546} \end{cases} \quad (7)$$

4.2 约束条件处理

上述切削力与表面粗糙度优选函数由切削试验结果构建,因此,目标优选函数中切削参数的取值应该被限制在切削试验选择的范围内。

切削深度约束条件为

$$\begin{cases} a_{p\min} - a_p \leq 0 \\ a_p - a_{p\min} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

进给量约束条件为

$$\begin{cases} f_{\min} - f \leq 0 \\ f - f_{\min} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

切削速度约束条件为

$$\begin{cases} v_{\min} - v \leq 0 \\ v - v_{\min} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

因此,PCD 车刀车削 Al7075-T6 超硬铝合金多目标优选模型的约束条件为

$$\begin{cases} 0.05\text{mm} \leq a_p \leq 0.2\text{mm} \\ 0.025\text{mm/r} \leq f \leq 0.1\text{mm/r} \\ 300\text{m/min} \leq v \leq 1200\text{m/min} \end{cases} \quad (11)$$

4.3 多目标优选方法

本次选择的目的是提高切削加工效率、降低工件表面粗糙度和降低切削加工过程中的切削力。对多目标优选问题进行求解的常用方式有以下两种^[7]。

(1) 偏好法

偏好法为对各优选目标的重要性进行人为区分,通过权重的分配来区别各优选目标的重要性,将所有权重分配完后获得一个对各优选目标进行综合的解。该方法的核心思想为将复杂问题简单化,多目标优选通过权重分配后转化成单目标优化,降低了计算的复杂性。

由于使用偏好法解决多目标优选问题时,操作简单,计算效率高,在解决多目标优选问题上被大规模运用,但该方法的权重分配受人为因素的干扰,所以计算结果也受到影响。常用的偏好方法有:理想点法、主要目标函数法以及线性加权法等。

(2) 产生式法

解决多目标优选问题的过程中,往往不存在每个目标同时都为最优解,各目标之间或多或少存在冲突。求出来的解中,可能对其中单个目标是最优的解,但从其他目标的角度来看并不一定为最优解。这些在某个目标上的最优解称为 Pareto 最优解,该方法特点是在优化某个目标的同时往往要牺牲其他的目标。

通过产生式法得出的结果为一个数据集合,这个集合称为 Pareto 解集,用户可以根据实际需要 Pareto 解集中选择适合自己的解。目前,使用产生式方法解决多目标优选问题大多是通过智能优选算法来完成目标优化,常用的优选算法包括粒子群算法、模拟退火算法和遗传算法等。

上述两种方法中,偏好法受用户主观意志影响较大,因此本研究采用基于遗传算法的产生式方法对多目标进行优选。将基于遗传算法计算所得 Pareto 解集保存到智能选刀平台的后台数据库中,再根据优选目标函数进行计算得出的 Pareto 解集如表 2 所示。选刀平台根据输入的信息自动从 Pareto 解集中自动匹配最优解,并显示在选刀结果窗口中。

表 2 Pareto 解集

编号	背吃刀量 a_p (mm)	进给量 f (mm/r)	切削速度 v (m/min)	表面粗糙度 Ra (μm)	切削效率 S (mm^2/min)	切削合力 F (N)
1	0.055	0.028	1099	0.104	-31239	1.744
2	0.063	0.026	1155	0.093	-29485	1.83
3	0.142	0.07	1140	0.3	-80023	6.402
4	0.104	0.039	1144	0.152	-44284	3.487
5	0.113	0.057	1145	0.234	-65084	4.711
6	0.149	0.076	1145	0.327	-86640	6.952
7	0.12	0.061	1127	0.255	-68919	5.161
8	0.118	0.05	1144	0.204	-57339	4.501
9	0.075	0.033	1117	0.124	-36484	2.429
10	0.099	0.047	1136	0.188	-53433	3.758
11	0.109	0.053	1127	0.218	-60176	4.378
12	0.125	0.061	1153	0.257	-70871	5.356
13	0.088	0.042	1131	0.165	-47619	3.22
14	0.143	0.071	1147	0.303	-81262	6.48
15	0.114	0.054	1142	0.219	-61159	4.574
16	0.118	0.059	1136	0.242	-66476	4.957
17	0.135	0.068	1134	0.29	-77454	6.035
18	0.102	0.049	1125	0.199	-55564	3.978
19	0.063	0.031	1155	0.114	-35334	2.039
20	0.078	0.038	1143	0.147	-43609	2.739
21	0.05	0.1	1155	0.426	-115259	3.431
22	0.05	0.026	1200	0.093	-30925	1.529
23	0.05	0.08	1200	0.332	-95854	3.009
24	0.05	0.085	1200	0.355	-101818	3.12
25	0.05	0.064	1200	0.261	-77367	2.647

5 PCD 刀具智能选择平台的开发与应用

在上述理论分析和关键技术研究的基础上,运用 JAVA 开发工具 IntelliJ IDEA 和 MySQL 8.0 后台数据库,使用 JAVA 编程语言基于 PCD 车刀车削 Al7075-T6 超硬铝合金开发 PCD 车刀智能选择及管理系统,以实际应用结果进一步论证了上述方案的可行性。用户可以通过开发的 PCD 车削 Al7075-T6 超硬铝合金的智能选刀界面实现内部匹配规则,快速得到 PCD 车刀车削 Al7075-T6 超硬铝合金时的最优参数以及最佳刀具。

5.1 平台登录及用户管理

在平台登录界面中输入用户名及密码,系统会在后台对所输入的用户名及密码进行验证,若验证成功,则直接进入平台主界面,若弹出“登录失败,密码或用户名错误”的提示信息,则表示验证错误。

5.2 刀具智能选择平台主界面

如图 4 所示,PCD 车刀车削 Al7075-T6 超硬铝合金刀具智能选择平台的主界面主要有加工特征、刀具查询、选择方案、加工方法、工件材料以及其他类型这 6 个子系统。



图4 刀具智能选择平台主界面

(1) 选择方案查询

用户通过选择方案查询系统来实现切削参数与刀具优选的功能,在选择方案查询界面输入或者选择加工类型和加工材料等信息,系统根据所填信息快速推荐出最优切削参数以及符合用户需求的加工刀具。在主界面上选择“选择方案查询”按钮,弹出刀具选择方案窗口,根据要求输入窗口中信息(见图5)。其中加工类型选择车削加工-外圆,加工工件的材料选择铝合金 Al7075-T6 超硬铝合金。



图5 刀具选择方案界面

如图6所示,在刀具选择方案界面中选择加工类型,可进入加工类型选择窗口,界面中有常用的加工类型供选择,包括车削加工、铣削加工以及镗削加工等。本文只研究车削加工,因此未对其他加工类型进行编辑,但为后续研究其它加工类型奠定了基础。在车削加工的下拉菜单中选择外圆,点击确定后,在刀具选择方案界面显示选择结果。

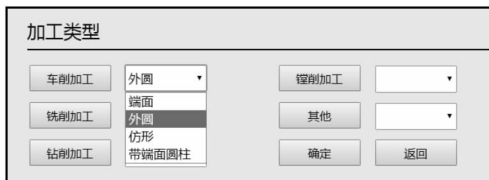


图6 加工类型选择窗口

在刀具选择方案界面中选择加工材料,进入加工工件材料窗口,如图7所示。根据提示信息选择待加工工件的材料,在下拉菜单中可以读取本平台的材料数据库中材料名称,点击确定按钮后,在刀具选择方案界面中显示选择结果。

如图8所示,在刀具选择方案界面中选择加工需求,进入加工需求界面。选择工序类型,输入工件直径以及切削参数。加工要求板块包括表面粗糙度、加工效率以及切削力三个选项,用户可以根据实

际加工的要求输入目标值。以表面粗糙度为例,输入实际要求的粗糙度值 $0.3\mu\text{m}$,点击确定按钮后,在刀具选择方案界面中加工需求按钮后面会显示已选择,表明加工需求项已完成设置。

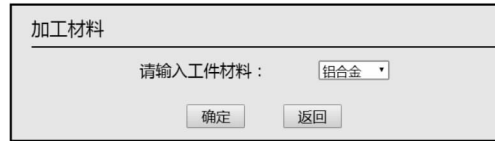


图7 工件材料选择窗口



图8 加工需求窗口

至此,已完成刀具智能选择平台的选择方案界面中的所有设置,选择获得结果按钮,平台根据所填信息自动从 Pareto 解集中选择最合适的切削参数并给出符合加工条件的刀具,选择结果如图9所示。选择结果为:使用 PCD 车刀精加工 Al7075-T6 超硬铝合金棒料的外圆时,要求表面粗糙度为 $0.3\mu\text{m}$ 的状态下,最佳切削参数分别为:切削速度 $1140\text{m}/\text{min}$,进给量 $0.07\text{mm}/\text{r}$,切削深度 0.142mm 。PCD 车刀的前角为 3.4° ,后角为 7.2° ,圆弧半径为 0.57mm 。



图9 刀具选择结果窗口

(2) 工件材料查询

在工件材料查询数据库可以查询一些常用工件材料的详细信息,该信息由用户手动储存在数据库中,当需要加入新的材料或数据库中原有材料信息需要进行改动时,用户可以随时在工件材料数据库的相应表格中对相关数据进行编辑,包括对材料进行增加、修改和删除,工件材料数据库如图10所示。

(3) 加工方法查询

在加工方法查询数据库中主要对刀具数据库中储存的加工刀具进行划分,按照刀具的作用和操作类型将加工方法分为车削加工、铣削加工、钻削加工以及镗削加工等。

加工材料查询						
材料库						
增加	修改	删除				
<input type="checkbox"/>	daihao	leibie	zubie	mingcheng	xuhao	beizhu
<input type="checkbox"/>	01-01	碳素钢	P	低碳钢	1	C : 0.05-0.25%
<input type="checkbox"/>	01-02	碳素钢	P	中碳钢	1	C : 0.25-0.55%
<input type="checkbox"/>	01-03	碳素钢	P	高碳钢	1	C : 0.55-0.8%
<input type="checkbox"/>	02-01	合金钢	P	低合金钢	2	NULL
<input type="checkbox"/>	02-02	合金钢	P	高合金钢	2	NULL
<input type="checkbox"/>	02-03	合金钢	P	淬硬钢	2	>400BHN
<input type="checkbox"/>	03-01	不锈钢	M	300系列	3	NULL
<input type="checkbox"/>	03-02	不锈钢	M	400系列	3	NULL
<input type="checkbox"/>	04-01	耐热合金钢	S	NULL	4	200-260BHN
<input type="checkbox"/>	04-02	耐热合金钢	S	NULL	4	260-350BHN
<input type="checkbox"/>	05-01	钛合金	M	NULL	5	NULL
<input type="checkbox"/>	06-01	铝合金	N	NULL	6	NULL
<input type="checkbox"/>	07-01	铜及铜合金	N	NULL	7	NULL
<input type="checkbox"/>	07-02	钢及钢合金	N	NULL	7	NULL
<input type="checkbox"/>	08-01	灰铸铁	K	NULL	8	NULL
<input type="checkbox"/>	09-01	球墨铸铁	K	NULL	9	NULL

图 10 工件材料数据库

(4) 加工特征查询

刀具智能选择平台根据待加工工件材料的特征信息完成刀具的选择,在该窗口中可以查询加工特征类型,包括内圆柱面、外圆柱面、内圆锥面、外圆锥面、端面、矩形沟槽、圆弧槽和螺纹等类型。选择某个加工类型后,在窗口右边会显示出与之相对应的特征图形,以便更加直观地了解加工特征信息。如图 11 所示,在该窗口上选择特征类型外圆时,特征图形区域会显示出外圆特征的立体图。



图 11 加工特征信息窗口

(5) 刀具查询

在智能选刀平台的刀具查询数据库中,用户可以查询数据库中所有刀具的详细信息。用户选择任一刀具,均会弹出刀具信息栏,并在刀具信息栏中给出该刀具的详细信息。

(6) 其它查询

其它类型查询包括常见机床型号、操作类型、加工环境和加工零件图等。

6 结语

(1) 建立了 PCD 智能选刀平台数据库结构,使用 E-R(实体-联系模型)图介绍了加工工件与刀具的匹配结构。建立了加工效率、表面粗糙度和切削力多目标优选模型,并完成约束条件处理,采用基

于遗传算法的产生式方法对多目标进行优选计算,基于试验结果得出 Pareto 解集。

(2) 完成 PCD 刀具车削 Al7075-T6 超硬铝合金智能选刀平台的界面开发,用户选择和输入相关信息后,平台会根据用户输入信息从后台的 Pareto 解集中选择出最佳切削参数,并给出合适的加工刀具。

(3) 完成 PCD 刀具车削 Al7075-T6 超硬铝合金智能选刀平台的界面开发,包括用户登录界面、选择方案查询、工件材料查询、加工特征查询和加工方法查询等功能。在选择方案查询中完成刀具优选工作,在选择方案界面选择或填写相关加工工况和需求,即可完成刀具选择。

参考文献

- [1] 王英杰,刘广超,许世龙. 智能刀具的发展现状[J]. 黑龙江科技信息,2017(3):36.
- [2] 林天义,严新民. 集成环境下的刀具调度管理系统[J]. 组合机床与自动化加工技术,1995(4):26-30.
- [3] 王云华. 基于特征的高速铣刀优选系统开发[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2007.
- [4] 陈龙. 高速铣削数据库共享技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.
- [5] 吕学婷. 基于 Springmvc 和 Mybatis 框架的门户网站及其内容管理系统的设计与实现[D]. 南昌:东华理工大学,2016.
- [6] 钱德成. 基于 MES 的刀具选择优化及管理系统研究与开发[D]. 无锡:江南大学,2015.
- [7] 姚焯. PCD 刀具车削超硬铝合金的切削性能及参数优化研究[D]. 镇江:江苏大学,2019.
- [8] 付秀丽. 高速切削航空铝合金变形理论及加工表面形成特征研究[D]. 济南:山东大学,2007.
- [9] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

第一作者:张宇,硕士研究生,江苏大学机械工程学院,212013 江苏省镇江市

First Author: Zhang Yu, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

通信作者:沈春根,副研究员,江苏大学机械工程学院,212013 江苏省镇江市

Corresponding Author: Shen Chungen, Associate Researcher, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China