

DOI: 10.7652/xjtuxb201602016

面向低碳制造的切削液供给系统优化研究

刘香浪, 张英杰, 李云龙, 高瑞
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统切削液粗放式的供给方式所带来的污染和浪费问题,提出了一种面向低碳制造的切削液供给系统优化方法。该方法建立了制造车间切削液循环系统的资源消耗模型,指出切削液系统的优化包括切削液供给设备的改进及切削液使用工艺的优化。在系统模型分析的基础上,研究了切削液对加工过程的影响,从切削液的润滑及冷却效果出发,提出了依据切削区域摩擦因数及温度进行切削液喷射流量、压力、距离等参数的优化实施方法。构建了面向低碳制造过程的智能切削液系统控制平台,并进行了仿真实验,结果表明:切削液的实际作用效果主要包括润滑和冷却,都与切削液在切削区域的流动情况有着密切的关系;随着润滑效果的提升,切削变形量有所减小,振动能量分布趋于均匀,切削力和温度也呈较明显的下降趋势;依据切削区域摩擦因数与温度进行切削液喷射参数调整具有一定可行性。研究内容为面向低碳制造过程的机械制造车间切削液系统优化问题提供了一条可行的实施途径。

关键词: 切削液;低碳制造;资源消耗

中图分类号: TG506 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)02-0091-07

Cutting Fluid System Optimization for Low-Carbon Oriented Manufacturing Process

LIU Xianglang, ZHANG Yingjie, LI Yunlong, GAO Rui
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A strategy of cutting fluid system optimization for low-carbon oriented manufacturing is proposed to reduce pollution and waste in the extensive supplying systems of traditional manufacturing. A resource consummation model for cutting fluid cycling system in workshop is constructed, which indicates two ways for low-carbon oriented cutting fluid system optimization, supplying equipment improvement and cutting fluid volume optimization. Then the influences of cutting fluid on machining process are analyzed. A system controlling software platform is established and some numerical simulations are carried out. It is feasible to adjust the flux volume, pressure and jetting distance of cutting fluid according to the friction coefficient and temperature in cutting zone. Good lubricating and cooling effects greatly owe to the good flow state of cutting fluid in cutting zone, the chip deformation and cutting force as well as temperature reduction and vibration energy distributes more uniformly with the reduced friction coefficient, which validates the reliability of this strategy.

Keywords: cutting fluid; low-carbon manufacturing; resource consumption

收稿日期: 2015-07-04。 作者简介: 刘香浪(1991—),男,硕士生;张英杰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375377)。

网络出版时间: 2015-11-11 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151111.1813.008.html>

切削液被广泛地应用在机械制造领域,其作用包括冷却、润滑、去屑(清洗)、防锈等。冷却和润滑功能作为切削液的主要功能,大大延长了刀具的寿命,提高了加工质量和加工效率。作为机械制造过程中的辅助工艺,为了满足加工质量需求,传统切削液供给方式采用了粗放式的浇注方法,对其供给过程的优化没有足够重视,因而存在着较严重的资源浪费和环境污染。有研究表明,在大型机加工车间且有较高精度要求的条件下,切削液相关成本占总制造成本的7%~17%^[1]。虽然切削液相关成本如此之高,但是从已有研究成果来看,切削液相关工艺改进类的文献数量远远少于切削用量优化、刀具磨损以及加工效率优化等其他相关研究。面对全球可利用资源的枯竭性威胁和环境的日益恶化,节约能源、提高资源的利用率已经成了不可忽视的问题。在低碳制造概念^[2-3]的驱动下,研究者们逐渐转向研究新型的切削润滑方法,近年来提出了干切削、微量润滑切削(MQL)、低温切削等新型切削润滑技术。

干切削技术^[4]是基于刀具及其涂层材料的发展而被提出的,它不使用切削液,从而避免了切削液带来的系列问题,但其当前所能适应的加工工艺范围极其有限。MQL技术^[5-6]将微量切削液以雾状喷射至切削接触区域,具有较好的润滑效果,但存在冷却效果不足的缺陷,而且产生超高空气悬浮颗粒和呼吸性粉尘,对工人健康造成了一定威胁。此外,还有其他新型的冷却润滑及相关改进技术,如低温切削、高压冷却、内冷技术、低温MQL技术等均在实验室研究阶段,还有较多技术问题有待解决^[7-9]。

调查显示,目前国内超过70%的切削液用户仍采用传统浇注式喷射方法且取得了良好的加工效果,但存在着浪费严重及排放处理困难的问题。面对这一现状,目前国内外对传统浇注方式提出改进建议的文献并不多见^[10]。在传统切削液供给方式存在较多缺陷的情况下,当前新型切削润滑技术并没能被广泛推广包含着多方面原因,而这些技术本身所存在的缺陷为主要因素。从近些年来的研究文献分布状况来看,研究者们将研究重点放在了提出及改进新型切削润滑技术上,然而并没有提出统一的技术评价标准^[11],这导致了工程人员在面对多种新型冷却润滑方式的选择时存在随意性,除此之外,工程人员对整个低碳制造系统中切削液所连带的经济及环境成本问题缺乏足够认识。

本文从新的角度认识切削液供给技术的优化方向,提出面向低碳制造过程的切削液供给系统优化

方法,从整个切削液循环系统消耗模型和切削液喷射工艺优化方法两个方面探讨了切削液供给过程优化的实施方法,最终开发出面向智能化和低碳化制造车间的切削液循环系统控制平台。

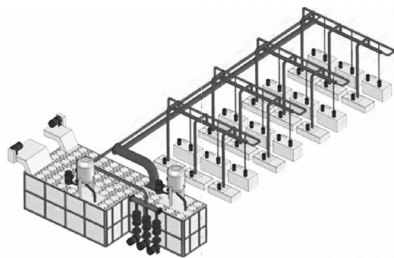
1 切削液循环系统的资源消耗模型

在机械加工行业中的大规模(如汽车、飞机制造业等)生产条件下,多采用集中切削液循环系统。制造系统中整条生产线上的几十、上百台机床的供液系统串联在一起,切削液由泵统一输送,加工后的切削液又统一流回储液槽进行集中过滤循环处理。相对于传统单机供液方式,集中切削液循环供给系统具有经济及能耗成本低、环境污染少、维护管理方便、切削液质量可靠等优势,是未来机械制造车间中切削液供给方式的发展趋势。

集中切削液循环处理系统主要包括集中过滤系统、回流系统、供液系统和辅助系统等组成部分。系统所实现的主要任务包括:切削液的日常维护、切削液过滤循环处理、废液排放处理、向加工单元泵送清洁切削液及其他辅助任务。其中,切削液回收循环处理环节承担着对回收切削液多级过滤的任务,复杂的过滤系统也是整个切削液系统中使用及维护成本最大的部分。过滤机组实物图及循环处理系统示意图如图1所示。



(a) 过滤机组实物图



(b) 切削液循环系统示意图

图1 切削液循环系统

过滤系统是切削液循环系统的核心环节。通常用于描述过滤系统的指标,除了包括过滤精度等技术指标外,还经常使用切削液循环周转率(R)来衡

量系统在工作过程中的工作效率。切削液循环周转率定义为单位时间内过滤系统中的切削液循环次数,表达式如下

$$R = \frac{q}{V} \quad (1)$$

式中: q 表示单位时间过滤系统的切削液吞吐量, m^3/h ; V 表示过滤系统容量, m^3 。

通常 q 大于单位时间内加工单元的实际切削液使用总量,这是由于存在切削液的黏附、蒸发、扩散等现象,供给加工单元的切削液使用量(q_m)并没有被全部回收。若用 k_1 表示加工单元切削液回流量占总供给量的比值,该值可依据经验数据获得。回收切削液流入循环系统进行过滤操作,假定 k_2 为可再使用切削液的比例,该值为过滤系统的清洁率,其大小反映了过滤系统的回收能力。建立图2所示数学模型来反映切削液的回收过程,依据该模型可计算出单位时间内过滤系统的吞吐量为

$$q = (1 + k_1 - k_1 k_2) q_m = k q_m \quad (2)$$

式中: k 为杠杆系数,反映车间或生产线的切削液循环回收能力,值大于1, k 越小表明回收能力越强,当取极限值1时意味着所有已使用切削液可完全回收利用。

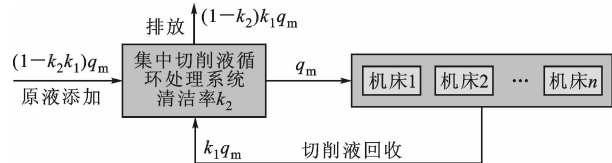


图2 切削液循环过程数学模型

若用 K 表示每循环一次切削液系统的资源(如电能)消耗成本, C_0 表示供液系统的基本维护成本,则集中切削液循环系统单位时间内的总成本

$$C = C_0 + KR = C_0 + Kk \frac{q_m}{V} \quad (3)$$

模型中的成本 C 既可表示经济成本,也可表示环境成本(碳排放、环境污染)。从式(3)可以看出,降低切削液成本的主要手段包括改进切削液循环设备(降低 K)和减少切削液的使用量(减小 q_m)。其中,切削液循环设备的改进通常侧重于动力设备的功率优化,而切削液使用过程的改进则为机械制造工艺优化的研究内容。切削液循环设备的能耗结构优化长期被研究者关注,其往往涉及较多的技术难题,改进成本大。相比而言,从切削液喷射工艺优化方面的改进实现成本低,且具有较大的优化空间。通过对切削液使用工艺的改进,能减小对高功耗循环设备的依赖,从而尽可能大程度地降低切削液辅

助系统带来的多种负面影响。此外,针对现有的传统机加工车间切削液使用中大量浪费的现状,设法减少切削液浪费可视为现有车间低碳化和低成本化改造的主要方式。新型切削润滑技术,包括干切削、MQL 技术等也都着力于减少切削液的浪费和提高其使用效率。

2 切削液喷射工艺的优化方法

切削液喷射过程是切削液循环系统的最终作用环节,喷射工艺中切削液的使用效率直接决定了切削液的使用量。本节从切削液的主要作用,即润滑和冷却两个方面出发,通过分析切削液对切削过程变量的影响来判断切削液的作用效果,从而提出切削液喷射工艺的优化方案,为提高切削液使用效率提供依据。

2.1 切削液对切削过程的影响分析

切削液的润滑作用表现为降低切削区域的接触面摩擦因数。以切屑与前刀面的摩擦接触区域为例,切削液主要通过毛细管现象泵吸进入接触区域的微小的缝隙中,使摩擦条件由干摩擦转变为边界润滑状态。用 μ 表示切屑与前刀面接触区域的平均摩擦因数,使用不同的切削液或在同一种切削液的不同喷射参数下, μ 值可从干摩擦条件下的 0.9 下降至 0.5^[12]。润滑作用对切削过程最直接的影响便是改变了切屑与前刀面的摩擦因数,从而影响切削力、热、变形及切削振动信号等切削过程变量。通常随着 μ 的减小,切削变形降低,切削力减小,切削温度降低,切削振动总能量减小且趋于均匀^[11],并最终提高刀具的寿命以及工件表面质量。切削过程变量随切削液喷射工艺参数的变化规律为切削液喷射参数优化提供了依据。

切削液的冷却作用表现为低温切削液流动在高温切削区域表面,从而带走切削区域热量。在喷射过程中,切削液的温度、流量、压力、喷射角度及固有物理属性都直接或间接影响其换热性能。假设切削液在切削区域表面的流动主要表现为层流,依据普朗特层流理论,通常在普朗特数 $Pr > 1$ 的条件下,温度边界层小于速度边界层,而只有温度边界层内部的切削液有温度梯度,即具有冷却作用,速度边界层内的切削液对底层切削液起推动流动作用,因此处在速度边界层外的切削液被浪费掉。因此,从切削液的冷却作用效果来看,切削液的使用量并非越多越好。这一分析解释了传统粗放式切削液喷射方法存在严重浪费的根本原因。

此外,由于发热区域处在刀尖位置附近并包含在切削区域内部,切削液并不能直接到达并实现冷却,因此切削液喷射在切削区域的位置及角度会影响热源热量的传递方向。例如,若采取一定措施使切削液主要被喷射在前刀面,使前刀面的温度远低于切屑及工件,便引导热源中更多的热量流向刀具,从而增加刀具的热负荷并影响刀具寿命。因此,在分析切削液对切削区域的冷却效果时,不能仅以前刀面温度为依据,还需考虑其对切削热在整个区域的分配的影响。

2.2 切削液作用效果仿真实验

切屑与前刀面的摩擦因数反映了切削液的润滑效果,因此切削液润滑效果仿真实验可以用于探索前刀面-切屑之间的摩擦因数与切削过程变量的关系。仿真条件如下:刀具和工件材料分别选择高速钢和45钢,仿真环境为基于Deform-2D的有限元平台。进行正交切削动态模拟,在不同 μ 的条件下,输出切削力、温度、变形及振动信号的变化情况。图3为在不同摩擦因数条件下切削变形相对稳定后的切屑形态截图,从中可以看出,随着摩擦因数的降低,切削变形量有所减小。通过多层小波包分解及能量计算,图4展示了切削振动信号在不同频段上的能量分布随摩擦因数的变动情况,从中可以看出,

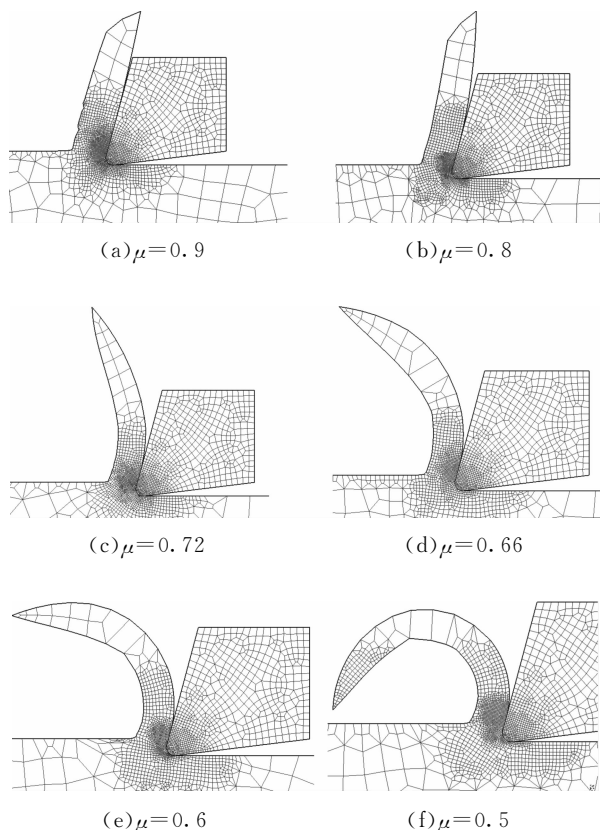


图3 切削变形随摩擦因数的变化

随着摩擦因数的降低,振动能量分布趋于均匀。此外,切削力和切削温度也随着润滑效果的提升而呈较明显的下降趋势。

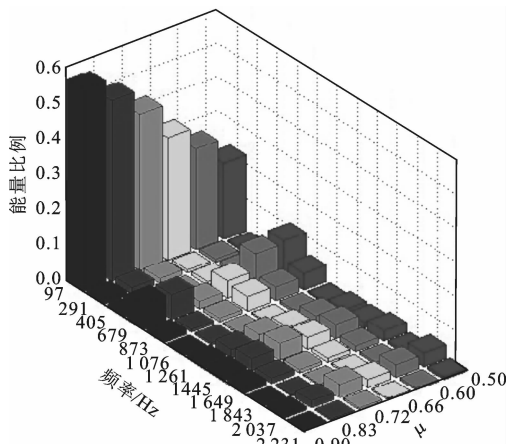
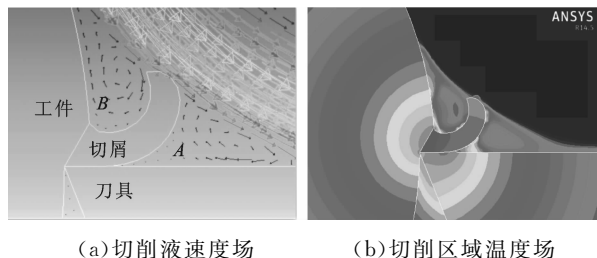


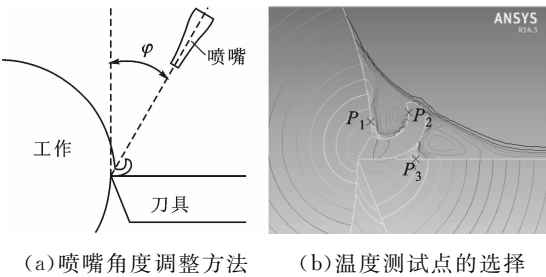
图4 背向振动信号能量分布随摩擦因数的变化

切削液冷却效果仿真实验用于探索切削液对切削区域温度分布的影响。仿真条件如下:在Fluent软件平台上,假定切削接触区域无相对运动,在剪切区域和摩擦区域加恒定热源。仿真结果显示,切削液流动场分布被切屑在空间上分为两个部分,即切屑与前刀面所夹空间A以及切屑与未加工表面所夹空间B,如图5a所示,在A和B区域存在旋涡现象。图5b显示温度场也形成类似流场的旋涡状分布,依此可以看出,切削区域表面温度分布与切削液流场分布有着密切关系。为探索切削液对切削热在工件、切屑及刀具上的分配的影响,改变切削液的喷射角度用以研究切削液对切削热分配的影响关系。切削热的分配通过在工件、切屑、刀具表面上各选取一个温度测试点(P_1, P_2, P_3)来反映。图6a、6b分别反映喷嘴角度调整方法和温度测试点的选取方法,测试结果如图7所示。随着喷嘴轴线与前刀面法线夹角的增大,刀具前刀面 P_3 点的温度逐渐降低,而工件表面 P_1 点的温度稍有上升。这一现象表明,当A区域的换热条件有所提高时,更有利于其对前刀面热量的疏导。



(a) 切削液速度场 (b) 切削区域温度场

图5 切削液冷却过程仿真结果



(a)喷嘴角度调整方法 (b)温度测试点的选择

图 6 仿真实验方案

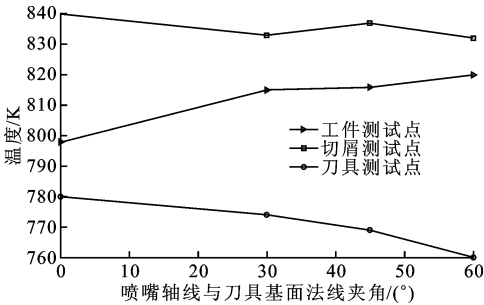


图 7 测试点温度随喷嘴角度调整的变化

通过仿真分析可知,切削液的实际作用效果主要包括润滑和冷却,与切削液在切削区域的流动情况有着密切的关系。因此,切削液的喷射参数如压力、流量、喷射方位等与切削液的实际作用效果及利用率产生了重要的关联。通过切削液的作用效果及使用效率指标进行切削液供给参数优化调整是提高切削液使用率、降低浪费的有效途径。

2.3 切削液喷射工艺优化的实现方案

切削液的润滑效果指标可以用摩擦因数 μ 来表示,而切削液的冷却性能指标则可以选择目标点的温度与切削区域平均温度的比值来表示,其中切削区域平均温度可以通过切削温度经验公式获得。

理论分析及仿真实验指出,切削液的润滑效果及冷却效果对切削过程的影响可以从切削过程变量(力、温度、振动、变形等)反映出来。因此,可以通过测量切削过程变量来判断切削液的作用效果,进而指导切削液的选择、供给方式及参数优化。在实际加工过程中,切削液的供给参数优化过程见图 8,使用液压阀门及机械机构对切削液流量、压力、喷嘴喷射方位进行调整,以实现切削液供给参数的控制,在切削加工中监测切削过程变量信息并进行切削液冷却和润滑指标计算。通过不断调整切削液供给参数并计算其冷却润滑效果指标,最终找出特定冷却及润滑效果边界条件下的最低切削液使用量和相应供给参数。

在上述优化过程中,切削液的作用效果指标需

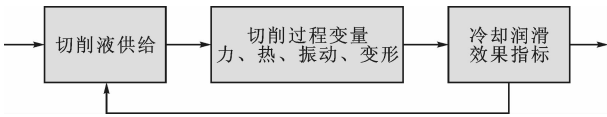


图 8 切削液供给参数优化过程示意图

要通过切削过程变量拟合获得。这一拟合过程对切削液作用效果评价至关重要,其必须同时考虑到多个切削过程变量之间的内部联系以及它们与切削液冷却润滑效果指标之间的联系。此外,拟合过程需要尽可能滤除传感器所获得数据存在的随机误差。现代智能计算方法,如 BP 网络算法、支持向量机等,具有较强的自学习能力、非线性拟合能力和稳定性,可用在切削液作用效果的拟合过程中。表 1 所示数据展示了 BP 网络算法对于拟合 μ 值的可靠性。

表 1 BP 神经网络方法预测的 μ 值与真值的对比

输入参数				μ		预测相对误差/%
主切削力/N	切削变形系数	切削温度/℃	振动能量分布方差	真值	预测值	
766.15	2.422 7	354	0.776 3	0.90	0.899 5	0.54
708.50	2.286 7	334	0.736 4	0.83	0.831 1	0.13
645.20	1.979 7	321	0.652 2	0.72	0.716 8	0.44
622.23	1.917 3	317	0.591 2	0.66	0.659 5	0.07
603.30	1.818 7	313	0.573 8	0.60	0.606 1	1.01
578.04	1.746 7	308	0.516 8	0.50	0.496 9	0.62

在实际加工中,切削过程变量通常还会受到加工材料、刀具参数、切削用量等多方面因素的影响,因此在切削液作用性能拟合的过程中可以选取较重要的影响因素作为输入参数一并参与计算。需要指出的是,在选取切削液的作用效果指标时通常还会考虑其使用条件,在低速加工及精加工条件下通常以润滑作用为主,此时可选用润滑性能指标作为切削液供给参数调整依据,高速加工和粗加工条件下则与之相反。刀具磨损、加工精度以及工件表面质量通常作为选取及确定切削液作用效果指标的约束条件。

3 切削液循环系统控制平台

3.1 切削液系统碳排放量计算

低碳制造可被描述为在产品生产过程中释放尽可能少的二氧化碳的制造过程^[3]。碳排放量是评价系统低碳化程度的重要指标。切削液辅助系统的碳排放总量划分为切削液资源消耗(S)、循环系统电能消耗(E)以及切削液浪费(W)3个部分的相关碳

排放,具体表达为

$$Q_c = f(E,S,W) \tag{4}$$

式中: Q_c 代表碳排放总量。在计算过程中,碳排放总量等于各个部分的资源消耗形式乘以相应的碳排放转换系数再求和。

通过本文前两节的研究可知,依据切削液的作用效果指标进行切削液喷射工艺优化直接降低了切削液使用量,在间接上降低了切削液辅助系统电能消耗,从而能够有效降低切削液辅助系统的碳排放总量。

3.2 切削液循环系统智能控制平台

作为制造车间中重要的辅助系统,切削液循环系统可以被看作是与机床设备并行运行的相对独立系统,其负责切削液的供给、喷射、回收、过滤、排放等循环程序。在智能化及低碳化制造体系下,切削液循环系统的碳排放及运行状况也需要同生产线上的机床群体一样被考虑。因此,在切削液循环系统模型和喷射工艺优化模型的基础上,有必要开发面向低碳制造车间的切削液系统智能控制平台。

依据切削液的冷却润滑效果指标指导切削液的供给方式,为改进切削液的使用工艺提供了重要的参考依据。然而,通过实时监测切削液喷射过程中切削过程变量来拟合切削液作用效果指标并不容易实现,因此建立切削液使用经验数据库成为了必要。该数据库在一定量切削试验的基础上建立,能够指导切削液使用的工艺过程,提高其使用效率。

通过上述分析可知,系统控制平台在完成对切削液设备及切削液状态监测的基础上,还需包含切削液使用数据库以及碳排放指标运算模块,以实现切削液使用过程的指导、评价和优化。依此设计智能切削液循环系统控制平台,其功能模块如图 9 所示,包含:设备运行及切削液状态监测模块,其保证循环设备的正常运行及切削液浓度、pH 值等指

标合格;循环系统指标运算及优化模块,用于对系统的过滤精度、回收能力、周转率、碳排放量等指标的计算,并在其基础上实现优化配置;切削液喷射控制与指导模块(系统界面见图 10),包含切削液使用数据库并能指导切削液喷射工艺参数的确定,该模块依据切削工艺条件设定切削液喷射工艺参数以及供给泵工作参数,促进了切削液供给过程的智能化转变。

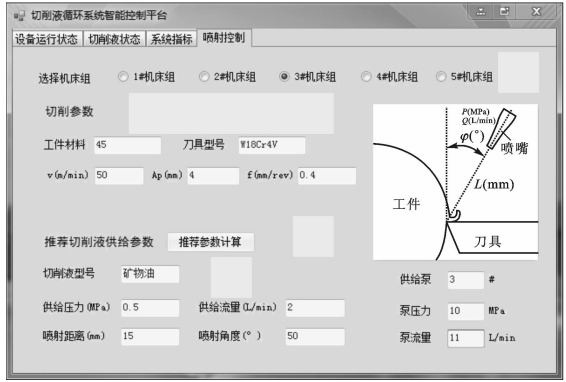


图 10 切削液喷射控制模块界面

4 结 论

本文提出了一种面向低碳化和智能化的切削液循环系统优化方法,从切削液循环系统模型和喷射工艺优化两个方面进行了研究,主要研究结论如下。

(1)面向低碳制造过程的切削液系统优化改进的目标主要包括切削液相关设备改进和切削液使用工艺的优化。

(2)依据切削液的作用效果指标(如切削区域摩擦因数、温度)进行切削液供给参数的调整及优化是切削液使用工艺优化的可行途径。

(3)设计了面向低碳制造的切削液循环系统智能控制平台。本文研究内容对传统切削液供给系统的改进以及新型切削润滑技术的推广有着重要的指导意义。

参考文献:

[1] BRINKSMEIER E, WALTER A, JANSSEN R, et al. Aspects of cooling lubrication reduction in machining advanced materials [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part B Journal of Engineering Manufacture, 1999, 213(8): 769-778.
[2] 刘飞,王秋莲. 机械制造系统能效评价的特点、研究现状及发展趋势 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1550-1556.

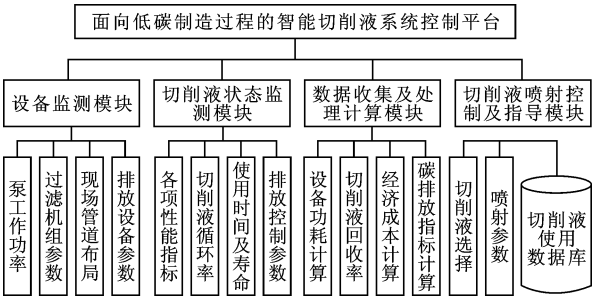


图 9 面向低碳制造过程的智能切削液系统控制平台功能模块

- LIU Fei, WANG Qiulian. Energy efficiency assessment of mechanical manufacturing system: characteristics, state-of-the-art and future trends [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(11): 1550-1556.
- [3] 刘献礼, 陈涛. 机械制造中的低碳制造理论与技术 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(1): 1-8.
- LIU Xianli, CHEN Tao. Theory and technology of low-carbon manufacturing in machinery manufacturing [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(1): 1-8.
- [4] WANG Z G, RAHMAN M, WONG Y S, et al. Study on orthogonal turning of titanium alloys with different coolant supply strategies [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(7/8): 621-632.
- [5] LAWAL S A, CHOUDHURY I A, NUKMAN Y. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1): 1-12.
- [6] SHARMA V S, DOGRA M, SURI N. Cooling techniques for improved productivity in turning [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(6): 435-453.
- [7] LIU N M, CHIANG K T, HUNG C M. Modeling and analyzing the effects of air-cooled turning on the machinability of Ti-6Al-4V titanium alloy using the cold air gun coolant system [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5/6/7/8): 1053-1066.
- [8] SHOKRANI A, DHOKIA V, NEWMAN S T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 57(2): 83-101.
- [9] YILDIZ Y, NALBANT M. A review of cryogenic cooling in machining processes [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(9): 947-964.
- [10] ZHONG Weiwu, ZHAO Dongbiao, WANG Xi. A comparative study on dry milling and little quantity lubricant milling based on vibration signals [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(12): 1057-1064.
- [11] YAN Sijie, ZHU Dahu, ZHUANG Kejia, et al. Modeling and analysis of coated tool temperature variation

in dry milling of Inconel 718 turbine blade considering flank wear effect [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 2985-3001.

- [12] 陈日曜. 金属切削原理 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2002: 137-142.

[本刊相关文献链接]

- 杜昆, 李军, 晏鑫. 槽缝射流对静叶端壁冷却性能的影响. 2015, 49(1): 21-26. [doi:10.7652/xjtuxb201501004]
- 廖高良, 王新军, 李军. 带槽双射流气膜冷却数值研究. 2014, 48(3): 34-38+127. [doi:10.7652/xjtuxb201403007]
- 章云, 梅雪松, 胡振邦, 等. 注液式高速切削主轴动平衡装置设计及其性能研究. 2013, 47(3): 13-17. [doi:10.7652/xjtuxb201303003]
- 王建录, 成冰, 赵万华, 等. 汽轮机长叶片型面双刀加工刀位轨迹优化算法. 2013, 47(9): 65-71. [doi:10.7652/xjtuxb201309011]
- 刘丽娟, 吕明, 武文革. Ti-6Al-4V 合金的修正本构模型及其有限元仿真. 2013, 47(7): 73-79. [doi:10.7652/xjtuxb201307014]
- 徐亮, 税琳棋, 高建民, 等. 透平叶片双工质冷却流量和流向的优化配置. 2012, 46(5): 7-12. [doi:10.7652/xjtuxb201205002]
- 赵鹏, 楼佩煌, 刘明灯, 等. 实轴空间综合约束下的数控加工速度前瞻策略. 2012, 46(2): 64-69. [doi:10.7652/xjtuxb201202011]
- 朱爱斌, 路新春, 张浩, 等. 铜化学机械抛光材料去除机理的准连续介质法研究. 2011, 45(12): 111-116. [doi:10.7652/xjtuxb201112020]
- 吕凯波, 景敏卿, 张永强, 等. 一种切削颤振监测技术的研究与实现. 2011, 45(11): 95-99. [doi:10.7652/xjtuxb201111018]
- 张琦, 陈余秋, 方建儒. 盒形件压铸模具冷却流道排布的研究. 2011, 45(7): 38-44. [doi:10.7652/xjtuxb201107008]
- 孙殿柱, 康新才, 李延瑞, 等. 三角 Bézier 曲面粗加工刀轨生成算法. 2011, 45(3): 70-74. [doi:10.7652/xjtuxb201103013]
- 樊文刚, 王小椿, 姜虹, 等. 一种开闭自由凹曲面五坐标加工多点刀位算法. 2010, 44(9): 69-73. [doi:10.7652/xjtuxb201009014]
- 罗昔联, 顾兆林, 雷康斌, 等. 一种三维切削网格上的 N-S 方程离散方法. 2010, 44(5): 15-20. [doi:10.7652/xjtuxb201005004]
- 许卫疆, 朱惠人. 孔间距对气膜冷却效率影响的数值模拟. 2009, 43(3): 101-105. [doi:10.7652/xjtuxb200903022]

(编辑 杜秀杰)