

# 基于特征的飞机结构件加工状态监测方法<sup>\*</sup>

## Feature Based Machining Condition Monitoring Method for Aircraft Structural Part

南京航空航天大学机电学院 黎明 李迎光 刘长青 刘浩

**[摘要]** 为有效监测飞机结构件加工过程中出现的刀具严重磨损、刀具破损和加工颤振等异常加工状态,提出基于特征的飞机结构件加工状态监测方法。分析了加工特征对监测加工状态监测的影响,运用小波分析方法提取加工特征关于加工状态的信号特征量,应用支持向量机方法对加工状态进行辨识。实例结果表明,该方法能有效的监测飞机结构件异常加工状态,具有较高的工程实用价值。

**关键词:** 特征 飞机结构件 加工状态 信号特征量 支持向量机

**[ABSTRACT]** In order to monitor the abnormal machining conditions of tool wear, tool breakage and chatter in the process of aircraft structural parts, the feature based method of CNC machining condition monitoring for aircraft structural parts is proposed. The effect of machining feature on monitor signal is investigated, and monitor signal is analyzed by wavelet analysis to obtain signal characteristics of the machining features. Support vector machine theory is used for machining condition recognition. The result shows that this method can monitor the abnormal machining conditions of aircraft structural parts effectively with high practical value.

**Keywords:** Feature Aircraft structural part Machining condition Signal characteristic Support vector machine

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.096

飞机结构件具有尺寸大、种类繁多、结构复杂等特点,使其加工工艺和加工过程较为复杂,采用传统的数控加工方式存在一定技术风险和加工问题,同时在加工过程中存在各种不稳定的加工因素,这会导致产生诸如刀具严重磨损、刀具破损和加工颤振等问题,这些问题不仅会影响加工零件的加工质量和刀具的合理利用,严

重时会造成机床、刀具和零件的损坏,影

响整个加工系统运行和操作人员安全,造成难以估量的损失<sup>[1]</sup>。

加工状态监控技术通常是对加工过程进行连续或周期性的定性或定量监测、分析、辨识与决策技术的统称。它以监测和辨识系统的可用状态和故障状态为目的,预测可能出现的早期故障,为后续的加工过程提供科学的决策信息。实施状态在线监控可最大程度地保证整个加工系统处于良好的技术状态,为顺利进行高效的加工生产提供科学的保障<sup>[2]</sup>。

20世纪60年代末期,国际上开始了对切削加工状态监测技术的研究。Pal基于传感器融合的神经网络模型用于监测车削加工的刀具磨损,用小波包树方法分析获取的信号即刀柄力、电机的电流和提取的磨损敏感特征,以神经网络模型的健壮性应对不确定的输入数据,并集成监控信息到一个最佳的监测系统,利用获取的刀具磨损信息来选择一个最佳的切削条件<sup>[3]</sup>。Dimla通过分析得出切削力(静态力和动态力)和振动(加速度)是最广泛适用的信号,同时指出最成熟的刀具状态监测系统并没有成功的应用,原因在于不准确的传感信号和应用的加工过程模型没有反映加工过程的复杂性<sup>[4]</sup>。吕凯波选择振动加速度传感器获取切削状态信息,选择时域方差和频域频谱特征作为颤振发生的综合指标,采用监测数据与正常切削时建立的对比库进行比较的方法进行了颤振识别,针对车、铣削加工工艺,研发了一种实用的切削颤振监测组件,并验证了其适用性<sup>[5]</sup>。

上述对刀具状态监测或对加工颤振现象的研究中,多集中在针对某一固定的加工条件下对刀具状态或加工颤振现象进行监测,且对加工特征几何参数动态变化对监测结果的影响未有考虑。针对飞机结构件这类种类繁多、结构复杂、加工工艺和工况复杂的零件,上述方法显然不能完全满足要求,且在监测方法的效果准确性和通用性方面都有待提高。

### 1 加工特征对加工状态监测的影响

根据飞机结构件几何形状和加工工艺特点,并充分

<sup>\*</sup> 国家科技重大专项(No.2012ZX04010041)资助。

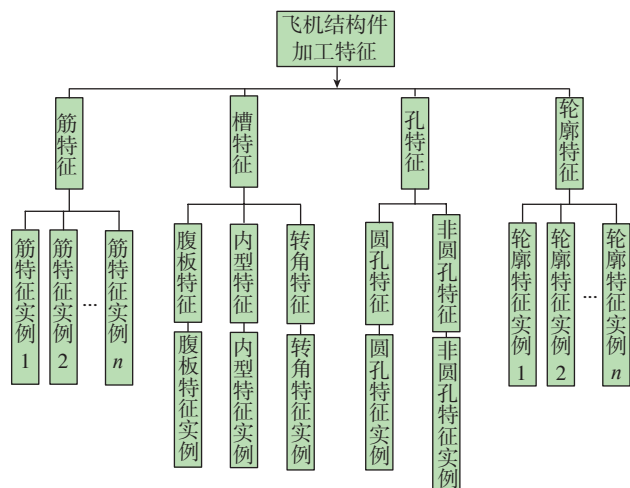


图1 飞机结构件加工特征分类

Fig.1 Classification of machining feature of aircraft structural parts

考虑数控加工的实际需求,飞机结构件的典型特征分类如图1所示,包含了筋、槽、孔、轮廓4大类典型加工特征。其中槽特征又包含了腹板特征、内型特征和转角特征,孔特征包含了圆孔特征和非圆孔特征<sup>[6]</sup>。

图2所示为飞机结构件典型加工特征的构成要素,现将各典型加工特征构成要素<sup>[7]</sup>以及特征对加工状态的影响描述如下:

(1)筋特征:构成要素包含筋种子面 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 及约束面 $f_4$ ,如图2所示。筋特征通常采用大直径刀具进行加工,筋的宽度决定加工走刀策略,筋的加工余量决定是否需分层加工,不同的切削参数和走刀路径将对切削力的受力大小和受力方向产生影响。

(2)槽特征:包含3种子特征,即槽腹板、槽内型和槽转角特征。图2中槽的 $f_1$ 面即为腹板面,通常为平面,槽腹板具有厚度较薄、加工精度高等特点。槽腹板在加工过程中的切削力以Z向力为主,腹板面面积大小将决定不同的切宽和走刀策略,并最终影响加工质量和加工过程状态。槽内型特征由槽的内侧面 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 、 $f_5$ 构成。槽内型特征的形状和深度影响着X向和Y向切削力的变化,槽内型加工一般采用分层切削的方式。当槽腔很深时,刀具容易发生振动,对表面质量会产生很大影响。转角特征即为槽内部相邻侧面的过渡面 $f_6$ 、 $f_7$ 、 $f_8$ 、 $f_9$ ,转角的半径大小主要影响X向和Y向切削力的变化过程。当转角加工深度较深时,采用悬伸比较大刀具加工较易发生加工颤振。 $f_{10}$ 为槽的底角面。

(3)孔特征:包含2种类型,即圆孔和非圆孔特征。构成要素包含孔壁面 $f_1$ 和孔的上下支持面 $f_2$ 、 $f_3$ ,如图2所示,其中 $h$ 为非圆孔特征。相比其他特征加工,加工孔时Z向受力较为明显,特别是对于钻孔加工等。

(4)轮廓特征:构成要素包含轮廓种子面 $f_1$ ,如图2

所示,其中 $f$ 为连接轮廓特征的工艺凸台。相比其他特征,轮廓加工范围大,加工时间长,常常需径向和轴向均采用分层切削的策略。另外,由于轮廓特征形状变化较大,加工时还需考虑凸台和工装的影响,如采用不同的切削参数或加工零件外围特殊位置时都将引起零件状态和刀具状态发生大的变化。

通过上述分析可以发现,不同类型的加工特征有各自不同的几何结构特点、加工工艺特点和加工过程特点,这将直接影响加工过程中的切削力大小、切削力变化过程以及加工过程中所产生的振动情况。而加工特征自身的几何参数变化将会对其走刀策略产生直接影响,亦会使加工过程中的切削力大小和振动情况产生不同的变化,并将影响最终的加工过程状态。

飞机结构件加工特征的上述特点决定了其加工过程是一个复杂多变的过程,每一类加工特征都有各自不同的加工过程特点和对加工状态的影响,而加工特征自身的几何参数变化亦会对加工状态产生影响。

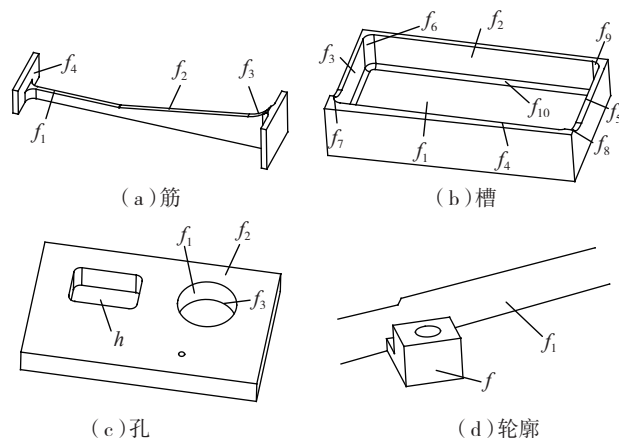


图2 飞机结构件加工特征构成要素描述

Fig.2 Description of constitute elements of machining feature of aircraft structural parts

## 2 构建基于特征的监测模型

图3所示为基于特征的监测模型,该模型首先通过多种传感器获取加工中的诸如振动、切削力、声发射等信号,对信号进行模数转换、放大和滤波等处理后,通过时域、频域和时频分析以获取加工特征的监测信号特征量,同时结合加工特征的信息(包含特征类型信息、几何信息和切削参数信息),运用模式识别方法构建加工状态的辨识模型,输出实时加工状态信息。

### 2.1 信号的确定

已有的研究表明,切削力是加工状况和刀具状态中最为敏感的参数,同时切削力信号具有拾取容易,反应迅速、灵敏等优点,因此被大量用来监测刀具的切削加

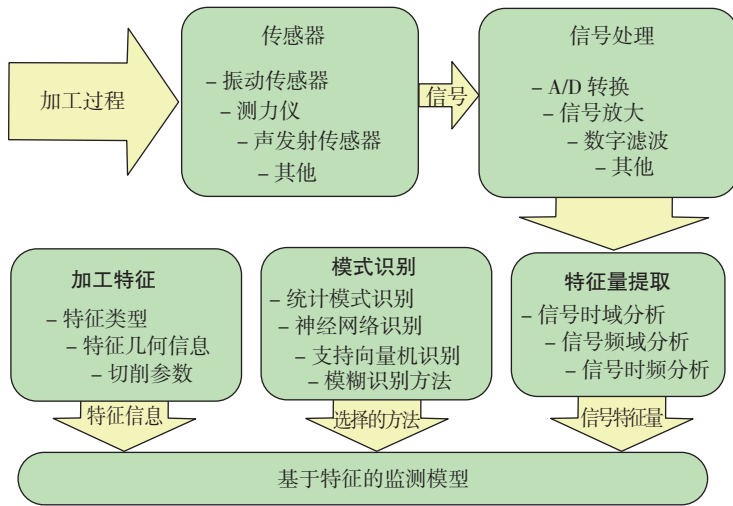


图3 基于特征的监测模型  
Fig. 3 Feature based monitoring model

工。切削力信号通常由测力仪获取<sup>[8]</sup>。振动信号与切削力、切削系统本身动态特性密切相关,并具有安装方便、测量信号易于引出、测试仪器简单等特点,常被用于监测刀具状态和切削颤振等。振动信号由振动传感器获得<sup>[9]</sup>。

基于切削力信号和振动信号的上述特点,选用切削力信号和振动信号来监测飞机结构件加工状态。同时选用该两种信号可比单一信号获取的信息更加全面和可靠,并且该两种信号均具有较易实现等优点。

### 2.2 基于特征的监测方法优势

基于特征的飞机结构件在线监测方法相较传统的在线监测方法具有如下优势:

(1)信息通用性。飞机结构件同一类加工特征具有相似的外形、相近的切削参数和较为一致的走刀策略,使它们的加工过程具有相似性。同时按照特征的加工工艺,同一类特征所处的加工阶段基本一致,此时零件力学等方面性能也是相近的,因此基于特征获取的监测信息具有一致通用性,获取的监测信号也具有可比性和参照性。

(2)有利于获得准确的监测信息。不同的加工特征在实际加工中对于同一种信号的敏感特征量不同,这是由特征的结构特点、加工工艺、零件所处状态、走刀策略、加工工具和切削参数等因素决定的。若固定一组敏感特征量,并以整个零件的加工过程为监测对象,显然很难获得加工过程中的准确状态信息。

### 3 加工特征的信号特征量获取

振动信号和力信号属于低频信号,每种加工状态的近似信号存在较为明显的差异。取信号小波分解后近似信号各频段的方差和均方值进行分析和对比选择变

化明显特征量。式(1)和式(2)分别为均方值和方差的定义表达式。

$$X_{rms}^2 = E[x^2(t)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2(t), \quad (1)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2. \quad (2)$$

其中,  $X_{rms}^2$  代表均方值;  $\sigma_x^2$  代表方差;  $x_i$  代表变量,即信号样本;  $\bar{x}$  代表变量平均值,即信号样本平均值;  $N$  代表变量数,即样本数。

图4所示为加工转角时不同状态下的振动信号,对应于刀具磨损状态、刀具破损状态和加工颤振的时域波形各有不同,其中在颤振状态下的振动幅度要明显大于其他两种状态。为获取更多有利信息,对振动信号进行 db5 小波 5 层分解 ( $a_1 \sim a_5$ )。取振动信号小波分解后近似信号各频段的方差和均方值,结果如表1所示。

图5所示为加工转角时的三向切削力信号,可知加工转角时  $X$  向和  $Y$  向切削力较大,且变化较为明显,  $Z$  向力受力则较小、较平稳,因此对于转角加工选择  $X$  向力和  $Y$  向力进行分析,分别对不同加工状态下的3向力信号进行 db5 小波 5 层分解,分解后近似信号各频段的方差和均方值如表2所示。

通过对表1和表2中的数据分析,发现振动信号  $a_2$  频段的方差和均方值存在较明显差异,而力信号中  $F_x$  在  $a_4$  频段重构信号均方值,  $F_y$  在  $a_4$  和  $a_5$  频段重构信号的方差变化较为明显。因此选择振动信号  $a_2$  频段的方差和均方值、力信号中  $F_x$  在  $a_4$  频段均方值和  $F_y$  在  $a_4$

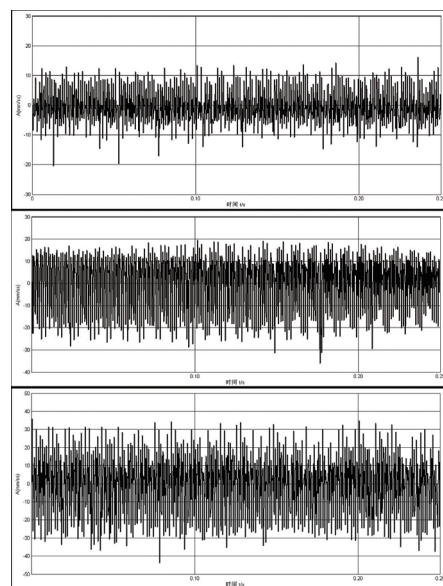


图4 振动信号示意图  
Fig. 4 Diagram of vibration signal

表1 振动信号分解后各层逼近信号方差和均方值

转角特征	—	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
刀具磨损	$\sigma^2$	23735	3560.9	1597.4	789.4	279.5
	$X^2$	23891	3738.7	1776.9	967.3	458.5
刀具破损	$\sigma^2$	134380	10218	5794.6	2842.8	1295.9
	$X^2$	134380	10343	5924	2960.4	1413.8
加工颤振	$\sigma^2$	171370	18868	8903.9	3577.4	1711.3
	$X^2$	171640	19259	9320.4	3958.2	2090.9

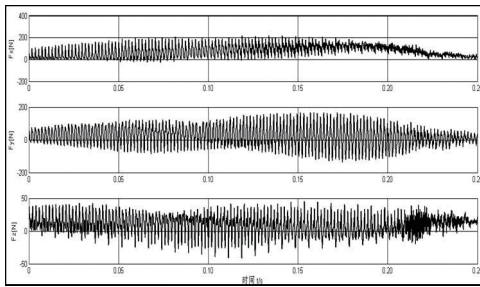


图5 加工过程中的3向切削力信号示意图

Fig.5 Diagram of three-dimensional cutting forces signal in processing

表2 力信号分解后各层逼近信号方差和均方值

转角	—	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
刀具磨损	$F_x/\sigma^2$	128.2	118.1	106.2	89.5	88.4
	$F_x/X^2$	498.8	488.7	476.8	460.0	459.0
	$F_y/\sigma^2$	76.68	70.30	51.4	6.7	5.9
	$F_y/X^2$	321.9	315.5	296.6	251.9	251.1
刀具失效	$F_x/\sigma^2$	291.6	269.7	235.4	189.6	186.6
	$F_x/X^2$	454.6	432.8	398.4	352.7	349.7
	$F_y/\sigma^2$	319.7	303.7	230.6	50.7	48.1
	$F_y/X^2$	577.5	561.6	488.4	308.6	305.9
加工颤振	$F_x/\sigma^2$	246.4	234.3	221.3	204.0	202.7
	$F_x/X^2$	616.9	604.7	591.8	574.5	573.2
	$F_y/\sigma^2$	192.2	184.0	164.1	118.9	117.9
	$F_y/X^2$	437.3	429.0	409.2	364.0	362.9

和  $a_5$  频段的方差作为槽转角特征的关于加工状态的信号特征量。

#### 4 基于支持向量机方法加工状态识别

支持向量机(SVM)方法由 Vapnik 于 1992 年首次提出,它是一种基于统计学习理论的模式识别方法,属于有监督的学习方法。支持向量机是基于结构风险最小化原则,泛化能力优于神经网络,能很好地处理小样本学习问题。同时,SVM 算法具有全局最优性,克服了传统模式识别的极小值问题。图 6 所示为支持向量机模型结构示意图。支持向量机因其特有的优越性越来越受到各领域的重视,现已广泛运用于信号处理、计算

机视觉、数据挖掘、机器人、加工状态监控与故障诊断等诸多领域,具有良好的应用前景<sup>[2]</sup>。

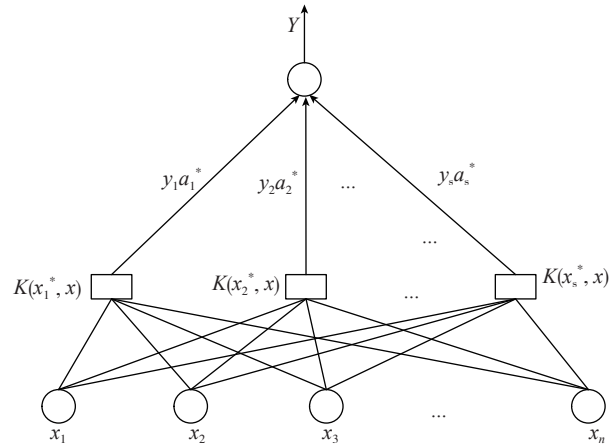


图6 SVM模型结构示意图

Fig.6 Diagram of SVM model structure

本文采用支持向量机方法构建加工状态识别模型,输入包含加工特征的几何参数信息、切削参数信息和监测信号特征量。支持向量机只有一个输出,在此即为输出的加工状态。

选择径向基函数作为支持向量机模型的核函数,径向基函数如式(3)所示。一类加工特征需建立一种支持向量机模型,此处以槽转角为例说明实现过程。为了使支持向量机模型更紧致,具有更好的柔性和推广性,需对模型中的参数进行相应设置和调节。此模型有两个参数需要调节,一个是径向基核函数  $\gamma$  参数,另一个为惩罚因子  $C$ 。设置槽转角的支持向量机模型参数  $\gamma$  为 5.2,  $C$  为 0.8 时能很好地满足精度要求。

$$K(x, x_i) = \exp(-\gamma|x - x_i|^2) \quad (3)$$

#### 5 实例验证

针对图 7 这个包含单槽的飞机结构件,加工转角特征以验证系统的适用性。试验中传感器的安装如图 8 所示。

##### 5.1 采样参数的确定

试验中,加工槽转角时机床的主轴最高转速设定为 6000r/min,频率为 100Hz;最低转速设定为 600r/min,频率为 10Hz。预估各加工状态的信号频率在 16 倍频以下,采用振动传感器、4 通道 BVM-300-4M 振动测试与模态分析仪和奇石乐 9443B 型测力仪,设定采样频率  $f_s$  为 4000Hz,采样点数为 1024 点。

最高分析频率为

$$f_{\max} = 1000 \times 16 = 16000\text{Hz} \quad ,$$

采样间隔为

$$\Delta t = 1/f_s = 1/4000 = 0.25\text{ms} \quad ,$$

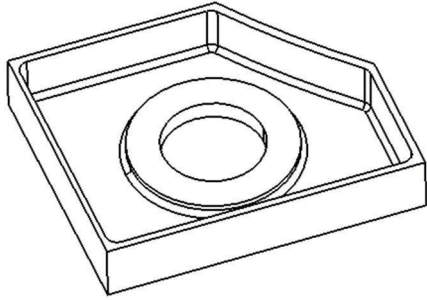


图7 包含单槽的飞机结构件零件  
Fig.7 Aircraft structural part including single slot



图8 振动传感器和测力仪的安装  
Fig. 8 Installation of vibration sensor and dynamometer

采样长度为

$$T = N \cdot \Delta t = 1024 \times 0.25 = 0.256s$$

频率分辨率为

$$\Delta f = 1/T = 1/0.256 = 3.9Hz$$

## 5.2 系统运行结果

基于 VC++ 开发了飞机结构件加工状态在线监测系统。此时转角加工处于正常状态,转角特征的几何参数为:半径 6.5mm,深度 28.16mm,转角对应角度 90°,切削加工参数为转速 6000r/min,切深 2mm,进给 3000mm/min。为验证系统对刀具破损状态的预警性能,试验中采用破损的刀具加工槽转角特征,结果运行如图 9 所示。系统此时发出刀具破损警报,应立即停机及时更换刀具。类似地针对其他两种加工状态进行相应的监测试验,最终实验结果如表 3 所示。

表 3 中的试验结果表明该监测方法具有较高的准确性,能有效监测转角加工过程中的异常状态。针对飞机结构件的其他类加工特征,均可采用相同的分析方法实现对加工状态的监测。

## 6 总结

结合航空制造企业的实际需求,针对飞机结构件数控加工过程中因刀具达到磨损极限或破损造成刀具失效、加工中出现颤振等故障加工状态极大影响工件的加工质量和刀具的合理利用的问题,开发了飞机结构件加

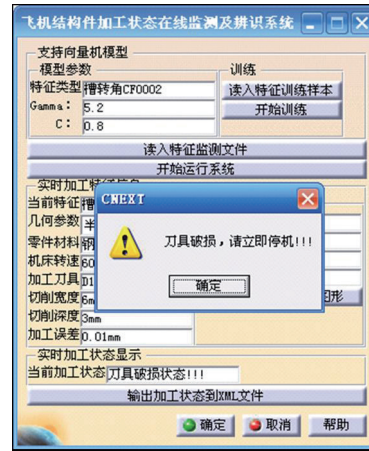


图9 实例零件仿真过程及结果  
Fig.9 Simulation process and results of instance

表3 实验结果统计

加工特征	加工状态	正确数 / 预测样本数 / 个	正确率 / %
槽转角	刀具严重磨损	7/9	77.8
	刀具破损	7/9	77.8
	加工颤振	8/9	88.9

工状态在线监测及辨识系统,并以槽转角为例说明了该监测方法的详细实现过程。实例运用结果表明,该系统能基本满足对各类飞机结构件加工状态的在线监测要求,保证了零件的加工质量和刀具的合理利用,提高了飞机结构件的生产质量和效率。

## 参考文献

- [1] 柳万珠, 刘强. 切削加工过程的在线监测与自适应控制. 航空制造技术, 2012 (14): 86-90.
- [2] 温熙森. 模式识别与状态监控. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] Pal S, Heyns P S, Freyer B H., et al. Tool wear monitoring and selection of optimum cutting conditions with progressive tool wear effect and input uncertainties. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 22(4): 491-504.
- [4] Dimla E, Dimal S. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2000, 40(8): 1073-1098.
- [5] 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. 西安交通大学学报, 2011, 45(11): 95-99.
- [6] 方挺立, 黄翔, 李迎光. 飞机结构件加工特征定义方法研究. 机械科学与技术, 2008(8):1005-1008.
- [7] 程少杰. 飞机结构件加工特征识别技术研究与实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [8] 薛鸿健, 杨克冲, 杨叔子, 等. 切削加工状态监测技术的现状与发展. 技术动态, 1995 (5): 36-39.
- [9] 费仁元, 王民. 切削颤振在线监控的研究现状及进展. 中国机械工程, 2001, 12(9): 1075-1079.

(责编 谷雨)