DOI:10.3969/j.issn.1001 - 4551.2019.08.010

基于 BP 神经网络和多元线性回归的航发叶片铣削力预测研究*

黄 兵[1],胥 云[1,2*],廖映华[1],石 艳[1,2],李志荣[1]
(1.四川轻化工大学 机械工程学院,四川 宜宾 644000;
2.过程装备与控制工程四川省高校重点实验室,四川 宜宾 644000)

摘要:针对航空发动机叶片加工过程中铣削力的变化预测和控制问题,通过研究铣削加工工艺系统的主要工艺参数,利用正交试验法确定了若干组工艺参数方案,建立了 AdvantEdge FEM 叶片二维铣削模型完成了叶片铣削仿真试验;提取了仿真试验的铣削力,通过方差分析确定了不同工艺参数对铣削力变化影响能力的强弱;利用影响能力强的参数设计了对比试验,建立了 BP 神经网络铣削力预测模型和多元线性回归铣削力预测模型,比较分析了两种预测模型对铣削力的预测能力。研究结果表明:铣削深度对铣削力变化的影响最大,其余影响较小;BP 神经网络预测的准确度和稳定性整体上优于多元线性回归。

关键词:航发叶片;铣削加工;铣削工艺参数;铣削力预测
中图分类号:TH165;TG54 **文献标志码**:A **文章编号**:1001 - 4551(2019)08 - 0824 - 06

Milling force forecasting of aero-engine blade based on BP neural network and multivariate linear regression

HUANG Bing[1], XU Yun[1,2], LIAO Ying-hua[1], SHI Yan[1,2], LI Zhi-rong[1]
(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China;
2. Sichuan Key University Laboratory of Process Equipment and Control Engineering, Yibin 644000, China)

Abstract: Aiming at the problem of milling force change prediction and control about the aero-engine blade during the mechanical processing, by studying the main process parameters of milling machining system, the orthogonal test method was used to determine several sets of process parameter schemes, the two-dimensional milling model of AdvantEdge FEM blade was established, and the simulation test of blade milling was completed. The milling force of simulation test was extracted, by using the variance analysis to determine the strength of the influence of different process parameters on the change of milling force. Then, by using the strong influential parameters to design contrast test, the BP neural network milling force prediction model and the multivariate linear regression milling force prediction model were established, and the prediction ability of the two prediction models on the milling force was compared and analyzed. The research results indicate that the influence of milling depth on the change of milling force is the strongest, while the others are weaker. The prediction accuracy and stability of BP neural network are better than that of multiple linear regression on the whole.

Key words: aero-engine blade; milling; milling process parameters; predicting milling force

收稿日期:2019 - 01 - 20
基金项目:四川省教育厅科技创新团队项目(18TD0029);四川省教育厅自然科学一般项目(18ZB0431);四川理工人才引进项目(2016RCL01);自贡市科技局重点研发项目(2017DZ08);四川理工学院研究生创新基金资助项目(y2018034)
作者简介:黄兵(1993 -),男,四川南充人,硕士研究生,主要从事叶片加工变形方面的研究。E-mail:xinjingruzhen@163.com
通信联系人:胥云,男,高级工程师,硕士生导师。E-mail:xuyunzigong@163.com

0　引　言

当前,航空发动机叶片(以下简称叶片)的主要材料是高强度不锈钢、钛合金、高温合金等难加工材料,且叶片型面数控铣削加工精度要求高,如轮廓精度接近 20 μm[1]。叶片铣削加工精度对于工艺参数的选取极为敏感,叶片粗铣加工时采用低速、大进给量、大切削量加工,铣削力大;在精铣加工时采用高速、小进给量、小切削量加工,铣削力小。大部分的研究证明:铣削力的变化是影响叶片加工精度的主要因素之一[2-3],故研究铣削力预测控制方法是提高叶片加工精度的重要措施。

为提高铣削力的预测准确度,国内外众多专家学者对叶片铣削工艺及铣削力预测方法做了相关研究。袁信满等[4]采用中心复合响应曲面法建立了三向铣削力预测模型;WOU S J 等[5]利用射线铸造和体素表示法建立了球头铣刀的铣削力预测模型;董新峰等[6]采用最小二乘法对不同铣削用量时的铣削力进行了预测;孙暄等[7]通过微元法与有限元法相结合对动态铣削力进行了预测;GYU M K 和 TAI C C 等[8-9]基于 Z-map 理论,计算了铣削单元网格铣削力密度以预测平均铣削力。

以上方法为进行叶片加工铣削力的预测提供了研究思路,但上述研究将所有的工艺参数作为分析变量,而实际加工中铣削力大小受多个工艺参数共同影响,且各参数影响能力所占的权重各不相同,以权重较小的参数作为自变量,无法验证铣削力预测的准确度与可靠性。

故本文通过正交试验和方差分析确定对铣削力影响权重较大的强相关参数,再通过强相关参数设计铣削力预测对比试验,分析 BP 神经网络铣削力预测模型与多元线性回归铣削力预测模型对铣削力预测的变化趋势和误差波动,通过权重较大的强相关参数设计预测对比试验,提高铣削力预测的准确度与可靠性。

1　影响铣削力的主要参数的确定

1.1　影响铣削力参数分析模型的建立

1.1.1　影响参数分析

叶片铣削力变化机理复杂,特别是在叶片的精铣加工中,由于叶片型面为复杂曲面,不同部位厚度不同,刀具与叶片的相对位姿实时改变,叶片加工刚度实时改变,铣削力实时发生改变,故明确不同工艺参数对铣削力影响的规律是实现铣削力预测的第一步。

叶片在机床中进行铣削加工时的状态如图 1 所示。

图 1　叶片铣削加工

在不考虑发热对叶片变形的影响条件下,本研究选择材料为钨钴类硬质合金的球头铣刀,固定铣刀转速为 6 000 r/min,温度为 25°,研究不同刀具前角 γ、每齿进给量 f_z、切削宽度 a_e、切削深度 a_p 对材料为 Ti6Al4V 型钛合金叶片铣削加工时铣削力的影响规律。

本文建立叶片二维铣削有限元模型如图 2 所示。

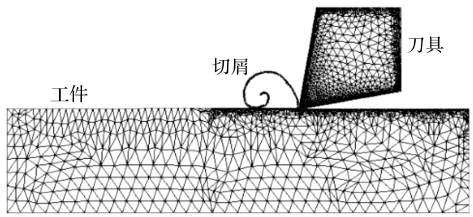


图 2　二维铣削有限元模型

1.1.2　试验软件选择

AdvantEdge FEM 是一款专门用于切削加工的仿真软件,它不需要定义切屑分离线与分离准则,其自适应网格划分避免加工网格畸变;工件与切屑的良好接触保证进行复杂计算的稳定性与计算收敛的可靠性[10-11]。

本研究利用 AdvantEdge FEM 获得方差分析、BP 神经网络训练、多元线性回归建模分析与对比验证的数据样本。

1.1.3　材料本构方程

本构方程是反映工件材料的应力与应变、应变率与温度之间的对应关系特性的材料模型,其主要表达形式为:

$$\bar{\sigma} = f(\varepsilon, \dot{\bar{\varepsilon}}, T, \xi) \tag{1}$$

式中:ε— 等效塑性应变;$\dot{\bar{\varepsilon}}$— 等效塑性应变率;T— 温度;ξ— 变形量。

目前,主要的本构模型有 Johnson-Cook 模型、Zerilli-Armstrong 模型、Bodner-Parton 模型、Drucker-Prager 模型、Power-Law 模型、Khan-Huang-Liang 模型等。AdvantEdge FEM 平台中材料本构关系有 Power-Law 和 Drucker-Prager 两种,同时支持自定义 Johnson-Cook 本构模型。由于叶片铣削加工是发生在高应变率、高温

情况下,使得计算结果的拟合准确度降低[12-13]。

由于 Johnson-Cook 模型结构简单、参数较少,本文选择 Johnson-Cook 模型,其本构方程为:

$$\bar{\sigma} = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + Ch\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{mon}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{mon}}}\right)^m\right] \tag{2}$$

式中:$\dot{\bar{\varepsilon}}/\dot{\varepsilon}_0$— 参考塑性变率;$T_{\text{mon}}$— 室温;$T_{\text{melt}}$— 材料融化温度。

查阅文献[14]可知 A、B、C、n、m 这5种材料参数,如表1所示。

表 1 *J-C* 本构方程参数

A/MPa	B/MPa	n	C	m
862	331	0.34	0.012	0.8

1.2 正交试验

1.2.1 正交试验设计

影响叶片铣削力大小的工艺参数众多,主要包括主轴转速、铣削速度、铣削深度、铣削宽度、每齿进给量、刀具转角等,且各参数取值范围大,采用全面试验法的试验次数多。而正交试验法是研究多因素、多水平共同作用的试验方法,分析该法选取的部分具有整体代表性的试验组合,能够通过较少的试验次数达到与大量全面试验等效的试验结果[15]。

针对本研究选取的刀具前角 γ、每齿进给量 f_z、铣削宽度 a_e、铣削深度 a_p 共4个因素,每个因素取3个水平,根据正交试验设计原则选择 $L_9(3^4)$ 型试验方案,通过 AdvantEdge FEM 软件完成试验,通过结果后处理提取时间 - 铣削力曲线中稳定的区域取平均值,得到不同试验组别中 F_x、F_y 值,如表2所示。

表 2 试验结果统计表

组号	γ	f_z	a_e	a_p	F_x/N	F_y/N
1	1	1	1	1	29.262	30.168
2	1	2	2	2	53.110	46.570
3	1	3	3	3	97.174	77.196
4	2	1	2	3	53.102	55.17
5	2	2	3	1	38.760	32.472
6	2	3	1	2	68.020	52.772
7	3	1	3	2	38.346	43.286
8	3	2	1	3	73.374	62.328
9	3	3	2	1	49.428	32.048

1.2.2 正交试验结果分析

针对表2中的9组试验结果,本文建立 F_x、F_y 方差分析表如表3所示。

表 3 方差分析表

	差异源	S	f	F 检验
F_x	γ	57.377	2	0.070
	f_z	1 377.688	2	1.679
	a_e	52.275	2	0.064
	a_p	1 795.409	2	2.188
	误差 e	3 282.75	8	
F_y	γ	50.571	2	0.103
	f_z	189.305	2	0.384
	a_e	62.022	2	0.126
	a_p	1 667.812	2	3.387
	误差 e	1 969.71	8	

查阅参考文献[16]知,F 临界值在信度 a 为0.1时的 f 临界值为3.11。从表3发现,针对 F_x,4个因素的 F 检验值皆小于 f 临界值,对 F_x 影响不显著,其中每齿进给量和铣削深度对 F_x 影响相对较大;针对 F_y,铣削深度和每齿进给量对 F_y 影响相对较大,并且铣削深度的 F 检验值大于 f 临界值。

所以在固定铣刀转速的条件下,影响铣削力大小的主要因素是铣削深度,其次是每齿进给量,且随着铣削深度增加,铣削力逐渐增大。

2 预测对比模型的建立

2.1 预测对比试验设计

从方差分析中知,铣削力变化的主要原因是铣削深度的变化。

故以铣削深度为自变量设计单因素对比试验方案,铣削深度 a_p 分别为0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm、1.2 mm,并且刀具前角 $\gamma = 10°$,每齿进给量 $f_z = 0.05$ mm,铣削宽度 $a_e = 9$ mm,得到预测对比试验方案如下表4所示。

表 4 对比试验方案

组号	γ/(°)	f_z/mm	a_e/mm	a_p/mm
1	10	0.05	9	0.4
2	10	0.05	9	0.6
3	10	0.05	9	0.8
4	10	0.05	9	1.0
5	10	0.05	9	1.2

2.2 BP 神经网络铣削力预测模型的建立

2.2.1 模型结构设计

BP神经网络模型主要有输入层、隐含层、输出层3部分。本文采用3层网络模型建立输入、输出的函数关系映射。取刀具前角、每齿进给量、铣削宽度、铣削深度为输入层 X 的4个节点,其向量表达式为:

$$X = (\gamma, f_z, a_e, a_p) \tag{3}$$

输出层主要是 x、y 两个方向的铣削力分力,即以

F_x、F_y 为输出层 Y 的 2 个节点,其向量表达式为:

$$Y = (F_x, F_y) \tag{4}$$

查阅参考文献[16],隐含层节点数目 n_1 和输入层节点数目 n_2 的近似关系为:

$$n_2 = 2 \times n_1 + 1 \tag{5}$$

故隐含层取 9 个节点,建立一个 3 层结构为 4-9-2 的 BP 神经网络模型,如图 3 所示。

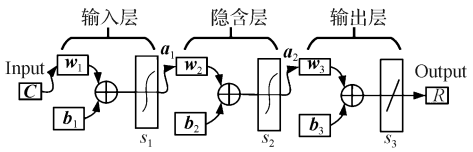


图 3　BP 神经网络模型结构

$\boldsymbol{C}$ – 输入参数组成的矩阵;$\boldsymbol{W}_i$ – 各层权值矩阵;$\boldsymbol{b}_i$ – 各层阈值矩阵;S_i – 各层的激活函数;$\boldsymbol{a}_i$ – 第 i 层的输出矩阵,同时是第 $i+1$ 层的输入矩阵;R – 输出变量

本文选择 tansig 函数、purelin 函数分别作为输入层、输出层激活函数,以保证输入值、输出值的任意性,同时为提高网络训练的收敛性,笔者选用 premnmx 函数对输入数据进行归一化处理,采用 postmnmx 函数对输出数据进行反归一化处理。

2.2.2　预测模型训练

本研究借助 Matlab 将网络模型的学习误差设置为 10^{-5},学习效率为 0.01,利用试验结果样本数据进行训练,在训练次数为第 2 032 次时满足误差要求。

2.3　多元线性回归铣削力预测模型的建立

本文采用指数形式的切削力与切削参数之间的关系式为:

$$F = K_f a_p^{n_1} f_z^{n_2} v_c^{n_3} \tag{6}$$

式中:K_f— 取决于工件材料与切削条件的系数;a_p— 切削深度;f_z— 每齿进给量;v_c— 切削速度。

本文铣削力表达式为:

$$F = K\gamma^{n_1} f_z^{n_2} a_e^{n_3} a_p^{n_4} \tag{7}$$

式中:K— 总修正系数;γ— 刀具前角;a_e— 铣削宽度。

对等式(7) 两端取对数,可得[17]:

$$\lg F = \lg K + n_1 \lg\gamma + n_2 \lg f_z + n_3 \lg a_e + n_4 \lg a_p \tag{8}$$

设 $\lg F = F_m$,$\lg K = M$,$\lg r = R_1$,$\lg f_z = R_2$,$\lg a_e = R_3$,$\lg a_p = R_4$,代入式(8),可得方程:

$$F_m = M + n_1 R_1 + n_2 R_2 + n_3 R_3 + n_4 R_4 \tag{9}$$

借助多元线性回归计算方法,结合表 2 的试验数据,可得 x,y 两个方向的铣削力(线性回归决定系数 R^2 为 0.96) 为:

$$\begin{cases} F_x = 224.266\gamma^{0.442} f_z^{0.814} a_e^{0.338} a_p^{0.987} \\ F_y = 87.435\,0\gamma^{0.14} f_z^{0.337} a_e^{0.343} a_p^{1.058} \end{cases} \tag{10}$$

3　预测对比试验结果分析

本研究利用 BP 神经网络预测模型和多元线性回归预测模型完成铣削力预测对比试验,以同样的方法提取 AdvantEdge FEM 结果后处理中时间 — 铣削力曲线中稳定的区域,取平均值,得到不同试验组别中 F_x、F_y 平均值,如表 5 所示。

表 5　预测对比试验结果

数值类别	F_x/N	F_y/N
FEM 试验值	43.002 96	34.584 84
	65.622 36	52.863 78
	82.297 12	64.326 9
	113.615 1	88.172 98
	134.448 6	100.564 7
BP 神经网络预测值	42.7457	35.370 1
	66.434 1	52.523 8
	80.740 7	63.103 1
	111.270 4	88.648 2
	136.062 6	105.451 8
多元线性回归预测值	46.077 8	35.442 4
	68.753 4	54.428 6
	91.329	73.792 6
	113.830 6	93.442 3
	136.273 3	113.322 8

利用表 5 中的数据,建立关于 F_x、F_y 的试验值与预测值的对比关系,如图 4 所示。

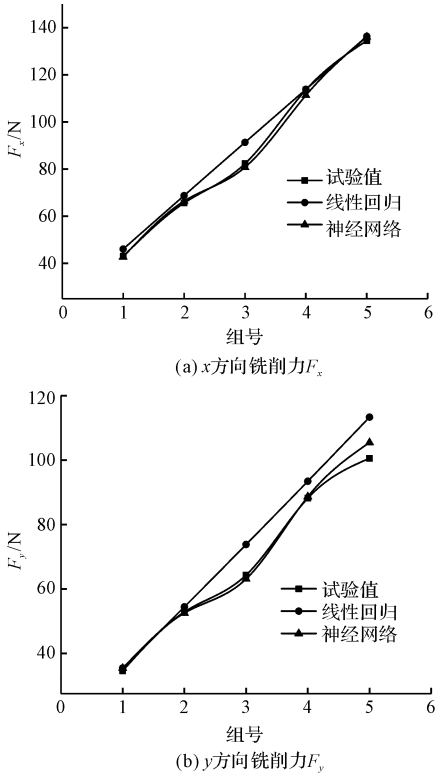


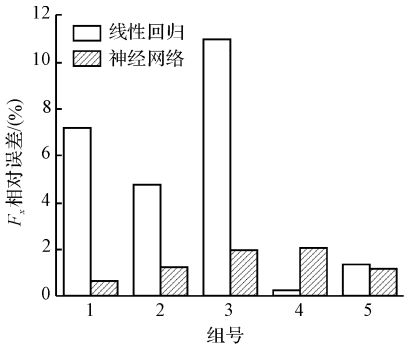
图 4　铣削力对比试验值

从图 4 可知：

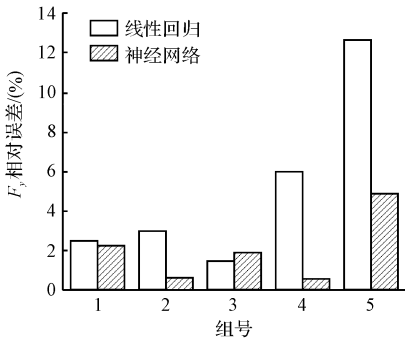
(1) 在主轴转速、刀具前角、每齿进给量、铣削宽度不变的条件下，随着铣削深度的增加，F_x、F_y 逐渐增大，与正交试验结论一致；

(2) BP 神经网络预测模型与多元线性回归预测模型对铣削力的预测准确度有差异：在铣削深度为 0.4 mm ~ 0.6 mm 和1.0 mm ~ 1.2 mm 两个范围内，BP 神经网络与多元线性回归的预测准确度整体都较高；在铣削深度为 0.6 mm ~ 1.0 mm 范围内，BP 神经网络比多元线性回归预测准确度更高。

具体的准确度有预测值与试验值的相对误差统计，如图 5 所示。



(a) x方向铣削力预测值相对误差



(b) y方向铣削力预测值相对误差

图 5 预测值相对误差

从图 5 可知：

(1) 在 x、y 两个方向的铣削力预测中，两种方法对于两个方向的预测误差在不同铣削深度时各不相同；

(2) BP 神经网络的预测相对误最大不超过 6%，多元线性回归的预测相对误差最大为 12.68%，并且 BP 神经网络的预测误差波动范围小于多元线性回归。

4 结束语

(1) 通过 AdvantEdge FEM，本文建立了二维铣削有限元试验模型，利用正交试验法确定了对铣削力变化的影响最大的是铣削深度；

(2) 利用铣削深度的变化，本文建立了 x、y 两个方向铣削力的预测模型，完成了预测试验对比分析；确定了 BP 神经网络对于叶片铣削力的预测误差波动相对更小、预测精度更高；

(3) 本文确定了对铣削力变化的影响较大的主要工艺参数，可为后续铣削力的预测控制提供参考。

参考文献(References)：

[1] 李 勋，于建华，赵 鹏. 航空发动机叶片加工变形控制技术研究现状[J]. 航空制造技术，2016(21)：41-49，62.

[2] 江 敏，谌永祥，李双跃，等. 汽轮机叶片汽道加工中受力及变形分析[J]. 机械设计与制造，2012(7)：222-224.

[3] KLOCKE F，SOO S L，KARPUSCHEWSKI B，et al. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites [J]. **CIRP Annals**，2015，64(2)：581-604.

[4] 袁信满，郑华林，忻龙飞，等. 基于响应曲面法的 NOMEX 蜂窝芯超声复合铣削力预测模型构建[J]. 制造技术与机床，2017(1)：103-108.

[5] WOU S J，SHIN Y C，EI-MOUNAYRI H. Ball end milling mechanistic model based on a voxel-based geometric representation and a ray casting technique[J]. **Journal of Manufacturing Processes**，2013，15(3)：338-347.

[6] 董新峰，张为民，孙嘉彬，等. 薄壁件不一致刀齿铣削时铣削力系数构造与预测[J]. 机械工程学报，2015，51(19)：197-205.

[7] 孙 暄，安庆龙，张东进，等. 立铣加工动态切削力预测新方法及应用[J]. 机械设计与研究，2008，24(3)：84-88.

[8] KIM G M，CHU C N. Mean cutting force prediction in ball-end milling using force map method[J]. **Journal of Materials Processing Technology**，2004，146(3)：303-310.

[9] TAI C C，FUH K H. A predictive force model in ball-end milling including eccentricity effects [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**，1994，34(7)：959-979.

[10] KIM G M，CHO P J，CHU C N. Cuttingforce prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**，2000，40(2)：277-291.

[11] 曾林林，周利平，张敬志. 基于 AdvantEdge FEM 的车刀参数优化试验研究[J]. 工具技术，2015，49(12)：49-52.

[12] 曾祥国，盛 鹰，韩悌信，等. 考虑热粘塑性钛合金动态本构关系及其试验验证[J]. 四川大学学报：工程科学版，2014，46(6)：152-157.

[13] DUCOBU F，RIVIÈRE-LORPHÈVRE E，FILIPPI E. On the importance of the choice of the parameters of the Johnson-Cook constitutive model and their influence on the results of a Ti6Al4V orthogonal cutting model[J]. **Interna-**

tional Journal of Mechanical Sciences, 2017(122):143-155.

[14] WANG B, LIU Z. Shear localization sensitivity analysis for Johnson-Cook constitutive parameters on serrated chips in high speed machining of Ti6Al4V[J]. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 2015(55):63-76.

[15] 周玉珠. 正交试验设计的矩阵分析方法[J]. 数学的实践与认识,2009,39(2):202-207.

[16] 孟少农. 机械加工工艺手册:第 1 卷[M]. 北京:机械工业出版社,1995.

[17] 郁　磊,史　峰,王　辉,等. Matlab 智能算法 30 个案例分析[M]. 第二版. 北京:北京航空航天大学出版社,2017.

[**编辑**:程　浩]

本文引用格式:

黄　兵,胥　云,廖映华,等. 基于 BP 神经网络和多元线性回归的航发叶片铣削力预测研究[J]. 机电工程,2019,36(8):824 - 829.

HUANG Bing, XU Yun, LIAO Ying-hua, et al. Milling force forecasting of aero-engine blade based on BP neural network and multivariate linear regression [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(8):824 - 829.　　《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第 823 页)

[3] 李　伟,马云栋,蒋　鹏,等. 基于声学检测系统理论的输油管道阀门内漏问题分析[J]. 压力容器,2017,34(12):55-62.

[4] 王亚利. 核电阀门技术的现状及发展方向[J]. 科技创新与应用,2014(10):63.

[5] 陈　林,王兴松,张逸芳,等. 阀门故障诊断技术综述[J]. 流体机械,2015,43(9):36-42.

[6] 王灵芝. 以可靠性为中心的高速列车设备维修决策支持系统研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2011.

[7] 王景军. 电动阀门手动操作的常见问题及其解决措施[J]. 流体机械,2018,46(3):42-46.

[8] YU Dan, WANG Qing, LI Xiao-min. Development of surveillance equipment on power quality based on DSP and MCU [J]. **Instrumentation Technology**,2004(6):31-33.

[9] 陈　洁. 三相交流电量采集算法的研究[D]. 武汉:武汉大学动力与机械学院,2005.

[10] 李沂乘. 采样计算方法测量交流电压有效值误差分析[J]. 电子测量与仪器学报,2008,22(S2):62-65.

[11] WILLIAMS J G, GAMONPILAS C. Using the simple compression test to determine Young's modulus, Poisson's ratio and the Coulomb friction coefficient [J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2008,45(16):4448-4459.

[12] EPRI. Use of MCC-based motor torque measurements for periodic verification of motor-operated valves[M]. California:EPRI,2006.

[13] 杨春燕,蔡　文. 可拓工程[M]. 1 版. 北京:科学出版社,2007.

[14] 胡宝清,何娟娟. 区间论域上的区间可拓集及其关联函数[J]. 广东工业大学学报,2001,18(1):48-54.

[15] 王　鑫,徐习东,琚　军,等. 基于层次分析法的继电保护消缺优化研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1540-1545.

[16] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method [J]. **Computers&Opera-tions Research**, 1995,22(7):763-770.

[**编辑**:周昱晨]