

口感预测型食品物性仿生检测系统

马德军¹, 王加森¹, 卢慧¹, 俞经虎^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122;
2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:针对目前在使用质构仪进行食品物性检测时,存在的检测数据准确性较差,操作系统功能单一,测试结果与口感评价间无关联性分析等缺点,提出了基于六自由度并联机器人的口感预测型仿生检测系统。设计了仿生咀嚼检测平台;利用数理统计原理和最小二乘法建立了物性检测数据与口感评价之间的数学模型,实现了仿生检测系统的口感预测功能。实验结果表明,利用数学模型获得的口感预测值与人口感评价结果之间的误差小于9%,满足实际应用的需要,验证了口感预测数学模型构建的正确性及口感预测功能的可行性。

关键词:食品物性;口感预测;数学建模;仿生检测

中图分类号:TS201.2;TP274

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)04-0007-05

Food Texture Bionic Detection System of Achieving the Function of Humans Taste Prediction

MA Dejun¹, WANG Jiasen¹, LU Hui¹, YU Jinghu^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: When using an existing texture analyzer to detect physical properties of food, there are some drawbacks, such as, poor accuracy of detection data, single function of operating system, lack of correlation analysis between test results and texture evaluation. For these shortcomings, this paper presented a bionic detection system with taste prediction capabilities, and the bionic chew detection platform was designed. A mathematical model was established between food texture test data and taste evaluation using mathematical statistics principle and the least squares method to achieve taste prediction function of bionic detection system. Experiments show the deviation between the result of taste prediction and the value of person's sensory evaluation is less than 9%, it is acceptable in practice. The results demonstrate the rationality of method to build the equation and the feasibility to achieve the function of predicting person's taste to food.

Key words: food texture; taste forecast; mathematical modeling; bionic detection

目前食品物性^[1]的检测主要依靠物性检测仪器,即质构仪^[2]。随着食品生产的规模化和批量化,质构仪检测的物性数据的准确性以及仪器系统功能的单一性已经不能满足当代食品生产向规范化、规模化、批量化发展的需要,因此,迫切需要研发能实现食品质地特性检测更加准确和功能更加丰富的新物性检测系统^[3],以适应当代食品科学的快速发展的需要,推动食品科学研究的稳步发展。

本文从机械和操作系统2方面对新一代食品物性仿生检测系统进行研究。以提高系统数据检测的准确性和功能的多样性为目标,从人类咀嚼运动出发,对检测系统的硬件检测平台进行仿生设计,并建立口感预测数学模型,实现系统的口感预测功能,在食品物性检测和分析方面具有应用价值。

1 系统硬件设计

经过分析,现有质构仪对物性值检测准确性较差

收稿日期:2015-01-07;修回日期:2015-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目;面向食品材料物性检测与评价的仿生咀嚼机器人研究(51375209)

作者简介:马德军(1988),男,山东诸城人,硕士研究生,主要从事基于六自由度并联机构的仿生咀嚼机器人系统研究。E-mail: mdjyouxiang@163.com

的一个主要原因是检测平台的测试运动与人的咀嚼运动^[4]相去甚远,主要体现在测试环境和完成测试的运动方面,单一的上下直动不能反映人类咀嚼的空间六自由度运动。针对这些不足,本文提出了利用六自由度并联机器人^[5]构建检测平台的方案。检测平台如图 1 所示,主要包括:伺服电机、驱动杆、载物台、唾液室、伺服电动缸、机架、上颌骨、下颌骨、上平台、下平台、检测探头、电源模块、运动控制卡、数据处理与传送模块等。其中下平台、伺服电机、驱动杆和上平台构成了硬件的运动部分,即六自由度并联机构,检测探头安装在上颌骨平台上。

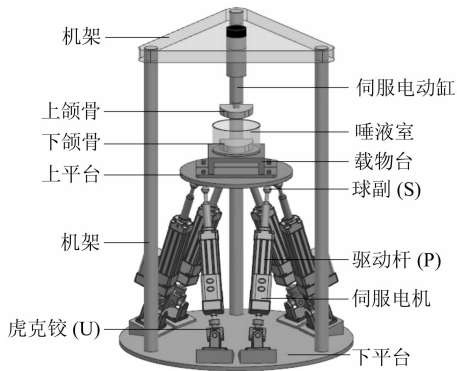


图 1 仿生咀嚼平台

Figure 1 Bionic chew platform

系统的工作过程:初始时,检测平台部分恢复初始状态,伺服电动缸运动到设定的基准坐标位置,系统根据仿人的咀嚼运动轨迹规划结果控制伺服电机转动,实现 6 根杆的伸缩运动,由 6 根杆的协同运动使上平台按预期的运动轨迹运动,从而实现对放在上颌骨上的食品做类人的咀嚼运动。在咀嚼运动的过程中向唾液室中实时的加入与人的唾液特性相近的液体,以实现检测过程的高仿真性。在运动过程中将传感器采集的信息经数据采集模块采集并传送至 PC 机的物性检测系统,在系统中完成原始数据的处理,并将数据保存到数据库中,系统根据各项物性值计算方法完成物性值的计算。操作人员还可以根据已建立口感预测方程对检测的物性值进行口感预测,或者依次进行感官评价统计、物性值与口感评价关系分析建立新的口感预测方程。

2 口感预测数学模型构建

食品质地性质属于食品的一种感官特性,只有人的感官才是质地性质测定的最佳工具。仪器测量出的是食品所具有的物理性质,不是人的感官性质。在一定条件下,食品质地的仪器测量值可以替代人的感官

评价,而这种替代只有建立食品物性测量值与感官评价之间的对应函数关系才能实现,即实现口感的预测功能。所以,需要对检测系统获得的质地特性值和感官评价结果 2 种数据之间进行数学建模。

用 y 表示感官评价,可用于表示感官物性(如感官硬度、感官咀嚼性等),用 $x_1, x_2, \dots, x_7$ 分别表示食品的硬度、黏着性、内聚性、弹性、咀嚼性、回复性、脆性^[6] 7 种物性值。假设随机变量 y 与 7 个自变量 $x_1, x_2, \dots, x_7$ 之间的相关关系是线性的,则 y 和 7 个自变量之间形成了 7 元线性函数,可用数学模型表示为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_7 x_7, \quad (1)$$

其中, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_7$ 是 8 个待估计参数,该参数的确定需要通过一定量的实验观察点来对其进行估计,对于每一观察点应满足

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_7 x_{i7} + \varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

式中: $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i7}$ 是 $x_1, x_2, \dots, x_7$ 的第 i 次测试值; y_i 是随机变量 y 的第 i 次测试值; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i$ 是 i 个两两之间独立并具有相同正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 关系的随机变量。

模型的矩阵表达形式为

$$Y = X\beta + \varepsilon, \quad (3)$$

$$\text{式中: } X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{17} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{27} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{n7} \end{bmatrix} \text{ 称为结构矩阵;}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}; \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_7 \end{bmatrix}; \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}。$$

根据最小二乘法的定义,必定有一个多维空间的面到各平面之间的偏差平方和最小,该空间面为

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_7 x_7, \quad (4)$$

式中 $\hat{y}$ 为由自变量 $x_1, x_2, \dots, x_7$ 确定的空间回归面的函数值。根据最小二乘法可知,口感预测模型的偏差平方和 Q 为

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (5)$$

式中 $\hat{y}_i$ 是将 $x_1, x_2, \dots, x_7$ 的第 i 次测试值代入式(4)求得。要使 Q 最小, $b_0, b_1, \dots, b_7$ 必须满足

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_j} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) x_{ij} = 0 \end{cases} (j = 1, 2, \dots, 7)。 \quad (6)$$

将式(6)展开,则

$$\begin{cases} nb_0 + (\sum_{i=1}^n x_{i1})b_1 + (\sum_{i=1}^n x_{i2})b_2 + \cdots + (\sum_{i=1}^n x_{i7})b_7 = \sum_{i=1}^n y_i \\ (\sum_{i=1}^n x_{i1})b_0 + (\sum_{i=1}^n x_{i1}^2)b_1 + (\sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i1})b_2 + \cdots + (\sum_{i=1}^n x_{i7}x_{i1})b_7 = \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ (\sum_{i=1}^n x_{i2})b_0 + (\sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2})b_1 + (\sum_{i=1}^n x_{i2}^2)b_2 + \cdots + (\sum_{i=1}^n x_{i7}x_{i2})b_7 = \sum_{i=1}^n x_{i2}y_i \\ \vdots \\ (\sum_{i=1}^n x_{i7})b_0 + (\sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i7})b_1 + (\sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i7})b_2 + \cdots + (\sum_{i=1}^n x_{i7}^2)b_7 = \sum_{i=1}^n x_{i7}y_i \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中只需要求解出系数 $b_0, b_1, \dots, b_7$ 就可以确定该多维回归面的函数。引入 $S_{P_{kj}}$ 和 S_{S_j} 2 个变量,且有

$$S_{P_{jk}} = S_{P_{kj}} = \sum_{i=1}^n x_{ij}x_{ik} - n\bar{x}_j\bar{x}_k (j=1,2,\dots,7), \quad (8)$$

$$S_{S_j} = S_{P_{jj}} = \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 - n\bar{x}_j^2. \quad (9)$$

特别的,当式(8)中的一个变量是 y 时

$$S_{P_{jy}} = \sum_{i=1}^n x_{ij}y_i - n\bar{x}_j\bar{y}, \quad (10)$$

式中, $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$, $\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik}$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 式(7)

可表示为

$$\begin{cases} b_0 = \bar{y} - \sum_{j=1}^7 b_j \bar{x}_j \\ \mathbf{A}\mathbf{b} = \mathbf{B} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{式中, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} S_{P_{11}} & S_{P_{12}} & \cdots & S_{P_{17}} \\ S_{P_{21}} & S_{P_{22}} & \cdots & S_{P_{27}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{P_{71}} & S_{P_{72}} & \cdots & S_{P_{77}} \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_7 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} S_{P_{1y}} \\ S_{P_{2y}} \\ \vdots \\ S_{P_{7y}} \end{bmatrix},$$

则

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} = \mathbf{C}\mathbf{B}, \quad (12)$$

式中, $\mathbf{C} = \mathbf{A}^{-1} [c_{ij}]_{m \times m}$ 称为相关矩阵^[7], c_{ij} 为高斯系数。

通过计算式(12)就可以求出多维线性回归面方程的全部系数,即求得口感预测函数方程。但是该方程还不能直接用于口感预测,还需要对方程的线性关系是否真实进行检验。首先,要验证函数方程的线性回归关系是不是显著;其次,在函数方程回归关系显著的基础上,要弄清各个自变量对因变量的线性影响是否显著。

在多元线性回归分析中, S_{S_T} 可以分解为 S_{S_R} 与 S_{S_r} 2 部分,也就可以写成

$$S_{S_T} = S_{S_R} + S_{S_r}, \quad (13)$$

式中, $S_{S_T} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2$; $S_{S_R} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = \sum_{j=1}^7 b_j S_{P_{jy}}$; $S_{S_r} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 。相应的,自由度 d_{f_T} 也可以分解为 d_{f_R} 和 d_{f_r} 2 部分,即

$$d_{f_T} = d_{f_R} + d_{f_r}, \quad (14)$$

式中, $d_{f_T} = n - 1$; $d_{f_R} = 7$; $d_{f_r} = n - 7 - 1$ 。构造统计量 F ,有

$$F = \frac{\frac{S_{S_R}}{d_{f_R}}}{\frac{S_{S_r}}{d_{f_r}}} - F(7, n - 7 - 1). \quad (15)$$

对于指定的显著水平 α , 如果 $F > F_\alpha(7, n - 7 - 1)$, 那么就拒绝假设 $H_0: \beta_j = 0, j = 1, 2, \dots, 7$, 这时认为方程在指定的显著水平 α 下是显著的, 相反则认定为不显著。自变量 x_i 对因变量 y 的影响程度, 用 S_{S_j} 表示, 其自由度为 1, 则

$$S_{S_j} = \frac{b_j^2}{c_{jj}}, \quad (16)$$

式中, b_j 为自变量 x_j 的偏回归系数, c_{jj} 为相关矩阵 $\mathbf{C}$ 对角线上的元素。得到偏回归平方和 S_{S_j} 后, 即可通过建

立统计量 $F = \frac{\frac{S_{S_j}}{1}}{\frac{S_{S_r}}{d_{f_r}}} = \frac{\frac{b_j^2}{c_{jj}}}{\frac{S_{S_r}}{d_{f_r}}}$ 对偏回归系数 b_j 的显著性做出验证。

为了能得到准确反映因变量和自变量 2 者之间相关关系的经验表达式, 常常需要对自变量做统计选择, 剔除那些影响不显著的因素, 获得最优口感预测方程, 以便能更精确地进行预测。

在剔除不显著自变量的过程中,若有多个自变量影响不显著,不能同时剔除所有的不显著自变量,而是逐一剔除不显著自变量,再重新进行口感预测函数构建分析,该系统中先剔除回归平方和最小的自变量,接着对余下的自变量进行口感预测函数构建分析,检验新的口感预测方程和检验新的偏回归系数,若仍然存在不显著因素,可再按上述步骤逐次剔除,直至得到最优口感预测方程。

可以证明,删减后的偏回归系数 b_j^* 和删减前的偏回归系数 b_j 之间存在如下的等价关系

$$b_j^* = b_j - \frac{c_{kj}}{c_{kk}}b_k (j=1,2,\cdots,7 \text{ 且 } j \neq k), \quad (17)$$

式中, c_{kj} 和 c_{kk} 是相关矩阵 $C_{m \times m}$ 中的元素。

最终求得最佳口感预测方程,根据以上最佳口感预测方程的理论推导编写程序,实现系统的口感预测功能。

3 实验验证与分析

3.1 实验材料选择

根据食品质地的力学特性分类方法^[8-9],选取胡萝卜、苹果、榨菜、花生、黏玉米、豆腐干、火腿、面包和饼干共 9 种固体食品作为试验用材料。

将胡萝卜、苹果和榨菜头清洗并去除外皮,然后用小刀沿纵向轴线切成厚度约为 8 mm 的薄片,用直径为 10 mm 的样本制备器制备样本,样本做成直径为 10 mm,厚度为 8 mm 的圆柱形。取没有破损和变质的,大小、长度相近的花生仁颗粒作为样品。将煮熟后的黏玉米剥粒,选取饱满的玉米粒作为样品。将豆腐干从包装中取出,用样本制备器做成直径为 10 mm 的圆片。将火腿用小刀切成厚度大约为 8 mm 的小段,然后用样本制备器将火腿做成直径为 10 mm,厚度为 8 mm 的圆柱体。同样对土司面包切成 8 mm 薄片,用样本制备器做成直径为 10 mm,厚度为 8 mm 的薄片。将饼干用小刀切成边长约 10 mm 的正方体样品,取没有裂纹的作为样品。样品制成后,立即用于测试,每次实验样品需重新制作。

3.2 实验数据

对以上 9 种样品分别进行感官评价和食品质地特性检测系统测试。对样品进行质地特性测试,每一种样本检测 10 次,求它们的平均值,如表 1 所示。

10 名接受过培训的评价员对样品进行感官评价,评价结果平均值如表 2 所示。

根据表 1 和表 2 数据,系统分析结果如图 2 和图 3 所示。

表 1 样品质地特性测试平均值
Table 1 Average value of sample texture

样品	硬度	脆性	黏着性	弹性	咀嚼性	回复性	内聚性
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
胡萝卜	7.10	4.30	0	0.70	1.39	0.60	0.28
苹果	3.70	1.90	0	0.67	0.67	0.34	0.27
榨菜	3.97	2.94	0	0.33	0.25	0.28	0.19
花生	4.31	0	0	0.39	0.29	0.22	0.17
粘玉米	2.86	0	-0.40	0.70	1.08	0.53	0.54
豆腐干	3.05	0	0	0.97	2.00	0.52	0.68
火腿	1.69	0	0	0.99	1.10	0.54	0.65
面包	0.80	0	-0.02	0.88	0.48	0.33	0.67
饼干	2.41	0	0	0.33	0.12	0.16	0.16

表 2 样品的感官评价平均值
Table 2 Average value of sample sensory evaluation

样品	感官硬度	咀嚼性	样品	感官硬度	咀嚼性
	$y_{\text{硬度}}$	$y_{\text{咀嚼性}}$		$y_{\text{硬度}}$	$y_{\text{咀嚼性}}$
胡萝卜	6.90	23.60	豆腐干	3.70	2.58
苹果	4.20	17.60	火腿	2.86	19.00
榨菜	4.40	16.00	面包	1.60	17.00
花生	5.12	15.80	饼干	3.10	9.60
黏玉米	3.30	20.20			

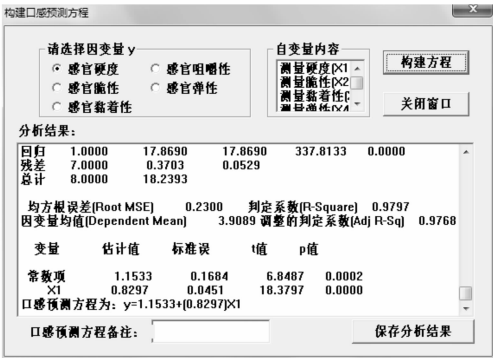


图 2 硬度预测方程的系统构建
Figure 2 System construction of hardness prediction equations



图 3 咀嚼性预测方程的系统构建
Figure 3 System construction of chewiness prediction equations

3.3 实验结果与分析

系统根据实验数据构建出感官硬度、感官咀嚼性与物性计算值之间的口感预测方程分别为:

$$y_{\text{硬度}} = 1.1533 + 0.8297x_1;$$

$$y_{\text{咀嚼性}} = 9.0841 + 2.8491x_1 + 12.5283x_3 + 22.9183x_4 - 20.4099x_5 + 41.6896x_6。$$

其中, $y_{\text{硬度}}$ 、 $y_{\text{咀嚼性}}$ 分别表示感官硬度和感官咀嚼性, x_1 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 分别表示物性检测系统测试的硬度、黏着性、弹性、咀嚼性、回复性。从方程可以看出感官硬度只与检测物性值硬度有关,而感官咀嚼性却与测试的硬度、黏着性、弹性和回复性成正相关关系,与咀嚼性成负相关,这与食品研究中的经验相符合。取火腿新样品进行物性测试,测试结果为: $x_1 = 1.73$, $x_3 = 0$, $x_4 = 0.96$, $x_5 = 1.70$, $x_6 = 0.52$ 。感官硬度评价值为 2.80, 感官咀嚼性评价值为 21.00。

用口感预测方程求解的感官硬度值 $y_{\text{硬度}} = 2.59$, 感官咀嚼性数值 $y_{\text{咀嚼性}} = 23.00$ 。与感官评价值比较发现计算值与感官评价值相近,误差分别只有 7.5% 和 8.7%, 满足实际应用的需要。证明了系统的口感预测功能的可信性,同时,口感预测函数所反映的物性值与口感评价间的相关性对新产品的开发具有很好的指导意义。

4 结语

本文从机械和操作系统 2 方面对新一代食品物性仿生检测系统进行研究。在机械部分创新性地将六自由度并联机构应用到了检测平台中,而在软件系统功

能方面,则提出了实现由物性检测值到食品口感预测的功能要求。基于数理统计原理和最小二乘法构建口感预测数学模型,建立了最优口感预测方程,并通过实验验证了口感预测方程模型构建的正确性及口感预测功能的可行性。

目前系统仍有一些不足,如计算食品物性前筛选原始数据中极大值和零点的方法需要创新。以及实验中用于构建口感预测方程的数据量相对较少,口感预测方程的准确性欠佳。所以,在以后的研究中,需要搜集更多的数据用于构建口感预测方程,提高口感预测结果的准确度。

参考文献:

- [1] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 96-100.
- [2] 胡亚云. 质构仪在食品研究中的应用现状[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(11): 101-104.
- [3] 杨世凤, 赵继民, 王秀清, 等. 基于虚拟仪器技术的食品物性检测系统的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 176-180.
- [4] 李娟. 不同年龄组正常人群的下颌运动轨迹及咀嚼月几表面肌电比较研究[D]. 昆明: 昆明医科大学附属口腔医院, 2013: 10-36.
- [5] 吴培栋. Stewart 平台的运动学与逆动力学的基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 1-12.
- [6] JOWITT R. The terminology of food texture [J]. Journal of Texture Studies, 1974, 5(8): 351-352.
- [7] 马立平. 回归分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 71-87.
- [8] 孙钟雷. 基于咀嚼模拟的食品质地评价研究[D]. 吉林: 吉林大学生物与农业工程学院, 2012: 45-81.
- [9] SUN Zhonglei, SUN Yonghai, WAN Peng, et al. Design and experiment on bionic chewing equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 214-218.
- [10] 郑加洲, 刘峰军, 王洪琪. 高速碟式分离机转鼓体结构有限元分析[J]. 江苏船舶, 2011, 28(3): 20-22.
- [11] 李盼. 基于有限元的碟式分离机应力分析与结构优化[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
- [12] 薛晓宁, 李盼, 何真. 胶乳离心机高速转鼓有限元接触分析[J]. 机械强度, 2014, 36(2): 233-242.
- [13] 中航燃气涡轮研究院. 高速滑环引电器使用说明书[Z]. 绵阳: 中航燃气涡轮研究院测控室, 2012.
- [14] Datatel Telemetry company. Datale2010GTE 旋转部件应变无线遥测系统使用说明书[Z]. 北京: Datatel Telemetry Company, 2012.
- [15] 张洪才, 何波. 有限元分析: ANSYS 13.0 从入门到实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [16] 孙启才, 金鼎五. 离心机原理结构与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [17] 濮良贵. 机械设计[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [18] 尹刚, 王德润. 分离机转鼓超速自增强最佳超速条件的研究[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 1988(3): 42-47.
- [19] 卡查科夫 H Φ, 马尔切诺夫 r A. 食品机械制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 159.
- [20] ANGHEL C I. A study concerning elastic analysis of disk centrifugal separators [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1997, 144(3): 275-285.
- [21] 林致远. 碟式分离机转鼓的强度计算及分析评定[J]. 轻工机械, 2013, 31(6): 80-82.
- [22] 张元祥, 梁利华, 吴将天. 分离机转鼓强度评定方法的对比研究[J]. 轻工机械, 2014, 32(2): 28-32.
- [23] 陈科, 黄海元, 郑红梅, 等. 基于 Workbench 的碟式分离机转鼓应力等效线性化分析[J]. 流体机械, 2014, 42(9): 31-34.
- [24] 朱跃峰, 陈德林, 蔡云辉. 基于有限元法的碟式分离机转鼓组件强度分析[J]. 机械设计与制造, 2013(6): 183-186.
- [25] 赵志国, 石博强, 王力, 等. 基于 ANSYS 的润滑油碟式分离机转鼓应力分析[J]. 煤矿机械, 2011, 32(2): 93-95.

(上接第 6 页)

参考文献: