

家禽悬挂输送机张力分析与在线称量方法研究

夏建春 王 俊 周曼箐 陈坤杰

(南京农业大学工学院, 南京 210096)

摘要: 针对家禽在悬挂输送过程中的在线称量需求,提出一种家禽在线称量方法。通过对家禽宰杀用悬挂链输送机牵引链的受力分析,建立牵引张力的力学模型,采用不同称量高度的方法,估算出链条牵引张力,再根据牵引张力计算出被称量物体的质量。仿真结果显示,通过仿真估算张力的方法计算得到的称量物体质量,偏差在 15.7 g 以内。如果根据测量得到的牵引张力计算出被称量物体质量,最大误差为 125.03 g。表明采用根据牵引张力得到被称量物体质量的方法实际可行,在进一步提高测量精度后能够实现家禽的在线称量。

关键词: 家禽; 悬挂链输送机; 在线称量; 牵引张力

中图分类号: TS251.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0232-07

Tension Analysis and Online Weighing Method of Poultry Suspension Conveyor

Xia Jianchun Wang Jun Zhou Manjing Chen Kunjie

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An online weighing method for poultry was proposed to meet the demand for online weight grading and weighting of poultry which were carried out on a suspension transportation device. The mechanical model of drawing tension was developed by a force analysis to suspension chain conveyors which was used for butchering the poultry. The method of different weighing heights was proposed to estimate the draw tension of chain and the weight of objects was calculated according to the estimated drawing tension. A weighting test device for the poultry weighting was established. At first, a simulation experiment was carried out and the Matlab and SimMechanics were used to simulate the procedure of online weighing. The results showed that correlation coefficient was 0.999 14 between D-value and drawing tension, and the object weight deviation from simulating estimation to drawing tension was within 15.7 g. Then the experiments were conducted on the same test device and the results showed that correlation coefficient was 0.76 and the correlativity between D-value and drawing tension was significant at a significant level of 0.10. The maximum error was 125.03 g when the object weight was calculated according to D-value. The study suggested that it was realistic to get the object weight on the basis of drawing tension, and the online weighing for poultry carcass could be realized through further improving the measurement accuracy.

Key words: poultry; suspension chain conveyor; online weighing; drawing tension

引言

国内外家禽屠宰加工均采用轻型悬挂链输送机

将各个家禽屠宰工序串接起来,加工时,禽体通过挂具悬挂在输送机上,沥血、脱毛和净膛等主要加工工序都在悬挂输送过程中完成^[1-3]。但是,由于缺乏

收稿日期: 2015-12-31 修回日期: 2016-01-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303083-2)

作者简介: 夏建春(1979—),男,讲师,博士生,主要从事农产品无损检测研究,E-mail: 17713469@qq.com

通信作者: 陈坤杰(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农副产品加工与检测研究,E-mail: kunjiechen@njau.edu.cn

合适的在线称量分级设备,目前国内大多数家禽屠宰加工企业中,家禽的质量分级工序却是采用将禽胴体从输送线上摘下,用人工称量的方法完成。不仅严重影响生产效率,而且还增加了禽胴体之间交叉污染的危险,文献[4]指出家禽检测需要非破坏性与非接触性。因此,研究开发家禽质量在线非接触式分级技术和设备具有实际意义。

目前,物体称量基本上都是接触式测量。对处于运动状态的物体,尤其是快速运动状态的物体进行接触式测量有很大的技术困难。虽然也有研究采用图像技术进行非接触测量^[5],但是目前,对在线称量的研究和应用,主要是对称量精度要求不高、同时对称量效率又有严格要求的场所或者行业,如轨道交通领域和公路交通等^[6-8]。研究内容主要集中在对动态称量信号的处理方面,如张西良等^[9-10]对动态称量信号采用离散小波变换实时处理的方法,结果表明对比 FFT 法,低频信号稳定时间减少至 0.128 s,相对误差为 -1.5% ~ 2%。刘杨等^[11]采用最小二乘支持向量机的方法对动态称量建立预测模型。庄育峰等^[12]则利用 BP 神经网络对微量药品的称量进行补偿。关于家禽在线称量分级方法、技术和设备方面的研究,国内外还鲜有报道。

牵引张力是悬挂输送机的主要作用力。通过牵引张力,悬挂链输送机克服运行阻力,达到输送物品的工作目的。这种牵引张力对在线称量的影响需要进行分析 and 探讨。因此,本文建立轻型悬挂输送链的牵引模型,研究张力作用对家禽在线称量的影响规律,在此基础上提出一种新型的家禽在线称量分级方法。

1 悬挂链输送机的结构与牵引模型

家禽屠宰用的悬挂链输送机主要由驱动装置、牵引链条、挂架吊具、轨道等组成,采用牵引方式驱动。工作时,牵引电动机带动牵引链条运行,挂架吊具均安装在牵引链上,牵引链上存在的张力拖动整个机构运行。其基本状态可以分为静止、启动、运行等。当悬挂链输送机处于静止状态时,为保证设备启动时的平稳运行,需要张紧牵引链条,因此,输送机在静止时,牵引链条上就具有一定的张力。此时的张力处处相等,可表示为

$$S(i) = S(i - 1) = \cdots = S(0) \tag{1}$$

式中 i ——挂具编号 S ——张力, N

在悬挂链输送机运行时,链条上的张力要克服阻力前进,张力造成悬挂链的伸长,链条可以用粘弹性模型^[13]表示,如图 1 所示。

用数学表达式描述为

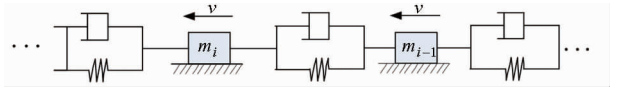


图 1 牵引链模型

Fig. 1 Drawing chain model

$$S(i) = m_i x'' + Cx' + K(x_i - x_{i-1}) \tag{2}$$

式中 m_i ——第 i 处链条与链上承载物质量, kg

C ——阻尼系数 K ——刚度系数

x ——链条伸长距离, m

考虑到悬挂链输送机是牵引挂具进行移动,根据有限元的基本原理,将牵引链进行分割,对于整个牵引链上的某一挂具,建立模型为

$$\frac{dm_i x'_i}{dt} = S(i) - S(i - 1) - W_i \tag{3}$$

其中

$$S(i) = Cx'_i + K(x_i - x_{i-1})$$

$$S(i - 1) = Cx'_{i-1} + K(x_{i-1} - x_{i-2})$$

$$W_i = \mu m_i \tag{4}$$

式中 $S(i - 1)$ ——挂具后牵引链上的张力, N

W_i ——挂具运行时的阻力, N

μ ——摩擦因数

输送机采用一个驱动轮和一个从动轮的单驱方式,则驱动轮和从动轮的模型如图 2 所示。

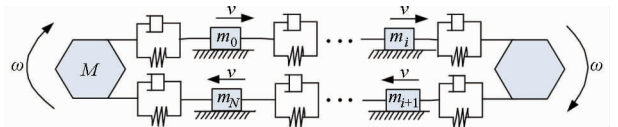


图 2 悬挂链输送机整机模型

Fig. 2 Suspension chain conveyor model

主动轮是由主轴电动机驱动,能够提供力矩 M 。根据粘弹性模型,有

$$J_z \varphi'' + K_z(\varphi_0 - \varphi_N) + C_z(\varphi'_0 - \varphi'_N) = M \tag{5}$$

式中 J_z ——主动轮的转动惯量, N·m

φ ——链条的转动角度, rad

φ' ——链条角速度, rad/s

φ'' ——链条角加速度, rad/s²

K_z ——主动轮刚度系数

C_z ——主动轮阻尼系数

N ——输送机行走方向最后一个挂架的编号

对于从动轮,其运动由牵引链进行牵引转动,因此有

$$J_z \varphi'' + K_z(\varphi_{i+1} - \varphi_i) + C_z(\varphi'_{i+1} - \varphi'_i) = (S_{i+1} - S_i) R \tag{6}$$

式中 R ——从动轮半径

式(3)、(5)、(6)构成了悬挂链输送机在整个运行期间牵引链的张力模型^[14]。基本张力分布如图 3 所示。

图 3 中,用箭头长短表示张力大小,方向沿着链

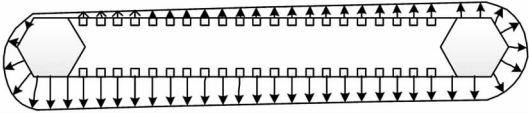


图 3 张力分布图
Fig. 3 Distribution of tension

条。主动轮与链条的分离点处,张力可以认为等于初始预张力,沿着链条前进方向,张力逐渐增大。由于称量时,一般均处于匀速运行工况,因此称量时是不考虑式(5)和式(6)的,同时式(3)中 $\frac{dm_ix'_i}{dt}=0$ 。张力沿着链条每经过一个吊具,张力增加 W_i 。作为连续输送机械,可以认定摩擦因数恒定,张力的 size 只与负载的大小相关。

若忽略链条、主被动轮间隙与机加工工艺的差别,可以做出如下假设:从分离点分离出一个挂具到分离出下一个挂具时,链条上张力大小固定不变。根据图 2 的模型,只要将称量平台设置在主动轮、牵引链分离点与从动轮、牵引链的接入点之间,牵引张力就可以减少对从动轮的牵引,从而减少从动轮的干扰。

2 忽略张力变化时的称量

称量实际上就是要检测运行过程中,挂架吊具所承受的向下的力。根据力平衡原理,就是测量运行轨道上承受的力。由力学分析可知,输送机轨道上承受的力 F 主要由以下几部分组成:被测对象物体受到的重力 M_0 、吊具本身受到的重力 M_1 、牵引链上的张力向下的分力 $S_c(x)$ 。

F 可以表示为

$$F = M_0 + M_1 + S_c(x) + \Delta \tag{7}$$

式中 Δ ——误差

M_0 是要测量的对象值, M_1 在一定范围内变化幅值很小,本文暂时忽略其变化。而对于 $S_c(x)$,由前面的分析可知,在同一位置,理论上链条张力应该固定。

根据图 4 将链张力分解,理论认为 $S_c(x)$ 也是固定的。因此,本文在悬挂链输送机上选取了固定位置,进行质量的测定。

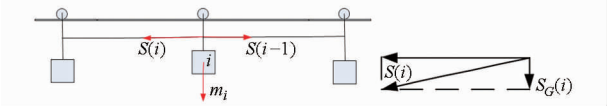


图 4 张力的分解
Fig. 4 Decomposition of tension

悬挂链输送机是一种轨道式结构,轨道称量方式主要有断轨式和不断轨式。MELI 等^[15]将轨道列车称量分为 4 种称量方式,分别为轨道剪力测量、轨

道弯矩测量、枕木传感器测量和轨道桥式测量。其中,轨道桥式称量方式是在列车运行的轨道上去除一段轨道,在缺失部位用称量平台代替,类似搭建一座桥梁。列车运行时,列车的车轮会在一定时间内在称量平台上运行,此时安装在称量平台下的称量传感器的测量数值可以反映列车轴重数据。

参照轨道桥式称量方式,如图 5 所示将悬挂链输送机的轨道断开,构成断轨式称量平台,在称量平台两端的支撑处加装 10 kg 称量传感器,5 V 的电压输出,以 LabVIEW 8.6 为测量软件,利用研华 USB4716 作为数据采集装置,构成称量检测平台。当空挂具由牵引链条拖动时,选用 5 组空载挂具,由牵引链牵引通过称量平台,检测悬挂吊具承受的向下的力。测量结果如表 1 所示。

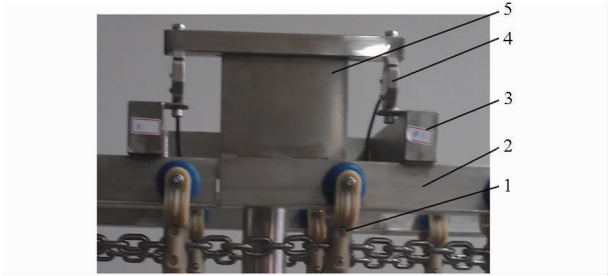


图 5 轨道桥式称量平台

Fig. 5 Bridge weighing table

1. 支架 2. 轨道 3. 基础 4. 称量传感器 5. 称量平台

表 1 空载称量结果

Tab. 1 No-load weighing results kg

序号	被测物体质量	测量值	绝对偏差
1	0	4.44	0.784
2	0	2.66	0.996
3	0	2.70	0.956
4	0	3.14	0.516
5	0	5.34	1.684

挂具的质量经过测量为 (830 ± 3) g,平台的质量恒定,被测对象均为 0 kg。但是在表 1 中,称量传感器测得的质量信号却有很大的变化,最大偏差达到 1.684 kg。造成这个结果的原因,主要是悬挂链输送机在不断运行过程中,环境温度变化、链轮磨损变化以及载荷的变化等甚至挂具上的承载轮滚动与否,都会导致每一组挂具从主动轮上分离后,链条的张力发生较大改变。测试显示,张力变化引起垂直方向绝对偏差的变化达到 1 kg 以上。因此,在链条上张力不断变化情况下,直接对挂具载荷进行测量几乎不可能,必须将质量载荷信号中的张力部分分解出来,才可以得到准确结果。

3 张力影响下的在线称量

严荣涛^[16]认为在胶带秤进行动态测量时,胶带

上张力的变化会对称量精度造成影响。若采用悬浮式结构,使胶带上张力成为系统内力,则可以获得较为理想的测量精度。但对于悬挂链输送机,结构的限制导致张力无法转换成测量系统内力,同时由于链条存在跳动及运行角度的变化,也使得张力难以控制与测量。

目前对于链条或绳索等装置张力的测量,主要采用压力传感器法、频率法等。黄刚等^[17]用压力传感器间接测量出胶带在传送时的张力。王增梅等^[18]则将链条上的链节替换成带电阻应变片的弹性链片,然后直接对链条上的张力进行测量。但是,在对挂具上的物体进行称量时,由于挂具上物体质量的不同,导致链条上的张力在不断变化,因此,上述 2 种方法均不适合于链条张力的在线测量。

根据第 2 节对牵引张力的分析,称量平台可以简化为图 6 的方式。

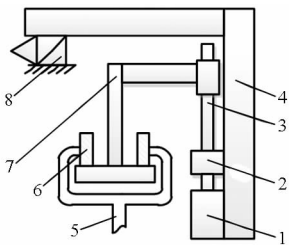


图 6 浮动称量平台示意图

Fig. 6 Float weighing platform

- 1. 伺服电机 2. 轴承 3. 丝杆 4. 底座 5. 支架 6. 承载轮
- 7. 称量平台 8. 称量传感器

图 6 为浮动式称量平台,主要由伺服电机、丝杆、称量平台、传感器等组成。称量对象由电机丝杆支撑。当称量对象经过称量平台时,电机快速旋转,推动平台上升,测试出当前牵引链的张紧程度后,平台再迅速下降,回归原位。根据测试出的当前牵引张力,再计算当前称量对象的质量。

3.1 受力分析

当系统运行时,称量平台两端安装有称量传感器,牵引链带动挂具经过称量平台上时,平台抬升,形成称量平台在 2 个位置对称量对象进行测量。

当输送机运行时, $S(i)$ 是当前挂具链条张力,根据式(3), $S(i)$ 与 W_i 以及 $S(i-1)$ 相关, W_i 只与摩擦因数和垂直于轨道的力相关。由于摩擦因数 $\mu \ll 1$,当挂具在系统运行一个挂具距离时,可以认为 W_i 不变。因此,在主动轮分离出下一个挂具时, $S(i)$ 可以认为不变。在此基础上,测量位置变化引起的检测数值才有意义。

如图 7 所示,挂具的承重轮进入称量平台后会经过 2 段不同称量高度。将称量平台视为高低 2 段,当承载轮进入低位段时,由于链条的变化,根

据模型有(虎克定律)

$$S(i)_1 = K\Delta x_1 \tag{8}$$

当承载轮进入高位段时,有

$$S(i)_2 = K\Delta x_2 \tag{9}$$

式中 Δx_1 、 Δx_2 ——链条伸长量

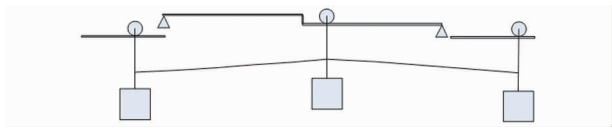


图 7 称量动作示意图

Fig. 7 Action of weighing

因此可以认为当前链条上张力增加了 $K(\Delta x_2 - \Delta x_1)$,二者存在关系为

$$\Delta x = \Delta x_2 - \Delta x_1 = \sqrt{l^2 - h_2^2} - \sqrt{l^2 - h_1^2} \tag{10}$$

式中 l ——挂具之间牵引链的长度,m

h_1 、 h_2 ——2 段称量平台相对轨道的高度,m

在竖直方向上,由张力产生的作用力可以表示为

$$\begin{cases} S(i)_{1G} = S(i)_1\alpha_1 \\ S(i)_{2G} = S(i)_2\alpha_2 \end{cases} \tag{11}$$

α_1 与 α_2 是竖直分量系数,当结构固定时这 2 个参数为固定值。当称量平台上升时,此时有关系式

$$S(i)_{2G} - S(i)_{1G} = S(i)_1(\alpha_2 - \alpha_1) + K\Delta x\alpha_2 \tag{12}$$

式(12)可以简化为

$$S(i)_1 = a(S(i)_{2G} - S(i)_{1G}) + c \tag{13}$$

式中 c ——常数 a ——待定系数

根据式(13),2 段垂直方向测量值的差值与牵引链上张力为线性关系。如果测量出 2 段垂直方向的受力差值,就可估计出当前张力。根据式(7)有

$$M_0 = F - M_1 - ab(S(i)_{2G} - S(i)_{1G}) - bc + \Delta \tag{14}$$

式中 b ——待定系数

式中 ab 可以合并,本文定义为差值的垂直分量系数。通过式(14)在称量时剔除张力的影响,可以估计出被称物体的质量。

3.2 仿真分析

采用 SimMechanics 建立牵引链运动受力模型^[19],基本单元采用质点方式。在模型上加载不同的张力,利用铰接传感器检测铰接处的反馈信号。

将链节作为基本单元连接起来形成链条,在连接处放置称量对象。

图 8 的仿真主要运行环境为 Windows 8.1, Matlab 2013RB,主要仿真参数如表 2 所示。

在仿真图中所有的实物被简化成质点,如图 9 所示。

在检测物下面的约束铰链上,加装有反应力传

仿真结果与均值的最大偏差为 15.7 g。仿真结果作为分级依据是可以被接受的。

3.3 试验分析

称量平台搭建完成之后,在主动轮处安装编码器用于检测运行位置。主动轮采用三菱变频器驱动,变频器设置为速度模式,使输送机处于匀速运行状态。使用研华 USB4716 发送脉冲信号控制伺服电机,同时采集称量信号并检测到位信号与编码器信号。采用 LabVIEW 8.6 作为开发平台。图 13 表示本文的数据采集系统。

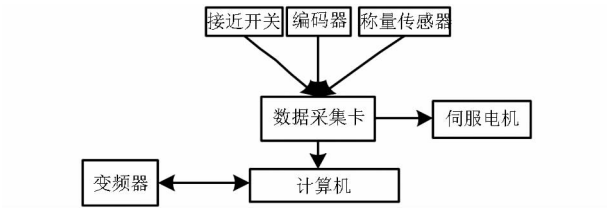


图 13 数据采集结构图
Fig. 13 Structural diagram of DAQ

当接近开关接收到称量对象的到位信号时,数据采集卡采集称量传感器的信号,当编码器计数到一定时,驱动伺服电机旋转,将称量平台抬升 5 mm,使得称量平台处于不同位置。同时通过通信检测变频器输出电流的变化,监测整个系统的张力变化状况。由于通信方式实时性较差,本文没有将变频器输出电流参与到链张力估计中。当编码器提示牵引轮将离开称量平台时,驱动称量平台下降 5 mm,保证输送机运行的平稳。

在运行时, $S(i)$ 无法直接测量,但是根据文献[17],可以认为如果悬挂链上没有载物,此时悬挂链上的张力与称量传感器上的信号成正比关系。

以称量平台的低位信号间接作为牵引链张力信号,与称量平台的高低位不同称量信号差做对比。试验基本环境采用表 4 中的参数。

图 14 是计算机采集到的原始数据,采用

表 4 试验参数

Tab. 4 Experiment parameters

参数	数值
称量对象质量/kg	0
测量运行平台	轻型悬挂链输送机
称量传感器规格	S 型 15 kg
承载轮、支架质量/g	830
材料	铝合金
链条长度/m	0.02
链节数量	每段 5 节
链节直径/m	0.01
运行速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.02
上升距离/mm	5

Kalman 滤波算法对原始数据进行滤波,然后取平稳处的均值。得到低位测量值与高位测量值,计算出高低位差值。

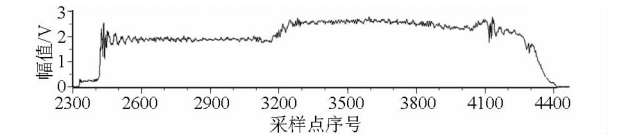


图 14 测量结果
Fig. 14 Result of experiment

对差值与低位测量值进行回归分析(图 15),显著性 P 为 0.0409,差异一般性显著。相关系数为 0.76,表明差值与张力有一定的相关性。在估计被称量对象质量的运算中,采用运算方式不同于仿真。这是由于在试验中,称量平台的几何尺寸,包括安装位置很难得到精确测量。在进行数据处理时,本文将试验结果分成两部分,其中一部分以称量对象为 0 g 估计 2 段差值的垂直分量系数,然后将得到系数值用来做另一部分试验结果的称量对象的质量估计。这里采用与真值的误差对结果进行评价,结果如表 5 所示。

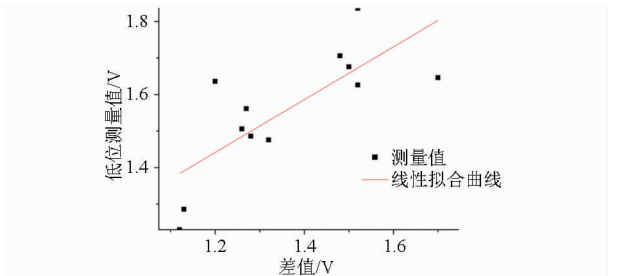


图 15 试验差值-低位测量值回归曲线
Fig. 15 Regression curve of D-value and observed value

表 5 试验结果
Tab. 5 Experiment result

序号	差值/V	低位测量值/V	质量估算值/g
1	0.203	0.392	-28.90
2	0.142	0.412	41.56
3	0.192	0.372	-79.94
4	0.226	0.374	-83.72
5	0.203	0.370	-88.30
6	0.237	0.384	-59.69
7	0.269	0.363	-125.03

测量值与实际值的最大误差为 125.03 g,平均误差为 72.45 g。虽然较仿真结果有明显误差,但相较于忽略张力变化时的试验结果,测量精度有显著提高。该研究结果表明,悬挂链牵引张力可以通过本试验装置实时测量出来。根据所得到的实时张力数值,可以对物体进行实时称量。因此,通过本方法,可以实现对家禽加工的在线称量。但是还需要进行进一步的研究以及对称量平台的优化,以便将测量误差控制在一定范围。

4 结论

(1) 悬挂链输送机的链条张力对称量有显著影响,称量时不可以忽略。如果采用让链轮通过不同高度称量平台,可以得到张力引起的垂直分量的变化值。根据变化差值乘以差值的垂直分量系数估算出当前牵引链张力的垂直分量,对质量数据进行测算,可以实现对家禽加工的在线称量。

(2) 试验采用浮动式称量平台,得到的 2 段称

量位置的差值与低位测量值的相关系数达到 0.76,表示了差值与牵引链张力相关。并利用差值估计被称量物体的质量,结果最大误差为 125.03 g,平均误差达到 72.45 g。表明本文采用的称量方式有一定的应用价值。

(3) 对于在数据处理时使用的差值垂直分量系数,仿真过程中是根据称量平台结构计算出的,试验过程中采用的是估计出的结果,都是固定值。从试验的结果来看,应该不断修正。

参 考 文 献

- 1 张先达,叶金鹏. 国内外家禽屠宰加工技术的现状与发展趋势的探讨[C]//中国机械工程学会包装和食品机械学会第一届年会论文集,1989.
- 2 潘金龙,叶金鹏,王子戡,等. 2020 年我国家禽屠宰技术装备发展战略[C]//中国机械工程学会包装与食品工程分会 2010 年学术年会论文集,2010.
- 3 EDUARDO Cervantes Lopez. Poultry processing and the importance of staff performance[J]. Poultry International, 2012, 51(7): 42-45.
- 4 SAMS A. 商业化家禽加工中的屠体质量在线检测技术[J]. 中国家禽, 2007, 29(18): 58-60.
- 5 SUN LI, YUAN Leiming, CAI Jianrong. Egg freshness on-line estimation using machine vision and dynamic weighing[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(4): 922-928.
- 6 JACOB B, BEAUMELLE V F La. Improving truck safety: potential of weigh-in-motion technology [J]. IATSS Research, 2010, 34(1): 9-15.
- 7 郭兰英,梁波,董安国. 汽车动态称重的新方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(2): 98-101.
- 8 耿少波,石雪飞,阮欣. 基于桥梁结构的动态称重系统算法研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2011, 24(4): 40-44.
- 9 GENG Shaobo, SHI Xuefei, RUAN Xin. Algorithm analysis of bridge weigh-in-motion system based on bridge response[J]. Journal of Shijianzhuang Tiedao University: Natural Science, 2011, 24(4): 40-44. (in Chinese)
- 10 张西良,纪开荣,李萍萍,等. 混合式定量称量系统动态特性分析及数字补偿[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 117-119.
- 11 ZHANG Xiliang, JI Kairong, LI Pingping, et al. Study on dynamic characteristic and digital compensation of hybrid quantifying-weighing system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 117-119. (in Chinese)
- 12 张西良,杨伟玲,李萍萍,等. 动态称量信号小波变换强制性阈值去噪方法[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2009, 30(3): 228-231.
- 13 ZHANG Xiliang, YANG Weiling, LI Pingping, et al. Compelling threshold denoise method of wavelet transformation on dynamic weight signal[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(3): 228-231. (in Chinese)
- 14 刘杨,蒋庆,桑迎平. 最小二乘支持向量机在动态称重系统中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2013(12): 170-172.
- 15 LIU Yang, JIANG Qing, SANG Yingping. Application of least squares support vector machine in dynamic weighing system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(12): 170-172. (in Chinese)
- 16 庄育锋,胡晓瑾,翟宇. 基于 BP 神经网络的微量药品动态称重系统非线性补偿[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1914-1920.
- 17 ZHUANG Yufeng, HU Xiaojin, ZHAI Yu. Nonlinear compensation of micro scale capsule dynamic condition weighing unit based on BP neural network model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1914-1920. (in Chinese)
- 18 金丰年,浦奎英. 关于粘弹性模型的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 355-361.
- 19 JIN Fengnian, PU Kuiying. Discussing of visco-elastic models[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4): 355-361. (in Chinese)
- 20 林相东. 采煤机牵引链动态特性分析[J]. 阜新矿业学院学报, 1991, 10(1): 59-65.
- 21 MELI E, PUGI L. Preliminary development, simulation and validation of a weigh in motion system for railway vehicles[J]. Meccanica, 2013, 48(10): 2541-2565.
- 22 严荣涛. 皮带张力变化对电子皮带秤动态称量精确度的影响[J]. 自动化仪表, 1991(8): 10-15.
- 23 黄刚,李文强. 称重传感器在带式输送机胶带张力测试中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2007(1): 121-123.
- 24 HUANG Gang, LI Wenqiang. Application of weight sensor in the system of belt conveyor's tension testing [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2007(1): 121-123. (in Chinese)
- 25 王增梅,刘信声,谢大吉. 链条张力测试系统的研制[J]. 仪表技术与传感器, 1996(10): 29-31.
- 26 WANG Zengmei, LIU Xinsheng, XIE Daji. Development of a system measuring tensions in chains[J]. Instrument Technique and Sensor, 1996(10): 29-31. (in Chinese)
- 27 王英波,黄其涛,郑书涛. Simulink 和 SimMechanics 环境下并联机器人动力学建模与分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(1): 100-105.
- 28 WANG Yingbo, HUANG Qitao, ZHENG Shutao. Dynamic modeling and analysis of a parallel manipulator using Simulink and SimMechanics[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(1): 100-105. (in Chinese)
- 29 张建伟. Origin 9.0 科技绘图与数据分析超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社, 2014.