

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.065

# 基于压力分布测量系统的奶牛跛行早期识别

杨丽娟 张永 刘德环 徐彬腾 刘彩霞

(内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 奶牛跛行导致奶牛的生产性能下降,以致过早的被淘汰,给养殖场带来严重的经济损失,对奶牛跛行早期进行识别是最佳的解决办法。采用美国 Tekscan 公司生产的 Walkway(压力测量步道)搭建压力分布测量系统,利用光电传感器设计触发电路,同步触发启动和停止测量系统,数据采集后利用分析软件进行数据处理和分析,计算单个或多个步态参数,获取其数据表和曲线。以人为测试对象的前期试验结果表明:基于 Walkway 搭建的压力分布测量系统对经过其表面的压力数据提取、分析,得到的步态参数值能够实时反映测试对象相应的运动状态,且提取速度快、准确度高;该测量系统用于步态分析是可行的,且为后期奶牛跛行早期的识别奠定了理论基础,为奶牛养殖场实现无人监督的自动步态检测提供了可能。

**关键词:** 奶牛;跛行;早期识别;Walkway;压力分布

**中图分类号:** S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0426-07

## Early Recognition for Dairy Cow Lameness Based on Pressure Distribution Measurement System

Yang Lijuan Zhang Yong Liu Dehuan Xu Binteng Liu Caixia

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

**Abstract:** Lameness in dairy cow has been reported to be a critical economic factor and a vital animal-welfare issue for the dairy industry around the world. Lameness necessitates medical treatment reduces milk production, results in decreased body condition, impairs reproduction performance, and adversely impacts the social status of animals. Economically, lameness is reported to be the third most cost problem for dairy herds following mastitis and sub-fertility. So it would be the best way if the early symptoms of lameness could be recognized. Based on the Walkway (pressure measurement trail) which was produced by America Tekscan Company, the photoelectric sensor was used to trigger the electric circuit, which will also trigger the start and stop measuring system. After the obtainment of data, the analysis software was used to do disposal and analysis work, compute single or multiple gait parameters, as well as catch the data tables and curves. In the preliminary experiment, with the human being as the test objects, the result showed that the gait parameters which based on extraction and analysis of the surface pressure using the pressure distribution measurement system built by Walkway, could reflect the real-time motion state of the test subjects, and the extraction work would be faster, also with a higher degree of accuracy. That means the measurement system could be used to analyze the gait parameters, which also lays a theoretical foundation of recognition for the early stage lameness afterwards, making it possible to achieve unsupervised automatic gait detection in the future.

**Key words:** dairy cow; lameness; early recognition; Walkway; pressure distribution

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61563042)

作者简介: 杨丽娟(1992—),女,硕士生,主要从事数字化装备及自动控制技术研究,E-mail: 3141265030@qq.com

通信作者: 张永(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事数字化装备及自动控制技术研究,E-mail: yongz@imau.edu.cn

## 引言

奶牛跛行病是仅次于奶牛乳房炎的第二大类影响奶业发展的疾病<sup>[1]</sup>。奶牛跛行病发生率高,奶牛跛行后,会严重影响奶牛的正常生理活动,而且降低产奶量和繁殖能力。随着跛行程度的加重,奶牛体重和体况下降越来越严重,致使青年奶牛被过早淘汰<sup>[2-4]</sup>,这对于奶牛养殖业来说是巨大的损失。奶牛在早期跛行时不易被察觉,很容易错失最佳的治疗时间。因此开展对跛行病的早期识别研究对奶牛养殖业的健康发展十分有必要。

在跛行的早期识别中,通过对蹄底压力分布的研究可以确定跛肢以及跛肢蹄底的具体病变位置,是判断跛行的重要依据。压力分布的测量和分析,在各行各业的研究和发展中都起着极其重要的作用<sup>[5-8]</sup>。1882年,英国 MURRAY 率先对足底压力分布测量技术进行研究<sup>[9]</sup>,通过测量足部在塑性地面上的外部轮廓,分析判断足底压力的分布。随着科学技术的发展,计算机技术的普及与压力测量仪器等新型传感技术的快速发展,压力分布的测量技术得到进一步的发展。目前,关于足底压力测量技术的应用领域<sup>[10]</sup>主要有:步态分析<sup>[11]</sup>、临床医学和康复医疗<sup>[12]</sup>、运动鞋设计<sup>[13]</sup>等。足底压力的测量工具主要有压力鞋及鞋垫<sup>[14-16]</sup>、测力台、压力测量板等。可穿戴的压力鞋垫在近年来受到各领域研究人员的关注,并致力开发更为精确、轻便的产品,但是压力鞋薄膜材料的输出信号弱,国内外应用压力鞋垫的对象都是人或者机器人,对于本文的研究对象奶牛而言,由于其蹄部形状的特殊性,故无法将压力鞋或鞋垫应用于奶牛的蹄部压力测量。由于测力板或者测力台的压敏元件多、输出响应快、频率高,多采用柔性薄膜网状传感器,且具有完善的数据采集系统和分析软件等优点,能够适用于动物足底压力测量与分析。如美国 Tekscan 公司<sup>[17-21]</sup>生产的 Walkway——压力测量步道(以下简称 Walkway)采集到的压力数据精确、快速、直观,现主要应用于体型较小的动物(猫、狗等)的步态分析和手术后的康复治疗,但未见与本文类似的将其应用于奶牛或其他牲畜类的步态分析的相关研究。而猫、狗的体型和爪部结构与奶牛的体型和蹄部结构明显不同。因此,进行 Walkway 测量技术在奶牛步态分析中的应用研究,对奶牛跛行的早期识别很有必要。

为此,本文采用 Walkway 搭建压力分布测量系统(以下简称测量系统),利用光电传感器同步触发启动和停止测量系统。在前期研究阶段,先以人作为试验的测试对象,对搭建的测量系统的准确性和

可靠性进行试验验证,避免直接以奶牛作为测试对象对测量系统造成不可挽回的损伤或破坏,为后期以奶牛作为测试对象试验时判断奶牛跛行奠定理论基础。

## 1 测量系统组成及特点

测量系统主要由 Tekscan 公司生产的 Walkway、信号采集系统和计算机组成。通过外接光电传感器同步触发启动和停止,将采集的数据上传至计算机,利用软件进行数据处理和分析。

### 1.1 Walkway 结构及原理

Tekscan 的专利技术即柔性薄膜网络状触觉压力传感器<sup>[23]</sup>,它是一种基于矩阵的薄膜压力传感器,由 2 片很薄的聚酯薄膜组成,其中一片薄膜内表面铺设若干行的带状导体,另一片薄膜的内表面铺设若干列的带状导体。导体本身的宽度以及行间距可以根据不同的测量需要而设计。导体外表涂有特殊的压敏半导体材料涂层。当 2 片薄膜合为一体时,大量的横向导体和纵向导体的交叉点就形成了压力感应点阵列。当外力作用到这些感应点上时,半导体的阻值会随外力的变化而成比例变化,由此来反映感应点的压力。即压力为零时,阻值最大;压力越大,阻值越小,从而可以反映出两接触面间的压力分布情况。本测量系统应用 Tekscan 公司生产的 4 片感测片组合成一体,单片感测片厚度为 0.1 mm,组装后 Walkway 厚度为 0.57 cm,感应点 9 152 个,分辨率达到 1.4 感应点/cm<sup>2</sup>,压力测量范围为 0 ~ 862 kPa,精度误差为  $\pm 5\%$ 。Walkway 实物图如图 1 所示。



图 1 Walkway 实物图

Fig. 1 Figure of Walkway

系统通过扫描和测量每一个施力单元的电阻变化确定表面力的幅值和时间特征,使用 Walkway 的配套分析软件,得到实时二维或三维图像。系统的扫描频率为 0 ~ 440 Hz。

### 1.2 信号采集系统

信号采集系统包括数据采集器和 USB 集线器两部分,主要功能是完成对多点多通道信号的分时采样,时间连续信号经采样后变为离散时间序列,并

将信号的采样值由 A/D 转换器转换为幅值离散化的数字量以适应计算机的工作。

Walkway 由 4 片感测片组成,利用电缆将 4 片感测片的数据采集器接口进行封装并拉出引线,引出 4 个网线数据接口,与 2 个数据采集器连接。数据采集器实物图如图 2 所示。输出的数据通过带有 USB 接口的通用集线器发送到计算机。



图 2 数据采集器实物图  
Fig. 2 Figure of data collector

### 1.3 Walkway 的分析软件

软件 Walkway 7.6 主要有 6 个功能模块:数据采集器的控制、压力分布实时显示、感测片的校准、采集数据的记录方式、步态参数的分析以及数据的保存和导出。

## 2 同步触发方案设计

为实现测量系统的自动启动和停止,在测量系统的一侧架设挡板,在挡板的两端安装反射板,反射板的正对侧是 2 个发光二极管。当测试对象经过发光二极管 1 时,测量系统启动,开始记录数据。测试对象通过测量系统后到达发光二极管 2 处,停止测量系统。触发方案设计示意图如图 3 所示。

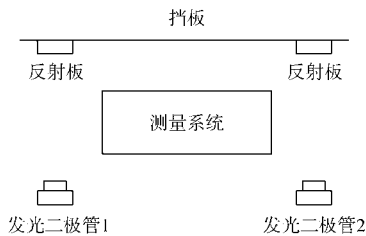


图 3 触发方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of trigger circuit

### 2.1 光电式传感器的工作原理和组成

光电式传感器是利用光电器件把光强度的变化转换成电信号的变化来实现控制的装置<sup>[25]</sup>。其主要由光源、光学元件和光电元件 3 部分组成。本设计采用透射(遮光)式光电传感器进行测试对象的到达和离开检测。测试对象位于恒定光源与光电元件之间时,光源发出的光通量经测试对象遮去一部分,使作用在光电元件上的光通量减弱,减弱的程度

与测试对象在光学通路中的位置有关,利用这一原理实现对测量系统的同步触发功能。

### 2.2 触发电路的设计

设计一个触发电路,使该电路既能实现光电信号的转换,又能够实现电信号的放大,为后续电路匹配所需的电平。当测量系统检测到该高电平信号时,测量系统便进入触发状态,信号采集系统启动即开始对压力数据实时采集,并将采集的数据上传至计算机内保存、处理。触发电路设计如图 4 所示。触发电路的设计避免了人工实时观看进行手动启动测量系统,使该测量系统更加自动化和智能化。

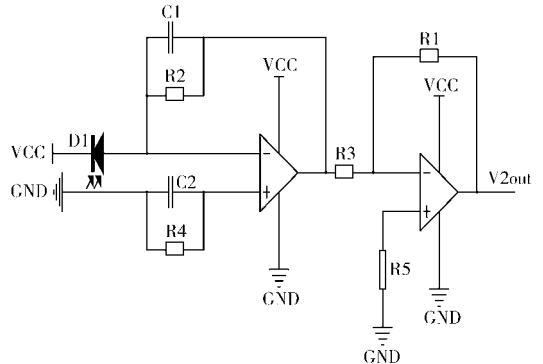


图 4 光电触发电路图

Fig. 4 Circuit of photoelectric trigger

### 2.3 触发过程分析

触发过程图如图 5 所示。发光二极管 1 和发光二极管 2 向反射板发出恒定光源,当测试对象经过发光二极管 1 时,挡住了光束,测试对象被检测出来,产生脉冲信号,脉冲信号经放大电路放大后作为启动测量系统的触发信号,此时信号采集系统启动,分析软件开启实时记录功能,对测试对象经过 Walkway 的过程中产生的压力数据快速采集传输到计算机内;当测试对象经过 Walkway 到达发光二极管 2 处,再次被检测出来产生一脉冲信号,此信号被放大电路放大后作为停止测量系统的触发信号,此时信号采集系统被停止,数据上传至计算机用来进行软件分析。

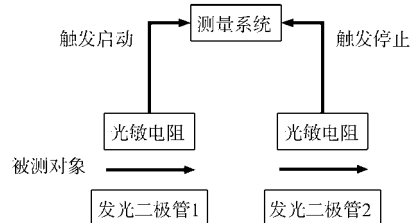


图 5 触发过程图

Fig. 5 Trigger process

### 2.4 测量系统运行流程

接通电源后系统初始化,等待启动触发信号,检测到触发信号则启动信号采集系统开始数据采集。

测试对象通过测量系统后,到达第2个发光二极管处,启动停止触发信号则停止数据采集,并将数据上传至计算机进行数据处理与步态分析,完成一次测试过程。如果长时间未检测到停止触发信号,警报提醒数据采集异常,系统恢复初始化,重新等待启动触发信号。运行流程图如图6所示。

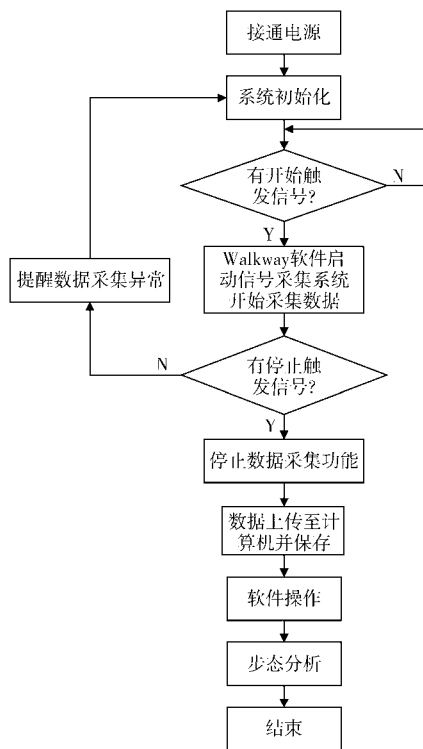


图6 测量系统运行流程图

Fig. 6 Operation flow chart of measurement system

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 试验前期准备

为使采集的压力数据真实可靠,需做如下试验准备:

(1)系统清理:小的硬质物体都会影响测量结果。若 Walkway 上存在硬质物体(小沙粒等),当踩到这些物体下方的传感器区域时,很小的受力面积会使压强瞬间增大,导致传感器饱和,甚至会损坏传感器,因此在试验前必须清理测量系统。

(2)系统安置:将测量系统的 Walkway 放到平坦硬质的地面上,避免由于地面质地松软或存在凹坑所产生的局部压力或剪切力损坏测量系统。测量的地方要使测试对象具有在 Walkway 的前后外边沿行走两步的空间,保证测试对象能够在 Walkway 上保持正常行走周期自由行走。

(3)启动系统:打开软件,如果界面显示“Sensor OK”则运行正常,若出现“MISALIGNED”则出现错误。

(4)系统参数设定:在测量之前需要对测量系

统的采样频率、采样时间和噪声阈值进行设定,使系统达到最佳状态。参数设定见表1。

表1 测试对象基本情况及参数设定

Tab. 1 Basic situation and parameter setting of test objects

测试对象序号	性别	体质量/kg	脚部状况	状态	采样频率/Hz	采样时间/s	噪声阈值
1	女	61.3	高弓足	正常	100	15	4
2	女	60.1	高弓足	中跛	100	15	4

(5)初步试验:首先要让测试对象在 Walkway 上按照正常行走周期来回行走 20 步左右,使系统与测试对象相互磨合,尽量以最舒适和自然的状态开始试验。

#### 3.2 压力分布与压力中心轨迹

试验开始后计算机内软件可以实时记录测试对象通过 Walkway 时足底压力的分布情况,通过对软件的操作可以以 2D(轮廓)图和 3D(轮廓)图的形式显示在计算机界面上,并在 2D(轮廓)图上标示出运动过程中压力中心的移动轨迹。

在压力峰值分布图(图7)以及压力中心轨迹图(图8)中,红色部分表示受压力最大的部位,蓝色部分表示受压力最小的部位。通过观察 2D(轮廓)图,可以知道高弓足人的足部中间几乎接触不到感测片,因而足部中间几乎没有压力分布。而 3D(轮廓)图可以直接反映出足底各部位所受压力大小的分布情况,其中脚后跟部、前脚掌中部以及脚大拇指在行走过程中承受的压力较大。在压力中心轨迹图中,轨迹线由若干个节组成,其中较大的节表示重心移动的速度快,较小的节表示重心移动的速度慢,即脚在运步过程中身体重心移动速度较快,而脚在支撑时期身体重心的移动速度较慢。

#### 3.3 脚部所受压力曲线分析

通过观察 2D(轮廓)图和 3D(轮廓)图能够清

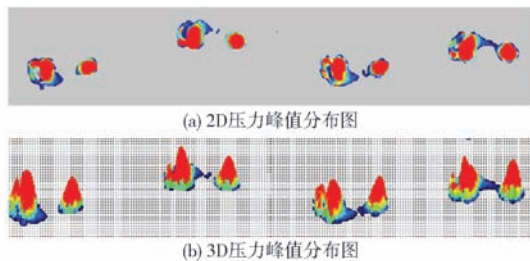


图7 压力峰值分布图(1号测试对象)

Fig. 7 Peak pressure distribution (No. 1)



图8 压力中心轨迹(1号测试对象)

Fig. 8 Center of force trajectory (No. 1)



通过对获取步态参数进行计算得到左脚与右脚的步态参数对称性百分比数据(表5)。对称性的计算为对称指数(针对某一步态参数,左右脚中较低的该步态参数值除以较高的该步态参数值后再乘以100%)。数据表明:2号测试对象相对于1号测试对象,其左右脚的各项步态参数差值较大,导致其左右脚的步态参数对称性百分比较差。

表5 左右脚参数对称性百分比

Tab.5 Symmetry percentage of parameters of left and right feet %

参数	1号测试对象	2号测试对象
摆步时间	93.7	67.0
步幅	94.3	60.2
步速	99.4	46.1
步宽	98.4	92.0
步行周期	97.7	97.6
支撑时间	97.2	87.3

上述试验可以得到以下试验数据:步频、步速、支撑时间和摆动时间,左右脚步幅时间百分比、步幅、步速和步宽的差值以及左右脚步幅时间、步幅、步速、步宽和支撑时间的对称性百分比,且可明显看出,2号测试对象相对于1号测试对象,其步行距离、步速以及左右脚的摆步时间、步幅、步速、步宽和支撑时间的对称性百分比都会有所减小,而左右脚的摆步时间、步幅、步速和步宽的差值则会增大。即

本文所搭建的测量系统能够实时提取、分析测试对象经过其表面时的压力数据,且得到的步态参数值能够实时反映出测试对象相应的运动状态。

## 4 结束语

目前,国内应用足底压力判断足部跛行只处于探索阶段,而且利用 Walkway 搭建的测量系统属于新型设计。该测量系统采用的薄膜压力传感器具有较好的稳定性以及较高的精确度和灵敏度。数据采集器响应速度快、采集的数据精确、采集频率高且可调。在测试过程中,测量系统能够实时地反映出测试对象的足底压力分布情况,以及压力中心轨迹,能够获取运动过程的动态步态参数。对步态参数进一步计算分析,能得到左脚与右脚的步态参数差值以及身体左右侧的对称性百分比。经试验验证,试验数据与真实情况相符。获取到的这些步态参数特征值都能够作为步态分析、跛行判断、压力分布分析的有效依据,该测量系统用于步态分析是可行的。这对于人、两足及四足动物足部的医疗和步态分析都具有实际意义和推广价值,为以后奶牛跛行早期的识别、判断和治疗都提供了可靠的理论依据和技术支持。测量系统采用光电传感器同步触发实现系统自动启停,可有效避免手动操作启动和停止测量系统,不仅解放了人工劳动力,而且为奶牛的规模养殖、实现无人监督的自动步态检测提供了可能。

## 参 考 文 献

- 1 严作廷,王东升,张世栋,等. 奶牛肢蹄病综合防治技术[J]. 兽医导刊, 2013(1):35-37.
- 2 苏雅,乌云. 内蒙古奶业生产运行分析与对策——以2008年—2012年奶业生产为例[J]. 当代畜禽养殖业, 2013(5):5-7.
- 3 郭秀艳,张文娟. 内蒙古奶业绿色发展模式探讨[J]. 经济论坛, 2013(7):37-39.
- 4 NATALIE Knudsen. 重视跛行降低奶牛淘汰率[J]. 戴军,译. 今日畜牧兽医:奶牛, 2013(3):45.
- 5 MUELLER M J, STRUBE M J. Generalizability of in-shoe peak pressure measures using the F-scan system[J]. Clinical Biomechanics, 1996, 11(3):159-164.
- 6 PAVLOVIC J L, TAKAHASHI Y, BECHTOLD J E, et al. Can the Tekscan sensor accurately measure dynamic pressures in the knee joint? [J]. Journal of Biomechanics, 1994, 27(5):617.
- 7 WOODBURN J, HELLIWELL P S. Observations on the F-scan in-shoe pressure measuring system[J]. Clinical Biomechanics, 1996, 11(5):301-304.
- 8 AGINS H J, HARDER V S, LAUTENSCHLAGER E P, et al. Effects of sterilization on the Tekscan digital pressure sensor. [J]. Medical Engineering & Physics, 2003, 25(9):775-780.
- 9 MURRAY M P. Gait as a total pattern of movement: including a bibliography on gait[J]. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, 1967, 46(1):290-333.
- 10 李建设,王立平. 足底压力测量技术在生物力学研究中的应用与进展[J]. 北京体育大学学报, 2005, 28(2):191-193. LI Jianshe, WANG Liping. Application and advances of sole pressure measurement in biomechanical research[J]. Journal of Beijing Sport University, 2005, 28(2):191-193. (in Chinese)
- 11 伍颢,陆爱云,庞军. 健康老年人常速行走的步态分析[J]. 上海体育学院学报, 2000(2):52-55. WU Xie, LU Aiyun, PANG Jun. Analysis on footwork of healthy old people's walking with normal speed[J]. Shanghai Institute of Physical Education, 2000(2):52-55. (in Chinese)
- 12 梁成军. 足底压力测量在步态分析及病理足评估中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2007, 11(40):8149-8152. LIANG Chengjun. Application of planter pressure measurement in gait analysis and pathology foot evaluation[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2007, 11(40):8149-8152. (in Chinese)

- 13 PRAET S F, OUWERENS J W. The influence of shoe design on plantar pressures in neuropathic feet. [J]. *Diabetes Care*, 2003, 26(2):441-445.
- 14 SCHAFF P, HAUSER W, SCHATTNER R, et al. Pressure measurements inside shoes and applications in alpine skiing[J]. *Journal of Biomechanics*, 1987,20(8):817.
- 15 SOAMES R W. Foot pressure patterns during gait[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 1985, 7(2):120-126.
- 16 DREBYSHIRE B, PIATTS R G S. A shapeable foot-pressure measuring device. [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 1989, 11(3):258-264.
- 17 BARITZ M, COTOROS D. Analysis of plantar pressures developed during gait for hollow foot and flat foot shapes with bio-behavioral implications[C]//E-Health and Bioengineering Conference (EHB), 2011, IEEE, 2011:1-4.
- 18 CHANG C C, LEE M Y, Wang S H. Customized foot pressure redistribution insole design using image-based rapid pressure measuring system[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2007:2945-2950.
- 19 HUANG Q. Development of walking analysis system consisting of mobile force plate and motion sensor[C]//2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2011:4022-4025.
- 20 兰民国. Tekscan 压力分布测量系统[J]. *测控技术*, 2002, 21(4):8-9.  
LAN Minguo. Tekscan pressure distribution measurement system[J]. *Measurement & Control Technology*, 2002, 21(4):8-9. (in Chinese)
- 21 王禹桥, 李威, 宋兴元. 基于 LabVIEW 与 Tekscan 的压力分布测量系统[J]. *仪器仪表用户*, 2004, 11(1):52-53.