

速度、充气压力和垂直负荷对子午线轮胎滚动阻力的影响研究

Hamid Taghavifar, Aref Mardani

(Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia 571531117, Iran)

中图分类号: TQ336.1 文献标志码: B 文章编号: 1006-8171(2014)05-0265-07

采用单轮测试仪和土槽研究拖拉机车轮的速度、充气压力和垂直负荷对一定条件下轮胎滚动阻力的影响。车轮在农业机械和工程机械中起重要作用,这是由于轮胎直接与农田接触,几乎全部的负荷和力矩都集中在轮胎上,因此其对车辆的动力学起重要影响。由于车轮具有行驶、转向和牵引的基本作用,因此有必要研究土壤-车轮的相互作用。拖拉机是重要的农业车辆之一,对拖拉机车轮-土壤的相互作用应给予更多的关注。滚动阻力、土壤致密性、能量损失和车轮滑移为土壤-轮胎相互作用中至关重要的参数。在上述参数中,考虑其在车轮开始滚动时的阻碍效应及对能源消耗的重要影响,滚动阻力作为对土壤-车轮相互作用产生重要影响的参数被广泛研究。据报道,由于不正确管理导致美国农业轮胎每年消耗约 5.75 亿 L 燃料。因此,如何将能源消耗降至最低水平已有大量理论和试验分析研究。

一般,滚动阻力作用在车轮上产生与运动方向相反的力矩,此时车轮运动需要外力。滚动阻力基本上是作用在车轮上的多额外力,是因为车轮在路面开始滚动时土壤或车轮变形消耗能量而产生的。因此,滚动阻力与车轮下土壤的变形紧密相关,且在不适当的仪器上和不可控条件下测量得出的滚动阻力结果完全不可靠。此外,由于车轮行驶条件明显不同,因此评价测量结果更困难。

Morin 于 1840 和 1841 年研究了滚动阻力对四轮马车的影响。Bekkar 系统(或科学)地研究和建立了轮胎与土壤间的关系方程[式(1)],滚动阻力(R)受不同因素影响,方程表达式如下:

$$R = \frac{3\omega^{\left(\frac{2n+2}{2n+1}\right)}}{(3-n)^{\left(\frac{2n+2}{2n+1}\right)}(n+1)(K_C + eK_\varphi)^{\left(\frac{1}{2n+1}\right)}d^{\left(\frac{n+1}{2n+1}\right)}} \quad (1)$$

$$P' = \left(\frac{K_C}{e} + K_\varphi\right)Z^n \quad (2)$$

式中, ω 为车辆的质量, n 为下沉指数, d 为车轮的直径, e 为矩形接触面积的小尺寸边长, P' 为平均垂直接触压力系数, Z 为下沉量, K_C 和 K_φ 为土壤条件参数[压力下沉方程(2)得出]。轮胎在行驶一定距离内碾压土壤所消耗的能量与运动阻力和该距离的乘积相等。该阻力(如滚动阻力)如下:

$$R = b_w \int_0^{Z_{\max}} \left(\frac{K_C}{e} + K_\varphi\right)Z^n dZ \quad (3)$$

当车轮直径大于 50 cm,下沉量小于车轮直径的 15% 时,上述方程基于土壤的变形预测滚动阻力的有效性已被证实。

随后,Hetherington 和 Littleton 从几何、负荷和接触土壤方面提出了一个简单计算滚动阻力的近似方程。该模型描述轮胎在沙路面行驶时的滚动阻力。

$$R = \sqrt[3]{\frac{2W^4}{ld^2\gamma N_q}} \quad (4)$$

式中, W 为作用于车轮的垂直负荷, l 为车轮的宽度, γ 为沙子的体积密度, N_q 为 Terzaghi 负荷量系数。

影响滚动阻力的因素有很多,包括车轮直径、轮胎充气压力、复合行程、土壤质地、下沉量、车轮滑动、垂直负荷和速度。Pope 于 1971 年证实了轮胎速度对滚动阻力的影响。Elwaleed 等报道了充气压力对滚动阻力的影响。Way 和 Kishimoto

研究了土壤-车轮相互作用及证实了行驶速度特别是高速对滚动阻力的影响。Zoz 和 Grisso 在他们的试验中报道了同样的结果。McAllister 研究了车轮滚动阻力的降低与其滚动阻力系数的关系,结果表明:滚动阻力系数减小可通过降低充气压力和垂直负荷来实现。Coutermarsh 于 2007 年证实了在干沙地上滚动阻力在加速至匀速过程与速度呈线性关系,之后滚动阻力稳定或降低。

由于采用单轮测试仪在土槽上研究速度、垂直负荷和轮胎充气压力对滚动阻力的精确影响至今未引起广泛关注,因此,本研究讨论了上述因素对滚动阻力的影响,特别是针对农田拖拉机实际速度情况,不同于以往针对高速情况的研究。

本工作研究不同垂直负荷和充气压力下,拖拉机车轮速度对滚动阻力的影响;研究不同速度和垂直负荷下,轮胎充气压力对滚动阻力的影响;研究不同速度和充气压力下,轮胎垂直负荷对滚动阻力的影响。

1 材料和方法

1.1 试验设备

2010 年在伊朗 Urmia 大学农业学院修建了长土槽。该土槽长 23 m,宽 2 m,深 1 m。这个长通道可支撑一架马车,单轮测试仪和不同农耕工具一起在土槽内移动。在土槽内可填充不同质地和不同湿度的土壤,具有高度可控条件。当马车

以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度通过土槽时,采用 22.38 kW 三相电动机通过链条系统拖动试验马车和单轮测试仪通过土槽。电动机的输出轴与链条的驱动轴联接推动马车向前或向后移动。变频器提供不同频率电流为电动机供电以改变移动速度。该系统的另一个优势是可以调整制动和启动加速度以降低惯性力。4 个 200 kg 容量的“S”形传感器校准后并行分布于车厢和单轮测试仪器之间。传感器与包括数据记录仪的数据采集器联接,在显示屏上监视数据,同时数据以约 30 Hz 的频率传给电脑。单轮测试仪与带 4 个“S”形传感器车厢系统组装在一起,以测试不同试验条件下车轮运动产生的滚动阻力变化。采用固特异 9.5L-14 农业子午线驱动轮胎安装在 John Deere 拖拉机上。系统设置如图 1 所示,对应的土槽原理示意图 2。

土槽的测试体积为 46 m^3 ,填满土壤。电动



图 1 土槽系统设置示意(包括车厢和单轮测试仪)

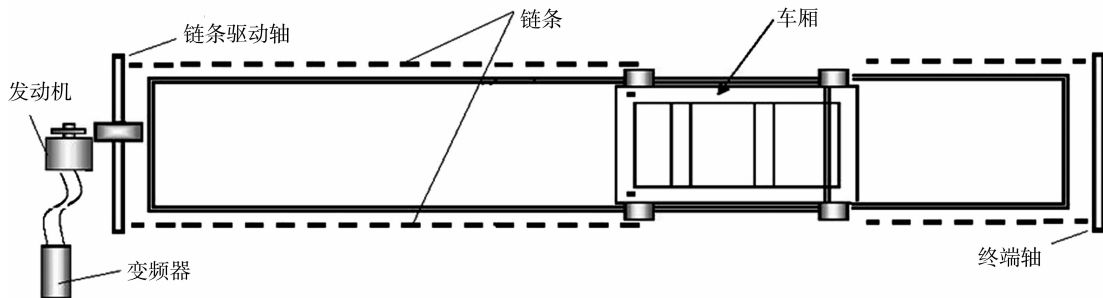


图 2 电力传输程序和土槽示意

机为车厢移动提供动力,通过联接电动机轴和链条系统的变频器调节速度。当变频器为车厢提供不同速度时,采用光学转速计测量车厢的速度。该系统内部装配铁轨,由两个滚动车轮承载车厢的质量。因此,车厢对单轮测试仪无负荷。同样,垂直负荷可通过与车轮一端和车厢另一终端相连

的电动螺栓调节。通过调节电动螺栓,车轮的垂直位移与负荷量成正比。产生的负荷通过垂直负荷单元测量,该单元置于电动螺栓与车轮框架之间。测量的负荷传递至数字显示器,可读取数据。负荷加载可以停止也可持续至所需的值。

车厢在土槽内移动,通过链条系统牵引单轮

测试仪,于是传感器将信号传递至数据采集系统,记录车轮的滚动阻力,最终数据采集系统可监测这些数据并将其传输至电脑中。采用 Microsoft Office Excel 软件计算、评估和确定速度与滚动阻力之间的关系。

图 3 所示为安装于车厢上的单轮测试仪和沿土槽的 4 个平行水平横置负荷单元。

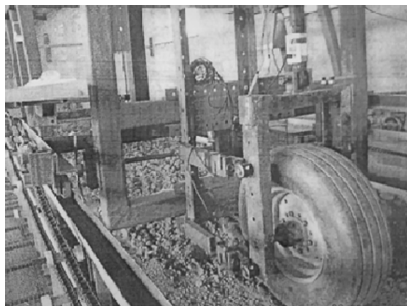


图 3 安装于车厢的单轮测试仪通过土槽示意

试验速度分别为 $0.7, 1.4$ 和 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 轮胎充气压力为 3 水平, 分别为 100, 200 和 300 kPa, 作用于单轮测试仪的垂直负荷为 5 水平, 分别为 1, 2, 3, 4 和 5 kN。

土槽填满粘壤土以模拟伊朗 Urmia 地区大部分农场的真实土壤条件。用特定的设备整理土壤,包括矫直机和耙,这是因为良好的土槽土壤条件对得到精确的试验结果非常重要。土壤通过栽培、矫直机和滚轴处理后达到预期的圆锥指数。需要注意的是,由于土槽容量限制,只能对土槽中土壤再次处理后才可保证所有的试验均在相似的条件下进行。

土壤的圆锥指数通过 RIMIK 数字针入度仪 (CP20 型) 进行测试,顶锥角为 30° ,标准气压,负荷单元和芯片组满足 ASAE S313.2 标准,土壤针入速率为 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,土壤组分为:沙 34.3%,淤泥 22.2%,粘土 43.5%。土壤体积密度为 $2360 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,摩擦角为 32° ,圆锥指数为 700 kPa。

1.2 图像处理法计算接地面积

为了计算轮胎的接地面积,将白色粉末撒在轮胎-土壤界面外围。重复测试 3 次以提高计算的准确度。图 4 所示为几次处理得到的轮胎与土壤的接地面积。



图 4 沿土槽通道通过时轮胎与土壤的接地面积

该阶段使用了数码相机和玻璃板,将相机放在玻璃板上并采用 MATLAB® 软件处理图像。在车厢通过土槽通道时,保持相机与车厢固定的距离进行拍照。这些图像拍摄于 RGB 空间。RGB 空间照片和颜色成分如图 5(a) 所示。利用 HSV 空间的饱和度(s)以及 Lab 空间的色差分量(b),将轮胎轨迹与图像背景完美区分。两分量的像素强度(X_1)规范处理在 $0 \sim 1$ 之间。两分量相加然后处理在相同的范围内。

$$X_1 = s + b \quad (5)$$

为了进一步分离图像背景和轮胎轨迹,像素强度(X_2)采用 Gamma 转换如下:

$$X_2 = X_1^\alpha \quad (6)$$

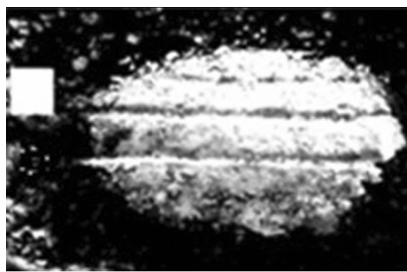
本研究中, α 的优化值为 2。此后,为了分离轮胎轨迹和背景至极限阈值,要求采用 Otsu 方法以达到最佳水平。通过图像放大和阈值处理得到二进制图像。图 5(b)所示为二进制图像,其中白色像素显示的是轮胎的轨迹。数码相机照得的彩色图像中轮胎轨迹采用黑色像素表示。

最终从二进制图像中提取目标物,测量其像素面积(对象区域的像素数量)和校准面积(目标区域的像素数量与实际值占预测值的比率的乘积)等变量,单位为 cm^2 。将预定义尺寸指数用于每张图像,以校准图像尺寸并得出接地面积。

2 结果与讨论

2.1 速度对滚动阻力的影响

为了研究速度对滚动阻力的影响,考察 5 个垂直负荷水平和 3 个充气压力水平的数据。图 6 所示为在相应的 5 个垂直负荷水平不同充气压力下,滚动阻力与接地面积的关系。

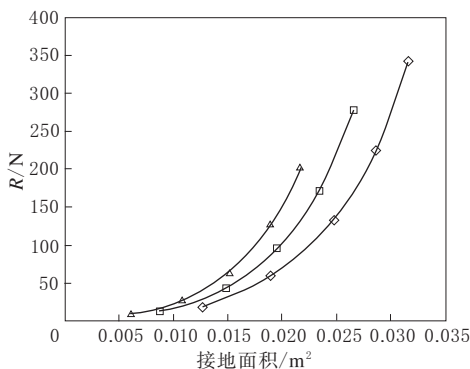


(a) RGB 空间图像



(b) 处理的图像

图5 RGB 空间和处理的图像



充气压力/kPa: ◇—100; □—200; △—300。

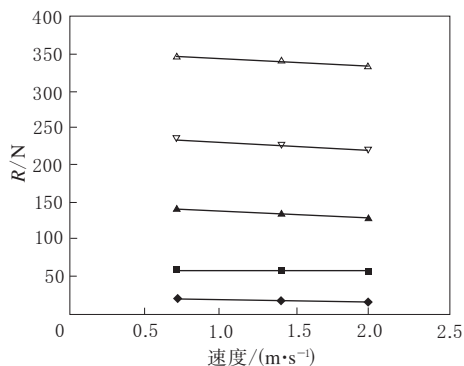
图6 滚动阻力与接地面积的关系曲线

考虑到轮胎接地面积是研究滚动阻力与速度关系的前提,因此在不同的负荷和充气压力下先测量接地面积。从图6可以看出,随着轮胎接地面积的增大,其滚动阻力增大。在3种不同充气压力下,垂直负荷的增大导致接地面积增大。基本上当充气压力不变时,增大垂直负荷导致轮胎的屈挠变形增大,滚动阻力增大。

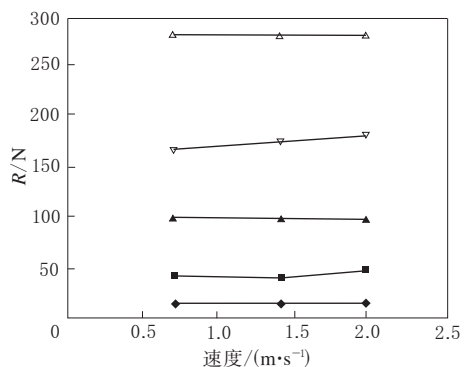
图7所示为不同充气压力和垂直负荷下速度对轮胎滚动阻力的影响。

从图7可以看出,当充气压力和垂直负荷一定时,随着速度的增大,轮胎的滚动阻力几乎不变,说明速度的改变对滚动阻力未造成显著影响。

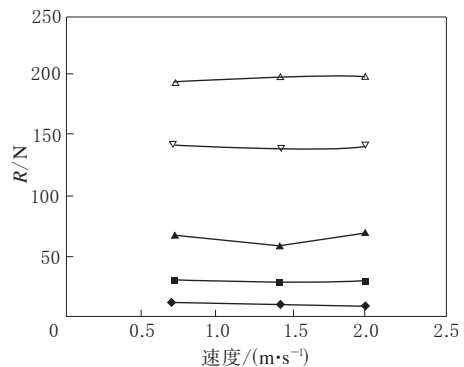
在该研究的速度(v)为 $0.7 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, P'



(a) 充气压力为 100 kPa



(b) 充气压力为 200 kPa



(c) 充气压力为 300 kPa

垂直负荷/kN: ◆—1; ■—2; ▲—3; ▽—4; △—5。

图7 滚动阻力与速度的关系曲线

小于0.01,垂直负荷(W)分别为1,2,3,4和5 kN时,速度对滚动阻力的影响的方差分析如表1所示。需要说明的是在图6的测试中,接地面积与滚动阻力在测试的速度范围内均不发生改变。此外,当充气压力(P)不变时,在较大的垂直负荷下滚动阻力增大,预示轮胎-土壤的接地面积增大。

从图7还可以看出,随着垂直负荷的增大,轮胎的滚动阻力显著增大。

在一些类似的研究中,Pope报道,当负荷为

表 1 因子方差分析

项 目	自由度	平方和	均方	显著性(F_s)
重复	2	10 232.6	5 116.3	0.20 ^{ns}
试验方法	44	4 780 267.1	108 642.4	4.45 [*]
P	2	674 956.8	337 478.4	13.83 [*]
v	2	11 362.6	5 681.3	0.23 ^{ns}
W	4	1 862 375.9	465 594	19.09 [*]
$P \times v$	4	17 313.7	4 328.4	0.17 ^{ns}
$P \times W$	8	981 193.5	122 649.2	5.03 [*]
$v \times W$	8	27 069.4	3 383.6	0.13 ^{ns}
$P \times v \times W$	16	1 205 995.1	75 374.7	3.09 [*]
误差	88	24 387.5		
总和	134	4 814 887.1		

注:ns 为不显著; * 为 P' 小于 0.01。

56 kg,速度范围为 0.01~0.08 m·s⁻¹时,滚动阻力理论上从 109 N 下降至 91 N,但两次测试说明在相应速度和车轮负荷范围内,滚动阻力的变化更小。同样,当车轮负荷为 92.5 kg 时,预测极端速度下滚动阻力的差值为 0.036 kN,而测量值为 0.028 和 0.032 kN。Way 和 Kishimoto 报道了速度与滚动阻力的线性增大关系。该试验是在高速下进行的,试验速度为 11 m·s⁻¹及以上,该速度不是拖拉机农田操作的常规速度。Zoz 和 Grisso 报道了在常规拖拉机的行驶速度下,速度对滚动阻力的微小影响,该研究证实了本文的研究结果。Coutermarsh 的研究进一步证实了本文的研究结果,在不同的充气压力下,当速度增至 8.9 m·s⁻¹时,滚动阻力的变化较小,当速度继续增大时,滚动阻力开始增大。

2.2 充气压力对滚动阻力的影响

图 8 所示为不同垂直负荷和速度下,滚动阻力与充气压力的关系。

从图 8 可以看出,当速度从 0.7 m·s⁻¹增大至 2.0 m·s⁻¹时,滚动阻力略微改变。

从图 8 可以看出,当垂直负荷较大时,充气压力越大,滚动阻力越小。考虑到滚动阻力的降低与垂直负荷和充气压力相关的事实以及增大充气压力似乎更实际,增大充气压力是达到降低滚动阻力更有影响的参数。

在类似的研究中,轮胎充气压力降低 55 kPa 可导致滚动阻力提高 9.9%,进一步证实了本研究的试验结果。根据上文的研究结果,当充气压

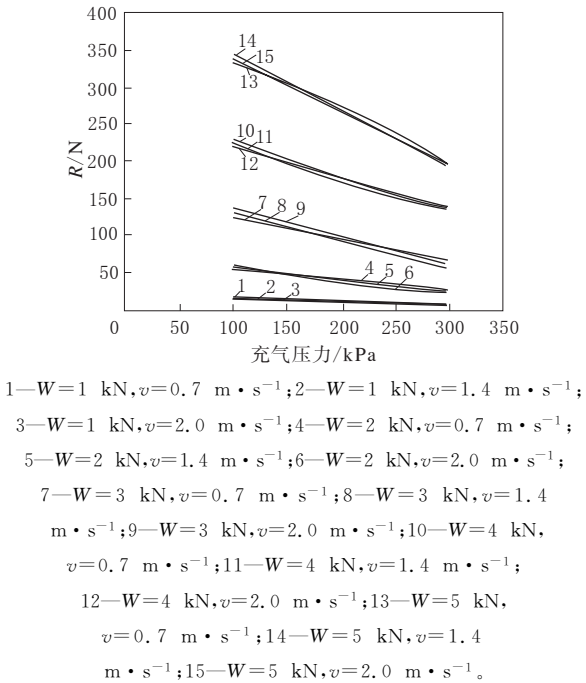


图 8 滚动阻力与充气压力的关系曲线

力和垂直负荷较大时,滚动阻力随充气压力的增大而明显减小。这种现象可以解释为轮胎变形对滚动阻力的重要影响,这是因为在较大的垂直负荷下,轮胎在滚动时产生持续的变形需要消耗更多的能量。因此,增大充气压力和降低轮胎变形导致轮胎能量损耗减小。强调该结果是由于对农业轮胎不正确的管理导致能量消耗,从而使美国每年消耗约 5.75 亿 L 燃料。

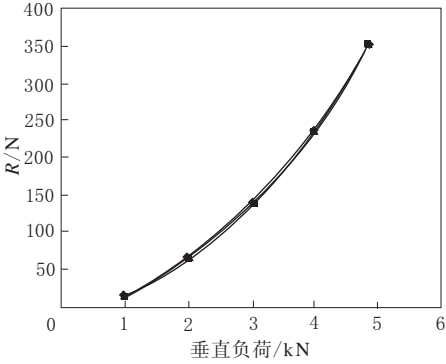
2.3 垂直负荷对滚动阻力的影响

将作用于车轮的垂直负荷作为有效参数评估其对滚动阻力的影响。图 9 所示为轮胎充气压力为 100,200 和 300 kPa 下,垂直负荷对滚动阻力的影响。

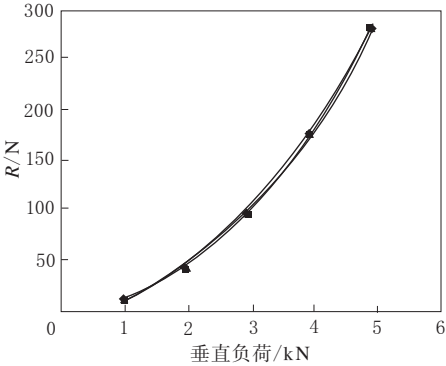
从图 9 可以看出,滚动阻力与垂直负荷近似呈二阶多项式关系,但速度对滚动阻力为无效参数(2.1 中进行了讨论)。垂直负荷与滚动阻力似乎呈线性关系,相比之下,当滚动阻力为垂直负荷的函数时,它们为二次方程关系似乎更合理。对不同试验方法进行多元回归分析得到方程(7)。

$$R=10W^2+3.2W-0.37P-25v+103.56 \quad (7)$$

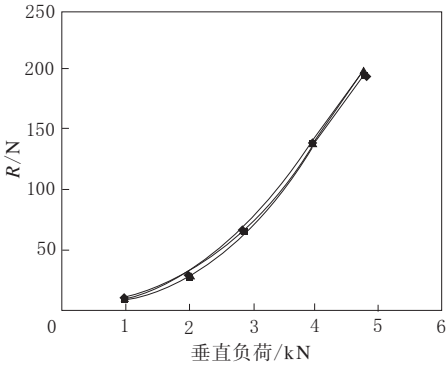
将该方程对试验结果进行评估,表明滚动阻力试验值与预测值具有高度的相关性和合



(a)充气压力为 100 kPa



(b)充气压力为 200 kPa



(c)充气压力为 300 kPa

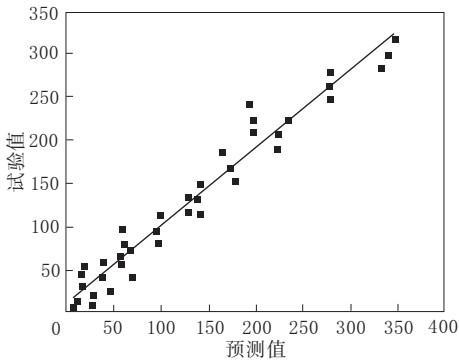
速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$):◆—0.7;■—1.4;▲—2.0。

图9 滚动阻力与垂直负荷的关系曲线

理性。

图10所示为利用方程(7)得出的预测值。线性相关方程为 $y=0.902x+8.2779$,线性拟合相关系数为 0.959 9。

本研究得出的试验结果进一步证明了滚动阻力与垂直负荷之间的关系可以通过高度相关的二阶多项式描述,而非 Hetherington 等提出的多项式。传统经验模型中,基于车轮数值的方程如下。



——预测值;■—试验值。

图10 预测值与试验值关系曲线

$$R=\frac{1.2W^2}{CI \cdot ld}+0.04W \tag{8}$$

式中,CI 为圆锥指数。

图11所示为采用方程(8)得出的滚动阻力与垂直负荷的关系,CI 为 700 kPa,l 为 0.2 m,d 为 0.7 m。

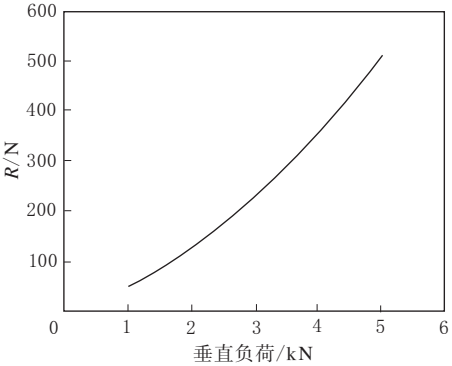


图11 方程(8)得出的滚动阻力与垂直负荷的关系

本研究得出的垂直负荷与滚动阻力之间的关系是可以接受的,其可靠性显然得到方程(8)和图11的验证。

3 结论

利用土槽中的单轮试验准确地研究速度、充气压力和垂直负荷参数对滚动阻力的影响。速度3水平分别为 0.7,1.4 和 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,充气压力3水平分别为 100,200 和 300 kPa,垂直负荷5水平分别为 1,2,3,4 和 5 kN。每个过程采用 4 个传感器采集数据并将数据传输至电脑中,分析结果如下:

(1)车轮滚动阻力受充气压力和垂直负荷的影响比速度大;

(2)当速度较小时,车轮的滚动阻力几乎保持不变,由于农场拖拉机的行驶速度不能达到较高水平,因此研究的速度对滚动阻力没有较大影响;

(3)充气压力增大,滚动阻力减小,特别是当垂直负荷较大时;

(4)垂直负荷对滚动阻力的影响较大,其与滚动阻力呈二阶多项式关系。

(北京橡胶工业研究设计院

肖大玲摘译 徐立校

译自美国“Journal of Terramechanics”,50[1],

99~106(2013)

阿波罗轮胎中东扩张到卡塔尔

中图分类号:TQ336.1;U463.341 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2014年2月27日报道:

阿波罗轮胎有限公司宣布其已经扩张到中东地区的卡塔尔市场。该公司表示此举是其跨地域进入新市场战略的一部分。

两年前,阿波罗在阿拉伯联合酋长国的迪拜设立了中东和北非(MENA)中心。阿波罗称,在该市场销售的轮胎从印度和欧洲进口。

对于乘用车轮胎,阿波罗轮胎表示其将充分利用卡塔尔日益增长的汽车销售、人均收入和与轮胎品质相关的严格规定的实施等方面的优势。

阿波罗称,轮胎依赖进口的卡塔尔是最有前途的汽车市场之一,在中东地区仅次于沙特阿拉伯。阿波罗将瞄准市场推广其包括 Aspire 4G, Alnac 4G 和 Amazer 4G 的高性能 4G 系列轮胎。该公司还计划将其优质的欧洲品牌 Vredestein 引进该市场以图发展。

该地区建设力度的加大也推动了商用车轮胎业务的增长。作为载重子午线轮胎主要市场的卡塔尔,将会看到引进的阿波罗载重子午线轮胎的优越耐久性能。据阿波罗估计,该市场每月有近 2 万条载重轮胎的潜在消费能力,其中 80% 为子午线轮胎。

在接下来的几个月里,阿波罗计划在中东和北非地区发掘更多类似市场。

(马晓摘译 许炳才校)

固特异 2013 财政年度净收入达 6 亿美元

中图分类号:TQ336.1;U463.341 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2014年2月13日报道:

固特异轮胎和橡胶公司公布其 2013 年第 4

季度净销售额为 48 亿美元,净收入为 2.28 亿美元,收入与销售额的比率为 4.7%,而 2012 年同期销售额超过 50 亿美元,收入为零。2013 年第 4 季度营业收入增长 54%,从 2.72 亿美元增长到 4.19 亿美元。

固特异公布其 2013 财政年度净收入为 6 亿美元,净销售额为 195 亿美元。其 2012 财政年度销售额将近 210 亿美元,而收入仅为 1.83 亿美元。2013 财政年度的营业收入增长了 26.6%,从 12 亿多美元增长到将近 16 亿美元。

“突出的第 4 季度及全年收入证明我们的战略发挥了作用,这也证明了固特异有能力维持收入增长及强劲的现金流。”公司董事长兼执行总裁 Richard Kramer 称,“我们北美业务完成了 2013 年的收入目标。”

固特异已经开始为其持续的美国退休金计划提供了 11.5 亿美元现金支持,并已开始冻结和去风险计划进程。

“2013 年的表现给了我们全面支持持续美国退休金计划的信心,”Kramer 称,“这是我们有史以来一个重要的里程碑,并为我们潜在的轮胎业务提供更大的透明度及增加收入和现金流。移除过去遗留的债务对公司来说是一个新的开始。”

固特异 2013 年第 4 季度销售额与 2012 年同季度相比降低 5%。其中轮胎销售额高出 6 400 万美元,但是 1.78 亿美元消耗在其他轮胎相关业务,特别是北美地区第三方化学品的销售额下降,3 600 万美元消耗在较低原材料价格导致的价格走低,1.02 亿美元消耗在不利的汇率折算。

“随着行业大范围复苏,我们继续看到全球混合增长率提升,而我们瞄准的高附加值部分增长强劲。”Kramer 称,“我们仍然循规蹈矩,通过品牌和价值主张提高我们的盈利能力。”

(马晓摘译 许炳才校)