

国农

农业工程

第6辑



上海科学技术文献出版社

国外农业工程

(第六辑)

中国农业工程协会编

*

上海科学技术文献出版社出版

(上海高安路六弄一号)

新华书店上海发行所发行

江苏宜兴南漕印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 6 字数 148,000

1982年11月第1版 1982年11月第1次印刷

印数: 1—1,900

书号: 16192·20 定价: 0.77 元

《科技新书目》36-242

目 录

动力和机具

轮式拖拉机的振动与乘坐性能	1
机组行走系统对土壤的压实	8
土壤的沉陷和压应力的关系	10
脱粒滚筒的动力学	15
手提式大豆播种机	17
农业航空电子设备	20
航空喷洒设备	25

农业能源

从奶牛粪和大麦茎秆的高固体率混合物中发生沼气	31
硫酸盐、铁和氢对微生物将醋酸转化为甲烷的影响	38
太阳能用于灌溉水泵的评价	43

农田灌溉

灌溉条件下的农田土壤盐分及淋洗	48
选择对作物最有利的灌溉系统	69

环境工程

温室作物的蒸发蒸腾总量模拟试验	78
温室工业和效率	82
英国“国家农业中心”的养羊塑料棚	84
温室中氮氧化物的污染对作物的危害	86
美国的立体温室	91

农业科研

美国农业科研问题	94
----------------	----

轮式拖拉机的振动与乘坐性能

吴 起 亚

一、轮式拖拉机振动的数学模型

一般认为,充气橡胶轮胎拖拉机是具有6个自由度的弹簧-质量-阻尼系统。如果考虑到驾驶座相对于拖拉机机体的位移、轮子的转向角、轮子的转动或铰接式前轴的横摇,自由度就不止6个。如果有驾驶室,而驾驶室和拖拉机机体不是刚性连接,为了考虑驾驶室的运动,则要增加6个自由度,共有12个自由度了。

把拖拉机当作6个自由度的弹簧-质量-阻尼系统时,认为拖拉机能够在 x 、 y 、 z 三个轴线方向即垂直(上下)方向($z-z$)和水平方向[包括前后($x-x$)和左右($y-y$)]的线振动,以及绕三个轴线的角振动。绕 y 轴线的角振动叫做颠簸(pitch),绕 x 轴线的角振动叫做摇晃(roll),绕 z 轴线的角振动叫做扭摆(yaw)。

前后方向和左右方向的线振动以及扭摆一般都不出现。如果过拖拉机纵轴线的垂直平面对称平面,也不会发生摇晃。剩下的只有垂直振动和颠簸了,其中以垂直振动为最主要的振动。因此,可以把地表-拖拉机系统简化为2个自由度的弹簧-质量-阻尼系统(图1)。

如果拖拉机带农具,例如挂接中耕农具,中耕农具对于拖拉机有相对运动,在这种情况下,可把地表-拖拉机-农具系统简化为4个自由度的系统(图2)。

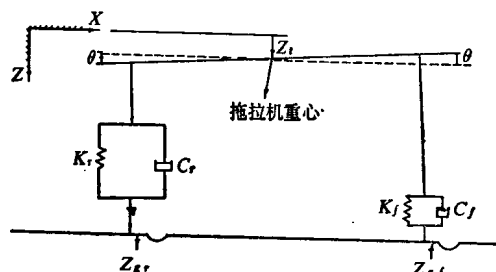
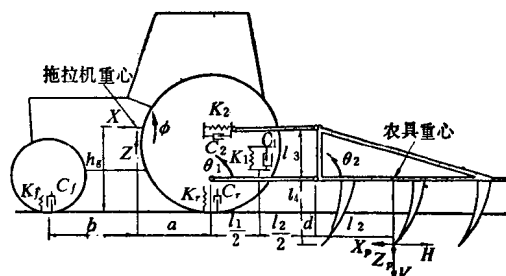


图1 2个自由度的弹簧-质量-阻尼系统

K_r —两后轮的刚度之和; K_f —两前轮的刚度之和; C_r —两后轮的阻尼系数; C_f —两前轮的阻尼系数; Z_{gr} 、 Z_{gf} —因为地面不平引起的后轮、前轮位移的时间历程



当振荡中心(Oscillation center)在前后轴距之内时, 该振荡中心叫做颠簸中心(Pitch center), 与此对应的频率叫做颠簸频率。如果振荡中心在前后轴距之外时, 该振荡中心叫做垂直振动中心(Bounce center), 与此对应的频率叫做垂直振动频率。

因为拖拉机轮胎的阻尼系数小, 所以拖拉机本身频率占主要成份。垂直振动主频率约为 3 赫; 颠簸主频率约为 1~4.5 赫; 摇晃主频率约为 1.5 赫。频率高低还与是否挂接农具有关。

二、影响驾驶员所受振动强度的因素

影响驾驶员所受振动强度的主要因素有驾驶座位置、驾驶座的弹性悬挂参数以及挂接农具的种类等(图 3~6)。此外, 与驾驶员体重、前桥、后桥是否弹性悬挂及轮胎充气压力高低等也有关系。

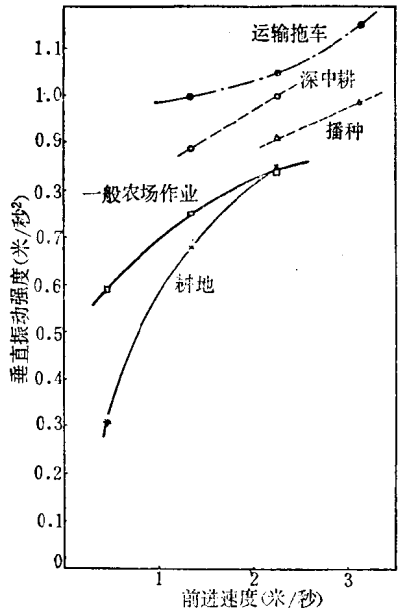


图3 驾驶座处测得的垂直振动

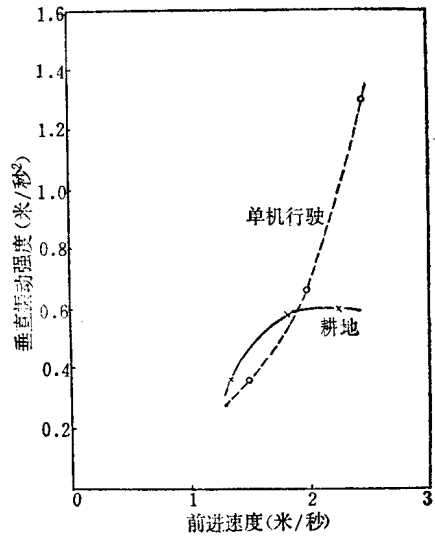


图5 拖拉机速度与垂直振动强度的关系

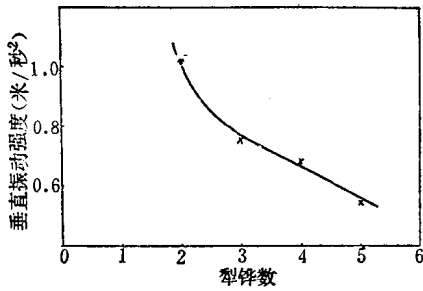


图4 铧数多少和垂直振动强度的关系

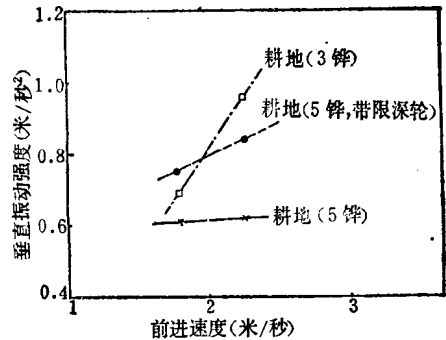


图6 犁铧数和限深轮与垂直振动强度的关系

一般情况下,拖拉机的座位多在后轴正上方或其附近。这是根据驾驶员视野需要、整体布置及振动强度等多项因素考虑决定的。

单从选择振动强度较低的位置这个角度出发,座位应在后轴与拖拉机重心之间,而且不要靠近后轴。据洛阳拖拉机研究所报告,如将座位移近重心,可使垂直振动加速度降低11%。

镇江农机学院拖拉机教研组用东风-50型拖拉机进行的试验结果,指出单机行驶时,座位最佳点在重心后的几厘米至20余厘米的范围内(后轴在重心后78厘米)。

对于折腰转向四个轮子大小相同的四轮驱动拖拉机,座位应放在前后轴中间。

在满足驾驶员视野要求的情况下,座位的高度应放到最低,以减小颠簸和摇晃的影响。

在同一驾驶座上,不同体重的驾驶员背部的加速度值也不同,所以驾驶座位应按体重进行调节。

和采用驾驶座对比,采用弹性悬挂的驾驶室,更能降低振动强度。但弹性悬挂的驾驶室成本高,这是它到现在还没有被广泛采用的主要原因。

由于成本限制和传动系设计上的困难,在农用拖拉机上几乎没有采用后桥弹性悬挂的。

据有关试验报告,装上前桥弹性悬挂以后,测得的前桥中点、后桥中点和驾驶员背部3处的振动加速度的平均幅值都有所减小,但前桥中点的振动加速度降低较多,后桥中点的加速度降低较少。因为影响后桥振动的主要原因是后轮所受的激励,前桥振动对驾驶员的影响远较后桥振动的影响小,所以近年来,制造厂家几乎都停止生产前桥弹性悬挂的拖拉机。

随着胎压的降低,振动加速度值有所减小。但用降低轮胎气压的办法来改善乘坐性能是有局限性的,它受到轮胎承载重量、轮胎寿命和牵引附着性能等条件的约束。

根据Crolla的试验结果,得知拖拉机牵引拖车时,驾驶员受到的振动强度比单机行驶时大。当拖拉机-拖车系统横过沟辙时,轮胎受到的垂直激励使拖车发生颠簸,因而拖拉机挂钩受到激励,驾驶座的振动因之加剧。拖拉机牵引铧式犁时,驾驶员受到的颠簸大为减弱,这是由于土壤作用于犁上的力的缘故。

总的说来,任何悬挂在拖拉机后方的农具都会改变拖拉机的自然频率,而对颠簸频率影响最大,这是因为农具重心远在拖拉机重心后方的缘故。

三、驾驶座振动强度传递比和对驾驶座振动频率的要求

目前,拖拉机大多没有弹性悬挂装置,车轮与机体之间系刚性连接,因而驾驶座的结构对乘坐性能起主要作用。

新型拖拉机大多装有弹性悬挂的驾驶座。弹性悬挂包括三部分,即杆件机构、弹性元件和阻尼装置。杆件机构保证座位与机体之间的相对运动关系,弹性元件用来隔振,阻尼装置用来减振。

传到座位上的振动的位移近似为

$$Z_x = Z_t + R\theta \quad (1)$$

式中 Z_x ——传给座位基部的振动位移(厘米);

Z_t ——拖拉机重心的垂直位移(厘米);

θ ——绕拖拉机重心的颠簸角度(弧度);

R ——从驾驶座到拖拉机重心的纵向距离(厘米)。

当 θ 很小时, $R\theta$ 项等于由拖拉机颠簸引起的垂直位移。

因此,

$$\ddot{Z}_\lambda = \ddot{Z}_t + R\ddot{\theta} \quad (2)$$

假设车辆后桥和前桥的质量相等, 车身重心处质量为零, 并假定前后轮的刚度及阻尼系数相等, 因此前后桥只发生垂直振动, 而拖拉机没有颠簸的角振动。经过这样的简化, 就可用一个自由度的弹簧-质量-阻尼系统来表示地面-车辆系统。

一个自由度的线性弹簧-质量-阻尼系统的传递比 T 如下式(稳态输入时):

$$T = \left[\frac{1 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega_t}{\omega_s} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega_t}{\omega_s} \right)^2 \right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega_t}{\omega_s} \right)^2} \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中 T ——传递比 ($T = \frac{\text{输出振动强度}}{\text{输入振动强度}}$);

ζ ——阻尼比 ($\zeta = C/C_0$);

ω_t ——拖拉机底盘频率(弧度/秒);

ω_s ——驾驶座的无阻尼自然频率(弧度/秒), $\omega_s = \sqrt{\frac{K}{M}}$;

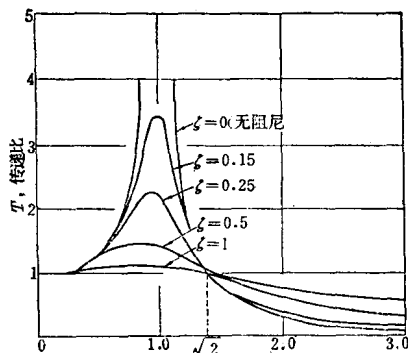
M ——座位和驾驶员的质量(公斤);

K ——座位悬挂系统的弹簧刚度(牛顿/米);

C ——座位悬挂装置的阻尼系数(牛顿·秒/米);

C_0 ——临界阻尼系数(牛顿·秒/米), $C_0 = 2M\omega_s$ 。

传递比 T 值应小于 1。当 ω_t/ω_s 之值大于 $\sqrt{2}$ 时, 则 T 值小于 1(图 7)。在设计驾驶座时, ω_t 应为已知。



拖拉机底盘振动频率与驾驶座
自然频率之比(ω_t/ω_s)

图 7 传递比与频率比的函数关系

轮式拖拉机底盘的无阻尼自然频率通常是 3~10 赫。如果略去颠簸的影响, 则后桥处的自然频率可用下式近似计算, 即

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_r}{m_r}}$$

式中 m_r ——后轮承受的质量(公斤·秒²/厘米);

K_r ——后轮轮胎的刚度(公斤/厘米)。

轮式拖拉机后桥垂直振动的自然频率多在 3 赫左右。

当车辆以速度 v 在高低不平的地面上行驶时, 来自地面的激励频率可用空间频率 Ω 或时间频率 f 表示。空间频率是指单位距离内的振动次数,

$$\Omega = 1/L$$

式中 L ——地面波形的波长(米)。

在已耕地上, 一般情况下, $L=0.1\sim 10$ 米, 故 $\Omega=0.1\sim 3$ 次/米。

时间频率 f 为单位时间振动次数, 因车辆振动为时间的函数, 所以在研究车辆振动时,

用时间频率比用空间频率方便。

$$f = \frac{v}{L} = v\Omega \quad (5)$$

式中 v ——车辆速度(米/秒)。

据以往测量结果,初步查明,由于拖拉机在农村田地行驶时,拖拉机速度较低,来自地面的激励频率一般在 20 赫以下。

阻尼过大,则接近临界阻尼;阻尼过小,则当 ω_i/ω_s 小于 $\sqrt{2}$ 时,传递比又过大(图 7)。驾驶座的阻尼比 ζ 应在 0.25~0.5 范围内。至于 ω_s , 则推荐为 1.5 赫或更低。

如果考虑到减振垫和悬挂装置实际上都并非线性,则传递比公式远比式(3)复杂。所以,往往用实验来测定传递比。

在决定驾驶座的振动强度传递比以后,即可求出加速度均方根值 a_z ,

$$a_z = T\ddot{Z}_x \quad (6)$$

式中 a_z ——垂直加速度(均方根, RMS) (米/秒²);

$\ddot{Z}_x$ ——根据式(2)计算的加速度均方根值。

求得 a_z 后,可把它与 ISO 2631 标准对照,判定该驾驶座的振动强度是否超过该标准的相应规定。

还有,可用磁带记录装在驾驶座上的加速度传感器传出的振动加速度信号上,然后输入数据处理设备,直接得出 a_z 。

四、振动对驾驶员的影响和评价指标

振动对人的生理、心理状态,对人的健康和工作效率及工作质量,对机器的工作性能、建筑物和机器寿命均有不同程度的影响。近年来,对轮式拖拉机振动的研究逐渐深入,积累了一些值得重视的试验数据。因为篇幅所限,本文着重讨论有关振动与乘坐性能(振动对驾驶员的影响)问题。至于振动对拖拉机牵引附着性能和操纵性的影响,则未涉及。

长期经受较大的乘坐振动的驾驶员容易患胃病和脊椎畸形两种职业病。患胃炎和消化不良的也屡见不鲜。胃病主要由于振动,而脊椎畸形则由坐的姿势不正常和振动所引起。此外,大的乘坐振动还会降低工作效率和工作质量。在振动环境下,驾驶员的手脚的动作配合受到干扰,又感到疲劳,所以影响工作效率。又由于振动,车身颠簸,耕深也会不一致。

车辆振动系地面高低不平、发动机和传动系的振动以及空气动力等因素的影响所造成,其中以地表高低不平为主要因素。

振动频率与振动对人体为害的轻重有密切关系。低频振动(指 20 赫以下)作用于座位上,引起全身振动,而其中 2~10 赫的振动为害尤大,因为人体内脏器官的振动频率也在 2~10 赫内(人体平均自然频率 4~5 赫),所以引起共振。

较高的频率(30 赫以上)引起身体一部分的振动。就全身振动而言,高频振动虽不占重要地位,但它引起手脚和手臂振动,因为这些较高频率振动是出现在方向盘、变速杆、操纵杆或驾驶座下的底板上。高频振动能刺激人的神经系统,引起头疼、视力降低和过早疲劳。此外,所有这些机械振动都能在固体、流体、气体介质内产生噪音,这也对驾驶员的生理和心理发生影响。

垂直振动的最大敏感度的频带为 4~8 赫，水平振动的最大敏感度的频带为 1~2 赫。

图 8、9 中的受振时限是指连续经受该频率振动的的时间，并且多年来经常承受这种振动而言，例如职业驾驶员。如果承受振动时间是间断的，在一个工作日中有间歇，在振动强度相同时，总的日受振时间为上述各单个时间的简单相加。如果均方根加速度值是变化的，则要求“等效总受振时间”。

除振动频率外，驾驶座振动时的振幅、振动速度、振动加速度和加速度变化率（即位移

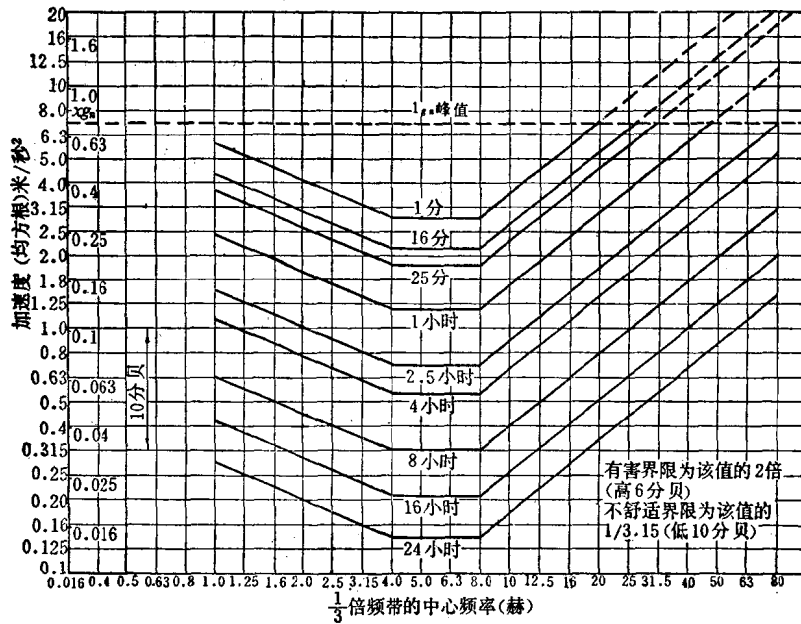


图 8 垂直振动加速度的限值：“疲劳或减效界限”[ISO 2631-1978(E)]

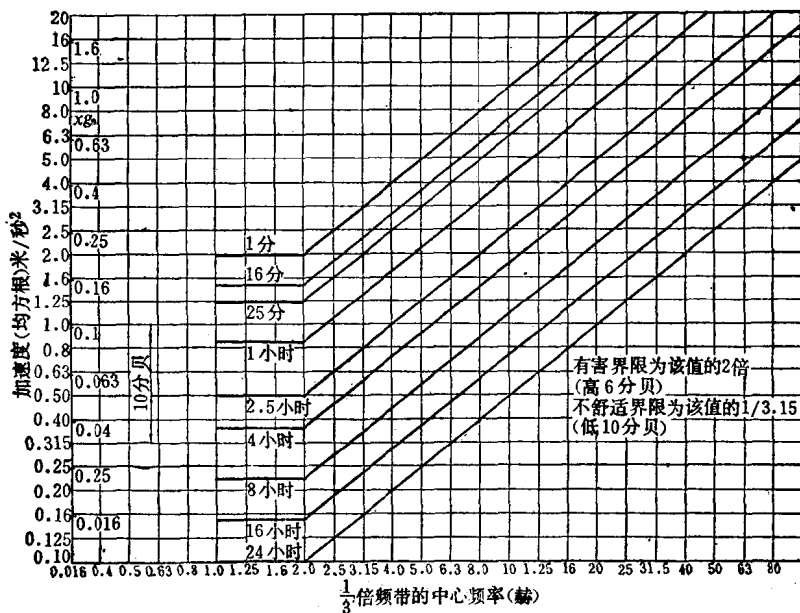


图 9 水平振动加速度的限值：“疲劳或减效界限”[ISO 2631-1978(E)]

对时间的三阶导数)也影响振动对人的为害程度。

SAE 采用振动频率和振幅作为评价指标。西德工程师学会采用“感觉强度”进行评价。瑞典用最大加速度来评价。奥地利利用振幅与频率相结合来评价。

国际标准化组织(ISO)提出以加速度均方根对频率的关系作为振动的评价指标,现在正逐渐得到广泛的采用(图 8、9)。该项指标规定 3 种界限,即

1. 减舒适性界限——指客运车辆能否使乘客舒适而言,具体地讲,例如乘客能否在车内正常地谈、写、进餐作为衡量依据。
2. 疲劳或减效界限——以地面车辆驾驶员能否保持工作效率为依据。
3. 有害界限(健康和安全界限)。

将图 8 和图 9 内的加速度值乘以 2, 则得到有害限值, 将它除以 3.15, 即得到减舒适性限值。

ISO 指标适用于振弦波的输入信号。当应用迭加原理(即随机信号的效应与每个单频率正弦波信号效应迭加的总和相等)时, 则 ISO 标准也适用于随机振动。输入到拖拉机驾驶员的振动是由一两个主频率的频谱所构成的。将来有了更多的试验数据以后, 现有的一些振动评价指标, 可能还要修改。

ISO 标准只包括 1~80 赫范围内的振动。ISO 认为, 频率低于 1 赫的振动引起“晕船病”, 但这种病的发生不仅与振动强度和频率有关, 而且还与许多其他因素有关。

ISO 标准适用于一个给定方向上的直线振动。对于不同方向振动分量的联合效应的研究, 目前还处于开始阶段。

五、振动强度(加速度)的测定

在拖拉机从事田间作业时, 测定乘坐振动, 才能符合实际情况。但因农田地表大多是松软的, 地表不平度往往因拖拉机行驶次数和气候条件而变化。这样, 就不便对比试验结果。为了比较各种座位的性能, 应在同等条件下做对比试验, 试验条件应能重现, 换句话说, 要创造一种模拟拖拉机实际行驶条件的试验环境, 来测定乘坐振动。

目前采用的乘坐振动测定法有传递函数测定法、模拟试验跑道试验法、滚筒试验台试验法、电-液振动发生器试验法等。

实验室内传递函数试验法系用振动台输入不同振幅和频率的正弦振动, 测得的座位上振动加速度对振动台加速度的比值与频率的关系为传递函数。

测得的传递函数, 可作为确定驾驶座悬挂弹簧刚度和座位悬挂系统阻尼系数的依据。由实验室传递函数试验法计算出的座位振动加速度值和田间实测得出的数值是有较大出入的。这是在垂直正弦振动发生器上测定座位弹性悬挂性能时没有水平振动、角振动以及颠簸振动的非线性等因素所造成的。

在用试验跑道法时, 拖拉机应处于工作状态, 轮胎尺寸应符合拖拉机制造厂的规定, 轮胎花纹深度应不小于新轮胎花纹深度的 65%。轮胎气压应为制造厂建议的胎压范围的算术平均值, 轮距应为常用的轮距。

人工试验跑道有 (a) 100 米长的较平滑的试验跑道和 (b) 35 米长的较粗糙的试验跑道。前者相当于农村土路, 后者相当于已耕地。

在两种跑道上的行驶速度建议为

- (a) 在较平滑的跑道上 12 公里/小时;
- (b) 在较粗糙的跑道上 5 公里/小时。

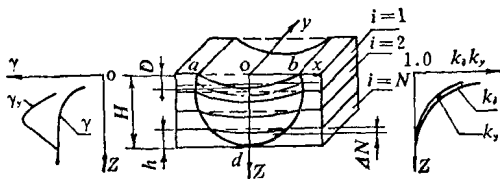
根据 ISO 5008-1979 号标准“农用轮式拖拉机和田间作业驾驶员整体振动的测量”的规定: 加速度传感器装在一个圆盘中央刚性部分上, 圆盘直径为 250 ± 50 毫米, 它的中央刚性部分直径 75 毫米。

传感器最好用一个刚性的盖子保护好。圆盘可用 20 毫米厚的弹性材料覆盖起来, 放在驾驶员座位中心。由于拖拉机振动剧烈, 人可能被振离座位, 因此除了把加速度传感器装在座位上之外, 还应同时装在驾驶员的背部。

机组行走系统对土壤的压实

В. Т. Шевцов

轮辙的深度 D , 变形土层的厚度 H , 土壤密度在深度上的变化 $\gamma = \gamma(z)$, 压实系数 k_r 和变形系数 k_n 与深度 z 的关系曲线, 都是机组行走系统压实土壤的主要特性(见图)。



由机器拖拉机机组行走系统所形成的土壤变形示意图

(在图中 c 点没有标出, c 点位于 ab 弧与 OZ 轴的交点上)

轮辙的深度 D 是一组直接测量的平均值, 直接测量是在三个同一长度 (15~20 米) 任意选择的轮辙区段里, 以同样的间隔 (1.5~2.0 米) 进行的。

变形层的厚度 H 是用目力观察变形概图预先确定的^[1]。同时将有弹性的聚乙烯薄膜, 固定在所研究土壤凹处经过仔细修齐的垂直侧壁上, 并且用土壤将此处填平。在机器从凹处上通过以后, 取出薄膜, 并且能沿着薄膜塞紧的方向发现土壤的压实区。以后在确定密度 γ 在土壤深度上的变化时, 能更准确地规定出变形层的深度。

为了求 γ , 利用 AM-7 仪器上的卡琴斯基钻套, 在每个厚度为 5 厘米的土层中选取四个试样。由取出的试样所测定出的平均密度, 与土层中心的密度相一致。

在计算 H 和作 $\gamma = \gamma(z)$ 关系曲线时, 必须考虑到所取土样深度的读数就是对土壤表面的变动。其变动量就是轮辙的深度 D , 所以轮辙的深度 D 是所有土层的总变形, 这些土层均受到机组行走系统的作用。

已变形土壤质量的总压实系数, 乃是未压实土壤容积与已压实土壤容积之比:

$$k_{\infty} = \frac{V_{aobd}}{V_{acbd}}$$

由于 k_{∞} 不能反映出机组行走系统对于土层的作用强度, 植物的根系便在此土层中形成, 以及由于在机组通过以前和通过以后, 测定每个土层容积的复杂性, 在机组车辙中心 (z

轴)的土壤最大变形区域里,根据密度的比例来求 k_y 是适宜的:

$$k_y = \frac{V_o}{V_y} = \frac{V_o m}{V_y m} = \frac{\gamma_y}{\gamma_o}$$

式中 m 为土壤变形微粒的质量; V_o 、 V_y 分别为土壤微粒在变形前后的容积。

当确定 k_y 是机组车辙的密度与土壤密度之比的情况下,除轮辙外需要了解变形土层的分布,它的分布可以一层一层的变形的计算为基础来计算。

正如土壤变形状态的分析所表明的那样(见图),土层在机组行走系统的作用下所产生的位移,第一,是由于沿 z 轴的压缩(压实);第二,是由于沿 x 轴的拉伸(消除压实),被压实土层弧形平均线的延长也证明了这点,被压实土层的弧形平均线象弦一样支持在未压实土层的平均线上。除轮辙的起点和终点以外,沿 y 轴的土层长度没有改变,在轮辙的起点和终点有土壤被压出。

如果把土层从 1 至 N 编上号码,以及把 i 土层下边界的坐标标上符号 z_i , i 土层的变形为 Δ_i , 土层的厚度为 h , 那末下列基本情况是很明显的,土壤在深度上变形的关系曲线应与这些基本情况相符合:上层紧密最少,因而其变形最大;土层的变形随深度的增加而减少,并且在深度 $H+h$ 上等于零;变形因深度而变化的关系曲线具有平滑的特性,并且当深度等于 $H+h$ 时,关系曲线将是深度轴上的切线;土层的变形值是与其厚度成正比例的;所有土层变形之和等于轮辙的深度 D 。

函数与所提出的条件相符合

$$\Delta_i = a(H+h-z_i)^2 h$$

式中 a 为固定系数,可由下列公式计算

$$\sum_{i=1}^N \Delta_i = D$$

例如,当 $N=7$, $D=5$ 厘米, $h=5$ 厘米和 $H=35$ 厘米

$$\sum_{i=1}^N \Delta_i = \sum_{i=1}^N 5a(40-z_i)^2 = 5$$

由此

$$a = 2.86 \cdot 10^{-4}$$

那末 Δ_i (当 $i=1-7$ 时)将分别等于: 1.75 厘米; 1.28; 0.89; 0.57; 0.32; 0.14; 0.04 厘米。

由未变形层和变形层的高度比所求出的土壤变形系数与深度的关系式是

$$k_{\pi i} = \frac{h}{h - \Delta_i} = \frac{1}{1 - 2.86 \cdot 10^{-4} (40 - z_i)^2}$$

土层在两个方向的变形会造成由于 x 轴土层的拉伸, k_{π} 将比 k_y 具有更大的值。

根据已算出的土层的变形,移动层中部土层的深度是

$$z_{oic} = z_{oi} + 0.5 \Delta_i + \sum_{i=1}^N \Delta_i$$

式中 z_{oi} ——未压实土层中部的坐标。

对于所研究的例子,未变形和移动过的土层中部的坐标等于(厘米):

i		1	2	3	4	5	6	7
z_{oi}		2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5
z_{oic}		6.62	10.10	14.02	18.29	22.84	27.61	32.52

用 $\gamma = \gamma(z)$ 曲线图求出相应的密度时, 就能计算 k_y (见图)。

所提出的计算 k_y 的方法, 能够更准确地规定出机器拖拉机机组的行走系统对于土壤作用的性质。

(参考文献略)

王隆基、张玉福译自 «Механизация и Электрификация С. С-Х.»

1980, № 2, p. 33

土壤的沉陷和压应力的关系

Д. И. Золотаревская

弄清楚土壤变形的规律性, 是制定机器行走器对土壤作用的计算方法的先决条件。

土壤是可以使之变形的物质, 具有流变性质。为了得到土壤的某种类型的流变方程式, 需要求得压应力 σ 和土壤在长时间静载荷下产生的相对压应变 ε 间的解析关系式, 即不包含时间 t 的关系式 $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, 亦即当 $t = \text{常数}$ 时的 $\sigma - \varepsilon$ 间的关系式。求得这些关系式的必要性在于, 如果 $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ 和若干时间函数已知, 那么 $\sigma = \sigma(\varepsilon, t)$ 就可以在一系列条件下得到^[1, 2]。

许多文献^[3~9]介绍了各种土壤的 σ 和 ε 或沉陷 h 之间的关系的研究成果, 但是, 这个复杂的问题还没有完全解决。例如, 文献^[1, 2, 10]中采用幂关系式

$$\sigma = Ch^\mu \quad (1)$$

式中 C 和 μ ——经验系数。

在现有的 $\sigma - h$ 关系的方程式中, 近来广泛采用关系式^[9]

$$\sigma = \sigma_0 \tanh \frac{k}{\sigma_0} h \quad (2)$$

式中 σ_0 ——土壤承压能力的极限;

k ——土壤的体积压缩系数。

关系式(2)已被大量的实验所证实。 σ_0 和 k 是已被确认的土壤性能的特征数(在文献^[11]和其他文献中介绍了它们的值)。但是, 式(2)没有反映出应力和土壤沉陷之间的关系的所有情况。

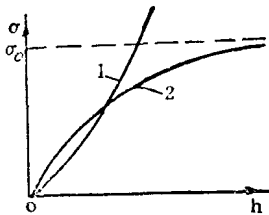


图1 应力和土壤沉陷之间的关系

在压模压入和行走器作用于土壤时产生压缩和剪切变形。图1介绍了两种类型的 $\sigma - h$ 实验曲线。曲线1反映疏松土壤的变形, 疏松土壤在垂直载荷作用下主要产生压缩变形。曲线2反映密实土壤的变形。在这种情况下, 当垂直载荷作用时, 土壤被压实的同时还发生显著的剪切变形(公式(2)正是反映了这条曲线)。但是, 不能排除对疏松土壤变形的研究。文献^[2, 8]按土壤试样压缩的结果, 以及文献^[12]按在田

间条件下利用滚动轮使土壤变形, 得出了疏松土壤的 $\sigma-h$ 实验关系式。文献[3~5, 7]给出了压模作用时压应力和土壤沉陷的一般关系式, 并且文献[4~7]给出了它的以接触强度理论为基础的理论论证。这些文献中反映土壤变形规律性的方程式都没有得到实际运用。

图2示出, 作图时使 ε 既有正值(压载荷), 又有负值(拉载荷)。曲线上拐点 $M(\varepsilon_m, \sigma_m)$, 乃是曲线的对称中心。当 $\varepsilon < \varepsilon_m$, 曲线是下凹的; 当 $\varepsilon > \varepsilon_m$, 曲线是上凸的。在正的 σ 的下凹段压实占优势, 而在上凸段土壤微粒的剪切占土壤总变形中的比例增长(依 σ 增长的大小)。曲线 $\sigma-\varepsilon$ 有两条水平渐近线, 它们的方程式分别为 $\sigma = \sigma_s$ 和 $\sigma = -\sigma_o$ ($\sigma_o > \sigma_s > 0$)^{*}。 σ_s ——土壤承压能力的极限; σ_o ——表征初压实的应力^[6, 7]。常常接近某些应力值, 有时甚至超过 σ_m , 曲线 $\sigma-\varepsilon$ 的开头一段取为直线^[13], 但这样不能确切地反映土壤变形的规律性。

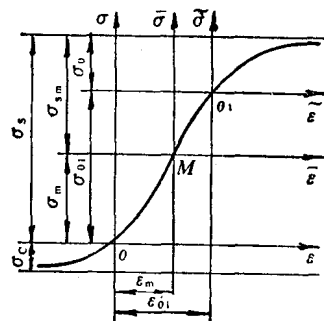


图2 一般类型的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

利用双曲正切函数, 求一般类型的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线的近似方程式。假设土壤被压实(σ 从零变到 σ_{o1}) 到应变 ε_{o1} ($\varepsilon_{o1}, \sigma_{o1}$ ——在 $\varepsilon O \sigma$ 坐标系中, 配置在曲线的上凸段上任意一点 O_1 的坐标)。建立辅助坐标系 $\tilde{\varepsilon} O \tilde{\sigma}$, 并求相应于 $\tilde{\varepsilon} \geq 0$ 的曲线段的方程式^[9], 可写作

$$\tilde{\sigma} = A \operatorname{th} B \tilde{\varepsilon} \quad (3)$$

确定参数 A 和 B 的物理意义。当 $\tilde{\varepsilon} \rightarrow \infty$, $\tilde{\sigma} \rightarrow A$ 时。同时(图2), 当 $\varepsilon \rightarrow \infty$ 时, $\tilde{\sigma} \rightarrow \sigma_o$ ($\sigma_o = \sigma_s - \sigma_{o1}$ ——预先从 $\varepsilon = 0$ 压缩到 $\varepsilon = \varepsilon_{o1}$ 的土壤承压能力的极限)。因此, $A = \sigma_o$ 。把 $E = d\sigma/d\varepsilon$ 称为土壤变形模数。那末, 模数 E 在坐标原点 O_1 处等于

$$E_{o1} = \left. \frac{d\tilde{\sigma}}{d\tilde{\varepsilon}} \right|_{\tilde{\varepsilon}=0} = \left. \frac{AB}{Ch^2 B \tilde{\varepsilon}} \right|_{\tilde{\varepsilon}=0} = AB$$

因此, $B = E_{o1}/\sigma_o$ 。将 A 和 B 的值代入(3)式, 得

$$\tilde{\sigma} = \sigma_o \operatorname{th} \frac{E_{o1}}{\sigma_o} \tilde{\varepsilon} \quad (4)$$

如果把土壤的相对压缩变为绝对压缩 $h = \tilde{\varepsilon} l$ (l ——被变形层的高度), 并用 κ 表示 E_{o1}/l , 将得到 $h-\tilde{\sigma}$ 坐标的对应于式(2)的方程式。

使平行于 $O\varepsilon$ 和 $O\sigma$ 的轴为 $M\tilde{\varepsilon}$ 和 $M\tilde{\sigma}$ 的辅助坐标系的原点和拐点 M 重合(图2)。由此可得, 在坐标系 $\tilde{\varepsilon} M \tilde{\sigma}$ 中曲线的上凸段可写成

$$\tilde{\sigma} = \sigma_{sm} \operatorname{th} \frac{E_m}{\sigma_{sm}} \tilde{\varepsilon} \quad (5)$$

式中 E_m ——在曲线拐点处的土壤变形模数;

$$\sigma_{sm} = \sigma_s - \sigma_m \quad (6)$$

为了得到在坐标系 $\varepsilon O \sigma$ 中的一般类型的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线方程式, 运用平行移轴坐标变换公式

$$\bar{\sigma} = \sigma - \sigma_m; \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon - \varepsilon_m \quad (7)$$

根据式(7), 变换式(5)。因而,

* 原文 $\sigma_o > \sigma_s > 0$, 应改为 $\sigma_s > \sigma_o > 0$ 。——译者注

** 原文 $\tilde{\varepsilon} O \tilde{\sigma}$, 应改为 $\tilde{\varepsilon} O, \tilde{\sigma}$ 。——译者注

$$\sigma = \sigma_{sm} \operatorname{th} \frac{E_m}{\sigma_{sm}} (\varepsilon - \varepsilon_m) + \sigma_m \quad (8)$$

因为, $\bar{\sigma} = -\sigma_m$ 时, 压缩量 $\varepsilon = -\varepsilon_m^*$, 所以, 从式(5)得

$$\sigma_m = \sigma_{sm} \operatorname{th} \frac{E_m}{\sigma_{sm}} \varepsilon_m \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 得方程式

$$\sigma = \sigma_{sm} \left[\operatorname{th} \frac{E_m}{\sigma_{sm}} (\varepsilon - \varepsilon_m) + \operatorname{th} \frac{E_m}{\sigma_{sm}} \varepsilon_m \right] \quad (10)$$

式(10)描绘了坐标系的原点放在曲线任何一点上时一般类型的 σ - ε 曲线。在 M 点, 函数 $E = E(\varepsilon)$ 有最大值 (E_m ——最大的土壤变形模数)。应力 σ_m 确定土壤压实阶段的范围^[18], 因此, 可以称 ε_m 为这个阶段的极限相对变形。 σ_{sm} 用土壤承压能力的极限 σ_s 和表征土壤起始压实的应力 σ_o 表示, 可按下式计算

$$\sigma_{sm} = (\sigma_o + \sigma_s) / 2 \quad (11)$$

由关系式(6)和(11)得

$$\sigma_m = (\sigma_s - \sigma_o) / 2 \quad (12)$$

已知 σ_m , σ_{sm} 和 $\varepsilon_m \neq 0$ 时, 模数

$$E_m = \frac{\sigma_{sm}}{\varepsilon_m} A_r \operatorname{th} \frac{\sigma_m}{\sigma_{sm}} \quad (13)$$

土壤的特征数 E_m 和 σ_{sm} 确定一般类型的 σ - ε 曲线的形状。 ε_m 表明每条具体的曲线上拐点相对于土壤加载起点的位置。将式(8)变为 E^{**} 的表达式, 及利用由式(13)变换得到的 ε_m 的表达式, 得

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{sm}}{E_m} \left(A_r \operatorname{th} \frac{\sigma - \sigma_m}{\sigma_{sm}} + A_r \operatorname{th} \frac{\sigma_m}{\sigma_{sm}} \right) \quad (14)$$

利用下式

$$A_r \operatorname{th} x = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} \quad (x^2 < 1)$$

和关系式(11)和(12), 变换方程式(14), 于是

$$\varepsilon = \frac{1}{L} \ln \frac{\sigma_o + \sigma}{\sigma_s - \sigma} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (15)$$

式中 $L = 2E_m / \sigma_{sm}$ ——相对的土壤硬度系数^[7]。

方程式(15)与文献[7]中的公式一致, 文献[7]中公式是在使文献[4, 5, 6]中的土壤变形性理论更精确的基础上得到的。文献[4~7]中, 在导出载荷和变形关系的方程式时, 认为力的增量使土壤微粒的接触点的数量成比例地增加, 且土壤微粒接触点的数量在压缩时增加, 而在剪切时减少。

解式(15)求得 σ

$$\sigma = \sigma_s \sigma_o [\exp(L\varepsilon) - 1] / [\sigma_s + \sigma_o \exp(L\varepsilon)] \quad (16)$$

这样, 式(10)和(16)反映的是同样一条曲线。已求出的关于 ε 的等价方程式(14)和(15)与它们一致。在实际运用上, 用方程式(10)表示土壤变形的规律性比用方程式(16)方便。

* 原文 $\varepsilon = -\varepsilon_m$, 应改为 $\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_m$ 。——译者注

** 原文 E , 应改为 E_m 。——译者注

要运用方程式(10), 则必须足够准确地确定它的参数。土壤的特征数 σ_s 、 σ_m 及与它们相联系的参数 σ_{sm} 、 ε_m , 利用图解法能够确定^[7]。此时, E_m 值需用公式(13)计算。

为了近似计算 σ_{sm} , E_m , ε_m , 可利用函数 $f(x) = \text{th}x$ 的马克劳林级数的展开式

$$\text{th}x = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 - \frac{17}{315}x^7 + \dots \left(\text{当 } x^2 < \frac{\pi^2}{4} \right)$$

设 $\left[\frac{E_m}{\sigma_{sm}} (\varepsilon - \varepsilon_m) \right]^2 < \frac{\pi^2}{4}$ 和 $\left(\frac{E_m}{\sigma_{sm}} \varepsilon_m \right)^2 < \frac{\pi^2}{4}$ 时,

$$x = x_1(\varepsilon) = \frac{E_m}{\sigma_{sm}} (\varepsilon - \varepsilon_m) \text{ 和 } x = x_2 = \frac{E_m}{\sigma_{sm}} \varepsilon_m$$

及利用级数的前两项, 得

$$\left. \begin{aligned} \text{th} \frac{E_m}{\sigma_{sm}} (\varepsilon - \varepsilon_m) &\approx \frac{E_m}{\sigma_{sm}} (\varepsilon - \varepsilon_m) - \frac{1}{3} \frac{E_m^3}{\sigma_{sm}^3} (\varepsilon - \varepsilon_m)^3 \\ \text{th} \frac{E_m}{\sigma_{sm}} \varepsilon_m &\approx \frac{E_m}{\sigma_{sm}} \varepsilon_m - \frac{1}{3} \frac{E_m^3}{\sigma_{sm}^3} \varepsilon_m^3 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

将式(17)代入式(10), 并完成变换, 得到 σ - ε 的近似方程式

$$\sigma = a\varepsilon^3 + b\varepsilon^2 + c\varepsilon \quad (18)$$

式中

$$a = -\frac{E_m^3}{3\sigma_{sm}^2}; \quad b = \frac{E_m^3}{\sigma_{sm}^2} \varepsilon_m; \quad c = E_m \left(1 - \frac{E_m^2}{\sigma_{sm}^2} \varepsilon_m^2 \right) \quad (19)$$

关系式(19)乃是由包含三个未知量 ε_m , E_m , σ_{sm} 的三个方程式构成的方程组。解方程组(19), 即得

$$\varepsilon_m = -\frac{b}{3a}; \quad E_m = c - 3a\varepsilon_m^2; \quad \sigma_{sm} = \left(\frac{E_m^3 \varepsilon_m}{b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

利用多项式(18)代替表达式(10)计算 σ , 由此产生的绝对误差 δ_a 用下列不等式评价

$$\delta_a < \frac{2}{15} \frac{E_m^5}{\sigma_{sm}^4} [(\varepsilon - \varepsilon_m)^5 + \varepsilon_m^5]$$

为检验得到的关系式, 根据资料^[3,7]精确地绘制出一系列 σ - ε 实验曲线。曲线1(图3)是在压模压入壤土时得到的。它的规律性用形式为(18)的多项式逼近。为确定系数 a 、 b 、 c , 运用拉格朗日插值公式

$$\begin{aligned} P_3(\varepsilon) = & \sigma_0 \frac{(\varepsilon - \varepsilon_1)(\varepsilon - \varepsilon_2)(\varepsilon - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)(\varepsilon_0 - \varepsilon_2)(\varepsilon_0 - \varepsilon_3)} \\ & + \sigma_1 \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)(\varepsilon - \varepsilon_2)(\varepsilon - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} \\ & + \sigma_2 \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)(\varepsilon - \varepsilon_1)(\varepsilon - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_0)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)} \\ & + \sigma_3 \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)(\varepsilon - \varepsilon_1)(\varepsilon - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_0)(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)} \end{aligned}$$

因为多项式(18)的常数项等于零, 所以在这个公式中需设 $\sigma_0 = 0$, $\varepsilon_0 = 0$ 。采用点(0; 0), (0.15; 0.26), (0.31; 0.65), (0.6; 1.18), 作为插值基点。对上述提到的壤土得到下列近似多项式

$$\sigma = -5.9945\varepsilon^3 + 5.0144\varepsilon^2 + 1.1160\varepsilon$$

用式(19)求出方程式(10)的参数: $\varepsilon_m = 0.2788$, $E_m = 2.5135$ 兆帕, $\sigma_{sm} = 0.9396$ 兆帕。

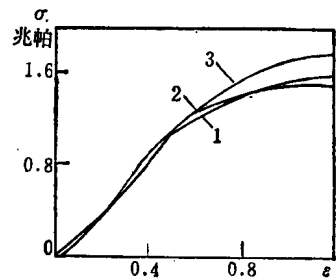


图3 σ - ε 曲线图

- 1—实验的;
2— $\sigma = 0.94\text{th}2.68(\varepsilon - 0.28) + 0.59$;
3— $\sigma = 1.24\text{th}1.87(\varepsilon - 0.31) + 0.65$

用式(6)、(11)、(12)确定 $\sigma_m = 0.5945$ 兆帕, $\sigma_s = 1.5340$ 兆帕, $\sigma_e = 0.3451$ 兆帕。将求得的值代入(9)式, 得出方程式

$$\sigma = 0.94th2.68(\varepsilon - 0.28) + 0.59 \quad (21)$$

图3中的曲线2和此方程式对应。为检查所得的方程式在多大程度上符合实验数据, 曾以 $\Delta\varepsilon = 0.05$ 为分距, 计算了理论值 $\sigma_{Ti}(i=0, 1, 2, \dots, 24)$ 。求出了理论值 σ_{Ti} 与对应的实验值 σ_{si} 的差的绝对值(绝对误差) ($\Delta_i = |\sigma_{Ti} - \sigma_{si}|$)。当 $\varepsilon = 0.6$ 时, 最大的差 $\Delta_{\max} = 0.069$ 兆帕。 $\varepsilon = 0.15$ 时, σ_{Ti} 与 σ_{si} 的最大的相对误差 $\delta_{\max} = 6.9\%$ 。 σ_{Ti} 与 σ_{si} 的平均绝对误差 $\bar{\Delta} = 0.028$ 兆帕, 平均根方差 $\sqrt{D(\sigma)} = 0.037$ 兆帕。

曲线3的参数是用图解法确定的^[7], ($\sigma_s = 1.89$ 兆帕, $\sigma_e = 0.59$ 兆帕, $\varepsilon = 0.31$), 以下列方程式表示

$$\sigma = 1.24th1.87(\varepsilon - 0.31) + 0.65 \quad (22)$$

取 $\Delta\varepsilon = 0.05$, 按照式(22)确定 σ_{Ti} 。评价曲线3相对实验曲线1的误差的指标为: $\Delta_{\max} = 0.218$ 兆帕(当 $\varepsilon = 1.15$ 时), $\delta_{\max} = 12\%$ (当 $\varepsilon = 1.15$ 时), $\bar{\Delta} = 0.1$ 兆帕, $\sqrt{D(\sigma)} = 0.132$ 兆帕。

因此, 介绍的确定土壤力学特性的计算方法, 对实际运用已足够精确, 并且比较简便。

已经研究过 σ - ε 曲线的下凹和上凸的逼近法问题。可以认为这些曲线为一般类型的 σ - ε 曲线上的一段。对于曲线1(图3)的下凹部分用拉格朗日公式, 以(0; 0), (0.1; 0.17), (0.2; 0.37), (0.3; 0.62)为基点, 完成插补, 求得多项式(当 $\varepsilon \geq 0$)

$$\sigma = 3.33\varepsilon^3 + 0.50\varepsilon^2 + 1.62\varepsilon \quad (23)$$

在这一段上得出的 σ 值接近于它的相应的实验值 ($\Delta_i \leq 0.07$ 兆帕, 在测量精度范围内)。但是, 由公式(23)确定的曲线拐点的坐标与实验曲线拐点的坐标显著不同。采用其他方法确定近似多项式的系数, 得到类似的结果。对一般类型的 σ - ε 曲线的下凹段没能足够精确地求得它的方程式的参数。

E_m , ε_m , σ_{sm} 为未知的值, 土壤的 σ - ε 下凹曲线可以直接用 $\sigma = a_1\varepsilon^3 + b_1\varepsilon^2 + c_1\varepsilon$ 的多项式表示。采用这种近似法来解由机器行走器引起的土壤变形的若干问题时, 比采用幂关系式的近似法好, 因为它为应用提供了较精确和方便的计算公式。

曲线1(图3)的上凸段, 以点(0.5; 1.06)为起点, 在 σ - h 坐标系中用关系式(2)表示它。这个关系式的参数 σ_0 和 h 用公式^[9]来确定。求得的理论曲线

$$\sigma = 0.58th0.85h \quad (24)$$

以很高的精度和实验曲线相符 ($\Delta_i \leq 0.01$ 兆帕, 在测量精度范围内)。与式(2)一致的关系式(4)和(5)的参数, 也可以用本文中对一般类型的曲线的近似求解时采用的图解法和计算法来确定。

将实验资料 and 计算结果相比较, 确认用方程式(10)表示土壤的压应力和沉陷的关系的正确性, 并与文献[6, 7, 9]的结论一致。

研究的成果可用于制定决定机器和土壤的相互作用特性的计算方法。

结论: 在一般情况下, σ 和 ε 的关系可以用方程式(10)表示。

方程式(10)和(16)是等价的。对于实际运用而言, 表达式(10)较(16)方便。

采用提供的计算方法确定土壤的特性 E_m 、 σ_{sm} 、 ε_m , 比用图解法^[7]精确。

下凹的 σ - ε 实验曲线可以用三次多项式近似表示。