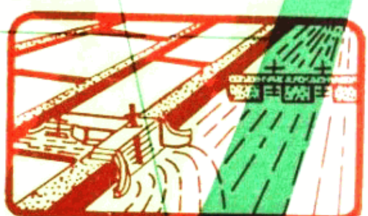
国外

农业工程

第5辑



上海科学技术文献出版社

国外农业工程
（第五辑）
中国农业工程学会
《国外农业工程》编委会编
*
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
江苏省宜兴县南漕印刷厂印刷
*
开本 787×1092 1/16 印张 9.75 字数 244,000
1981年12月第1版 1981年12月第1次印刷
印数：1—1700
书号：16192·19 定价：1.25元
《科技新书目》17-207

目　　录

一、动力和机具

二、农业能源

三、农田灌溉

四、环境工程

动力和机具

拖拉机和农业机械的模型试验

吴 起 亚

在水工航空和航海等技术领域，开展模型试验已有很长的历史，并已取得一些显著成果。早在1869年，Froude就为英国海军进行了船壳的模型试验。但用模型试验来研究拖拉机和农业机械的性能并改进设计却开展得比较晚。主要原因有二：1、和空气或水比较，土壤的变化太大。空气和水具有相当明确的和可预计的特性，而土壤的特性不太明确，不容易量测，也不容易被预测。2、在经费和技术上没有得到那样大的支持。

1930年前后，德国开始了车辆模型试验。二次世界大战以后，用模型试验来预计原型农业机具的性能的试验研究工作才逐渐开展起来。一般说来，用缩小尺寸的模型进行试验可以节约费用和时间，又比较容易地控制试验条件，因而较易于揭示出影响性能的因素，得出简单的基本概念。

一、模型试验的目的

模型试验的目的是通过对模型的观察和测量来了解和认识原型，换句话说，就是以模型试验的结果为依据，来预测原型的性能。

自然界中，某一物理过程常由物体外界及内界许多因素决定。每一个因素又按一定法则对该物理过程起作用，因而因素之间又互相制约。如果我们(在实验室中)创造了与天然相近似的条件，就有可能产生一定的物理过程，这样就可以通过人为的措施，预见到物理过程的性质。例如拖拉机行走部件与土壤的相互作用产生滚动阻力，由于各种土壤的组成和物理机械性质差异很大，行走部件的结构参数也不相同，作用的情况也很复杂，要在模型中得到相似的现象，那就需要了解上述现象中各种力的分布作用情况，使模型和原型中有同样类型的力的分布及作用情况，并相应地符合相同的比例。那么，我们把对模型观测的结果乘上相应的比例系数，就可以得到原型的相应数值，因而也就达到了模型试验的目的。

二、量 纲 分 析

在进行模型试验时，需要求出π项，π项也可叫做相似准则。导出π项的方法有方程分析法和量纲分析法两种。根据关系方程式导出π项的方法称为方程分析法。

当事先无法求得描述现象的关系方程式时，可用量纲分析法求π项。在农机及拖拉机的模型试验中，因为事先往往不知道所研究的物理现象的关系方程式，所以常用量纲分析法求π项。

用量纲分析法求出π项间的关系后，就能得到几乎任何问题的部分解答，但用这种方法不能得到完整的解答，而且单独用量纲分析法也不能说明一种现象的内部变化情况。

量纲分析从十九世纪末即已开始应用，柏金汉氏在1914年对量纲分析原理进行了阐述，但是并没有完全证明这些原理。布立奇曼氏在1922年大致完成了这一项工作。

根据柏金汉理论，某一现象当用 n 个参量、r 个基本量纲的函数来表示时，它可用以下形式表现，即

$$f(\pi_1,\ \pi_2,\ \cdots,\ \pi_{n-r})=0$$

式中，每个 π 项都是一个独立的无量纲的比。

这就是说，描述现象的关系方程式，可以转变成相似准则间的关系式。该函数能够写成下列形式来表示因变 π 项与自变 π 项间的关系，即

$$\pi_1=f(\pi_2,\ \pi_3,\ \cdots,\ \pi_{n-r})$$

设在一个工程技术问题中，已知一物理量 q 以某种方式依赖于其他物理量，例如

$$q_1=f(q_2,\ q_3,\ \cdots,\ q_n)$$

式中 q_1——因变参量；

$q_2,\ q_3,\ \cdots,\ q_n$——自变参量。

上式有 $n-1$ 个自变参量。为了通过实验确定 q_1 对 q_2、q_3、$\cdots q_n$ 的依赖关系，需要做 $n-1$ 个试验。但如依据定理，则得

$$\pi_1=f(\pi_2,\ \pi_3,\ \cdots,\ \pi_{n-r})$$

根据上式，只需做 $n-r-1$ 个试验。后者的试验工作远比前者少。由此可见，按照 π 定理要求安排实验、整理并解释实验数据可以节约实验时间和经费。

对于一个物理过程进行量纲分析时，首先选定自变参量与因变参量，然后，列出量纲分析矩阵。在排矩阵时，必须选定基本量纲。

在力学和机械系统中，通常取质量 M、长度 L 与时间 T 作为基本量纲。在工程中，则多用长度、时间与力 F 作为基本量纲。

力的量纲与质量的量纲之所以不是独立的，是因为它们之间受牛顿第二定律的约束。然而，如果在所讨论的特定问题中，不需要使用牛顿第二定律，那么力的量纲和质量的量纲就相互独立了。这时，基本量纲就从3个增加到4个（力学及机械系统中各物理量的量纲见表1）。

表1 力学及机械系统中各物理量的量纲

物理量	质量系统中量纲	力系统中量纲	物理量	质量系统中量纲	力系统中量纲
长度 L	L	L	应力 σ	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
时间 T	T	T	应变 ε	—	—
质量 M	M	$FL^{-1}T^2$	应变率	T^{-1}	T^{-1}
力 F	MLT^{-2}	F	弹性模量 E	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
面积 A	L^2	L^2	力矩	ML^2T^{-2}	FL
体积 V	L^3	L^3	能，功 W	ML^2T^{-2}	FL
密度 ρ	ML^{-3}	$FL^{-4}T^2$	功率 P	ML^2T^{-3}	FLT^{-1}
速度 v	LT^{-1}	LT^{-1}	转动惯量 I	ML^2	FLT^2
加速度 a	LT^{-2}	LT^{-2}	动力粘度 η	$ML^{-1}T^{-1}$	FTL^{-2}

可以用几种比较正规的方法来形成 π 项，但是并没有一种能保证得到最有用的 π 项的方法。通常可以用观察的方法决定，只要预先做好下列准备工作。选定基本自变参量，并使基本参量的数目等于量纲分析矩阵阶数。在这些参量中，应当包含所有的需用的基本量纲。

在选定基本自变参量时，最好选定此系统中最基本的，也就是以后不会认为是可以略去不计的那些参量。

其次一步是将剩下的各个自变参量、再次是将各个因变参量逐一的与基本自变参量组合起来，成为 π 项。非基本参量的每一个只在一个 π 项中出现。这样就形成了一些独立的 π 项。所谓独立的 π 项，就是说这些 π 项中的任一个都不是其余 π 项的幂函数的乘积。

如令　n——参量个数；

　　　r——基本量纲的数目。

则一般情况下，π 项数 $=n-r$。

但严格说来，$r=$ 量纲矩阵的秩，即矩阵中不等于零的子式的最大阶数。$n-r$　π 项是该物理现象的 π 项的完整集合。

量纲矩阵的秩，一般与基本量纲数相等，但有时则不等。

如果基本参量选择得好，形成的 π 项在分析中或实验中将很有用处。假如选择得不恰当，也可以用适当的方法转换到比较好的形式。

π 项通常是在同一个物理现象中，两个相同性质的物理量的比例，如长度与宽度之比、作用力之比、动量之比、能量之比等。

最后写出因变的 π 项与自变的 π 项之间的关系方程式，量纲分析即告完成。

根据需要，由系统的试验数据组成的各种 π 项通过数据处理中的作图和求系数的方法绘制一个 π 项相对于另一 π 项的关系曲线，进而分析其函数关系，得出经验公式和关系式。

关于求 π 项的方法，也可用以下方式说明。表征物理现象的参量可由下式表示，即

$$A_i=M^{\alpha_i}L^{\beta_i}T^{\gamma_i}$$

式中　$i=1,\ 2,\ 3\cdots n$

因 n 个参量为已知，故 α_i、β_i、γ_i 是已知的常数。π 项是由表征现象的参量所组成的，且是这些参量的幂函数，故 π 项可表示为

$$\pi_j=A_1^{k_1}A_2^{k_2}A_3^{k_3}\cdots A_n^{k_n}=(M^{\alpha_1}L^{\beta_1}T^{\gamma_1})^{k_1}(M^{\alpha_2}L^{\beta_2}T^{\gamma_2})^{k_2}$$
$$(M^{\alpha_3}L^{\beta_3}T^{\gamma_3})^{k_3}\cdots(M^{\alpha_i}L^{\beta_i}T^{\gamma_i})\cdots(L^{\alpha_n}M^{\beta_n}T^{\gamma_n})^{k_n}$$

如能求得各参量的指数 k_1、k_2、$k_3\cdots k_i\cdots k_n$，即可求出 π 项。求 k_1、k_2、$k_3\cdots k_i\cdots k_n$ 的方法如下：因为 π 项是无因次量，故

$$\left.\begin{array}{l}\text{对于 } M \text{ 有 } \alpha_1k_1+\alpha_2k_2+\cdots+\alpha_ik_i+\cdots+\alpha_nk_n=0\\ \text{对于 } L \text{ 有 } \beta_1k_1+\beta_2k_2+\cdots+\beta_ik_i+\cdots+\beta_nk_n=0\\ \text{对于 } T \text{ 有 } \gamma_1k_1+\gamma_2k_2+\cdots+\gamma_ik_i+\cdots+\gamma_nk_n=0\end{array}\right\}\qquad(1)$$

式(1)为参量的指数关系式。

上述方程式组由三个线性齐次方程式组成，但有 n 个未知数，即 k_1、$k_2\cdots k_n$。显然方程式的数目等于选用的基本量纲数目，而需要确定的未知数数目等于该物理现象包含的参量数目。根据线性代数理论，式(1)有无穷多组解，但其基础解的数目等于参量数目减去式(1)的量纲矩阵的秩数。

三、用量纲分析求 π 项的具体例子

兹以越野车辆在硬路面上行驶为例，说明求 π 项的方法。先列举主要物理量(参量)如

下：

I——车辆惯性矩；

H_p——车辆功率；

ρ——质量密度；

V——速度；

N——转速；

M——车辆质量；

F——车辆的力；

l——车辆长度；

p——接地压强；

μ——车轮与道路附着系数；

g——重力加速度。

量纲分析矩阵如下：

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	
	F	V	I	H_p	p	N	ρ	g	l	μ
M	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0
L	1	1	2	2	−1	0	−3	1	1	0
T	−2	−1	0	−3	−2	−1	0	−2	0	0

$$\begin{aligned}\pi &= F^{k_1}V^{k_2}I^{k_3}H_p^{k_4}p^{k_5}N^{k_6}\rho^{k_7}g^{k_8}l^{k_9}\\ &=(MLT^{-2})^{k_1}(LT^{-1})^{k_2}(ML^2)^{k_3}(ML^2T^{-3})^{k_4}(ML^{-1}T^{-2})^{k_5}(T^{-1})^{k_6}(ML^{-3})^{k_7}(LT^{-2})^{k_8}(L)^{k_9}\\ &=M^{k_1+k_3+k_4+k_5+k_7}L^{k_1+k_2+2k_3+2k_4-k_5-3k_7+k_8+k_9}T^{-2k_1-k_2-3k_4-2k_5-k_6-2k_8}\end{aligned}$$

故

$$k_1+k_3+k_4+k_5+k_7=0$$

$$k_1+k_2+2k_3+2k_4-k_5-3k_7+k_8+k_9=0$$

$$-2k_1-k_2-3k_4-2k_5-k_6-2k_8=0$$

假定 k_1、k_2、$k_3 \cdots k_6$ 为已知，求 k_7k_8 及 k_9，得

$$k_7=-k_1-k_3-k_4-k_5$$

$$k_8=\frac{-2k_1-k_2-3k_4-2k_5-k_6}{2}$$

$$k_9=-k_1-k_2-2k_3-2k_4+k_5+3(-k_1-k_3-k_4-k_5)-\frac{-2k_1-k_2-3k_4-2k_5-k_6}{2}$$

$$k_9=\frac{-6k_1-k_2-10k_3-7k_4-2k_5+k_6}{2}$$

令

$k_1=1,\ k_2=k_3=k_4=k_5=k_6=0$，则 $k_7=-1,\ k_8=-1,\ k_9=-3$

$k_2=1,\ k_1=k_3=k_4=k_5=k_6=0$，则 $k_7=0,\ k_8=-\dfrac{1}{2},\ k_9=-\dfrac{1}{2}$

$k_3=1,\ k_1=k_2=k_4=k_5=k_6=0$，则 $k_7=-1,\ k_8=0,\ k_9=-5$

$k_4=1,\ k_1=k_2=k_3=k_5=k_6=0$，则 $k_7=-1,\ k_8=-\dfrac{3}{2},\ k_9=-\dfrac{7}{2}$

$$k_5=1,\ k_1=k_2=k_3=k_4=k_6=0,\ 则\ k_7=-1,\ k_8=-1,\ k_9=-1$$

$$k_6=1,\ k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=0,\ 则\ k_7=0,\ k_8=-\frac{1}{2},\ k_9=\frac{1}{2}$$

将上列各值填入下列指数矩阵内:

指数	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	
参量	F	V	I	H_p	p	N	ρ	g	l	μ
π_1	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-3	
π_2	0	1	0	0	0	0	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	
π_3	0	0	1	0	0	0	-1	0	-5	
π_4	0	0	0	1	0	0	-1	$-\frac{3}{2}$	$-\frac{7}{2}$	
π_5	0	0	0	0	1	0	-1	-1	-1	
π_6	0	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
π_7	(μ)									

故

$$\pi_1=\frac{F}{\rho g l^3}$$

$$\pi_2=\frac{v^2}{gl}$$

$$\pi_3=\frac{I}{\rho l^5}$$

$$\pi_4=\frac{H_p^2}{\rho^2 g^3 l^7}$$

$$\pi_5=\frac{p}{\rho g l}$$

$$\pi_6=\frac{N^2 l}{g^2}$$

$$\pi_7=\mu$$

在量纲矩阵内，参量的安排次序可按下列原则：第一个参量是因变量，第二个参量应该是在实验时最容易调节的参量；第三个参量是次于最容易调节的参量，如此类推。

上述各 π 项间的关系式可用下式表示：

$$\frac{V^2}{gl}=\phi\left(\frac{F}{\rho g l^3}、\frac{I}{\rho l^5}、\frac{p}{\rho g l}、\frac{H_p^2}{\rho^2 g^3 l^7}、\frac{N^2 l}{g},\ \mu\right) \tag{2}$$

试验者希望任何一个独立的 π 项都能较容易地受试验技术的控制，而其他独立的 π 项值可以维持不变。这种希望是不容易做到的，因为通常在最初的原始参量中只有少数几个可以由实验控制。例如在管道内液体的速度能够用阀门调节，但是重心加速度这个参量却不能由人来控制。

柏金汉指出：假若那些能够调节的参量每一个只在一个 π 项内出现，我们就得到对于 π 项的最大可能的控制。例如，速度 v 在实验时是容易改变的，则 v 只应该在一个独立的 π 项中出现。同样，假若压力 p 能够容易调节，而又不影响 v，那么 p 应该只在一个独立的 π 项内出现，但不和 v 在同一个 π 项内。因为要想知道因变参量的变化与其他参量的关系，所以

因变参量只能在一个 π 项内出现。例如在上述全组 π 项内，v 只在一个 π 项内出现。根据柏金汉氏提出的原则，让每一个 π 项只包含一个参量(除基本参量外)，则在参量不多时，可根据观察法求 π 项。这个方法就是先写出一个非基本参量的量纲式，观察它的量纲和量纲指数，然后取基本参量，与之组成 π 项，换句话说，使各量纲指数之和等于零。

例如，先取非基本参量 F 与基本参量 ρ、g、l 组成一 π 项，假定 F、ρ、g、l 的指数分别为 a、b、c、d，故

$$F^a=(MT^{-2}L)^a=M^aT^{-2a}L^a$$
$$\rho^b=(ML^{-3})^b=M^bL^{-3b}$$
$$g^c=(LT^{-2})^c=L^cT^{-2c}$$
$$l^d=L^d$$
$$\pi_1=F^a\rho^bg^cl^d=(M^aT^{-2a}L^a)(M^bL^{-3b})(T^{-2c}L^c)L^d$$
$$=M^{a+b}T^{-2a-2c}L^{a-3b+c+d}=M^0T^0L^0$$

故 $a+b=0$，如令 $a=1$，则 $b=-1$。$-2a-2c=0$，则 $-c=a$，如 $a=1$，则 $c=-1$。

因 $a-3b+c+d=0$，故 $d=-3$

故所求之 π 项为

$$F\rho^{-1}g^{-1}l^{-3}=\frac{F}{\rho gl^3}。$$

用上法，可依次求出

$$\frac{I}{\rho l^5},\ \frac{H_p^2}{\rho^2g^3l^7},\ \frac{p}{\rho gl},\ \frac{N^2l}{g}$$

在量纲分析中，应该注意正确选定必要的参量。在每一个物理过程里，哪些是必要的参量有时难以决定。如果有重要影响的参量没有包括进去，就不能找出这种物理过程的真实规律，反之，如果包括了一些关系不大的变量，又会使分析工作复杂化。

分析 π 项的物理意义和比较它们数值的大小，往往能帮助判定可以略去哪些自变量。例如，对于一个质点的运动，如果作用有两个性质类似的力 F_1 和 F_2，如果 $\frac{F_2}{F_1}\ll 1$，则有时可以忽略 F_2，因此，由 $\frac{F_2}{F_1}$ 形成的 π 项，将不在

$$\pi_1=f(\pi_2、\pi_3\cdots\pi_{n-r})$$

中出现。

要决定哪些是必要的，就要求研究工作者对具体问题和具体情况有比较深入的本质的了解。

四、模型设计的条件和进行模型试验的步骤

量纲分析被用于建立模型试验所需要的相似条件。

柏金汉理论用下列方式定义原型系统和模型系统：

原型 $\pi_1=f(\pi_2、\pi_3\cdots\pi_{n-r})$

模型 $\pi_{1m}=f(\pi_{2m}、\pi_{3m}、\cdots\pi_{(n-r)m})$

上面说过模型试验的目的就是以模型试验结果为依据，来预测原型的性能。也就是说，要满足下列条件：

$$\pi_1 = \pi_{1m}$$

要使 $\pi_1=\pi_{1m}$，首先要使原型和模型的各独立 π 项都各相等。这也是设计模型的条件：

$$\pi_{2m}=\pi_2、\pi_{3m}=\pi_3\cdots\pi_{(n-r)m}=\pi_{n-r}$$

由于测量的误差，严格说来，各独立 π 项不可能绝对相等。一个或一个以上的 π 独立项不相等就叫做畸变。所以，严格说来，所有模型都是畸变的。但如果这种差异不致造成对原型性能估计上的显著误差，这种模型就是合适的模型。

模型设计条件应保证模型与原型间的几何相似、动力相似和运动相似，如果原型与模型的相应长度和力的无因次比值各各相当，则可获得几何相似和动力相似。运动相似则决定于各相当点或部件的位移。在工程实践上，几何相似比较容易做到，但建立动力相似却是模型设计的主要任务，因此，必须识别影响系统的所有的力，并把它们包括到代表该系统的全组的 π 项内。这就需要研究该系统的力学和该系统的材料，就土壤机器系统而言，这就需要识别并测定主要的土壤性质。根据量纲分析建立土壤-机器系统模型，可按下列步骤进行：

① 问题的陈述或提出假说；
② 识别主要变量；
③ 求出 π 项；
④ 设计并试验模型；
⑤ 预计原型性能或检验所提出的假说。

五、充气轮胎在松软土壤上的模型试验

兹以充气轮胎在松软土壤上工作时的情况为例，说明进行模型试验的步骤和具体做法。

（一）问题的提出

美国水道试验站在六十年代初期进行了轮胎模型试验。目的在于预计充气轮胎在松软土壤上的性能。期望探明轮胎载荷、几何尺寸、轮胎挠性和土壤强度对牵引附着性能的影响。

（二）识别主要参量

选择主要参量时，要考虑到试验研究目的，也要顾及到现实的设备及技术条件。例如用总尺寸为 d、b 和 h 的无花纹的（光滑的）半圆形（Torus）来代表充气轮胎。用轮胎挠度 δ 表示轮胎挠性而不用充气压力。土壤参量也是专对均匀的不分层的土壤而言，因为均匀的不分层的土壤的抗剪性能可用内聚力和内摩擦角表示。充气轮胎-土壤系统的参量见表2。

表2　充气轮胎-土壤系统的参量

参　　量	符　号	量　纲	参　　量	符　号	量　纲
独立参量 i			系统		
轮胎			载荷	W	F
直径	d	L	平移速度	V	LT^{-1}
断面宽	b	L	滑动率	S	—
断面高	h	L	轮胎-土壤摩擦	μ	—
挠度	δ	L	重力加速度	g	LT^{-2}
土壤			因变参量：		
摩擦角	φ	—	牵引力	p	F
内聚力	c	FL^{-2}	拖力	p_T	F
比重	γ	FL^{-3}	扭矩	Q	FL
取决于应变率的抗剪切强度	β	$FL^{-2}T$	下陷量	Z	L

（三）求 π 项

在 17 个参量而基本量纲为 3 的情况下，可有 $17-3=14$ 个 π 项。

$$\pi_1=\frac{p}{W} \qquad \pi_8=\frac{b}{d}$$

$$\pi_2=\frac{p_T}{W} \qquad \pi_9=\frac{h}{d}$$

$$\pi_3=\frac{Q}{dW} \qquad \pi_{10}=\frac{\delta}{h}$$

$$\pi_4=\frac{Z}{d} \qquad \pi_{11}=\frac{cd^2}{W}$$

$$\pi_5=\mu \qquad \pi_{12}=\frac{rd^3}{W}$$

$$\pi_6=\varphi \qquad \pi_{13}=\frac{\beta Vd}{W}$$

$$\pi_7=S \qquad \pi_{14}=\frac{gd}{V^2}$$

π 项是兼靠观察和矩阵技术求出的，π 项间的函数关系如下：

$$\frac{p}{W},\ \frac{p_T}{W},\ \frac{Q}{dW},\ \frac{Z}{d}=f\Big(\mu,\ \varphi,\ S,\ \frac{b}{d},\ \frac{h}{d},\ \frac{\delta}{h},\ \frac{cd^2}{W},$$

$$\frac{\gamma d^3}{W},\ \frac{\beta Vd}{W},\ \frac{gd}{V^2}\Big) \tag{3}$$

（四）模型试验

π 项多到 14 个，要进行模型试验还是不容易的。为了简化试验工作，可把试验分成两组，一组限于"纯"粘土($\varphi=0$)，另一组限于"纯"砂($c=0$)。此外，可用圆锥指数来度量土壤性质，在粘土，平均圆锥指数 CI 被解释为相当于内聚力 c。在砂里，圆锥指数变化率(grodient)被认为主要受土壤密度 γ 的影响。砂的摩擦角 φ 视为常数。

$\pi_9\left(\frac{d}{h}\right)$是不加控制的，它对土壤-车辆系统性能的影响不显著。在被牵引的轮胎，$\pi_7(S)$ 也不必考虑。当土壤很弱，以致只有土壤与土壤之间发生失效而轮胎与土壤之间没有相对滑动时，轮胎-土壤间的摩擦的影响也可以略去不计，即 π_5 也可以不考虑。

就所用的轮胎大小而言，速度对于试验结果的影响很微，因此，进行试验时采取相同的速度。

经过上述简化以后，π 项间的函数关系变为：

$$\text{粘土：}\ \frac{p}{W},\ \frac{p_T}{W},\ \frac{Q}{dW},\ \frac{Z}{d}=f\left(\frac{cd^2}{W},\ \frac{b}{d},\ \frac{b}{h}\right)$$

$$\text{砂：}\ \frac{p}{W},\ \frac{p_T}{W},\ \frac{Q}{dW},\ \frac{Z}{d}=f'\left(\frac{\gamma d^3}{W},\ \frac{b}{d},\ \frac{\delta}{h}\right)$$

（五）原型性能的预计和所提假设的检验

研究的主要目的是在充气轮胎-土壤系统的一些重要参量之间建立定量关系。

模型试验结果证实了下列假设，即在粘土上轮胎载荷大小决定于

$$\frac{c\lambda^2}{W}=\left(\frac{c\lambda^2}{W_m}\right)$$

式中　λ——长度参量

因为 $c=c_m$，故 $\frac{W}{W_m}\propto\left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2$

同样，在砂里，轮胎载荷大小决定于 $\gamma\lambda^3/W$，即与长度的立方成比例。

因为 $\gamma=\gamma_m$，所以 $\frac{W}{W_m}\left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^3$

用 4.00-7 轮胎和 9.00-14 轮胎构成相似系统。试验结果证实速度对系统性能影响不大，因为这两种尺寸不同的轮胎用同一速度进行试验，而所得结果互相符合。

根据模型试验结果，为美国陆军设计在软土上高机动性运输车辆取得成功，并为这种车辆选择承受规定载荷和使用于给定土壤条件的轮胎。

根据模型试验结果，预计值和实测值相差不大。

六、土壤-铁轮系统的模型试验和量纲分析

对于土壤-铁轮系统，有人建议用下列参量和 π 项。

(一)土壤-铁轮系统和参量

1．独立参量

(1) 土壤		
内聚力	c	$ML^{-1}T^{2}$
摩擦角	φ	—
比重	γ	$ML^{-1}T^{-1}$
粘度	η	$ML^{-1}T^{-1}$
(2) 铁轮		
直径	d	L
轮圈宽度	b	L
轮刺高度	h	L
轮刺角	β	—
轮刺间隔	L_k	L
(3) 系统		
法向载荷	W	MLT^{-2}
轮缘速度	V_t	LT^{-1}
滑转率	i	—
重力加速度	g	LT^{-2}
轮子-土壤摩擦	μ	—

2．因变参量

拉力	p	MLT^{-2}
扭矩	T	ML^2T^{-2}

下陷量　　　　　　Z　　　　　　L

(二)π 项

$$\pi_1=\frac{p}{W},\ \pi_2=\frac{T}{dW},\ \pi_3=\frac{Z}{d},\ \pi_4=\frac{c}{\gamma d}$$

$$\pi_5=\frac{\gamma d^3}{W},\ \pi_6=\frac{\eta^2 g}{\gamma^2 d^3},\ \pi_7=\frac{b}{d},\ \pi_8=\frac{h}{d}$$

$$\pi_9=\beta,\ \pi_{10}=L_s/d,\ \pi_{11}=gd/V^2,$$

$$\pi_{12}=i,\ \pi_{13}=\varphi,\ \pi_{14}=\mu$$

π_1、π_2、π_3——因变参量

π_3、π_6、π_{11} 和 π_{14}——可以略去。可略的理由是在控制的试验条件下进行试验，供试轮子的直径相等；每次试验时，用同一种土壤，且土壤情况也相同。

因此，预计方程式如下：

$$\frac{p}{W}=f_1(i,\ \gamma d^3/W,\ b/d,\ h/d,\ \beta,\ L_s/d)$$

$$T/dW=f_2(i,\ \gamma d^3/W,\ b/d,\ h/d,\ \beta,\ L_s/d)$$

$$Z/d=f_3(i,\ \gamma d^3/W,\ b/d,\ h/d,\ \beta,\ L_s/d)$$

七、耕耘机具的模型试验

圆盘犁的几何形状比较简单，能够用少数几个参量表示出来，兹以圆盘犁为例，说明模型试验在整地农具试验研究上的应用。

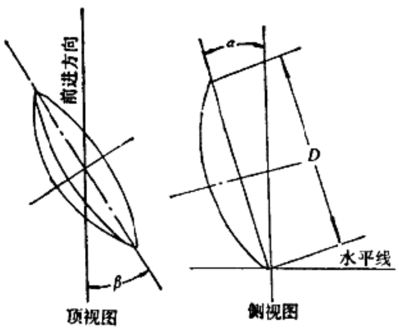


图 1　圆盘的几何尺寸

(一)分析

圆盘参量

符号	定义	量纲
D	盘径	L
λ	其他长度	L
α	倾斜角	—
β	圆盘接近角	—

圆盘实际上等于一个球被平面切割后的一部分，λ 可以是曲面半径，或球心距切割面的距离，或圆盘材料厚度。

在初步试验中需要研究的因变参量是牵引阻力，也就是土壤对圆盘反作用力的与地面平行的分力，用 R 代表。因使用情况不同而出现的参量有 V(圆盘相对于土壤的速度)和重力加速度。

至于土壤参量，可用两个不同的系统表示，即

土壤参量系统 A，即根据土壤机械分析[4]：

ω——土壤容重(湿重)　　　　FL^{-3}

M——湿度　　　　—

c_1——粘土含量　　　　—

μ——土壤金属摩擦角　　　　—

土壤变量系统 B(Payne)，即根据土壤抗剪强度：

ω——土壤容重 FL^{-3}

c——内聚力 FL^{-2}

φ——摩擦角 —

μ——金属(圆盘)-土壤摩擦角 —

A——圆盘土壤粘附力 FL^{-2}

Bockhop[2] 采用土壤参量系统 A，从 11 个参量中，组成 8 个 π 项，并得到下列关系式：

$$\frac{R}{\omega D^3}=f(\lambda/D,\ V^2/gD,\ d,\ \beta,\ M,\ c_1,\ \mu) \tag{4}$$

Mcleod[3] 采用土壤系统 B，得到下列关系式：

$$\frac{R}{\omega D^3}=F\left(\frac{\lambda}{D},\ V^2/gD,\ d,\ \beta,\ \varphi,\ \mu,\ c/\omega D,\ A/\omega D\right) \tag{5}$$

如果采用土壤参量系统 A，而

$$\frac{R}{\omega D^3}=\frac{R_m}{\omega_m D_m^3}$$

则模型与原型之间存在下列关系

$$\frac{\lambda_m}{D_m}=\frac{\lambda}{D} \tag{6}$$

$$V_m^2/g_m D_m=\frac{V^2}{gD} \tag{7}$$

$$\mu_m=\mu \tag{8}$$

$$\alpha_m=\alpha \tag{9}$$

$$\beta_m=\beta \tag{10}$$

$$M_m=M \tag{11}$$

$$c_m=c \tag{12}$$

$$\text{长度比例尺等于}\ \frac{D}{D_m}=n \tag{13}$$

故

$$\lambda_m=\lambda D_m/D=\lambda/n \tag{14}$$

可见模型的任何量纲为 L 的参量的值均应等于原型的相应参量的值除以 n(曲面半径、切土宽和切土深、圆盘厚度)。

因为在一般情况下，$g=g_m$，故

$$V_m^2=\frac{D_m V^2}{D}=v^2/n \tag{15}$$

式(13)和式(15)表示模型的两个设计条件，其他设计条件为原型和模型，由同样材料制造，原型和模型的倾斜角相等，接近角也相等，土壤的湿度相等，粘土含量相等。

如果采用土壤变量系统 B，则公式(6)和(10)仍然适用。但公式(11)和(12)便不适用。

公式(11)和(12)用以下公式代替：

$$\phi_m=\phi \tag{15$_1$}$$

$$\frac{c_m}{\omega_m D_m}=c/\omega D \tag{16}$$

$$\frac{A_m}{\omega_m D_m}=A/\omega D \tag{17}$$

式(16)和(17)可变化为

$$c_m/\omega_m=\frac{c}{n\omega} \tag{18}$$

$$\frac{A_m}{\omega_m}=A/n\omega \tag{19}$$

(二)实验

为了探明所选择的参量(包括土壤参量系统 A)是否恰当,用直径为 5 英寸和 10 英寸的圆盘进行试验,其他有关量纲为 L 的尺寸都满足方程式(13)。

设备和步骤:土壤槽在双轨上移动,轨道长 36 英尺,土壤槽长 12 英尺,宽 3 英尺,深 9 英寸,土壤槽 4 个,内贮 4 种不同土壤,滚子链装在轨道上,驱动土壤槽,5 马力的马达通过变速装置和蜗轮蜗杆机构驱动滚子链,土壤槽运动方向由远距离开关控制。

在轨道中部安装试验架,高跨于轨道双方,圆盘和测力设备装于试验架上。

如果用土壤作为工作介质,公式(18)和(19)的条件是很难满足的。此外,模型试验的土壤和原型试验的土壤应该满足 $\phi_m=\phi$ 和 $\mu_m=\mu$ 的条件。

要找到同时满足上面 4 个条件的土壤是几乎不可能的。

因此,在采用土壤参量系统 B 的试验里,所用的模型是畸变(歪扭)模型,畸变模型指的是不能符合全部设计条件的模型。

歪扭程度对于模型预测性的影响应该予以研究。

设计条件(16)和(17)重写成如下形式:

$$c_m/\omega_m D_m=\gamma c/\omega D \tag{20}$$

$$\frac{A_m}{\omega_m D_m}=\eta A/\omega D \tag{21}$$

式中　γ 和 η=畸变系数。

故模型的函数方程式为

$$\frac{R_m}{\omega_m D_m^3}=F(\lambda/D\cdot V^2/gD, d,\ \beta,\ \mu,\ \phi,\ \gamma c/\omega D\cdot\eta A/\omega D) \tag{22}$$

模型与原型间的关系如下式:

$$R/\omega D^3=\delta\left(\frac{R_m}{\omega_m D_m^3}\right) \tag{23}$$

式中　δ=预计系数,为 γ 和 η 的函数。

因此,必须测定 η 和 γ,再根据 η 和 γ 决定 δ。

在采用土壤参量系统 B 时,用三种尺寸圆盘(3、6、12 英寸),在 4 种不同土壤、不同含水量、不同土壤压紧度情况下进行试验,3 英寸圆盘切土深度 $\frac{3}{4}$、6 英寸切土 $1\frac{1}{2}$、12 英寸切土 3 英寸。在每种圆盘切土深度之半的地方测定土壤抗剪强度。

根据(20)(21)和(23)得

$$\begin{aligned}&\gamma=n(c_m/c)(\omega/\omega_m) && \because\ D/D_m=n\\ &\eta=n(\omega/\omega_m) && \because\ A_m=A\ \ D/D_m=n\\ &\delta=R\omega_m/R_m\omega n^3\end{aligned}$$

因为 $A\approx 0$，故 n 可以消除。

根据试验，用线性最小乘方回归法处理数据得知 δ 与 γ 之间有下列关系，即

$$\delta=0.580-0.0685\gamma$$

采用土壤参量系统 A 的试验中，用 5 和 10 英寸两种圆盘，5 英寸圆盘切土宽度 2 英寸，深 $1\frac{7}{8}$ 英寸，两种圆盘的 $\alpha=0°$，$\beta=45°$，测量牵引阻力时在土壤槽内来回各一次，在 4 种不同的 $\frac{V^2}{gD}$ 进行试验。

试验结果指明引用预计系数 δ 能够提高预计的精确度。

采用土壤参量系统 B（即考虑土壤抗剪能力）所得到的试验结果比采用土壤参量系统 A（考虑土壤的机械组成）更有预计性。这说明用内聚力、内摩擦角、粘附力以及金属-土壤摩擦角来描述土壤状况更为恰当。

在试验过程中，没有考虑剪应变出现快慢对抗剪阻力的影响。因为模型速度与原型不同，因此它们遭遇的抗剪阻力也不相同。

（三）实际应用举例

1．对田间实际遇到的阻力的预测

采用土壤参量系统 A，在实验室内用 10 英寸模型圆盘进行试验，并预测田间试验结果，田间试验用 26 英寸二铧圆盘犁。

故 $$D/D_m=26/10=2.6$$

原　型	模　型
直径　26 英寸	10 英寸
耕深　5.5 英寸	2.11 英寸
耕深 12.7 英寸	4.88 英寸
$\alpha=22\frac{1}{2}°$	$22\frac{1}{2}°$
$\beta=42°$	$42°$
$\mu=0.25$	0.51
$M=18.6\%$	13.2%
$c_1=18.6\%$	15.6%
$\omega=118$ 磅/英尺^3	76.7
$V^2/gD=0.040$	$V^2/gD=0.040$

一切有关尺寸均经仔细调整，使原型与模型之间几何相似。除 M、c、μ 外，相应的 π 项均相等。

粘度含量相差 3%，对预计性影响很小。如果有影响的话，可能使预计值偏低。

由于含水量不同而发生的影响可以通过计算来调整。

μ 对于圆盘阻力的影响，目前还缺少资料，但是一般认为影响很小。

平均预计值等于

$$R_m/\omega_m D_m^3=0.373$$

因为含水量的差异，需进行调整，调整后

$$R_m/\omega_m D_m^3=0.524$$

因为模型与原型相似，故

$$R_m/\omega_m D_m^3 = R/\omega D^3 = 0.524$$

在田间测出的牵引阻力为1599磅，即每圆盘阻力799.5磅，故

$$\text{实际值 } R/\omega D^3 = 0.665$$

可见预计值比实际值低，但用预计值估计农具的田间阻力，还是有一定的准确性。

26英寸圆盘犁在茬地上工作，地里还长着很多草，又有许多根，模型在没有植物的土壤上工作，预计值较低也是可以预料的。

根据预计，牵引阻力为

$$R = (0.524)(\omega D^3) = (0.524)(118)\left(\frac{26}{12}\right)^3 = 630 \text{ 磅}$$

如果采用土壤参量系统 B，并对土壤特性对牵引阻力的影响有更多的了解，则预计值和实际值相差将会更小。

2．最佳设计参数的预计

兹以寻求最佳圆盘接近角为例，即预计接近角要多大，牵引阻力才能最低。

3．切土片

威斯姆(Wismer)和鲁斯(Luth)用量纲分析法研究切土刀片的性能。影响切土性能的参量如下(图2)。

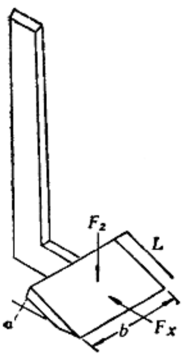


图2 切土刀片受力情况

(1) 因变参量

F_x——切土刀片所受的水平分力；

F_z——垂直分力。

(2) 自变参量

① 切土部件：

b——刀片宽度，L；

l——刀片长度，L；

Z——工作深度，L；

α——刀片角度，弧度，无量纲；

V——工作速度，LT^{-1}。

② 土壤：

c——内聚力，FL^{-2}；

ϕ——内摩擦角，无量纲；

γ——容量，FL^{-3}；

β——剪切率因数(Shear rate factor)，无量纲。

③ 系统：

g——重力加速度，LT^{-2}；

μ——土壤-金属间摩擦系数，无量纲。

根据 π 定理，靠观察可得牵引阻力方程式的一般形式

$$\frac{F_x}{\gamma L^3} = f\left(\frac{L_1}{L_2}, \frac{L_1}{L_3}, \alpha, \frac{V^2}{gL}, \mu, \phi, \frac{c}{\gamma L_1}, \beta\right) \tag{24}$$

在上列各参量中，ϕ 变化很大，但在试验情况下(粘土)，$\phi = 0$，而 μ 近于常数，故 ϕ 和 μ