

拖拉机理论

镇江农业机械学院、洛阳农业机械学院 合编



中国农业机械出版社

· 高等院校试用教材

拖 拉 机 理 论

镇江农机学院
洛阳农机学院 合编

中 国 农 业 机 械 出 版 社

本书是根据拖拉机专业的“拖拉机理论”教材编写大纲编写的。全书分为九章，分别阐述了拖拉机行走机构的滚动阻力和附着性能、拖拉机机组的总体动力学、拖拉机的牵引性能、拖拉机的稳定性、拖拉机的转向理论、拖拉机基本参数的确定、拖拉机的行驶平顺性和噪声等方面的理论问题。除重点探讨了轮式和履带式拖拉机的理论问题外，还以适当的篇幅对四轮驱动拖拉机、手扶拖拉机和船式拖拉机进行了理论分析。

本书可作为大专院校的拖拉机专业教材，供大专院校的师生使用；也可供中等农机专业学校的师生和从事拖拉机研究、设计与使用工作的工程技术人员参考。

拖 拉 机 理 论

镇江农机学院 合编
洛阳农机学院

中国农业机械出版社出版

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

787×1092 16开 10.5印张 231千字

1981年8月北京第一版·1981年8月北京第一次印刷

印数：0,001—9200 定价1.10元

统一书号：15216·050

前 言

本书是根据1978年4月第一机械工业部在天津召开的高等学校对口专业教材会议的精神和镇江专业教材会议所讨论的拖拉机专业“拖拉机理论”教材的编写大纲编写的。本书分析了拖拉机运动的基本规律和主要使用性能，在取材上力求吸收近年来新发展的较为成熟的理论，并使之与拖拉机型式和结构的发展相适应。例如，在介绍拖拉机的滚动阻力和驱动力理论时，引用了多年来国内外关于地面-车辆系统力学的理论和实验研究的基本观点和主要结论，相应地删去了一些陈旧的内容。在介绍总体动力学和牵引附着性能时，考虑到悬挂机组的广泛被采用，所以着重从配带“悬挂农具”的角度以及从“机组”的角度进行讨论。同时，鉴于四轮驱动拖拉机的发展和手扶拖拉机的普遍使用以及具有独特型式的船式拖拉机在我国的发展，因而本书专列一章介绍这三种型式拖拉机的运动学和动力学的特点，并在转向理论一章中对四轮驱动拖拉机的转向问题作了讨论。

拖拉机的振动和噪声问题已日益引起重视，因此书中也作了扼要的介绍。

本书由镇江农机学院吴起亚、翁家昌、顾珊和、洛阳农机学院方在华等同志编写，翁家昌负责主编；由吉林工业大学陈秉聪同志审校。

由于编者的水平所限，本书在取材上和问题的阐述上可能还有不当和错误之处，欢迎读者批评指正。

一九八〇年五月

主要符号表

α ——轮式拖拉机重心到横垂坐标面（过后轴线的横垂面）的距离；	P_f ——滚动阻力；
α_{Σ} ——轮式拖拉机组重心到横垂坐标面的距离；	P_q ——驱动力；
α_n ——农具重心到横垂坐标面的距离；	P_{φ} ——附着力；
α_T ——牵引点到横垂坐标面的距离；	P_r ——制动力；
B ——轮距或轨距；	P_T ——挂钩牵引力；
b ——轮胎宽度（履带宽度）或轮胎接地面宽度；	P_c ——离心力；
f ——滚动阻力系数；	P_{xy} ——在 xy 平面（纵垂面）内的合成牵引阻力；
G ——拖拉机重量；	P_x ——牵引阻力，即 xy 平面内合成牵引阻力的水平分力；
G_s ——拖拉机使用重量；	P_y ——农具对拖拉机驱动轮的增重力，即 xy 平面内合成牵引阻力的垂直分力；
G_{Σ} ——机组重量；	Q ——作用在车轮上的荷重；
G_n ——农具重量；	R ——转向半径；
G_{φ} ——附着重量；	R_{xy} ——在 xy 平面（纵垂面）内土壤对犁刀的反作用力的合力；
h ——重心高度；	r_c, r_q ——从动轮和驱动轮的动力半径；
h_T ——牵引点离地面高度；	r ——驱动轮滚动半径；
h_{Σ} ——机组重心高度；	V_l ——拖拉机理论速度；
h_o ——耕深；	V ——拖拉机实际速度；
i ——传动比；	Y_c, Y_q ——地面对从动轮和驱动轮的垂直反力；
L ——轴距；	Z ——横向反力、犁铧数或下陷量；
L_o ——履带支承面长度；	α ——纵向坡度角；
M_e ——发动机有效力矩；	β ——横向坡度角；
M_{ed} ——发动机标定力矩；	δ ——滑转率；
M_q ——驱动力矩；	η_c ——传动系效率；
M_f ——滚动阻力矩；	η_f ——滚动效率；
N_q ——驱动功率；	η_{δ} ——滑转效率；
N_c ——传动系损失功率；	η_T ——牵引效率；
N_f ——滚动阻力损失功率；	K ——发动机载荷系数；
N_{δ} ——滑转损失功率；	g ——附着系数；
N_T ——牵引功率；	ω_e ——发动机曲轴的角速度；
N_e ——发动机有效功率；	ω_Z ——转向角速度。
n_e ——发动机转速；	

主要参考书目

- | | |
|--|---|
| <p>〔1〕“拖拉机理论”，陈秉聪、顾品铨编，中国工业出版社，1965。</p> <p>〔2〕机械工程师手册第70篇“拖拉机”，机械工业出版社，1978。</p> <p>〔3〕“Theory of Land Locomotion”M. G. Bekker, The Univ of Michigan Press, 1956。（中译本</p> | <p>“陆用车辆行驶原理”机械工业出版社，1964。</p> <p>〔4〕“Introduction Terrain-Vehicle Systems”，M. G. Bekker, The Univ of Michigan Press, 1969。（中译本：“地面-车辆系统导论”，机械工业出版社，1978。</p> <p>〔5〕“拖拉机理论”列伏夫著，1960年版。</p> |
|--|---|

目 录

绪 论	1
第一章 拖拉机行走机构的滚动阻力及附着性能	6
§ 1-1 拖拉机的行驶原理	6
§ 1-2 土壤的物理机械性质	8
§ 1-3 行走机构运动学	16
§ 1-4 行走机构动力学	20
§ 1-5 拖拉机的滚动阻力	24
§ 1-6 拖拉机的附着性能	27
§ 1-7 影响滚动阻力和附着性能的因素	30
第二章 拖拉机机组的总体动力学	33
§ 2-1 轮式机组在纵垂面内的受力分析	33
§ 2-2 轮式机组在纵垂面内的平衡	43
§ 2-3 履带式拖拉机在纵垂面内的受力分析	49
§ 2-4 机组在水平面内的受力分析	51
§ 2-5 机组在横垂面内的受力分析	55
第三章 拖拉机的牵引性能	59
§ 3-1 拖拉机的功率平衡和牵引效率	59
§ 3-2 拖拉机的牵引特性曲线	62
§ 3-3 拖拉机的牵引试验	66
§ 3-4 悬挂机组动力测量	72
第四章 四轮驱动拖拉机、手扶拖拉机和船式拖拉机的性能特点及受力分析	78
§ 4-1 四轮驱动拖拉机的性能特点	78
§ 4-2 手扶拖拉机的受力分析	86
§ 4-3 船式拖拉机的受力分析	89
第五章 拖拉机的稳定性	93
§ 5-1 拖拉机的纵向稳定性	93

§ 5-2 拖拉机的横向稳定性	102
第六章 轮式拖拉机的转向理论	109
§ 6-1 轮式拖拉机的转向运动学	109
§ 6-2 轮式拖拉机的转向动力学	111
§ 6-3 单差速器对轮式拖拉机性能的影响	115
§ 6-4 四轮驱动拖拉机的转向运动学和动力学	118
第七章 履带式拖拉机的转向理论	123
§ 7-1 履带式拖拉机的转向运动学	123
§ 7-2 履带式拖拉机的转向动力学	124
§ 7-3 影响履带式拖拉机转向能力的因素	128
§ 7-4 各种转向机构的转向性能	129
§ 7-5 对履带式拖拉机转向机构的简单评价	141
第八章 拖拉机基本参数的确定	143
§ 8-1 牵引力、速度和功率的确定	143
§ 8-2 传动比的确定	147
§ 8-3 重量和重心的确定及重心测定的方法	149
第九章 拖拉机的行驶平顺性和噪声	153
§ 9-1 拖拉机的振动形式及评价指标	153
§ 9-2 拖拉机前轮的摆振	156
§ 9-3 拖拉机的噪声	158
主要符号表	162
主要参考书目	162

绪 论

拖拉机理论这门课的主要目的是：研究拖拉机的机构及机组的运动学与动力学，研究拖拉机的使用性能，为拖拉机设计、评价、试验、研究和运用提供理论基础。

拖拉机理论是一门正在发展中的学科，无论在理论上或是在试验方面都还需要做大量的工作，还需要从各方面进行探讨和研究。例如：为了提高拖拉机在各种土壤上（尤其是在潮湿松软土壤上）的通过性能和牵引附着性能，近年来对有关车辆行驶的地面（土壤）物理特性和几何特性进行了许多研究，探讨建立地面（土壤）-车辆系统的数学模型，以及舒适性、稳定性、操纵性、越障碍性、功率和燃料消耗等的数学模型化问题。我国拖拉机科技工作者也结合我国农业机械化的特点和我国土壤情况，进行了一些研究工作，取得了一定成果。

拖拉机理论这门学科也随着拖拉机结构的改进和新型式的出现而有所发展。例如，由于悬挂农具的发展，农具和拖拉机形成一个机组，因此使拖拉机理论研究的对象，由“单机”而转入“机组”；由仅研究带牵引农具作业时的工况，转为侧重研究带悬挂农具作业时的工况。又例如，由于铰接式四轮驱动拖拉机的出现，促使对这种具有特殊结构型式的拖拉机的运动学和动力学进行研究。随着拖拉机行驶速度的提高，以及对安全性、舒适性等问题的重视，对振动、噪声、动态稳定性等也进行了研究。但总的来说，拖拉机理论这门学科还不够成熟，对许多问题还不能提出完整的、科学的理论依据。

研究拖拉机理论的最终目的，是使设计制造出的拖拉机具有良好的使用性能；而拖拉机的使用性能则是评价拖拉机的基础。

下面分类介绍拖拉机的主要使用性能，其中有些使用性能在各章中还要详述，此处只做扼要介绍。

使用性能大致可分为三类：对农业自然条件和农艺要求的适应性、技术经济性、以及劳动保护性。

一、对农业自然条件和农艺要求的适应性

这类性能与是否能保证农业技术要求有关，主要有牵引附着性、操纵性、机动性、对土壤结构的破坏程度等。

1. 牵引附着性

牵引附着性是指拖拉机在容许滑转率情况下所能发挥的牵引能力。拖拉机的牵引性能用各档所能发挥的牵引力、牵引功率和牵引效率来衡量（详见第三章及第八章）。

2. 通过性

通过性是指拖拉机在各种田间和道路条件下的通行能力，以及在没有道路情况下的通过性（也称越野性）。通过性大致可从三方面来考虑：

（1）在潮湿或松软地面上的通过性

在潮湿和松软地面上，拖拉机易发生下陷、严重滑转等现象，影响拖拉机的正常作

业。在潮湿松软地面上，附着性差、滚动阻力大。当拖拉机的附着力小于其牵引载荷与滚动阻力之和时，拖拉机机组就无法作业；当附着力小于滚动阻力时，空车也无法通过。拖拉机行走机构的型式（轮式或履带式）和支承面单位面积上的压力是影响在潮湿松软地面上通过性的主要因素，详见第一章。

轮式拖拉机轮胎支承面上单位面积压力约为10牛顿/厘米²（1公斤/厘米²）左右，而履带支承面上仅为4~5牛顿/厘米²（0.4~0.5公斤/厘米²），所以履带式拖拉机较轮式拖拉机具有较好的通过潮湿地面的能力。

（2）在作物行间的通过性

对于中耕用拖拉机来说，要求拖拉机在作物生长期下田作业，因此拖拉机机体需在作物之上通过，而拖拉机的行走机构需在作物的行间通过。在中耕时，为了保证机体的下部不致碰坏作物的枝叶，要求有足够的农艺离地间隙 h_a ；为了保证行走机构不致压损作物的根部及碰伤作物，要求有足够的保护区 c （图1）。当拖拉机行走机构恰好走在两行作物之间时（这样可使左右两侧保护区相等，对作物损害最小），则其轮距 B 必为作物行距 s 的整倍数，即：

$$B = ns \quad (1)$$

式中 n ——拖拉机所跨过的作物行数。

因此轮距必须能调节到在常用 s 时满足式（1）的要求。我国作物行距 s 多为30、60、70和90厘米等几种。

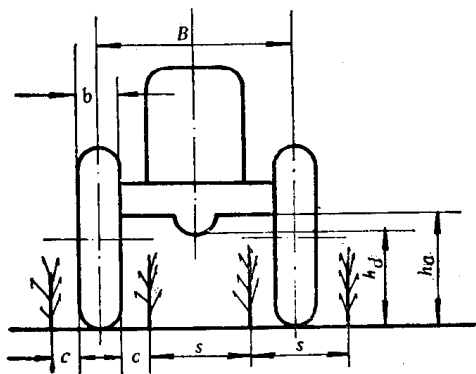


图1 行距、轮距与离地间隙

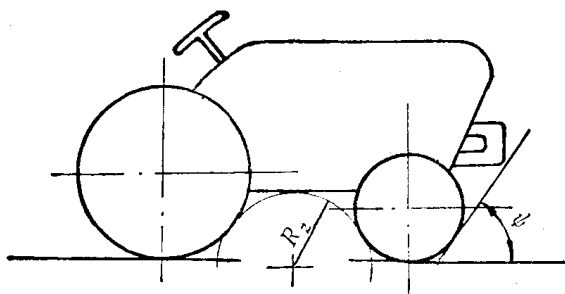


图2 接近角和纵向通过半径

对于某些作物来说，中耕是在作物之下进行的，即拖拉机在作物枝叶下通过，因此要求用于这种中耕作业的拖拉机总体高度较低，向上无凸出部分。另外有些作物，中耕时拖拉机整机在两行作物之间通过，对于这种中耕拖拉机来说，则要求它总体宽度较窄，两侧面无凸出部分。

（3）在田间转移时的通过性

在田间转移时，拖拉机要跨过沟渠，越过田埂等障碍物。衡量田间转移通过性的主要参数是：道路离地间隙 h_a （图1）、纵向通过半径 R_z 和接近角 ψ （图2），以及最大越障高度等。

3. 操纵（机动）性

操纵性是指拖拉机能否按驾驶员的意图沿给定方向行驶的性能，它可用直线行驶性和最小转向半径来衡量。

直线行驶性可用不加操纵情况下直线行驶一定距离后拖拉机偏离原定方向的偏

移量来衡量。直线行驶性不好，耕作时会产生漏耕、重耕现象，播种时会产生漏播、重

播现象；在中耕时也易碰伤作物。直线行驶性较差时，驾驶员须经常纠正行驶方向，产生过度疲劳，转向机构因此也易磨损。

最小转向半径 $R_{\min}$ 是指驱动桥中点的最小转向半径（详见第六、七章）。该半径愈小，拖拉机在地头转弯时留下的未耕地面积也愈小，转向所需的时间也愈少。在狭小的地块上转向时，有时还用图 3 所示的转向圆半径 R_v 或 R_s 来衡量。

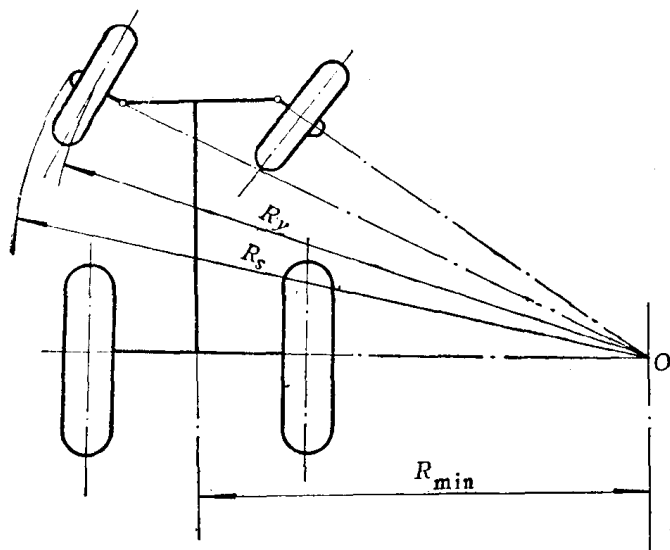


图 3 转向半径图

4. 对土壤结构的破坏程度

拖拉机行驶后（或反复多次行驶后），土壤结构往往遭到破坏。对土壤结构破坏程度的衡量标准，对水田来说，系指行走机构对水田土壤硬底层有无破坏，是否引起泥脚加深；对旱田来说，系指拖拉机行驶后对土壤的压实程度。对土壤结构的破坏程度主要取决于行走机构型式，例如：在水田土壤上采用铁轮就较采用高花纹轮胎容易破坏土壤。

二、技术经济性

拖拉机的技术经济性主要用生产率和经济性来表示，而后者可用油耗、折旧费、维修费等衡量，折旧、维修费等又与可靠性和耐用性有关。

1. 生产率

拖拉机的生产率用单位时间内完成的作业亩数或公顷数来表示，生产率的大小与作用在农具上的有效功率成正比，可表示为：

$$A = cN_T = c\eta_T N_e \quad (2)$$

式中 A ——完成的作业亩数（或公顷数）；

c ——系数，此数值的大小与土壤的比阻力，作业的种类等有关；

η_T ——牵引效率，指实际作用到农具上的有效功率与发动机功率的比值；

N_e ——发动机功率；

N_T ——拖拉机传给农具的有效功率。

由上式可看出，同等发动机功率的拖拉机，其能发挥的有效功率或生产率的大小，取决于牵引效率，而牵引效率的高低，又与牵引附着性等因素有关。另外，拖拉机有效功率的发挥还与机组编排的合理性有关，机组编排不合理，发动机功率就不可能得到充

分发挥。拖拉机排档数目、速度、牵引力范围、悬挂系统的型式、动力输出轴的型式及其布置等都与机组编排的合理性有关。

拖拉机的生产率可分为实际生产率和纯生产率两种。实际生产率是指机组实际工作时间内的生产率，纯生产率是指机组纯工作时间（不包括地头转弯和技术停车时间）内的生产率。纯生产率可用拖拉机实际工作速度与耕宽的乘积来估算，即：

$$A = \frac{VB'}{10} \quad (\text{公顷/小时}) \quad (3)$$

式中 V —— 拖拉机实际作业速度（公里/小时）；

B' —— 耕宽（米）。

2. 油耗

油耗包括燃油消耗和机油消耗。燃油消耗分为实际油耗和纯油耗，用每小时完成的作业亩数(或公顷数)所耗油量来表示。机油消耗量常用占燃油消耗量的百分比来表示。

3. 可靠性与耐用性

拖拉机的可靠性用在一定工作时间内发生的零部件损坏及故障的性质、严重程度、次数等来衡量。耐用性用主要零部件需更换（或修理）时已使用的时间来衡量。

拖拉机的可靠性与耐用性好，不仅可保证正常出车，提高生产率，而且可减少维修费用，延长使用寿命；延长使用寿命又可减少折旧费。

影响拖拉机技术经济性的还有综合利用性、维护保养方便性等。综合利用性好，能进行的作业项目多，年完成的作业量大；维护保养方便性好，则用于技术保养、零部件拆装的工时少。

三、劳动保护性

劳动保护性是指驾驶员工作的安全性和使驾驶员的身体健康不受损害的性能。它主要包括拖拉机的平顺性（振动）、噪声、稳定性、制动性等。

1. 平顺性

拖拉机能平顺地进行工作的性能称作拖拉机的平顺性。拖拉机平顺性好，表示拖拉机的振动小，驾驶员不易疲劳（详见第九章）。它是劳动保护性中一项重要的内容。平顺性不仅影响驾驶员的健康，也会影响作业质量、机件寿命等。影响平顺性的主要因素是悬架型式、行走机构的型式以及一些与振动有关的参数。

2. 噪声

噪声会影响驾驶员身体健康，目前已日益引起人们重视。噪声主要用分贝值等来衡量（详见第九章）。

3. 稳定性

稳定性指拖拉机不致产生翻倾或滑移的性能。拖拉机在坡道上行驶或在山地作业时，稳定性尤为重要，它直接关系到驾驶员的人身安全。稳定性常用不致产生翻倾和滑移的有关角度来表示。重心坐标以及轮距、轴距等参数影响拖拉机的稳定性（详见第五章）。

4. 制动性

拖拉机的制动性是指在给定的坡道上能制动住以及在较短的距离内能制动至停车的性能。如果制动性好,则拖拉机在较大坡度的道路上行驶以及在地面上进行高速行驶时皆较安全。为了提高制动性,有些国家规定,拖拉机时速超过30公里时,必须采用四轮制动(前后轮皆制动)。

5. 驾驶室的牢固程度

如果驾驶室的强度和刚度好,则当拖拉机发生翻倾事故时,仍能保证驾驶员的人身安全。因此,有些国家对驾驶室的强度和刚度都提出一定要求,驾驶室需进行锤击试验和翻车试验。

6. 视野性

视野性是指驾驶员工作时能否看到农具作业情形及车轮(或履带)行驶路线的性能。这个性能用驾驶员看不到的区域的大小以及看不到的区域是否重要来衡量。视野性不好,驾驶员作业时的劳动强度就大,而且也会影响作业质量。

用上述各种使用性能来评价拖拉机时,必须根据拖拉机的用途,分清主次,全面地进行衡量。例如,对于中耕用拖拉机来说,要求其有较高的农艺离地间隙(但农艺离地间隙高了,重心也必然会高些,这就会使稳定性降低);对于山地用拖拉机来说,则要求其有较好的稳定性。

第一章 拖拉机行走机构的滚动阻力及附着性能

§ 1-1 拖拉机的行驶原理

一、驱动力矩与传动系效率

由发动机通过传动系统传到拖拉机驱动轮上的力矩称为拖拉机的驱动力矩 M_q 。发动机的动力经过传动系传往驱动轮时有一定的功率损失，这一功率损失主要由齿轮啮合的摩擦阻力、轴承间的摩擦阻力、油封和轴间的摩擦阻力以及齿轮搅油阻力等原因所造成。

拖拉机传动系效率 η_e 就是考虑上述功率损失的效率，它可用拖拉机等速直线行驶时，传到驱动轮上的功率 N_q 与发动机有效功率 N_e 之比来表示，即：

$$\eta_e = \frac{N_q}{N_e} = \frac{M_q \omega_q}{M_e \omega_e}$$

η_e 值约为 0.9 左右。

式中 ω_q ——驱动轮的角速度；

ω_e ——发动机曲轴的角速度；

M_e ——发动机的有效力矩。

假定离合器不打滑，则上式可表示为：

$$\eta_e = \frac{M_q}{M_e i} \quad (1-1)$$

式中 i ——传动系的总传动比，它是变速箱、中央传动和最终传动各部分传动比的乘积； $i = \frac{\omega_e}{\omega_q}$ 。

由式 (1-1) 可知，当拖拉机在水平地段上作等速直线行驶时，其驱动力矩 M_q 可用下式求得：

$$M_q = \eta_e M_e i$$

二、轮式拖拉机的行驶原理

图 1-1 是带有牵引式农机具的轮式拖拉机在水平地段上作等速直线行驶时的原理简图，拖拉机重量和土壤作用在车轮上的垂直反力等都略去未画。

对拖拉机整体来说，驱动力矩 M_q 是内力矩，故图中用虚线表示。在驱动力矩作用下，驱动轮在其与土壤接触之处有向后滑动的趋势，在接触面的各个微小部分产生了土壤反作用力。这些反作用力的水平分力可用合力 P_q 来表示，其方向与拖拉机行驶方向相同。这个反作用力 P_q 就是推动整个拖拉机前进的驱动力。

$$P_q = \frac{M_q}{r_q} = \eta_{ic} \frac{i M_e}{r_q} \quad (1-2)$$

式中 r_q ——驱动轮动力半径。

当驱动力 P_q 足以克服作用在拖拉机前后轮上的土壤反作用力 P_{fo} 和 P_{fq} (力 P_{fo} 和 P_{fq} 以后分别称为拖拉机从动轮和驱动轮的滚动阻力) 以及作用在拖拉机挂钩上的牵引力 P_T 时, 拖拉机就能保持正常行驶。但是, 驱动力 P_q 并不能任意随发动机力矩 M_e 的增加或传动比 i 的增大而增加,

它受到轮胎与土壤间的附着力 P_q 的限制。也就是说, 要使拖拉机能保持正常行驶, 其必要和充分的条件是:

$$P_q \geq P_T + (P_{fo} + P_{fq}) = P_T + P_f \quad (1-3)$$

式中 $P_f = P_{fo} + P_{fq}$ 为拖拉机的滚动阻力。

为了保证拖拉机的正常行驶, 为了提高拖拉机作业时的牵引效率, 我们力图提高附着力 P_q 和减少滚动阻力 P_f , 而附着力和滚动阻力的大小皆与行走机构的型式和土壤的物理机械性质有关。所以本章先讨论土壤的物理机械性质和行走机构的运动学与动力学, 然后讨论拖拉机的滚动阻力和附着性能。

三、履带式拖拉机的行驶原理

履带式拖拉机是靠履带卷绕时地面对履带接地段产生的反作用力推动拖拉机前进的。

为了便于说明其行驶原理, 如图1-2所示, 将履带分成几个区段: 1-3 为驱动段, 4-5 为上方区段, 6-8 为前方区段, 8-1 为接地段或称支承段。

拖拉机行驶时, 在驱动力矩 M_q 作用下, 驱动段内产生拉力 T , T 的大小等于驱动力矩 M_q 与驱动轮动力半径 r_q 之比, 即 $T = \frac{M_q}{r_q}$ 。对拖拉机来说, 拉力 T 是内力。它力图把接

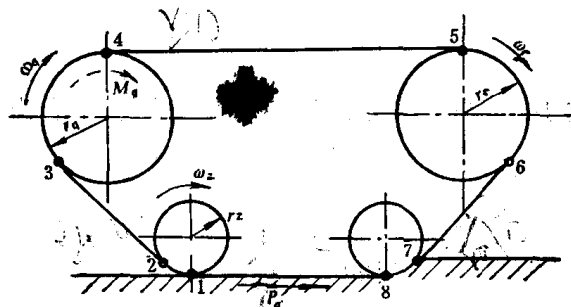


图1-2 履带式拖拉机行驶原理图

地段从支重轮下拉出, 致使土壤在接地段的履带板上产生水平反作用力。这些反作用力的合力 P_q 叫做履带式拖拉机的驱动力 P_q , 其方向与拖拉机行驶方向相同。履带式拖拉机就是在 P_q 作用下行驶的。

由于动力从驱动轮经履带驱动段传到接地段时, 中间有动力损失, 如果此损失可用

履带驱动段传动效率 η_l 表示, 则履带式拖拉机的驱动力 P_q 可表示为:

$$P_q = \eta_l T = \eta_l \eta_e \frac{i M_e}{r_q} \quad (1-4)$$

此式同样可用于轮式, 不过此时 $\eta_l = 1$ 。

为了分析驱动力 P_q 是如何传到拖拉机机体上的, 如图1-3所示, 在驱动轮轴上加两个大小相等, 方向相反的力 T 。其中一个力与驱动段内拉力 T 形成力偶, 其值等于驱动力矩 M_q ; 另一个力则可分解成平行和垂直于路面的两个分力 T' 和 T'' , 其中 $T' = T \cos \psi$ 。

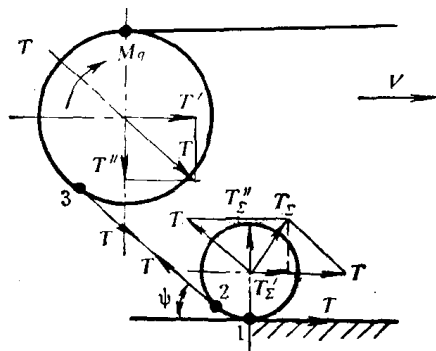


图1-3 履带驱动力的传递简图

同理, 将作用在后支重轮上的两个力 (一个是驱动段内的拉力 T , 另一个是土壤的反作用力 T , 即 P_q) 都分别移到该支重轮轴线上, 结果, 得到一个合力 T_s 。将合力 T_s 分解成平行与垂直于路面的两个分力 T'_s 和 T''_s , 而 $T'_s = T - T \cos \psi$ 。

推动拖拉机机体前进的力应该是 T' 与 T'_s 之和, 即:

$$T' + T'_s = T \cos \psi + T - T \cos \psi = T$$

假定履带销子和销孔间的摩擦损失等略去不计, 则推动拖拉机机体前进的力 P_q 即等于履带驱动段内的拉力 T , 它并不随驱动段的倾角 ψ 的变化而变化。实际上, 因为履带销和销孔间有摩擦, 故 P_q 比 T 要小。

§ 1-2 土壤的物理机械性质

在本书中, 土壤的物理机械性质是指湿度、容重、密度、土壤与行走机构的外摩擦系数、土壤的承载能力和抗剪能力等。

土壤的物理机械性质影响拖拉机及农具性能的发挥, 同时也影响农作物产量的高低。

一、土壤的物理性质

1. 土壤的湿度 (含水率)

常规测定土壤湿度的方法是将在 $105 \sim 110^\circ\text{C}$ 温度下烘干至重量不再减少为止, 此时所损失的水分重量占样土 (烘干样土) 重量的百分率即为土壤湿度, 以 k_T 表示, 即:

$$k_T = \frac{\text{土壤试样内水重}}{\text{烘干试样土重}} \times 100$$

土壤湿度的大小对土壤抗剪能力有很大影响。

2. 土壤的容重和密度

在自然结构下，单位体积土壤的重量，即为容重。容重又分干土容重及湿土容重两种。湿土容重指天然含水率情况下的容重；干土容重指按烘干土计算的土壤容重，即一般所称容重，常用 γ_d 表示。

土壤密度是指土壤内固体粒子的单位体积的重量，其数值显然比容重大。

表1-1和表1-2列出了土壤的容重和密度值。

表1-1① 土壤的容重

土 壤 类 型	容重(克/厘米 ³ 或0.01牛顿/厘米 ³)
干 砂	1.6
湿 砂	1.6
松 砂	1.3
粉 砂	1.8
黄 土	1.6
壤 土	1.6
粘 土	2.1
泥炭土	1.1

表1-2① 土壤的密度

土 壤 类 型	密 度(克/厘米 ³)
粘 土	2.44~2.97
腐殖土	1.37
黄 土	2.65~2.75
石灰土	2.7
泥炭土	1.26~1.8
石英砂	2.64~2.65
粉 砂	2.68~2.72

① 摘自Jamkins编著的《Soil Mechanics》。

3. 土壤的外摩擦系数

土壤的外摩擦系数 μ 系指土壤与车辆行走部分的摩擦系数。

外摩擦系数主要与拖拉机行走部分的表面材料、土壤种类、土壤湿度、土壤表面状况、接触面上单位面积上的法向应力，以及行走部分与土壤间的相对滑动速度有关。 μ 值随土壤湿度的增加而降低。

目前，土壤的外摩擦系数还缺乏足够可靠的试验数据。

二、土壤的承压能力

固体的机械性质是用应力-应变关系来确定的。由于土壤性质比较复杂，目前还只能用半经验的方法来描述这种应力-应变关系，以供选择设计参数和预测车辆性能之用。

从设计和有效地使用拖拉机的角度出发，我们首先要研究土壤的垂直和水平的应力-应变关系。

现在常用压强-下陷曲线来表示垂直的应力-应变关系，压强-下陷曲线说明土壤的

垂直承压能力。

拖拉机行走机构的下陷量、滚动阻力的大小以及通过性能等都与土壤的承载能力有密切关系。下陷量大，会使滚动阻力增加；下陷量等于离地间隙时，拖拉机就会丧失行驶能力。

用什么土壤参数表示土壤承载能力，目前还没有最后的一致意见。测定土壤承载能力的仪器和试验规范，也还没有标准化。

现在用得较多的表示土壤承载能力的方法有圆锥指数法和贝氏仪法两种，这两种方法各有一定的适用范围和一定的实用价值。

圆锥指数法系第二次世界大战期间美国水道试验站发展的。它所用的圆锥穿入仪的测头呈锥形，锥角 30° ，锥底面积为 $\frac{1}{2}$ 英寸²。圆锥测头穿入土中到车辆作用的深处时，

土壤作用在锥头上的单位面积的阻力（磅/英寸²）称为“圆锥指数”。它是反映土壤强度的一个综合性指标（包括圆锥对土壤的剪切-压缩和土壤-金属摩擦）。

贝氏仪法是五十年代由美国贝克（M.G. Bekker）提出的。贝氏仪包括2~3个不同大小的穿入平板和一个剪切环（或矩形剪切板）。

将平板逐渐压入土内，以此来模拟车辆行走装置对土壤的加载作用，而平板与“压强-下陷”记录器相连（图1-4右方），因此由平板的压入过程可得出压强-下陷曲线，即 σ - Z 曲线（ σ 为单位面积的载荷，即压强； Z 为下陷量）。贝氏仪的剪切环可测出在垂直压强 σ 作用下，土壤承受的扭矩 M 与其角位移 α 的关系（图1-4左方），由此可确定土壤抗剪强度的有关参数。

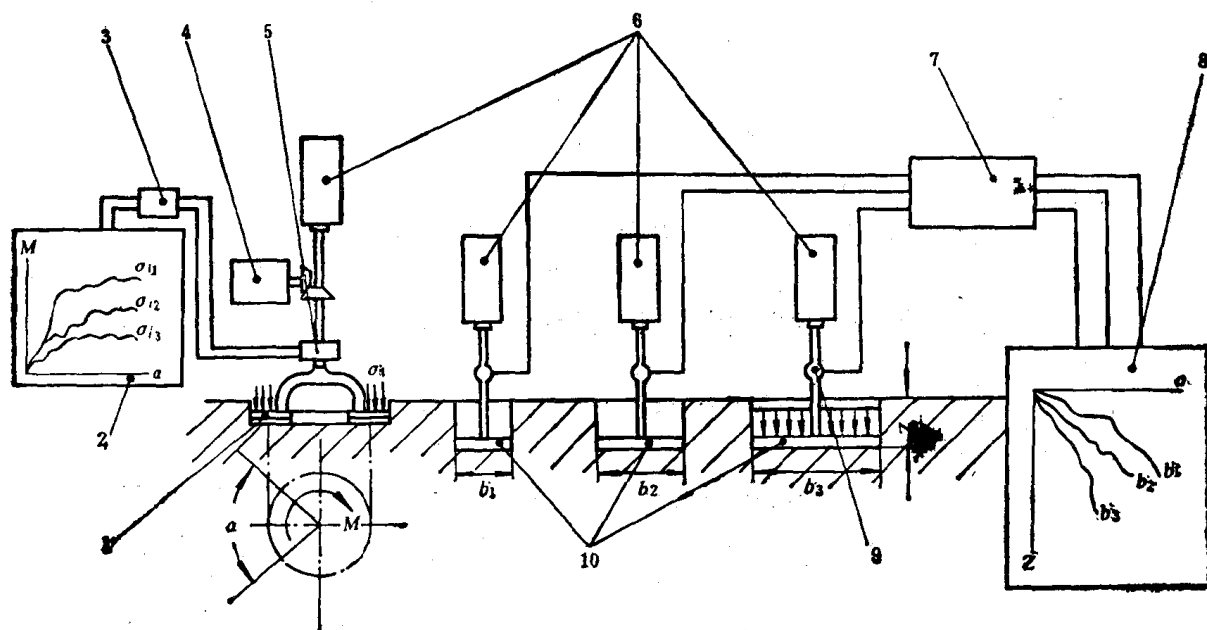


图1-4 贝氏仪示意图

- 1—剪切环 2—记录带 3—放大器 4—扭矩马达 5—扭矩及角运动传感器
6—加载缸筒 7—放大器 8—记录带 9—压力表 10—穿入平板

用贝氏仪或其它仪器，将小圆板或矩形板以与车辆运动相应的速率“穿入”土壤到一定的深度，可测得压强-下陷曲线。图1-5、1-6、1-7即为实验所得的曲线。

图1-5为在塑性均匀土壤上用圆形或矩形平板测得的压强-下陷曲线。由图可看出，在浅层塑性的均匀土壤中发生的理想压强-下陷过程，可由0A与AB二条直线大致表示。

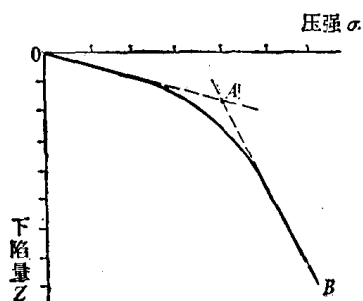


图1-5 在塑性均匀土壤上用圆形或矩形板测得的压强下陷曲线

0A表示起始部分，这部分属于弹性变形，或只是土粒的变位，或两者都有。A点近似地表示土壤的极限承载能力。AB线表明土壤由于塑性流动而失效时的压强-下陷过程。实际的压强-下陷关系是一条曲线（如图中实线所示），曲线形状随土壤性质而不同。

图1-6表示出相同平板在不同的塑性均匀土壤中测得的压强-下陷曲线。这些曲线可按下述下陷量公式代以不同 n 值来描述。下陷量公式为：

$$\sigma = kZ^n \quad (1-5)$$

式中 σ ——下陷量为 Z 时平板上的压强；

Z ——下陷量；

n ——土壤变形指数，随土壤类型而不同；

k ——系数，它不仅是土壤的函数，而且又是负荷面积的函数；在给定土壤和给定负荷面积时，可认为是常数。

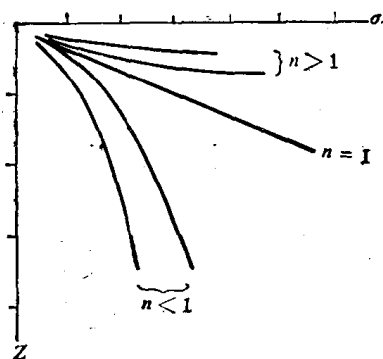


图1-6 在不同的塑性均匀土壤中用相同平板测得的压强-下陷曲线

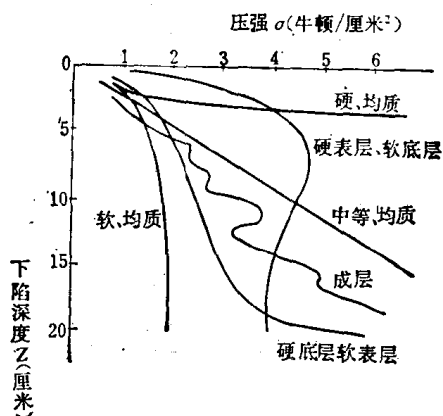


图1-7 在均质土壤和分层土壤上测得的压强-下陷曲线

图中各曲线按 n 值可分成两组，分界线相当于 $n=1$ 的直线。当 $n<1$ 时，为松软土壤；这种土壤在重复载荷作用下可能碎裂而失去强度。当 $n>1$ 时，为坚硬土壤；这种土壤在拖拉机多次通过的情况下，通常会变得硬而结实。

图1-7所示的压强-下陷曲线还可表明土壤是否分层。图中有三条曲线代表均质土壤，另外的三条曲线代表分层土壤。