

高等学校试用教材

汽车地面力学

吉林工业大学 庄继德 编

机械工业出版社

高等学校试用教材

汽车地面力学

吉林工业大学 庄继德 编



机械工业出版社

汽车地面力学

吉林工业大学 庄继德 编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

冶金工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $14^{1/8}$ ·字数312千字

1980年11月北京第一版·1982年4月北京第二次印刷

印数 2,300—4,000·定价1.45元

*

统一书号: 15033·5011

前 言

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会精神和 1978 年 6 月在镇江召开的汽车、拖拉机、农机专业教材会议制订的《汽车地面力学》教材编写大纲编写的。

汽车地面力学是研究车辆与地面间力学关系的一门工程学科。这门学科是在第二次世界大战后发展起来的，并在最近几年取得了不少进展。目前有关这方面的资料虽然数量不少，但都比较零散。国外有些专门著作也只反映一个学派的观点，并且出版年代较早，不能反映七十年代的最新发展。故编写本书的目的在于全面而系统地介绍地面-车辆力学的近代成果，使读者对这门新兴学科的形成历史、研究内容和发展趋势有个概括的了解。

本书主要包括五部分内容：第一部分介绍地面力学的基础知识，其中包括土壤的物理特性、地面的几何特性和轮胎的力学特性；第二部分论述汽车在松软地面的通过性能，提供了滚动阻力和挂钩牵引力的计算方法；第三部分探讨汽车的越障性能和在无路地面的振动特性；第四部分介绍了土壤-车辆力学的最新发展，讨论了因次分析、模型理论和有限单元法等在汽车地面力学中的应用；第五部分提出越野性能的电子计算机模拟方法和轮式越野车辆设计参数的选择。本书最后还对改进越野车辆的可能性作了分析，并介绍了一些特殊型式的行走装置。

本书博采不同学派的观点，反映了七十年代的最新发展，

并在吸取外国经验的基础上建立了自己的体系。

本书为高等学校汽车专业教材，也适于越野车辆及一般汽车设计人员、研究人员和军事院校有关专业师生参考。

本书由镇江农业机械学院王德杉同志主审，并提出很多宝贵的修改意见。此外，本书编辑洪宗林副教授也认真细致地审阅和校核了全书，在此谨致谢意。

由于编者的水平所限，书中所叙述的一些内容和观点难免有缺点和错误，希望读者多加批评指正。

目 录

第一章 总论	1
§ 1-1 汽车地面力学的含义及研究内容	1
§ 1-2 地面-车辆力学的发展历史	2
§ 1-3 地面-车辆力学的研究方法	8
第二章 土壤的物理特性	12
§ 2-1 土壤的质地分类	12
§ 2-2 土壤的几个物理性质	13
§ 2-3 土壤的力学基础知识	16
§ 2-4 土壤性质的变化	24
第三章 地面的几何特性	29
§ 3-1 地面几何形状的分类	29
§ 3-2 地面几何形状的测量	36
§ 3-3 地面波形的功率谱密度	44
第四章 轮胎的力学特性	59
§ 4-1 弹性轮胎在硬路面上的变形	59
§ 4-2 轮胎和土壤的接触表面形状	72
§ 4-3 轮胎的临界气压	79
§ 4-4 车轮的受力分析	84
第五章 土壤变形与滚动阻力	95
§ 5-1 载荷-下陷曲线与影响因素	95
§ 5-2 半经验公式及其分析比较	107
§ 5-3 滚动阻力计算与最佳气压	126
§ 5-4 滑转下陷与推土阻力	133
§ 5-5 多次通过理论	138
第六章 驱动车轮滑转与附着力	145

§ 6-1 载荷-剪切曲线与影响因素	145
§ 6-2 附着力的确定	151
§ 6-3 挂钩牵引力的计算	156
§ 6-4 驱动轮胎效率	170
第七章 汽车越障性能	174
§ 7-1 汽车失去几何通过性的几种类型	174
§ 7-2 汽车越障通过的条件	179
§ 7-3 不能穿过的障碍和绕路	193
§ 7-4 几何形障碍的强制通过	201
第八章 汽车在无路地面的振动特性	206
§ 8-1 简化的汽车地面系统及其对输入的反应	206
§ 8-2 传递函数与汽车垂直加速度的功率谱密度	210
§ 8-3 垂直加速度对越野行驶性能的影响	219
§ 8-4 越野汽车传动系统的动态方程式	231
§ 8-5 汽车在松散土壤上行驶时传动系的自激振动	236
第九章 汽车通过性与土壤行驶性	239
§ 9-1 汽车通过性的指标	239
§ 9-2 土壤行驶性的定义	243
§ 9-3 判断土壤行驶性和汽车通过性的快速测定法	247
§ 9-4 土壤行驶性的简易测定仪	252
§ 9-5 根据土壤特性的统计分布预测汽车通过性	255
第十章 因次分析及模型理论在汽车地面力学中 的应用	257
§ 10-1 因次分析原理	257
§ 10-2 模型理论基础	268
§ 10-3 用因次分析和模型试验研究弹性轮胎在软土壤上 的性能	276
§ 10-4 用因次分析法导出预测车辆性能的经验公式	290
第十一章 用有限单元法预测车轮与土壤的相互作用	303

§ 11-1	用于有限单元法的矩阵代数	303
§ 11-2	弹性力学的基本知识	315
§ 11-3	有限单元法的分析过程	337
§ 11-4	用有限单元法预测车轮下的应力分布和 土壤变形	356
§ 11-5	非线性分析方法	367
第十二章	越野性能模拟与轮式越野车辆设计	
	参数选择	376
§ 12-1	越野性能参数确定	376
§ 12-2	越野性能模拟	384
§ 12-3	轮式越野车辆设计参数选择	398
§ 12-4	在随机地面条件下选择最佳设计方案	408
§ 12-5	利用性能预测系统选择轮胎参数	413
第十三章	改进越野车辆的途径	418
§ 13-1	动物的运动与步行机构	418
§ 13-2	列车概念与铰接车	423
§ 13-3	弹性车轮原理与结构	426
§ 13-4	特殊型式的行走机构	432
	主要参考文献	444

第一章 总 论

§ 1-1 汽车地面力学的含义及研究内容

地面力学 (terramechanics) 是工程力学的一个新分支, 这个术语是个新创造的专门名词。这门新学科主要研究机器与其工作地面之间的关系。所谓机器可以是汽车、拖拉机、农业机械或工程机械等; 地面通常指松软土壤或硬的路面。地面又可能是平的或高低不平。

若仅研究越野车辆与土壤之间的关系通常称为土壤-车辆力学。如果所研究的环境包括土壤和硬路面, 则称为地面-车辆力学。所谓车辆是轮式和履带式车辆的统称, 故在所研究的范围主要限于有传统结构的轮式汽车时, 我们就可更明确地称它为汽车地面力学。

研究汽车地面力学的主要任务在于用理论分析和试验方法揭示各种越野汽车在不同外界环境下的真实工作特性, 以达到在不同地面条件下合理使用汽车和改进现有车辆性能的目的。此外, 根据不同的土壤物理特性, 地面几何特性, 轮胎力学特性以及车辆负荷和几何尺寸间所存在的相互关系建立一系列理论公式、纯经验或半经验公式, 并从这些方程式以决定越野汽车所要求的任何设计参数和选择最佳设计方案。

汽车地面力学的主要内容一般地说包括四个部分:

1. 汽车在松软土壤中的性能及松软土壤性能的分析;
2. 汽车由于不平地面而产生的振动;
3. 汽车克服障碍(壕沟、灌木丛、岩石等)的能力;

4. 轮式车辆的两栖性能,特别是在水陆之间的过渡地段上的性能。

当然上面所列述的这些内容也不是一成不变的,随着地面车辆力学研究的广泛深入开展,有些问题,例如作为交通工具的气垫船最近已被列入地面车辆力学的研究内容,这样就把“水面”也纳入了“地面”的范畴之内。

§ 1-2 地面-车辆力学的发展历史

关于车轮在变形土壤上滚动过程的研究,早在十八世纪末十九世纪初就已经开始了。在这一时期由于资本主义生产方式的兴起引起生产力的急剧发展,因而要求从根本上改善运输手段和交通方式。

十九世纪初就有人提出马车行走部分的几何尺寸与行驶阻力间的关系式。例如,捷克学者盖斯纳尔(Gerstner)于1813年发表了车轮尺寸、载荷、轮辙深度与牵引力间关系的理论研究。盖斯纳尔假设车轮载荷与土壤变形间存在直线关系。1875年胡斯塔(Wüst)提出了车轮设计的简化方法,他建议

$$P = K \sqrt{DB}$$

$$K = \frac{2}{3} k \sqrt{H^3}$$

式中 P —— 车轮载荷;
 D —— 车轮直径;
 B —— 轮缘宽度;
 K —— 土壤抗变形强度;
 H —— 轮辙深度;
 k —— 常数。

胡斯塔公式直到今天在农业机械制造业中还得到应用。

到十九世纪中叶,由于铁路建设的迅速发展,对降低马车行驶阻力的研究兴趣减小了。直到二十世纪初,特别是1910~1936年,由于拖拉机的出现以及运输车辆本身重量的大大增加,人们对车辆在软土壤上的行驶阻力重新给予必要的注意。

1913年德国学者伯恩斯坦(R. Bernstein)提出如下公式,表明车轮下陷深度 h 与其接地压力 q_z 间的关系

$$q_z = (a'u + a''F)h^{1/2} = ch^{1/2}$$

式中 F ——车轮印痕面积;

u ——印痕外周;

a', a'' ——土壤常数。

1929年苏联教授莱多石涅夫(М.Н. Летошнёв)建议把伯恩斯坦的理论扩大,并引入指数 μ

$$q_h = ch^\mu$$

式中 c ——在下陷深度为 h 时的土壤抗变形强度;

μ ——与土壤特性有关的指数,它表征土壤抗变形强度随下陷深度的变化规律。

但由于伯恩斯坦和莱多石涅夫公式内的 c 值是一个和土壤接触面积和形状有关的不定函数,故当车轮的尺寸大小不一,即负载面积和伯恩斯坦所研究的不同,这样的公式就无法普遍采用。这个难题一直到四十年代末还未解决,一度影响了越野行驶理论的进一步发展。

此外,伯恩斯坦的见解也是不完整的,因为他只考虑到被动车轮的下陷和运动阻力,而并未触及到驱动车轮的推动力问题,一直到1944年英国的密克莱威特(W. E. Micklethwaite)才首先提出这个问题,他在一篇关于土壤力

学和战车关系的论文中第一次提出：土壤对车辆单位接触面积的最大推力能用土力学中的库伦（Coulomb）公式表示

$$\tau_{\max} = c_0 + q \operatorname{tg} \phi$$

式中 c_0 ——单位面积的土壤粘聚力；

q ——垂直于剪切面积的单位压力；

$\operatorname{tg} \phi$ ——土壤颗粒间的摩擦系数。

密克莱威特在上述论文内还提出引用太察基（K. Terzaghi）原理来解决土壤的承载能力问题。

可惜的是密克莱威特的著作，特别是关于土壤推力或车辆牵引力公式的重要意义当时并没有引起人们的注意。

在密克莱威特发表他的著作前后，美国也开始对车辆的越野行驶理论发生了兴趣。因为美国的军事部门在第二次世界大战中发现：土壤条件限制了战车的动作。由于不可预计到的土壤状况的改变，常使已制订好的作战计划遭到破坏。由于对土壤的知识不足，车辆不可能通过困难的地段。为此，他们在战时集中精力进行了土壤可行驶性的研究，其目的在于探索一种可预报一辆汽车能否通过某一特定地段的快速方法。例如美国军事工程兵瓦透韦斯（Waterways）试验站设计出了一种类似葡氏密度测定计（Proctor needle）的土壤穿入仪。这是一端部为锥形体的杆，根据将锥形体压入土中所需力的大小来区别不同的土壤。如果记录了某种车辆在临界试验条件下通过某一土壤的力，那么在任何土壤条件下，若将实地测得的力与此临界力相比较就可预知该种车辆能否通过。

总的来说，在第二次世界大战期间，英国和美国的注意力都贯注于土壤剪切强度概念的研究，并把它看作是一种灵丹妙药，希望它能回答车辆能否通过的一切问题。例如英国

的泥土委员会 (Mud Committee) 在第二次世界大战以后也还热衷于设计和试验测量土壤剪切强度的仪器, 如“剪切叶片” (*Shear vane*) 式仪器, 并企图利用一个单一土壤参数值的测量来衡量车辆的通过性能。

显然, 为了评价土壤特性对车辆通过性的影响, 必须知道土壤在车辆作用下的应力应变关系。而企图利用一个单一值的测量来回答车轮为什么能够通过或不能通过的问题是很不全面的, 它只能解决特殊问题, 而不能解决具有普遍性的问题。因此当时在加拿大从事于土壤-车辆力学方面研究的培克 (M. G. Bekker) 指出, 车辆通过性应包括两个方面的问题: 一部分是属于车辆最大牵引力和土壤承载能力问题, 称为“稳定性问题”; 而另一部分是所谓“塑性问题”, 它包括由于土壤变形引起的行驶阻力和牵引力-滑转关系等问题。稳定性问题中关于车辆最大牵引力和土壤承载能力这两问题已由密克莱威特和太察基解决。

1950~1952 年, 当培克在美国斯蒂文斯工学院工作期间第一次导出了下列较库伦方程式更具有普遍意义的剪切应力-应变关系式, 它不仅能表示最大剪切强度, 而且还表出在不同滑转率 (i_0) 下的剪切强度中间值 (τ_x)

$$\tau_x = \frac{c_0 + q \operatorname{tg} \phi}{y_{\max}} \left[e^{(-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}) K_1 i_0 x} - e^{(-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 1}) K_1 i_0 x} \right]$$

在此公式内 K_1 和 K_2 是对某一土壤型式而言的经验系数, x 表示从土壤接触面开始的地方到测量 τ_x 这一点的距离, 而 $y_{\max}$ 是代表包含在括号内的函数最大值。利用这个公式就可能对不同负荷面积、形状和尺寸的车轮算出不同滑

转率下地面附着允许的牵引力值。

培克在斯蒂文斯工学院进行科学研究的同时还给研究院的学生开课，讲课的内容后来由密执安大学作为教科书在1956年出版，书名为“陆用车辆行驶原理”(*Theory of Land Locomotion*)。

1952~1954年培克在约翰·霍布金斯大学(John Hopkins University)的作战研究处(Operation Research Office)工作。在此期间，他对土壤下陷和行驶阻力的塑性问题进行了专门研究。培克的研究发现，曾用于土木工程方面的表示下陷深度 h 较小而负荷支承面积(宽度 b)较大的应力应变关系

$$q = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) h$$

颇值得借鉴。

式中 k_c 和 k_ϕ 分别表示由土壤粘性和摩擦性成分所决定的变形模量。

不过考虑到越野车辆在软土壤上行驶时的下陷深度较大，故上式不能直接利用。培克认为适合于越野车辆的方程式应是把莱多石涅夫和土木工程方面的公式合并起来，如

$$q = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) h^n$$

培克的试验证明： n 、 k_c 和 k_ϕ 实际上和负荷面积的尺寸及形状无关，故上式可用作解决土壤下陷和运动阻力问题的基础。

从1954到1960年，培克在美国底特律市领导了陆上运动研究所的工作。在此六年内他从事于用试验方法测定土壤的 c_0 、 ϕ 、 k_c 、 k_ϕ 和 n 等各参数值，并致力于在土壤-车辆力

学的基础上进一步发展地面车辆关系的数学模型。所有这些研究成果都综合在1960年出版的“越野行驶”(Off-the Road Locomotion)一书内。

1960年培克离开陆上运动研究所,去美国通用公司的国防研究所工作,并成为车辆机动性研究室主任,专门从事于勘探月球的车辆研究工作。他以地面-车辆力学为基础成功地设计了适用于月球表面的车辆,后来此登月车由阿波罗号宇宙飞船送上了月球。

从以上的叙述可见,地面-车辆力学的发展历史是和培克卓有成效的研究工作紧密相联,由于培克的杰出贡献使得美国在地面-车辆力学的研究方面处于领先地位。

美国在地面-车辆力学方面的成就使意大利的陆军感到很大兴趣。1961年美国 and 意大利陆军在意大利的都灵工业大学召开了地面-车辆系统力学第一次国际会议,出席的有17个国家,320名代表。会议总结了大约从1944年开始的研究活动;根据会议建议,1962年在美国建立了“国际地面-车辆系统力学学会”,商定每3~4年召开一次国际性会议并出版季刊“地面力学”。

从第一次国际会议到1969年,其间又相继召开了第二、第三次地面-车辆力学国际性会议,这些活动更进一步促进了美国和英国、加拿大、西德、日本等国关于地面力学研究工作的开展。培克在1969年又出版了“地面-车辆系统导论”

(Introduction to Terrain-Vehicle Systems)一书,系统地总结了到六十年代末为止有关地面-车辆力学的研究成果,至此“地面-车辆力学”这门新学科的雏型已基本形成。

近十年来地面-车辆力学又有了新的发展。1972年在瑞典的斯德哥尔摩,1975年在美国的底特律和1978年在奥地

利的维也纳先后召开了第四、第五和第六次地面-车辆力学国际会议。特别是最近，由于对越野性能的计算机模拟以及塑性理论和有限单元法等预测轮胎与汽车性能方面的应用，使得地面-车辆力学的研究工作又大大地推进了一步。

§ 1-3 地面-车辆力学的研究方法

如前所述，研究地面-车辆力学的最终目的是要建立车辆特性与地面性质之间的相互关系。为此许多学者采取了不同的方法，致力于地面-车辆数学模型的建立，要想详细的区分这些方法是困难的，但大体上可以分为以下几种方法：

一、纯经验方法

此方法是基于用观察或测量，鉴定土壤特性，并在各种类型的土壤上试验车辆，然后根据这两组试验结果，推导出土壤特性与车辆性能之间的关系。美军工程兵的瓦透韦斯试验站判断车辆在软土壤上通过性的方法即系纯经验法（或简称 WES 法）。此方法的主体是采用一个锥形体式穿入仪，将锥形体压入某一土中所需的力除以锥形体基底面积之商称为“圆锥指数”。如果将这个指数和车辆曾经试验过的土壤“圆锥指数”相比较就可预知一辆汽车能否在指定的土壤表面上通过。WES 法是在第二次世界大战末期建立起来的，由于此方法简单而快速，目前仍在被采用，如日本的田中孝在研究软弱地表面的可行驶性时就用的这种方法。最近几年，瓦透韦斯试验站又在进一步研究如何把“圆锥指数”和土壤的特性参数，如相对密度等联系起来。

二、半经验方法

此方法是对车轮在软土壤上的作用进行力学分析，确定和测量适当的土壤性质，并推导出包括车辆和土壤参数的简

化方程式。一般所熟知的培克方法即系半经验法。此方法是基于把车轮的挂钩牵引力 DP 对其重量 W 之比来评价车辆的牵引附着性能,而挂钩牵引力 DP 又等于最大牵引力 $P_{\max}$ 减去运动阻力 R_c , 结果

$$\frac{DP}{W} = \frac{P_{\max} - R_c}{W}$$

式中 R_c 为土壤垂直变形所引起的阻力,并对刚性车轮提出如下的简化公式

$$\begin{aligned} \frac{DP}{W} = \operatorname{tg} \phi - \left[\frac{3}{3-n} \right]^{\frac{2n+2}{2n+1}} \\ \times \left[\frac{W}{(n+1)(k_c + b k \phi)} \right]^{\frac{1}{2n+1}} \times \left[\frac{1}{D} \right]^{\frac{n+1}{2n+1}} \end{aligned}$$

式中 D ——车轮直径。

在导出上式时培克假设土壤的接触面积较小,而忽略了由于 c_0 值所产生的粘聚力部分。

半经验方法目前用得最广,例如苏联的阿葛伊金(Я. С. Агейкин)用理论和试验方法确定弹性轮胎在软土壤上的接触面积;日本的富一本多(Y. Fujimoto)用假想的大轮胎半径代替刚性车轮半径来计算弹性轮胎的滚动阻力和挂钩牵引力等。

三、基本理论研究方法

此方法是用最新的塑性理论或有限单元法等来研究土壤与车轮的相互作用。例如,美国的克拉费阿斯(L. L. Karafiath)用塑性理论研究车轮下的应力分布。加拿大的扬格(R. N. Yong)和米兰(P. M. Miller)提出“观察塑性法”(Visioplasticity Method),即假设:若车轮下土壤颗