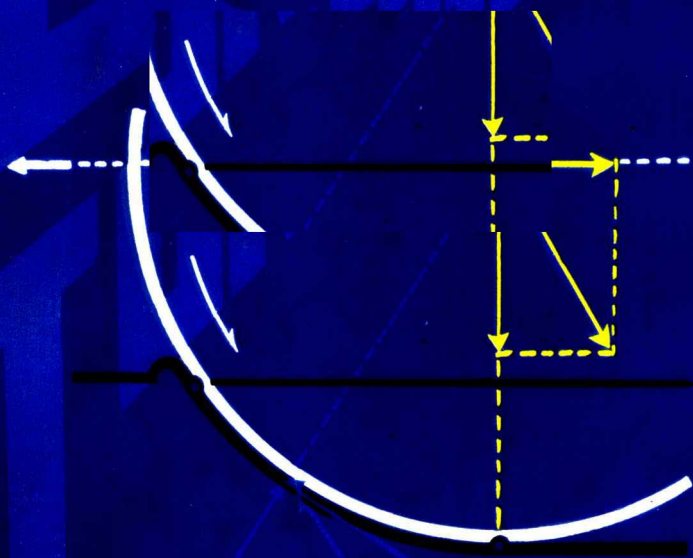




汽车通过性

庄继德 编著 孙凯南 审校



汽车通过性

庄继德 编著

孙凯南 审校

吉林人民出版社

内 容 提 要

本书介绍了美、英、苏、德、日、加拿大等国学者关于汽车通过性方面的研究成果及作者对汽车通过性问题的部分研究结果。

主要内容有：汽车通过性的土力学基础，弹性轮胎在软土壤上的滚动，汽车在土壤上的振动特性和越障性能，评价汽车通过性的指标，汽车的通过性试验，影响汽车通过性的因素及提高汽车通过性的方法，越野汽车的载荷状况，以及履带式车辆与轮式汽车通过性的比较等。

本书可供汽车设计及研究工作者和国防及交通部门工程技术人员参考之用，也可作为高等院校有关专业师生的教学参考书。

封面设计：马腾骧

责任编辑：林先根

汽 车 通 过 性

庄继德 编著

孙凯南 审校

*

吉林人民出版社出版 吉林省新华书店发行

长春新华印刷厂印刷

*

850×1168毫米32开本 16½印张 插页2 389,000字

1980年9月第1版 1980年9月第1次印刷

印数 1—2,570册

书号：15091·163 定价：2.10元

前 言

汽车通过性是指汽车在坏路或无路地区能顺利通过，并在给定的使用期限（寿命）内能以足够高的平均速度行驶的能力。

研究汽车通过性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，并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参数间的相互关系，建立数学模型和纯经验或半经验公式，用以决定越野汽车的设计参数，选定理想的设计方案。

对汽车通过性的研究，得到较快、较深入、较广泛的发展，主要是在第二次世界大战之后。目前对这个问题的研究已超出以往一般“汽车理论”所叙述的范围，而逐渐发展成为一门新的边缘学科。

研究汽车通过性对提高汽车在农村、矿山和建筑工地等无路地区的越野性能占重要地位，在军事上也有着重大意义。

作者编写本书的目的在于对汽车通过性研究的近代成果作比较系统的介绍，其中特别对通过性的评价指标、试验方法、载荷状况和影响因素等进行了较详细的探讨。

在编写时注意博采不同学派的观点，并对历史上一些有关的著名工作，而目前又不易查到文献资料的，书中也尽可能作详细介绍，以便开拓思路，了解汽车通过性问题的来龙去脉。

本书注重理论和实际相结合，力图用一般原理解释汽车通过

性的各种影响因素，以便更好地用理论指导实践，改进现有车辆的通过性能和设计出性能更为良好的越野汽车。

汽车通过性作为一门新的学科，还在不断发展和完善，尚有很多未被认识的东西。本书所叙述的内容和观点难免有不足和欠妥之处，希望读者多加批评和帮助。

本书由孙凯南工程师详细审校，在审校时，对书中的一些章节在内容上作了补充，特别在第七章中增写了〈螺旋推进器式车辆的两栖性能〉和〈铰接式车辆的动力学〉等内容，在此谨表谢意。

作 者

1979.5.20

绪 论

汽车的“通过性”是一个逐步发展的概念,其含意比较广泛,一般指汽车通过各种道路,地形的能力,有时也称为“越野性”。

苏联的曲达可夫(Е·А·Чудаков)、西米列夫(Г·В·Зимелев)等在他们的著作如“汽车理论”中,把通过性概念解释为汽车在不平的路面和松软土壤上通过的能力,并且提出了汽车的“支承通过性”和“几何通过性”两个概念。支承通过性是指汽车在松软土壤上可靠地行驶的性能,几何通过性是指汽车克服几何形障碍物如垂直阶台、弹坑、壕沟及灌木丛林等,这些概念代表着对汽车通过性问题的早期的认识。

在英、美等国家中,早年对于通过性问题主要是在实践中认识和解决的。在二次大战期间,军用越野汽车大都是在民用汽车的基础上改进而成,例如用民用车的总成构成的 6×6 全轮驱动越野汽车,在实际使用中,发现这一类中、后轴为双胎的车型行驶阻力太大,性能不好,而 4×4 型的后轴单胎的车型则比较好。在战时不及进行改进设计工作,战后这些问题成为研究课题。先是将越野汽车全部改为单胎,以后又着手研究通过性理论,美国贝克尔(M·G·Bekker)在他所著的车辆通过性理论《非公路车辆行驶力学》(Mechanics of Off-the-road Locomotion)中说:应该把通过性理解为,汽车在表面较为平滑的软路面上通过以及保证它在有粗糙不平的表面和大的几何形障碍物的硬路面上工作

的能力。

在此以后的一段时期内，有很多研究工作者曾从各方面定义汽车的通过性，但是他们大都从汽车能否在困难条件下行驶出发来定义和评价汽车的通过性，较少涉及这种使用条件是否经济合理。这种学术思想反映在越野汽车的研制工作上就是车型变化多，构造复杂。

越野汽车的主要使用者是军队，他们从战略、战术的要求出发提出了“机动性”的概念。早期的“机动性”概念与“通过性”或“越野性”区别不大，即指越过不平路面和松软土壤的能力及涉水和在冰雪地面上行驶的能力等，后来随着汽车与军队的战略战术性行动的关系日益密切，发展了“战术机动性”和“战略机动性”的概念。战术机动性大体上就是通过性或越野性。战略机动性指的是汽车以各种运输方式如海运、空运、陆运等运送的方便性，燃料、润滑油料供应的方便性，备件供应及与民用车总成零件的通用性、互换性、维修简便性等等。这就比单纯的通过性或越野性含意更为广泛，也多少超出了学术理论的范围了。

早期对于汽车通过性的研究，在经济性方面注意较少，汽车在艰难的条件下行驶，不可避免地会使汽车的燃料消耗增加，行驶速度降低，磨损和疲劳损坏加速，影响其寿命和行驶安全性。六十年代以来，随着对越野汽车使用经验的增加，发展了“越野经济性”的概念，其含意就是说某种结构的汽车用于越野行驶是否经济合理，美国、西德等从军队的汽车配备的角度出发，进行了较系统的研究，例如美国的陆军司令部“车轮”（wheels）小组的工作即是一例。他们的结论是并非所有的军事用途都要用结构复杂的高性能的越野汽车，很多后勤性的工作可以由一般全轮驱动的汽车担任，某些情况下，可以采用普通的民用汽车。

但是从纯属军事用途以及其它一些特殊地区如沼地，冰雪地

带的汽车而言，在通过性问题上仍然应当考虑由于驱动轮的滑转所造成的车速降低，汽车通过坏路时引起的传动系、行走系和车架等部分动载荷的增加，磨损加剧等等因素。从这一事实出发，汽车的通过性可以说是汽车能够顺利通过坏路或无路地区，并且能保持足够的平均经济车速及一定的寿命的能力。这个定义包含的内容已经相当复杂，但是与大量使用高通过性汽车的军事部门所要求的“机动性”仍有相当的差别。

研究汽车通过性的主要任务是，用理论分析和试验方法探索各种车辆在不同土壤条件下的实际工作特性和载荷状况，以达到改进车辆性能的目的。并要根据土壤特性、载荷与车辆参数间的相互关系，发展数学模型和方程，以决定越野汽车的设计参数和理想的设计方案。

因此汽车通过性理论的研究内容应包括：轮式车辆与土壤的相互作用关系，土力学原理在汽车通过性问题上的应用；汽车的越野行驶经济性问题；高通过性汽车的试验方法及其总成参数对通过性的影响；零部件的实际载荷及提高汽车强度与寿命的途径；履带式车辆的行驶特性及其与轮式车辆的比较等。

这些问题中最根本的还是对于车辆与土壤间的力学关系。因为前此几十年间车辆的发展比较着重于零部件的改进及车辆性能的探讨，对于车辆与土壤间的关系研究得比较少。车辆通过性能还以其行路机构对地面的“平均单位压强”经验数据为依据，这是因为考虑到一些无法确定但从经验上又感到其重要的因素，而往往采用较大的安全系数。近年来车辆的发展使过去隐藏在安全系数中的属于车辆运动学的一些未知因素逐渐显露出来，例如在一些特定的地面上，平均单位压强高的车辆的通过性反而比平均单位压强较低的车辆更好。其原因就在于汽车设计中忽略了土壤特性这一因素，不了解车辆与土壤间的应力应变关系。现在车辆的

使用条件愈来愈复杂，要设计一种能适应某种特定的自然条件的车辆，必须从系统地研究车辆与土壤间的力学关系着手。

研究的内容主要是以下两方面：

稳定问题 即土壤在车辆运动载荷下的极限强度问题，或土壤在塑性流动所引起的破坏以前的平衡状况，研究工作的目的是决定车辆的最大载荷或在车辆载荷下的土壤承载能力。如果超过最大载荷，土壤就会崩裂，车辆即发生沉陷。要解决这个问题主要是研究应力状态，不必对应变作量的分析。

变形问题 即土壤在车辆负荷下的变形问题，车辆沉陷问题即属于这一范畴。为了解决这些问题必须知道土壤的应力与应变关系。但在分析时可以不涉及破坏时的应力状态。

实际上车辆很少有不下压土壤表面的，强度较低的土壤大部分不能承受现代车辆的负荷而发生崩裂和很大的变形，所以在变形问题中包含了车辆运动的重要问题如沉陷、滑移及行驶阻力等。

从土壤稳定性与变形问题的角度来解释土壤与车辆之间的关系，至少有两个方面与土木工程不同：其一方面是使车辆行驶问题比较简化，这就是时间因素，因为车辆下面的土壤的变形时间相当短暂，往往只有几分之一秒至几秒，因此可以假设土壤的机械性能恒定不变，因而不发生由于土壤性质不稳定所引起的一些理论性和实际计算工作的困难；第二方面则恰好相反，由于车辆具有运动载荷而使问题复杂化，因为土力学主要是研究静载荷问题，严格说来，土力学的理论是不适用于动载荷的。在车辆行驶问题上应用土力学原理，主要是用于比较各种现象。

仅只是考虑车辆与土壤的相互作用关系的纯理论性力学分析，应力与应变作用的探讨，及由此而导出的一般牵引力、滑转、行驶阻力等与土壤特性，负荷，尺寸参数等的关系，并不能

评价整个车辆的通过性能。根据上述通过性的定义，还要考虑汽车的平均行驶速度和燃料经济性等。为此必须寻求一个统一的综合评价通过性能的效率系数，以及一些附加的评价指标。这些系数和评价指标应该用土壤特性，车辆载荷和行路机构外廓尺寸的函数形式表示。这样，汽车使用者就有可能对给定的土壤条件预测汽车的通过性能，而设计人员就能根据理论方程式充分分析各种可能的方案，正确地决定设计参数，使所设计的车辆能符合实际需要，得到良好的性能和经济效果。

越野车辆一般在变化很大的地面形状与土壤条件下行驶。因此很难设计一种能完全适应各种不同的土壤上行驶的越野汽车。所以越野车辆必须结合使用场地的特殊条件而设计，而要能针对使用场地的具体条件合理选择车辆型式和尺寸参数，必须先对使用场地和土壤性能有充分了解，用恰当的试验方法测出土壤的特性参数。

根据基本理论设计的越野车辆还需要不断进行试验，以考核所选定的车型与参数是否适合，预测的性能是否符合实际情况，以求达到预期的效果。因此探求土壤特性的测试技术和研究越野车辆在软土壤上的行驶特性是汽车通过性理论的一个重要部分。

汽车的传动系、悬架系等部分的结构与参数对汽车的通过性也有很大的影响，为了更全面地揭示越野车辆在软土壤上的真实工作特性，还必须进一步研究汽车各系统和总成对车辆和土壤相互作用关系的影响。

其次，对越野汽车不仅要求有良好的使用性能，而且还要求有足够的强度和寿命。因此研究越野汽车各部分的真实载荷状况也是汽车通过性理论的重要部分。知道了车辆在给定的使用场地和在不同行驶工况下的载荷状况，才能在设计时正确决定计算载荷并合理选定零件尺寸。

履带式车辆实际上是有一条随车携带的“道路”的轮式车辆，车辆前进时，履带即铺设在车前，同时吸起后面的部分，因此车轮并不与地面直接作用，而是通过履带板加压于地面。在此情况下，车辆接地面积形状与轮式车辆根本不同，但是所涉及的土力学原理则并没有多大改变，在很多问题上都还可以应用。因此车辆通过性理论主要是研究轮式车辆在软土壤上行驶的较普遍规律。然后以这种普遍规律为指导，进一步研究履带式车辆在软土壤上的行驶特性，来比较它们与轮式汽车的通过性。

目 录

绪 论	1
第一章 汽车通过性研究概况	1
一、汽车通过性理论的发展历史	1
二、汽车通过性问题的今后研究方向	15
第二章 土壤的物理机械特性	58
一、土壤的分类	58
二、土壤的特性	59
三、土壤的受力与变形	62
四、土壤内的应力分布	74
五、土壤的支承力	79
第三章 弹性轮胎与软土壤的相互作用	85
一、影响轮胎变形的因素	85
二、轮胎和土壤接触表面的形状 与轮胎径向变形大小的关系	89
三、轮胎和土壤接触表面上的压力分布	97
四、轮胎与土壤接触表面尺寸的确定	100
五、影响土壤变形大小的因素	104
六、轮胎的滑转与下陷	109
第四章 车轮在软土壤上的滚动阻力	112
一、用经验或半经验公式综合考虑弹性轮胎 和土壤变形的阻力	112
二、单独计算由于轮胎变形所引起的滚动阻力	120
三、由于土壤在垂直方向变形所引起的滚动阻力 的各种计算方法	122

四、车轮纵向推移土壤时所引起的滚动阻力	147
五、当轮辙深度大于汽车最小离地间隙时所 引起的附加阻力	148
六、考虑车轮滑转损失的滚动阻力计算公式的推导	150
第五章 驱动车轮的滑转及其与土壤的附着	162
一、车轮上牵引力与滑转系数的关系	162
二、影响滑转系数的因素	166
三、车轮滑转对汽车动力性与经济性的影响	169
四、在松散土壤上驱动车轮最大可能牵引力 (附着力) 的确定	172
五、在粘性土壤上牵引附着力的确定	177
六、对不同力学性质土壤确定的牵引附着力计算公式	183
七、确定车轮与土壤间最大牵引力的简化公式	191
八、根据车轮的作用力半径确定附着系数	193
九、在半液性稀泥中滚动时车轮极限拖拉力的确定	198
第六章 汽车土壤系振动	200
一、汽车在软土壤上的垂直振动	200
二、土壤振动时引起的传动系扭转振动	204
三、引起汽车振动的地面不平度	208
四、影响汽车通过性的垂直振动加速度	219
五、地面不平度引起的振动对汽车牵引附着性能的影响	225
第七章 汽车的几何通过性	232
一、几何参数对汽车通过性的影响	232
二、不同悬架系统的汽车越障性能比较	241
三、车轴数目与几何通过性的关系	256
四、螺旋推进器式车辆的两栖性能	257
五、铰接式车辆的动力学	264
第八章 汽车通过性的评价指标及其预测	277
一、汽车通过性的评价指标	277

二、单位附着后备及驱动车轮效率的确定	288
三、最有利的汽车通过性	299
第九章 汽车的通过性试验	306
一、土壤条件及确定土壤特性的方法	306
二、确定汽车支承通过性及动力性、 经济性指标的方法	315
三、试验汽车通过性的测量仪器	322
四、越野汽车的道路试验	336
第十章 影响汽车通过性的因素及提高汽车通 过性的方法	350
一、土壤状况对汽车通过性的影响	356
二、轮胎参数对汽车通过性的影响	360
三、特种轮胎对汽车通过性的影响	383
四、车轮布置与轴间载荷分配对汽车通过性的影响	397
五、传动系结构特点对汽车通过性的影响	411
六、行驶状况对汽车通过性的影响	429
第十一章 越野汽车的载荷状况	434
一、越野汽车行走系的实际载荷	434
二、越野汽车传动系的载荷特点	439
三、由于功率循环所产生的附加载荷	447
四、多轴汽车驱动轴间扭矩分配	458
五、降低越野汽车传动系载荷的途径	467
第十二章 履带式车辆与轮式汽车 通过性的比较	476
一、履带式车辆在软土壤上的单位压力分布 及履带与车轮承载能力的比较	476
二、履带下陷及履带与车轮滚动阻力的比较	482
三、履带与车轮牵引力的比较	487
四、履带式车辆通过性的评价指标	497

五、提高履带式车辆通过性的途径	501
六、履带式车辆传动系载荷	505
附 录	508
主要参考文献	513

第 一 章

汽车通过性研究概况

目前关于汽车通过性的研究，大体上仍然是力学原理在汽车运动方面的应用，但已超出一般“汽车理论”书中所叙述的范围。

严格说来“汽车理论”只是工程力学包括静力学、动力学、振动等在汽车运动方面的应用，本身并不能构成“理论”，这一术语在四十年代开始应用时，其内容比目前更为狭窄。汽车通过性问题从五十年代开始较全面的研究发展以来，引入了土力学和概率统计、因次分析等学科的内容，在六十年代以后，又将有限单元法和计算技术用于汽车通过性的研究，实际上形成了接近于边缘科学的技术学科。

在实际应用中，有的国家已经根据汽车通过性理论，发展了“雪地列车”、“沼地车”、“月球车”、各型铰接式汽车和多种型式的越野汽车，以及各种适应高通过性汽车性能要求的总成。

由于汽车通过性理论有这样的生命力，致使汽车通过性理论的研究工作发展很快。

一、汽车通过性理论的发展历史

汽车通过性理论这门学科在二十世纪五十年代以前发展得比较慢。虽然在第二次世界大战期间也取得些进步，但都依靠经验的方法研究车辆的通过性问题，而不是依靠坚实的理论基础，因

而在很长的时期内阻碍了对越野车辆的合理设计。在第二次世界大战以后，由于车辆与土壤力学关系的研究得到了重视，车辆的通过性理论才很快的发展起来，在这方面，加拿大和美国取得了比较大的进展。

美国在车辆土壤力学方面的成就是和德国、苏联以及英国等的早期研究分不开的。德国的伯恩斯坦 (R·Bernstein) 是第一个以应用力学的古典方式研究了土壤车辆关系问题。他的关于刚性车轮下陷的著作于1913年发表，他在著作内企图建立土壤在车轮作用下的应力应变关系，并导出如下联系车轮下陷量 h 和表面压力 q 的公式：

$$q = kh^{\frac{1}{3}} \quad (1-1)$$

式中 k —— 土壤形变模量。

1936年苏联农业工程师戈里亚契金 (В. П. Горячкин) 把这个理论扩大，并引入下陷指数 n ：

$$q = kh^n \quad (1-2)$$

上列公式是在很多人研究不遵循虎克定律的物质的应力应变关系基础上得到的。

式(1-1)和(1-2)内的 k 值并不只代表一个仅仅与土壤有关的一般常数，也是一个和土壤接触面积及形状有关的不定函数。虽然伯恩斯坦和戈里亚契金也曾试图用一个经验常数来表示其间的关系，但并没有成功。一直到五十年代这个难题并未解决，因此阻碍了车辆通过性理论的发展。

伯恩斯坦的见解并不完整，因为他只考虑到从动车轮的下陷量及由此而引起的运动阻力，而并未触及到驱动车轮的牵引力问题。一直到1944年英国的密克斯威特 (E.W.E. Micklethwait) 才首先提出这个问题。他在坦克技术学校写了一篇关于土力学和