

工程机械履带—地面附着力矩 理论基础

杨红旗 著

机械工业出版社



工程机械履带—地面 附着力矩理论基础

杨红旗 著



机械工业出版社

本书是工程机械履带与地面相互作用范畴内的理论专著。全书以履带—地面附着力矩理论为主线，按层次阐述了履带接地比压、履带与地面水平作用的相关系数、履带回转极距与机器纵向偏心距的函数关系等基础理论问题；根据履带式工程机械作业特点，将其分为停机作业和行驶作业两类型式，分别论述了两种不同作业条件的履带—地面附着力矩理论；书中有应用举例、试验、数据分析以及结论。

本书可做为高等工业学校工程机械专业研究生的专业教科书和本科生专业理论课的参考书，亦可供工程机械科研单位、生产企业工程技术人员进行研究和设计参考之用。

工程机械履带—地面附着力矩理论基础

杨红旗 著

*

责任编辑：林 松 余荣林 版式设计：胡金瑛

封面设计：严庆满 责任校对：王书庚

*

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)

江苏工学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 ·印张 11.75 ·字数 293.3 千字

1990 年 9 月北京第一版·1990 年 9 月江苏第一次印刷

印数 0 001—3 000 ·定价：6.50 元

*

ISBN7-111-02666-7/TH·271(X)

序

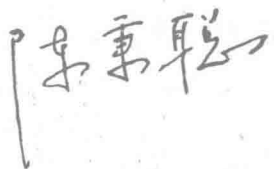
刚参加过七届全国人大三次会议返校，收到杨红旗同志自北京来信，说机械工业出版社决定将他的著作《工程机械履带—地面附着力矩理论基础》正式出版，要我写一小序。得到这一消息，我感到由衷高兴。

据我所知，杨红旗同志这本著作是他二十多年的业余研究结晶。他在1981年写的征求意见的草稿，我曾经逐章审阅过。深感这是理论与实践相结合的产物，对履带式工程机械地面力学理论确有创见。后来他又综合各方面的意见和国外有关理论的发展情况，用四年多的业余时间写成此书。我认为这是一部很好的专著，对履带式工程机械理论的建立和发展，是会发生积极影响的。

该书的特点是：立论来源于设计工作中存在的实际问题；根据解决问题的要求，以履带—地面附着力矩理论研究为核心，展开了系统而且分层次的研究，最终形成了具有独特见解的工程机械履带接地区段与地面相互作用的理论体系。书中的履带接地比压部分，有着系统全面的理论分析；并提出了履带接地平面核心域概念，对评价履带式机器设计水平有着很直观的实用意义；对美国学者 M.G.Bekker 关于接地比压与沉陷深度关系研究中出现的“谜”，解释得很符合客观实际，也很有理论见解；对转向阻力系数、行驶阻力系数和附着系数的研究，不仅物理意义明确，而且把传统的查表法上升为解析算法，使土壤参数、机器结构参数和运动学参数结合为一体，形成统一的计算系统，很有学术和实用意义；关于回转极距的研究、履带—地面附着力矩以及滑转对其影响的研究，都很有独到见解。试验部分较为全面，对数据处理颇费了一番功夫，可信程度很高。

还有一点应该说明，杨红旗同志是政府机关的一位领导干部，长期从事技术管理工作；他结合实践经验，对发现的技术理论问题，能够寻根究源，得出结论，而且从未影响本职工作。这种刻苦作风和认真态度，确实是难能可贵的。可以肯定地说，如果没有丰富的实践经验和深厚的基础理论知识，对这样的著作是万万写不出来的。在我与杨红旗同志接触中，经常听到他说：“有志者事竟成。”这本著作的诞生，我想就是他这种坚韧不拔精神的写照，也是他的坚强毅力的体现。

趁该书出版之机，特写以上数语，作为我向读者的推荐意见，也作为对杨红旗同志的祝贺。



1990年5月1日序于吉林工业大学

序

本书是作者二十多年来对工程机械履带—地面附着力矩理论悉心研究的成果。履带—地面附着力矩理论，历来是工程机械和履带车辆地面力学的重要课题，中外学者进行了长期研究探索，其中影响较大的如美国 M.G.Bekker、苏联 Е.Д.Львов 等人所做的工作；他们创建的理论和推导的计算式，为设计部门和大学教科书中所广泛引用。然而，以往的研究，或由于假设条件不完善，或由于忽略了某些因素，在机械设计应用中，有着一定的局限性。作者有鉴于此，在研究以往成果、博览有关著作的基础上，综合分析、潜心探索，提出了履带接地平面核心域等新概念，对接地比压的变化与附着力矩的内在关系、回转极距与纵向偏心距的函数关系、履带滑移、滑转理论等都提出了一系列新的观点。这些理论和计算方法经过论证，证实是正确的，能够更好地解析工程实践中的问题。

作者以精益求精和从实际出发的精神撰写了本书，对问题的探讨锲而不舍，二十多年来，不断修改、不断补充，几易其稿。使本书具有不少特色，并经一些高等学校研究生教学使用后，受到了普遍欢迎。本书的特色之一是以理论探讨为基础、工程实用为目的，两者紧密结合，理论上力求严密、完善，综合的计算式、图表又富有工程实用价值，使读者感到学术深度与工程实用性结合成一体，言之有物、取之可用，这是本专著最可贵之处；特色之二是作者对国内、外现有履带—地面附着力矩的主要理论和计算方法作了实事求是的客观评价，使读者得窥全豹，对权威著作也作了恰如其分的评议，还解答了 M.G.Bekker 教授著作中接地比压与沉陷深度关系研究中出现的“谜”，提出了比压与沉陷深度关系的新观点，这不但有助于读者对该课题研究深广度的了解，也为进一步探索该课题开辟了途径；特色之三是本书的主要结论和计算数据都经过试验证实，试验数据经计算机处理，准确性大，有极大的可信度和可靠度。由于这些特色，本书部分内容在有关杂志上发表以后，受到工程机械行业工厂、研究单位工程技术人员和高等学校有关教师的重视，在部分论文和大学教科书中也引用了作者的有关论点；日本小松制作所还组织过讨论。因此本书在国内外是具有一定影响的。

作者是我国工程机械行业的主要领导人之一，近三十年来，对工程机械行业的规划、管理、产品开发、生产、科研和教学付出了巨大劳动，为我国工程机械行业发展做出了很大贡献。本专著是作者业余写成的。可以想象，作者在繁忙的行政管理工作之余撰写本书，需要多大的毅力和事业心！这种精神是值得大家学习的。我们深信，本书的出版，将为工程机械的设计、教学和科研提供一部高水平的参考书。



1990年5月1日序于同济大学

前 言

本书是作者利用业余时间断续写成的。

早在 1963 年夏末,作者应邀参加大型快速履带式敷路机设计审查会议期间,发现设计人员使用的计算许用偏载水平外载负荷的计算式,是以机器重心与履带行驶装置几何中心相重合为条件推导的;但设计的机器在相应工况下却具有较大的偏心距,其数值约为履带接地区段长度的 $1/6$ 。显然,按此公式计算的数据与实际情况存在着很大的差异,必然导致机器重力过大、通过性能差以及转向困难等缺陷。当时作者查阅了许多专业文献,找到一组与设计工况相吻合的试验数据。该设计存在的问题虽然暂时得到了解决,但从理论上却不得其解;当条件稍有变化时,仍然是一个无法解决的难题。受到这一启发之后,作者便利用业余时间对上述问题以及与其直接相关的履带—地面附着力矩理论,开始做些探讨性的工作。

由于当时条件所限,作者只能从理论着手分析,并于 1966 年年初写出了论文草稿。又由于众所周知的原因,直到 1977 年才将论文摘要以《履带式工程机械对地附着力矩浅议》为题发表于《工程机械》杂志第 5~6 期。发表的意图,是为了给专门从事工程机械理论研究的同志提供一些线索,希望能够起到抛砖引玉的作用。发表以后,出乎作者意料地受到了工程机械行业的工厂和研究单位很多工程技术人员以及高等院校有关教师的重视,有的同志撰写的研究论文和编著的大学教科书曾经引用了作者的有关论点;日本小松制作所的 3 个研究单位专门组织过讨论,并联合给作者寄来了讨论记录和评论意见。国内、外读者的关心与支持,给了作者很大的鼓励。

根据工程机械行业很多科技人员的建议,在吉林工业大学陈秉聪教授指导下,作者从 1977 年开始陆续对理论部分进行补充、完善和深化,并在此基础上做了试验验证。试验工作从 1979 年下半年开始准备,到 1980 年年底完成。在整个试验过程中,得到了机械电子工业部天津工程机械研究所的大力帮助,按试验大纲先后参加试验工作的有 20 多位同志,其中谭新吾高级工程师和张金兴高级工程师付出了尤为艰巨的劳动。包括试验部分在内的全书草稿写成并经陈秉聪教授审改后,于 1981 年年底印出了征求意见本,呈送有关学者和专家审阅。为了更广泛地征求意见,作者应《工程机械》杂志社之约,将书中第四、五两章的主要内容在《工程机械》杂志 1982 年第 2、3、9 期上发表。从 1981 年印出征求意见本至今,已近 9 年。这期间,作者收到很多同志来信,其中有鼓励,有建议,也有对个别地方的商榷意见。中国科学院学部委员雷天觉教授、北京航空航天大学王俊奎教授、北京科技大学陈道南教授等老一辈学者,曾分别约作者面谈过,充分交换了看法,对作者有极大的帮助和启发。还有很多关心作者的同志,寄来了国外近期的有关论文,作者都认真拜读过,收获也很大。吉林工业大学诸文农教授、陈德兴教授、张子达副教授、许纯新副教授、同济大学曹善华教授、华北水电学院北京研究生部南新旭教授、刘士贤副教授等学者,对 1981 年征求意见本逐章进行了细致审查,从不同角度指出了一些问题。另外,作者在 1984~1985 年给研究生讲授《地面—机器系统力学》课程时,对全书内容进行了系统介绍。江苏工学院自 1986 年开始,选用为工程机械专业研究生的教材,至今仍在使用。在综合分析各方面意见

的基础上，作者从 1986 年开始用了 4 年多的业余时间，对全书进行修改，写成现在的本子。出版之前，陈秉聪教授和江苏工学院高行方教授做了全面审校。陈秉聪教授和曹善华教授在百忙中为本书写了序。在此谨向热情帮助与支持过作者的同志和外国朋友，表示衷心感谢。

作者学识浅薄，尤其是能用于业余研究的时间越来越少，书中论述不周甚至错误之处在所难免，恳请学者、专家和读者批评指正。

杨红颖

1990 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 国内外现有的主要计算方法	4
一、履带接地比压呈均匀分布状态的算法	4
二、具有挂钩牵引力的算法	5
三、根据履带转向作功量推导的算法	7
四、通过履带与地面之间静摩擦作用求解的算法	7
五、调整转向阻力系数的算法	8
六、接地比压呈倒置等腰三角形分布的算法	9
七、附加修正系数的算法	10
八、由履带滑转(移理论引证的算法	10
第三章 履带接地比压和履带接地平面核心域	13
一、履带接地比压	13
二、履带接地平面核心域	18
三、履带接地比压与沉陷深度的关系	19
第四章 履带与地面水平作用的相关系数	29
一、转向阻力系数	29
二、行驶阻力系数	33
三、附着系数	44
第五章 回转极距与纵向偏心距的函数关系	52
一、机器重心位于履带接地平面核心域以内的函数关系	52
二、机器重心位于履带接地平面核心域以外的函数关系	54
三、机器纵向偏心距的解析测定法	58
第六章 履带—地面附着力矩理论	61
一、机器重心位于履带接地平面核心域以内的履带—地面附着力矩	61
二、机器重心位于履带接地平面核心域以外的履带—地面附着力矩	65
三、履带—地面附着力矩综合分析	69
第七章 滑转(移对履带—地面附着力矩的影响	73
一、履带相对于地面的滑转机理和滑转率	73
二、滑转条件下履带回转极距与纵向偏心距之间的函数关系	75
三、滑转条件下的履带—地面附着力矩	82
第八章 履带接地比压和履带—地面附着力矩理论在工程机械研究与设计中的应用	89
一、履带式机器直线行驶牵引力的确定	89
二、履带式机器曲线行驶牵引力的确定 ^[25]	92

三、履带式推土机许用水平偏载外载荷的确定	97
第九章 试验与数据分析	100
一、样机横向与纵向偏心距标定试验	100
二、试验场地土壤物理—力学性能测定和地质条件探测	106
三、履带接地比压试验与数据分析	115
四、回转极距与纵向偏心距函数关系试验与数据分析	140
五、履带—地面附着力矩试验与数据分析	142
第十章 结论	168
附录一 主要物理量代表符号(按文中先后次序排列)	170
附录二 微压计现场标定数据	173
附录三 微压计实测应变值数据	177
参考文献	179

第一章 绪 论

履带式工程机械以及拖拉机、坦克、牙轮钻机、回转钻机等履带式机器，在自重与外载荷作用下，通过履带接地段与地面之间的相互作用，才能正常工作与行驶。所有履带式机器在工作和行驶过程中，各种外载荷的水平分力，除沿履带行驶装置几何中心左右相互平衡的特殊情况外，总是要产生迫使履带接地段沿地面向左或向右的扭转趋势；由于履带接地段在地面上具有一种附着能力，因而使机器能够按设计要求保持相对稳定。履带接地段与地面之间的这种附着能力，本书用履带—地面附着力矩表述。

履带—地面附着力矩是履带式机器的一个重要基础理论领域。它不仅直接关系到机器的工作效率、行驶稳定性和转向灵活性，而且是研究机器转向理论、牵引性能、结构合理性、零部件强度以及使用经济性的基本依据。

对于履带式工程机械来说，履带—地面附着力矩的明显特点是具有两重性：在某些条件下，对机器工作性能是有利的；在另外条件下，则对机器工作性能又是有害的。

履带式工程机械处于作业状态时，一般要求具有较大的履带—地面附着力矩，以保持机器有足够的工作稳定性，能克服更大的水平外载荷，并提高机器的工作效率。从这一观点出发，往往把履带—地面附着力矩称为工作稳定力矩。现举几例加以说明：

1. 履带式推土机偏载作业工况

履带式推土机进行推土作业时，水平外载荷的合力 F 往往集中作用于推土板下部切削刃中心线以外的部位(图 1-1)。这样，必然产生迫使机器沿工作地面扭转的外力矩 M_1 ，其数值为 $M_1 = Fa$ ；这个外力矩是由推土机与地面之间的履带—地面附着力矩来平衡的。由图 1-1 不难看出，履带—地面附着力矩 M 越大，则推土机所能克服的外力矩 M_1 也越大，因而所能克服的作用于机器纵向中心线以外的水平外载荷 F 也就越大。所以在设计过程中，计算推土机工作装置推杆强度和刚度所选用的许用外力，要直接通过履带—地面附着力矩 M 来确定。如果计算的履带—地面附着力矩 M 比实际数值大时，则推杆断面尺寸就要大于实际需要的数值，这样必然导致机器重力不必要地增加。当然，如果计算的履带—地面附着力矩 M 小于实际数值时，则机

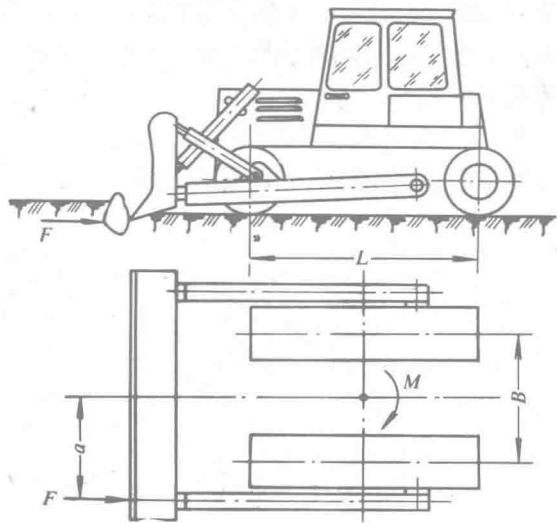


图 1-1 推土机偏载作业工况

器的工作装置就要产生变形以至损坏。由此可见，推土机的履带—地面附着力矩是确定机器许用偏载水平外载荷的重要依据。对履带—地面附着力矩的计算是否正确，直接影响着推土

机设计的水平。

2. 斗轮和单斗挖掘机作业工况

斗轮挖掘机和单斗挖掘机在挖掘土壤和岩石时，作用于斗齿或切削刃上的外力可以分解成相互垂直的 3 个空间分力：垂直分力 F_{01} 、纵向水平分力 F_{02} 、横向水平分力 F_{03} (图 1-2、图 1-3)。其中，横向水平分力 F_{03} 将产生迫使机器履带接地地区段沿地面扭转的外力矩 M_1 ，其

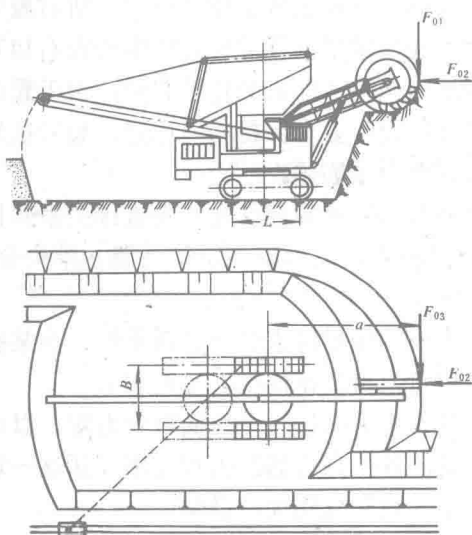


图 1-2 斗轮挖掘机作业工况

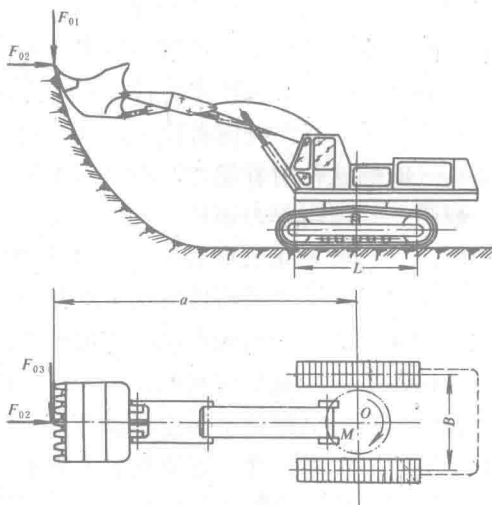


图 1-3 单斗挖掘机作业工况

数值为 $M_1 = F_{03}a$ 。这个外力矩要由机器的履带—地面附着力矩 M 来平衡。显然，履带—地面附着力矩 M 越大，所能克服的外力矩 M_1 越大，因而所能克服的横向水平分力 F_{03} 也就越大。对各种履带式挖掘机来说，履带—地面附着力矩是决定挖掘过程中机器工作稳定性能的重要因素之一。

3. 军用履带式工程机械行驶工况

军用履带式工程机械在弯曲道路上高速行驶时 (图 1-4)，由于离心力的作用，便产生迫

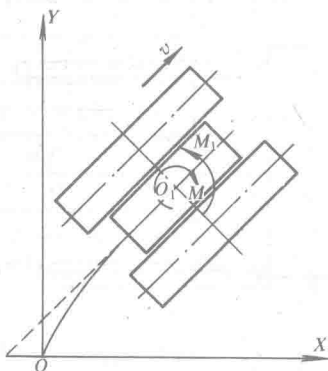


图 1-4 军用履带式工程机械行驶工况

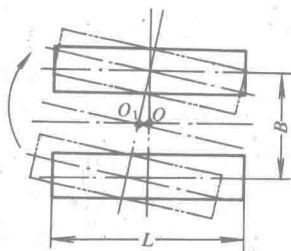


图 1-5 阻碍转向的外力矩产生情况

使机器脱离行驶轨道的外力矩 M_1 。机器所以能沿运行轨道正常行驶，除司机的操纵与调整

外, 主要是由于履带—地面附着力矩 M 保持了机器的平衡。履带—地面附着力矩越大, 所能克服的外力矩就越大, 因而机器高速行驶的稳定性也就越好。

履带—地面附着力矩对履带式工程机械的技术性能既然存在着有利的一面, 必然也存在着有害的一面。从有害的观点出发, 往往把履带—地面附着力矩称为转向阻力矩。举例说明如下:

履带式工程机械转向时, 地面对机器必然产生阻碍转向的外力矩(图 1-5)。从机器转向的灵活性来说, 这个外力矩越小越好。转向的外力矩是由机器自身的转向作用而产生的, 其极限值即为机器的履带—地面附着力矩。外力矩在数值上如果小于履带—地面附着力矩时, 说明机器自身的转向力矩尚未达到转向的极限值, 因而机器不能转向。只有当其数值等于或大于履带—地面附着力矩时, 转向运动才能发生。就是说, 当机器转向时, 履带—地面附着力矩越小, 阻碍机器转向的外力矩极限值也越小, 因而机器转向灵活性也就越高。

综上所述, 履带—地面附着力矩是履带式工程机械固有的一个重要技术特征, 有时称为工作稳定力矩, 有时称为转向阻力矩。其实两者在本质上是一个问题的两个方面, 是履带—地面附着力矩两重性的具体表现。因此, 设计履带式工程机械时, 要对履带—地面附着力矩的两重性进行综合分析: 既要保证机器作业时有足够的工作稳定性, 又要保证机器转向时必要的灵活性。机器对工作稳定力矩和转向阻力矩的要求相反, 前者要求大, 后者要求小, 互相矛盾。因此, 必须根据对立统一规律, 力求两者匹配得当, 取值适中。这样, 才能设计出技术和经济性能先进的履带式工程机械。这是工程机械专业研究与设计人员必须正确掌握的一个原则问题。

但是, 目前国内外学术界关于履带—地面附着力矩的研究, 在理论上还很不成熟, 现有的一些计算方法不能反映一般规律, 而且与实际情况差距甚大。究其原因, 主要是忽略了机器重心的偏移影响到回转极距和履带接地比压, 并进而影响到履带—地面附着力矩这个极为重要的规律。有的外国学者在研究履带—地面附着力矩时, 认为上述规律是今后要致力探讨的理论课题^[35]。他们在以这个规律为基础而进行的其它理论分析和试验过程中, 只对履带—地面附着力矩做出简单假设, 因而所得理论式的计算值与试验实测值之间出现了很大的误差。这不能不影响到有关研究成果的可信度。

本书研究了履带接地比压随机器纵、横向偏心距的改变而变化的规律, 提出了履带接地平面核心域概念及其应用方法; 讨论了接地比压与沉陷深度的关系; 探讨了履带与地面水平作用的相关系数; 分析了履带回转极距与机器纵向偏心距之间的函数关系; 在上述研究成果的基础上, 全面分析了履带—地面附着力矩理论, 得出了理论计算式和在工程技术中具有足够精度的简化计算式; 探讨了滑转(移)对履带—地面附着力矩的影响; 做了 5 个单元的试验, 获得了与理论相吻合的结果。这样就使履带—地面附着力矩这个复杂的理论课题, 通过对地面土壤特性、机器结构有关参数和机器运动特性 3 个面的综合分析, 总结出了比较符合实际情况的结论。所得的一系列新的并经试验验证了的计算式和试验方法, 可以在履带式工程机械的研究和设计中应用。

第二章 国内外现有的主要计算方法

在目前所见到的文献中,关于履带式工程机械(包括履带式拖拉机和坦克等)履带—地面附着力矩的计算方法很多,名称也不统一,如转向阻力矩、回转抗阻力矩和摩擦阻力矩等。就其实质来说,上述不同名词表达的是一个意思。本书统一命名为履带—地面附着力矩。

本章把目前国内外现有的主要计算方法归纳为8种。根据各自的特点,给这些计算方法分别命名,指出存在的问题,并尽可能地分析其产生问题的原因。为便于比较,把不同文献中对同一物理量所用的不同代表符号,统一为相同的形式。

一、履带接地比压呈均匀分布状态 的计算法^{[1][2][3][10][15][18][23][25][33][34]}

这种计算方法的特点是:机器重心在水平地面上的投影与两条履带接地区段的几何中心相重合;每条履带均承受机器1/2的重力。只要具备这些条件,履带接地比压即呈均匀分布状态。

如图2-1所示,一条履带的微元接地面积 $b dx$ 在平均接地比压 p_a 作用下,以 x 为半径,绕履带接地区段的几何中心 O 点(回转极)转动的微元履带—地面附着力矩为

$$dM' = \mu p_a b x dx \quad (2-1)$$

式中 μ ——履带转向阻力系数;

p_a ——履带平均接地比压, kPa;

$$p_a = G / 2bL \quad (2-2)$$

G ——机器重力与垂直外载荷的合力, kN;

b ——履带宽度, m;

L ——履带接地长度, m。

一条履带的履带—地面附着力矩 M' , 对上式积分得出

$$M' = 2 \int_0^{\frac{L}{2}} \mu p_a b x dx = \frac{\mu GL}{8} \quad (2-3)$$

具有两条履带的机器总的履带—地面附着力矩为

$$M = 2M' = \frac{\mu GL}{4} \quad (2-4)$$

式(2-4)应用得非常普遍。但是只有机器重心在水平地面上的投影与两条履带接地区段的几何中心相重合时,才是正确的。该条件在一般履带式机器上是很难具备的。因此该式不能反映一般规律。应用时,一定要注意具体条件,不可随意套用。

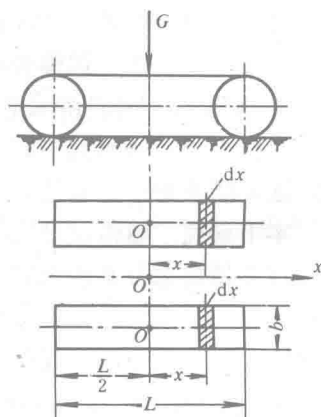


图2-1 平均接地比压作用下的履带—地面附着力矩

二、具有挂钩牵引力的计算法^{[15][21]}

履带式机器在挂钩牵引力作用下的受力状态, 如图 2-2 所示。

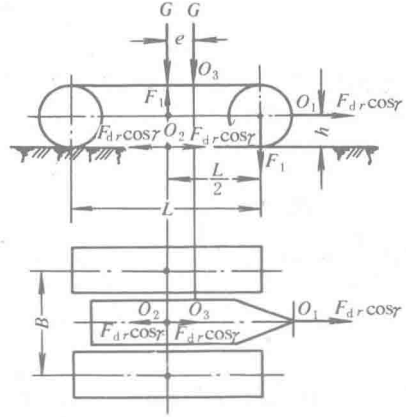
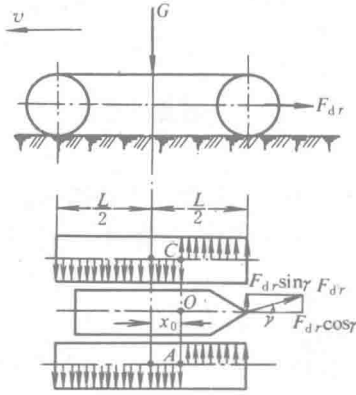


图 2-2 机器在挂钩牵引力作用下的受力状态 图 2-3 对挂钩牵引力作用的分析

该计算方法的假设条件是: 挂钩牵引力 F_{dr} 的方向与机器纵向中心线之间的夹角为 γ , 履带宽度为无穷小, 机器运动路程为水平地面, 履带接地比压呈均匀分布状态, 机器具有很小的行驶速度。

挂钩牵引力 F_{dr} 可以分解为相互垂直的两个分力 ($F_{dr} \cos \gamma$ 、 $F_{dr} \sin \gamma$), 并以 x_0 表示履带回转极 A 和 C 与履带接地地区段横向中心线之间的距离(简称回转极距)。

在此条件下, 履带—地面附着力矩为

$$M = \int_0^{\frac{L}{2} + x_0} \mu \frac{G}{L} x dx + \int_0^{\frac{L}{2} - x_0} \mu \frac{G}{L} x dx = \frac{\mu GL}{4} \left[1 + \left(\frac{2x_0}{L} \right)^2 \right] \quad (2-5)$$

式(2-5)常见于工程机械、拖拉机和坦克理论领域的有关文献。很多学者还以该式作为推导其它物理量的依据。

但是, 该式的推导过程存在着原则性的问题。简要分析如下:

为简化分析过程, 略去横向分力 $F_{dr} \sin \gamma$ 的影响; 假设挂钩牵引力的纵向分力 $F_{dr} \cos \gamma$ 与机器纵向中心线相重合; 机器重心在地面上的投影落在两条履带接地地区段的几何中心上; 除重力外, 没有其它垂直载荷(图 2-3)。

根据力的平移法则, 将纵向分力 $F_{dr} \cos \gamma$ 由 O_1 点平移至 O_2 点。此时, 便产生一个附加力矩 M_0 , 其值为

$$M_0 = h F_{dr} \cos \gamma$$

式中 h ——挂钩牵引力着力点与地面之间的距离, m。

根据力的转换法则, 将该附加力矩转换为

$$M_0 = \frac{L}{2} F_1$$

由图 2-3 可知, 经过力和力矩的必要转换之后, 可以认为作用于履带上的垂直力是由

$G-F_1$ 和 F_1 两个平行分力所构成的合力；其几何和为 G 。但此时 G 的作用点将改变位置，即在 $F_{dr}\cos\gamma$ 的作用下，机器重心将后移。

根据力的平衡法则，将 F_1 和 $G-F_1$ 两个平行分力同时对 O_3 点取力矩，并假设机器重心后移距离为 e ，则可列出下式

$$e(G - F_1) = \left(\frac{L}{2} - e\right)F_1$$

整理后得

$$\frac{G}{F_1} = \frac{L}{2e}$$

即

$$e = \frac{LF_1}{2G} \quad (2-6)$$

已知 $F_1 \frac{L}{2} = hF_{dr}\cos\gamma$ ，故

$$F_1 = \frac{2h}{L}F_{dr}\cos\gamma \quad (2-7)$$

将式(2-7)代入式(2-6)得

$$e = \frac{h}{G}F_{dr}\cos\gamma \quad (2-8)$$

式(2-8)表明，当履带式机器具有挂钩牵引力时，机器重心将后移。后移距离与挂钩牵引力的纵向分力及其作用点距离地面的高度成正比，与机器重力成反比。既然机器重心后移，说明履带接地比压的分布状态要发生变化，不能继续保持均匀分布状态。在此状态下，最大接地比压产生在履带接地地区段的后端。在文献^[22]中，А.Д.Софиян 和 Е.И.Максименко 利用 ДТ-54 型和 С-80 型履带式拖拉机进行试验的结果(图 2-4)，可以证明上述分析是正确的。

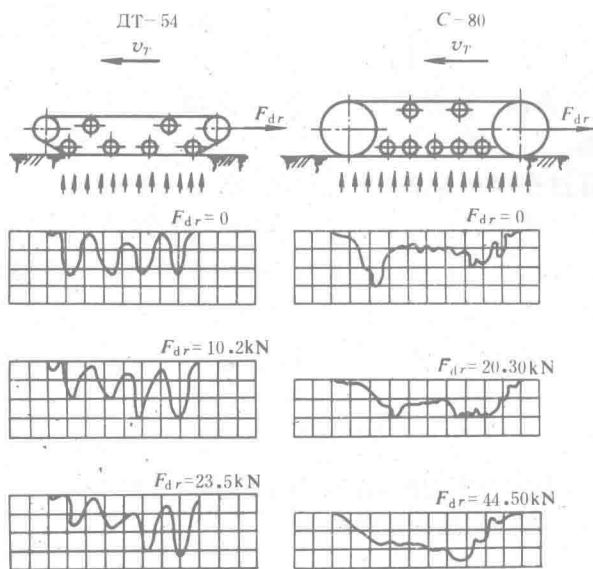


图 2-4 接地比压随挂钩牵引力的变化

接地比压发生了新的变化, 但 Е.Д.Лбвов 教授却仍按平均接地比压推导履带—地面附着力矩, 这显然是不恰当的。文献^[13]的试验数据证明, 当机器重心与履带接地区段的几何中心不重合时, 履带—地面附着力矩的试验值都比 $\mu GL/4$ 为小。但式(2-5)表明, 无论回转极距 x_0 如何变化, $[1+(2x_0/L)^2]$ 之值都要大于或等于 1, 即机器具有挂钩牵引力时, 履带—地面附着力矩都要大于或等于 $\mu GL/4$ 。这与实际情况相比较, 很明显地存在着矛盾。因此, 式(2-5)不宜引用。

三、根据履带转向作功量推导的计算法^{[14][34]}

履带式机器在转向过程中, 假设一条履带的作功量为 A , 回转极在履带接地区段面积的中心 O 点处, 机器重力平均作用于两条履带上, 即各为 $G/2$ 。根据图 2-5 可知, 履带接地区

段微元面积 $b dx$ 在平均接地比压作用下, 以 x 为半径绕回转极 O 点转动微元角度 $d\theta$ 时, 所作的微元功为

$$dA = \frac{G}{2L} \mu x dx d\theta \quad (2-9)$$

式中 θ ——履带回转角, rad。

将式(2-9)积分, 得一条履带绕其几何中心 O 点回转角度 θ 时所做的功。即

$$A = \int_0^\theta \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{\mu G}{L} x dx d\theta = \frac{\mu GL}{8} \theta \quad (2-10)$$

一条履带的履带—地面附着力矩为

$$M' = \frac{A}{\theta} = \frac{\mu GL}{8} \quad (2-11)$$

具有两条履带的机器总的履带—地面附着力矩为

$$M = 2M' = \frac{\mu GL}{4} \quad (2-12)$$

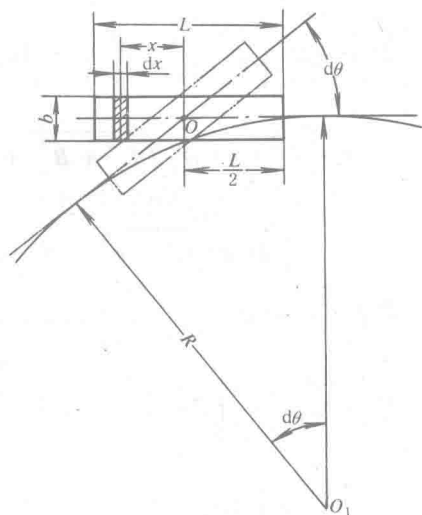


图 2-5 机器转向时履带接地区段的运动

虽然这种方法与第一种方法推导过程的物理意义有所差异, 但由于假设条件相同, 结论仍是一致的。其中, 最关键的一个假设条件是履带接地比压均呈均匀分布状态。所以, 两种方法求得的同一计算式, 只适用于履带式机器接地比压均匀分布的情况, 接地比压一旦发生变化, 则该式就不适用了。

四、通过履带与地面之间静摩擦作用求解的计算法^[9]

履带式机器转向时, 履带接地区段与地面之间必然产生摩擦作用。为了简化推导过程, 将履带沿曲线的运动假设为沿很多小折线的运动。同时, 假设履带接地比压是常数。

如图 2-6 所示, 一条履带的微元面积 $dx dy$, 在平均接地比压 p_a 作用下, 以 ρ 为半径绕

其支承面几何中心 O 点转动时的微元履带—地面附着力矩为

$$dM' = \mu p_a \rho dx dy = \mu p_a \sqrt{x^2 + y^2} dx dy \quad (2-13)$$

将式(2-13)积分, 则得一条履带的履带—地面附着力矩为

$$\begin{aligned} M' &= 4\mu p_a \int_0^{\frac{L}{2}} \int_0^{\frac{b}{2}} \sqrt{x^2 + y^2} dx dy \\ &= \frac{\mu p_a}{12} \left(2Lb\sqrt{L^2 + b^2} + L^3 \ln \frac{b + \sqrt{L^2 + b^2}}{L} \right. \\ &\quad \left. + b^3 \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + b^2}}{b} \right) \end{aligned} \quad (2-14)$$

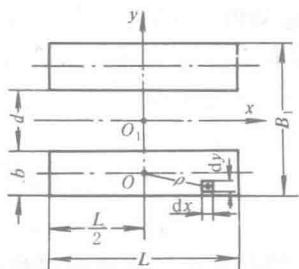


图 2-6 履带与地面的摩擦作用分析

由图 2-6 知, 具有两条履带的机器总的履带—地面附着力矩为

$$\begin{aligned} M &= 4\mu p_a \left[\int_0^{\frac{B_1}{2}} \int_0^{\frac{L}{2}} \sqrt{x^2 + y^2} dx dy - \int_0^{\frac{d}{2}} \int_0^{\frac{L}{2}} \sqrt{x^2 + y^2} dx dy \right] \\ &= \frac{\mu p_a}{12} \left[\left(2LB_1\sqrt{L^2 + B_1^2} + L^3 \ln \frac{B_1 + \sqrt{L^2 + B_1^2}}{L} + B_1^3 \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B_1^2}}{B_1} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(2Ld\sqrt{L^2 + d^2} + L^3 \ln \frac{d + \sqrt{L^2 + d^2}}{L} + d^3 \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + d^2}}{d} \right) \right] \end{aligned} \quad (2-15)$$

假设 $L = c_1 B_1 = c_2 d$, 则可将式(2-15)转换成如下形式

$$\begin{aligned} M &= \frac{\mu p_a}{12} \left\{ B_1^3 \left[2c_1\sqrt{c_1^2 + 1} + c_1^3 \ln \frac{1 + \sqrt{c_1^2 + 1}}{c_1} + \ln(c_1\sqrt{c_1^2 + 1}) \right] \right. \\ &\quad \left. - d^3 \left[2c_2\sqrt{c_2^2 + 1} + c_2^3 \ln \frac{1 + \sqrt{c_2^2 + 1}}{c_2} + \ln(c_2\sqrt{c_2^2 + 1}) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2-16)$$

这种计算方法所得之结果较繁杂, 应用不甚方便。由于该方法以平均接地比压为前提, 其应用范围必然受到很大限制。国内外的实践经验证明, 式(2-14)、(2-15)、(2-16)并无多大实用价值, 其推导者 Н.Г. Домбровский 教授在他 60 年代以后的著作中^[10], 均未向读者推荐这种计算方法。

五、调整转向阻力系数的算法^[32]

这种计算方法与第一种计算方法基本一样, 所不同的是履带与地面之间的转向阻力系数有所区别。当履带式机器作转向运动时, 履带—地面附着力矩计算式为

$$M = \frac{\mu_\omega GL}{4} \quad (2-17)$$

式(2-17)中的 μ_ω 代表转向阻力系数。这个系数与地面情况和回转半径 ρ 直接有关,