

高等学校试用教材

矿山机械底盘设计

吉林工业大学 曹金海 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

TD402

2
3

高等学校试用教材

矿山机械底盘设计

吉林工业大学 曹金海 主编

VX01/20



机械工业出版社

540471



B

前 言

本书是根据1983年9月高等工业学校矿山机械专业教材编审小组制定的教学计划和教学大纲,以及审定的本教材的编写大纲编写的。它是高等工业学校矿山机械专业“矿山机械底盘设计”课程的教材,也可作为其他有关专业的教学参考书,并可供有关工程技术人员学习参考。

本书着重介绍了矿山机械底盘设计的基本理论、设计原则和方法,并讲述了各部件与系统的结构分析和主要参数的确定,主要零件的设计要点和计算方法,以及一些新结构、新技术和试验方法。全书以矿山机械底盘所需的设计知识为主,建立科学体系,并考虑了专业课之间的分工与联系。

本书由吉林工业大学曹金海主编,并编写第一、八、九、十一、十二章及第十章中第一、二、三、四节,太原重型机械学院李淳编写第四、五、七章及第十章中第五、六节,重庆大学李自新编写第二、三、六章。全书由北京钢铁学院史肇华主审。参加审稿的有北京钢铁学院周鹏里、中南工业大学吴建南、昆明工学院黄定国、西安冶金建筑学院裴永宝、武汉化工学院刘御卿、武汉钢铁学院王湘龄和唐山工程技术学院严孟煌等。参加审稿的同志对本书进行了详细地审阅,并提出了宝贵的意见。本书在编写过程中还得到有关研究所、工厂和高等院校的支持和帮助。编者一并表示衷心地感谢。

由于本书编者水平有限,编写时间仓促,书中一定有错漏之处,诚恳地欢迎广大师生和读者提出批评指正。

编 者

1986年7月

目 录

第一章 绪论	1	§ 7-3 主传动锥齿轮设计	136
§ 1-1 概述	1	§ 7-4 差速器设计	146
§ 1-2 底盘设计的基本问题	5	第八章 制动系统设计	153
§ 1-3 本课程的地位、作用及与其他课程的关系	7	§ 8-1 制动能力分析	153
第二章 行驶力学	9	§ 8-2 蹄式制动器设计	158
§ 2-1 轮式机械行驶力学	9	§ 8-3 盘式制动器设计	160
§ 2-2 履带式机械行驶力学	18	§ 8-4 带式制动器设计	163
第三章 牵引力学和牵引计算	25	§ 8-5 制动驱动机构	166
§ 3-1 自行式矿山机械的牵引力平衡和牵引功率平衡	25	第九章 回转机构和支承装置	171
§ 3-2 自行式矿山机械的牵引性能和经济性能	29	§ 9-1 回转支承装置类型和零件结构形式	171
§ 3-3 牵引性能参数的选择与计算	39	§ 9-2 回转支承装置的作用载荷	175
§ 3-4 传动系统传动比分配及传动系统计算载荷的确定	55	§ 9-3 回转支承装置的计算	181
第四章 离合器设计	58	§ 9-4 回转机构的传动装置设计	192
§ 4-1 离合器类型与结构分析	58	§ 9-5 承载装置的结构类型和强度计算	198
§ 4-2 主离合器设计	61	第十章 转向系统设计	201
§ 4-3 离合器的操纵机构	74	§ 10-1 概述	201
第五章 定轴式变速箱设计	78	§ 10-2 偏转车轮转向系统设计	202
§ 5-1 变速箱的功用、要求和类型	78	§ 10-3 铰接式转向系统设计	211
§ 5-2 定轴式变速箱结构分析	79	§ 10-4 液压动力转向系统设计	214
§ 5-3 定轴式变速箱传动简图设计	81	§ 10-5 履带式机械驱动桥	219
§ 5-4 变速箱主要参数确定与配齿计算	88	§ 10-6 履带式机械的转向理论	221
§ 5-5 变速箱操纵机构设计	92	第十一章 行走系统设计	227
第六章 行星变速箱设计	96	§ 11-1 履带行走系统的类型和结构	227
§ 6-1 行星变速箱结构设计	96	§ 11-2 履带接地压力与地面承载能力	232
§ 6-2 行星机构运动学和动力学	100	§ 11-3 步行机构设计	238
§ 6-3 行星变速箱传动简图设计	111	§ 11-4 轨轮式行走机构	244
§ 6-4 行星变速箱齿轮传动设计	124	§ 11-5 轮胎和轮辋	246
第七章 万向节传动与轮胎式机械驱动桥	128	§ 11-6 轮胎式机械的车架和悬架	252
§ 7-1 万向节传动的的设计	128	第十二章 矿山机械底盘的试验研究	259
§ 7-2 轮胎式机械驱动桥	132	§ 12-1 概述	259
		§ 12-2 载荷谱的测试和应用	260
		§ 12-3 整机性能测试内容与方法	262
		参考文献	267

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

一、矿山机械底盘的功用

在矿山机械中，自行式矿山机械占很大比重。自行式矿山机械主要由原动机、工作机构和底盘等部分（有的还包括转载机构）组成。原动机为该机械提供动力，工作机构进行生产作业，而底盘作为整机的支承，并使该机械按所需的速度和牵引力，以及需要的方向行驶。

对于在行驶中进行作业的矿山机械，如矿山装载机、平巷掘进机、矿用载重汽车和推土机等，其底盘（称牵引型底盘）的性能对整机的性能起决定性的影响。对于在行驶中不进行作业的矿山机械，如凿岩台车、牙轮钻机、旋转钻机和挖掘机等，其底盘（称承载型底盘）的性能也直接影响整机的性能。所以，研究矿山机械底盘对于提高其性能具有重要意义。

矿山机械底盘由传动系、行走系、转向系、制动系和回转支承装置（某些矿山机械在作业中需要回转时设有这种装置）等五部分组成。

1) 传动系统是原动机动力与驱动轮负载之间的动力传递装置。其功用是将原动机输出的功率传给驱动轮，并满足使用上对底盘性能的要求，即：保证底盘在各种使用工况下所必须的牵引力变化范围和速度变化范围；保证具有最佳的动力性和能源利用经济性。

传动系统由分动箱、传动轴、主离合器或液力变矩器、变速箱、传动轴、主传动、转向离合器（履带式底盘常设的装置）和终传动等组成。

2) 行走系统的功用是把整机支承在地面上，传递和承受路面作用于车轮或履带的各种力和力矩，并吸收振动与缓和冲击以保证底盘的正常行驶。轮胎式底盘行走系统由车架、悬架、前桥、后桥和车轮等组成。此外，为了从驱动桥壳传力到车架上，行走系统还可能包括传动轴套管或推力杆等零件。履带式底盘行走系统由车架、悬架、履带架、驱动轮、导向轮、支重轮、托轮和履带等组成。

3) 转向系统是保证整机在行驶时按需要的方向行驶。轮胎式底盘转向系统由方向盘、转向机和转向传动机构等组成；履带式底盘转向系统由转向离合器和制动器及其操纵机构组成。

4) 制动系用来使自行式矿山机械迅速降低行驶速度甚至停车，并保证机械能在坡道上停车。制动系统由制动器和制动传动机构组成。在履带式底盘中通常没有专门的制动装置，而利用转向制动器进行制动。

5) 回转支承装置的功用是使工作机构在任何方位作业，并使铲掘的物料提起及绕整机垂直轴线（即回转中心）作圆弧运动，以达到运输物料的目的。它由回转驱动机构、回转平台、回转支承轴承等组成。

二、矿山机械底盘的类型

根据行走机构的类型不同，一般把它分为轮胎式、履带式、轨轮式和步行式4种。

根据传动机构的类型，一般又把其底盘分为机械传动式、液力机械传动式、液压传动式

和电力传动式4种。

对轮胎式底盘按转向方式的类型，可将其底盘分为偏转车轮式和铰接式两种。对履带式底盘，按履带的数目可分为双履带式、三履带式和多履带式底盘等。

根据不同矿山作业条件和要求，合理地选用矿山机械底盘的类型，能有效地提高矿山机械的生产效率和降低生产成本。

三、对矿山机械底盘的要求

矿山机械底盘的工作环境和条件多变，同时也十分恶劣，如露天矿使用的自行式矿山机械所行驶的路面，是经凿岩爆破后由推土机加以平整的锋利岩石路面或其它较差条件的路面。同时，露天作业的气候条件也较差。井下矿使用的自行式矿山机械路面条件也很差，巷道尺寸又小，矿物岩尘及地下水对底盘的工作影响较大。除此而外，其工作机构在作业时产生的冲击和振动载荷，以及正常工作载荷均传给底盘。因此，对矿山机械底盘应满足如下5个要求。

(一) 使用性能要求

自行式矿山机械的使用性能是指，它能适应预定的工作环境和作业条件，并使其发挥最大的工作效率。其使用性能包括牵引性能、动力性能、制动性能、通过性能、稳定性和行驶平顺性能，以及便于安装、拆卸和维修等。为了使所设计的自行式矿山机械具有良好的使用性能，设计人员在接受任务后应搜集自行式矿山机械的工作环境与作业条件有关的资料，搜集国内、外同类型机械的技术资料。在广泛调查基础上进行深入分析研究，并充分地征求制造、使用和修理部门的意见，明确设计目的和要求进行设计。

(二) 可靠性要求

可靠性是用概率指标或寿命指标来衡量，可靠性用概率表示时，称为可靠度，底盘的可靠度是指在规定的时间内和工作条件下，能够正常完成其功能的概率。反之，完不成规定功能的概率称为不可靠度或失效率。可靠性的寿命指标是用平均故障间隔和失效前的平均时间来表示。

可靠性是一个综合性指标，它是评价底盘的一个重要尺度。影响底盘可靠性的因素很多，主要有：

1) 它取决于组成底盘的那些零部件的可靠性。因此，在进行底盘设计时，要选择和设计组成底盘的各零部件有较高的可靠性，合理布置各零部件在底盘上的位置，改善工作环境和作业条件，提高其可靠性。

2) 要充分考虑变载荷的影响。由于自行式矿山机械的工作载荷变化，在一定条件下导致底盘某些零件产生较大的载荷，致使零件损坏。这是由于载荷的作用频率等于零件自振频率的干扰累积而引起共振的结果。为了防止这种共振现象的发生，设计时要仔细分析变载荷特征及其影响，使零件和整个系统避免在共振范围内工作。

3) 合理选择零件的尺寸及形状，防止底盘在运行中产生自激振动。在底盘传动系中存在着间隙，当传动系工作时，运动构件之间存在的间隙，会使某些构件产生较大的动载荷，这种动载荷过大时，将会直接影响一些零件的可靠性。例如在挖掘机的回转装置中，因为运动链中有间隙，可使启动和制动时的载荷增加4~5倍，这种突然附加载荷可能损坏零件，降低零件的可靠性。所以在设计时，要合理地选择底盘运动链中机件的连接特性，减少在运行中动载的影响。

(三) 经济性要求

经济性是一个综合性指标。设计的经济性体现在满足使用性能要求的前提下，应力求结构简单，零件的种类和数量要少、重量要轻，以减少原材料的消耗。制造经济性则体现在工艺上合理、加工方便和制造成本低。使用经济性则体现在高生产率、高效率、能源消耗少以及低的管理和维护费用等。

(四) 结构工艺性要求

结构工艺性对底盘的质量和成本有很大的影响。所谓结构工艺性就是底盘的结构符合一定的工艺要求，即在保证必要的质量和要求的寿命的条件下，使材料消耗和劳动消耗最少，并且便于成坯、加工和装配。结构工艺性好的产品，在加工制造中可以降低劳动消耗量和减少材料消耗量。

提高结构工艺性，要合理设计机器零件的结构形式，正确地选择材料和制作毛坯的方法，合理地选择加工形式、表面质量、加工精度、热处理方法及技术要求等。

(五) “三化”要求

产品的系列化、部件的通用化、零件的标准化，一般三者称为“三化”。“三化”程度是评价机器先进性的重要指标之一。实行“三化”可以简化生产、提高劳动生产率和产品质量，降低生产成本。

系列化是指同一类型的产品按其大小分成若干等级组成系列，用较少品种的部件组装成多种型号的产品。系列化工作包括系列型谱的制定和系列化设计，前者是确定产品的基本参数系列，后者是根据系列型谱进行系列化设计。

通用化是指一个产品内部及不同产品之间的部件最大限度地通用互换，以减少零件的种类。由于部件通用化的结果，系列化产品上的零件种类将大为减少。这样可减少产品的设计工作量，扩大部件的制造批量，使工艺规程典型化，有利于组织生产和提高产品质量。

标准化首先意味着遵守颁布的各种标准和规范，再则是常用零件（如连接件、紧固件和传动件等）和组件应完全按国家、部门或行业的标准选用，而不另行设计。在设计中广泛采用标准件，有利于通用化和系列化，便于组织生产，提高质量，降低造价和方便维修。

实行“三化”是一项重大的技术政策，它有利于提高企业的技术水平、经济管理水平和劳动生产率，有利于采用新技术、新工艺、新材料，从而大大提高产品的产量和质量，大幅度地降低生产成本，同时也便于产品的维修与备品供应，并使设计工作得到简化。

四、矿山机械底盘的发展趋势

(一) 大型化

金属矿和非金属矿的露天开采是矿山开采的主要方式，由于露天开采能够使用大型设备，以实施生产集中化，所以它比地下开采有产量大（世界上最大露天矿年采剥总量达2.44亿t）、效率高、成本低、基建速度快、易于实现机械化和自动化，以及生产安全、回采率高等一系列优点，所以世界各国都优先发展露天矿开采。目前在大型露天矿采用的大型高效设备有：理论生产率达 $11000\text{m}^3/\text{h}$ 的斗轮挖掘机、铲斗容积为 40m^3 采矿型挖掘机、 137.5m^3 剥离挖掘机、 168m^3 步行式拉铲挖掘机、 22m^3 单斗液压挖掘机、钻孔直径为 445mm 的高轴压大孔径的牙轮钻机、 18.4m^3 轮胎式装载机、350吨位级电动轮汽车、 603kW 的推土机和10吨位级以上的装药车等，这些大型矿山设备都包括大型底盘。因此，底盘大型化是矿山机械底盘的重要发展方向。

(二) 大力发展液压传动和液压控制

矿山机械底盘采用液压技术具有以下优点:

- 1) 可实现很大的传动比, 而没有传动机构, 故结构简单、重量轻;
- 2) 便于安装布置, 液压传动和液压控制是靠管路中的油来传递动力, 因此液压元件的安装布置较为方便;
- 3) 由于重量轻、惯性小, 故能源消耗可降低 30%, 并且工作时动载荷小、噪声低, 工作平稳;
- 4) 操纵轻便灵活, 液压元件易于实现“三化”。所以, 液压传动和液压控制在矿山机械底盘上应用越来越广泛。但是, 由于液压元件要求精度高, 加工制造较困难, 致使其性能不易保证。因此, 液压技术的应用又受到限制。

(三) 发展多功能的底盘

在同一底盘上, 更换不同的工作机构, 实现多种作业, 如在装载机底盘上, 安置不同的工作机构, 能使其实现吊、推、装、抓和插等多种作业要求。这对实现同类型底盘的通用化很有意义, 它可提高劳动生产率 and 产品质量, 便于制造和维护, 降低生产成本。

(四) 采用新技术、新结构、新材料和新工艺, 不断地提高底盘的质量

随着电子计算机发展, 采用计算机辅助设计系统, 可把计算机的快速计算和逻辑判断能力、高效的数据处理(包括贮存)能力与人的创造思维能力充分结合起来, 使设计过程逐步由半自动化走向自动化。这样的设计过程就是由电子计算机对有关产品的大量资料进行检索; 对有关数据和公式进行快速计算, 通过草图和标准图显示设计结果, 如果需要修改, 可由设计人员用光笔和人机对话语言, 直接对图形进行修改设计, 直至达到最佳方案为止。这种计算机辅助设计系统大大地减轻了设计人员的劳动、缩短了设计周期, 提高了设计质量, 使设计人员从繁琐的计算和绘图工作中解放出来, 以便有时间从事更多的创造性工作。

应用基础理论的新成就, 完善设计理论, 如应用累积疲劳损伤理论、随机振动理论、模拟理论、控制论等直接指导设计, 使设计的科学性和准确性不断提高。

测试技术的现代化是新技术发展的一个重要方面。通过试验, 可以测定某些技术参数; 通过测试, 还可以对产品的质量进行检查和评价。晶体管式、集成电路和数字显示式的仪器与仪表, 以及磁带记录装置和电子计算机处理装置的出现, 还有传感装置的发展, 大大地提高了试验水平。

新技术除在底盘设计上应用外, 它在自动调节和自动操纵方面的应用也在发展, 如自动润滑装置、自动换挡装置、自动调节悬架, 制动力自动调节装置、制动器防抱装置等, 这些新技术和新结构, 在矿山机械底盘上逐渐得到发展。

与此同时, 新工艺、新材料也不断涌现, 电子计算机引入机械制造中以后, 使各种工艺和装配工作的自动化程度日益提高, 加工质量和速度有很大的提高。在大、中型矿山机械底盘中, 金属结构件的比重很大(如平台、底架和履带架等), 过去均采用调质碳钢。目前都广为采用低合金高强度钢如 15MnVN, 它具有强度高, 韧性和塑性好, 抗脆性和抗破坏能力强; 加工性和可焊性亦较好, 焊后不要求作内应力处理; 能在载荷激烈变化和低温(-20°C)条件下工作等优点。目前的趋势是把计算机辅助设计与计算机辅助制造等结合起来, 组成一个从设计到加工、装配, 并包括管理在内的全自动化工厂, 使人们摆脱繁重的劳动, 去从事学习和研究。

§ 1-2 底盘设计的基本问题

一、设计过程

矿山机械产品从设计开始到结束的整个过程，通常要经调查研究、明确设计要求、制定设计任务书、总体与部件方案设计、技术设计、试制、试验、改进与定型等，在设计中交叉进行。

(一) 调查研究和明确设计要求

矿山机械产品是供用户使用的。因此，它必须满足使用部门的要求，同时它又必须符合制造厂的条件，使制造厂能够制造出来。设计人员在接受设计任务后，首先要明确所设计产品的用途、主要技术经济要求、生产方式和国民经济意义。此外，要了解国家有关方针政策和产品系列化要求，国内的资源情况等。

这个阶段的中心任务是，在深入调查研究及分析资料的基础上，明确设计要求，确定设计原则。为此要进行的工作有：

1) 资料的搜集和分析，即广泛搜集国内外同类型产品的设计、使用、试验、研究和生产技术等方面的资料，加以分析和整理、列出同类型产品的性能参数统计表和统计曲线，写出技术发展水平的分析报告，从而了解同类型产品的整机和部件的结构、性能、参数、产品系列、生产水平和发展趋势。此外，要搜集与设计有关的各种标准和专利。

2) 使用调查，即深入了解使用部门对产品的要求及市场的需要量；了解产品的工作环境，如用途、作业范围、现场道路情况、气温、湿度、空气含尘量等；了解产品使用情况，如同类型产品实际使用的优、缺点、损坏零部件统计与分析等。

3) 生产调查，即了解具体制造厂的生产条件、生产设备、技术水平、新工艺和新材料方面的研究成果、原有产品等，以便充分利用生产厂的技术与设备，合理地选择零部件的结构、形状与技术条件。

(二) 技术任务书制订

在调查研究的基础上，仔细全面地进行分析研究，通过初步选型、总体布置和性能参数计算，确定整机的主要尺寸、参数和部件的基本形式，制定技术任务书。技术任务书是整机和部件设计的共同依据，它决定了以后的设计、试制和试验的方向。技术任务书包括下列内容：

- 1) 任务来源和设计依据；
- 2) 所设计产品的用途、使用范围和使用条件；
- 3) 整机的布置型式及主要尺寸参数、性能参数和重量参数；
- 4) 各部件的基本型式和特性参数；
- 5) 国内外同类型产品主要参数的统计和分析、结构分析及发展趋势的论述；
- 6) 所设计产品拟采用的新技术、新结构、新材料和新工艺；
- 7) 产品的“三化”情况；
- 8) 生产数量、生产方式、设备条件、预期的制造成本和技术经济分析。

技术任务书经过设计、使用、制造、规划、供销等部门讨论通过，并经领导部门批准后，就成为指导设计与生产的重要技术文件，一般不得随意改动。

(三) 总体与部件方案设计

总体与部件方案设计是指选择总体方案、进行总体布置、部件和总成的方案设计等。

总体布置是将设计任务书中提出的技术要求具体化。主要是确定各总成及部件的具体位置及相互之间的连接形式。总体布置过程中，通过绘制总体布置草图来确定总成及部件的位置，经过一系列的整机参数及尺寸计算进行校核，并通过若干种方案进行比较，选择布置合理和技术经济指标先进的方案。

总体布置的主要内容：

- 1) 确定各部件在整机上的位置，对各部件的控制尺寸提出要求；
- 2) 确定各部件之间、部件与整机之间的安装连接方式；
- 3) 确定整机的主要尺寸，估算重量及重心位置；
- 4) 布置各种操纵机构、机棚及司机室等；
- 5) 审查各运动件的运动空间，排除可能发生的干扰。

在总体布置时，要注意满足下列要求：有利于提高整机的稳定性、传动效率和生产效率，同时便于维护和修理。

部件方案设计是在总体布置的基础上进行的，在研究了各总成的布置及相互安装位置关系之后，按照整机性能要求，力求做到结构简单、使用可靠、材料消耗少、生产成本低、维护修理方便。同时注意提高零件的加工工艺性，充分采用标准件和通用件。在设计中应从多种方案分析比较，选取最优方案。

在完成总体和部件方案设计后，应召开方案审查会，广泛听取使用部门、研究与制造部门的意见，为技术设计做好准备。

(四) 技术设计

技术设计主要是指零件图与部件装配图的绘制，以及有关技术文件的制订。

一个产品设计质量，最终体现在设计图纸上，任一零件的设计错误，都可能影响到整机性能或拖延试制试验工作。

图纸设计包括有：产品总图、部件装配图、传动系统图、润滑系统图、电气系统图、液压系统图等，还要进行零件图绘制。

技术文件包括：产品技术性能说明书、设计计算书、拟制部件与总成的装配与试验技术文件、产品使用说明书、备件目录以及外购件与外协件明细表。

在技术设计中，要进行大量的计算工作，为此要善于运用有关的试验资料与设计图表。充分利用电子计算机等现代工具，可使所设计的零部件在强度和寿命方面达到最优。设计的零件图纸，必须经过仔细地校核，并通过尺寸链计算，检查各装配尺寸。此外，对所设计零件应进行成本分析，充分挖掘潜力，减少零件重量，合理选用材料和容易制造，以降低成本。

必须指出：设计工作是一个反复进行的过程，设计的每个阶段都应考虑是否满足设计要求。在设计时，可以先研究系统中几个零部件，对其进行分析并使之优化。然后再综合，看其对系统的其它部分有什么影响。不论是分析和优化，都要求能建立系统的抽象模型，以便对它进行数学分析，这样的模型就称为数学模型。在拟定数学模型时，最好找到一个能很好地模拟实际物理系统的数学模型。

(五) 试制、试验、修改和定型

产品试制是将图纸变成实物的过程，通过试制，考核图纸设计的完整性和正确性。在试制和装配过程中，设计人员应参加。在工作中应注意试制和装配时发现的设计问题，并及时地加以解决；注意了解整机和部件的结构工艺性；参加各部件的称重，以查明各部件重量是否符合其控制重量。

试验是对一个成功设计的最后检验。试验希望弄清楚：设计是否能满足用户要求？是否可靠？与同类产品是否有竞争力？在制造和使用上是否经济？维护和修理是否方便？因此，试制的样机要进行性能试验和一定时间的工业试验。前者是检验新样机的性能指标；后者是检验样机在实际使用条件下，零部件的耐久性和可靠性。实际上产品是否满足设计要求，最后由用户来检验和评价，产品用户评价高，市场销路就广。

新设计的产品经试制和试验后，会发现一些原设计中存在的问题。因此，需要对原设计（例如总图、部件装配图和零件图，以及某些系统图和技术文件等）进行修改。将原设计中存在的问题全部解决后，最后才能对产品进行定型。

二、设计因素

（一）强度

在决定机械零件的几何形状和尺寸时，强度是机械设计的一个重要问题，因此它是一个重要的设计因素。机械强度是某材料或机械零件的特性，零件的强度与材料的选择、热处理和加工方法有关。强度设计因素是用来评价构件安全性的系数（又称安全系数）。

（二）刚度

零件在工作时所产生的弹性变形不能超过允许的限度，否则就要影响机器的工作性能。因此，设计时除了要考虑强度因素外，还必须考虑刚度因素。

（三）成本

在设计过程中，成本设计因素起着重要的作用，设计人员研究成本设计因素如同研究设计本身一样，要花费同样多的时间。降低成本的措施：首先是采用标准化零件和通用化部件；其次对成本影响最显著的是结构工艺性，良好的结构工艺性是指，在既定的生产条件下，能够方便而经济地生产出来，并便于装配；第三是加强企业管理，做好价值分析，这是降低成本的新途径。

（四）可靠性

可靠性设计因素是评价设计质量的一个重要指标。质量可靠的产品，不仅要求在产品出厂时没有任何质量问题，而且在有效使用期内，产品也不降低设计功能。要求少出事故，出现事故也易修理，并且维修费低。

必须经常考虑的其它设计因素有：加工工艺、摩擦与磨损、尺寸与形状、重量、热因素、腐蚀、噪声、润滑、操纵与维护等。通常在某一设计任务中，某几个主要设计因素满足要求后，就不再考虑其它因素了。

§ 1-3 本课程的地位、作用及与其他课程的关系

在矿山机械专业教学计划中，本课程是一门重要的专业课程。通过本课程的教学，使学生运用所学的基础课、技术基础课的知识，并提供底盘设计的基本理论和计算方法，为从事矿山机械底盘各主要零、部件设计及其试验研究，打下理论基础。

本课程的研究范围包括底盘的行驶理论、牵引性能和组成底盘各零、部件的设计方法，以及性能试验方面等内容。

本课程在学完基础课、技术基础课，以及矿山机械构造和机械制造工艺学等专业课，并完成了矿山认识实习和矿山机械厂的生产实习，在具有必要的基本理论和矿山机械的实践知识以后，来解决矿山机械底盘设计问题。同时，这门课又为学习其它专业课程创造了条件。

第二章 行驶力学

§ 2-1 轮式机械行驶力学

一、轮式机械的行驶原理

前轮驱动的装载机在平路上，作等速、低速直线行驶作业时的受力状况，如图 2-1 所示。作用于装载机的外力有重力 G ，插入阻力 F_R ，路面作用于前、后车轮的法向反力 F_{Z_1} 和 F_{Z_2} ，切向反力 F_{X_1} 和 F_{X_2} 。

原动机经传动系作用于前轮的驱动力矩 M_i ，对装载机来说是内力矩，在图中以虚线表示。在驱动力矩 M_i 的作用下，前轮在克服滚动阻力矩后，在轮缘接地处对路面施加一切向力，路面反过来对车轮作用切向反力 F_{X_1} 。路面切向反力 T_K 就是推动车轮，再通过车轮轮轴推动机械前进的力。

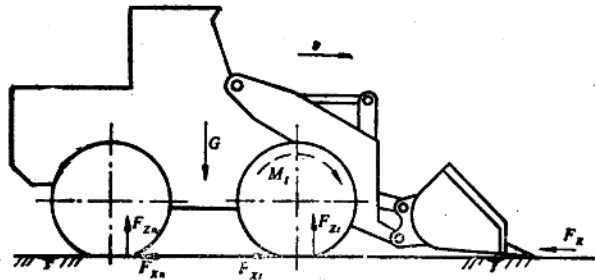


图 2-1 轮胎式机械行驶原理图

因此，轮式底盘的行驶是通过车轮与路面的相互作用来实现的。

二、车轮运动学

轮式机械的车轮分轮胎和轨轮两种：

1) 轨轮在钢轨上的运动

由于轨轮与钢轨之间的接触刚度很大，可以不考虑轨轮和钢轨的塑性变形。因此，轨轮在钢轨上的运动，可看成是刚性车轮在刚性路面上的运动。图 2-2 所示为轨轮在钢轨上的滚动情况， O 为轨轮轴线， O_1 为轨轮轮缘的接轨线， ω 为轨轮角速度； v 为轨轮轴线速度（轨轮速度）。

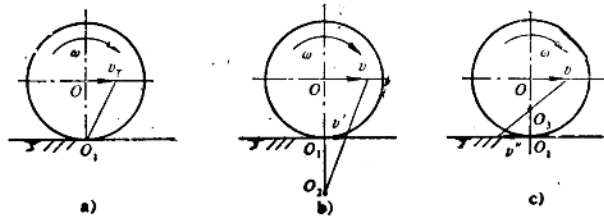


图 2-2 轨轮在钢轨上的运动

当轨轮作纯滚动时， O_1 即为轨轮运动的瞬时轴，这时的轨轮速度称为理论速度，记为 v_T ， $v_T = \omega \times \overline{OO_1}$ ，如图 2-2 a 所示。当 $v > v_T$ 时，设轨轮瞬时轴为 O_2 ，由 $v = \omega \times \overline{OO_2}$ ，知 $\overline{OO_2} > \overline{OO_1}$ ， O_2 在 O_1 之下，轨轮相对轨面向前滑动，称为轨轮滑移，如图 2-2 b 所示。这时轨面切向反力与轨轮运动方向相反，为从动轮（或制动轮）。当 $v < v_T$ 时，设轨轮瞬时轴为 O_3 ，则 $\overline{OO_3} < \overline{OO_1}$ ， O_3 在 O_1 之上，轨轮相对轨面向后滑动，称为轨轮滑转，如图 2-2 c 所示。这时轨面切向反力与轨轮运动方向相同，为驱动轮。

轨轮轴线到轨轮瞬时轴的距离，称为轨轮滚动半径，以 r 表示， $r = v/\omega$ 。显然， r 为假想半径，是取决于轨轮运动状态的参数。

2) 轮胎在路面上的运动 轮胎在路面上滚动时，轮胎和路面都会产生弹性及塑性变形。为便于分析，对轮胎支承面作如下假设：轮胎在硬路面上滚动时，因路面刚度比轮胎刚度大得多，可以不考虑路面变形，轮胎支承面视为平面，如图 2-3 所示；轮胎在软路面上滚动时，考虑到土壤弹性变形远小于塑性变形，且轮胎弹性很好，可假定土壤为完全塑性，则轮胎支承面视为一柱面，如图 2-4 所示。轮胎接地中心 O_1 到轮胎中心轴线的距离 $\overline{OO_1}$ ，称为轮胎动力半径，以 r_d 表示。

根据轮胎支承面的假设，即可将轮胎在路面上的运动，看成半径为 r_d 的刚性车轮在变形后（或不变形）刚性路面上的运动。

轮胎纯滚动， $v = v_T = \omega r_d$ ， $r = r_d$ ；当 $v > v_T$ 时， $r > r_d$ ，轮胎滑移，为从动轮（或制动轮）；当 $v < v_T$ 时， $r < r_d$ ，轮胎滑转，为驱动轮。

轮胎在软路面上滚动时，其动力半径用下式计算：

$$r_d = r_0 - \Delta b \quad (2-1)$$

式中 r_0 ——轮胎自由半径；

b ——轮胎断面宽度；

Δ ——系数。对低压胎，在松软土壤上， $\Delta = 0.08 \sim 0.10$ ；在密实土壤上， $\Delta = 0.12 \sim 0.15$ ；对高压胎， $\Delta = 0.10 \sim 0.12$ 。

轮胎在硬路面上滚动时，其动力半径用下式计算：

$$r_d = 0.0254 \left[\frac{d}{2} + b(1 - \lambda) \right] \quad (2-2)$$

式中 d ——轮辋直径， $[d]$ 为 in， $1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$ ；

b ——轮胎断面宽度 $[b]$ 为 in；

λ ——轮胎径向变形系数。对标准胎或宽断面胎， $\lambda = 0.12 \sim 0.16$ ；对超低压拱形胎， $\lambda = 0.2 \sim 0.3$ ；

r_d ——轮胎动力半径， $[r_d]$ 为 m。

三、车轮与路面的相互作用

(一) 车轮受力分析

1. 从动轮

在水平软路面上，从动轮作等速直线运动时的受力状况，如图 2-5 所示。

忽略轴承的摩擦力矩，由从动轮平衡得：

$$\Sigma X = 0, \quad F_1 = F_x$$

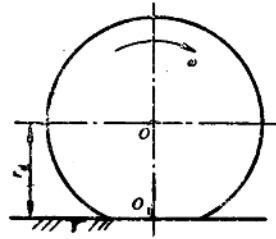


图2-3 轮胎支承面(硬路面)

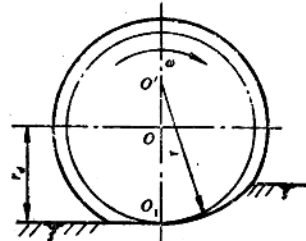


图2-4 轮胎支承面(软路面)

$$\begin{aligned}\Sigma Z &= 0, & W_n &= F_{zn} \\ \Sigma M_{(O)} &= 0, & F_{xn}r_n &= F_{zn}a_n\end{aligned}$$

由以上三式得:

$$F_1 = W_n \frac{a_n}{r_n}$$

令 $f_n = \frac{a_n}{r_n}$, 称为滚动阻力系数; $W_n f_n = F_{fn}$, 称为从动轮滚动阻力, 则

$$F_1 = F_{fn}$$

应当指出, 滚动阻力 F_{fn} 并非真正以水平阻力的方式作用于从动轮, 而是以滚动阻力矩 $F_{zn}a_n$ 的形式作用于从动轮的, 只是为了研究方便化成力的形式。今后计算时, 可取 $r_n \approx r_d$ 。

由受力分析还可看出, 从动轮滚动的驱动力矩由切向反力 F_{xn} 及水平推力 F_1 构成。显然, 切向反力的存在并具有一定数值, 是从动轮滚动的条件之一。

2. 驱动轮

在水平软路面上, 驱动轮作等速直线运动时的受力状况, 如图 2-6 所示。

不计轴承摩擦, 由驱动轮平衡得:

$$\begin{aligned}\Sigma X &= 0 & F_2 &= F_{x1} \\ \Sigma Z &= 0 & W_1 &= F_{z1} \\ \Sigma M_{(O)} &= 0 & M_1 &= F_{x1}r_d' + F_{z1}a_1\end{aligned}$$

整理后得:

$$\frac{M_1}{r_d'} = F_{x1} + F_{z1} \frac{a_1}{r_d'}$$

令 $f_1 = \frac{a_1}{r_d'}$, 称为驱动轮滚动阻力系数; $F_{f1} = W_1 f_1$,

称为驱动轮滚动阻力; $F_1 = \frac{M_1}{r_d'}$, 称为车轮驱动力,

则上式变为:

$$F_1 = F_{x1} + F_{f1} \quad \text{或} \quad F_{x1} = F_1 - F_{f1}$$

上式表明: 驱动轮在驱动力矩 M_1 的作用下, 克服滚动阻力矩 $F_{z1}a_1$ 之后, 绕轮轴转动, 因而在车轮接地处, 轮胎对路面有向后移动的趋势。在驱动力矩和垂直载荷联合作用下, 轮胎与路面相互作用, 产生了推动驱动轮前进的切向反力 F_{x1} 。上式中, 驱动力 F_1 实际上是由驱动力矩 M_1 变换得到的, 只是为了今后分析问题方便, 化成力的形式。

(二) 车轮的滚动阻力

车轮滚动阻力是由车轮滚动阻力矩引出的, 而车轮和路面(地面或轨面)的变形所造成的能量损失, 则是车轮滚动阻力矩产生的原因。

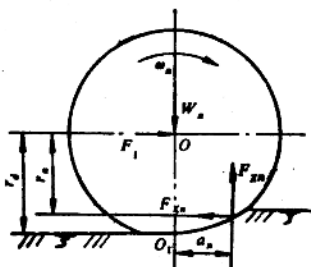


图2-5 从动轮受力简图

W_n —作用于从动轮的垂直载荷
 F_1 —通过从动轮轴作用于从动轮的水平推力
 F_{zn} —路面作用于从动轮的法向反力
 a_n — F_{zn} 到车轮轴线的距离
 F_{xn} —路面作用于从动轮的切向反力
 r_n — F_{xn} 到车轮轴线的距离

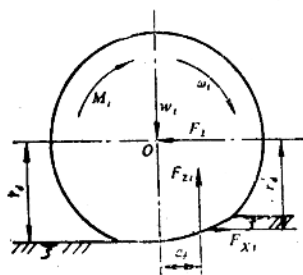


图2-6 驱动轮受力简图

W_1 —作用于驱动轮的垂直载荷
 F_2 —通过驱动轮轴作用于驱动轮的水平阻力
 M_1 —作用于驱动轮的驱动力矩
 F_{z1} —路面作用于驱动轮的法向反力
 a_1 — F_{z1} 到驱动轮轴线的距离
 F_{x1} —路面作用于驱动轮的切向反力
 r_d' — F_{x1} 到驱动轮轴线的距离

1. 滚动阻力产生的原因

(1) 路面变形：车轮滚动时，路面在车轮施加的垂直和切向载荷下会产生弹性和塑性变形，造成能量损失。当车轮在土壤上滚动时，可以观察到：地面在垂直方向产生塑性变形，形成车辙；车轮侧面与车辙摩擦，车轮把土向前推移。上述情形在图 2-5 及图 2-6 中可看出。

(2) 车轮变形造成的弹性迟滞损失。下面以轮胎在硬路面上的滚动为例，说明轮胎变形造成的能量损失是怎样产生车轮滚动阻力矩的。

轮胎在硬路面上的滚动情况如图 2-7 所示。图中，轮胎承受的垂直载荷为 W_n ，水平推力为 F_1 ，通过车轮轴线 O 的法面 1-1，将轮胎分为前、后两部分。轮胎可以看成是由很多个微段组成，车轮滚动时，轮胎上每一个微段弹性体工作状态的变化，可视为依次地进行周期性的加载和卸载。在轮胎上切取一微段 2-2'，则车轮在 W_n 及 F_1 作用下滚动一周时，微段的加载和卸载变形曲线如图 2-8 所示。图中 OA 为加载变形曲线， AE 为卸载变形曲线，两曲线间的面积即为弹性体在加载-卸载过程中的弹性迟滞能量损失。此能量系消耗于轮胎各组成部分间的摩擦及橡胶、帘布等物质分子间的摩擦，最后转化为热能散失在大气中。车轮不滚动时，路面对轮胎法向反力的分布是前后对称的，但车轮滚动时，在法面 1-1 前后对称的两点 C 、 C' 处，轮胎的变形虽然是相同的，但由于轮胎产生了弹性迟滞能量损失，两点路面反力不相同。处于轮胎被压缩前部 C 点的地面法向反力，大于处于轮胎恢复过程后部 C' 点的地面法向反力。因此，车轮滚动时，轮胎支承面上地面法向反力的分布，如图 2-9 所示。从图上可看出，轮胎支承面上地面法向反力的合力 F_{Z_2} 向前移动了一段距离 a_s ，形成滚动阻力矩 $M_f = F_{Z_2} \cdot a_s$ 。轮胎变形越大，产生的滚动阻力矩也就越大。

轨轮变形造成的能量损失也是弹性迟滞损失，因此轨轮在钢轨上滚动时，滚动阻力矩的产生机理与轮胎完全相同。

2. 影响滚动阻力的主要因素

(1) 路面性质 地面越松软，滚动阻力越大；钢轨与轨轮材料越软，表面硬度越低，滚动阻力越大。

(2) 车轮尺寸 对软路面，增大轮胎直径和宽度都能增大轮胎支承面面积，降低轮胎接地比压，从而减少车辙深度，降低滚动阻力，且增大轮胎直径比增大宽度更有效。但增大车轮直径受成本及整机稳定性的限制。

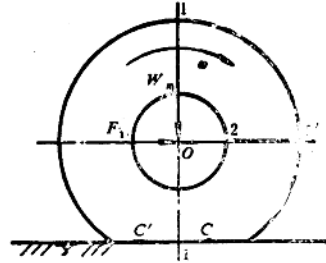


图 2-7 轮胎在硬路面上滚动

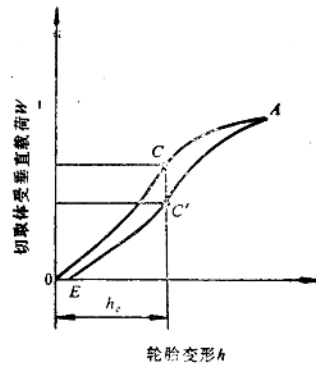


图 2-8 轮胎滚动时切取体变形曲线

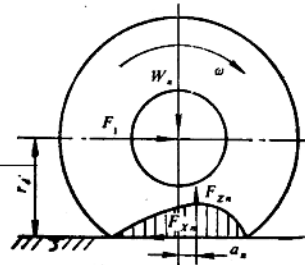


图 2-9 轮胎滚动时地面法向反力的分布

(3) 轮胎充气压力 对软路面,降低轮胎充气压力,可以增大轮胎支承面面积,降低滚动阻力。但轮胎充气压力降低到一定程度时,滚动阻力反而会随着轮胎充气压力的降低而增大,这是因为轮胎变形能量损失对滚动阻力起了主要影响的缘故。所以在一定地面条件下,必定有一个对应于最小滚动阻力的最佳轮胎充气压力。轮胎在硬路面上滚动时,滚动阻力主要由轮胎变形产生,应当提高轮胎充气压力以减少轮胎变形损失。应当指出,轮胎充气压力的降低往往会导致轮胎承载能力的下降,因此,一般在软路面上作业的轮胎式机械多采用宽基超低压轮胎,在降低轮胎充气压力的同时增大轮胎宽度,从而在保证轮胎承载能力的前提下达到降低滚动阻力的目的。

(4) 轮胎结构及材料 构成轮胎的帘线种类、橡胶的品种,以及轮胎的结构,对滚动阻力也有影响。子午线轮胎的滚动阻力比斜线轮胎小;采用强度高的粘胶帘线、合成纤维帘线或钢丝帘线,可以减少轮胎帘布层数,减薄胎体,使滚动阻力减小。例如采用钢丝帘线,可减少滚动阻力10%。

(5) 作用在车轮上的垂直载荷 作用在车轮上的垂直载荷大,车轮和路面变形就大,车轮滚动阻力也就大。

应当指出,在同样的垂直载荷作用下,驱动轮滚动阻力大于从动轮滚动阻力。有关理论分析,可参阅 Beker《地面-车辆系统导论》

3. 滚动阻力计算

综上所述,影响滚动阻力的因素很多,难于从理论上准确计算,因此,目前仍广泛采用简化公式来计算车轮滚动阻力:

$$F_f = Wf \quad (2-3)$$

式中 W ——作用于车轮的垂直载荷;

f ——滚动阻力系数。可根据路面种类、性质和表面状况从表 2-1 和表 2-2 中查取。

表2-1 车轮的滚动阻力系数和附着系数(软路面)

地面性质	相对含水量		轮胎充气压力 /MPa									
	$\frac{\omega}{\omega_{Bz}}$	$\frac{\omega}{\omega_0}$	0.1		0.2		0.3		0.4		0.5	
			f	ϕ	f	ϕ	f	ϕ	f	ϕ	f	ϕ
松	0.4	0.67	0.10	0.83	0.14	0.75	0.17	0.70	0.18	0.67	0.19	0.65
	0.6	1.00	0.11	0.82	0.15	0.72	0.18	0.66	0.19	0.63	0.20	0.61
	0.7	1.17	0.12	0.80	0.16	0.65	0.19	0.62	0.21	0.58	0.22	0.55
粘	0.8	1.33	0.12	0.77	0.18	0.61	0.21	0.53	0.23	0.47	0.24	0.44
	0.4	0.67	0.05	0.94	0.04	0.89	0.04	0.87	0.04	0.85	0.05	0.84
	0.6	1.00	0.05	0.89	0.05	0.80	0.06	0.75	0.06	0.71	0.07	0.69
土	0.7	1.17	0.06	0.84	0.06	0.70	0.07	0.63	0.08	0.58	0.09	0.53
	0.8	1.33	0.07	0.75	0.08	0.55	0.09	0.43	0.10	0.34	0.11	0.26
	0.5	0.83	0.06	0.78	0.06	0.70	0.07	0.65	0.08	0.62	0.09	0.60

注: 1. ω ——土壤含水量。

2. ω_0 ——用标准方法压实的最佳含水量(土壤压实消耗能量最少时的含水量)。

3. ω_{Bz} ——土壤塑性状态含水量的上限,土壤含水量高于 ω_{Bz} 时就呈流动状态。