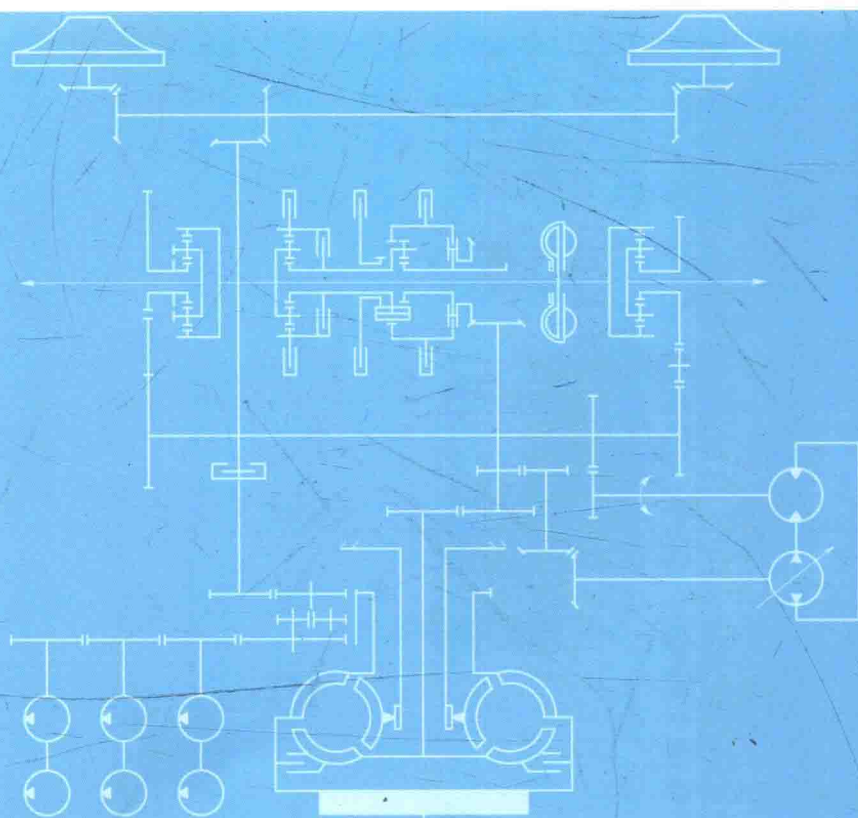


“十二五”国家重点出版物出版规划项目
坦克装甲车辆设计系列丛书

液力机械综合传动装置 ——设计理论与方法——

Design of Transmission for Heavy Tracked Vehicle: Theory and Method

毛明 周广明 邹天刚◎著



兵器工业出版社

“十二五”国家重点出版物出版规划项目
坦克装甲车辆设计系列丛书

液力机械综合传动装置 设计理论与方法

Design of Transmission for Heavy Tracked
Vehicle: Theory and Method

毛明 周广明 邹天刚 著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书系统论述、介绍了液力机械综合传动装置的概念、动力传动匹配的理论与方法、液力传动理论与设计、行星传动理论与设计、履带车辆转向理论与设计、制动系统设计理论与方法、换挡操纵理论与设计、供油与润滑系统设计和风扇液粘传动调速理论与计算,涵盖了液力机械综合传动装置总体和各分系统的设计理论与方法,是我国近20年来研究开发液力机械综合传动装置的理论与设计成果的总结。各章节均有设计计算实例。

本书可作为坦克装甲车辆总体、传动专业以及重型商用车辆、工程机械、农用机械的工程技术人员参考用书,也可以作为兵器科学与技术、地面武器机动工程和工程机械专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液力机械综合传动装置设计理论与方法 / 毛明, 周广明, 邹天刚著. — 北京: 兵器工业出版社, 2015. 12
(坦克装甲车辆设计系列丛书)
“十二五”国家重点出版物出版规划项目
ISBN 978-7-5181-0096-5

I. ①液… II. ①毛… ②周… ③邹… III. ①坦克—
液压传动装置—设计 IV. ①TJ811

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第034885号

出版发行: 兵器工业出版社
发行电话: 010-68962596, 68962591
邮 编: 100089
社 址: 北京市海淀区车道沟10号
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京圣夫亚美印刷有限公司
版 次: 2015年12月第1版第1次印刷
印 数: 1—1350

责任编辑: 林利红
封面设计: 揽胜视觉
责任校对: 郭 芳
责任印制: 王京华
开 本: 710×1000 1/16
印 张: 24.75
字 数: 450千字
定 价: 58.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

《坦克装甲车辆设计系列丛书》

编审委员会

总主编：胡金锁

总顾问：毛 明

编 委（按姓氏笔画排序）：

王钦钊 冯武斌 刘 洋 刘 勇

刘学工 杨震寰 李国强 李春明

李惠彬 邹天刚 宋海平 周广明

郑振忠 徐保荣 常天庆

丛书序言

坦克装甲车辆是陆军地面突击、占领控制、夺取战争最后胜利的核心装备，是城市作战、特种作战的骨干装备，是反恐、维和、处突、护边的主体装备，同时也是常规武器军贸的主打产品和军民融合发展的良好平台。坦克装甲车辆技术则是典型的集光、机、电于一身的高新技术，引领着动力传动、火炮弹药、光电信息、装甲防护和新材料新工艺等技术的发展。主战坦克的装备数量和质量是一个国家常规威慑力的重要标志，其技术水平也是一个国家工业水平的重要标志。

自1916年坦克从英国诞生以来，在第一、第二次世界大战中得到广泛应用和极大发展，被称为“陆战之王”，这时候的坦克往往被称为第一代坦克。“二战”之后到20世纪八九十年代，坦克再一次得到迅猛发展，由第一代发展到第三代。目前，世界各主要军事强国虽然没有研制、生产、装备第四代坦克，但在机械化战争向信息化战争转变的推动下仍在应用信息技术、自动控制技术、材料技术等大力改进其第三代坦克，坦克装甲车辆技术在以信息技术为代表的高新技术的推动下仍处于快速发展阶段。

我国的坦克装甲车辆走过了修理、仿制、仿研到自主研制、跻身世界先进水平的发展历程，特别是进入21世纪以来，我国坦克装甲车辆技术得到了快速发展。中华人民共和国成立60周年阅兵式上，99式主战坦克、03式轻型步兵战车、04式履带式步兵战车、05式两栖装甲突击车和09式8×8轮式步兵战车威武雄壮地通过天安门广场接受党和国家领导人的检阅。2015年，96A式主战坦克走出国门参加世界坦克竞赛并夺得第二名，在抗战胜利70周年阅兵式上，以99A式坦克为首的地面突击方阵更是给国人以极大振奋。

虽然信息化战争对坦克装甲车辆提出了新功能要求，现代坦克装甲车辆也大量采用了新原理、新结构、新材料、新工艺，传统的基于经验和试验的设计理论与方法也逐渐被基于知识、仿真、虚拟样机、多学科优化和台架试验的现代设计理论与方法代替，但我们至今没有看到反映这些需求与技术进步的坦克装甲车辆设计理论与方法的丛书。

我一直有个愿望，“文革”前共和国培养的第一代工程技术人员在条件极其匮乏的情况下自主研制成功第三代坦克，但他们是学习、应用、发

展苏联的坦克设计理论与方法，我们作为“文革”后共和国培养的第二代工程技术人员在老一辈的指导下自主研制出世界先进水平的坦克装甲车辆，我们应该创建具有我们自己特色的坦克装甲车辆设计理论与方法。在兵器工业出版社的积极组织下，中国北方车辆研究所、北京特种车辆研究所、装甲兵工程学院等的有关工程技术人员积极响应，在国家新闻出版广电总局的大力支持下，《坦克装甲车辆设计系列丛书》作为“十二五”国家重点出版物出版规划项目立项。这套丛书将陆续同读者见面，期望以这套丛书为基础，通过读者和广大坦克装甲车辆工程技术人员、专家、教授的不断努力，实现我们的夙愿。

毛明

前 言

传动装置是坦克装甲车辆的核心部件之一，其功能是将发动机功率传递给主动轮实现车辆在越野等复杂路况下加速、转向、制动等，其性能是坦克装甲车辆机动力的基本保证，其技术与装备水平是一个国家机械制造业的重要标志。空间狭小、重达五六十吨的坦克，越野速度要达 50km/h 以上，使得传动装置与技术成为坦克关键和难点之一。液力机械综合传动装置融变速、转向、制动与操纵等功能于一体，汇液力传动、液压传动、机械传动与自动控制等技术于一身，是现代先进坦克的典型标志，2000 年前只有德国、美国、英国、法国和日本等发达国家能够研制、生产。

我国从 59 式中型坦克直至 96 式主战坦克所采用的传动装置都是仿制、仿研俄罗斯 T55 坦克，均为固定轴式机械变速机构，配合二级行星转向机、机械制动器来分别实现车辆的直驶、转向和制动功能。我国 99 式主战坦克虽然采用了液力传动和行星传动技术，但两者仍然分立。我国是汽车产量世界第一的大国，汽车发动机能自主研发，但自动变速箱则全部从德国、美国等发达国家进口。

为摆脱我国坦克传动技术严重落后的面貌，1989 年在制订“八五”预研规划时，以中国兵器科学研究院杨楚泉研究员和北京理工大学朱经昌教授等为代表的 19 位老一辈坦克专家提出书面建议，希望把军用履带车辆传动技术列为原国防科工委“八五”规划重点，将其作为“传动专项”，拨出专门经费，集中全行业优势力量，开展系统攻关研究。1992 年初，“传动专项”得到原国防科工委批复，1998 年 3 月，坦克传动国防科技重点实验室开始运行，标志着“坦克传动技术创新团队”的诞生。2007 年 1 月，国防科工委授予团队首批“国防科技创新团队”称号，以中国北方车辆研究所毛明、周广明研究员和北京理工大学项昌乐教授为带头人。

经过 20 余年的不懈努力，团队发展了液力机械综合传动理论，突破了液力机械综合传动总体技术、多自由度行星变速技术、电液自动操纵技术、高能容液力传动技术、双流无级转向技术、液力机械联合制动技术和复杂系统供油、润滑与污染控制技术，研制形成 Ch 系列 4 个功率等级多种液力机械综合传动装置产品，分别批量装备在新一代地面武器装备中，并成为这些装备先进性的典型特征和主要技术创新点，实现了我国坦克装

甲车辆由分立式机械传动向液力机械综合传动、由手动换挡向自动换挡、由机械操纵杆有级转向向液压方向盘无级转向、由低速机械制动向高速联合制动的跨越。形成的自动换挡、液力变矩器和超高压液压泵马达技术与产品必将极大地促进我国重型商用车辆、大功率工程机械和农用机械突破“自动变速箱”和“高压液压泵马达”依赖进口的局面,推动其技术进步和产业升级。

为系统总结液力机械综合传动装置的设计理论与方法,满足坦克装甲车辆行业和重型商用车辆、工程机械和农用机械等行业工程技术人员知识更新和培养专业人员的需要,在中国北方车辆研究所、国家新闻出版广电总局和兵器工业出版社的支持下,撰写了这本《液力机械综合传动装置设计理论与方法》。

全书共九章,系统论述、介绍了液力机械综合传动装置的概念、动力传动匹配的理论与方法、液力传动理论与设计、行星传动理论与设计、履带车辆转向理论与设计、制动系统设计理论与方法、换挡操纵理论与设计、供油与润滑系统设计和风扇液粘传动调速理论与计算,涵盖了液力机械综合传动装置总体和各分系统的设计理论与方法,是我国近20年来研究开发液力机械综合传动装置的理论与设计成果的总结。各章节均有设计计算实例。

毛明研究员撰写了第1、2、7章和第5章的第1、2节,周广明研究员撰写了第3、8、9章和第5章的第3、4节,邹天刚研究员撰写了第4、6章。全书由毛明研究员起草撰写大纲、统稿和审定。

在撰写过程中得到了坦克传动国防科技重点实验室和中国北方车辆研究所传动技术部很多工程技术人员的帮助,张金乐、李慎龙、唐守生、顾宏弢、宁克焱、罗小梅、杨阳、徐鸣、潘嘉明、李吉元、杨正龙、刘翼、郭刘洋、毛飞鸿、汪浒江、马立刚、兰海、韩明、郭静、方青峰、宋振川、李慧渊、刘越、秦绪情、邢庆坤、张静、刘树成等提供了许多素材、资料,毛飞鸿做了大量的文字录入、整理工作,装甲兵工程学院的高连华教授审读了全书,提出了许多宝贵的修改意见,在此,一并表示衷心感谢。由于知识、经验和水平有限,书中难免存在不妥和错漏之处,恳请读者批评指正。

毛明

2015年12月

目 录

第1章 概论	1
1.1 液力机械综合传动装置的概念	1
1.1.1 液力机械综合传动装置	1
1.1.2 液力机械综合传动装置的优点	8
1.2 典型液力机械综合传动装置	9
1.2.1 美国 Allison 公司 X 系列	10
1.2.2 德国 RENK 公司 HSWL 系列和 ZF 公司的 LSG 系列	14
1.2.3 法国 ESM500 传动装置	23
1.3 坦克传动与液力机械综合传动装置发展趋势	27
1.3.1 液力机械综合传动仍是履带车辆的主流传动型式	27
1.3.2 轮式装甲车辆传动以 AT、AMT 为主	29
1.3.3 多种型式的电传动技术在探索研究中逐渐成熟	30
1.3.4 液压机械传动技术得到最新工程应用	31
1.3.5 准无级和无级变速器技术处于研发初期	32
1.3.6 动力、传动、辅助系统呈现出一体化设计的趋势	33
第2章 动力传动匹配的理论与方法	34
2.1 动力传动匹配的概念和原则	34
2.1.1 动力传动匹配的概念	34
2.1.2 动力传动匹配的原则	35
2.2 动力性与经济性匹配	37
2.2.1 动力性和经济性的评价指标	37
2.2.2 传动比分配	39
2.2.3 发动机与液力变矩器匹配	46
2.3 动力传动的扭振匹配	57
2.3.1 发动机激励简谐分析	58
2.3.2 扭振计算模型	64
2.3.3 模型中参数的确定	64
2.3.4 自由振动固有特性计算	68

2.3.5 强迫振动计算	71
2.3.6 扭振计算实例	73
2.4 传动系统设计载荷的确定	79
2.4.1 静强度计算载荷的确定	79
2.4.2 疲劳强度计算载荷的确定	80
第3章 液力传动理论与设计	85
3.1 概述	85
3.1.1 液力传动的概念	85
3.1.2 液力传动技术的发展趋势	86
3.1.3 液力传动典型产品	89
3.2 液力传动的基础理论	92
3.2.1 液力传动水力学基础	92
3.2.2 液力元件的叶轮和几何参数	96
3.2.3 液力传动中的损失	101
3.3 液力传动装置的设计	106
3.3.1 液力传动装置的设计流程	106
3.3.2 液力元件的设计方法	106
3.3.3 液力变矩器设计	112
3.3.4 液力偶合器设计	117
第4章 行星传动理论与设计	124
4.1 概述	124
4.1.1 行星传动的特点	124
4.1.2 行星传动技术的发展趋势	126
4.2 行星传动的基础理论	128
4.2.1 行星排基本型式	128
4.2.2 行星传动转速关系式	129
4.2.3 行星传动扭矩关系式	130
4.3 多自由度行星变速箱方案设计	132
4.3.1 基于成熟方案的拓展设计法	133
4.3.2 线图分析综合法	136
4.3.3 构件分析综合法	143
4.3.4 组合求解法	147
4.4 基于图论的行星变速机构性能分析	150
4.4.1 性能分析的图论模型	151
4.4.2 运动学分析的拓扑变换规则与建模	152

4.4.3 静力学分析的拓扑变换规则与建模	153
4.4.4 传动效率计算	155
4.4.5 性能分析的程序实现与应用实例	155
4.5 行星排扭振特性分析	160
4.5.1 简单行星排的扭振物理模型	160
4.5.2 简单行星排扭振动力学方程	161
4.6 行星排的结构设计	163
4.6.1 行星排配齿计算	163
4.6.2 行星排几何参数计算	167
4.6.3 行星排齿轮强度校核	173
4.6.4 行星轮轴承寿命计算	178
第5章 履带车辆转向理论与设计	180
5.1 概述	180
5.1.1 履带车辆转向机构的主要类型	180
5.1.2 转向机构的发展趋势	184
5.2 履带车辆的转向理论	185
5.2.1 转向运动学	186
5.2.2 转向受力分析	188
5.2.3 转向动力学模型	192
5.3 双流传动转向机构的设计计算	195
5.3.1 双流传动转向负荷特性分析	195
5.3.2 转向行驶的极限条件	198
5.3.3 转向机构传动比设计	200
5.4 液压转向系统的设计计算	204
5.4.1 概述	204
5.4.2 转向泵马达的选型	206
5.4.3 转向泵马达主要技术参数	208
5.4.4 转向泵马达摩擦副接触力学特性	210
5.4.5 转向泵马达变量伺服机构的设计	218
第6章 制动系统设计理论与方法	236
6.1 概述	236
6.1.1 重型高速履带车辆制动的基本要求	236
6.1.2 重型高速履带车辆制动技术发展趋势	236
6.1.3 液力机械联合制动的典型代表——ESM500 联合制动系统	241
6.2 履带车辆制动性能计算	244

6.2.1 履带车辆制动性能的评价参数	244
6.2.2 制动时履带的受力	245
6.2.3 车辆制动过程分析	246
6.3 机械制动器设计	249
6.3.1 干片式机械制动器摩擦副的设计	250
6.3.2 机械制动弹子加压装置的设计	258
6.4 液力减速器的匹配与设计计算	260
6.4.1 恒扭矩液力减速器的匹配与设计计算	260
6.4.2 液力减速器控制系统设计	263
第7章 换挡操纵理论与设计	264
7.1 概述	264
7.1.1 换挡操纵的几种型式	264
7.1.2 电液自动操纵系统的功能与组成	267
7.1.3 几种典型的换挡操纵系统	269
7.2 换挡规律设计及换挡逻辑控制	272
7.2.1 换挡规律的设计	273
7.2.2 换挡逻辑控制	277
7.3 换挡品质的评价与控制	281
7.3.1 换挡品质的评价指标	282
7.3.2 换挡品质的控制方法	284
7.4 行星变速机构换挡过程动力学	288
7.4.1 行星变速机构的动力学分析	289
7.4.2 行星变速机构换挡过程动力学模拟程序 KDAPT 的功能与结构	292
7.4.3 Allison - WT 系列行星变速机构 3 挡换 4 挡的换挡过程动态模拟	294
7.5 湿式摩擦离合器的热负荷计算	295
7.5.1 湿式摩擦离合器的结构与工作过程	295
7.5.2 湿式离合器热负荷计算	297
7.6 操纵元件充放油特性与液压缓冲控制阀的设计计算	305
7.6.1 操纵元件充油特性	305
7.6.2 操纵元件放油特性	306
7.6.3 几种典型液压缓冲控制阀及其调压特性	307
7.6.4 缓冲控制阀的设计计算	309
第8章 供油与润滑系统设计	312
8.1 概述	312
8.2 供油与润滑系统方案设计	314

8.2.1	液力变矩器补偿供油流量与压力	315
8.2.2	换挡操纵系统供油流量与压力	316
8.2.3	多泵供油及其联接	317
8.2.4	转向泵马达系统补油流量与压力	319
8.3	供油与润滑系统液压元件设计	322
8.3.1	油泵的设计计算	322
8.3.2	典型液压阀设计	326
8.3.3	液力机械综合传动装置油箱的设计	337
8.3.4	供油系统污染控制及油滤的设计	338
8.4	润滑系统设计与仿真	342
8.4.1	润滑系统设计	343
8.4.2	润滑系统仿真	346
第9章	风扇液粘传动调速理论与计算	353
9.1	概述	353
9.1.1	风扇传动的功能与组成	353
9.1.2	风扇传动的类型	354
9.2	液粘传动的理论与计算	356
9.2.1	液粘离合器结构原理	356
9.2.2	液粘离合器油膜传力理论	356
9.2.3	液粘离合器摩擦片受力分析	358
9.3	风扇液粘传动调速理论与设计	364
9.3.1	风扇液粘传动的调速原理与调速方式	364
9.3.2	风扇液粘传动调速控制策略设计	366
参考文献		376

第1章 概 论

1.1 液力机械综合传动装置的概念

1.1.1 液力机械综合传动装置

1. 车辆传动系统

车辆传动系统的作用是将发动机的功率传递给车轮或履带，以适应车速和路面阻力的变化。因此传动系统是协调发动机驱动力与车轮（或履带）负载的装置。由于陆上车辆发动机的扭矩（驱动力）储备系数小（对于柴油机一般不大于1.15），而路面阻力即车轮或履带上的负载变化往往大于20倍，因此车辆传动装置需要多挡，如轿车一般4~5个挡，卡车和工程机械一般7~9个挡，坦克4~7个挡，农用机械20个挡以上。负载适应范围宽是车辆传动系统与飞机、轮船传动系统最大的区别。即飞机、轮船的负载特性没有车辆的负载特性复杂、变化范围宽，因此飞机、轮船传动系统挡位很少（一般1~2个挡）。从挡位和传动比范围这个意义说，车辆的传动装置相当于几个飞机或轮船的传动装置串联后的效果。车辆驾驶员在开车时不仅要不断地改变发动机的油门，而且要适时地改变传动装置的挡位，而飞机、轮船的驾驶员一般只需改变油门。

传动系统与发动机、辅助系统（保证发动机、传动装置正常工作的系统，主要由润滑、冷却、进气、排气装置等组成）一起组成车辆的动力舱。

轮式车辆的传动系统一般包括变速器和车桥；履带式车辆的传动系统一般指综合传动装置。

轮式车辆的变速器分为：机械变速器（MT）、自动机械变速器（AMT）、自动变速器（AT）。机械变速器一般由主离合器、齿轮系、换挡同步器、供油与润滑系统、箱体等组成。图1-1所示为机械变速器。

自动机械变速器（AMT）是在MT的基础上增加主离合器、换挡同步器的操纵控制系统，以替代驾驶员踩主离合器踏板和操作换挡手柄的动

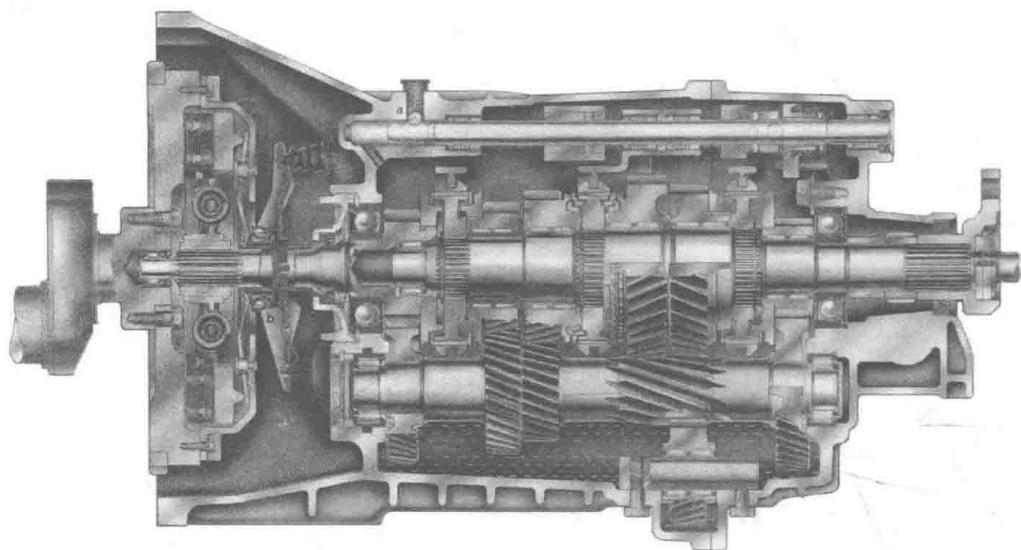
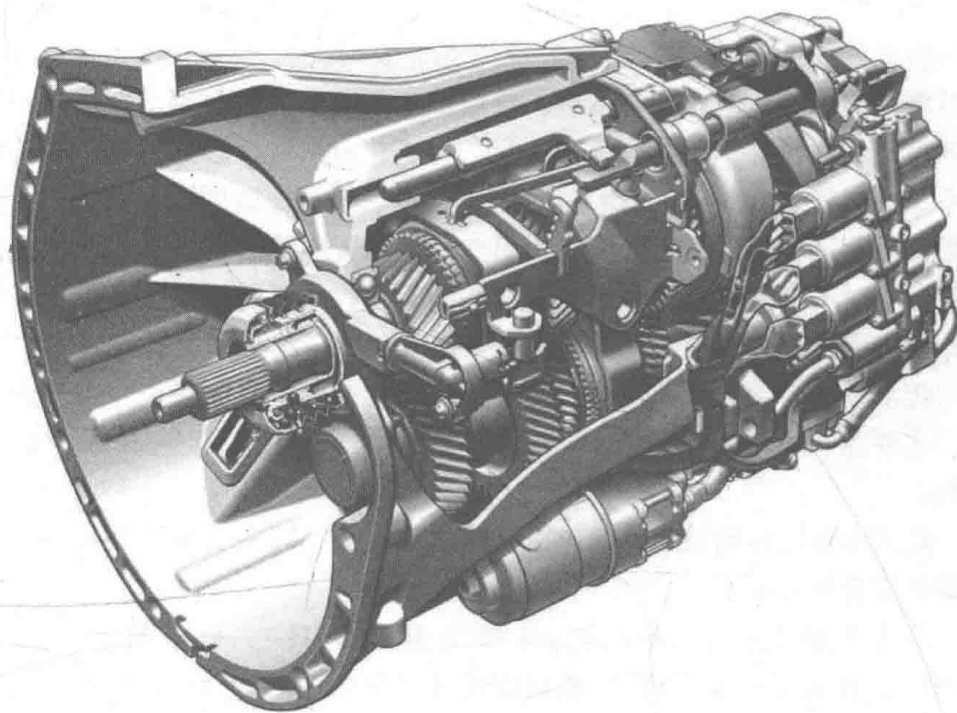


图 1-1 机械变速器 (MT)

作。图 1-2 所示为自动机械变速器。



a)

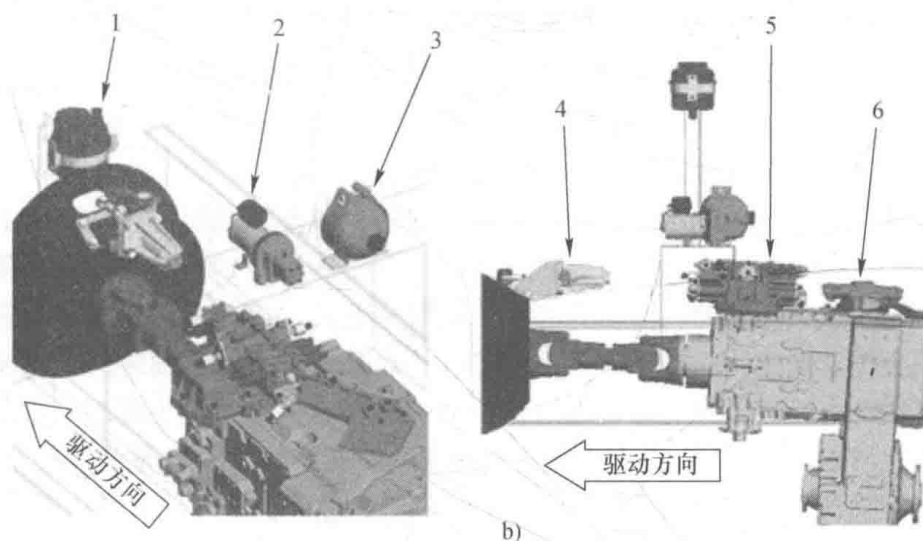


图 1-2 自动机械变速器 (AMT)

a) 剖视图; b) 组成图

1—油箱; 2—电泵; 3—蓄能器; 4—离合器执行机构;

5—主变速器执行机构; 6—副变速器执行机构

自动变速器 (AT) 主要由液力变矩器、齿轮系、换挡操纵元件、供油与润滑系统、自动换挡控制系统、箱体等组成。图 1-3 所示为液力机械自动变速器。

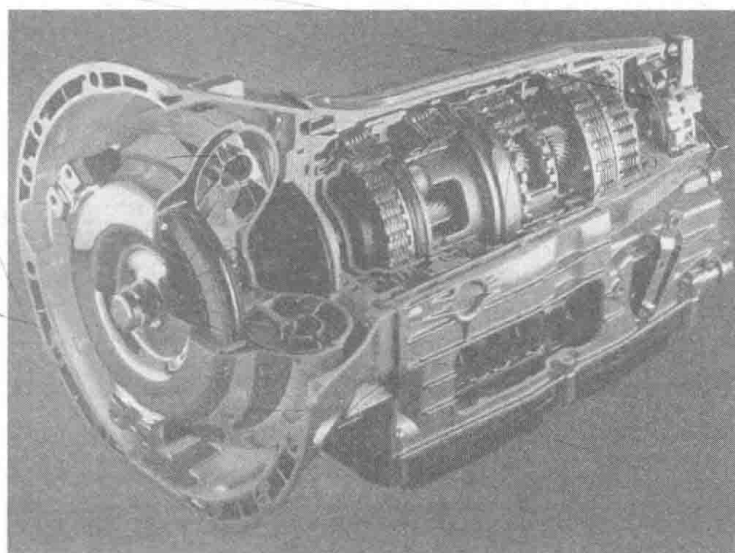


图 1-3 液力机械自动变速器 (AT) 剖视图

MT 效率最高、最便宜也最可靠, 但驾驶员换挡操纵消耗体力大, 且需要相对较为丰富的驾驶经验。AMT 就是在 MT 的基础上增加自动换挡功能, 无需驾驶员换挡, 显然 AMT 比 MT 贵 (对于轿车一般贵 1 万元左右, 对于商用车如公交车一般贵 2 万~3 万元)。AT 与 AMT 相比, 主要是采用

液力变矩器取代了主离合器,换挡操纵元件取代了换挡同步器。这样装配AT的车辆起步加速性能好,且由于液力变矩器的载荷自适应性能够提高车辆自主适应复杂道路的能力,但价钱最贵(比AMT一般贵一倍),而且传动效率低,车辆油耗高。

履带车辆转向的原理与轮式车辆不同,轮式车辆通过改变车轮的行进方向实现车辆转向,而履带车辆则通过改变两侧履带的行进速度而实现车辆转向。履带车辆的转向功能由传动系统来实现,履带车辆传动装置是一个综合传动装置,一般指液力机械综合传动装置,主要由前传动(装备于纵置式动力舱时一般是螺旋锥齿轮传动,装备于横置式动力舱时一般是直齿圆柱齿轮传动)、液力变矩器、齿轮系、转向系统(一般是液压泵马达,或液压泵马达与其机械助力耦合机构)、换挡操纵装置、供油与润滑系统、电液控制系统、箱体等组成,如图1-4所示。

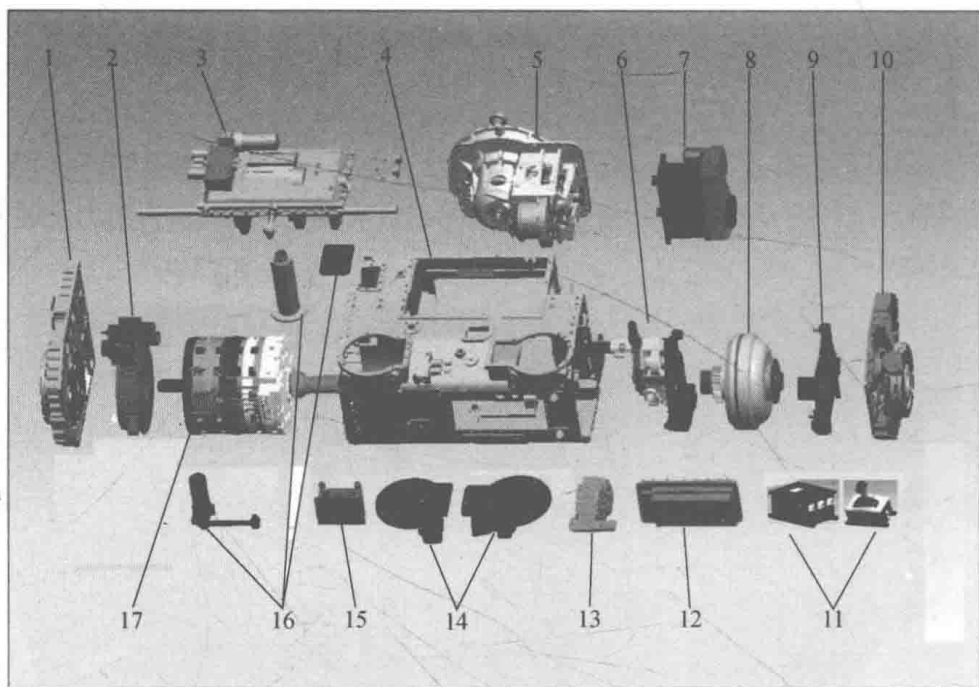


图1-4 履带车辆的综合传动装置——液力机械综合传动装置

- 1—左汇流排及侧盖;2—液力减速器及控制阀;3—转向机构总成;4—箱体部件;5—前传动总成;
6—中间支架;7—联体泵马达;8—液力变矩器;9—液力变矩器支架;10—右汇流排及侧盖;
11—换挡控制盒与换挡手柄;12—液压操纵系统;13—油泵组;14—风扇传动;
15—状态监测与故障诊断盒;16—供油系统;17—行星变速机构

液压机械传动系统是一种传统的传动系统,可以用于轮式车辆,也可以用于履带式车辆。由于其传动效率低,高压液压元件制造精度高、成本高,一直应用在传递功率小的车辆上。液压传动系统的优点是:①可连续地在正、倒行驶工况内平稳地进行无级变速,而且性能非常接近理想的输