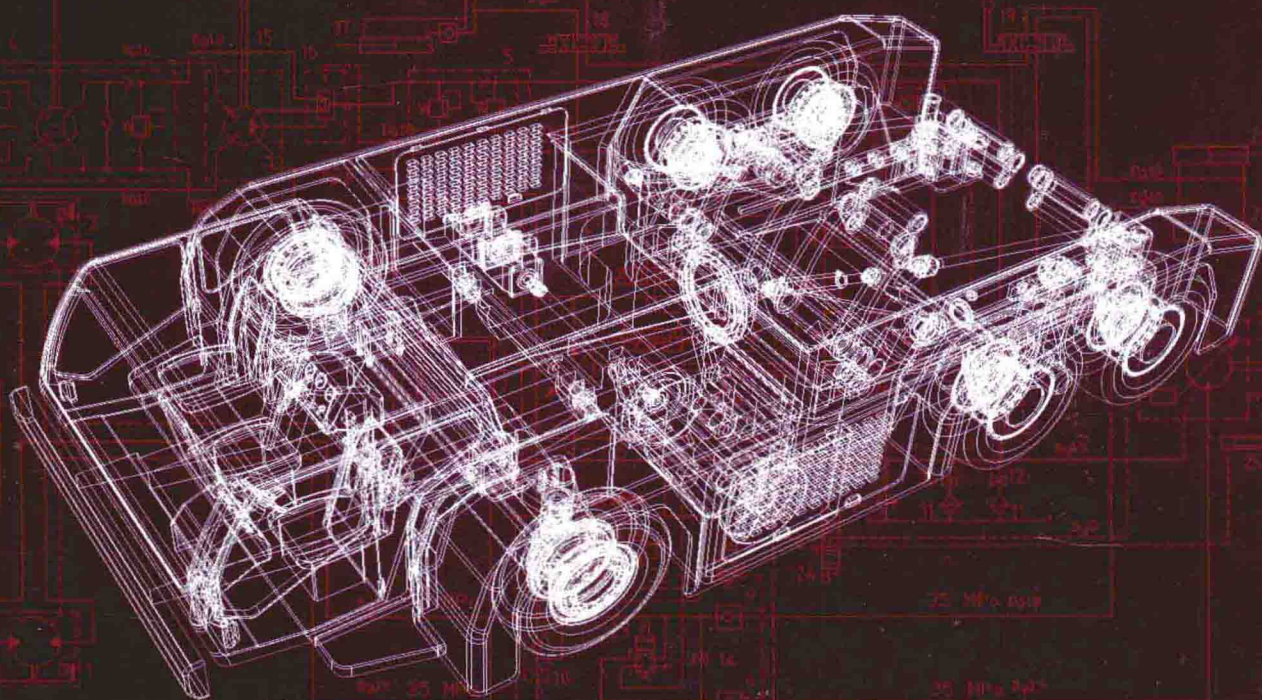




车辆与行走机械的 静液压驱动

Hydrostatic Transmissions for
Vehicle & Mobile Machinery

王意 著



化学工业出版社

车辆与行走机械的 静液压驱动

**Hydrostatic Transmissions for
Vehicle & Mobile Machinery**

王意 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了车辆与行走机械静液压驱动技术及关键元器件的历史沿革及其最新应用成果,对比了纯机械、液力、电力和静液压传动的特点及各自的适用领域,讨论了各种静液压驱动装置及与其关联的动力装置和行走装置的结构、系统配置、控制策略和工程化设计的要点,勾画了静液压驱动技术未来的发展前景。书中特别就整机动力传动系统的优化集成和多种技术的契合问题进行了较详细的分析,并提出一些独到的见解。本书立意新颖,内容翔实,汇集了丰富的实例和图片,力求系统地读者提供一些严谨的技术知识、科学的创新思维和实用的研制经验。

本书主要读者对象为机械、液压相关行业领域从事科研、设计和规划的专业人员以及技术发展史的研究人员,也可作为高等学校相关专业的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

车辆与行走机械的静液压驱动/王意著. —北京:
化学工业出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-122-19401-5

I. ①车… II. ①王… III. ①汽车-静液压传动
②机械-静液压传动 IV. ①U463.22②TH113

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第001067号

责任编辑:黄 滢
责任校对:吴 静

文字编辑:陈 喆
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京画中画印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张32 字数929千字 2014年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:198.00元

版权所有 违者必究

序

Preface

车辆与行走机械的静液压驱动



农业机械、工程机械、起重运输机械、矿山机械等由于工作负荷的不确定性，多在野外现场工作，工况和环境复杂严酷，又多采用内燃发动机为原动力，其传动系统不仅要求高效，而且更需要兼有对于工作负荷和原动机的良好适应性、可操纵性和实现多种工作功能协调性要求，近年来又提升了节能环保和系统智能化等要求。该领域始终是流体传动与控制应用的重要领域，也是流体传动与控制，尤其是静液压传动应用发展最具特色的领域之一。今天，中国已成为车辆与行走机械装备的生产和消费大国，并正处于实现由大向强跨越的关键时期。撰写出版有关工程技术专著对于促进提升车辆与行走机械装备的自主创新能力，提升产业技术水平，促进产业结构调整升级很有意义。

本书论述了行走机械对于传动装置的基本要求，分析比较了纯机械、液力、电力和静液压四种传动装置的优缺点和适用范围。通过丰富的资料和图片，展示了静液压驱动技术发展进步及其在各种非公路用车辆和作业机械中广泛应用的历史沿革，特别展示了中国科技人员在这一领域中的努力和成就。介绍了静液压驱动装置中的核心功率传输元件的发展、评述比较了各种功能部件结构功能的发展以及当前的市场格局。指出了近年来的发展趋势，如电子信息技术引入静液压驱动装置、电液容积调节和交流容积调节、材料与设计理论与制造技术进步等对静液压驱动核心器件和系统性能带来的变化。归纳描述了静液压驱动装置输出端的一些延伸耦合传动部件，如后置变速箱、轮边减速器、驱动桥和转向驱动桥等。分析了静液压闭式回路系统和开式回路系统的优缺点。比较详细地分析了几种各有特色的转速敏感变量控制系统的工作原理。特别介绍了现代静液压驱动车辆的先进电液控制技术、信息化智能技术等。介绍了车辆静液压驱动装置中的传动介质与特性。讨论了静液压驱动装置的效率问题，描述效率随工况变化的规律，提出了一些保持和提高装置效率的基本途径。比较了静液压高速和低速驱动方案的结构形态与整机的配置关系。归纳了静液压驱动装置输入端和输出端的各种调节方式的应用特点，提出了静液压驱动装置控制策略的几个基本经验准则。特别介绍了静液压驱动与机械、液力和电力传动优势互补组合的可能。点评了多个静液压机功率分流无级变速箱和静液压辅助驱动轮系统的实例。介绍了静液压驱动装置与输入原动机及输出行走装置间匹配耦合的技术知识。给出了一些可供工程应用的经验和数据。介绍了静液压驱动装置动力传输元件整机匹配所需的基本计算公式和设计理念、流程。通过多个不同类型的静液压驱动的车辆和机械的研制实例，重点介绍了中国科技人员在这一领域的工程实践经验。最后作者还提出了静液压驱动技术的一些最新发展思路，特别是通过电-液混合驱动实现节能减排的可能性。

该书是作者长期从事车辆与行走机械静液压驱动技术研究和工程实践的系统总结和归纳，具有较强的系统性、工程实践性和一定前瞻性。是一本内容比较系统，取材比较新颖，理论和工程实践结合比较紧密的工程技术专著。可作为从事该领域研究开发、设计制造、维修服务的工程技术人员，高校师生的参考书。

我与作者相识多年，他一向作风朴实、勤奋努力，求真务实。应他的热情邀请，我通读了书稿，写下以上文字，以为序。

中国科学院院士
中国工程院院士

洪永祥

这本书是为从事车辆和行走机械行业技术工作，并已具有一定的液压技术基础知识的读者群体撰写的，希望以其来弥补一些当下专门介绍行走机械液压技术的书籍比较稀缺的问题，履行一些传承知识和经验的责任。但鉴于笔者有限的认知范围和经历，本书的主要内容被界定为对于移动设备液压技术中，用于车辆与行走机械中驱动车轮、履带等旋转部件，并采用闭式回路系统的静液压驱动技术。除涉及了与静液压驱动有密切联系的动力装置和行走力学等一些有用的知识之外，其他领域均不敢过多旁骛。书中还刻意回避了笔者这一代科技人员普遍欠缺的对于现代电子控制技术的实际知识，不想用自己在这些时尚领域中仅了解的一点皮毛来“以其昏昏使人昭昭”。好在现代专业化的分工，使我们这些曾比较专门地从事“机械化”车辆驱动技术的人们能方便地从专门从事信息化技术的新一代科技人员那里获得必要的帮助和支持，所需要的只是描绘与沟通好控制的目标和接口的界面。

笔者曾有在国外工作和任教的经历。受德国同事们的严谨治学精神和他们的教材风格，法国同事们热情浪漫和富于想象力等特质文化的影响，期冀用不很枯燥的叙事方式，使读者从宏观上了解静液压驱动技术的全貌和一些实际应用经验，授人以渔；对于具体的技术细节，则取其精华，点到为止，为读者留下自己的思考和创造空间。笔者在内容的取舍和编排上也都力求有所创新。以较大的篇幅介绍了静液压驱动整机及相关元件和系统的发展历程，尤其是尽力发掘了一些中国人自己的东西，希望以史为鉴，温故知新，一反某些领域模仿、克隆成风和山寨化的不良倾向，促进创新精神的发扬光大。使读者在获得技术知识、开阔眼界和思路的同时，也能体会到一些从事创造性劳动的艰辛和快乐。构建一个创新型国家是实现中华民族伟大复兴的中国梦的一个重要内容。在本书的后记中，着重谈及了笔者关于液压技术创新问题的一些感悟，供有兴趣的读者参考和指教。

受所涉及的技术内容的宽泛性和笔者对于材料和文字驾驭能力的制约，书中的观点、叙述和文字难免存在疏漏；为了保持各章节内容和叙事逻辑的相对完整，以及从不同角度、不同层面对需要特别强调的重要观念和事物的分析介绍，前后章节之间也有一些交叉；虽经多次修改、加工和调整，仍未能做到完全如意。敬请读者见谅并指正。

在撰写本书的过程中，笔者得到了家人、同事、同行、国内外诸多学会、协会和院校企业的激励和帮助，加之化学工业出版社、《工程机械与维修》编辑部和中国机械工程学会流体传动与控制分会的鼎力支持。笔者不会忘怀黄人豪、李耀文、赵曼琳、李志勇、孙刚、唐胜生、林艺、陈欣及德国Renius教授等诸多友人的热情关心与帮助。尤其是十一届全国人民代表大会副委员长、中国科学院和中国工程院路甬祥院士在百忙之中拨冗通读全稿后点睛赐序，使笔者深受鼓舞。在此一并表示衷心的感谢。

王 昱

绪论 /001

Chapter 1 第1章 现代车辆与行走机械的传动装置 /004

- 1.1 现代车辆和行走装置传动装置用途和功能 /004
- 1.2 车辆与行走机械对于传动装置性能的基本要求 /007
- 1.3 车辆与行走机械传动装置的主要参数指标 /007
- 1.4 车辆与行走机械对于传动装置布置方式的要求 /009

Chapter 2 第2章 现代车辆与行走机械采用的四种传动技术 /010

- 2.1 四种传动装置的基本特点 /011
- 2.2 对于四种传动的总体比较和评价 /018
- 2.3 在整体式变速箱单元形态下的四种传动的比较 /022
- 2.4 对于具有“柔性”布局能力的电力传动与静液压驱动的专门比较 /028
- 2.5 对于四种传动技术优缺点的综合归纳 /034
- 2.6 适宜应用静液压驱动技术的车辆与行走机械类型 /036

Chapter 3 第3章 车辆与行走机械应用静液压驱动技术的发展历程 /038

- 3.1 拖拉机和农业机械 /039
- 3.2 起重运输机械 /058
- 3.3 工程机械 /070
- 3.4 路面施工机械 /078
- 3.5 矿山和地下作业机械 /080
- 3.6 市政工程及环卫机械 /081
- 3.7 航空地面保障车辆 /082
- 3.8 装有静液压驱动底盘的特种作业车辆 /096
- 3.9 滑移转向的轮式车辆 /099
- 3.10 坦克和装甲车辆 /100
- 3.11 静液压驱动的汽车和摩托车 /103
- 3.12 方兴未艾的油液混合动力汽车技术 /107
- 3.13 以史为鉴，温故知新 /121

Chapter 4 第4章 静液压驱动功率传输元件的分类及发展沿革 /124

- 4.1 行走机械液压元件与工业设备液压元件的主要区别 /124
- 4.2 静液压驱动装置对液压泵和液压马达的功能要求 /126
- 4.3 用于静液压驱动装置的柱塞式液压泵和液压马达的主要特点 /128
- 4.4 各种柱塞式液压泵和液压马达的共性结构 /129
- 4.5 柱塞式液压泵和液压马达的调节排量的基本原理 /131
- 4.6 用于静液压驱动装置的柱塞泵和柱塞式液压马达的基本分类 /133
- 4.7 静液压驱动装置用液压泵和液压马达的发展沿革和当前的市场格局 /135
- 4.8 不同结构类型的静液压力传输元件的综合比较 /154
- 4.9 静液压驱动功率传输元件发展模式的一些特点 /160

Chapter 5 第5章 静液压驱动功率传输元件的典型构造 /162

- 5.1 斜盘型轴向柱塞变量液压泵和液压马达 /162
- 5.2 斜轴型轴向柱塞液压泵和液压马达的典型构造 /173
- 5.3 径向柱塞式变量液压泵和高转速液压马达的典型构造 /178
- 5.4 多作用径向柱塞液压马达（内曲线马达）的典型构造 /181
- 5.5 单作用摆缸型径向柱塞马达的构造简介 /191
- 5.6 数控配流的径向柱塞式变量液压元件的构造简介 /194
- 5.7 多作用轴向柱塞马达的构造简介 /195
- 5.8 摆线齿轮马达的构造简介 /196
- 5.9 整体式静液压无级变速驱动装置的构造简介 /199
- 5.10 静液压驱动装置功率传输元件的技术发展趋势 /204

Chapter 6 第6章 静液压驱动装置输出端的延伸部件 /206

- 6.1 静液压驱动装置的成品后置减速器、变速箱和分动箱 /206
- 6.2 轮边齿轮减速器和轮边静液压驱动单元体 /210
- 6.3 静液压驱动的成品驱动桥和转向驱动桥 /215
- 6.4 链传动装置 /224
- 6.5 摩擦轮传动装置 /225

Chapter 7 第7章 静液压驱动装置的基本液压回路构成 /227

- 7.1 传输功率流的开式回路和闭式回路的比较 /227
- 7.2 闭式回路中的补油问题 /229
- 7.3 静液压驱动装置传动比的调节 /231
- 7.4 二次调节液压驱动系统简介 /232

Chapter 8 第8章 静液压驱动装置的控制系统、辅助系统和外设元器件 /236

- 8.1 变量液压泵的变量控制系统 /236
- 8.2 变量液压马达的变量控制系统 /242
- 8.3 液压泵和液压马达的联动变量 /243

- 8.4 变量操控装置 /244
- 8.5 静液压驱动装置的过载和故障保护系统 /245
- 8.6 静液压驱动装置的辅助保障系统 /247
- 8.7 主回路系统中的切换阀 /252
- 8.8 检测接口 /252

Chapter 9 第9章 静液压驱动装置的传输介质——液压油 /253

- 9.1 对于液压工作介质的基本要求 /253
- 9.2 液压介质的种类和各自的特点 /255
- 9.3 常用静液压驱动装置中液压油的温度与运动黏度 /256
- 9.4 静液压驱动装置用液压油、发动机润滑油和齿轮传动油的通用性问题 /258

Chapter 10 第10章 静液压驱动装置的输出特性及效率走向 /259

- 10.1 静液压驱动装置的输出特性和输出包线 /259
- 10.2 静液压驱动装置元件和系统效率走向的基本规律 /261
- 10.3 保持和提高静液压驱动装置实时总效率的基本原则 /266

Chapter 11 第11章 静液压驱动装置的结构形态及其在整机上的配置方案 /267

- 11.1 静液压驱动装置的基本结构形态 /267
- 11.2 静液压驱动装置的机械传动链的配置方案 /269

Chapter 12 第12章 静液压驱动装置的调节方式和基本控制策略 /272

- 12.1 静液压驱动装置的基本调节方式——输入端调节 /272
- 12.2 静液压驱动装置性能的优化与功能的扩展——输出端调节 /274
- 12.3 静液压驱动车辆与行走机械的制动控制 /287
- 12.4 静液压驱动装置的基本控制系统和控制策略 /290

Chapter 13 第13章 静液压驱动与机械、液力和电力传动的契合 /295

- 13.1 静液压驱动与机械传动的契合——静液压机械功率分流传动 /295
- 13.2 全程式和分段式静液压机械功率分流传动装置 /307
- 13.3 静液压机械功率分流无级变速箱的一些实例 /309
- 13.4 静液压驱动与液力传动的契合 /337
- 13.5 静液压驱动与电传动的契合 /339
- 13.6 多种传动系统的契合—静液压同步辅助驱动装置 /341

Chapter 14 第14章 油液混合动力技术中的静液压驱动系统 /344

- 14.1 油液混合动力系统节能的机理 /344
- 14.2 并联、串联和混联型油液混合动力系统的共性问题 /345

- 14.3 动力传动链的配置 /354
- 14.4 油液混合动力系统的基本控制策略和操控装置的设置 /363
- 14.5 油液与油电混合动力系统的比较 /365

Chapter 15 第15章 静液压驱动装置与柴油机的匹配和连接 /367

- 15.1 静液压驱动装置与柴油机的匹配要点 /367
- 15.2 静液压驱动装置的变量泵与柴油机的连接方式 /372

Chapter 16 第16章 车辆的行走装置及其与静液压驱动装置关联的部件 /375

- 16.1 车辆行驶力学的基本概念 /376
- 16.2 轮式车辆的行走装置 /385
- 16.3 履带式行走装置 /396
- 16.4 半履带式行走装置和轮式车辆改装用履带行走装置 /399
- 16.5 静液压驱动与履带式和轮式车辆的滑移转向技术的关系 /400

Chapter 17 第17章 静液压驱动装置的整机匹配计算的基本公式和流程 /408

- 17.1 静液压驱动装置的基本匹配计算 /408
- 17.2 静液压驱动装置元件选型的基本计算流程 /412

Chapter 18 第18章 几种装有静液压驱动装置的车辆和机械的概况和研制实例 /417

- 18.1 静液压驱动农用轮式拖拉机的现状 /417
- 18.2 自走式联合收割机的静液压驱动 /421
- 18.3 对于几种静液压驱动叉车的评介和参数测算 /426
- 18.4 轮式装载机的静液压驱动装置及其系统 /449
- 18.5 现代振动压路机的静液压驱动装置 /455
- 18.6 飞机牵引车的静液压驱动及其系统 /460

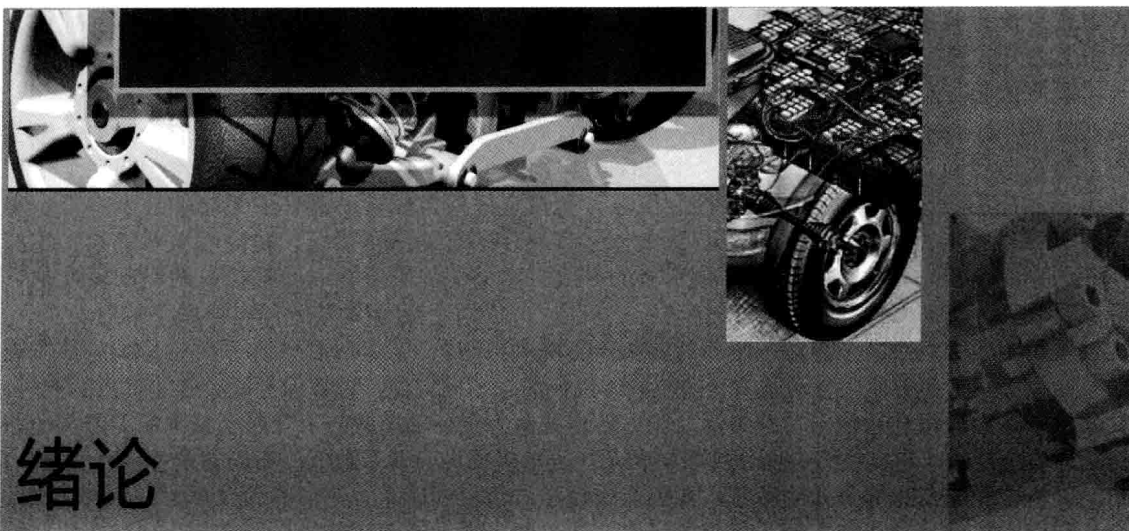
Chapter 19 第19章 结语——站在大有作为的新的发展机遇期的门槛上 /477

- 19.1 三项重大突破促使静液压驱动技术走向强势 /477
- 19.2 静液压驱动技术在节能减排方面的新探索 /478
- 19.3 迎接静液压驱动技术新的发展机遇期 /484

后记 有关液压行业发展问题的一些感悟 /485

参考文献 /489

专业术语索引 /496



液压技术是一门相当古老的学科，现在一般分为工业用液压技术（固定设备用，industry hydraulic）和移动设备液压技术或称行走液压技术（mobile hydraulic）两大类，本书论及的静液压驱动是行走液压技术中的一个重要分支，即国外通常称为“hydrostatic transmission”，简称HST，或“hydrostatic drive”，国内译为“静液压传动”或“静液压驱动”的相关技术。后者的“驱动”一词在于强调它作为以液压马达为执行元件输出的方式连续传输功率较大的旋转动力、并主要用于驱动车辆和其他地面行走机械的行走装置的特殊属性，以区别于常见的以往复作用的液压缸为执行元件的液压传动装置。本书也将采用“驱动”这样的称谓。静液压驱动与行走机械上其他液压传动装置的区别还在于前者主要采用的是闭式回路系统而后者则多为开式回路系统。当然这两者之间的界线实际上是比较模糊的，一些新技术、新概念的引进使它们有了更多的交集和契合。尤其是不能简单地用功率大小对它们的适用性进行区分。事实上在行走机械中既有功率很大的采用开式系统的液压传动装置，如巨型的挖掘机；也有功率很小的采用闭式系统的机械，如园艺割草机。它们在布局灵活性方面的共性要多于在调节特性方面的差异。本书主要针对闭式回路系统进行分析，但在介绍以液压马达为执行元件的应用时又不排除原本是开式回路的一些实例。至于一般称谓的液压控制（hydraulic control），则多为泛指利用液压阀组和网络传输信号流以及使用小功率执行器完成指定动作的技术。液压驱动与液压控制两者的关系约略与电力技术中的“强电”与“弱电”相当。

本书的主题是车辆与行走机械的静液压驱动技术。在“液压”一词前面冠以“静”字，在开始时其实并非为了在液压技术中独树一帜，而仅仅是为了与更为广义的流体传动领域中的那个原本曾经译称“动液传动”（“hydrodynamic transmission”）相对应。但国内现在都把后一个术语改称为“液力传动”了。没有了“动液”的对照，“静液传动”就只是液压技术中采用闭式回路系统的一个特类的名称，静液压系统中的流体介质并不“静”。实际上，就物理概念来说，用“静液”和“动液”来表征这两种分别以势能和动能转化为主的流体动力传动方式似乎要更为贴切一些。不过反正在技术领域中，许多即使是十分专业的名词术语也并不都是十分严谨和科学的，而更多的是历史沿革和约定俗成的习惯使然，例如像“汽车”和“火车”之类的称谓。在我国，有一段时间人们对于车辆传动中的液压抑或液力传动是有不少混淆的，像今天统称为采用“液力传动”的自动挡汽车和工程机械，当时也常被人们冠以“液压传动”以作为卖点，而实际上那时真正为液压传动的行走装置完全是凤毛麟角。今天液压传动的车辆和机器多起来了，很少有人把带液力自动变速箱的汽车再叫成“液压”传动的了，而“静液压驱动”的术语也就

成为置身于目前各种机动车辆所采用的机械、液力、电力和液压四大传动技术中，为了有别于采用普通开式液压传动和控制系统而所特指的一类液压传动装置和技术。

顺便谈起，车辆和行走机械液压技术中还有另外一个带有英文定语“hydrostatic”的东西，这就是“hydrostatic steering”，不过国人很少把它称为“静液压转向”，而是赋予它一个更为形象的“全液压转向”的名称。这里的“全”字贴切地表征了这种在方向盘和转向轮之间完全依靠液压元器件和液压介质传递动力和控制信息、而没有任何机械传动部件的系统的技术特点。实用的车辆与行走机械中采用的液压装置大体可分为行走驱动液压系统、转向液压系统和工作部件液压系统，但它们之间并没有十分严格的界线。例如，静液压驱动的拖拉机的驱动轮就是它最主要的“工作部件”，而履带式车辆与行走机械的静液压行走驱动装置同时兼顾了转向功能。

采用闭式油路系统是静液压驱动装置的核心技术特征之一。以闭式油路系统构成的静液压驱动装置在保留了各种液压传动所共有的控制方式灵活、布局方便、过载保护能力强的优点的同时，又具备了在由液压马达输出转速矢量及输出转矩矢量为坐标轴组成的所有四个象限中无级调速和连续运转的能力。它在许多方面比纯机械传动（发动机平均负荷系数低，布局方式受限制）、液力传动（特性匹配及布局方式受限制，变矩范围较小，动力制动能力差，不适合要求速度稳定的场合）和电力传动（功率密度低、目前效费比较差）都更适合对调速性能要求高、传动链布局较特殊的中低速行走机械使用（图0-1）。例如，已有大量事实证明，一台带有良好的静液压驱动装置的叉车或装载机，可以在装用较小功率发动机的条件下，获得较之纯机械传动和液力传动的机型高得多的生产率和低得多的比油耗，而操作人员的劳动强度却大为降低。但也由于静液压驱动装置相对于纯机械传动的稳态效率较低和目前成本较高（一般亦比液力传动昂贵），所用元器件的高性能和可达到的功率级别尚不如液力和电力传动等原因，使它在小轿车、普通卡车等最为量大面广的公路型车辆领域还只有很少的成功应用的实例；在大功率高速特种车辆与行走机械上的应用成果也还不多。不过这种情况正在发生变化。人们正通过多种传动技术的契合，构成功率分流传动系统、二次调节液压驱动系统、油液和电液混合动力系统，加之在行走液压中移植源自大功率风力发电机恒频传动系统的数字控制配流的新型液压功率传输元件等，这一系列涉及能量的转化、控制、储存和再生方面的创新技术概念，为静液压驱动技术注入了新的活力，并将促使它的应用向更大的深度和广度发展。在最早应用静液压驱动技术的农用拖拉机领域和技术经济门槛很高的公路型车辆领域就都已经出现了这样的发展势头。采用闭式回路只是手段而并非目的，当诸

如二次调节等一些新的液压系统也具备了类似于闭式回路系统的转速-转矩四象限运行的输出特性时，从应用的角度看，它们同样可以归属于广义的静液压驱动技术之列。

静液压驱动技术中除了人们所预期和已经被广泛利用的基本运动学和动力学关系以外，还存在着由于高压液体介质在传输过程中不可避免的泄漏、黏滞、压缩以及相关的机械构件的摩擦、变形等引起的各种损耗，这些损耗不仅造成了传输功率的损失，而且也使得它们的许多运动行为与理想的关系有所偏离，例如输出转矩的下降、输出转速的滑差以及调节特性的非线性退让等。但在相关的机构原理分析中，为了简化叙述，突出主线，人们常常暂时忽略这些相对次要的因素，这也是本书所采用的叙事原则。本书更强调工程化的务实内容。例如在一般性地谈及液压泵的输出流量与其排量和输入转速之

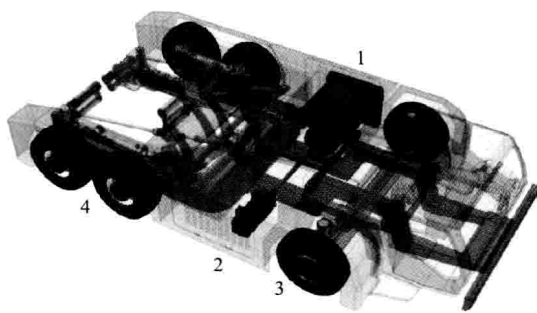


图0-1 一种静液压驱动的大型飞机牵引车的动力传动装置的布局

1—发动机；2—变量液压泵；3—前轮驱动液压马达；4—由液压马达和行星齿轮减速器构成的后轮驱动单元体组合

静液压驱动技术的魅力在于，它具有在功能调节、结构布局以及与其他传动及控制技术的契合和包容等方面的诸多优点。这使得它在对于性能和形态都有特殊要求的一些车辆与行走机械中成为动力装置和行走装置之间十分称职和便捷的“二传手”

间的基本关系时，只采用简单明了的“流量等于转速和实时排量的乘积”的表述，而没有为了追求形式上的严谨而继续细抠在上述乘积的基础上还要扣除的百分之一、二、三。只是在进行工程问题的量化计算，以及需要特别强调这些因素对于元件和系统的实际效能和调节品质的影响和趋向等时候，才对由于这些损耗的存在所引起的性能的偏离等细节加以分析，并主要体现为在传动装置的工程化详细设计计算中引入各种效率的量值。而这些量值都是与制造品质相关并随工况变化的，很多情况下需要由实物进行测定。液压技术在很大程度上是一门实验的科学。

基于同样的理由，在不至于引发歧义的前提下，本书没有对于“转矩”和“扭矩”、“质量”和“重量”以及使用“百公里油耗”而不是“百千米油耗”等术语的习惯用法的恰当与否进行更多的深究。行文中也常常用“液压泵输出压力油”这样的习用语言来描述严格说来是因负荷的加载才引起液压介质压力升高的机理，还约定俗成地以“压力”的术语代替了物理学中更为严谨的“压强”概念。如此等等，敬请读者理解和关照。

本书提倡理性和辩证思维。探讨技术事物必然要涉及多种方案、多种元素的选择问题。人们希望得到优化选择的结果，但优化永远是有条件和相对的。在不同的发展时期、不同的研究对象和不同的国情地域，优化的目标函数不会完全一样，优化的边界条件也各不相同，有时还必须考虑尊重和规避他人已注册的专利和其他知识产权的问题。技术研究不是商品广告，不应靠“代差”之类的云山雾罩式的忽悠去吓唬人，而是要脚踏实地进行具体分析。静液压驱动装置是一个系统的整合，和许多高新技术的产品一样，把各种新锐尖端的元器件简单堆砌在一起并不一定能得到最佳的结果；即使所有性能都占优，最后还难免会有一条成本过高的弱项。优秀的系统集成可以通过扬长避短来优化整合配置手头可能获得的元件，用简单经济的手段获得相对良好的总体结果。技术事物往往有螺旋式发展的历史和规律，今天的某种优势在新的边界条件下可能不再先进，某些先前不被看好的东西由于某个瓶颈的突破或某种新需求的出现可能一夜走红，这样的事例在人类技术发展史上已屡见不鲜。世间任何事物都有自身正面的优点和负面的缺点，存在着各自最能扬长避短的空间。液压技术当然也不会例外。在历史上，在各种应用领域中，液压技术压倒其他技术和其他技术压倒液压技术的实例都很多，甚至还有诸如在航空母舰上以古老“落后”的蒸汽装置取代比较新锐的液压技术用于舰载机弹射器的历史。然而这些都不是简单意义上的“换代”，而是在整个人类科学技术发展史中螺旋式上升过程中不同边界条件下的此消彼长的特定节点。有鉴于此，本书中不仅专门比较了在现代车辆与行走机械中应用的纯机械、液力、电力和静液压驱动四种传动形式的特点和它们的优势应用领域，也着重介绍了静液压驱动和其他传动技术通过优势互补、互相契合形成的新的传动系统的发展趋势，尤其是当今方兴未艾、对于汽车等节能技术具有重大现实意义的油液混合动力技术的一些情况，并涉及到一些传动机与原动机和工作机之间的整合技术，以及有关车辆和地面力学的知识。

作为一本以研讨系统整合和集成的实践经验为主的技术书籍，本书在介绍共性的经验的同时，也对现有的商品元器件的评介和推荐，特别是对于一些核心元器件的构造原理和不同的配置方案进行了比较详细的叙述、对比和分析。目的是希望读者能对于这些元器件不仅知其然，而且还能知其所以然；由此所获得的不仅仅是简单的模仿，而是举一反三的认知延伸、由此及彼的选择技巧和严谨理性的思维方式。书中还尽量给出了一些重要制造厂商和典型产品型号的原文名称，以便于读者能利用高效的搜索引擎在互联网上找到相关网站并获得比较详细的最新技术资料。

第1章 现代车辆与行走机械的传动装置

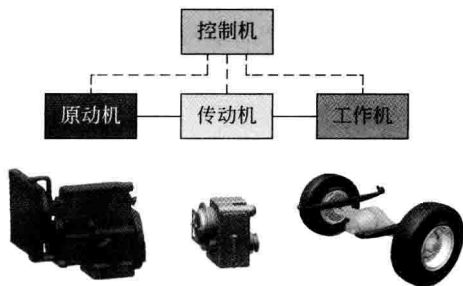
1.1 现代车辆和行走装置传动装置用途和功能

按照马克思主义的经典理论，包括行走机械在内的各种机器系统都是由原动机、传动机和工作机三个基本部分构成的（图1-1）。今天人们又在讨论体现了信息时代特征的第四个基本部分“控制机”。对于机动车辆和自走式机械来说，车轮或履带之类的行走装置就是它们重要的“工作机”之一。

在现代车辆与行走机械的原动机方面，人力、畜力、太阳能和风力等自然形态的能源装置所占比重很小，最古老的蒸汽机等外燃机除了在欠发达地区的铁路线上和老迈的压路机中一息尚存，也已基本退出了历史舞台，当然还存在着在新型常规军用潜艇中采用的“斯特林发动机”这样的不依靠空气运转的外燃机系统的特例。近年来，以化学电源为能源的电动车辆虽然有了令人瞩目的发展，以压缩空气为二次能源的“气动车”也初见端倪，但现代车辆和各种具有自行移动能力的行走机械的动力源主要仍然是以汽油、柴油或可燃气为燃料的活塞式内燃发动机和少量的燃气轮机，同时以蓄电池等二次能源供能的纯电动车辆和内燃机与电动机两者结合的油电混合动力车辆也在日益增多。近期出现的一个研发热点还在于内燃机与液压传动及蓄能装置相契合的油液混合动力技术领域。较之目前在车辆与行走机械领域已经开始商业化的油电混合动力技术，油液混合动力技术已经展现出在许多应用条件下具有更大的节能优势。

一百多年前，以高转速高效率的内燃机取代蒸汽机驱动行走装置曾是车辆技术的革命性的

巨大进步，无论在能量转化效率、结构体积和功率密度方面，内燃机都比蒸汽机要优越得多，并因之极大地促进了车辆的轻量化和高速化发展进程。然而有得必有失。往复蒸汽机的一个重要的优点是其简单皮实的结构和宽阔的调速范围。人们可以注意到：古老的蒸汽机车只需用车头下部两个交替工作的汽缸作为原动机和比较简单的曲柄连杆机构作为传动机即可直接驱动车轮旋转，通过同样是相当简单的蒸汽阀门和滑阀联动机构的调节就能自行启动，实现速度从零到每小时上百千米的无级调节和前进倒车之间的切换（图1-2）。往复式蒸汽机在很低的



转速下能产生巨大的转矩，而且不存在超负荷“熄火”的问题。而现代汽油机和柴油机等内燃机在额定功率下运转时，当负荷增加后，其输出转矩所能达到的增加值相当有限，并有最低转速的限制，即使是空载也无法在很低的转速下运转，而且多数机型都不能反转。它们还需要包括人力在内的其他动力装置来启动。所以单用内燃机是无法像蒸汽机那样直接来驱动车辆的。与这种情况相类似的是，在电动车辆中以前曾经广泛采用过的带电刷的串励式直流牵引电动机有很适合车辆应用的转速-转矩特性，结构和控制也比较简单。但因功率密度较差、能耗较高、维修工作量大和存在电磁干扰风险等问题，它们已日趋被淘汰。然而新一代车辆电力驱动技术所采用的许多新型电机在提高了效率和功率密度的同时，却不再具有如此理想的牵引特性和过载能力。因此，作为匹配车辆与行走机械原动机和工作机的特性差异的“二传手”，各种传动机和控制机的存在也就十分必要了。

然而，除了上述要解决特性匹配的要求之外，在车辆与行走机械的原动机与工作机（行走机构）之间设置传动机，特别是传动比可以改变的传动装置（变速箱），还有一个系统资源优化配置的作用。这体现在以下几个方面。

（1）体积和质量方面的优化

车辆与行走机械这样的移动设备对轻量化的要求十分迫切，特别注重前面已提及的“功率密度”的提高。功率密度是动力或传动装置的功率容量与其结构质量的比值。生活中也存在某些几乎无需传输功率的机构，一个极端的事例就是普通的指针式钟表，它们的功能仅是显示某些特定部件（如指针）的运动和位置，只需要克服指针自身的重力和传动轴系的摩擦力，可以认为是几乎没有外载荷的纯粹“运动学”工作机，因之可以制作得十分轻小。而包括需要展示某些玩偶、花鸟等的动作的特殊钟表在内的其他大多数设备和机械，它们的工作机在运动的同时却都还要承担外部施加的力和力矩（转矩）的负荷，并以所具有的运动的速度或角速度（转速）与力或转矩的乘积表征需要由其传输的功率值。这就不仅需要它们的动作符合某种运动学规律，还进一步对于相关机构的强度和摩擦性能也提出了要求。最为理想的情况是动力源传动装置的输出转矩和输出转速之间具有接近于所谓“恒功率”的双曲线特性关系。即使车辆行走装置的驱动系统不仅在启动、加速和低速运转时应该能够输出尽可能大的力或转矩，以克服各种部件之间较大的静摩擦和加速惯性力，而且在作业中遇到负荷突然增加时又需要能以降低速度来换取更大的推进力。然而，虽然各种动力机组的功率容量可以做到接近恒定，其输出轴所需要的抗扭强度和所具有的转动惯量却会随转速和转矩而变化。在恒功率条件下，低转速时对应的大的输出转矩要求机组装用更结实、更粗壮的输出部件，但这同时意味着部件结构质量和转动惯量的增加。这导致同一套输出部件在高转速下的抗扭强度过剩，而惯性力却会急剧增大。要求一台内燃发动机既有低转速下输出大转矩所需的较高的平均汽缸压力和相应的活塞、连杆和曲轴等部件的强度，又有适应提高功率密度所需的高转速运转时的稳定燃烧性能和精确动平衡的小惯量运动部件，是一件十分困难和昂贵的任务。

经验表明，当使用单一对象或单一技术难以全面满足互相矛盾的一些性能要求时，改为利用“分工论”的原则，依靠增加某些中间环节的手段往往是解决匹配问题的更好方法。按照这一原则，人们将对于零部件较多、机构较为复杂的动力机的功能的要求，简化为仅在于转速较高、但转速变化范围不大的有利的工况下高效率地输出功率，而把与工作机（行走机构）所要求的宽广的速度范围内的相差悬殊的转矩匹配转由依靠专设的传动机来完成，就是这样的一种

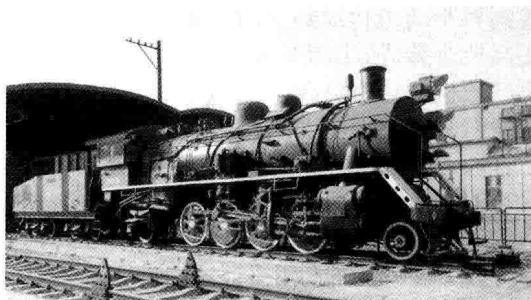


图1-2 陈列中的退役国产蒸汽机车

蒸汽机车的动力汽缸、传动连杆、控制阀和由其驱动的车轮组一目了然，机构原理和柱塞式液压马达基本相通。但图中同时也可清楚地看出其效率低下的供能锅炉和汽缸装置的规模之雄伟与笨重

提高整个动力传动装置的功率密度和调节品质的有效措施。由于无论对于动力机还是传动机，提高转速都是增加功率密度最直接的手段，因此现代车用内燃机的转速都提高到2000r/min以上，燃气轮机的转速更高达8000~15000r/min，有效地降低了在同等功率下所需的输出转矩和与之关联的零部件的尺寸和结构质量。传动机的结构和能量传输的方式较之动力机相对简单，其输出部件因之能以较轻、较小但却更为结实的结构来承担输出为工作机所需的较大的转矩。有了高速轻巧的原动机和具有较宽的可调节速比的传动机这样的“专业分工”，就无需再使用蒸汽机那样庞大笨重的原动机来直接驱动车轮，整机的动力和传动系统的总体的功率密度因之得以显著提高。

（2）整机能量利用高效区的扩展和优化

受到各种自然规律的制约，包括人力在内的任何一种原动机的能量转化和功率传输效率都与实时的负荷条件有关，并且都仅在某一限定的工况范围内才有较高的效率，这一能量损失相对较小的运转范围称为高效区。每一台传动机本身亦有特定的高效区。为了使整机对于能量的利用程度达到最大化，重要的不仅是需要提高单个环节的效率值和扩宽它的高效区的范围，而且也要使各个环节的高效区都尽可能重叠于所需要的工况区。现代车辆与行走机械装用的内燃机的高效区对应的转速范围一般在每分钟一千到几千转左右，而它们的驱动轮所要求的转速却可能在零到每分钟数百至数千转之间变化，比内燃机的可用转速范围要大得多。各种原动机和传动机各自的高效区范围和其间的最高效率峰值都有随工况变化的现象，工作机也同样存在工作效率随转速变化的特性。车辆和工作机的原动机本身的转速和转矩的调节能力均相当有限，人们无法改变在各种路面条件和作业状态下驱动轮所需推进力与其转速之间的关系，也难以使内燃机之类的原动机具有和行走装置等同的可用转速范围和所需的转矩。要使整车的高效区足以覆盖常用的工况范围，很大程度上要依靠对于原动机和工作机两者之间的传动机的传动比进行的实时调节。

车辆与行走机械的动力传动系统的最高总效率并不是每个环节各自最高效率的简单乘积，而是同一瞬间各自实时效率的乘积。对于整机的性能来说，更有实际意义的是实时的总效率的高低和走向趋势。此处需要区分系统和构成系统元件的“稳态最高效率”和“实时平均总效率”这两个概念。稳态最高效率是指系统或构成元件本身在试验台上于最有利的稳定工况条件下测出的效率峰值，从单独的原动机或传动机的样本上常常可以查到或推算出它们的稳态最高效率值。实时平均总效率表征的则是在一定的运行时间段内，一套装置输出的总有效功和总的输入能量之比，它主要用于评估由原动机和传动机乃至工作机所构成的全套系统的经济性，不仅受系统中各环节的自身的稳态最高效率的影响，而且与各环节之间的匹配水平以及所遇到的工况中载荷谱的变化关系密切。现在汽车越来越普及，人们所关心的表征汽车经济性的百公里（千米）油耗值正是这样的—个综合性指标。众所周知，在不同的行驶工况条件下，同一辆汽车的每百公里的油耗会有很大的差异，而根据某一型汽车在使用中可能出现的工况概率来优化其动力、传动和行走系统的相关参数的匹配来达到最佳的效益，则是汽车设计者的重要专业技能之一。

现代技术在原动机、传动机和工作机基础上进一步延伸出来的“控制机”的重要功能之一，正是要实现原动机、传动机和工作机高效区之间的优化匹配。理想的控制机能够根据原动机和传动机的效率特性以不同的目标函数（如最高生产率、最低能耗、最长运转寿命等）把它们的实时工作点调节到对应的最佳值。现代技术甚至对于作为工作机的行走机构也可作出某种实时调节，例如在车辆行驶间根据路面状况和推进力的需求调节驱动轮轮胎的气压，通过轮距和轴距的变化调节多个驱动轮之间的载荷分配等。不过就整机系统而言，目前这种调节的主要控制参数仍然是传动机的传动比。

（3）对原动机和工作机的空间布局的优化

在车辆与行走机械上，作为主要工作机之一的车轮或履带这样的行走机构必须布置在机架的最下部并使轮缘或履带板接触地面。另一些工作机的安装位置也要按照作业对象的性质确定。然而在大多数情况下，原动机难以布置在驱动轮等工作机的附近与其直接连接，两者中间需要有一系列互相连接环节，来解决在处于不同空间位置和姿态，很多时候相对位置还在不断变化

的各部件之间传输运动和动力的问题。这是传动机的又一项重要功能。功能良好的传动装置能使动力机在车辆上的安装位置的选择更为灵活和自由，并因之更方便地满足整机总体布局上各项优化目标的要求，如使动力机远离驾驶室以减小对驾驶员的噪声袭扰和视野的遮挡、将较为笨重的动力装置和某些受力构件布置在车架的底部以降低重心等。传动机还担负着向多个驱动轮或其他工作机按需要分配动力，并协调它们之间的运动关系的任务。当整机上设有多台原动机（例如油电混合动力车辆）时，也需要由传动机将各个工作机所需要的驱动功率合理与适时地分配到各个动力装置。

（4）阻尼和平抑负荷变化的冲击

由于车辆与行走机械运行中所遇到的负荷都是随机变化的，有时这种变化还会相当剧烈。车辆的惯性又使得这种负荷变化转化为对于动力传动装置的转速和转矩需求冲击性的突变。传动机需要能与原动机和工作机共同平抑这些负荷冲击。由于传动机本身的调节范围一般都比原动机和工作机更宽，反应也更快，还有可能集成基于摩擦、液压或电涡流等各种专门用于吸收冲击能量的部件，对于抑制冲击的影响，并有效地保护整机系统不受载荷剧烈变化的伤害具有更重要的作用。在此基础上，传动机在吸收车辆在减速和下坡时具有的多余动能和势能并再生利用的节能系统中，也发挥着重要作用。

选择和研制传动机系统是优化整机性能的必由之路，也是能够发挥设计者们创新才能和个性化理念的一个广阔的空间。

1.2 车辆与行走机械对于传动装置性能的基本要求

归纳以上的介绍和分析，作为车辆与行走机械这样的移动设备上的一个重要组成部分，传动装置除了具有与其他总成部件类似的体积小、重量轻、寿命长、使用可靠和成本低等共性要求以外，对于它们性能的专门要求主要是：

- ① 输入和输出端都具有尽可能大的转速和转矩变化适应范围。
- ② 当输入端的旋转方向不变时，输出端的旋转方向应当可以根据需要改变。
- ③ 既有从输入端向输出端传输动力，也有从输出端向输入端逆向传输动力的能力（动力制动和回收能量的要求）。
- ④ 自身消耗功率小，不仅稳态传动效率高，而且具有宽广的高效区。
- ⑤ 具有吸收和阻尼负荷突变引起的冲击和在必要时迅速完全地切断输入、输出端之间的功率流的能力。
- ⑥ 结构强度经得起负荷剧烈变化和车辆及行走机械行驶中的颠簸引起的惯性力负荷。
- ⑦ 本身具有较低的噪声和较小的其他污染排放。

在此基础上，随着近年来控制机的出现和环保、低碳运转等新概念的引入，新研制的整机对于传动装置还提出了一些更高的性能要求，诸如：

- ① 具有经过“零点”（静止状态）的双向无级调速的能力。
- ② 与电子设备匹配实现遥控与智能自动控制的能力。
- ③ 储存并再生利用车辆减速、下坡等工况中产生的动能和势能的能力。
- ④ 协调内燃机、电机等多种和多台原动机共同运行的能力。适当的传动装置是实现油电和油液混合动力技术应用的重要环节之一。
- ⑤ 灵活适应整机形态、布局和安装方式个性化、多样化的能力。

1.3 车辆与行走机械传动装置的主要参数指标

对于车辆传动装置的一个重要的要求是具有可变的传动比，其量化指标之一是该装置所具备的最大传动比和最小传动比之间的比值，通常称为变速比。变速比是一个运动学的概念，对

于有级变速箱来说，它等于最低挡位的最大传动比和最高挡位最小传动比的比值；但对于所有可以从零起步并经调节达到某一速度的无级变速的传动系统来说，按可用的最大最小传动比得到的变速比都是无穷大，所以要规定一个需要和能够稳定持续运行的速度下限值才好进行对比。根据使用要求的不同和通常认可的经验值，本书将常用速度比较高的公路运输类车辆、高通过性的越野和作战车辆以及要求微动性能更好的作业类行走机械的速度低限分别设定为5km/h、2.5km/h和1.5km/h三挡。

描述一个变速传动装置系统特性的动力学参数是变矩比，它是传动装置的输出端所能产生的最大转矩和它在最高输出转速时尚能维持运转的最小转矩之间的比值。变矩比不仅表征了一套动力传动系统的调节能力，而且也反映了它所能传输的功率容量及其偏离理想的恒功率特性的程度。

内燃发动机的输出参数中也有与传动系统的变矩比相当的参数或指标，即输出转矩提升系数，或称转矩储备系数，用以表征该机可能输出的最大转矩与对应于其额定功率时的转矩（可称为额定转矩）之比，通常以最大转矩增加值相对于额定转矩的百分比表示。现代车用活塞式内燃机的转速范围相当宽，可带载运行的最高转速和最低转速（略高于怠速）之比可达2~4或更大，但转矩提升系数却不大，车用柴油机为15%~30%，汽油机也只有25%~35%。这说明它们的调速范围比转矩随转速的下降可能增加程度大得多，也就是说，实际的输出特性与理想的恒功率特性相差甚远，必须依靠传动装置来对行走装置进行匹配，从转速和转矩两方面规划传动装置的参数指标。

发动机的可用最高、最低转速之比与传动装置的变速比的乘积，以及发动机输出转矩储备系数与传动系统变矩比的乘积分别构成了车辆和机械动力传动系统的总变速比和总变矩比，它们都应该能够覆盖车辆和机械在行驶和作业中可能出现的工况的需求。这里强调的“可用”值是表征在此值下装置的总效率能够保持在可以接受的程度内，但其功率却未必都达到了额定值。业界还将车辆在某一具体工况下，为克服行驶阻力、爬坡阻力和正常加速时的惯性力所需的推进力与其质量之比称为“动力因数”。总变速比、总变矩比和最大动力因数的大小取决于所涉及的车辆或行走机械的具体用途。总变矩比可以用车辆与行走机械所需的最大和最小动力因数的比值来确定。不同车辆和机械对应于在铺装良好的水平干硬路面上高速行驶时所需要最小动力因数都大体相同，仅根据行走装置本身的效率高而略有差异。为方便比较，我们将轮式车辆的最小动力因数值统一取为0.05，履带车辆取为0.08。最大动力因数则根据车辆与行走机械用途的不同而有较大的差异，普通公路型汽车的最大动力因数有0.3~0.5即可满足使用要求，而对于推进力要求较高的全轮驱动的非公路型车辆与行走机械则需要达到驱动轮附着系数的滑转极限，即0.7~0.8以上。履带式和滑移转向的轮式车辆即使没有很大的推进力负荷（如水稻收割机），也应具备超过约0.5的最大动力因数，否则无法原地转向。一般来说，各种车辆与行走机械的包括发动机特性在内的总变速比都要比变矩比大，但是速度范围和总变速比大的车辆所需的总变矩比却未必也大。例如普通小轿车的最高速度可达200km/h以上，按我们的定义，其总变速比超过40；但它们的最大上坡度（注意是上坡角度的正切值，以下同）只有20%左右，折算为角度约合10°。最大动力因数仅需0.25~0.3，对应的总变矩比为5~6，常用的5挡手动变速箱传动系统加上发动机的29%~25%的转矩提升系数后所能达到的总变矩比有6.5~7，已能轻松应对几乎所有可能遇到的工况，还可将第5挡设为省油的超速挡。而高通过性越野车辆虽然最高速度只有120km/h上下，但它们要爬坡度达60%（约合31°）的陡坡，最大动力因数需要超过0.8，对应的变矩比则应高达10~15，此时就必须利用兼起副变速箱作用的分动器将主变速箱的变矩比再扩大一倍左右才能满足要求。此外，受驱动轮最大附着系数和桥载分布的限制，驱动轮配置为4×2和6×4的车辆与行走机械的最大动力因数难以超过0.5~0.6，若要达到更大的动力因数，必须采用全轮驱动的4×4和6×6配置。表1-1给出了几种常见车辆与行走机械按以上原则计算得到的所需最大动力因数、总变速比和总变矩比的大致范围。