

自动变速箱

周守仁 编著
张光裕 主审

中国铁道出版社

1984年·北京

前 言

采用自动变速箱、实现自动换档，是提高车辆使用性能的有效措施。自动变速箱在国外汽车、坦克、装甲车辆上早已广泛应用，现已推广于多种自行式工程机械。五十年代末期，国产红旗牌高级轿车上也装置了自动变速箱。

随着我国科学技术的不断发展，具有动力换档的车辆日益增多，各型自动变速箱的设计、研制已在各有关部门进行，自动变速箱在各种车辆上的应用与生产将获得进一步发展。本书的出版，希望能对我国汽车、工程机械的教学、科研和生产有所裨益。

本书主要介绍车辆（包括汽车、坦克和工程机械）用自动变速箱的构造、工作原理及主要设计理论，并介绍了一些国外自动变速箱的最新结构和设计研究资料。

自动变速箱由液力元件、行星变速箱和自动控制操纵系统三部分组成。在编写本书时注意了理论的系统性和各部分相对的独立性。理论阐述由浅入深，尽可能地联系实际。

本书由同济大学张光裕副教授主审。吉林工业大学、西安公路学院、华北水利水电学院、同济大学建筑工程分校、上海铁道学院等单位参加了在同济大学召开的审稿会议。张光裕副教授在本书编写过程中，除负责主审外，还对作者进行了指导，且补充资料，进行修改，作者表示衷心的感谢。

作 者

1983年11月

自动变速箱

周守仁 编著 张光裕 主审

中国铁道出版社出版

责任编辑 王俊法 封面设计 赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168 $\frac{1}{2}$ 印张：9.5 字数：234千

1984年10月 第1版 第1次印刷

印数：0001—5,500册 定价：2.85元

内 容 简 介

本书共分五章，围绕自动变速箱，较系统地介绍了液力变矩器、行星齿轮变速箱和自动控制操纵系统的构造、工作原理及主要设计理论。书中搜集了近年来国内外有关自动变速箱的资料。

本书可作为高等院校工程机械（汽车）专业的教学参考书，也可供汽车行业和工程机械行业的科技人员参考。

目 录

| | |
|----------------------|-----|
| 第一章 导论 | 1 |
| 第一节 车辆对传动系统的要求 | 1 |
| 第二节 传动系统的类型 | 7 |
| 第三节 变速箱按换档方式分类及其评价 | 12 |
| 第四节 自动变速箱的优越性 | 16 |
| 第五节 自动变速箱的发展历史及其应用 | 19 |
| 第六节 自动变速箱在工程车辆上的应用 | 24 |
| 第二章 液力变矩器 | 30 |
| 第一节 液力变矩器的结构和工作原理 | 30 |
| 第二节 液力变矩器的类型及选择 | 51 |
| 第三节 液力变矩器与内燃机的联合工作特性 | 61 |
| 第四节 液力变矩器与内燃机的匹配 | 65 |
| 第五节 液力变矩器的设计 | 75 |
| 第六节 液力变矩器的补偿及冷却系统 | 78 |
| 第三章 行星齿轮变速箱 | 84 |
| 第一节 行星式变速箱的运动学分析 | 85 |
| 第二节 行星式变速箱的动力学分析 | 91 |
| 第三节 行星式变速箱的传动简图设计 | 107 |
| 第四节 行星传动齿轮齿数的选择 | 135 |
| 第五节 换档执行元件的设计计算 | 140 |
| 第六节 功率分流的液力机械传动 | 145 |
| 第四章 自动换档操纵及控制系统 | 161 |
| 第一节 自动换档操纵的一般介绍 | 161 |
| 第二节 自动换档控制参数与信号液压阀 | 167 |
| 第三节 供油系统 | 188 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 第四节 | 换档规律与换档控制阀 | 213 |
| 第五节 | 换档平顺性 | 235 |
| 第五章 | 典型自动变速箱 | 248 |
| 第一节 | 阿里森CLBT-750型自动 变速箱 | 248 |
| 第二节 | 红旗牌小轿车自动变速箱 | 263 |
| 第三节 | 克莱斯勒 (Chrysler) Torque Flite 自动变速箱 | 279 |

第一章 导 论

装置自动变速箱、实现自动换档，是近代轮式及履带式车辆中改进和完善传动系统的一个重要方向，是提高车辆（包括自行式工程机械）使用性能及生产率的重要途径，也是目前我国工程机械实现液压化、自动化的一个重要组成部分。

自动变速箱的设计研究和应用，已经历了几十年的发展历史，近三十年来，世界各国已研制生产了种类繁多的自动变速箱，我国的红旗牌高级轿车上已采用了自动变速箱。在国外，自动变速箱不仅已广泛采用在汽车、坦克上，且早已装置在某些工程机械上，如美国阿利森（Allison）公司于1973年将CLBT-750型自动变速箱装于铲运机上。

自动变速箱的设计技术和理论研究，已受到了国内外科学技术界的高度重视。

第一节 车辆对传动系统的要求

车辆传动系的基本功用是将发动机发出的动力传给驱动车轮（或驱动链轮），并保证车辆在运行或作业过程中具有良好的动力性和经济性。

高速活塞式内燃机由于具有尺寸小、重量轻、功率大等优点被广泛采用作为各类车辆的动力装置。但是由于高速活塞式内燃机还具有转速高、扭矩小、扭矩适应范围窄，这些与车辆复杂的行驶条件存在矛盾的缺点，致使在发动机和驱动轮之间不能采用简单的传动轴连接，而必需设置一套较复杂的传动系统，车辆对传动系统的具体要求如下：

1. 具有减速增扭作用：使驱动轮上具有足够大的驱动力

矩，以产生足够的切线牵引力 P_K ，从而使得车辆处在任何恶劣的行驶条件下，均能克服各项行驶阻力 ΣP ，顺利起步和正常行驶与作业。

2. 具有合适的最大传动比 i_{max} ：为使车辆具有能克服最大的行驶阻力的切线牵引力，或使车辆在规定的行驶条件下具有适当大小的最低车速，各型车辆应具有合适的最大传动比。其范围值一般如下。

| | |
|----------|-------|
| 小轿车 | 12~18 |
| 载重汽车及自卸车 | 35~50 |
| 轮式工程车辆 | 45~60 |
| 履带式工程车辆 | 55~70 |

3. 具有合适的最小传动比 i_{min} ：为使车辆在不平良好路面（或规定行驶条件下）克服滚动阻力和风阻力，而以所要求的最高车速行驶，各型车辆应具有合适的最小传动比。其范围值如下：

| | |
|--------------|-------|
| 小轿车和轻型载重车 | 3~6 |
| 重型载重车（包括自卸车） | 6~15 |
| 轮式工程车辆 | 12~25 |
| 履带式工程车辆 | 20~35 |

4. 变速作用：车辆的使用条件极其复杂：诸如地面坡度、路面好坏程度、工程车辆行驶作业时的载荷波动、运输车辆的实际载重量以及交通情况等等，这就需要车辆的切线牵引力和车速能有较大的变化范围，且能保证最及时地适应行驶条件的变化。

并且，在使车辆的牵引力和速度及时地经常地符合使用要求而变化的同时，发动机在工作中的负荷和转速变化范围要尽可能小（最好能稳定在最佳工况），以保证其动力性和经济性。显然，一般车辆传动系的传动比不能仅有一个最大值或最小值，而应该能在最大值和最小值之间变化，即要求传动系具有变速作用。为此，在传动系统中装置有变速箱。

5. 变速档数的选择

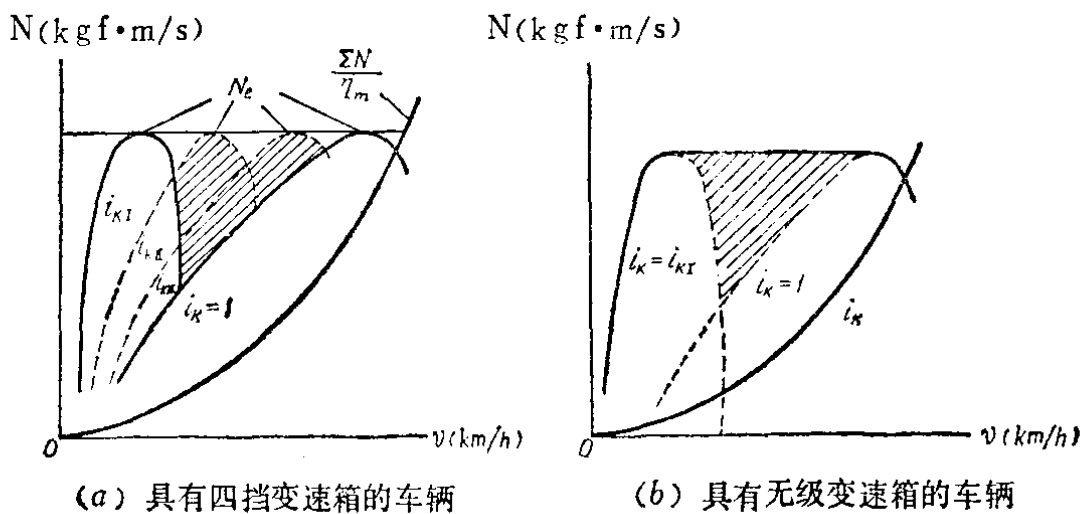


图 1—1 变速箱档数对车辆牵引性能的影响

变速箱的档数对车辆的牵引性能有很大的影响，图 1—1 (a) 中实线表示仅有两档 (i_1 ——低档传动比， $i_K = 1$ ——直接档传动比) 变速箱的车辆。其发动机输出功率和车速的关系曲线。虚线表示在头档与直接档之间增加两个中间档的情况。曲线 $\Sigma N/\eta_m$ 则表示车辆消耗功率随车速变化的曲线 (式中 N 表示车辆行驶时消耗的功率，而 η_m 表示传动系统的效率) 由图可知：档数增加，使得在相同速度变化范围内可利用的后备功率增加，如图中的阴影面积所表示。当然，这里指的是换档车速在两相邻曲线的交点处。如果换档车速掌握不当，甚至不及时换档，则后备功率仍不能充分利用。若档数增至无穷多，即所谓无级变速 (传动比在 i_{K1} 与 1 之间自动连续地变化) 则功率利用情况如图 1—1 (b) 所示。此时，在速度变化范围内的可利用的后备功率最大。即发动机有可能以 $N_{e_{max}}$ 及 n_{eH} 的工况工作，此时

$$N_{K_{max}} = N_{e_{max}} \times \eta_m = \frac{P_{K_{max}} v}{270} \quad (1-1)$$

即 $P_{K_{max}} v = \text{常数}$

此时车辆的牵引力和车速的关系曲线 (称牵引特性) 为一双曲线 (见图 1—2)，由图可知牵引力 $P_{K_{max}}$ 随车速的降低而急剧增加，这对满足外载波动剧烈及车速变化大的使用要求极为有利。

但是对于有级变化的变速箱，档数越多结构越复杂，要求在最合理的工况下换档操纵也越困难。目前，小轿车一般具有3~4档，载重车一般具有4~5档，工程车则有的多到6档甚至超过10档，其最理想的解决办法是采用自动变速箱。

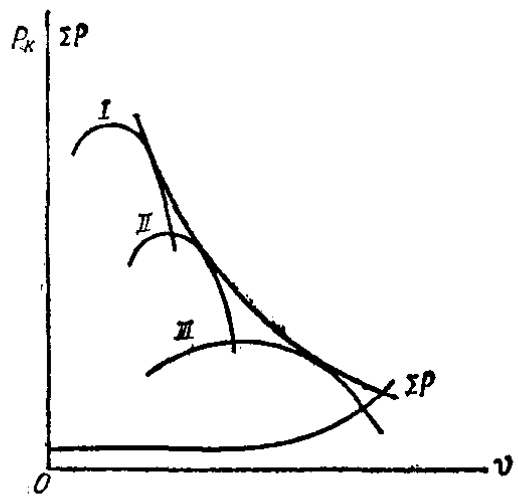


图1—2 有级变速与无级变速的车辆牵引性能比较

6. 变速箱传动比（速比）的选择

各型车辆的各中间档位的传动比，都是接近于等比级数分配的。例如美国阿利森（Allison）公司装用于铲运机的CLBT-750型自动变速箱，其各档传动比为 $i_{K1}=5.183$, $i_{K2}=3.190$, $i_{K3}=2.067$, $i_{K4}=1.400$, $i_{K5}=1$ ；相邻各传动比比值为 $i_{K1}/i_{K2}=1.62$, $i_{K2}/i_{K3}=1.55$, $i_{K3}/i_{K4}=1.47$, $i_{K4}/i_{K5}=1.4$ ，彼此均相差不大。所以可以认为，一般车辆变速箱各传动比有如下关系：

$$\frac{i_{K1}}{i_{K2}} = \frac{i_{K2}}{i_{K3}} = \frac{i_{K3}}{i_{K4}} = \dots = q$$

式中 q 为常数，也就是各档之间的公比。

若已知最大传动比 i_{K1} 与最小传动比（一般为1），便可确定各中间档传动比，由上式可得

$$\begin{aligned} i_{K1} &= q i_{K2} \\ i_{K2} &= q i_{K3} \\ i_{K3} &= q i_{K4} \\ &\dots \end{aligned}$$

若为五档变速箱设 $i_{K5}=1$ ，各档传动比与 q 便有如下关系：

$$\begin{aligned} i_{K4} &= q \\ i_{K3} &= q^2 \\ i_{K2} &= q^3 \end{aligned}$$

$$i_{K1} = q^4$$

或

$$q = \sqrt[4]{i_{K1}}$$

所以各档传动比为

$$i_{K4} = \sqrt[4]{i_{K1}}, \quad i_{K3} = \sqrt[4]{i_{K1}^2}, \quad i_{K2} = \sqrt[4]{i_{K1}^3}$$

由此可推出一般传动比的规律，如果是 n 档变速箱，则各档传动比应是

$$\begin{aligned} i_{K2} &= \sqrt[n-1]{i_{K1}^{n-2}} \\ i_{K3} &= \sqrt[n-1]{i_{K1}^{n-3}} \\ i_{K4} &= \sqrt[n-1]{i_{K1}^{n-4}} \\ &\dots\dots \end{aligned}$$

任意一档 (m 档) 的传动比是

$$i_m = \sqrt[n-1]{i_{K1}^{n-m}} \quad (1-2)$$

按等比级数分配各中间档传动比，其目的是在车辆行驶中无论各个档位的变换均能控制发动机转速稳定变化在一定范围内。

图 1-3 所示为换档过程中车速与柴油机转速的关系曲线。图中绘有柴油机速度特性，再根据车辆等速自动换档条件按下列公式关系绘出各档 $v \sim n$ 曲线。

即：

$$v_{IB} = 0.377 r_K \frac{n_B}{i_{K1}} = 0.377 r_K \frac{n_A}{i_{KII}}$$

$$v_{IIB} = 0.377 r_K \frac{n_B}{i_{KII}} = 0.377 r_K \frac{n_A}{i_{KIII}}$$

式中 r_K —— 驱动车轮动力半径

即可得：

$$\frac{i_{KI}}{i_K} = \frac{i_{KII}}{i_{KI}} = \frac{i_{KIII}}{i_{KII}} = \frac{n_B}{n_A} = q \quad (1-3)$$

可知，驾驶员用 1 档起步，随着发动机转速的提高，车辆的

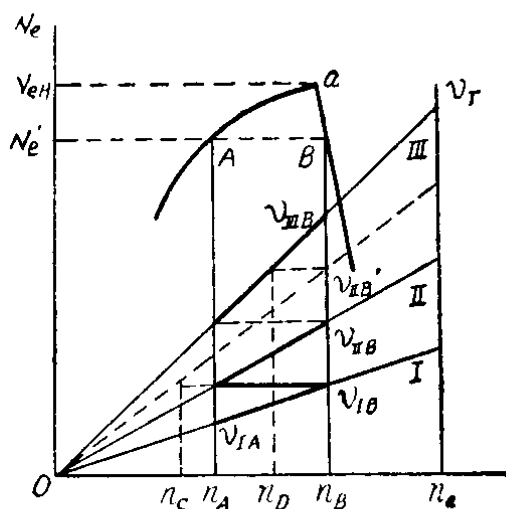


图 1-3 换档过程中车速与柴油机转速的关系曲线

行驶速度也跟着增加。当发动机的转速增至 n_B 时，车辆自动等速换档，当换入Ⅱ档时，发动机转速应降到 n_A 。随着车速再增高，各档自动等速换档，发动机转速始终在 $n_A \sim n_B$ 范围内稳定变化。

对于液力机械传动的自动变速箱，在确定公比 $q = \frac{n_B}{n_A}$ 时， $n_A \sim n_B$ 范围值应该定在变矩器高效区范围内。即按柴油机和变矩器的联合工作输出特性中找出 $\eta_T = 75\%$ 的涡轮转速 n_{TA} 及 n_{TB} ，当公比 $q \leq \frac{n_{TA}}{n_{TB}}$ 则可满足此要求。若 $q > \frac{n_{TA}}{n_{TB}}$ 时则应增加档位数。

7. 倒向行驶：车辆在某些情况下，如进入停车场或车库、窄路调头等常需倒向行驶，对于循环作业的工程车辆在每一工作循环中都需要倒车行驶。然而，车辆发动机一般都不能倒转工作。故传动系必须有倒车机构，在发动机旋转方向不变的情况下，使车轮反转。一般是在变速箱内加设倒车档位。

8. 平稳起步与有载起步：对于装置机械传动系统的车辆，在起步时，当发动机启动后，就将变速箱挂上档，车辆是无法起步的，这是因为发动机的最低稳定转速一般是每分钟数百转，起步时转速低于此值发动机便将熄火。而车辆起步时，车速则是从零开始逐渐增大的。为了解决这一矛盾，同时也为了适应变速箱换档及车辆制动等方面的需要，在机械式传动系统中装置有一个能短暂切断发动机动力的离合器。

9. 差速作用：轮式车辆在转弯时，其外侧车轮滚过的距离总是大于内侧车轮，如果两侧车轮用一根刚性轴驱动，则二者转速必然相同，因而在车辆转弯时必然产生车轮与地面滑磨现象。这将使车辆的动力与燃料消耗增加，传动系某些零件与轮胎的寿命缩短。因此，在左、右两驱动轮之间装有差速器。

10. 万向传动：在不少车辆的发动机至驱动桥的整个传动系统中，两相连机件（如变速箱输出轴与中央主传动器输入轴、发动机曲轴与变速箱输入轴等等）的旋转轴线是不同轴的则需用万向联轴节来连接。

第二节 传动系统的类型

在近代，轮式及履带式车辆的传动系统有以下几种类型：

- (1) 机械传动；
- (2) 液力机械传动；
- (3) 液压传动；
- (4) 电传动。

在以上四种类型中，最广泛采用的是机械传动和液力机械传动。自动变速箱绝大多数使用在液力机械传动系统中，故本书主要介绍液力机械式传动系。现对上述四种传动系统类型简要评述如下。

一、机械传动

轮式及履带式车辆最初普遍采用机械传动，它使用的历史最长。机械传动的主要优点是结构简单、制造容易、工作可靠、价廉、重量轻，工程车辆还可利用发动机运动机件的惯性进行作业等。

机械传动的主要缺点是：

1. 采用人力换档，换档时动力传递要中断。对于汽车，当行驶于交通复杂的情况下换档频繁，要求驾驶员技术熟练，容易引起紧张、劳累。对于工程车辆，在行驶作业时，由于车速低、阻力大，换档时间掌握不当常会导致发动机熄火，迫使驾驶员提前降档，这使得发动机的功率利用差，降低了生产率。
2. 在工作阻力急剧变化的工况下，工程车辆的柴油机，常易因过载而熄火。对于循环作业的车辆，经常要前进、后退及改变车速，换档频繁，这都大为增加了驾驶员劳动强度。
3. 传动系统受到附加冲击力，动载荷大，使得发动机及传动系零件的使用寿命降低。
4. 行驶阻力的变化直接改变发动机的工况，为了充分利用

发动机的功率，要求增加变速箱的档位数（如载重汽车、拖拉机、工程车辆的变速箱档数都较多），因而使变速箱结构复杂，并增多驾驶员换挡次数。

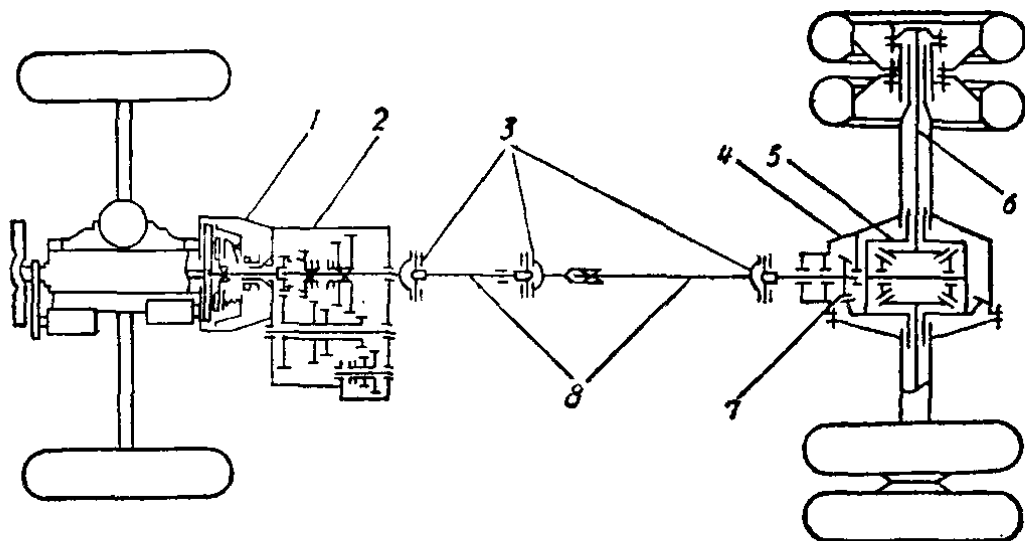


图 1—4 轮式车辆的机械传动式传动系统

1——主离合器；2——机械变速箱；3——万向节；4——驱动桥壳；5——差速器；6——半轴；7——主减速器；8——传动轴。

5. 每次换挡都要使主离合器分离、接合一次，在接合过程中离合器摩擦都要经历一个滑磨过程，对于换挡频繁的车辆，降低离合器摩擦片的使用寿命，缩短了更换周期，增加了停车维修时间，从而降低生产率。

近年来，在工程车辆中由于湿式离合器的普遍采用及柴油机特性的改善（提高适应性系数），对上述某些缺点有一定改善，因此，目前在国内工程车辆中采用机械传动的仍占一定比重。在国产汽车中仍得到较普遍应用。

图 1—4 和图 1—5 所示为采用机械传动的轮式运输车辆和履带式工程车辆的传动系统。

二、液力机械传动

在机械传动系统中加入液力变矩器（或液力偶合器）使发动机输出的功率通过液力变矩器（或液力偶合器）及机械传动部件传到驱动轮，称为液力机械传动系统。

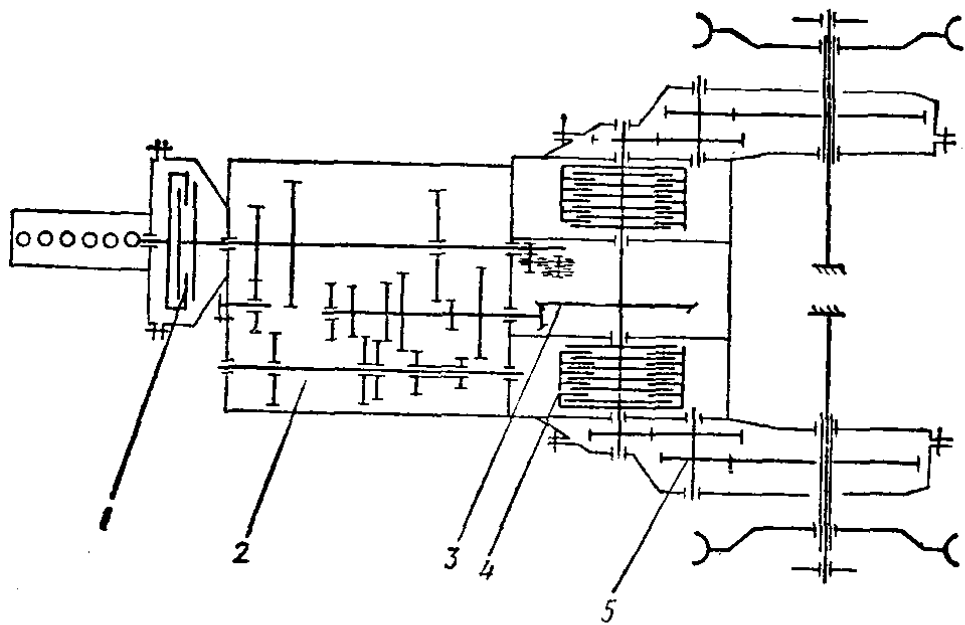


图 1—5 履带式车辆的机械传动式传动系统

1 —— 主离合器； 2 —— 变速箱； 3 —— 中央传动器； 4 —— 转向离合器；
5 —— 终传动器。

液力机械传动系统的主要优点是：

1. 能在一定范围内根据行驶阻力的变化，自动进行无级变速，因此能使发动机经常在所选定的工况附近工作，并能防止发动机过载熄火。这不仅提高了发动机的功率利用率，而且大大减少了换档次数。

2. 由于变矩器利用液体作为传递动力的介质，输出轴和输入轴之间没有刚性的机械联系，大大降低了发动机及传动系统零件的冲击载荷，大大提高了机件的使用寿命。根据重型载重汽车的统计数据，液力机械传动和机械传动相比，发动机寿命增长 47%，变速箱寿命增长 400%，后桥差速器寿命增长 93%。对于载荷波动剧烈的工程车辆，其效果更为显著。

3. 由于变矩器具有一定的变速能力，故对于同样的变速范围，可以减少变速箱的档位数，简化了变速箱结构。

4. 由于变矩器具有自动无级变速的能力，因而起步平稳，并可得到任意小的行驶速度。

5. 由于变矩器（或偶合器）采用液体介质传递动力，且由于变矩器冷却系统中的油泵、过滤器、冷却器等液压元件同时可

兼用于换档液压操纵系统等特点，这给采用自动换档或动力换档提供了条件，故其变速箱大多采用动力换档或自动控制换档。

和机械传动相比，液力机械传动的主要缺点是成本高，传动效率略低，零部件制造的工艺要求也比较高。

图 1—6 和图 1—7 所示为采用液力机械传动的轮式车辆和履带式车辆的传动系统图。

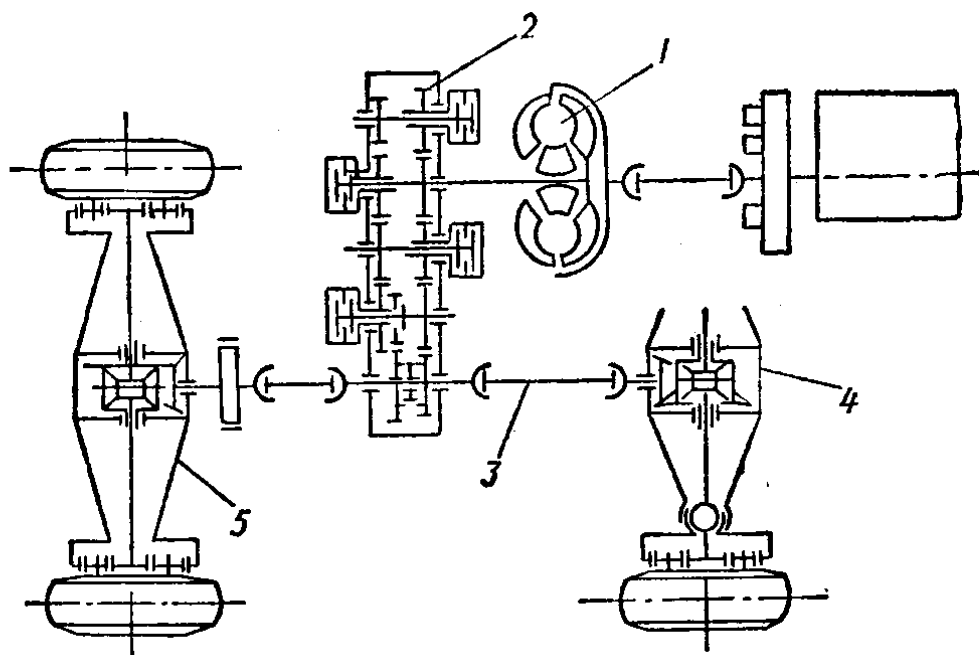


图 1—6 轮式车辆的液力机械式传动系统

1 — 变矩器； 2 — 变速箱； 3 — 万向传动轴； 4、5 — 前后驱动桥。

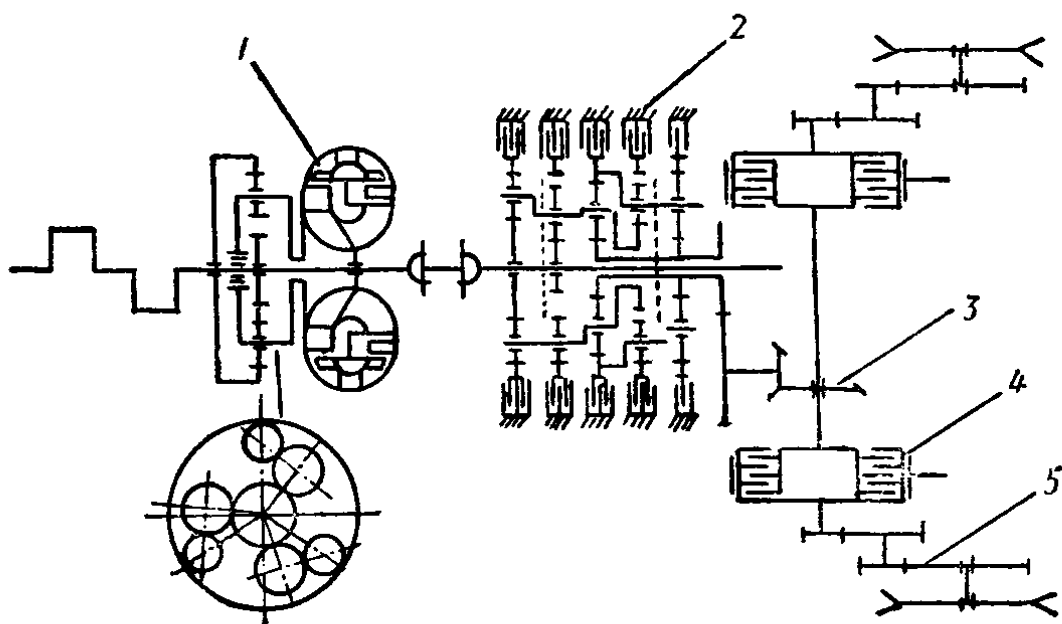


图 1—7 履带式车辆的液力机械式传动系统

1 — 变矩器； 2 — 行星变速机构； 3 — 中央传动器；
4 — 转向离合器； 5 — 终传动器。

三、液 压 传 动

液压传动系统本身具有很多优点，在自行式工程机械行业中引起广泛重视，但由于液压元件的价格、噪声、寿命等问题尚未完全解决，在车辆中应用尚不广泛，在此仅作简略介绍。其优点如下：

1. 能实现无级变速，转速范围大，并能实现微动，而且在相当大的转速范围内，保持较高的效率；
2. 用一根操纵杆便能改变行驶方向和变速；
3. 利用液压传动系统本身，可以实现制动；
4. 在履带式或以差速方式转向的轮式车辆中，当左、右驱动轮分别采用独立的传动系统时，不需要主离合器、转向离合器及制动器等摩擦构件，因此传动系统中没有易损零件，保养方便。另外，改变左、右驱动轮的转速能平稳地实现按任意转向半径转向及原地转向。
5. 便于实现自动化及远距离操纵。

近年来，由于液压元件产品质量及性能的提高，液压传动已较多地出现在运输车辆及工程车辆中，在工程车辆产品中如美国 John Deere公司的JD750型履带推土机，JD755型履带装载机及西德Liebherr公司的PR721、731及741各型推土机，它们都采用了液压传动系统，且都是基本类似的双泵回路系统。

四、电 传 动

车辆上较常见的电传动系统为“电动轮”的型式，其基本原理是：由柴油机带动直流发电机，然后用发电机发出的电能驱动装在车轮中的直流电动机。车轮和直流电动机（包括减速装置）装成一体称为“电动轮”。这种传动的优点是：

1. 动力装置（柴油机—发电机）和车轮之间没有刚性联系，便于总体布置及维修；
2. 变速操纵方便，可以实现无级变速，因而在整个速度变