

汽车金属带式无级变速器 ——CVT 原理和设计

程乃士 张伟华 杨会林 孙德志
宋锦春 张 镭 刘 温 郭大忠
郭凤麟 程 武 石晓辉
著



机械工业出版社

前言

汽车金属带式无级变速器——CVT (Continuously Variable Transmission) 是当代最先进的汽车变速器之一。由于它可以使发动机在最经济的区域工作, 与 (有级) 自动变速器 (AT) 相比显示出惊人的节油效果, 成为取代 AT 的最佳的传动形式。

传动系是车辆中较为重要、复杂的系统之一。以前, 人们把发动机和变速器分开来研究, 变速器是以适应发动机和整车参数要求来设计的。CVT 的出现使人们必须把发动机和 CVT 作为一个完整的动力总成来看待, 用控制器把二者有机地联系起来 (按发动机最佳的工作区域, 调节 CVT 的变速比, 甚至可以进一步调节供油量), 实现最优工作状态。

汽车金属带式无级变速器——CVT 由荷兰工程师 H. Van Doorne 在 20 世纪 60 年代末发明, 经过 20 多年的研制开发于 90 年代初成功地应用于如福特、本田、日产、菲亚特等多种轿车的传动中, 目前总产量已经达到 250 万台/年, 仅日本 JATCO 公司就有 150 万台/年的产量, 并预计 3 年内达到 400 万台/年。

程乃士是东北大学教授, 1987 年从德国留学回国以后, 开始了汽车金属带式无级变速器的研究。1996 年国家科技部确定的“九五”国家重点科技攻关计划专题“汽车电子控制汽车金属带式无级变速传动器研究” (专题号为 96—A05—04—03), 由吉林工业大学、东北大学和东风汽车公司技术中心三家承担, 共同负责整机设计。东北大学主要负责金属带传动设计和金属带研制, 程乃士教授是东北大学方面的负责人, 他带领的团队出色地完成了所承担的任务。

本书作者主要是由东北大学各专业领域的专家组成的团队, 经过十多年的研究、试验和工业实践, 从汽车金属带式无级变速器的核心元件——金属带的金属材料、制造工艺、设计理论开始做起, 直到最终制成完整的汽车金属带式无级变速器——CVT, 并在这个过程中, 不断形成自有知识产权的成果和专利。

这是一个只有大家全力合作才能完成的系统工程。首先它涉及的专业领域多, 如金属材料、轧钢、精密测量、汽车工程、液压、电子与自动控制、机械设计、机械制造等学科; 其次它不仅仅是实验室的成果, 而必须是和产业界紧密结合, 成为实际应用的产品, 并在激烈竞争的汽车市场经受考验, 进一步形成自己民族的品牌。

国内各大汽车公司 (尤其是民族品牌的)、各汽车变速器厂都在关注和学习 CVT, 但到目前为止, 国内还没有一本全面介绍汽车金属带式无级变速器原理与设计的专著。我们希望这本书能够对大家有所帮助, 为中国汽车金属带式无级变速器——CVT 事业尽一份力。

作者

目 录

前言	
第1章 概论	1
1.1 汽车变速器的类型和特点	1
1.2 汽车无级变速器的类型和特点	1
1.3 采用无级变速器——CVT的汽车可以节油的原理	6
1.4 汽车无级变速器的发展	7
1.5 实现汽车无级变速器——CVT大变速比、大转矩的关键——无偏斜金属带式无级变速传动	12
1.6 抛弃液压加压系统,进一步节油	15
第2章 金属带式无级变速传动的基本原理	16
2.1 金属带式无级变速器的基本组成	16
2.2 金属带式无级变速传动的几何关系和基本参数	17
2.3 金属带式无级变速传动的基本原理和传动特性	19
2.4 直母线锥盘导致的金属带偏斜及其影响	22
2.5 无偏斜金属带式无级变速传动摩擦副的共轭关系	28
2.6 无偏斜金属带式无级变速传动的参数设计	31
第3章 金属带式无级变速传动的承载能力	34
3.1 摩擦传动原理和摩擦因数	34
3.2 金属带传动的摩擦因数和传动效率	47
3.3 金属带传动的力分析	57
3.4 金属带传动的传动能力和带轮轴向推力的确定	69
3.5 金属带带环的应力与强度分析	69
3.6 带轮与摩擦片的接触强度计算	78
第4章 金属带式无级变速器的匹配设计	83
4.1 发动机的工作特性和最佳工作段	83
4.2 无级变速器的运动参数设计	87
第5章 液压传动与控制系统	93
5.1 液压传动概述	93
5.2 CVT液压部分基本结构分类	123
5.3 可控夹压力的SD-CVT液压传动	130
第6章 金属带式无级传动系统的电子控制技术	148
6.1 概述	148
6.2 金属带式无级变速传动特性分析	149
6.3 无级变速传动系统速比的匹配规律	168
6.4 CVT系统速比的控制	172
6.5 无级变速汽车模型的仿真	174
6.6 CVT从动轮夹紧力控制的研究	189
6.7 CVT控制系统的设计	191
第7章 金属带组件	197
7.1 金属带钢环组	197
7.2 金属带环组的配合关系与载荷分配	201
第8章 变速器箱体的有限元分析	208
8.1 引言	208
8.2 金属带式无级变速器模型的建立	209
8.3 金属带式无级变速器壳体模型的简化和导入	211
8.4 金属带式无级变速器箱体模型的有限元分析	214
8.5 分析结果的校正与分析	221
第9章 滚动球键	234
9.1 滚动球键的运动几何关系	234
9.2 滚动球键的应力分析	235
第10章 离合器换向机构	250
10.1 汽车无级变速器离合器换向机构	250
10.2 倒档行星机构的运动学设计	255
10.3 倒档行星轮机构的强度计算	259

第 11 章 纯机械电子控制金属带式	
无级变速器	286
11.1 金属带式无级变速器 CVT 的能量	
损失	286

11.2 纯机械电子控制金属带式无级变	
速器	288
参考文献	290

第 1 章 概 论

1.1 汽车变速器的类型和特点

目前汽车变速器按变速特点来分，可以分为两大类：一是有级变速器；二是无级变速器。按执行变速的方式来分，可以分为自动和手动两类。表 1-1 列出变速器的类型和特点。

表 1-1 汽车变速器的类型和特点

有级变速器					无级变速器			
滑动 齿轮变 速器	部分自动 爪式或同步 器式齿轮变 速器	全自动爪 式或同步器 式齿轮变速 器	常规自动 变速器	双离合器 齿轮变速器	液力变矩 器	摆销链式 无级变速器	金属带式 无级变速器	环盘滚轮 式无级变速 器
MT	AMT	AMT	AT	DCT		CVT	CVT	IVT
在换挡时有动力中断				无动力中断				
脚踏离合器切断动 力，实现起动、换挡 和结合		自动控制离合器切断动 力，实现起动、换挡和结 合		自动控制 离合器切换 档位	自动起动和无级变速			
手 动 换挡	换挡部分 自动化	换挡自动化			转矩-转速自动转换			

1.2 汽车无级变速器的类型和特点

1.2.1 液力变矩器

液力变矩器是较早用于汽车传动的无级变速器，成功地用于高档汽车的传动中。由于传动效率较低，且变速比大于 2 时效率急剧下降，经常仅在有级（2~3 档）变速器的两档中间实现无级变速，因此未能推广开来。目前经常作为起步离合器在汽车传动中使用。

1.2.2 宽 V 形胶带式无级变速器

宽 V 形胶带式无级变速器是荷兰 DAF 公司在 1965 年以前的产品，主要用在微型轿车上，一共生产了约 80 万辆。由于胶带的寿命和传动效率低，进而研究和开发了汽车金属带式无级变速器。

1.2.3 金属带式无级变速器

金属带式无级变速器是荷兰 VDT 公司的工程师 Van Doorne 发明的, 用金属带代替了胶带, 大幅度提高了传动的效率、可靠性、功率和寿命, 经过 30 ~ 40 年的研究, 开发已经成熟, 并在汽车传动领域占有重要的地位。目前金属带式无级变速器的全球总产量已经达到 250 万辆/年, 三年内将达到 400 万辆/年, 发展速度很快。

金属带式无级变速器的核心元件是金属带组件。如图 1-1 所示, 金属带组件由两组 9 ~ 12 层的钢环组和 350 ~ 400 片左右的摩擦片组成, 其中钢环组的材料、尤其是制造工艺是最难的, 要实现强度高 ($\sigma_b > 2000\text{MPa}$), 各层带环之间“无间隙”配合。以前只有荷兰 VDT 公司掌握这种工艺, 现在我国沈阳越士达无级变速器有限公司也已经掌握了这项技术, 并在重庆工学院建成了一条示范性生产线。

金属带式无级变速器的传动原理如图 1-2 所示, 主、从动两对锥盘夹持金属带, 靠摩擦力传递运动和转矩。主、从动边的动锥盘的轴向移动, 使金属带径向对工作半径发生无级变化, 从而实现传动比的无级变化, 即无级变速。

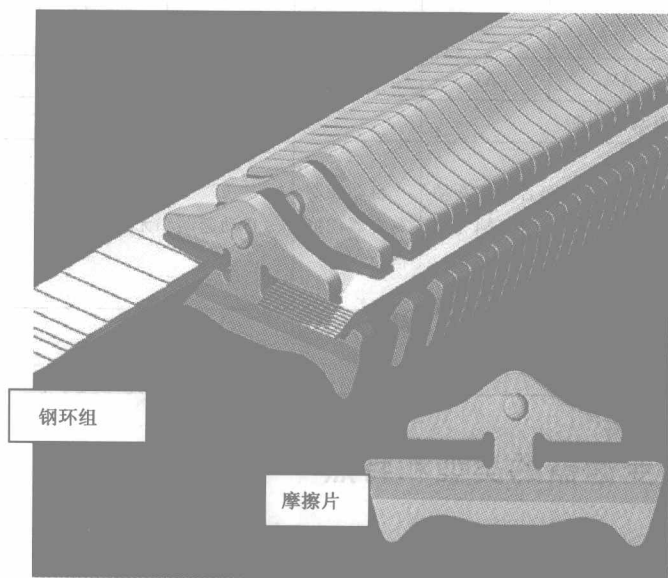


图 1-1 金属带组件

金属带式无级变速器的典型结构如图 1-3 所示。在这种结构中, 采用带锁止离合器的液力变矩器作为起步离合器使用, 液压泵提供锥盘加压、传动与调速系统用高压油, 高压油通过液压缸、活塞作用于主、从动两对锥盘, 夹持金属带, 产生摩擦力传递运动和转矩, 后面是齿轮传动和差速器传动。

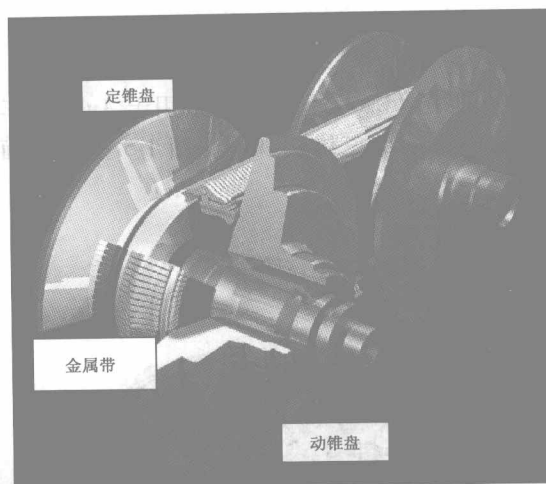


图 1-2 金属带式无级变速器的传动原理

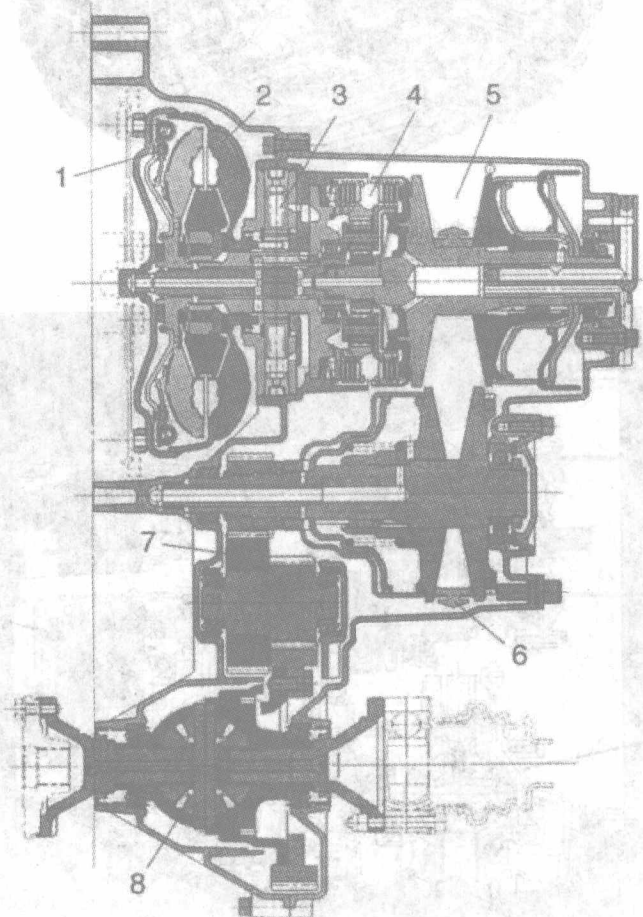


图 1-3 金属带式无级变速器的典型结构

- 1—变矩器离合器 2—液力变矩器 3—液压泵 4—前进、倒档离合器
5—锥盘变速装置 6—金属带 7—减速装置 8—差速器

1.2.4 摆销链式无级变速器

摆销链式无级变速器是由德国 LUK 公司将摆销链用于 Audi 汽车传动的成功范例。图 1-4 是摆销链式无级变速器 Multitronic 的三维剖视图, 图 1-5 是其剖面图, 图 1-6 是其传动简图。

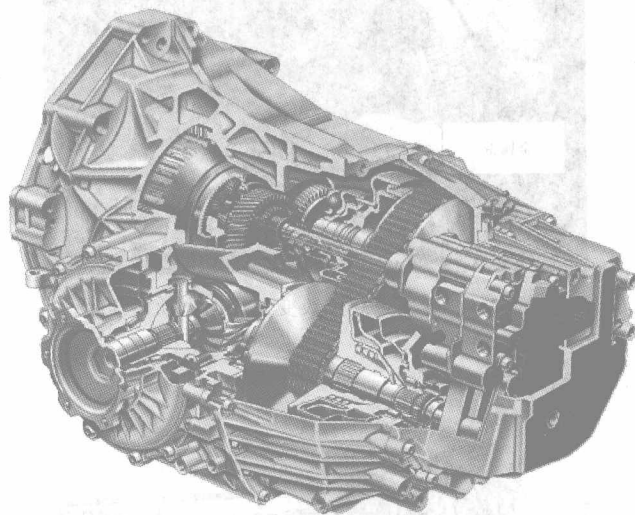


图 1-4 Multitronic 的三维剖视图

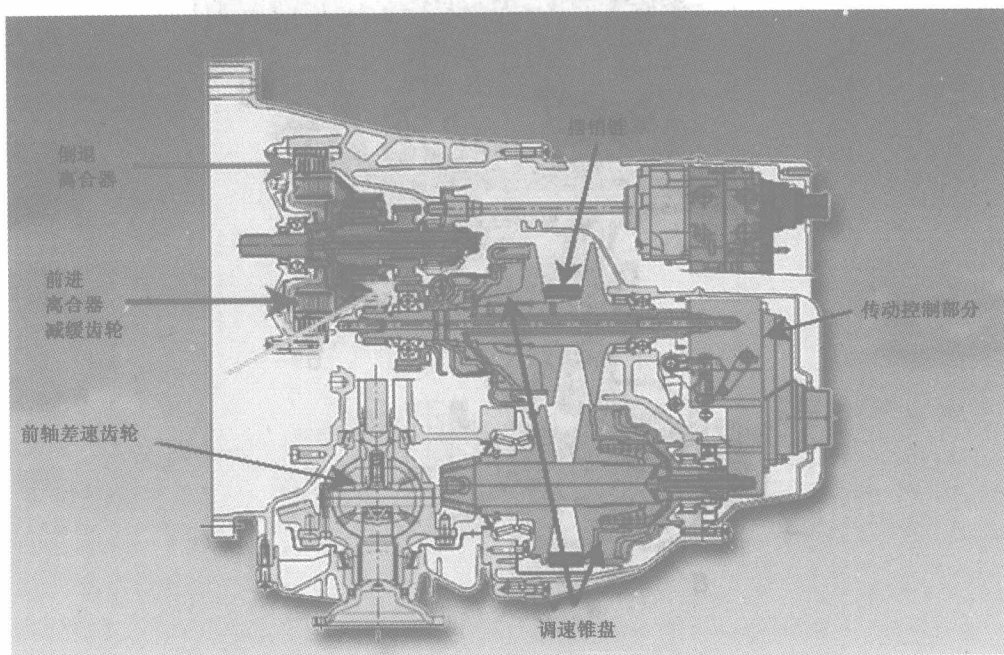


图 1-5 Multitronic 的剖面简图

与金属带式 CVT 不同的是, 它将无级变速部分放到低速级, 即最后一级。其原因是链传动的多边形效应在高速级时会产生更大的振动、噪声和动态应力。所以在其最新的结构中, 加装了导链板以减少振动和噪声。但是由于在低速级传动中, 要求传递的转矩大, 轴向的夹持压力就大, 液压系统的油压也大 (大约为 $8 \sim 9 \text{ MPa}$), 而摩擦盘式离合器所要求的油压又不高, 这样, 液压系统就比较复杂。由此看来, 如果能进一步降低或者消除多边形效应, 将会进一步提高此类传动的水平, 简化整机设计、降低成本。

用两组摩擦盘式离合器和行星转换装置组成前进和倒档离合器, 同时又满足起步离合器的功能要求, 是很成功的设计。这是和 VDT 公司的 P811 相同的。

目前许多公司采用如图 1-3 的设计, 用液力变矩器作为起步离合器, 简化了液压电控系统, 但增加了液力变矩器。而这样的两组摩擦盘式离合器加行星转换装置, 在实现前进和倒档离合器的功能时又显得累赘。

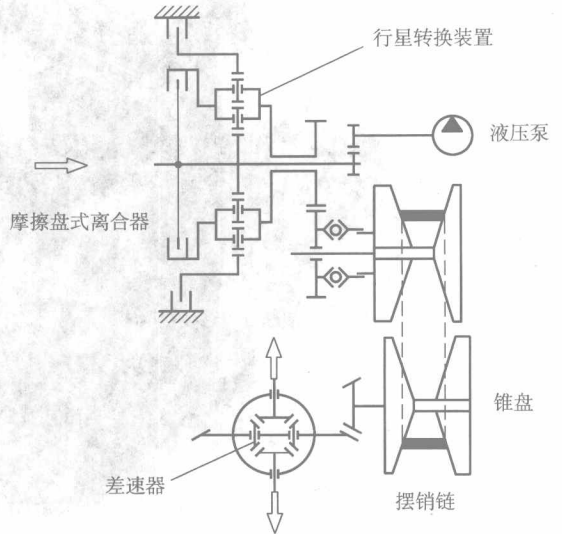


图 1-6 Multitronic 的传动简图

1.2.5 环盘滚轮式无级变速器

环盘滚轮式无级变速器是英国 Torotrak 公司发明的车用无级变速器, 图 1-7 是其原理图。运动和动力由输入盘靠摩擦力传给滚轮, 滚轮将运动和动力靠摩擦力传给输出盘。当滚轮在垂直于纸面的轴向转动时, 滚轮和两个环盘的接触点连续变化, 输入盘和输出盘接触点 (工作点) 的回转半径连续变化, 实现无级变速传动。图 1-8 是环盘滚轮式无级变速器核心传动部分的三维图, 图 1-9 是一种环盘滚轮式无级变速器的结构示意图。

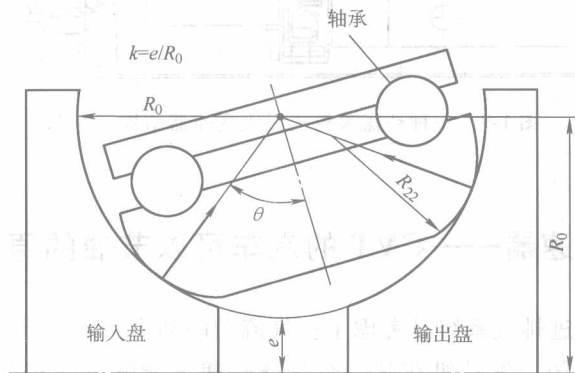


图 1-7 环盘滚轮式无级变速器原理图

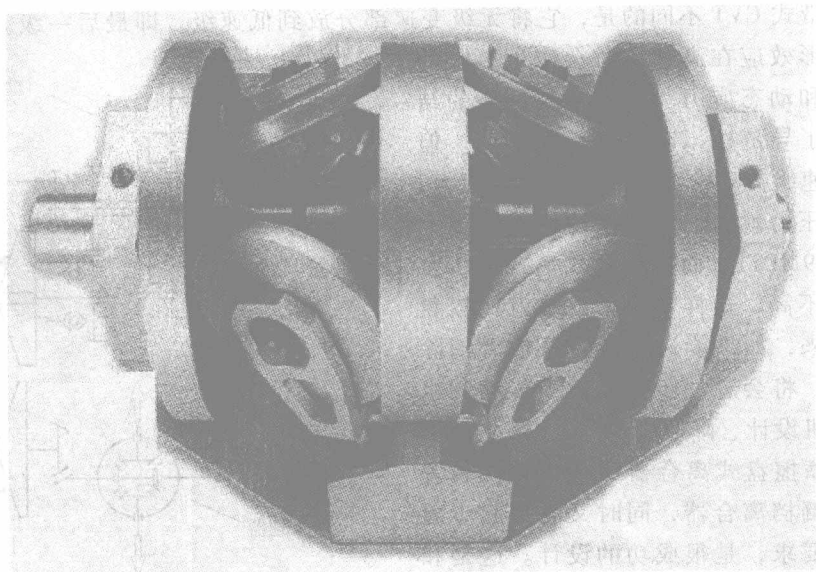


图 1-8 环盘滚轮式无级变速器核心传动部分三维图

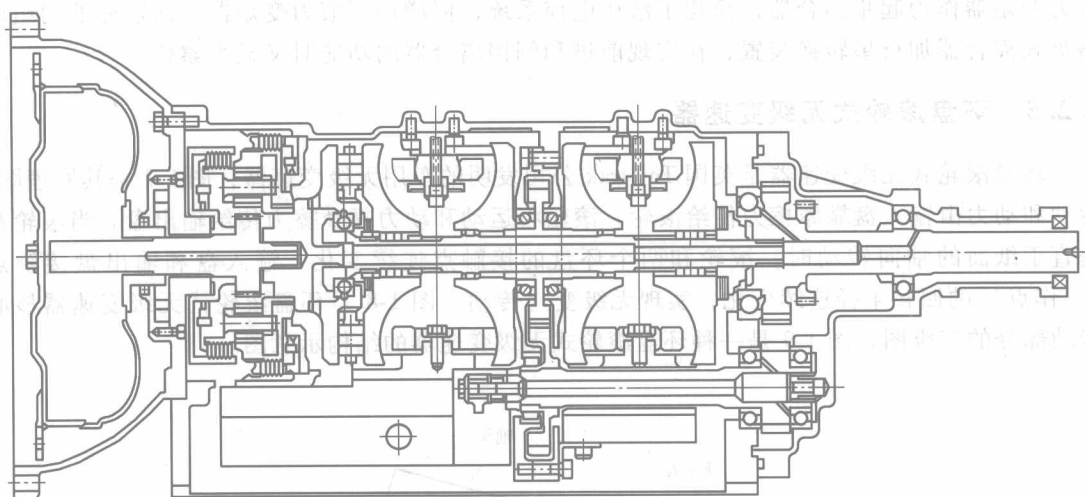


图 1-9 一种环盘滚轮式无级变速器结构示意图

1.3 采用无级变速器——CVT 的汽车可以节油的原理

由于汽车发动机的进排气系统是考虑了空气流动的动力学而设计的，由凸轮轮廓形状决定进气和排气气门的开闭。发动机在某一个最佳转速下能够进气充分、排气充分、燃烧完全、能量利用充分、排气污染少；但离开这一转速就会有进气不充分、排气不充分、燃烧不完全、能量利用差、油耗增加和排气污染增加等问题。

汽车的车速是随机的，在 20 ~ 30km/h 到 150 ~ 180km/h 之间变化。为了很好地利用发

动机的动力和减少油耗,采用有级变速器 (MT 和 AT),在两档之间依靠发动机的转速变化来适应车速的变化,因而发动机无法达到最佳工作状态。

采用液力变矩器的无级变速器,由于其工作原理是用油作为动力传动的介质,许多能量消耗在油的内摩擦上,传动效率低,通常为 80% ~ 85%,比传统的 MT 和 AT 大约费油 10% ~ 20%,而且液力变矩器转差越大,效率越低。通常减速比不大于 2,只能再增加 2 ~ 3 档有级变速,每两档中间用液力变矩器实现无级变速。

无级变速器 (CVT) 可以使发动机在最佳状态下工作,依靠变速器无级调速来适应汽车的各种速度,因此可以使发动机燃烧最好,排气污染最小,达到节油的目的。

目前据国外统计数据,采用 CVT 的汽车比采用 AT 的汽车节油 7% ~ 15%。图 1-10 是德国 ZF 公司所作的在各种道路和行驶条件下,采用 CVT (德文 CFT) 和采用 4 速自动变速器 (4 档 AT) 汽车相比时所节省的燃油消耗。不同的车,每辆车每次试验至少测量 3 次。

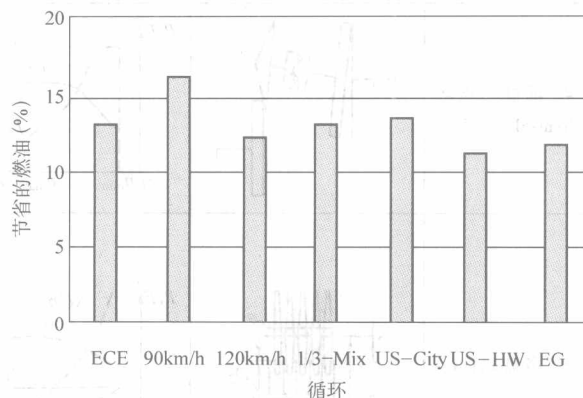


图 1-10 燃油消耗比较

1.4 汽车无级变速器的发展

由于内燃机工作特性的限制,为了发挥内燃机的能力和降低油耗,人们采用了变速器,而最佳的选择是无级变速器。机械无级变速器的种类有很多,表 1-2 列出了目前已经用于工业产品的传动形式。但是,哪些传动形式适合用于汽车传动,取决于其传动能力、功率、效率、转矩、比功率和速度范围。到目前为止,能够用于汽车无级变速传动的只有宽 V 形胶带式无级变速、金属带式无级变速、摆销链式无级变速和环盘滚轮式无级变速传动。

表 1-2 无级变速传动类型

名称	简图	机械特性	特性参数	特点及应用举例
1. 无中间元件的机械无级变速器				
1. 滚轮平盘式		轮主动、恒功率,盘主动、恒转矩	$i_s = 0.5 \sim 2; R_{bs} = 4$ (单滚)、15 (双滚); $P_1 \leq 4 \text{ kW}; \eta = 0.8 \sim 0.85$	相交轴,升、降速型,可逆转;用于机床、计算机构、测速机构
2. 锥盘环盘式 (Prym-SH)			$i_s = 0.25 \sim 1.25; R_{bs} \leq 5; P_1 \leq 11 \text{ kW}; \eta = 0.5 \sim 0.92$	平行轴或相交轴,降速型,可在停车时调速;用于食品机械、机床、变速电动机等

(续)

名称	简图	机械特性	特性参数	特点及应用举例
2. 锥盘环盘式 (Prym-SH)			$i_s = 0.125 \sim 1.25$; $R_b \leq 10$; $P_1 \leq 15 \text{ kW}$; $\eta = 0.85 \sim 0.95$	同轴或平行轴, 降速型; 船用辅机
3. 多盘式 (Re- ier)			$i_s = 0.2 \sim 0.8$ (单级)、 $0.076 \sim 0.76$ (双级); $R_b = 3 \sim 6$ (单级)、 $10 \sim 12$ (双级); $P_1 = 0.5 \sim 150 \text{ kW}$; $\eta = 0.75 \sim 0.87$; $\varepsilon = 2\% \sim 5\%$ (单级)、 $4\% \sim 9\%$ (双级)	同轴线, 降速型; 用于化纤、纺织、造纸、橡塑、电缆、搅拌机械、旋转泵等
4. 光轴斜环式 (Uhing)			$v_2 = 0.0183 \sim 1.16 \text{ m/min}$; $n_1 = 100 \sim 1000 \text{ r/min}$; $F = 50 \sim 1800 \text{ N}$	直线移动, 可正、反转, 可停车时调速; 用于电缆机械、举重器等

2. 有中间元件机械无级变速器

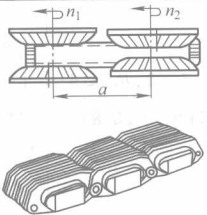
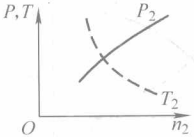
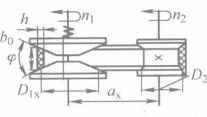
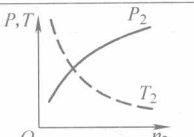
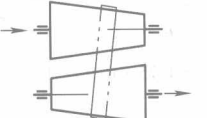
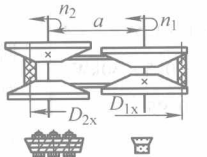
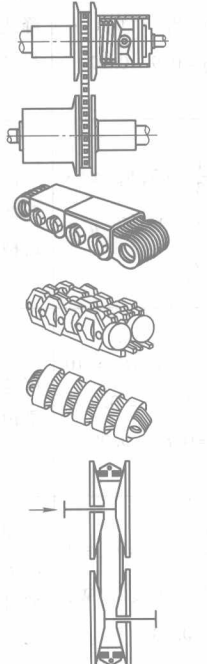
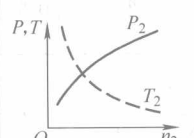
(1) 刚性中间元件无级变速器

5. 滚锥平盘式 (FU)			$i_s = 0.17 \sim 1.46$; $R_{bs} \leq 8.5$; $P_1 = 26.5$ ($R_b \approx 8.5$) ~ 104 ($R_b \approx 2$) kW ; $\eta = 0.87 \sim 0.93$ 以上四滚锥单滚锥; $R_b < 10$; $P_1 \leq 3 \text{ kW}$; $\eta = 0.77 \sim 0.92$	同轴或平行轴, 升、降速型; 用于试验设备、机床主传动、运输、印染及化工机械
6. 钢球平盘式 (PIV-KS)			$i_s = 0.05 \sim 1.5$; $R_{bs} \leq 25$; $P_1 = 0.12 \sim 3 \text{ kW}$; $\eta \leq 0.85$	平行轴, 升降速型; 用于计算机、办公及医疗设备、小型机床

(续)

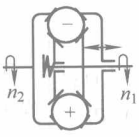
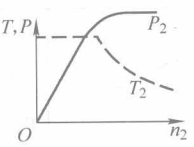
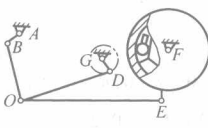
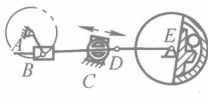
名称	简图	机械特性	特性参数	特点及应用举例
7. 长锥钢环式			$i_s = 0.5 \sim 2; R_{bs} \leq 4;$ $P_1 \leq 3.7 \text{ kW}; \eta \leq 0.85$	平行轴, 升降速型; 用于机床、纺织机械等, 有自紧作用, 不需加压装置
8. 钢环分离锥式(RC)			$i_s = \frac{1}{3.2} \sim 3.2; R_{bs} \leq 10 (16); P_1 = 0.2 \sim 10 \text{ kW}; \eta = 0.75 \sim 0.9$	平行轴, 对称调速型, 钢环自紧加压; 用于机床、纺织机械等
9. 滚轮整环式 (RF 单级) (Hayes 双级)			$i_s = 0.1 \sim 3.5; R_{bs} = 4 \sim 12; P_1 = 0.5 \sim 30 \text{ kW}; \eta = 0.8 \sim 0.95$	同轴线, 升降速型; 用于航空工业、汽车
10. 滚轮半环式(Toroidal)			$i_s = 0.22 \sim 2.2; R_{bs} = 6 \sim 10; P_1 = 0.1 \sim 40 \text{ kW}; \eta = 0.9 \sim 0.92$	同轴线或相交轴, 升降速型; 用于机床、拉丝机、汽车等
11. 钢球外锥轮式(Kopp-B)			$i_s = \frac{1}{3} \sim 3; R_{bs} \leq 9; P_1 = 0.2 \sim 12 \text{ kW}; \eta = 0.8 \sim 0.9$	同轴线, 升降速型, 对称调速; 用于纺织、电影机械、机床等
12. 钢球内锥轮式(Free Ball)			$i_s = 0.1 \sim 2; R_{bs} = 10 \sim 12 (20); P_1 = 0.2 \sim 5 \text{ kW}; \eta = 0.85 \sim 0.90$	同轴线, 升、降速型, 可逆转; 用于机床、电工机械、钟表机械、转速表等
13. 菱锥式 (Kopp-K)			$i_s = \frac{1}{7} \sim 1.7; R_{bs} = 4 \sim 12 (17); P_1 \leq 88 \text{ kW}; \eta = 0.8 \sim 0.93$	同轴线, 升、降速型; 用于化工、印染、工程机械、机床主传动、试验台等

(续)

名称	简图	机械特性	特性参数	特点及应用举例
(2) 挠性中间元件无级变速器				
14. 齿链式 (PIV-A) (PIV-AS) (FMB) 滑片链			$i_s = 0.4 \sim 2.5; R_{bs} = 3$ $\sim 6; \eta = 0.9 \sim 0.95; P_1 = 0.75 \sim 22\text{kW}$ (A型, 压靴加压) $P_1 = 0.75 \sim 7.5\text{kW}$ (AS型, 剪式杠杆加压)	平行轴, 对称调速; 用于纺织、化工、重型机械, 无滑差机床等
15. 单变速带轮式			$i_s = 0.50 \sim 1.25; R_{bs} = 2.5; P_1 \leq 25\text{kW}; \eta \leq 0.92$	平行轴, 降速型, 中心距可变; 用于食品工业等
16. 长锥移带式		基本为恒功率		平行轴, 升降速型, 尺寸大, 锥体母线应为曲线; 用于纺织机械、混凝土制管机
17. 普通V带、宽V带、块带式			$i_s = 0.25 \sim 4$ (宽V带、块带) $R_{bs} = 3 \sim 6$ (宽V带); $P_1 \leq 55\text{kW}; R_{bs} = 2 \sim 10$ (16) (块带式); $P_1 \leq 44\text{kW}; R_{bs} = 1.6 \sim 2.5$ (普通V带); $P_1 \leq 40\text{kW}; \eta = 0.8 \sim 0.9$	平行轴, 对称调速, 尺寸大; 用于机床、印刷机械、电工、橡胶、农机、纺织、轻工机械等
18. 光面轮链式 a) 摆销链 (RH) b) 滚柱链 (RS) c) 套环链 (RS) d) 金属带式			$i_s = 0.38 \sim 2.4; R_{bs} = 2.7 \sim 10; \eta \leq 0.93$ 摆销链 RH: $P_1 = 5.5 \sim 175\text{kW}, R_{bs} = 2 \sim 6$ RK: $P_2 = 3.7 \sim 16\text{kW}, R_{bs} = 3.6 \sim 10$ 滚柱链 RS: $P_2 = 3.5 \sim 17\text{kW}$ (恒功率用); $P_2 = 1.9 \sim 19\text{kW}$ (恒转矩用) 套环链 RS: $P_2 = 20 \sim 50\text{kW}$ (恒功率用); $P_2 = 11 \sim 64\text{kW}$ (恒转矩用) $i = 0.01 \sim 2.45; R \leq 6; P = 55 \sim 11.0\text{kW}; \eta \leq 0.92$	平行轴, 升降速型, 可停车调速; 用于重型机器、机床和汽车等 平行轴、升降速型; 适用于高速大功率传动; 用于汽车等行业

(续)

名称	简图	机械特性	特性参数	特点及应用举例
3. 行星无级变速器				
19. 内锥输出 行星锥式(B ₁ US)			$i_s = -\frac{1}{3} \sim -\frac{1}{115}$; $R_{bs} \leq 38.5 (\infty)$; $P_1 \leq 2.2 \text{ kW}$; $\eta = 0.60 \sim 0.70$	同轴线, 减速型, 可在 停车时调速; 用于机床 进给系统
20. 外锥输出 行星锥式(RX)			$i_s = -0.57 \sim 0$; $R_{bs} = 33 (\infty)$; $P_1 = 0.2 \sim 7.5 \text{ kW}$; $\eta = 0.6 \sim 0.8$	同轴线, 减速型; 广泛 用于食品、化工、机床、 印刷、包装、造纸、建筑 机械等, 低速时效率低 于 60%
21. 转臂输出 行星锥式(SC)			$i_s = \frac{1}{6} \sim \frac{1}{4}$; $R_{bs} \leq 4$; $P_1 \leq 15 \text{ kW}$; $\eta = 0.6 \sim 0.8$	同轴线, 减速型; 用于 机床、变速电动机等
22. 转臂输出 行星锥盘式(Disco)			$i_s = 0.12 \sim 0.72$, $R_{bs} \leq 6$; $P_1 = 0.25 \sim 22 \text{ kW}$; $\eta = 0.75 \sim 0.84$	同轴线, 减速型; 用于 陶瓷、制烟等机械, 变速 电动机
23. 行星长锥 式(Craham)			$i_s = -\frac{1}{100} \sim \frac{1}{3}$; $P_1 \leq 4 \text{ kW}$; $\eta = 0.85 \sim 0.9$	同轴线, 减速型, 可逆 转, 有零输出转速但特 性不佳, 可在停车时调 速; 用于变速电动机等
24. 行星弧锥 式(NS)			$i_s = -0.85 \sim 0 \sim 0.25$; $R_{bs} = \infty$; $P_1 \leq 5 \text{ kW}$; $\eta = 0.75$	同轴线, 减速型, 可逆 转, 有零输出转速但特 性不佳, 可在停车时调 速; 用于化工、塑料机 械、试验设备等
25. 封闭行星 锥式(OM)			$i_s = -\frac{1}{5} \sim 0 \sim \frac{1}{6}$; $R_{bs} = \infty$ (通常 $n_2 > 20 \text{ r/min}$); $P_1 \leq 3.7 \text{ kW}$; $\eta = 0.65$	同轴线, 减速型, 可逆 转, 有零输出转速但特 性不佳; 用于机床、变速 电动机等

名称	简图	机械特性	特性参数	特点及应用举例
26. 行星钢球 无级变速器 (Planetroll, AR)			$i_s = 0 \sim 0.414$; $R_b = \infty$; $P_1 = 0.03 \sim 7.5 \text{ kW}$; $\eta \leq 0.84$	同轴线、降速型; 用于木工机械
27. 四相摇杆 脉动变速器 (Zerro-Max)		基本为恒转矩	$i_s = 0 \sim 0.25$; $P_1 = 0.09 \sim 1.1 \text{ kW}$; $T_2 = 1.34 \sim 23 \text{ N} \cdot \text{m}$	平行轴, 降速型; 用于纺织、印刷、食品、农业机械等
28. 三相摇块 脉动变速器 (Gussa)		低速时恒转矩 高速时恒功率	$i_s = 0 \sim 0.23$; $P_1 = 0.12 \sim 18 \text{ kW}$; $\eta = 0.6 \sim 0.85$	平行轴, 降速型; 用于塑料、食品、无线电装配运输带等

注: 表 1-2 来自程乃士编著的《减速器和变速器设计与选用手册》, 机械工业出版社, 2007p972 表 3.2-1。

从 1899 年开始就出现了轴向可调锥盘宽 V 形胶带式无级变速器, 直到 1959 年, 荷兰的 Van Doone 的宽 V 形胶带式无级变速器 “Variomatik” 才在 DAF 轿车搭载成功, 总产量达到 825000 辆。

1969 年, Van Doorne 开发轴向可调锥盘金属带式无级变速器, 1975 年实现装车, 1990 年以后开始推广到福特、菲亚特和日本的三菱、尼桑等汽车, 到 2006 年总产量已经达到 250 万辆。

1992 年, 德国的 ZF 和 LUK 公司开发摆销链式无级变速器, 在奥迪 A4 和 A6 轿车上搭载成功, 1994 年批量生产。

1988 年, 日本 NSK 开始开发半环环盘滚轮式无级变速器。1995 年, Torotrak、NSK 和 Mercedes Benz 开发全环环盘滚轮式无级变速器成功。

2000 年, 中国的程乃士教授开始研发无偏斜曲母线锥盘金属带式无级变速器, 2003 年研发无偏斜复合母线锥盘金属带式无级变速器, 2005 年研发无偏斜等强共轭曲母线无级变速器, 并于 2007 年在吉利汽车公司实现装车; 2006 年研发平盘非对称直母线无偏斜金属带式无级变速器, 2007 年在众泰汽车公司实现装车。

1.5 实现汽车无级变速器——CVT 大变速比、大转矩的关键——无偏斜金属带式无级变速传动

对称直母线锥盘情况下 (如 VDT 公司的 CVT), 金属带在变速过程中必然产生偏斜 (详见第 2 章)。此偏斜量限制了锥盘半径, 也限制了变速比。因而, 对称直母线锥盘所产生金属带的偏斜, 一方面限制了车辆节油的经济车速范围; 另一方面限制了锥盘工作半径的

增加,也就是限制了可传递的转矩,即传动能力。目前,汽车 CVT 的变速比一般在 $R_b = 5.5$ 左右,通常用于排量在 2.0L 以下的汽车传动中。

图 1-11 为 VDT 公司的对称直母线锥盘和 LUK 公司的球面母线锥盘情况下,变速比 $R_b = 0.4 \sim 2.4$ 时,金属带(摆销链)产生的偏斜量。

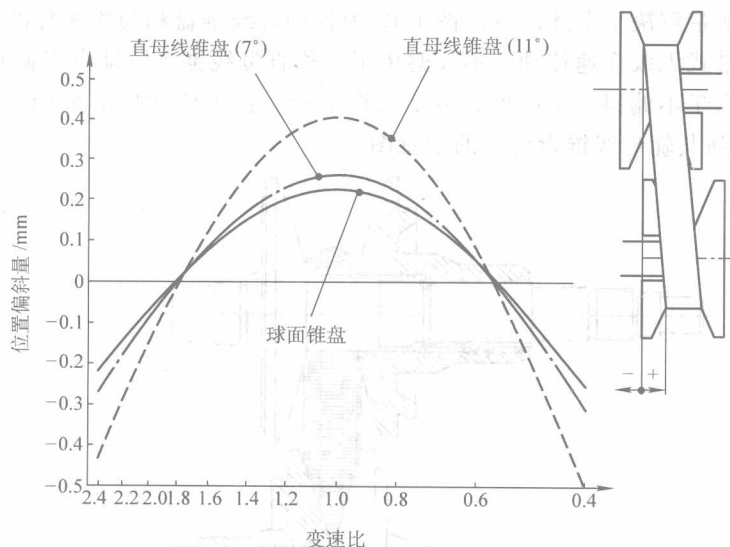


图 1-11 变速过程中金属带的偏斜量

1.5.1 节油的经济车速范围对整车的性能是重要的指标

变速比 $R_b = 5.5$, CVT 控制的节油经济车速范围是 20 ~ 110 km/h, 如果车速大于 110 km/h 时, 离开了 CVT 控制的节油经济车速范围, 只能采用提高发动机的转速适应所希望的车速。我们希望汽车 CVT 的变速比 $R_b = 6 \sim 8$, 也就是说, CVT 控制的节油经济车速范围可达到 20 ~ 120 km/h, 最好到 20 ~ 160 km/h, 即可达到正常行驶状况下全程经济节油的水平。

1.5.2 转矩是变速器传动能力的重要指标

目前, 金属带式 CVT 传递的转矩绝大部分在 $T_{\max} = 250 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以下, 应用范围是排量在

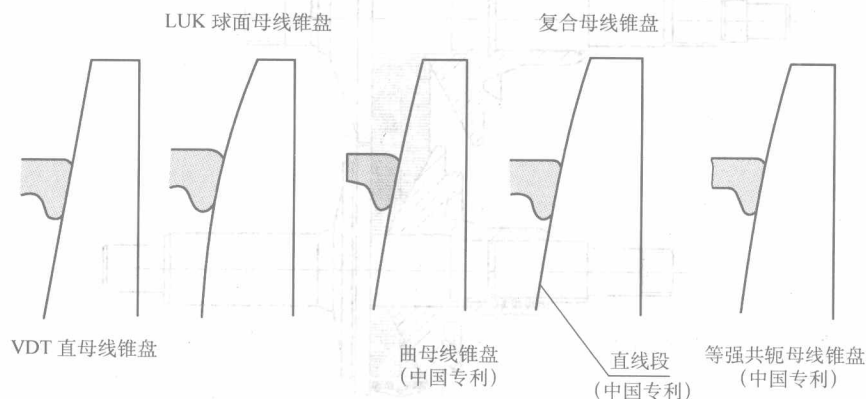


图 1-12 各种母线锥盘和与之相配的金属带的比较