

# 多级液力变速传动装置的工作特性与功率分流原理分析

董泳, 闫国军, 周绪强

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 多级液力变速传动装置 (MSVD) 适合于流体输送机械的速度控制而利于节能。相比于调速型液力偶合器, (MSVD) 在较宽的速度范围内可以保持较高的传动效率。本文介绍了 MSVD 装置的结构组成、工作原理与特性、各组成部分的相互配合及其监控系统, 通过特性曲线分析了 MSVD 装置在保持液力传动传统优势的同时具有较高工作效率的特点, 并介绍了大功率、高速运行行星变速齿轮的功率分流原理。

**关键词:** 多级液力变速传动装置 (MSVD); 工作原理; 特性; 功率分流

**中图分类号:** TH13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2008)10-063-4

## Analysis on the Working Characteristics and Power Splitting of Multi-stage Variable-speed Drive

DONG Yong YAN Guojun ZHOU Xuqiang

(School of Energy Science and Engineering Harbin Institute of Technology Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The multi-stage variable-speed drive (MSVD) is suitable for the speed control of fluid flow machine in order to save energy. Compared with variable-speed fluid coupling it has higher efficiency in a wide operating speed spectrum. The structure components, working principles and characteristics, cooperating of the components, and monitoring system of the MSVD unit were introduced. The characteristic curves of MSVD were analyzed, it is shown that the MSVD has a high working efficiency while maintaining the traditional advantages of hydrodynamic transmission. The principle of power splitting was introduced for the variable planetary gear with high power and high speed.

**Keywords** Multi-stage variable-speed drive (MSVD); Working principle; Characteristics; Power splitting

### 0 引言

液力传动机械在动力传输方面具有很多优点, 如对负载平稳启动、无级变速、过载保护和可观的节能效果等。但普通的液力传动机械 (如调速型液力偶合器) 在设计工况点存在一定的滑差损失, 且在非设计工况时效率有所降低, 所以出现了高效的新型液力传动装置。多级液力变速传动装置 (MSVD) 是 20 世纪 80 年代后期德国 Voith (福伊特) 公司生产的一种新型高效液力变速传动装置, 它既保持了传统的可调式液力元件的传动特点, 又改善了液力元件低速运行传动效率低的缺陷。该装置采用模块化设计, 把不同的流体动力元件和机械部件组合安装在一起用于特定的传动调速场合, 堪称流体动力学与机械学的完美结合。它的英文名称是 Multi Stage Variable-Speed Drive, 缩写为 MSVD。Voith 公司产品代号为 Vorecon, 英文名称为 Variable Speed Planetary Gear (调速行星齿轮)。

### 1 多级液力变速传动装置的结构组成与特点

图 1 给出的是 Voith 公司 RW 型 MSVD 装置的结构原理图, 这种型号的 MSVD 装置综合运用了液力偶合器、液力变矩器和液力制动器三种主要的液力传动元件, 配以行星齿轮传动机构, 调速范围宽, 调节范

围从最高输出转速的 10% ~ 100%。

系统的组成主要包括以下 7 个部分:

- A—带有匀管及执行机构的调速型液力偶合器;
- B—多片摩擦离合器, 用于将偶合器的泵轮与涡轮闭锁成一体, 消除滑差;
- C—导叶可调式液力变矩器;
- D—带有充液量控制的液力制动器;
- E—固定行星支架的行星齿轮机构, 调节变矩器的输出转速到所需要的叠加转速;
- F—支架旋转的行星齿轮机构, 调整次级输出转速到工作机械, 并用于速度的叠加;
- G—多回路控制器, 实现速度的闭环反馈控制, 并根据转速发出电磁阀控制信号等功能。

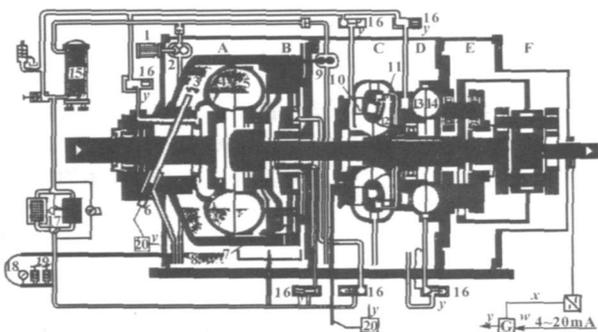
各单体分立元件沿轴向安装布置在卧式壳体中, 保持着同心安装。传动装置集润滑系统于一体, 结构设计紧凑、坚固。由于装置大多用于高功率、高转速的驱动场合, 主传动采用具有高承载能力的滑动轴承, 辅助传动采用耐磨滚动轴承。

从图 1 所示的结构剖面图可知, 与动力输入相关的部件有液力偶合器、闭锁离合器、液力变矩器 (泵轮)、旋转行星齿轮齿圈; 与动力输出相关的部件有液力变矩器 (涡轮)、液力制动器动轮、固定的

收稿日期: 2008-08-08

作者简介: 董泳 (1965—), 男, 汉族, 黑龙江人, 副教授, 硕士, 主要从事流体机械和液力传动与控制方面的教学与科研工作。电话: 0451-86413254, E-mail: ddyymm@vip.sina.com

行星齿轮、旋转的行星齿轮（行星架、行星轮和太阳轮）。



- 1—电动机 2—辅助润滑油泵 3—导管腔 4—耦合器泵轮
- 5—耦合器涡轮 6—导管 7—易熔塞 8—油箱 9—机械油泵
- 10—导叶 11—变矩器涡轮 12—变矩器泵轮
- 13—定轮 14—动轮 15—冷却器
- 16—电磁阀 17—可逆双向滤油器 18—其它机械用润滑油
- 19—润滑油检测仪表 20—执行器  $w$ —设定值  $x$ —实际反馈值  $y$ —控制输出量

图 1 多级液力变速传动 (MSVD) 装置的结构组成

## 2 系统工作原理与特性

### 2.1 组成部分的工作及相互配合

#### (1) 低转速运行

转速工作范围是最高输出转速的 20% ~ 80%，如图 2 所示，MSVD 的工作类似一个传统的调速型液力耦合器，只有调速型液力耦合器和行星齿轮投入工作，调节输出转速适应负载工况变化。输出轴转速的调节通过调整匀管的位置改变耦合器工作腔中的充液量来实现，力矩通过行星齿轮传递给输出轴。闭锁离合器打开，液力变矩器处于排空状态；液力制动器内充油，对固定的行星齿轮制动使其连续缓慢地减速，防止齿轮箱的磨损及振动。耦合器的另一个作用是实现驱动电机的空载起动，消除扭振，使工作机械平地运行。

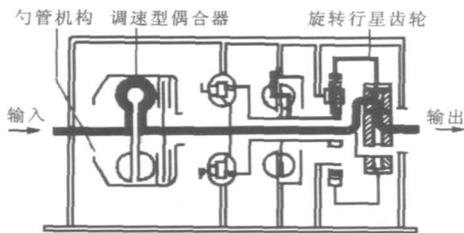


图 2 MSVD 装置在较低转速下运行

#### (2) 高转速运行

转速工作范围是最高输出转速的 80% ~ 100%，如图 3 所示，调速型液力耦合器泵轮与涡轮由多片式摩擦离合器闭锁成一个刚性的整体，液力制动器排空，液力变矩器承担速度的调节控制，通过转动的行

星齿轮改变输出转速。原动机的大部分功率由输入轴 → 行星齿轮 → 输出轴，一小部分功率从液力变矩器的泵轮分流，通过涡轮、固定的行星齿轮和太阳轮汇集到输出轴。输入轴、变矩器的泵轮和旋转行星齿轮的齿圈以同样的恒定转速转动。

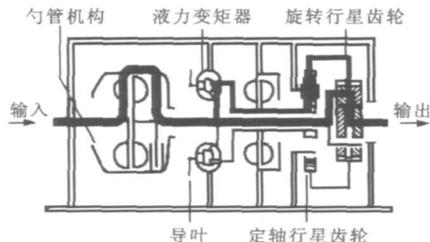


图 3 MSVD 装置在较高转速下运行

调整液力变矩器导叶的位置，涡轮输出转速随之改变。而变矩器的涡轮又通过固定的行星齿轮通过耦合钢套与转动行星齿轮的行星架相连，因此，旋转行星齿轮的行星轮速度也要改变，进而导致输出轴（与旋转的行星齿轮的太阳轮相连）转速的变化。

#### (3) 闭锁离合器和液力制动器

闭锁离合器由多个摩擦片组成，它的作用是当进入高速运行范围后，离合器动作，把调速型耦合器的泵轮和涡轮闭锁成一个整体，消除液力耦合器工作时存在的 1% ~ 3% 的滑差。因为需要克服的速度滑差本身也很小，所以离合器的工作只需提供很小的动力。

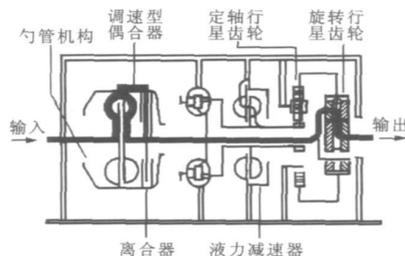


图 4 MSVD 装置离合器闭锁

液力制动器工作于低速运行范围，连续提供对行星齿轮系的制动力矩，使得齿轮与耐磨轴承慢速转动，免受磨损、侵蚀的影响，同时又具有对行星齿轮系的超速保护功能。

#### (4) 多回路控制器

多回路控制器实际是一个直接数字控制系统 (DDC)，如图 5 所示。根据控制器的输入信号（如 0/4 ~ 20mA），监控系统主要完成以下功能：

- 工作范围的选择（低速或者高速运行）；
- 实际值（振动、温度、压力等）的采样比较；
- 偏差控制；
- 确定切换工作点耦合器匀管和变矩器导叶的工

作位置;

- 耦合器、离合器、制动器及液力变矩器控制阀的开关控制;
- 故障检测报警。

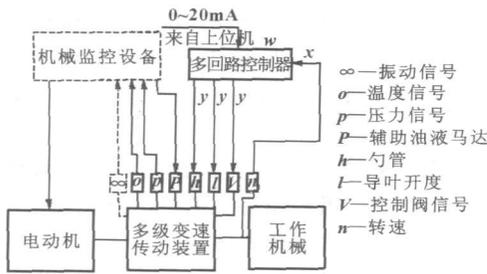


图 5 MSVD 装置监控系统

### 2.2 特性曲线与效率

#### (1) 转矩特性

图 6 给出了低速运行液力耦合器调速特性曲线、高速运行液力变矩器调节特性曲线及二者的重叠部分，与液力元件单独工作时的曲线形状很相似。可以看出，在牵引工况下，无论对于叶片式泵与风机抛物线类负载还是压缩机、磨煤机等恒转矩负载，系统的工作点都是稳定的。工作机械的反转工况只能出现在耦合器工作区域内，而这种情况可以通过增加耦合器的充液量得以调整。重叠区域提供了一个减少离合器切换频率的滞后缓冲区，这对系统的工作稳定性是有利的。

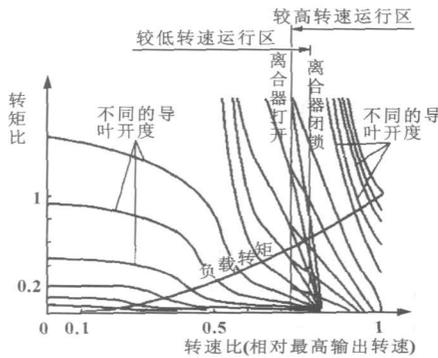


图 6 力矩特性曲线

#### (2) 效率特性

由图 7 可以看出，与调速型液力耦合器相比，MSVD 装置在整个速度范围内使传动效率得以改善。注意图 6 和图 7 横坐标的转速比是不同的，图 7 中的转速  $n_0$  实际上就是离合器闭锁耦合器的泵轮与涡轮成为一体后的输出转速，即输入轴转速；而  $n_T$  为耦合器的涡轮达到的、向高速工作区切换的转速。通过叠加合适的齿轮装置，可以使低速到高速的切换区域适应工作机械总体负载工况，从而使得系统工作点经常能够位于高效区范围内。

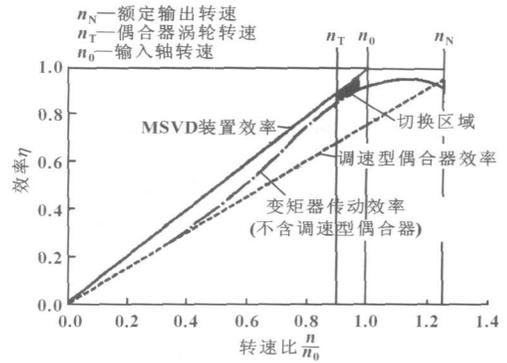
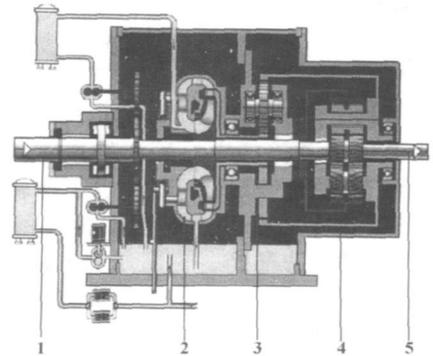


图 7 耦合器与 MSVD 的效率比较

### 3 行星齿轮的功率分流

下面以 Voith 公司的 RWE 型多级液力变速传动装置为例，分析系统的功率分流原理。



1—输入轴 2—可调式液力变矩器 3—固定行星齿轮 4—耦合钢套 5—输出轴

图 8 RWE 型多级变速传动装置剖面图

RWE 型是 Vorecon 系列最紧凑的一种形式，基本组成为 1 个液力变矩器、1 组固定的行星齿轮和 1 组旋转的行星齿轮。Vorecon 的运行基于功率分流原理，即大部分的功率直接通过主轴和行星齿轮以机械形式传递，只有工作机械有必要调速的一小部分功率通过液力变矩器叠加在旋转的行星齿轮上。由于大部分功率都是以机械形式传递，整个装置的效率可以超过 95%。MSVD 在输出高速时的调速由较小的那部分功率经过液力变矩器实现，这也是它具有高调节效率的原因所在。

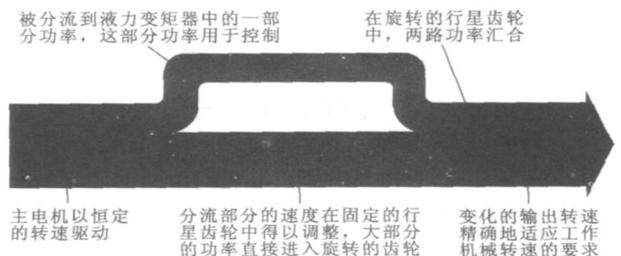


图 9 系统的功率分流

图 10 给出了旋转行星齿轮的圆周速度分布, 也表明了行星齿轮系具有把分流的功率通过行星架叠加的功能。齿圈以定速由驱动电机带动旋转, 如果行星架的速度为  $Q$  太阳轮也是以某个定速旋转, 由于存在齿轮系的传动比, 太阳轮的转速要高一些。如果行星架由变矩器涡轮驱动, 太阳轮则被叠加上一个额外的速度。行星架可以不同的速度由正反 2 个方向驱动, 使行星齿轮系获得连续变化的传动比, 从而使太阳轮获得不同的输出转速。

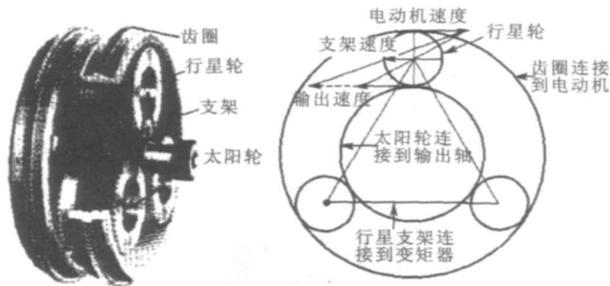


图 10 行星齿轮及圆周速度分布

图 11 给出了分流功率对输出转速三次方的关系曲线。太阳轮的输出功率  $P_3$  相当于传输给工作机械的功率, 这个功率包含: 齿圈传递的功率  $P_1$  和行星支架传递的功率  $P_2$ 。齿圈通过主输入轴直接与驱动电机相连, 接近 75% 的主电机功率通过行星齿轮系高效地传递给工作机械; 行星架的功率  $P_2$  则通过液力变矩器传递, 固定的行星齿轮用于调整变矩器涡轮与旋转行星齿轮系行星架之间的速度, 只有大约 25% 的主轴功率从可调式液力变矩器分流到行星支架, 也只有这部分功率受液力变矩器工作效率的影响, 一般变矩器的效率可以达到 89%, 也就是说, 在液力变矩器中的损失功率占变矩器分流功率的 11% 左右, 相对于整个传递功率, 比例则更小一些。

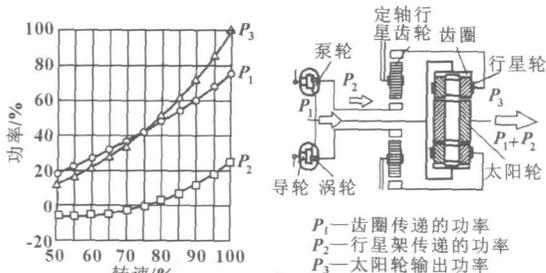


图 11 行星齿轮的功率分流

对于配置液力制动器的 MSVD 装置, 图 11 中的负功率表明, 在低转速时变矩器涡轮由液力制动器制动, 由制动器消耗了一部分功率, 转换为热量散失。

#### 4 结束语

多级液力变速传动 (MSVD) 装置的各个组成部

分都采用了成熟可靠的技术, 即使在恶劣的工作环境中也能保持相当高的可靠性, 其最大的优势在于较宽的转速范围内能够保持高效率的动力传输, 可比拟电气传动。目前, MSVD 装置的功率范围可以从 1 000~ 50 000kW, 转速范围从 100~ 20 000r/min。

该装置可应用于以下领域:

- (1) 能源工业。电站锅炉给水泵, 送、引风机, 磨煤机等。
- (2) 石油和天然气工业、石化行业。管线压缩机, 制冷压缩机, 氢再循环压缩机, 液化天然气气体压缩机, 液化天然气闪蒸气压缩机等。
- (3) 其它工业中的压缩机、泵和风机的驱动。

#### 参考文献

【1】杨乃乔, 姜丽英. 液力调速与节能 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000 5.  
 【2】G. Wahl Improvement of Efficiency of Hydrodynamic Variable-speed Coupling Multi-stage Variable-speed Drive—a New Development [Z]. Cr556 e 12/97. 2 VGB  
 【3】Georg Wahl 50MW Power Transmission for Variable Speed with Variable Planetary Gear [Z]. Cr588 e 09/99 2000 K&E  
 【4】Dipl.-Ing. H. Holler Multi-stage Variable-speed Drive—a Hydrodynamic Planetary Gear Unit with High Efficiency [Z]. Cr561 e 03/93. 2 ho  
 【5】朱经昌, 魏宸官, 等. 车辆液力传动 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982 11

(上接第 62 页)

腔两相流识别提供技术支持, 而且可以具有较高的流型辨识率。

#### 参考文献

【1】刘涛, 曾祥利, 曾军. 实用小波分析入门 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006  
 【2】史习智, 等. 信号处理与软计算 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004  
 【3】王强, 周云龙, 程思勇, 王俊霞. 基于小波和 Elnan 神经网络的气液两相流流型识别方法 [J]. 热能动力工程, 2007 22 (2): 168–175  
 【4】张凤娟, 陈国定, 吴昊天. 基于神经网络的航空发动机轴承腔气液两相流流型辨识方法研究 [J]. 润滑与密封, 2005 (2): 44–46  
 【5】MIY, ISHIM, TSOUKALASLH. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 204 (1/3): 87–100  
 【6】张凤娟. 气液两相流流型辨识研究及在轴承腔中的仿真实现 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005