

液力传动理论与设计

马文星 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

液力传动理论与设计/马文星编著. —北京: 化学工业出版社, 2004. 4

ISBN 7-5025-5474-2

I. 液… II. 马… III. 液力传动 IV. TH137.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 041683 号

液力传动理论与设计

马文星 编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 闫 敏

责任校对: 郑 捷

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{1}{4}$ 字数 439 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5474-2/TH·200

定 价: 40.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

液力传动以其独特的优越性在汽车制造、工程机械、矿山机械、石油、化工、冶金、军工等领域得到了广泛应用。作者根据多年来在液力传动方面的研究经验和心得，并参考国内外有关资料，编著了这本《液力传动理论与设计》，希望对液力传动的教学、科研和生产能有所帮助。

本书系统介绍了液力传动知识，尽量做到理论严谨，结构合理，文字精练，易于理解，概念与物理现象相协调。全书理论联系实际，具有很宽的适用面。

全书分 10 个部分，在绪论之后，分别讨论了液力传动基础知识、液力变矩器、液力偶合器、液力减速器、液力变矩器设计、液力机械分流传动、液力传动装置、液力变矩器三维流动计算以及液力传动试验，每一部分内容都结合工程应用给出实例。

本书除了注重理论和设计方法的系统性和完整性以外，还特别注意工程应用。内容既重视理论又强调实际，包括了液力传动各个方面的知识及其发展和应用。书中一些章节涉及了液力传动的最新研究和发展动态，与实际液力传动的发展现状紧密联系。

本书由吉林大学马文星教授编著。参加本书编写工作的还有邓洪超、褚亚旭、徐振国、荆宝德、于青海、王辉、李风、王清松、才委、崔志军、赵刚、齐迎春参加了本书的绘图和书稿的整理工作。全书由吉林大学刘文同研究员主审。

书中疏漏和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者 于吉林大学

2003 年 12 月 26 日

目 录

绪论	1
0.1 液力传动定义	1
0.2 液力传动发展简史	1
0.2.1 液力传动的出现与发展	1
0.2.2 液力传动在国外的应用	2
0.3 液力传动在我国的发展与应用	3
0.4 液力传动的优缺点	4
0.4.1 液力传动的优点	4
0.4.2 液力传动的缺点	4
0.5 液力传动的分类	5
0.5.1 液力耦合器	5
0.5.2 液力变矩器	5
0.5.3 液力机械变矩器	6
0.6 液力传动研究现状与发展趋势	6
0.6.1 多普勒激光测速 (LDA) 和粒子图像测速 (PIV) 技术	6
0.6.2 CFD 专用软件对流场进行数值模拟与仿真	6
0.6.3 三维流动理论叶片设计方法	6
0.6.4 动态特性研究	7
0.6.5 动态匹配	7
第 1 章 液力传动基础知识	8
1.1 理想流体及实际流体运动微分方程	8
1.2 液体运动的流量方程和伯努利方程	10
1.2.1 流量方程	10
1.2.2 伯努利方程	11
1.3 液体在叶轮中的运动	13
1.3.1 液体在叶轮中的运动分析	13
1.3.2 一元束流理论的假设	13
1.3.3 速度的计算	15
1.4 叶片式机械的基本方程——欧拉方程	16
1.4.1 动量矩方程和速度环量	16
1.4.2 欧拉方程的一般形式	19
1.5 相似原理	20
1.5.1 流动中的力学相似原则	20

1.5.2	根据相似原理建立的相似定律	21
1.6	叶片数目有限对液流的影响	24
1.7	液力传动的各种损失	28
1.7.1	液力损失	28
1.7.2	机械损失	32
1.7.3	容积损失	34
1.8	液力传动的工作液体	36
1.8.1	工作液体的密度和黏度	36
1.8.2	对工作液体的要求	37
第2章	液力变矩器	39
2.1	液力变矩器的结构和工作原理	39
2.2	液力变矩器的特性	41
2.2.1	液力变矩器的外特性	41
2.2.2	液力变矩器的原始特性	42
2.2.3	液力变矩器的全特性	44
2.2.4	液力变矩器的输入特性	46
2.2.5	液力变矩器的动态特性	47
2.2.6	动态特性辨识	51
2.3	液力变矩器的分类和结构特点	68
2.3.1	液力变矩器的分类	68
2.3.2	液力变矩器的结构特点	69
2.4	液力变矩器泵轮、涡轮、导轮的工作特性	85
2.4.1	液力变矩器泵轮的工作特性	85
2.4.2	液力变矩器涡轮的工作特性	87
2.4.3	液力变矩器导轮的工作特性	89
2.5	液力变矩器的转矩、功率及特性计算	91
2.5.1	液力变矩器的转矩和功率计算	91
2.5.2	液力变矩器的特性计算	94
2.6	液力变矩器与发动机的共同工作	95
2.6.1	液力变矩器与发动机的共同工作	95
2.6.2	变矩器与发动机的计算机辅助匹配	96
2.6.3	液力变矩器尺寸的选择	98
2.7	液力变矩器的各种性能及其评价标准	101
2.7.1	变矩性能	101
2.7.2	自动适应性能	101
2.7.3	经济性能	102
2.7.4	负荷特性	102
2.7.5	透穿性能	103

2.7.6	能容性能	104
2.8	液力变矩器补偿压力的选择及冷却系的计算	106
2.8.1	液力变矩器补偿压力的选择	106
2.8.2	液力变矩器冷却系的计算	108
第3章	液力耦合器	109
3.1	液力耦合器的工作原理	109
3.1.1	耦合器的基本工作过程	109
3.1.2	耦合器转矩的传递	111
3.1.3	耦合器的流量	113
3.2	耦合器的特性	114
3.2.1	耦合器的外特性	114
3.2.2	耦合器的基本计算方程	116
3.2.3	耦合器的原始特性	116
3.2.4	耦合器的通用特性	118
3.2.5	耦合器部分充液时的工作特性	118
3.3	耦合器和原动机的共同工作	120
3.3.1	耦合器和内燃机的共同工作	120
3.3.2	耦合器与异步电动机的共同工作	122
3.4	液力耦合器的结构及分类	124
3.4.1	牵引型耦合器	124
3.4.2	限矩型耦合器	125
3.4.3	调速型耦合器	129
3.4.4	斜叶片式耦合器	131
第4章	液力减速器	133
4.1	概述	133
4.2	车辆用液力减速器	134
4.2.1	机车用液力减速器	134
4.2.2	汽车用液力减速器	134
4.3	固定设备用液力减速器	137
第5章	液力变矩器设计	142
5.1	相似设计法	142
5.2	液力变矩器循环圆设计	143
5.2.1	循环圆形状的选择	143
5.2.2	工作轮在循环圆中的排列位置	144
5.2.3	循环圆尺寸的确定	144
5.3	叶片设计方法	146
5.3.1	环量分配法	146
5.3.2	等角射影法	152

5.4	叶片准三维设计	164
5.4.1	液力变矩器准三维流动设计计算的物理模型和基本方程	164
5.4.2	流线曲率法	169
5.4.3	准三维叶片设计	175
5.5	反求设计法	178
5.6	液力变矩器叶片参数和工艺因素对性能的影响	182
5.6.1	叶片参数对变矩器性能的影响	182
5.6.2	尺寸和工艺因素对变矩器性能的影响	184
5.6.3	叶片数 z 对性能的影响	185
5.7	叶轮上的轴向力分析	186
5.7.1	液力变矩器轴向力计算	186
5.7.2	降低轴向力的措施	189
5.8	液力变矩器的结构布置	191
5.9	单向离合器及锁止离合器设计	195
5.9.1	单向离合器设计	195
5.9.2	锁止离合器设计	199
第6章	液力机械分流传动	201
6.1	液力机械分流传动的分类	201
6.2	基本方程	203
6.2.1	功率方程	203
6.2.2	转速比方程	203
6.2.3	变矩比方程	205
6.2.4	用于输入分流的泵轮的转速和功率	206
6.3	用于特定变矩器的方程	207
6.3.1	输出分流的泵轮功率	207
6.3.2	输出分流的失速变矩比	208
6.3.3	效率	209
6.3.4	分流传动的转矩系数	210
6.4	分流传动特性的计算方法及实例	212
6.4.1	输入分流传动特性的计算方法	212
6.4.2	输出分流传动特性的计算方法	213
第7章	液力传动装置	216
7.1	动力换挡定轴变速器设计	216
7.1.1	确定离合器的布置位置	216
7.1.2	选配齿轮	219
7.1.3	特殊结构的设计	221
7.1.4	结构实例	221
7.2	动力换挡行星变速器的设计	223

7.2.1	行星变速器的特点与结构	223
7.2.2	行星变速器传动比的计算	225
7.2.3	选配齿轮	226
7.2.4	行星传动的动力学分析	229
7.2.5	行星变速器设计	234
7.3	操纵系统与自动换挡	236
7.4	电子-液压操纵系统	240
7.4.1	电子-液压操纵系统的组成	240
7.4.2	电子-液压操纵系统示例	242
第8章	液力变矩器三维流动计算	245
8.1	引言	245
8.2	基本控制方程	245
8.2.1	连续性方程	245
8.2.2	黏性流体运动微分方程	246
8.3	湍流模型	248
8.3.1	雷诺方程	248
8.3.2	湍流的计算方法	249
8.3.3	控制方程统一计算形式	253
8.4	模型的建立	254
8.5	分析方法的选择	255
8.5.1	各种数值方法求解对流-扩散方程的特点	255
8.5.2	有限体积法的基本原理	259
8.5.3	计算分析中的假定	260
8.6	仿真计算模型的网格划分	261
8.7	湍流模型的选择	261
8.8	液力变矩器流场计算模型的边界条件	262
8.9	三维流场计算结果分析	263
8.9.1	泵轮流场的计算结果	263
8.9.2	涡轮流场的计算	265
8.9.3	导轮流场的分析	268
第9章	液力传动试验	271
9.1	试验目的和试验项目	271
9.1.1	试验目的	271
9.1.2	试验项目	271
9.2	主要试验设备和测试仪器	272
9.2.1	试验设备	272
9.2.2	测试仪器	276
9.2.3	其他辅助试验设备	279

9.3 液力变矩器基本性能试验方法	280
9.3.1 外特性试验	280
9.3.2 内特性试验	285
9.4 实用性能试验和生产检验性试验	291
9.4.1 实用性能试验	291
9.4.2 生产检验性试验	293
参考文献	295

绪 论

0.1 液力传动定义

现代机械种类繁多，机械系统也愈来愈复杂。但从实现系统功能的角度分解，机械系统主要包括动力系统、执行系统、传动系统、操纵系统、框架支撑系统等子系统。

传动系统是机器的重要组成部分，其作用是将动力系统产生的运动和转矩传递给执行机构；在传递运动和转矩的同时调节或变换动力系统的性能，满足执行系统的要求，以实现预定功能。按照传递能量的方式，传动系统分为四种类型，即机械传动、电力传动、流体传动和复合传动。

在传动系统中，若有一个或一个以上的环节以液体为工作介质传递动力，则此传动系统定义为液体传动系统。在液体传动系统中，以液体传递动力的环节称为液体传动元件，简称为液体元件。若工作介质为气体，则为气压传动。

在液体元件传递能量过程中，机械能首先转变为液体能，再由液体能转变为机械能。液体能量以三种型式存在：动能、压能、位能。

在液体元件中液体相对高度位置没有变化或变化很小，位能变化可以忽略不计。因此，在液体元件中运动液体的能量变换主要表现为动能和压能两种型式。

主要依靠工作液体压能的变化传递或实现能量变换的液体元件称为液压元件，如液压泵、液压马达和液压缸。在传动系统中有一个或一个以上的环节采用液压元件传递动力时称为液压传动。主要依靠工作液体动能的变化传递或实现能量变换的液体元件称为液力元件，如液力偶合器和液力变矩器。在传动系统中有一个或一个以上的环节采用液力元件传递动力时称为液力传动。

0.2 液力传动发展简史

0.2.1 液力传动的出现与发展

液力传动的研究与应用出现于 20 世纪初，液力传动最早应用于船舶工业，作为船舶动力机构（汽轮机）与执行机构（螺旋桨）之间的传动机构。大功率、高转速汽轮机的出现，为船舶工业提供了新型的动力。但由于螺旋桨受到气蚀的限制，转速不能很高。因此，在汽轮机与螺旋桨之间需要设置大功率的减速装置。在当时的技术条件下，齿轮的制造技术水平相对低下，不能制造所要求的精度和表面粗糙度的大直径齿轮。在此情况下，德国的盖尔曼·弗丁格尔教授提出如下设想：把离心式水泵和水轮机用粗管连接，用原动机带动离心式水泵，集水槽中的水被水泵抽上来以后，通过管道进入水轮机，冲击水轮机叶片，使水轮机旋转，水轮机则带动工作机转动，见图 0-1。

这种传动方法可以解决高低转速的变换问题，而且可以解决螺旋桨在推动船只运行过

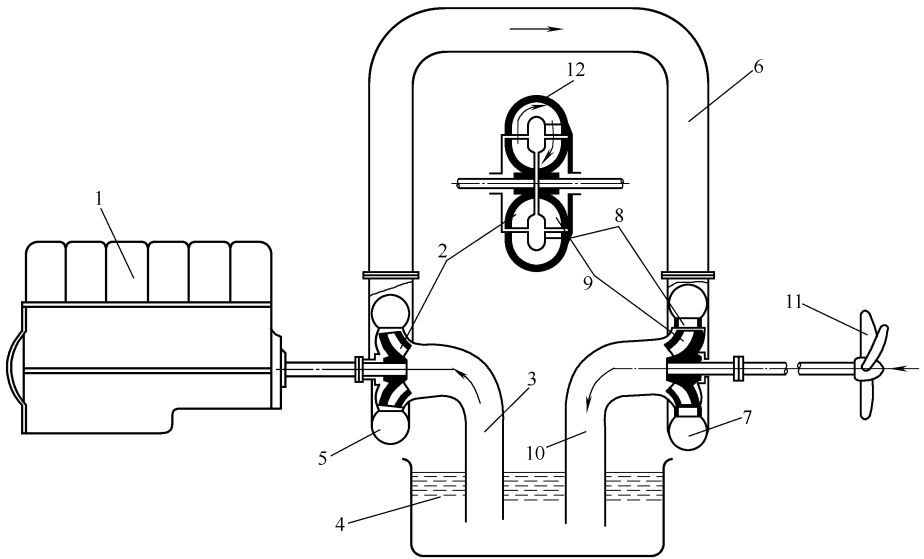


图 0-1 液力传动原理

- 1—发动机；2—离心泵的工作轮；3—离心泵的进水管；4—集水槽；5—泵的涡壳；6—连接管路；
7—水轮机的涡壳；8—导水机构；9—水轮机的工作轮；10—水轮机的尾水管；
11—螺旋桨；12—液力传动的原理简图

程中转矩的变化问题。但这种方案的缺点是传动效率太低，小于 70%。这样的传动效率无法得到实际应用。为了提高传动效率，盖尔曼·弗丁格尔教授将离心泵和水轮机的工作轮尽量靠近，取消进、出水管和水槽等不必要的机构（如图 0-1 中的 12），以具有新的几何形状的泵轮和涡轮取代离心泵和水轮机，构成一个共同的工作液体循环腔。当构成试验功率为 75kW、变矩比 $K=5$ 的液力变矩器时，效率达到 83%。液力传动及其传动元件——液力变矩器从此诞生，并在船舶工业中得到成功应用和发展。1912 年德国客轮“切勒比茨”号上安装的液力变矩器传动效率达到了 88.5%。

伴随科学技术的发展，机械加工制造业得到了迅速的发展。在第一次世界大战前，齿轮制造工艺获得很大发展，船舶工业中的液力传动元件被制造精密的齿轮传动所代替。但在船舶工业应用液力传动的过程中，人们对液力传动的性能特点有所了解和认识，如涡轮转速随负载的变化而自动变化，对传动系统的缓冲与减振等。这些功能对船舶来说不一定那么重要，但对于陆地行驶的车辆却是非常理想和重要的。

根据液力变矩器的这些特性以及陆上行驶车辆对传动系统的要求，在 20 世纪 30 年代，瑞典的阿尔夫·里斯豪姆与英国的史密斯合作，设计了里斯豪姆-史密斯三级液力变矩器，并将其成功应用于城市公共汽车。液力变矩器本身所具有的特殊性能极大地改变了公共汽车的传动特性，因此，许多其他类型的车辆相继安装了液力变矩器。自此，液力变矩器重新得到发展。尤其自第二次世界大战以来，随着军事工业的迅速发展，液力传动得到进一步发展和应用。

0.2.2 液力传动在国外的应用

军事工业对液力变矩器的成功应用，引起世界民用工业，如拖拉机、汽车、工程机械、建筑机械等制造行业的注意，并将液力变矩器广泛引用到各种轮胎和履带式车辆以及

内燃机车的传动系统中。国外的汽车、拖拉机、坦克、自行火炮、装甲运输车、装载机、铲运车、挖掘机以及内燃机车等很多机械和车辆采用了液力传动。美国自 20 世纪 70 年代起，每年在轿车上液力变矩器的装备率达 90% 以上；而在市区公共汽车上液力变矩器的装备率几乎达到 100%。在某些专门用途的车辆，如重型载重汽车及非公路车辆上液力变矩器的装备率亦在 70% 以上。在各种工程机械中，液力传动已经占绝对的优势地位。液力传动不仅广泛应用于各种车辆中，而且也被广泛应用于诸如石油钻探机械、冶金机械、化工机械、矿山机械、食品机械等各种工业机械中，甚至在航空航天机械中也得到成功应用，例如在美国的 B-1 型战略轰炸机上，燃气轮机的启动也采用液力传动。

在汽车工业中，美国的通用汽车公司、福特汽车公司，日本的丰田、日产公司，德国的奔驰、ZF 公司、伦克公司，瑞典的斯堪尼亚公司以及意大利的菲亚特公司等都生产了有液力传动配二挡、三挡或四挡自动变速箱的汽车。

在工程机械方面，日本生产的 KLD100 装载机、美国卡特皮勒公司生产的 950B 和 966D 装载机，日本小松公司生产的 D85-12A 型推土机，美国卡特皮勒公司生产的 T25D、日本丰田公司生产的 42-4FG14 型、日产公司生产的 135DL 和长河 MFL-460 型、意大利菲亚特公司生产的 D115C 型叉车都装备了液力传动装置。

0.3 液力传动在我国的发展与应用

在 20 世纪 50 年代，有关工厂、高等院校、科研单位共同协作，为大功率的“卫星”号内燃机车和“红旗”牌轿车配套研制液力变矩器，成功研制出液力传动系统，开创了我国独立设计、制造液力传动的历史。从此，液力传动在我国获得稳步发展。

1958 年，我国机车工业自行设计制造了“卫星号”（即“东方红 I 型”）液力传动内燃机车。该内燃机车采用两套 735kW 柴油机和液力传动机组。液力传动由三个液力变矩器组成：一个启动液力变矩器，二个相同的运转液力变矩器。以后又研制开发出“东方红（DFH）”型系列液力传动内燃机车。DFH1 型装备一套 735kW 马力柴油机——液力传动机组，作为调车机车；DFH2 型装备两套 735kW 柴油机——液力传动机组，作为客运机车。DFH 型内燃机车的液力传动系统为 SF2010 型液力变速箱，该变速箱包含二个性能不同，但相互配合很好的液力变矩器。同时，440kW 的红旗型和“东方红 4”型 2001 号液力传动内燃机车设计制造成功。1970 年，4400kW 的“北京号”（ 2×2200 kW）液力传动内燃机车设计制造成功，从而使我国进入世界制造大功率液力传动内燃机车的行列。

我国汽车工业自行设计并批量生产的液力传动红旗牌轿车 CA-770，采用了四元件综合式液力变矩器配两挡行星自动变速箱和液压操纵的液力传动系统。在此基础上还设计制造了 CA-774 型红旗牌轿车，它是 CA-770 型的改进型。目前，国产轿车如奥迪、捷达、别克等均有装备液力传动自动变速的型号。

我国自行设计并批量生产的上海牌 32 吨自卸载重汽车（SH180）采用了包含四元件综合式液力变矩器、固定轴式变速箱、液压操纵的液力传动系统。

在工程车辆中，采用液力传动的机械占有优势。装载机中 ZL20、ZL30、ZL40、ZL50、ZL60、ZL70、ZL80、ZL90 以及 ZM425 木材装载机中都采用了液力机械传动。液力元件有三元件综合式变矩器、四元件综合式变矩器或双涡轮液力变矩器；变速箱有定轴

式和行星式两种，采用动力换挡，液压操纵。

在 C₄₇ 型铲运车、C65 型推土铲运机以及 3m³ 短臂挖掘机，在港口、码头、车站、仓库、车间装卸用的叉车上，在轮式和履带式推土机中也采用液力传动系统。

除此之外，我国自行研制的一些石油钻机、采煤机械、龙门吊车、带式输送机、履带式战斗车辆和自行火炮等车辆和机械也都配备了液力元件。

0.4 液力传动的优缺点

0.4.1 液力传动的优点

① 具有良好的自适应性能。采用液力变矩器的工程机械和车辆，在困难和复杂的路面上行驶或外负载增大时，液力变矩器能使车辆自动地增大牵引力，同时自动地降低行驶速度，以克服增大的外负载；反之，当路面情况良好或外负载降低时，车辆又能够自动地减少牵引力和提高车辆的行驶速度，保证发动机能够经常在额定工况下工作。这样既能够避免发动机因外负载突然增大而熄火，又能够满足车辆牵引工况和运输工况的要求，因而具有良好的自动适应性。

② 提高机械和车辆的使用寿命。液力传动的工作介质是液体，各叶轮之间可相对滑转，输入和输出之间无刚性连接，因此液力元件具有减振和抗冲击作用。液力元件既能对发动机曲轴的扭转振动起到阻尼作用，提高传动元件的使用寿命，又能降低来自车辆行走部分或传动系统中的动负载，提高发动机的使用寿命。实验表明，发动机曲轴的扭转振幅通过液力变矩器后，可降低 50% 以上。重型载重汽车液力传动与机械传动的对比实验表明，液力传动比机械传动的最大负荷降低 18.5%，发动机使用寿命延长 47%，齿轮变速箱寿命延长 40%，差速器寿命延长 93%。

③ 提高车辆的通过性和具有良好的低速稳定性。装备有液力传动装置的车辆可以在泥泞、沙、雪等地面上以及非硬化路面上行驶，能够提高车辆的通过性并具有良好的低速稳定性。汽车对比实验表明，采用液力传动的汽车，在软路面起步、行驶时，下陷量减少约 25%，滑转小，附着储备增大 2~3 倍。

④ 简化操纵，提高驾驶员和乘员的舒适性。采用液力传动的车辆，可使车辆平稳起步，并在较大范围内实现无级变速；可以减少换挡或不换挡，简化操纵，减轻驾驶员的疲劳。在行驶过程中，液力元件可以吸收和减少振动、冲击，从而提高车辆乘坐的舒适性。

⑤ 可以不中断地充分利用发动机的功率，有利于降低发动机尾气造成的空气污染。

⑥ 液力元件的可靠度高，使用寿命长。液力元件的工作轮之间没有机械联系，没有机械磨损，工作介质为无机矿物油，保养简单，可靠度高，使用寿命长。

0.4.2 液力传动的缺点

① 液力传动的效率要比机械传动系统的效率低。

② 为了使液力传动系统能够正常工作，需要设置冷却补偿系统，使结构复杂，体积和重量大，成本高。

③ 由于液力元件的输入和输出构件之间没有刚性联系，因此不能利用发动机的惯性

来制动，也不能用牵引的办法启动发动机。如果要改善这方面的性能，则需要有附加装置。

由于液力传动具有其他传动型式所不能比拟的优越性，因此在汽车和工程机械行业和其他机械行业得到了广泛的发展和应用。随着科学技术的发展，液力传动的性能将会得到进一步的提高，其缺点将会逐步得到克服，液力传动将会具有更为广泛的应用前景。

0.5 液力传动的分类

按照液力传动的特点，通常将液力传动分为液力偶合器、液力变矩器和液力机械变矩器三类。

0.5.1 液力偶合器

液力偶合器是利用液体的动能进行能量传递的液力元件，能使主动轴与从动轴之间实现柔性连接，并将主动轴输入的转矩等值地传递给从动轴。因此，液力偶合器也称为液力联轴器。

目前广泛使用的偶合器，按其性能可分为以下四类。

- ① 牵引型偶合器 主要用于传递功率，同时起到柔性离合器的作用。
- ② 安全型偶合器 主要用于机械在常载、重载条件下启动性能的改善，减少机械冲击，有效地保护原动机和工作机械。
- ③ 调速型偶合器 可以根据负载情况（即使负载固定不变）调节偶合器的工况点，达到调节工作机械的目的，以满足生产实际中对工作机械进行无级调速的需要，广泛用于调速节能。
- ④ 普通型偶合器（亦称标准型偶合器） 仅用于要求对系统隔离振动、改善启动冲击或使偶合器只做离合器使用的场所。

0.5.2 液力变矩器

液力变矩器也是利用液体的动能进行能量传递的液力元件。液力变矩器与液力偶合器的区别在于液力变矩器可以根据工况改变其输出转矩。根据液力变矩器的结构和性能特点，通常按照如下方式分类。

- ① 根据工作轮在循环圆中的排列顺序分类，分为 B（泵轮）-T（涡轮）-D（导轮）型（因涡轮正转，亦称正转型）和 B-D-T 型（亦称反转型）液力变矩器。
- ② 根据刚性连接在一起的排列在其他叶轮之间的涡轮数分类，分为单级、双级、三级和多级液力变矩器。
- ③ 根据导轮数分类，分为单导轮和双导轮液力变矩器。
- ④ 根据泵轮数分类，分为单泵轮和双泵轮液力变矩器。
- ⑤ 根据各个工作轮的组合和工作状态分类，分为单相、两相和多相液力变矩器。
- ⑥ 根据涡轮的型式分类，分为轴流式、离心式和向心式液力变矩器。
- ⑦ 根据泵轮和涡轮能否闭锁为一体工作分类，分为闭锁式和非闭锁式液力变矩器。
- ⑧ 根据液力变矩器的特性能否控制分类，分为可调式和不可调式液力变矩器。

0.5.3 液力机械变矩器

液力机械变矩器有功率内分流和外分流两种。如双涡轮变矩器、导轮反转变矩器属于功率内分流；而液力元件与行星排的各种组合传动属于功率外分流，动力机的功率被液力元件和机械传动元件分流，部分功率经由液力元件传动，其他功率经由机械传动元件传动。

通常，液力偶合器、液力变矩器和液力机械变矩器与动力换挡变速器组合在一起成为液力机械传动装置。

0.6 液力传动研究现状与发展趋势

近年来，随着计算流体力学、计算机技术以及流动测试技术的不断发展，对液力传动的研究已经逐渐深入到各个层面，不仅包括液力传动元件本身的结构特点、三维流动计算、三维设计方法、流动测量、相关特性等方面，而且涉及到与液力传动相关的动力装置和传动系的特性及其对液力传动元件特性参数的影响、液力传动元件与动力特性优化研究等各个相关方面的研究，并已取得很多进展。

0.6.1 多普勒激光测速 (LDA) 和粒子图像测速 (PIV) 技术

LDA 技术实现了对流场的无接触测量，测量反射光相对于原入射光多普勒频移量，计算粒子运动速度。LDA 测量方法属单点测量。

PIV 技术用计算机采集流动图像，并通过专门编辑的程序对其进行图像分析，掌握液力变矩器内部流体在不同转速、不同负载条件下的流动过程、流场规律及其模化流动物理过程。在此基础上研究液力变矩器工作轮叶片的三维设计理论以及其他部件的设计计算方法。PIV 粒子图像测速技术的关键问题是粒子速度方向二义性的辨识。可采用三曝光三相关技术使其自动辨识速度方向，并采用专门软件对速度信息进行处理，得到三维流动内流场的速度矢量和数值。

液力传动的发展与实验技术是息息相关的。试验手段的先进与否决定了实验的可靠性与精确性。PIV、LDA 实现了流场的非接触测量和可视化，是近些年来流动试验的主导测试手段。

0.6.2 CFD 专用软件对流场进行数值模拟与仿真

目前有一些比较成熟的 CFD 流动计算软件。国外利用 CFD 软件对液力变矩器三维流场进行模拟，模拟过程及结果显示了软件优越的性能。国内也正在利用 CFD 软件对液力变矩器的内部流场进行仿真研究，模拟的初始条件和边界条件可由激光 PIV 和 LDA 测量试验给出，仿真结果的正确性和精度也可通过试验验证。

0.6.3 三维流动理论叶片设计方法

目前液力传动元件工作轮叶片的设计方法主要采用保角变换法、环量分配法和两类相对流面法。由于两类相对流面的局限性，该设计方法在实际设计中应用的不是很多。叶轮

机械三维流动理论、先进的实验手段以及 CFD 专用软件进行的三维流动数值模拟和仿真，为叶片设计新方法——基于三维流动理论的叶片设计法的深入研究提供了条件。鉴于三维流动叶片设计法所具有的有效性、精确性、可验证性，必将成为国内外液力传动行业所追求和深入研究的叶片精确设计方法。

0.6.4 动态特性研究

对液力变矩器而言，车辆起步、加速、通过障碍、换挡、制动等负载变化剧烈的工作环境称为非稳定工况。液力变矩器在非稳定工况下所表现的特性称为动态特性。

长期以来，液力变矩器动态特性研究均采用一维束流理论。但一维束流理论存在许多假设和简化，影响其分析、计算的精确性，从而限制了它的应用范围。基于快速性、准确性等瞬态指标进行液力元件动态实验研究和理论分析很少有公开的报道。采用系统辨识方法对液力变矩器的动态特性进行理论建模，并对变矩器进行试验辨识，可以获得其动态特性数学模型。利用专门编译的系统辨识仿真软件，通过实验对所建模型的参数进行辨识的结果表明，采用动态特性辨识方法对液力变矩器动态特性进行研究，可行且精度较高。

0.6.5 动态匹配

液力变矩器在各个领域越来越多地得到应用。在实际应用中必然涉及到动态匹配的问题，即发动机和液力变矩器以及整个传动系的动态匹配问题。分析发动机和液力变矩器的共同工作特性，通过动态匹配改善车辆传动系以输出功率为目标的换挡规律，并实现经常使发动机在低油耗区工作，使液力变矩器在高效区工作。

第 1 章 液力传动基础知识

1.1 理想流体及实际流体运动微分方程

理想流体是实际流体的一种简化，是一种假想的概念。当认为流体的黏性很小，可以忽略时，这种流体叫理想流体。由于在理想流体中忽略了黏性，故在任何表面上就没有切向力，只有法向力，从而使理想流体的流体动压力具有流体静压力的性质，沿着内法线方向，而且与作用的方向无关。

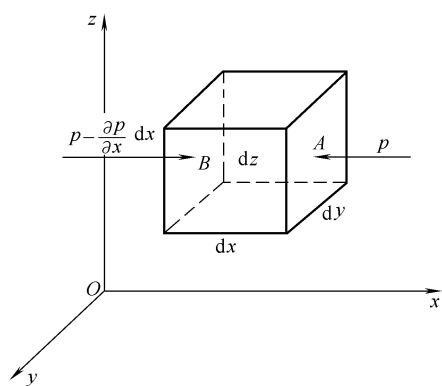


图 1-1 微元六面体的受力情况

在运动的理想流体中取一个微小的平行六面体形状的流体质点（图 1-1），每边长分别为： dx ， dy ， dz ，而且各边分别和相应的坐标轴 x 、 y 、 z 平行。

作用于六面体上的外力有表面压力、质量力和惯性力。

① 表面力 右面点 A 处的压力为 $p(x, y, z, t)$ ，由它产生的合力等于 $-p dy dz$ ，负号表示合力方向与 x 轴方向相反。右面点 B 处的压力为

$$p' = p - \frac{\partial p}{\partial x} dx$$

由它产生的合力为 $(p - \frac{\partial p}{\partial x} dx) dy dz$ ，方向与 x 轴方向一致。前后两面的总压力不等，其差值为

$$(p - \frac{\partial p}{\partial x} dx) dy dz - p dy dz = -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz$$

② 质量力 以 X 、 Y 、 Z 分别表示流体单位质量力在三个坐标方向的分力。故 x 轴方向的质量力的分力为

$$X \rho dx dy dz$$

其中 ρ 为流体的密度。

设六面体流体质点在 x 轴方向的加速度是 $\frac{dv_x}{dt}$ 。

根据牛顿第二定律，作用于六面体上诸力在任一轴投影的代数和应等于六面体的质量与该轴分加速度的乘积，对于 x 轴有

$$\rho dx dy dz \frac{dv_x}{dt} = X \rho dx dy dz - \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz$$