

机械无级变速器 设计与选用指南

阮忠唐 主编

化学工业出版社



机械无级变速器 设计与选用指南

阮忠唐 主编

阮忠唐 刘凯 阮劲松 雷淑存 编著
黄吉平 杨征瑞 赵玉良 崔亚辉

化学工业出版社
·北京·

(京)新登字 039 号

ISBN 7-5025-2465-7



图书在版编目(CIP)数据

机械无级变速器设计与选用指南 / 阮忠唐主编. — 北京: 化学工业出版社, 1999.8
ISBN 7-5025-2465-7

I. 机… II. 阮… III. ①无级变速装置-设计-手册
②无级变速装置-选型-手册 IV. TH132.46-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45021 号

机械无级变速器设计与选用指南

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市宇新装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18¼ 字数 420 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷

印 数: 1-3500

ISBN 7-5025-2465-7/TH·55

定 价: 38.00 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

京工商广临字 99007 号

永兴传动 永不停顿

宁波永兴变速器有限公司是一家专业生产减变速机的中外合资公司。主要产品有：机械无级变速器、蜗轮蜗杆减速机、螺旋伞齿轮减速机等6大系列1200多种规格。本公司竭诚向用户提供输入功率为0.12~22kW、输出转速在0.1~2500 r/min之间的各种减变速器。公司拥有专门从事新产品研制工作的技术开发中心，技术力量雄厚。本着“科技创新、走向世界”的宗旨，公司产品不断完善、更新，质量不断提高，并远销中东及欧美市场。

热忱欢迎国内外客户莅临指导，洽谈业务！



宁波永兴变速器有限公司

地址：宁波市环城北路西段518-19

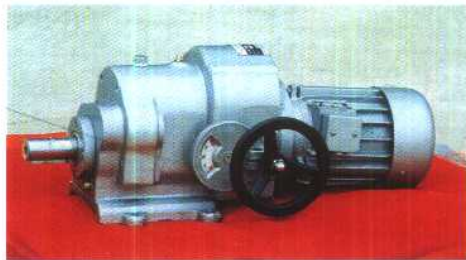
邮编：315016

电话：0574-7222414 7213446

传真：0574-7213446

总经理：闻志超

销售经理：陈巧月



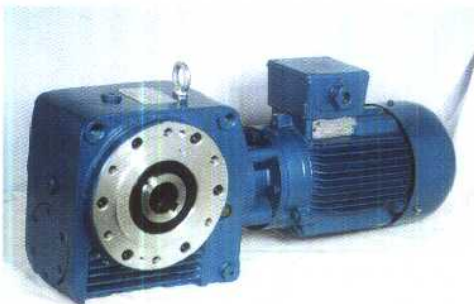
SPT系列机械无级变速器
($P=0.37 \sim 3.0 \text{ kW}$, $n_0=3 \sim 1680 \text{ r/min}$)



GPZH系列机械无级变速器
($P=0.12 \sim 1.5 \text{ kW}$, $n_0=12.5 \sim 2500 \text{ r/min}$)



MYG系列机械无级变速器
($P=0.12 \sim 0.25 \text{ kW}$, $n_0=0 \sim 300 \text{ r/min}$)



ZWLY系列齿轮-蜗轮减速器
($P=0.12 \sim 22 \text{ kW}$, $n_0=2.5 \sim 220 \text{ r/min}$)



通力变速 TONGLI

国内同行业首家通过
ISO9002国际质量保证体系认证



MB系列转臂行星式无级变速机



S系列蜗轮蜗杆减速机



K系列螺旋伞齿轮减速机



CV系列封闭式无级变速机



R系列斜齿轮减速机

主要产品

产品名称	配套功率(KW)	传动比
MB转臂行星式无级变速机	0.18-7.5	
CV封闭式无级变速机	0.18-4	
S系列蜗轮蜗杆减速机	0.18-22	9-305
R系列斜齿轮减速机	0.18-132	1.2-4050
K系列螺旋伞齿轮减速机	0.25-132	5.8-350
B(X)系列摆线针轮减速机	0.25-45	9-5133



浙江通力变速机械有限公司
ZHEJIANG TONGLI GEAR SHIFT MACHINERY CO., LTD.

地址: 浙江省瑞安市林祥通力大道 邮编: 325027
电话: 0577-5590000 5590188 5590588 5590838
传真: 0577-5590138 总经理: 项建忠



重合同守信用单位

化工部重点企业

中国齿轮专业协会会员单位

浙江长城减速机有限公司

主要产品：XM型行星摩擦式无级变速器，V型宽三角带无级变速器，WQD型石油矿场地面无级变速驱动装置以及摆线、齿轮、蜗杆、带式减速机和搅拌装置。



XM-LC型无级变速组合减速机
电机功率：0.18 ~ 7.5 kW
调速范围：R=5



V-DC型无级变速组合减速机
电机功率：0.55 ~ 45 kW
调速范围：R=4 R=6



WQD型无级变速驱动装置
可配电机11 kW、15 kW、18.5 kW
转速：25 ~ 150 r/min、30 ~ 180 r/min
可配抽油杆直径为 $\phi 28$ 、 $\phi 32$

法人代表：虞培清

地址：浙江温州市高新路30号
邮编：325028
网址：www.aaar.com.cn
Email:aaar@mail.wzptt.zj.cn

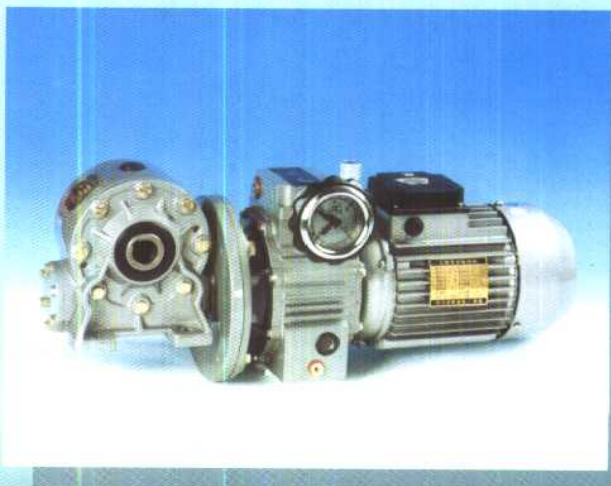
电话：0577-8628620 8628621 8628623
8628624 8628625 8628626
8628627 8628628 8628629
传真：0577-8628622→



台州市行星变速机械厂



UD系列行星锥盘无级变速器输出转速为 950 ~ 165 r/min, 功率为0.25 ~ 4 kW,可单独使用; 它与本厂WJ系列蜗杆减速器组合时,可在 118 ~ 4 r/min之间选择使用。本机能适应多方位安装。



厂址: 浙江省台州市椒江区工人路245号
邮编: 318013
电话: 0576-8224998
传真: 0576-8882874

前 言

机械无级变速传动具有结构简单、操纵与维修方便、传动效率较高、恒功率特性好、噪声低等优点；因此，能适应变工况工作、简化传动系统、节能和减少环境污染等要求。随着工业的发展和生产工艺流程机械化、自动化程度的提高，机械无级变速传动装置作为一类重要的机械传动部件，在国内外应用日益广泛，特别在生产流水线、变速机械中，甚至在轿车的变速传动系统中也采用了机械无级变速传动。

摩擦无级变速器问世已百余年，过去由于受到钢材材质、精密加工工艺水平和润滑剂品质三方面因素的限制，未能得到广泛应用。近 30 年来，由于钢材真空冶炼技术的应用、复合材料的出现、超精密机械加工工艺的日臻完善，特别是高牵引性能牵引油的研制成功，从而使干、湿摩擦传动转向了牵引传动 (Traction Drives)，使得机械无级变速传动的研制和应用有了快速的发展。

我国从 1960 年开始对滑片链 PIV 无级变速器和多盘式无级变速器进行了仿制，随后对 Kopp-B、Kopp-K、FU 无级变速器和 U 型卷绕无级变速器等进行了研制，在纺织、化工、机床行业取得了较好的使用效果；但无专业生产厂和研究机构，人们对它知之极少。1982 年出版的《机械工程手册》设专章介绍了机械无级变速器，1983 年出版了我国第一本专著《机械无级变速器》，尔后在相关的手册和教材中也列入了机械无级变速器的内容；高等院校也在此领域培养了一批硕士和博士。无级变速器专业生产厂也达到了近 50 个；生产了约 15 种机械无级变速器。1990 年在中国机械工程学会机械传动分会下成立了机械无级变速器专业委员会；随后又成立了中国减变速机行业协会、中国重型机械工业协会无级变速器专业委员会。举行过六次学术年会，在年会和各种学术杂志上发表了百余篇学术论文；制订了机械无级变速器方面的十个中华人民共和国机械行业标准，涉及名词术语、分类及产品型号编制、试验方法和产品标准。实现了产品的系列化和标准化。一些高校和研究所开展了机械无级变速器方面的科研工作。以上事实表明近 20 年来我国机械无级变速传动的理论研究和生产均取得了长足的发展。已形成了一个新兴的机械行业分支。

机械无级变速器传递的功率由数 10W 到 300kW；变速比为 12~40；传动效率可高达 95%；滑动率为 3%~10%，输入轴转速可达 7000r/min；最高输出转速可达 10^5 r/min，使用寿命可达 10^5 h 以上。

机械无级变速传动的设计，需综合运用行星传动理论、机构学、牵引传动理论、弹性流体动力润滑理论及控制工程方面的知识；本书在专著 [1] 的基础上，结合 15 年来国内、外理论与生产发展的成果和我们的研究成果，将基础性和共性的内容分别写在前 3 章，增强了弹流与牵引理论方面的内容，特别是对封闭行星无级变速传动系统作了较为深入而系统的介绍，因为这是无级变速传动向大功率发展的一个途径，需要理论上的指引和支持；对于无级变速器的稳速控制也作了简要的介绍，因此，初入门的读者应对这 3 章仔细阅读。4~8 章介绍了五类约 30 种变速器的结构和其自身的特定设计计算等问题，几乎覆盖了目前工业上应用的机械无级变速器品种。第 9 章介绍了机械无级变速器的选用和试验方法。附录收入 7 种机械无级变速器的我国机械行业标准及工厂规格以供选用参考。

目前对封闭行星无级变速器的传动机理、各种无级变速器的稳速控制及优化设计研究尚不充分，牵引设计及寿命设计的数据资料也不充分，变速器的应用研究等，均有待进一步深入。

参加本书编写工作的有：西安理工大学阮忠唐、刘凯、雷淑存、崔亚辉，西安金海实业有限责任公司的阮劲松，上海冶金专科学校的杨征瑞，浙东变速器厂的黄吉平和西安重型机械研究所的赵玉良。由阮忠唐汇总主编。

本书在编写过程中，承西北纺织工学院张治中先生审阅了大部分手稿，提出了不少宝贵的修改建议。承浙东变速器厂蒋南山、中国纺织机械厂赵凤州、宁波市无级变速器厂范荣富、温岭变速器厂赵正平、永嘉微型减速器厂李雄超、广州机床研究所杨文质、台州市行星变速机械厂王依平等先生提供了技术资料和信息，在此一并表示感谢。

鉴于我们的水平和资料有限，本书的内容一定会有不妥甚至错误之处，殷切希望读者随时予以批评指正。来信请寄 710048（邮编）西安市西安理工大学 305 信箱。

作者

1999 年元旦于西安

内 容 提 要

本书是在总结国内外先进经验和技术的基礎上編著而成的。

全书共分9章，第1章至第3章全面而系统地介绍了无级变速传动的意义和分类，机械无级变速器的传动原理、运动学、能量关系、失效方式和设计准则、机械特性、加压装置和调速机构的基本理论和设计数据。第4章至第8章分别介绍了定轴式、行星式、带式、链式和脉动式机械无级变速器的约30种结构和设计计算；第9章介绍了机械无级变速器的选用、试验及润滑方面的内容。另有附录，摘录介绍了中华人民共和国机械行业标准中六种机械无级变速器的性能和尺寸参数，机械无级变速器的试验方法，一种干式摩擦无级变速器的性能和尺寸参数。

本书内容先进、科学、实用，可供从事机械无级变速传动设计、研究、制造和应用的工程技术人员使用，也可供大专院校有关专业师生学习和参考。

目 录

1 无级变速传动概论	1
1.1 无级变速传动的意义	1
1.2 无级变速传动的分类	1
2 机械无级变速器的传动原理	11
2.1 机械无级变速器的组成、传动原理及运动学计算	11
2.1.1 机械无级变速器的组成与传动原理	11
2.1.2 变速方式与运动学关系	13
2.2 机械无级变速器的转矩与能量关系	20
2.2.1 不计损耗时变速器中的转矩与能量的关系	20
2.2.2 计入损耗时变速器中转矩与能量的关系	21
2.3 摩擦无级变速传动中的滑动	24
2.3.1 摩擦传动中的滑动	24
2.3.2 摩擦传动的滑动率 ϵ	26
2.3.3 摩擦传动几何滑动效率 η_g	31
2.3.4 提高传动效率的措施	31
2.4 机械无级变速器的失效方式和设计计算	31
2.4.1 失效方式与计算准则	31
2.4.2 接触应力的计算	32
2.4.3 强度计算	35
2.4.4 摩擦(牵引)传动副的材料、摩擦系数和许用应力	37
2.4.5 润滑、牵引油	38
2.4.6 牵引传动中的膜厚比 λ 计算	40
2.4.7 牵引传动的寿命计算	41
2.4.8 无级变速器的相似关系	42
2.4.9 无级变速器的强度、膜厚比和寿命计算例	43
2.4.10 设计注意事项	45
3 机械无级变速器的机械特性、加压装置和调速机构	46
3.1 机械特性	46
3.1.1 机械特性及其类型	46
3.1.2 容许输出特性	46
3.2 调速操纵机构	48
3.2.1 常用调速操纵机构的型式	48
3.2.2 转速显示的基本原理	49
3.2.3 调速操纵力矩的计算	49
3.3 无级变速器的加压装置	50

3.3.1	压紧力的确定	50
3.3.2	加压装置的特性、分类及位置配置	51
3.3.3	其他自动加压装置简介	56
3.4	转速伺服控制器简介	59
4	刚性定轴无级变速器	60
4.1	锥盘环盘无级变速器	60
4.2	多盘式无级变速器	64
4.3	滚锥平盘式(FU型)无级变速器	68
4.4	钢环分离锥轮式无级变速器	71
4.5	弧锥滚轮式无级变速器	72
4.5.1	弦向配置的弧锥滚轮式无级变速器	72
4.5.2	中间轮径向配置的弧锥滚轮式无级变速器	76
4.6	钢球锥轮式无级变速器	77
4.6.1	Kopp-B型钢球锥轮无级变速器	78
4.6.2	其他钢球锥轮无级变速器简介	81
4.7	菱锥锥轮式(Koop-K)无级变速器	86
4.8	光轴转环直线移动式无级变速器	92
4.9	定传动比摩擦轮传动设计简介	95
5	行星式牵引无级变速器	97
5.1	行星锥盘式无级变速器	97
5.2	转臂输出式行星无级变速器	104
5.3	转臂输出式封闭行星锥轮无级变速器	110
5.4	行星锥鼓式无级变速器	113
5.5	内锥轮输出行星无级变速器	116
5.6	环锥行星(RX)无级变速器	120
5.7	钢球行星无级变速器	127
5.8	谐波行星无级变速器简介	135
5.9	封闭行星无级变速器的动力学分析例	137
6	带式无级变速器	140
6.1	变速方式及基本关系	140
6.2	带式无级变速器的结构	144
6.3	宽V带无级变速器的设计计算	156
6.4	宽V带无级变速器与减变速器	166
7	链式无级变速器	174
7.1	概述	174
7.1.1	链变速器的结构特点与传动原理	174
7.1.2	链变速传动的运动学	176
7.1.3	链变速器的机械特性	177
7.2	变速传动链	178
7.2.1	滑片链	178

7.2.2	滚柱链和套环链	180
7.2.3	摆销链	181
7.2.4	导带活节链	182
7.3	滑片链无级变速器	183
7.3.1	P型链变速器	183
7.3.2	PS(AS)型链变速器	188
7.3.3	FMB型链变速器	190
7.4	其他链式变速器	191
7.4.1	滚柱和套环链变速器	191
7.4.2	摆销链变速器	192
7.4.3	导带活节链变速器	195
7.5	链式卷绕变速器	197
8	脉动无级变速器	203
8.1	脉动无级变速器的传动原理与分类	203
8.1.1	传动原理	203
8.1.2	分类、特点和应用	207
8.2	三相并列连杆脉动无级变速器	208
8.2.1	GUSA型无级变速器的工作原理与结构特点	208
8.2.2	GUSA型无级变速器的运动和动力分析	210
8.2.3	GUSA型无级变速器选用及标准	214
8.3	四相并列连杆脉动无级变速器	215
8.3.1	Zero-Max型无级变速器的工作原理与结构特点	215
8.3.2	Zero-Max型无级变速器的运动和动力分析	216
8.3.3	Zero-Max型无级变速器选用及标准	220
8.4	脉动无级变速器用超越离合器	220
8.4.1	结构型式	220
8.4.2	滚柱式超越离合器设计计算	222
9	机械无级变速器的选用、试验和润滑	225
9.1	机械无级变速器的选用	225
9.1.1	类型选择	225
9.1.2	容量选择	226
9.2	机械无级变速器的润滑与密封	228
9.2.1	润滑方式与润滑油	228
9.2.2	机械无级变速器的密封	230
9.3	机械无级变速器的试验	231
9.3.1	机械无级变速器的试验设备	232
9.3.2	机械无级变速器的试验方法	235
9.3.3	关于机械无级变速器试验的几点说明	240
附录 1	JB/T 6950—93 行星锥盘无级变速器 (摘录)	241
附录 2	JB/T 6951—93 三相并列连杆脉动无级变速器 (摘录)	247

附录 3	JB/T 7010—93	环锥行星无级变速器 (摘录)	249
附录 4	JB/T 6952—93	齿链式无级变速器 (摘录)	258
附录 5	JB/T 7515—94	四相并列连杆脉动无级变速器 (摘录)	266
附录 6	JB/T 9668—95	多盘式无级变速器 (摘录)	267
附录 7	SPT (锥盘环盘)	无级变速器 (摘自浙东变速器厂产品说明书)	272
参考文献			274

1 无级变速传动概论

1.1 无级变速传动的意义^[1]

无级变速传动是指在某种控制的作用下,使机器的输出轴转速可在两个极值范围内连续变化的传动方式。无级变速器是一种独立的传动部件,它具有输入和输出两根轴,通过能传递转矩的中间介质(固体、流体、电磁流)将输入、输出轴直接或间接地联系起来,以传递动力。当对输入、输出轴的联系关系进行控制时,即可使两轴间的传动比在两个极值范围内连续而任意地变化。用固体、流体作为中间介质的变速器分别称为机械无级变速器和液压力无级变速器。电力无级变速传动实际上是通过不同的电气控制系统对交流电动机和直流电动机的控制(改变磁通、电压、电流或频率),分别称为直流调速和交流调速;这种变速方式不存在输入轴(与一次动力机的调速相仿),它们的恒功率特性差。无级变速传动和定传动比、有级变速传动相比,能够根据工作需要一定范围内连续变换速度,以适应输出转速和外界负荷变化的要求,而且恒功率特性好,因而在现代机械传动领域内占有重要地位。近年来,为了扩大无级变速传动的调速比(范围)、传动功率或过零调速,控制式无级变速传动——用无级变速器作为封闭机构去封闭二自由度差动轮系的两个基本构件所得的单自由度行星无级变速器,已成为研究热点之一,通常称之为封闭行星无级变速器;这种系统中大部分功率流过差动轮系,而只有小部分功率流经无级变速器。此外,车用无级变速器和无级变速器的稳速问题也是研究热点。

无级变速传动主要用于下列场合:

- (1) 为适应工艺参数多变或输出转速连续变化的要求,运转中需经常或连续地改变速度,但不应在某一固定速度下长期运转,如机床、卷绕机、车辆和搅拌机等;
- (2) 探求最佳工作速度,如试验机、自动线等;
- (3) 几台机器或一台机器的几个部分协调运转;
- (4) 缓速启动以合理利用动力,通过调速以快速越过共振区;
- (5) 车辆变速箱,可节省燃料约9%,缩短加速时间,简化操纵。

如采用液力偶合器、液力变矩器或液体粘性传动无级变速器,则有吸振、缓冲和自适应性。

采用无级变速传动有利于简化变速传动结构、提高生产率和产品质量、合理利用动力和节能、便于实现遥控及自动控制,同时也减轻了操作人员的劳动强度。

1.2 无级变速传动的分类^[1~3]

按照机械特性的不同,无级变速传动可分成三类。

(1) 恒功率型:这种传动的输出转矩与输出转速成反比关系,输出功率恒定不变,这种特性的经济性好;机床的主传动系统、恒张力卷绕装置、试验装置和某些起重运输机械的传动需要这种特性。

(2) 恒转矩型:其输出转矩不随转速变化,而输出功率与输出转速呈正比关系;机床的

进给系统、某些工艺输送带（烘干、酸洗、染色等）和某些运输机的传动需要这种特性。

(3) 变转矩、变功率型：输出转矩和功率均随输出转速变化，例如纺织工业中的经纱卷绕装置和某些搅拌装置的传动就是这种使用特性。

实现无级变速大致可以从下列三种途径着手。

(1) 改变动力机（一次动力机——内燃机、汽轮机；二次动力机——电动机、液压马达等）的能源参数（油、汽量和电压、电流、供电频率等）以调节动力机的输出转速，实现无级变速。由于一次动力机的调速范围较小，二次动力机的惯量小、恒功率特性差，需要接入机械传动装置进行匹配。

(2) 改变输入、输出轴间传动元件的尺寸比例关系（如各种机械无级变速器），或改变工作腔中的油量（如液力耦合器和变矩器）来实现输出轴的无级变速。

(3) 通过调节作用在传动中某元件上的制动负载来实现传动系统的无级变速，如摩擦、电磁滑差和磁粉离合器，以及液粘传动，以耗能制动的方式进行无级变速，缺点是效率低、发热严重。

按传动介质的不同，无级变速传动可分为机械无级变速传动（表 1-1、表 1-4）、液压（力）无级变速传动（表 1-2）和电力无级变速传动（表 1-3）等三大类。

表 1-1 机械无级变速传动的特点和应用

型 式	固定轴式				行星式	脉动式	
	无中间体的		有中间体的				
	改变主 动轮工作 直径	改变从 动轮工作 直径	同时改 变主从动 轮工作直 径	改变中 间滚动体 主从动侧 工作直径			
传动原理	多借摩擦牵引力传动，改变传动构件间的长度（工作直径）比例进行变速 传动能力受加压机构和滚动体的强度以及润滑（牵引）油性能的限制				基本原理和固定轴式相同，并利用行星摩擦传动原理	用单向超越离合器将可调幅的摆动变为单向的脉动输出 传动能力受超越离合器的限制	
特点	结构简单，可制成系列化的独立部件，适应性强，维护方便；滑动率 $\epsilon < 3\% \sim 5\%$ ，在实现恒功率变速方面比电力、流体无级调速好 除少数可在停车时变速外，均需在运行时变速 对材料、热处理、加工精度、润滑油的要求高 适于中、小功率传动				在零转速附近，机械特性差，滑动率 $\epsilon < 7\% \sim 10\%$ ，可扩大传递功率和变速范围	输出为有脉动的旋转运动，变速稳定 适于中、低速小功率传动	
运动特征	变速比 R_b	3~5	<3	<16 (25)	<17 (20)	<40	>6
	升、降速	升、降				降	
	反转	可	可	否	否	可	否
动力参数	功率 P_{max} , kW	<40	多盘式达 300	40	40	75	18
	效率 η	0.50	~0.85	0.75~0.95	0.80~0.93	0.60~0.86	0.20~0.85
	机械特性	详见表 1-4					$T \approx C$
应用举例	食品、化纤、纺织、橡胶、制烟等机械，机床，搅拌机，运算机构		机床主传动、进给机构，电源及振动试验台，航空、汽车工业	机床、纺织、化工、印染、钟表等机械，工程机械，电工机械	机床进给系统、主传动系统，变速电机，化工、塑料机械，试验设备	食品机械，无线电装配线，热加工运输线	

表 1-2 流体无级调速传动的特点和应

型 式	阀 控 式	泵 控 式	阀-泵控联合调速	调速型液力耦合器	液力变矩器	
传动原理	用阀改变流体(液、气)进出口流量进行调速 旁路或比例阀节流	改变泵的有效工作容积进行调速 变量泵-定量马达 定量泵-变量马达 变量泵-变量马达	阀控与泵控两类调速联合应用	改变喷嘴阀门的开度或改变导管的位罝,以改变工作腔的充油量进行调速	改变叶片角度、充油量或泵轮转速进行调速	
特 点	结构简单,成本低 速度随载荷变化,效率低,温升高,有噪声	效率较高,功率使用合理 结构较复杂,成本较高,有噪声(高压时尤甚)	较率较高,温升较低 有噪声	快速性好,易于自动化调速;有吸振和缓冲作用		
运动特征	变速比 R_b	5~100 (2000)	4~100	5~50 (100)	3~10 (14)	0~全速 (高效区 2~3)
	升、降速	降				
	反转	用换向阀实现	用变量泵变量装置超过中心位置或用换向阀实现	用换向阀实现	否	否
动力参数	功率 P_{max} , kW	10	550	50	10000	3000
	效率 η	0.20~0.65	0.80~0.90	0.40~0.80	~0.96	~0.87
	机械特性	较硬	$n \approx C$ 硬	较硬	较硬	软
应用举例	用于速度要求较稳定、载荷变化不大的小功率传动,如磨床、车床的进给系统	功率较大的拉床、起重机、车辆	中等功率的组合机床	水泵、鼓风机	小客车、重型自卸卡车、军用履带车	

表 1-3 电力无级调速传动的特点和应

型 式	传动原理	特 点	运动特征			动力参数		应用举例	
			变速比 R_b	升、降速	反 转	功率 P_{max} kW	机械特性		
直 流 传 动	改变磁通调速	在励磁回路中串入电阻或并入分路电阻,或改变励磁供电电压,以减弱磁通进行调速	调速性能好;采用可控硅整流线路可节约大量有色金属,效率高,体积小,噪声低;采用有放大器(如磁放大器、运算放大器等)的负反馈控制系统可大大提高调速精度和机械特性;采用电子线路控制的宽调速直流伺服电机调速,调速范围可达 2×10^4	1.5~2 (3~4)	升	可		$P=C$	轧辊磨床、砂轮传动系统
	改变电枢电压调速	用可调电压的直流电源,改变电枢电压进行调速	设备复杂,成本高,维护困难;采用机组供电时,效率低,体积大,噪声大	2.5~12	降	可		较硬	机床、印染、造纸机械,轧钢机主传动,大型起重机
	复合调速	上述两种调速方式的结合,基速下采用调压,基速上采用调磁	正逐步被交流电机调速系统取代	10~40	升、降	可			初轧机主传动,卷取机,龙门刨、龙门铣等重型机床