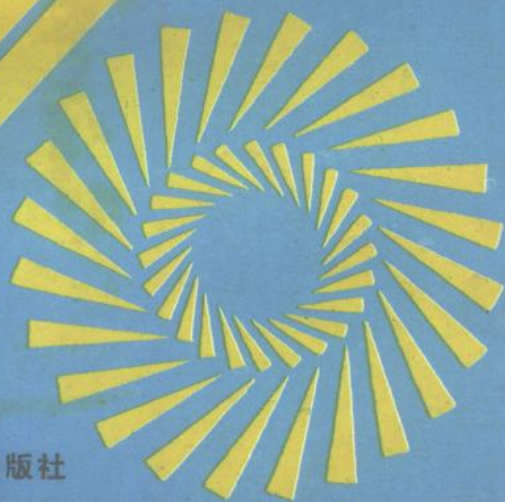


# 牵引传动行星 无级变速器设计

崔光彩 编著



河南科学技术出版社

# 牵引传动行星无级变速器设计

崔光彩 编著

河南科学技术出版社

(豫)新登字02号

DW03/02  
内 容 简 介

本书共分两篇。第一篇设计理论综述，详细地论述了牵引传动无级变速器的运动学、动力学、机械特性、弹性流体动力润滑计算理论及辅助机构等问题，为第二篇设计计算奠定了理论基础。第二篇重点介绍了RX型、BUS型和SC型行星无级变速器的设计计算方法，通过“计算实例”交代设计计算方法，容易掌握。

本书有理论有实际，是牵引传动无级变速器的系统专著。它不论对理论研究人员，还是对从事传动设计、应用、制造的工程技术人员，或者对有关工科院校师生，都是极有价值的一本参考书。

### 牵引传动行星无级变速器设计

崔光彩 编 著

责任编辑 孟庆云

河南科学技术出版社出版

(郑州市农业路73号)

河南郑州解东印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

850×1168毫米 3开本 8.75印张 200千字

1994年2月第1版 1994年2月第1次印刷

印数 1—1,000册

ISBN 7-5349-1026-9/T·210

定价： 8.80元

## 序 言

机械无级变速装置有许多优点，如可以按需要设计成各种特性曲线、调速范围大、效率高、噪声低、结构简单、总体成本低等，在许多工业部门一直被优先采用。但由于在设计理论、制造工艺、材料及其热处理等方面有许多问题未很好解决，在高速及大功率传动方面的应用一直受到限制。我国在这个领域的水平，无论在哪个方面，与先进国家相比，仍有较大的差距。有关这方面的专著，除了10年前出版的《机械工程手册》第6卷第33篇外，只有一本，而且出版也已10年之久。高等教育出版社虽然在1986年出版过一本给学生用的小册子，但只有6万多字，而且内容较浅，未反映现代发展水平。

近10年来，随着弹性流体动力润滑理论的发展，人们对机械无级变速装置的传动理论有了更深刻的认识，认为过去的“摩擦传动”概念已不适用，而是应当从润滑油膜的牵引力出发来考虑问题，并应称之为“牵引传动”；同时还认识到，牵引力可以通过润滑剂的性能的改变而大大提高；加之由于生产专业化的发展，制造精度的不断提高，材料与润滑剂性能的日益改善，牵引传动在国外有了飞跃的发展，尤其是在高速与大功率的应用方面。有的专家甚至声称，它将取代齿轮传动，是传动技术方面的一场革命。

崔光彩同志根据他多年的研究经验，调查了国内外的生产及

应用情况，以应用较广并较有发展前途的行星无级变速器为主要对象，编写了《牵引传动行星无级变速器设计》这一专著，首先将弹性流体动力润滑理论的油膜牵引力理论应用到行星无级变速器的设计计算中，并且着重介绍了RX型、BUS型和SC型行星无级变速器的结构与设计计算方法。在结构设计中，作者还针对我国的现状，着重提出了加工工艺和材料选择及其处理上应当注意的问题。

因此，这是一本既有理论价值又有实用价值的书，它不仅填补了10年来我国在机械无级变速器专著方面所出现的空白，而且也给工科院校的师生和从事传动装置设计、应用与制造的技术人员提供了一本有益的参考书。对于从事成套设备设计的技术人员来说，也可以开拓思路。

**余梦生**

1991年8月于北京科技大学

## 前 言

随着现代生产的发展与产品工艺流程机械化、自动化程度的提高，为了进一步提高机器设备的生产率与产品质量，机械无级变速装置作为机械传动中的一个重要部件，在国内外应用日益广泛。

机械无级变速传动中的摩擦无级变速器问世已近百年。以往，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，没有能够得到广泛应用。近20年来，由于钢材真空冶炼技术的应用、超精密机械加工工艺的日臻完善，特别是摩擦无级变速器专用润滑剂的研制成功，使摩擦副既有足够的油膜牵引力（tractive force）又有必要的油膜厚度和油膜强度，从而使摩擦传动转化为“牵引传动”（Traction Drives），使得摩擦无级变速器的研制与应用有了飞速发展。

弹流牵引传动行星无级变速器具有结构简单、承载能力强、变速范围大、体积小、效率高等特点，并在调速范围内可获得任一稳定转速。这类变速器的结构、原理的改变，可得到较好的恒功率特性或恒力矩特性，而且传动噪音极低。因此，能满足变工况工作，简化传动装置，节约能源和减少环境污染等要求。近十几年来在工业界受到极大重视并被广泛采用。

弹流牵引传动行星无级变速器设计，是弹性流体动力润滑理论、牵引传动理论及行星传动理论的具体应用。本书第一部分

设计理论综述是结合这类无级变速器的典型实例论述的，它为本书第二部分行星无级变速器设计计算提供了理论基础和原则方法。本书第二部分，具体阐明了有关无级变速器的结构及设计计算方法。

本书在编写过程中，曾蒙卢锡畴教授的指导，同时得到郑州工学院机械系机械原理及机械设计教研室的大力支持和帮助，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处，热忱地希望广大读者予以指正。

编 者

1991年5月

# 目 录

## 第一篇 设计理论综述

第一章 绪论	( 1 )
§1—1 机械无级变速传动概况及其应用	( 1 )
§1—2 机械无级变速传动分类及其特点	( 3 )
第二章 行星无级变速器运动学	( 6 )
§2—1 行星无级变速器运动及动力传递的机构特征	( 6 )
§2—2 行星无级变速器的传动比与调速范围分析	( 7 )
§2—3 行星无级变速器传动中的滑动与滑动率	( 11 )
§2—4 传动的功率损失与效率分析	( 27 )
第三章 行星无级变速器弹性流体动力润滑计算理论	( 34 )
§3—1 润滑概述	( 34 )
§3—2 基本润滑方程	( 39 )
§3—3 弹性流体动力润滑理论	( 69 )
§3—4 溢油流体动力润滑椭圆接触区的理论结果	( 80 )
§3—5 应用实例	( 92 )
第四章 行星无级变速器动力学	( 100 )
§4—1 变速器失效形式及设计准则	( 100 )



- §4—2 接触应力计算…………… (102)
- §4—3 变速器强度计算…………… (109)
- §4—4 传动副的材料、牵引系数(湿式工作)、摩擦  
系数(干式工作)和许用应力…………… (114)

## 第五章 牵引传动无级变速器的机械特性及辅助机构

- …………… (118)
- §5—1 机械特性…………… (118)
- §5—2 调速力和调速机构…………… (120)
- §5—3 加压装置…………… (125)

## 第二篇 设计计算

### 第六章 圆弧锥环行星无级变速器(RX型)…………… (141)

- §6—1 圆弧锥环行星无级变速器结构特点…………… (141)
- §6—2 RX型变速器的主要几何尺寸…………… (143)
- §6—3 RX型变速器传动原理分析…………… (148)
- §6—4 RX型变速器的受力分析…………… (153)
- §6—5 RX型变速器的承载能力…………… (158)
- §6—6 RX型变速器弹性流体动力润滑计算…………… (162)
- §6—7 设计算例…………… (166)

### 第七章 内锥轮输出式行星无级变速器(BUS型)…………… (190)

- §7—1 内锥轮输出式行星无级变速器结构特点…………… (190)
- §7—2 传动元件的主要几何尺寸…………… (193)
- §7—3 变速器传动原理分析…………… (195)
- §7—4 传动元件的受力分析…………… (202)
- §7—5 加压盘V型槽升角…………… (206)
- §7—6 变速器的承载能力…………… (207)

§7—7	BUS型变速器弹性流体动力润滑计算·····	( 210 )
§7—8	设计算例·····	( 213 )
<b>第八章</b>	<b>转臂输出式行星无级变速器 (SC) 型</b> ·····	<b>( 230 )</b>
§8—1	变速器结构、特点·····	( 230 )
§8—2	SC型变速器的尺寸参数·····	( 234 )
§8—3	变速器传动原理分析·····	( 239 )
§8—4	变速器的受力分析·····	( 241 )
§8—5	自动加压装置的V型槽升角·····	( 243 )
§8—6	变速器的承载能力·····	( 246 )
§8—7	SC型变速器弹性流体动力润滑计算·····	( 248 )
§8—8	设计算例·····	( 251 )
<b>主要参考资料</b>	·····	<b>( 270 )</b>

# 第一篇 设计理论综述

## 第一章 绪 论

### §1—1 机械无级变速传动概况及其应用

机械无级变速传动是使机器的速度连续可调并使其尽可能以最佳方式工作，满足最佳工作需要的机械调速系统。如今机械无级变速传动不仅常常在纺织、食品、造纸、印刷、橡胶、塑料等轻工业部门中应用，而且也用于运输机械、工作母机（车床、磨床等）、化工机械（反应罐、搅拌机、分离机等）、农业机械、建筑机械、工程机械上，就连仪器装置、试验装置及航空、航天设备上都有所应用。为了节能和简化操纵，国外已将机械无级变速传动应用在汽车变速上。

我国纺织工业系统自1960年开始对PIV型链式无级变速器进行了仿制，已系列生产多年。1975年开始，国内有关机床研究所及高等院校，研制成功了Kopp-B、Kopp-K、FU等型号无级变速器，曾经在万能铣床和车床上安装使用过。1985年国内生产摆线减速器的有关工厂，自日本引进了多盘式（Beier）无级变速器。1986年以来，国内高等院校、研究机关及有关机床厂、齿轮厂研制成功了行星无级变速器（XYZW型、RX型、SC型等），并已投入小批量生产。其它，脉动无级变速器（Gusa型、DSV-400型等）也已研制并开始试生产。至今，国内各类机械无级变速器年产量已达二万台以上，生产和研究此类产品的工厂、研究

所和高等院校已有百余家，逐渐形成了与电动机组成为一个整体部件的新兴机械行业。

机械无级变速器已成为机械传动中的一个重要部件并获得了广泛应用。它目前所能传递的功率从几十瓦至1500千瓦以上；调速范围为12~40(输出轴的最高转速与最低转速的比值)；传动效率可高达95%；滑动率 $\varepsilon < 3 \sim 10\%$ ；输入轴最高转速可达30000r/min；使用寿命高达10000h以上。

一般说来，无级变速传动主要适用于下述场合：

(1) 机器的工艺参数多变。如化工行业的搅拌机、反应罐等设备的搅拌轴，应按反应速度和反应物料的粘度的变化而改变搅拌轴的转速，从而可获得最高的搅拌效率；又如，通用机床因工件尺寸、加工精度、材料和刀具的不同，需要具备较大的变速范围( $R_b = 50 \sim 100$ )，以便按不同的工艺参数选择合理的工作速度。

(2) 机器的转速要求连续变化。如端面车床，要求以恒定的线速度车削端面，浆纱机要求以恒定的线速度卷绕棉纱，以保证工件良好的粗糙度和棉纱的恒张力。

(3) 探求机器新产品最佳工作速度及最佳工作状态。在新产品研制过程中，会遇到最佳工作速度及最佳工作状态无法从理论上确定的情况。这时在新产品中安装无级变速传动装置，便可确定其最佳工作状态及最佳工作速度。如我国近年来研制成功具有国际先进水平的Szz4水冷振动炉排锅炉，在炉排振动系统中采用了XYZW型圆弧锥行星无级变速器，使振动输送系统可靠地调整到亚共振状态工作，达到了节能的目的。同时，随着燃烧煤种的不同，调节无级变速器转速，有效地控制了燃料在水冷炉排上的振动输送速度，也满足了锅炉最佳运行状态的需要。

(4) 缓慢低速在负载下起动物器。对于具有大惯性或带负载起动的机器，采用无级变速传动，可在很低转速下起动，避免了过大的惯性负载，而且可采用功率较小的原动机。

(5) 协调机器之间或一台机器不同运动部件之间的运转速度。如塑料薄膜机轧辊前后驱动装置之间的速度，就是用无级变速器进行协调，以适应温度与厚度的变化。

(6) 需要变速测试数据的各种试验台。如管道振动试验台、测功器试验台、车辆驱动轴疲劳试验台等都配有无级变速器。

综上所述，采用无级变速传动可以有效地简化变速传动结构，提高生产率和产品质量，合理利用动力和节约能源，并能实现遥控及自动控制。

## §1—2 机械无级变速传动分类及其特点

无级变速传动有机械式、电气式、液压式和气动式等。机械无级变速传动大都是依靠摩擦力或弹性流体动压润滑油膜牵引力来传递运动和动力（PIV型及FMB型滑片链式变速器、GUSA型脉动变速器等机械无级变速传动例外）的。

机械摩擦式（牵引传动式）无级变速传动的形式很多。按有无过渡元件，可分为直接传动式和过渡元件传动式；按有无挠性元件，可分为刚性元件传动式和挠性元件传动式；按可调元件的几何形状，可分为圆盘式、圆锥式、球式和弧锥式；按运动形式，可分为普通传动式、行星传动式和复合行星传动式（图1·2—1）。

机械摩擦式（牵引式）行星无级变速传动是具有中间滚动体的变速传动，在传递运动和动力的过程中，中间滚动体作行星运动，即它既绕自身轴线作自转运动，又绕公共轴线作公转运动，故中间滚动体在这里称为“行星锥（盘）”或“行星鼓”。其传动原

理为 $2k-H$ 、 $3k$ 及复合行星传动（图1·2—1No:17~No:30）。

**摩擦式（牵引式）行星无级变速传动具有下述特点：**

（1）结构比较简单：一般的行星无级变速器，由六至八个关键传动元件组成，传动元件数目较少。加压机构及操纵机构也都可设计得简单易行。整机制造相对容易。

（2）变速范围较大，可简化传动结构，传动平稳、噪音极低：一般行星无级变速器的变速范围可达几十。输入轴作定向转动的情况下，输出轴可静止不动，也可反向转动变速，因而从理论上讲其变速范围可以是无穷大。只要设计合理，就可以从零转速起动，并能适应变工况工作。在其变速范围内可获得预期的任一稳定转速，大大简化了传动结构，且噪音极低，减轻了环境噪音污染。

（3）驱动功率较大，承载能力较强：从国内外现有行星无级变速器的系列产品来看，变速器的功率由几十瓦到1500千瓦左右（美国CVD型日本RX型行星变速器）。变速器结构紧凑，外形尺寸很小。

（4）输出机械特性优越：一般情况下，行星无级变速器低转速时恒转矩输出特性较强，高转速时可达到恒功率输出。

（5）属降速型传动：行星无级变速器的输出转速在全部变速范围内均低于输入转速。由于这个原因，变速器只在输出轴一侧设置一套自动加压装置，特殊情况例外（美国CVD型）。

（6）传动效率较高，变速器寿命较长：行星无级变速器的类型不同，传动效率也各不一样。其效率范围为75~94%。正常使用寿命可达10年以上。

由于上述特点，行星无级变速器近十几年来在工业界受到极大重视，得到越来越广泛的应用。

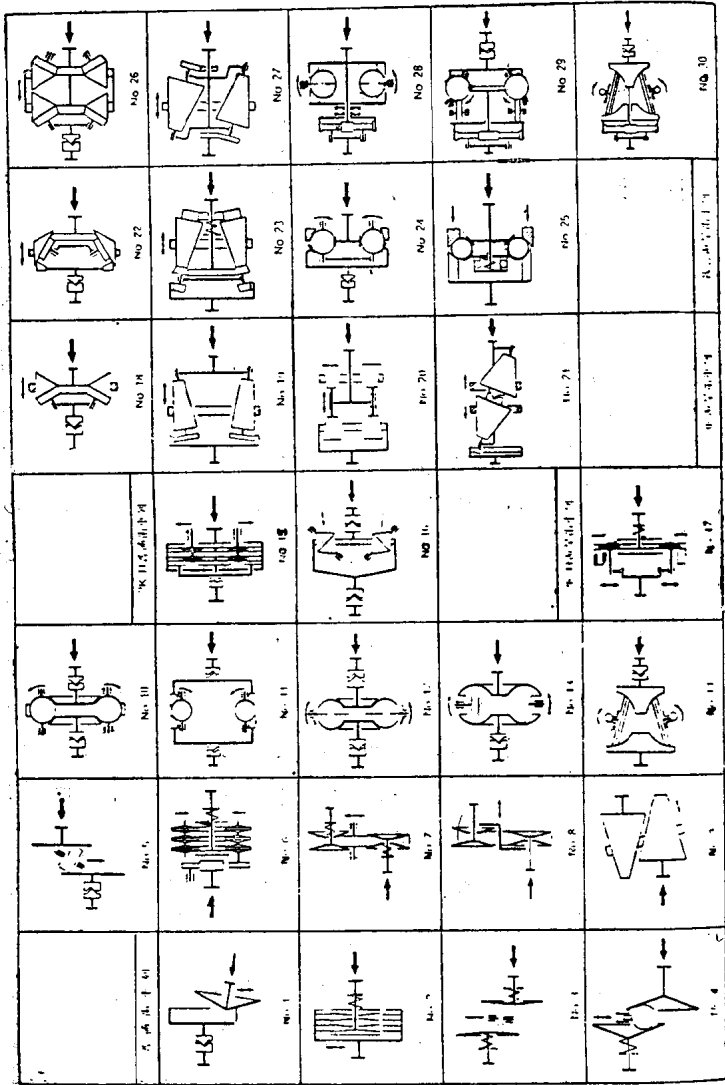


图 1.2—1 各种机械式(摩擦式)无级变速器的结构图

## 第二章 行星无级变速器运动学

### §2—1 行星无级变速器运动及 动力传递的机构特征

行星无级变速传动是具有中间滚动体作行星运动的变速传动。大都用可以轴向移动而不能旋转的内摩擦环来改变中间滚动体的工作半径，从而达到无级变速的目的。

现以XYZW型圆弧锥环行星无级变速器(图2·1—1)为例，来说明行星无级变速器的机构特征。这种行星无级变速器是由输入轴、输入盘、行星锥轮、调速环、轮架、输出盘、自动调压盘及输出轴等组成的3K型行星传动。当输入盘以 $n_1$ 回转时，在轮架中均布的行星锥轮自转，并沿着调速环内圈公转，由其自转与公转而产生的差动转速 $n_2$ ，依靠输出圆盘、自动调压盘传到输出轴上。变速是靠轴向移动调速环来实现的。调速环与行星锥接触点位置的连续变化，就改变了行星锥轮自转转速，从而使其差动回转转速 $n_2$ 变化，这样实现了无级调速。

这种行星无级变速器的输入圆盘、调速环及输出圆盘三者与行星锥轮瞬时的接触，均为圆弧点接触。根据点接触弹性流体动压润滑理论(EHL)，在点接触摩擦副中应将摩擦体视为弹性体，同时又考虑润滑剂粘度的压力效应，点接触的两个摩擦固体表面之间，在具有一定相对运动速度的条件下能够获得润滑，且



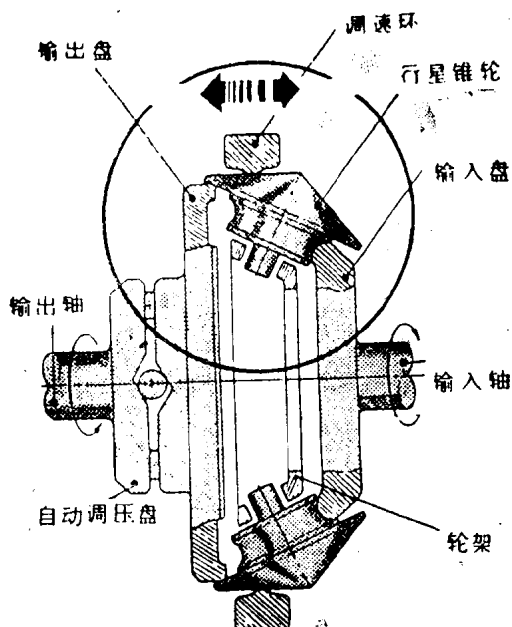


图2·1—1 XYZW型圆弧锥环行星无级变速器

润滑剂不致被挤出，在固体表面间形成了一层极薄且强度很高的油膜。它将两摩擦表面隔开，减少了摩擦磨损。在传动时，就是通过这一层极薄的强韧油膜的粘滞牵引力来传递运动和动力。因而传动过程中滑动很小，大大提高了传动承载能力，延长了变速器的使用寿命。

## §2—2 行星无级变速器的传动比 与调速范围分析

行星无级变速器传动机构根据行星轮系的原理，在略去接触点滑移的条件下，可以用行星轮系中转化机构的概念和公式来求解传动比及有关转速。其基本公式是