



齿轮设计  
丛书

CHILUN SHEJI  
CONGSHU

# 蜗杆传动设计

上册

吴鸿业 张亚雄 齐 麟 编著 机械工业出版社

**内容简介** 本书系《齿轮设计丛书》之一。蜗杆传动具有传动平稳、传动比大、结构紧凑、在一定条件下有良好的自锁性等优点。本书除介绍了常用普通圆柱蜗杆外，还介绍了圆弧圆柱蜗杆、环面蜗杆及锥蜗杆等新型蜗杆传动的设计理论、方法和参数选择等内容，反映了当前国内外较先进的科研和技术水平。

本书分上、下两册出版。上册包括普通圆柱蜗杆传动和圆弧圆柱蜗杆传动两部分；下册包括平面蜗轮及平面包络环面蜗杆传动，直廓环面蜗杆传动和锥蜗杆传动等三部分。

本书供从事齿轮研究、设计和加工的科技人员及大专院校师生参考。

齿 轮 设 计 丛 书

蜗 杆 传 动 设 计

上 册

吴鸿业 张亚雄 齐 麟 编著

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/32 · 印张 187/8 · 字数 416 千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 0.001—4,600 · 定价3.90元

\*

统一书号：15033·6219

## 《齿轮设计丛书》

### 出 版 说 明

齿轮是应用非常广泛的重要传动元件。随着科学技术的飞跃发展，对齿轮传动提出了越来越高的要求。为适应形势的需要，总结、介绍国内外先进经验与技术，特决定组织出版这套《齿轮设计丛书》，以利提高我国齿轮设计、生产水平。

本丛书内容包括：齿轮啮合原理、齿轮传动的精度、各类齿轮传动（包括特种齿轮）和各类蜗杆传动的设计、齿轮的试验技术与设备等等。内容着重于介绍设计的理论基础、设计方法、设计参数以及数据的分析选择等，力图满足齿轮传动设计者的需要。因此，本丛书主要供从事齿轮设计、制造工作的工程技术人员参考。丛书将分若干分册陆续出版。

由于水平有限，书中难免有错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。

## 出版者的话

蜗杆传动是在(夹角可为任意的,通常取成正交  $90^\circ$  的)交错轴之间传递运动和动力的一种齿轮传动装置。它长期得到广泛应用主要是因为它具有传动平稳、减速比大、在一定条件下有良好的自锁性等优点。通常用于减速传动,也有个别产品用它作为增速机构。但是它存在着传动效率较低、需要耗用有色金属等不足之处。

随着机器功率的不断提高,国外产品中五十年代以来陆续推出了各种新型式的蜗杆传动,效率低的缺点正在逐步克服。结合对引进国外先进技术的消化,我国在蜗杆传动的研究和改进生产技术方面,目前已呈现百花齐放的蓬勃局面,达到了前所未有的新水平。

在我国所研制口径为2.16米的天文望远镜上,精密分度蜗杆传动的精度已达到累积误差  $5.57''$ ,短周期误差小于  $1''$  的高水平。在动力传动方面,蜗轮轴的输出扭矩也已高达数十吨-米。

本书主要介绍了两类圆柱蜗杆传动、两类环面蜗杆传动和一种锥蜗杆传动,这些都是在国内生产实践中经受过考验的蜗杆传动。考虑到广大读者对它们还不够熟悉,单靠手册一类资料尚不足以掌握,所以约请在这方面有长期工作经验的同志编写了本书,以求讲清楚它们的特点,设计参数选择的依据以及制造和使用中应加以注意的问题,从而在这些新型蜗杆传动的推广应用中立读者一臂之力。

应该认识到,获得优质蜗杆传动产品,除了选用啮合特性良好的啮合制之外,还必须在制造上努力使这些优良品质得以变为现实。在这方面的工作包括:采用硬齿面蜗杆、提高蜗杆和蜗轮齿面光洁度,提高制造精度以及有意识地进行齿面曲率修形来加速跑合过程且使跑合后达到较理想的啮合状态。

本书在编写过程中,由于作者分散各地,篇幅也有一定限制,所以各篇之间编写的风格和内容的重点不够协调一致,其他方面也还存在着一些缺点,这些都是我们工作做得不够周到所致,有待今后改进。

本书分上、下两册出版。上册的第一篇(普通圆柱蜗杆传动设计)由吴鸿业同志编写,第二篇(圆弧圆柱蜗杆传动设计)主要由张亚雄同志编写,齐麟同志参加了部分编写工作;下册的第三篇(平面蜗轮及平面包络环面蜗杆传动设计)主要由齐麟同志编写,张亚雄同志参加了部分编写工作,第四篇(直廓环面蜗杆传动设计)由胡松春、黎上威同志编写,第五篇(锥蜗杆传动设计)由董学朱同志编写。

全书除第四篇由东北工学院的鄂中凯、施永乐同志进行审稿外,其余四篇均由南通机械研究所张希康同志审稿。他们提出了许多宝贵的意见,特别是张希康同志还做了大量协调、组织工作,在此表示衷心感谢。

全书各篇在编写过程中还得到许多有关同志的大力帮助与支持,在此一并致谢。

# 目 录

## 第一篇 普通圆柱蜗杆传动设计

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 概论 .....                                                        | 3   |
| 一、蜗杆传动的特点及发展 .....                                              | 3   |
| 二、蜗杆传动的润滑 .....                                                 | 7   |
| 第一章 普通圆柱蜗杆传动的类型、基本参数<br>及几何尺寸计算 .....                           | 36  |
| 一、普通圆柱蜗杆传动的类型及几何形状 .....                                        | 36  |
| 二、普通圆柱蜗杆传动的基本参数 .....                                           | 42  |
| 第二章 锥面包络圆柱蜗杆(ZK型) .....                                         | 64  |
| 一、座标系的建立 .....                                                  | 64  |
| 二、砂轮磨削蜗杆时的瞬时接触线、蜗杆齿面方程 .....                                    | 71  |
| 三、蜗杆蜗轮啮合时的瞬时接触线、啮合面及蜗轮<br>齿面方程 .....                            | 76  |
| 四、啮合区 .....                                                     | 81  |
| 五、接触线总长度计算 .....                                                | 83  |
| 六、砂轮磨削蜗杆时的根切线 .....                                             | 87  |
| 七、蜗杆蜗轮啮合时的二界曲线方程 .....                                          | 88  |
| 八、蜗杆蜗轮啮合时的根切线方程 .....                                           | 88  |
| 九、蜗杆蜗轮啮合时接触线法线方向与合速度 $v_{\Sigma}^{(12)}$<br>间夹角、润滑条件弱点的轨迹 ..... | 91  |
| 十、蜗杆蜗轮啮合时的诱导法曲率 $K_n^{(12)}$ .....                              | 93  |
| 十一、加工锥面包络圆柱蜗杆副的几个工艺问题 .....                                     | 96  |
| 十二、例题 .....                                                     | 114 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第三章 圆柱蜗杆传动的啮合情况 .....      | 124 |
| 一、蜗杆传动的相对运动 .....          | 124 |
| 二、普通圆柱蜗杆啮合中的润滑条件 .....     | 132 |
| 三、圆柱蜗杆传动啮合中点蚀初始失效点 .....   | 135 |
| 四、蜗杆传动中力的分析 .....          | 142 |
| 五、蜗杆传动的啮合效率 .....          | 146 |
| 六、蜗杆传动的自锁 .....            | 150 |
| 第四章 普通圆柱蜗杆传动承载能力的计算 .....  | 151 |
| 一、蜗杆传动的失效形式 .....          | 151 |
| 二、蜗杆传动材料的选择 .....          | 152 |
| 三、普通圆柱蜗杆传动承载能力的计算 .....    | 154 |
| 第五章 蜗杆传动的结构设计 .....        | 202 |
| 一、蜗杆减速器的结构型式 .....         | 202 |
| 二、蜗杆、蜗轮的结构设计 .....         | 207 |
| 三、普通圆柱蜗杆传动精度的选择和公差确定 ..... | 211 |
| 四、蜗杆、蜗轮工作图 .....           | 215 |
| 参考文献 .....                 | 232 |

## 第二篇 圆弧圆柱蜗杆传动设计

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第一章 概述 .....            | 237 |
| 一、圆弧圆柱蜗杆发展概况 .....      | 237 |
| 二、圆弧圆柱蜗杆传动的形成和特点 .....  | 237 |
| 三、ZC型蜗杆传动减速器系列 .....    | 242 |
| 四、蜗杆传动质量的评定 .....       | 246 |
| 第二章 蜗杆传动的啮合几何学 .....    | 249 |
| 一、啮合运动关系 .....          | 249 |
| 二、共轭曲面的曲率关系 .....       | 257 |
| 三、与润滑理论相关的几个问题 .....    | 260 |
| 第三章 圆弧圆柱蜗杆传动的啮合分析 ..... | 263 |
| 一、啮合轴和啮合枢纽线 .....       | 263 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 二、啮合面分析 .....              | 272 |
| 三、啮合区 .....                | 277 |
| 四、第一类界限曲线 .....            | 284 |
| 五、第二类界限曲线 .....            | 303 |
| 六、诱导法曲率 .....              | 308 |
| 七、综合参数 .....               | 317 |
| 第四章 几何参数的设计与计算 .....       | 321 |
| 一、基本参数的设计原则 .....          | 321 |
| 二、齿廓几何参数的设计 .....          | 322 |
| 第五章 砂轮修整器 .....            | 331 |
| 一、砂轮廓线的计算 .....            | 332 |
| 二、砂轮直径的变化 .....            | 336 |
| 三、蜗杆齿形的误差计算 .....          | 340 |
| 四、砂轮修整器的设计说明 .....         | 343 |
| 第六章 磨削成型的圆弧圆柱蜗杆的啮合分析 ..... | 346 |
| 一、啮合特性 .....               | 346 |
| 二、CAVEX蜗杆的齿形修整 .....       | 367 |
| 三、齿形对比分析 .....             | 377 |
| 第七章 强度设计 .....             | 381 |
| 一、蜗杆传动的功率损失 .....          | 381 |
| 二、传动效率的计算 .....            | 382 |
| 三、承载能力的计算 .....            | 388 |
| 四、轴和轴承载荷的计算 .....          | 425 |
| 五、蜗杆和蜗轮尺寸的设计 .....         | 428 |
| 六、轮体的结构和典型工作图 .....        | 430 |
| 七、蜗杆蜗轮的材料和热处理 .....        | 434 |
| 第八章 蜗杆蜗轮的损伤分析 .....        | 444 |
| 一、轮齿损伤的形式 .....            | 444 |
| 二、蜗轮齿面的点蚀 .....            | 450 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 三、齿面胶合 .....             | 456 |
| 第九章 程序设计和数据表 .....       | 460 |
| 一、程序中的补充公式及其用途 .....     | 461 |
| 二、符号说明 .....             | 467 |
| 三、框图、程序和使用说明 .....       | 474 |
| 四、JB2318-79 系列数据表 .....  | 491 |
| 第十章 JB2318-79 系列图谱 ..... | 492 |
| 参考文献 .....               | 591 |

---



# 概 论

## 一、蜗杆传动的特点及发展

蜗杆传动属于空间啮合传动。其基本元件为蜗杆 1 和蜗轮 2，如图 1.0-1 所示。蜗杆传动用以传递两交错（既不平行

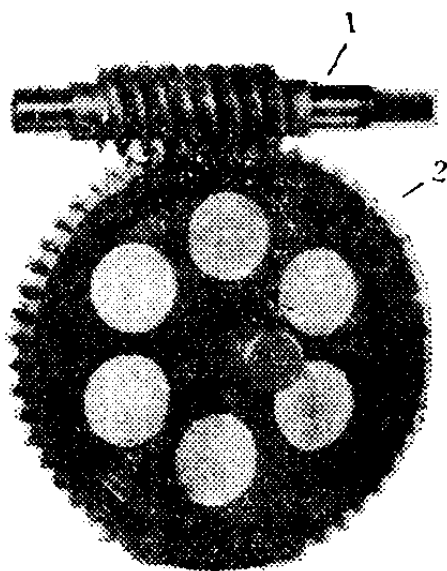


图 1.0-1 蜗杆传动

又不相交) 轴间的转矩和运动。两轴可以交错成任意角度  $\Sigma$ ，但最常用的为  $\Sigma=90^\circ$ 。在蜗杆传动中，通常蜗杆为主动件，蜗轮为从动件。但有时为了增速，如离心器中的蜗杆传动，蜗轮是主动件，而多头或大导程角的蜗杆则为从动件。

### 1. 蜗杆传动的特点

蜗杆传动的种类虽多，但其基本工作原理是相同的，现以普通蜗杆传动为例，说明其特点。这里所说的特点主要是

相对齿轮传动而言的。普通蜗杆是圆柱形的，表面有一条或几条螺纹，所以可把蜗杆视为一根较短的螺旋（丝杠），而把蜗轮齿视为螺母的一部分附在圆柱体上。这样就可把蜗杆传动类似于丝杠带动螺母移动的情况。当然，这样比喻并不完全恰当，因为两者的接触状态并不相同（蜗杆传动是线接触，螺旋传动是面接触），但作这样比喻可以形象地说明其运动关系。当蜗杆转动时，将带动蜗轮绕其自身轴线转过一个（蜗杆为单头时）或几个（蜗杆为多头时）轮齿；蜗杆连续转动，则蜗轮也随着连续转动。由此可知，只用两个零件就能实现很大的传动比。由于蜗杆传动类似于螺旋传动，而蜗杆与蜗轮的两轴交错，所以两齿面在啮合过程中有较大的相对滑动；与此同时，蜗杆与蜗轮在啮合过程中又都绕各自轴线转动，则齿面在接触中又相互滚动。他们的滚动速度在接触线法向的分量和的大小是决定齿面油膜大小的重要因素之一，其值越大越有利于形成液体动压油膜，有利于提高蜗杆传动的承载能力和传动效率。此速度和的大小与瞬时接触线的形状有关，瞬时接触线形状又与蜗杆头数（或蜗杆的导程角）有关；头数越多或蜗杆的导程角越大，瞬时接触线形状越有利。

根据上述可知，蜗杆传动具有以下优点：

（1）采用一级蜗杆传动就可实现很大的传动比 例如在金属切削机床中的低速转动工作台的传动中，采用的蜗杆传动的传动比甚至达到1000。但在传递动力的蜗杆传动中，不宜采用太大的传动比，因为传动比过大，蜗杆轴支承的跨度大，会影响蜗杆的刚度，故在设计动力蜗杆传动时，传动比通常取8~80之间；

（2）工作平稳，噪声小 由于蜗杆齿面是连续不断的

螺旋面，而蜗轮在同一时间处于啮合中的齿不少于两个齿，所以蜗杆与蜗轮的啮合是连续的。因此，在制造精度与工作条件相同的条件下，由制造误差引起的附加动载荷与齿轮传动相比，小得多；

(3) 结构紧凑，并可根据要求实现自锁 在要求传动比大的场合，采用蜗杆传动往往比齿轮传动结构紧凑，因为用一级蜗杆传动可以代替多级的齿轮传动，不仅减少了零件数目，而且简化了机构。在设计蜗杆传动时，只要使蜗杆的导程角小于蜗杆副的当量摩擦角，就可以使蜗杆传动自锁（应保证传动无振动和冲击）。

蜗杆传动的主要缺点是：

(1) 传动效率低 为实现大传动比，需采用小导程角的单头蜗杆，这时蜗杆传动的效率低，尤其具有自锁性的蜗杆传动的效率更低，小于50%。当不自锁时，蜗轮主动比蜗杆主动效率低。效率低表明动力损失大，相当一部分能量消耗在啮合摩擦上。故普通圆柱蜗杆传动所能传递的功率受到限制，通常不超过45kW。在设计多级传动时，为了降低蜗杆传动的啮合摩擦损失，一般把蜗杆传动放在高速级。这样，既可提高传动效率，又可使机构紧凑一些。

(2) 增加了较贵重的有色金属的消耗 蜗杆传动工作时，由于啮合齿面间有相当大的滑动，齿面容易产生磨损和发热。为了减小摩擦、磨损和工作温度，提高传动的承载能力和传动效率，一方面要保证良好的润滑，另一方面对蜗杆副的材料提出减摩，耐磨好的导热性及抗胶合能力强等性能的要求，所以在采用钢制蜗杆时，通常采用青铜做蜗轮齿圈。

由于上述特点，蜗杆传动在近代工业中得到了广泛的应

用；在机床制造业中，普通圆柱蜗杆传动的应用尤为普遍，并且几乎成了一般低速转动工作台和连续分度机构的唯一传动型式；冶金工业的轧机压下机构都采用大型蜗杆传动；煤矿设备中的各种类型的绞车及采煤机组牵引传动；起重运输业中各种提升设备、电梯、自动扶梯、汽车后桥传动及无轨电车等的传动。其他，如精密仪器设备、军工、宇宙观测部门中，蜗杆传动常用作分度机构、操纵机构、计算机构、测距机构等等。大型天文望远镜、雷达等也都离不开蜗杆传动。

## 2. 蜗杆传动发展概况

蜗杆传动的历史虽然很长，但得到迅速发展还是从本世纪二十年代开始的，尤其近三十多年来，随着空间啮合理论的不断突破，工业迅速发展的需要，发明了许多新型蜗杆传动，如五十年代的凹面齿圆柱蜗杆传动、锥蜗杆传动，七十年代的平面二次包络环面蜗杆传动等。与此同时还采用了许多利于提高各种蜗杆传动承载能力和传动效率的修形、挖窝，以及利用啮合中的动静压效应（封闭接触线）等措施，都取得了显著的效果，使蜗杆传动的发展达到了相当高的技术水平，如：

蜗杆传动输出转矩  $T_2 = 7000 \text{ N} \cdot \text{m}$ ；

蜗轮轮齿受力  $F_n = 800000 \text{ N}$ ；

蜗杆传动传递功率  $P = 10290 \text{ kW}$ ；

蜗杆传动的中心距  $a = 2000 \text{ mm}$  以上；

蜗杆转速  $n_1 = 4000 \text{ r/min}$ ；

蜗杆传动效率可达  $\eta = 0.98$ 。

关于蜗杆传动的今后研究方向，1979年7月蒙特利尔五届国际机器与机构理论联合会（IFTOMM）代表会议纪要

中曾提出，应将特殊蜗杆传动的发展以及传统圆柱蜗杆传动的应力模式有关数据的获取，作为今后重点研究方向。

目前，随着我国四化建设的迅速发展，国外先进设备正大量引进，为与这些设备中的蜗杆传动配套，我国对各种蜗杆传动机构展开了大量的研制工作，并取得了可喜的成果。但与四化建设的要求，差距还较大，今后应加强系统的实验研究工作，为设计提供结合我国实际的数据资料。

## 二、蜗杆传动的润滑

### 1. 蜗杆传动的润滑<sup>⊖</sup>

#### (1) 润滑的目的和作用

第一节指出，蜗杆传动在啮合过程中有很大的相对滑动，因此产生的摩擦、磨损和发热，使能量损失较大。为了减少摩擦阻力、磨损速度和控制传动装置的温升，以提高传动效率和工作寿命，必须注意蜗杆传动的润滑问题。

蜗杆传动润滑的作用主要是，在摩擦面间加入润滑剂，使之尽可能形成液体摩擦或半液体摩擦，以便有效地降低摩擦系数，从而减小摩擦力；当蜗杆和蜗轮工作表面完全被一层润滑油膜隔开时，即可避免两摩擦面的相互擦伤、研磨磨损和胶合；由于润滑可以减小摩擦，所以发热量减小，并且当润滑油流经摩擦面时可以带走一部分热量，从而降低传动装置的温升，因此，在传动装置中应有足够的润滑油。此外，润滑油所形成的油膜有保护零、部件不受锈蚀的作用。

由此可知，减速器的寿命在很大程度上与合理选择润滑油的种类、粘度以及供油系统有关。

---

⊖ 此部分与齐麟、张亚雄合写。

## (2) 润滑油的粘度

当油内部发生相对运动时，其分子间的阻力（油的内摩擦阻力）叫作油的粘性。油的粘性以其粘度大小表示之。粘度值表示油的内部作相对运动时，分子间摩擦阻力的大小；粘度大则表示油内部作相对运动时，分子间的摩擦阻力大；反之，则小。所以油的粘度是选择油的一个重要指标。

### 1) 粘度的分类

根据测定条件及所采用的单位不同，粘度一般分为三类：动力粘度、运动粘度和相对粘度。我国现行标准规定采用运动粘度为主，相对粘度为辅。国际单位中规定以动力粘度表示。为了合理地确定所选润滑油的粘度，有必要了解这些粘度的含义和单位，兹介绍如下：

① 动力粘度 当液体长、宽均为1m的面积，并相距1m的两层平行的液面，以每秒为一米的速度作相对运动，则此时所产生的液体内摩擦阻力，称为该液体的运动粘度，以 $\mu$ 表示。当摩擦阻力恰为1N时，则叫作一个动力粘度单位，称为“Pa·s”，即

$$\mu = \frac{1\text{N}/\text{m} \cdot \text{m}}{1\text{m}/\text{s}/\text{m}} = \frac{1\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{s} \quad (1.0-1)$$

动力粘度的国际单位称帕斯卡·秒。物理单位为泊（P）或厘泊（cP），其换算关系为

$$P(\text{泊}) = \frac{1\text{Dyne} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = 100\text{cP} = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s} \quad (1.0-2)$$

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = \frac{1\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 10\text{P} = 1000\text{cP} \quad (1.0-3)$$

液体在任意温度 $t^\circ\text{C}$ 时的动力粘度以 $\mu_t$ 表示。

② 运动粘度 在同温度下，其液体的动力粘度与该液

体的密度的比值称为运动粘度，以 $\nu$ 表示，其单位为 $\text{m}^2/\text{s}$ 。由于这个单位对多数的润滑油来说，都显得太大，所以通常用 $1\text{cm}^2/\text{s}$ [简称St(施)]作为运动粘度的单位，其换算关系为

$$1\text{cm}^2/\text{s} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s} = 1\text{St}(\text{施}) = 100\text{cSt}(\text{厘施})$$

(1.0-4)

液体在任意温度 $t^\circ\text{C}$ 时的运动粘度以 $\nu_t$ 表示。

运动粘度和动力粘度的换算关系为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.0-5)$$

式中

$\nu$ ——运动粘度，cSt；

$\mu$ ——动力粘度，cP；

$\rho$ ——润滑油的密度，对于矿物油 $\rho = 0.85 \sim 0.9\text{g}/\text{cm}^3$   
 $= 8230 \sim 8820\text{N}/\text{m}^2$

③ 相对粘度 相对粘度是用各种粘度计测出的粘度，以相对单位表示。例如，用恩格尔粘度计测出的 $t^\circ\text{C}$ 时的粘度的单位为恩氏度（以 $^\circ\text{E}_t$ 表示）；用赛氏粘度计测得的 $t^\circ\text{C}$ 时的粘度的单位为赛氏秒（以St表示）；用雷氏粘度计测量时所得的粘度单位则以雷氏秒(Rt)表示等。

恩氏粘度值以 $^\circ\text{E}_t$ 表示。测量粘度时常用的温度为 $20^\circ\text{C}$ ， $50^\circ\text{C}$ 和 $100^\circ\text{C}$ ，相应的恩氏粘度记为 $^\circ\text{E}_{20}$ ， $^\circ\text{E}_{50}$ 和 $^\circ\text{E}_{100}$ 。我国商品油的粘度常采用恩氏粘度单位。实用中经常遇到运动粘度与恩氏粘度的换算，图1.0-2给出他们之间的换算关系。其他各种粘度的换算请参阅[20]。

## 2) 温度和压力对粘度的影响

### ④ 温度对粘度的影响

粘度随温度而变化的性质称为粘-温特性。温度升高，