

# 圆弧齿圆柱蜗杆传动

杨兰春 编著

山西人民出版社

# 圆弧齿圆柱蜗杆传动

杨兰春 编著

•

山西人民出版社出版 (太原并州北路11号)

山西省新华书店发行 山西新华知青印刷厂印刷

•

开本: 850×1168 1/32 印张: 13 字数: 273千字

1984年2月第1版 1984年2月太原第1次印刷

印数: 1—3000册

•

书号: 15088·158 定价: 1.65元

## 前 言

本书围绕动力圆弧齿圆柱蜗杆传动的中心问题——承载能力（或使用寿命）、传动效率——重点介绍了空间啮合原理及摩擦、磨损与润滑的一些基本知识；较深入地论述了车削的圆弧齿圆柱蜗杆传动（ZAY型）、圆环面二次包络圆柱蜗杆传动（ZTKY型）的啮合原理；阐明了几何参数对传动质量的影响和各参数间的内在联系；提出了“最佳”几何参数、强度计算方法及新的设计方案；介绍了减速器设计的几个基本问题；论证了可控点接触圆弧齿圆柱蜗杆传动的设计方法；展望了可能出现的变态蜗杆传动。

本书可供从事机械传动的科技人员和设计人员参考，同时可做为高等工科院校师生学习机械原理和机械零件的参考书。

本书在编写过程中，曾得到国内很多厂矿、学校技术人员的支持和帮助，在此表示感谢。

# 目 录

## 第一章 概论

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 1.1 蜗杆传动的特点及发展概况 .....      | (1)  |
| 1.2 蜗杆传动的分类 .....           | (4)  |
| 1.3 影响蜗杆传动质量的主要因素 .....     | (7)  |
| 1.4 圆弧齿圆柱蜗杆传动的主要特点及发展概况 ... | (11) |

## 第二章 啮合原理基础知识

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| 2.1 矢量运算基础 .....                   | (14) |
| 2.2 坐标变换和系数矩阵 .....                | (18) |
| 2.3 蜗杆传动运动学基础 .....                | (35) |
| 2.4 曲面、法线和切面方程式 .....              | (45) |
| 2.5 单参数曲面族的包络面, 啮合面<br>和共轭曲面 ..... | (49) |
| 2.6 蜗杆传动的“过切” .....                | (53) |
| 2.7 诱导法曲率的求解方法 .....               | (60) |
| 2.8 几个特殊方向的诱导法曲率 .....             | (69) |

## 第三章 摩擦、磨损与润滑基础

|                |      |
|----------------|------|
| 3.1 干摩擦 .....  | (72) |
| 3.2 边界摩擦 ..... | (76) |

|      |                      |         |
|------|----------------------|---------|
| 3.3  | 流体动压润滑 .....         | ( 79 )  |
| 3.4  | 混合摩擦状态 .....         | ( 93 )  |
| 3.5  | 表面磨损及其分类 .....       | ( 95 )  |
| 3.6  | 粘着性磨损 .....          | ( 99 )  |
| 3.7  | 疲劳磨损 .....           | ( 103 ) |
| 3.8  | 磨料磨损和塑性变形 .....      | ( 106 ) |
| 3.9  | 润滑油及添加剂 .....        | ( 106 ) |
| 3.10 | 蜗杆传动润滑油的选择 .....     | ( 110 ) |
| 3.11 | 蜗杆传动的润滑方式和冷却措施 ..... | ( 122 ) |
| 3.12 | 蜗杆和蜗轮的材 料 .....      | ( 125 ) |

#### 第四章 车削的圆弧齿圆柱蜗杆传动的啮合原理

|     |                                  |         |
|-----|----------------------------------|---------|
| 4.1 | 蜗杆螺旋面方程式 .....                   | ( 134 ) |
| 4.2 | 接触线方程式 .....                     | ( 140 ) |
| 4.3 | 啮合轴和啮合枢纽线 .....                  | ( 144 ) |
| 4.4 | ZAY型蜗杆传动的啮合区 .....               | ( 155 ) |
| 4.5 | ZAY型蜗轮的“过切” .....                | ( 164 ) |
| 4.6 | ZAY型蜗杆传动的诱导法曲率方程式 .....          | ( 172 ) |
| 4.7 | 各几何参数对主要几何尺寸、啮合特性的<br>影响小结 ..... | ( 186 ) |

#### 第五章 圆环面二次包络圆柱蜗杆传动的啮合原理

|     |                    |         |
|-----|--------------------|---------|
| 5.1 | 蜗杆螺旋面方 程式 .....    | ( 188 ) |
| 5.2 | 蜗杆和蜗轮接触 线方程式 ..... | ( 195 ) |
| 5.3 | 啮合枢纽线方 程式 .....    | ( 198 ) |
| 5.4 | 啮合 区 .....         | ( 214 ) |
| 5.5 | 啮合点处的诱导法 曲 率公      |         |

|               |         |
|---------------|---------|
| 式及其求解步骤 ..... | ( 220 ) |
|---------------|---------|

## 第六章 几何计算和参数选择

|                                             |         |
|---------------------------------------------|---------|
| 6.1 几何参数计算 .....                            | ( 227 ) |
| 6.2 基本几何参数选择 .....                          | ( 240 ) |
| 6.3 车削的圆弧齿圆柱蜗杆传动的<br>几何参数选择 (以ZAY型为例) ..... | ( 249 ) |
| 6.4 圆环面二次包络圆柱蜗杆传动<br>的几何参数选择 .....          | ( 262 ) |
| 6.5 几何尺寸计算公式 .....                          | ( 263 ) |
| 6.6 几何参数选择配搭表 .....                         | ( 267 ) |
| 6.7 凸凹双圆弧齿圆柱蜗杆传动 .....                      | ( 280 ) |

## 第七章 圆弧齿圆柱蜗杆传动的 承载能力和强度计算

|                     |         |
|---------------------|---------|
| 7.1 失效形式和承载能力 ..... | ( 289 ) |
| 7.2 受力和效率计算 .....   | ( 297 ) |
| 7.3 强度计算方法 .....    | ( 304 ) |

## 第八章 圆弧齿圆柱蜗杆传动的改进

|                                         |         |
|-----------------------------------------|---------|
| 8.1 蜗轮齿面啮合特征的分析 .....                   | ( 336 ) |
| 8.2 在整个接触场内选择啮合部位及<br>可能出现的变态蜗杆传动 ..... | ( 347 ) |
| 8.3 可控点接触圆弧齿圆柱蜗<br>杆传动的设计与计算 .....      | ( 349 ) |
| 8.4 对圆弧齿圆柱蜗杆传动设计与计算                     |         |

|           |         |
|-----------|---------|
| 的建议 ..... | ( 366 ) |
|-----------|---------|

## 第九章 圆弧齿圆柱蜗杆减速器

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 9.1 减速器的型式、代号和主要参数 ..... | ( 370 ) |
| 9.2 减速器箱体及蜗轮付的结构设计 ..... | ( 385 ) |
| 9.3 蜗杆传动的热平衡计算 .....     | ( 391 ) |
| 9.4 减速器的公差及技术要求 .....    | ( 393 ) |
| 9.5 减速器的使用和维修 .....      | ( 401 ) |
| 附录 参考文献 .....            | ( 403 ) |

# 第一章 概 论

## 1.1 蜗杆传动的特点及发展概况

蜗杆传动是传递交错轴（交错角  $\Sigma$  通常采用  $90^\circ$ ，但也可为任意值）间的动力或运动的传动机构。它主要由蜗杆和蜗轮组成，如图 1—1 所示。蜗杆相当于一头或多头的等导程（或变导程）螺旋，蜗轮则是变态斜齿轮（或为斜齿轮或为直齿轮）。

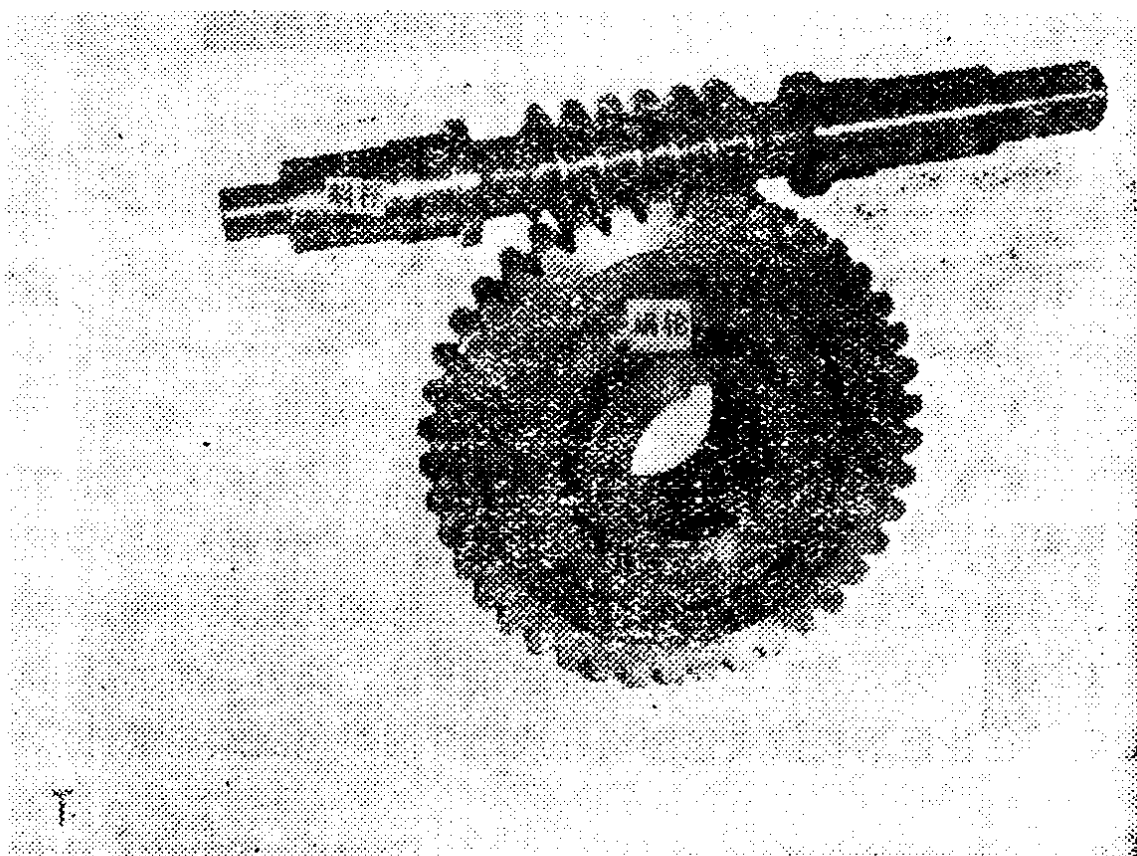


图 1—1

包含蜗杆轴线且垂直蜗轮轴线的平面称蜗杆传动的主平面。在主平面内蜗杆和蜗轮的共轭啮合特性和齿条传动相同。

### 1.1.1 蜗杆传动的特点

1.1.1.1 运动特点。由于蜗杆和蜗轮的轴线在空间交错，所以主要运动特性是相对滑动而不是相对滚动，即其共轭齿面接触点处的相对速度  $|\vec{v}^{(12)}|$  总大于蜗杆或蜗轮的圆周速度  $|\vec{v}_1|$  或  $|\vec{v}_2|$ ，且任何接触点处的  $\vec{v}^{(12)}$  都不等于零，使蜗杆传动具有工作平稳、噪音小、振动小等特点。另一方面，当共轭齿面间未实现良好润滑时，金属直接接触，易产生磨料磨损和粘着性（胶合）磨损。为了避免或减少这两种磨损，要求蜗轮采用减磨和耐磨性能好、易跑合的材料制造。常用材料是铜合金。

1.1.1.2 可实现较大的传动比。一级动力蜗杆传动，一般可实现的传动比为  $i_{12} = 8 \sim 60$ ，特殊要求可实现的传动比为  $i_{12} = 1 \sim 100$ 。和齿轮传动相比较蜗杆传动可得到结构紧凑、体积小、重量轻、成本低的减速机构。

1.1.1.3 应用特点。蜗杆传动中，由于蜗杆为主动件时，其效率远高于以蜗轮为主动件时的效率，故蜗杆传动多用于减速机构。据此，当蜗轮为主动件时，易设计成传动效率  $\eta < 0$  的自锁机构。

1.1.1.4 工艺特点。由于蜗杆传动是交错轴传动，要实现共轭齿面线接触，必须用对偶范成法加工蜗轮（或蜗杆），否则呈现点接触。所谓对偶范成，是指加工蜗轮（或蜗杆）时，刀具和毛坯的啮合是蜗杆和蜗轮啮合的再现，亦即几何尺寸和运动特性两者相同。另外为了增加瞬时接触线长度，或为了增加瞬时啮合齿数，往往把蜗轮做成包围蜗杆或蜗杆同时包围蜗轮的外廓形状。

### 1.1.2 蜗杆传动技术的发展概况

从本世纪二十年代以来，蜗杆传动机构的研制工作发展很快，蜗杆传动已广泛应用在冶金、矿山、起重运输、化工、国防等行业，达到了相当高的技术水平。如：

蜗杆传动输出扭矩  $T_2 = 70000(\text{N} \cdot \text{m})$

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  $n_1 = 40000(\text{r.p.m.})$

蜗杆圆周速度  $v_1 = 69(\text{m/s})$

蜗杆传动的效率可达  $\eta = 98\%$

传动比  $i_{12} = 1 \sim 5$  的蜗杆传动用得越来越多。

国内外广泛研究了蜗杆传动的共轭啮合原理，揭示了很多新的矛盾，从而对已有的蜗杆传动进行了改进，提高了承载能力（或使用寿命）和传动效率，同时发明了很多新型蜗杆传动。

二次包络尼曼圆柱蜗杆传动（亦称圆弧面二次包络圆柱蜗杆传动）的发明，为圆柱蜗杆传动开辟了道路。

圆弧面蜗杆传动的各种变态形式的出现，保留了“原始型”的主要优点（如瞬时啮合齿数多，呈现二次接触等），克服了一些缺点（如啮合区小、工艺性能差等），从而提高了承载能力和传动效率。尤其大型圆弧面蜗杆传动在冶金、矿山等部门的应用，对发展生产起了重要作用。

偏置蜗杆的发明，为蜗杆传动合理地利用啮合场和速度场，改善蜗杆传动的啮合特性，起了重要作用，为今后进一步发展蜗杆传动打开了思路。

目前，各种蜗杆传动机构的研制和应用在我国都有较快发展，对共轭啮合原理的研究也取得可喜的成果。随着我国四化建

设的发展，蜗杆传动机构的研制和应用，必将取得更大的成就。

蜗杆传动的发展，大致有以下特点：

蜗杆由直纹螺旋面发展成曲纹螺旋面，蜗杆和蜗轮共轭啮合由凸凸面发展成凸凹面，增大了共轭接触点处的诱导曲率半径，改善了共轭齿面间的润滑条件；蜗杆和蜗轮由单包围发展成双包围，从而呈现出了有利的二次接触条件，并且明显地增加了瞬时啮合齿数。

随着空间啮合理论研究的进展，人们逐步掌握了蜗杆传动的内在特点。利用速度场和瞬时接触线场的概念，合理地选择了啮合部位，出现了一批有发展前途的变态蜗杆传动。

由单包络蜗杆传动发展到二次包络蜗杆传动，从而把几何学问题和工艺学问题有机地结合起来，为采用硬齿面蜗杆传动，提供了磨齿工艺的理论依据。

加工蜗轮（或蜗杆）由对偶范成法发展到有控非对偶范成法，即由线共轭啮合发展到有控点接触，开辟了提高动力蜗杆传动承载能力和传动效率的新途径，或者说由“原始型”发展到各种“变态型”，提高了传动质量。

随着科学的发展，人们揭示了蜗杆传动内因和外因的有机联系，即把几何参数、材料及材料热处理、润滑及润滑方法、工艺特点、运动特性及承载特性等有机地联系起来了。特别是对润滑油及润滑油添加剂的研究，取得了重要成果。近年来设计方法的研究也取得了较大进展。高速重载小传动比的蜗杆传动，在各个工业部门用得越来越多。

## 1.2 蜗杆传动的分类

蜗杆传动的分类是为了揭示各种蜗杆传动的共性和特性，以

1.2.1 第一种分类方法是按蜗杆外廓形状、工艺特性分类,其一般分类如表 1 所列。

表 1

|                            |                                           |                           |               |
|----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|---------------|
| 蜗<br>杆<br>传<br>动           | 圆<br>柱<br>蜗<br>杆<br>传<br>动                | 直纹面圆柱<br>蜗杆传动（普<br>通蜗杆传动） | 阿基米德圆柱蜗杆传动    |
|                            |                                           |                           | 延伸渐开线圆柱蜗杆传动   |
|                            |                                           |                           | 渐开线圆柱蜗杆传动     |
|                            |                                           | 曲纹面圆柱<br>蜗杆传动             | 轴面圆弧齿圆柱蜗杆传动   |
|                            |                                           |                           | 法面圆弧齿圆柱蜗杆传动   |
|                            |                                           |                           | 平行轴面圆弧齿圆柱蜗杆传动 |
|                            | 圆<br>弧<br>回<br>转<br>面<br>蜗<br>杆<br>传<br>动 | 双包围圆弧<br>面蜗杆传动            | 圆环面二次包络圆柱蜗杆传动 |
|                            |                                           |                           | 直锥面二次包络圆柱蜗杆传动 |
|                            |                                           |                           | 直线齿双包圆弧面蜗杆传动  |
|                            |                                           |                           | 二次包络双包圆弧面蜗杆传动 |
| 偏<br>置<br>蜗<br>杆<br>传<br>动 | 单包围圆弧<br>面蜗杆传动                            | 曲线齿双包圆弧面蜗杆传动              |               |
|                            |                                           | 平面齿轮单包圆弧面蜗杆传动             |               |
|                            | 圆锥偏置<br>蜗杆传动                              | 曲线齿轮单包圆弧面蜗杆传动             |               |
|                            |                                           | 圆柱偏置<br>蜗杆传动              | 直线齿圆锥偏置蜗杆传动   |
|                            | 曲线齿圆锥偏置蜗杆传动                               |                           |               |
|                            |                                           | 直线齿圆柱偏置蜗杆传动               |               |
|                            |                                           | 曲线齿圆柱偏置蜗杆传动               |               |
|                            | 特殊蜗杆传动                                    |                           |               |

表 1 中列的圆柱蜗杆传动、双包弧面蜗杆传动、单包弧面蜗杆传动、偏置蜗杆传动机构的示意图分别见图1—2a、b、c、d。

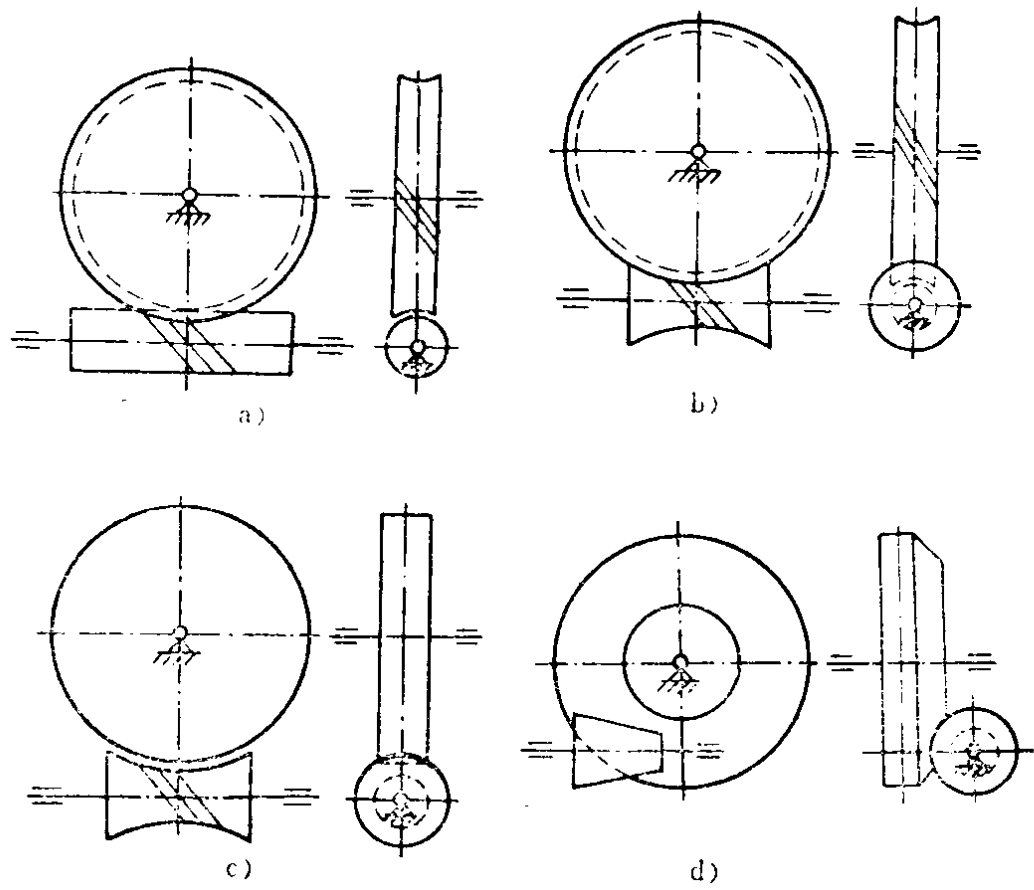


图 1—2

1.2.2 第二种分类方法是把蜗杆传动分成蜗杆为首创面 蜗 杆传动和蜗轮为首创面蜗杆传动两大类。

蜗杆螺旋面为母面（刀具），用对偶范成法加工（创成）蜗轮齿面，亦即蜗轮齿面是蜗杆螺旋面的包络面，这类蜗杆传动称为蜗杆为首创面蜗杆传动。如圆柱蜗杆传动、双包围弧面蜗杆传动、偏置蜗杆传动等。蜗轮齿面为母面（刀具），用对偶范成法加工蜗杆，亦即蜗杆的螺旋面是蜗轮齿面的包络面，这类蜗杆传动称蜗轮为首创面蜗杆传动。如某些单包弧面蜗杆传动等。

1.2.3 第三种分类法是把蜗杆传动分成单包络蜗杆传 动 和

双包络（二次包络）蜗杆传动两大类。

首创面（母面）为轨迹面的蜗杆传动，称单包络蜗杆传动，如用直刃或曲刃车刀加工蜗杆螺旋面的圆柱蜗杆传动。首创面为包络面的蜗杆传动称二次包络蜗杆传动。如圆环面二次包络圆柱蜗杆传动、直锥面二次包络圆柱蜗杆传动等。

1.2.4 第四种分类方法是把蜗杆传动分为单包围蜗杆传动、双包围蜗杆传动以及非包围蜗杆传动三大类。

从蜗杆或蜗轮外廓形状观察，如果蜗轮包围蜗杆，而蜗杆不包围蜗轮（反之亦然，如图1—2a、c所示），称单包围蜗杆传动。若蜗杆和蜗轮相互包围，称双包围蜗杆传动（图1—2b）。若蜗轮、蜗杆都不相包围称非包围蜗杆传动（图1—2d）。

### 1.3 影响蜗杆传动质量的主要因素

动力蜗杆传动质量的综合指标是承载能力和传动效率。

通过对蜗杆传动主要失效形式的产生原因及影响传动效率各因素的分析可知，影响蜗杆传动承载能力和传动效率的主要因素是共轭齿面间产生的摩擦力及赫芝应力值的大小。在某种意义上讲，摩擦力（或摩擦系数）大小又起主导作用。

不难理解，若轮齿齿面间处于流体润滑状态，即可避免两齿面金属直接接触，从而有效地减小共轭齿面间的摩擦力（或摩擦系数），同时能最大限度地扩大齿面间的实际接触面积，使载荷分布均匀，降低动载荷和应力值。

由流体润滑理论的分析（参考第三章）可知，影响液体动压油膜形成的主要因素，是相对速度 $\vec{v}^{(12)}$ 在接触线法线方向分量的大小，即

$$\vec{v}_n^{(12)} = \vec{v}_1 \cdot \vec{n} + \vec{v}_2 \cdot \vec{n}$$

式中  $\vec{v}_{2n}$ ——蜗轮圆周速度在接触线法线方向上的分量（图 1—3）。

$\vec{v}_{1n}$ ——蜗杆圆周速度在接触线法线方向上的分量（图 1—3）。

图1—3示出了接触点处相对速度 $\vec{v}^{(12)}$ 和该点处接触线切线之间夹角 $\Omega$ 。可以看出 $\Omega$ 越接近 $90^\circ$ ，相对速度在接触线法线分量越大，越易形成动压油膜。同时示出了 $\Omega = 0$ 时各点的集合线 $a-b$ 以及在附近形成的最易产生粘着性磨损的危险区。

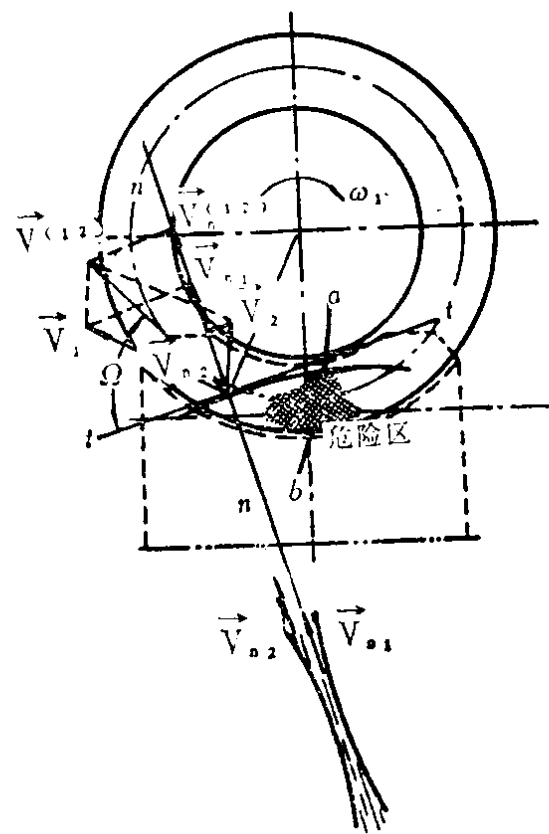


图 1—3

当蜗杆传动的几何尺寸和圆周速度给定时， $\vec{v}^{(12)}$ 的大小和方向都是定值，这时相对速度 $\vec{v}^{(12)}$ 在接触线法线方向的投影 $\vec{v}_n^{(12)}$ ，仅受 $\Omega$ 角大小的影响，如图1—3所示。 $\Omega$ 角是接触线的切线和相对速度 $\vec{v}^{(12)}$ 之间的夹角。实验和实践都证明 $\Omega$ 角大小（ $\Omega$ 的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ）对蜗杆传动质量有很大影响。国外试验证明， $\Omega = 90^\circ$ 和 $\Omega = 0^\circ$ 相比较，前者承载能力是后者的16倍。

在瞬时啮合点处， $\vec{v}^{(12)}$ 是定矢量，所以 $\Omega$ 角大小仅受接触

线形状的影响。

根据摩擦润滑理论的分析，当共轭齿面间处于半干摩擦状态时，相对速度增大，表面温度升高，产生熔焊结点，从而引起粘

着性磨损。当共轭齿面间处于边界润滑状态时，相对速度过大，同样会使温度升高，促使边界油膜破裂。当共轭齿面间处于流体润滑状态时，相对速度过大，会产生大的内摩擦损耗，使温度升高，润滑油粘度下降，引起动压降低，油膜破裂。另外 $v_n^{(12)}$ 大小又是动压油膜形成的主要条件。当接触线形状较为理想时，相对速度越大，对形成油膜越有利。

总之，当共轭齿面间有充足的润滑油，且传递的功率不变时，相对速度的法向分量 $v_n^{(12)}$ 越大，就越利于形成流体润滑状态。所以，改善接触线形状使各接触点处的 $\Omega$ 角尽量接近 $90^\circ$ ，有最理想的啮合特性，是提高蜗杆传动承载能力和传动效率的重要措施。

应当指出，不同类型的蜗杆传动，接触线形状有很大差别，图1—4是不同类型蜗杆传动接触线形状示意图。从图中可以看出，圆弧面蜗杆传动各点处的 $\Omega$ 角都接近 $90^\circ$ ，偏置蜗杆传动也十分理想，所以这两种蜗杆传动承载能力大，传动效率高。圆柱蜗杆传动则要比以上两种差。应当特别指出，在工作啮合区内 $\Omega = 0$ 点的集合线为 $a-b$ ，且在其附近，各接触点处 $\Omega$ 角都很小，致使在 $a-b$ 线附近形成了润滑条件最差的“危险区”。试验证明，在这个区内最易产生粘着性磨损。

另外影响蜗杆传动质量的因素还很多，如诱导曲率半径、载荷性质、材料配偶、润滑油及润滑方法等。

为了提高蜗杆传动的承载能力和传动效率，设计蜗杆传动时应尽量满足如下要求：

共轭齿面间的啮合，要有利于液体动压油膜的形成。通过对蜗杆传动类型和几何参数的合理选择，第一，改善接触线形状，使 $\Omega$ 角尽量接近 $90^\circ$ 。第二，使瞬时啮合齿数增多，以加长瞬时接触线长度，降低单位载荷。第三，使共轭齿面间啮

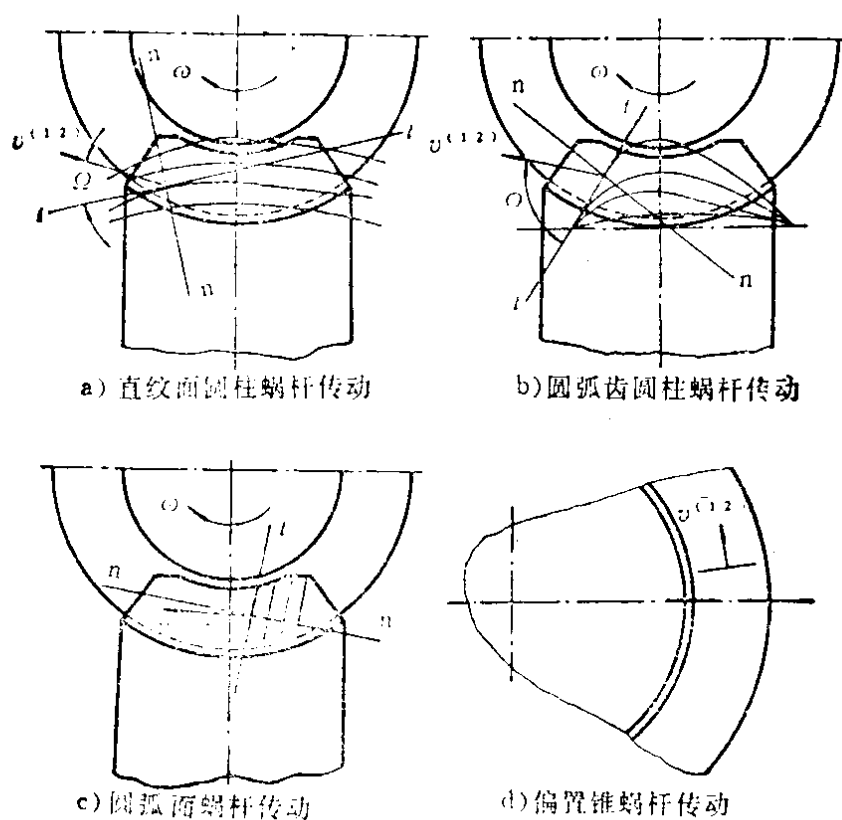


图 1—4

合点处的诱导曲率半径增大，以便减少赫芝应力和改善润滑条件。

为了提高蜗杆传动的承载能力和传动效率，可从以下几个方面采取措施：

- 几何参数、几何尺寸和传动类型；
- 载荷大小、施加方式和载荷特性；
- 润滑油、润滑油添加剂、润滑和冷却方法；
- 材料的配偶和材料的热处理；
- 工艺方案、齿面光洁度及“人工油涵”的形成；
- 运动特性、施加方式及速度大小。

本书就以上几个方面分析圆弧齿圆柱蜗杆传动的承载能力、传动效率及实现最佳设计问题。