

精密蜗杆传动副磨损量补偿及侧隙调控方法*

陈永洪

重庆大学机械传动国家重点实验室

蜗杆传动是机械传动的一种主要形式，具有传动比范围宽(通常一级传动比即可达 5~100，传递运动时最大可达 1500)、结构紧凑、体积小、运动平稳、噪声低等优点，除被广泛应用于动力传动外，也是机床及精密仪器精密圆分度机构的首选部件。

蜗杆传动副的侧隙是指一对蜗轮蜗杆啮合时非工作齿面间的间隙。侧隙的存在主要用以防止由于误差和热变形而致使传动副卡死，并给齿面间润滑油膜预留空间，但侧隙同时又给机构在反转时带来空回程，进而使机构不能准确定位。特别是频繁正反转的蜗杆传动中，侧隙引起的累积误差，严重影响系统的传动精度、位置精度和动态响应特性。此外，传动副齿面磨损导致的侧隙增大，也将降低传动系统的精度和寿命。

精密机电系统如工业机器人、数控机床、印刷设备、自动火炮、雷达系统等中，要求其蜗杆传动副的侧隙具有可调性，以到达系统小侧隙或无侧隙的目的，进而提高系统跟踪精度和稳定性。

因此，如何减小或补偿精密蜗杆传动副的齿面磨损量并对齿侧间隙进行有效调控，是精密蜗杆传动副的核心技术。根据侧隙调控方法及磨损量补偿原理不同，目前精密蜗杆传动主要有以下六大类：

1.中心距调整原理

在正常普通圆柱蜗杆传动中，将其中心距制作为浮动形式，通过利用调整垫片或偏心套等方式将蜗杆沿中心距方向移动(即：改变中心距)进行传动副侧隙调整。

正常啮合情况下，蜗杆的节圆为其分度圆，此时蜗杆分度圆的轴向齿厚 s 为：

$$s = \frac{\pi m_a}{2} \quad (1)$$

式中， m_a 为圆柱蜗杆的轴向模数。

但蜗杆沿中心距方向移动 h (即：中心距减小 h) 后，如图 1 所示，蜗杆的节圆与分度圆不同，其齿厚加大。此时的轴向齿厚 s' 为：

$$s' = \frac{\pi m_a}{2} + 2h \tan \alpha \quad (2)$$

式中， α 为圆柱蜗杆的轴向压力角。

由式(1)和式(2)可以看出，通过调整 h 值的大小，可调整传动副的侧隙及可补偿蜗轮齿面的磨损量，其中中心距调整量 h 与侧隙补偿量 δ 之间的关系为：

$$\delta = 2h \tan \alpha \quad (3)$$

该类侧隙可调式传动副具有结构简单、调整方便及成本低等优点，但其破坏了正确的啮合关系，造成齿面接触不良且磨损较快。目前主要应用于各类机床的分度台中。

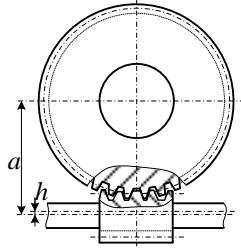


图 1 调整普通圆柱蜗杆传动中心距

2.蜗杆轴向移动原理

① 双导程圆柱蜗杆传动副 (如图 2 所示), 其蜗杆的左侧齿面导程 P_1 与右侧齿面导程 P_2 不相等, 其中因 $P_2 > P_1$, 故其蜗杆轴向齿厚沿轴向递增或递减, 如图 3 所示, 其一个导程之间的齿厚关系为:

$$s' = s + (P_2 - P_1) \quad (4)$$

而其蜗轮的所有齿的齿厚均相等, 因此当蜗杆沿其轴向移动时, 即可达到调整齿侧间隙及补偿磨损量的目的。蜗杆的轴向移动量 h 与侧隙补偿量 δ 之间的关系为:

$$\delta = 2h \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2} \quad (5)$$

台湾 TANSHING、日本津田驹 TSUDAKOMA、美国 Troyke 公司的连续分度精密转台产品多采用双导程蜗杆传动, 国内浙江台玖、德州金宇等公司专业生产高精度双导程蜗杆传动副。但加工蜗轮的复合模数滚刀铲磨困难, 蜗轮不可磨削, 精密制造成本高; 蜗轮蜗杆啮合传动时相邻齿对的齿侧间隙不相等, 不能保证每对齿的齿侧间隙都符合精度要求; 蜗轮与蜗杆同时啮合的齿对数极小、承载能力低、易磨损、精度寿命短, 难以胜任高速精密运动或重载精密运动的要求。



图 2 双导程圆柱蜗杆传动

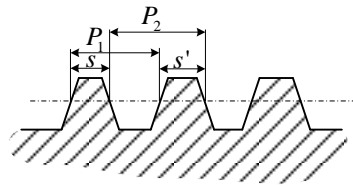


图3 双导程蜗杆几何关系

② 锥蜗杆传动副 (如图 4 所示), 其蜗杆轮齿位于一锥度为 θ 的圆锥体表面, 两齿面的压力角 α_1 和 α_2 不等, 如图 5 所示。通过轴向移动蜗杆即可实现对传动副侧隙的调整和蜗轮齿面磨损量的补偿, 其移动量 h 与侧隙补偿量 δ 之间的关系为:

$$\delta = h \cos \theta (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2) \quad (6)$$

锥蜗杆传动将其蜗杆做轴向移动, 在不破坏齿面共轭的情况下调整传动副侧隙, 还能补偿蜗轮齿面补偿能和具有离合功能。此外, 锥蜗杆传动还具有同时啮合齿数多、承载能力高、传动平稳; 润滑角接近 90° 、润滑效果好; 传动比范围广、结构紧凑、蜗轮材质能以钢代铜等优点。但其蜗轮凹面容易根切、锥蜗杆两侧齿面压力角不对称、正反转受力不等。目前在美国航空飞行器传动系统、空间飞行器伺服控制系统、天文望远镜分度装置及俄罗斯的管道阀等中等到了广泛应用。



图4 锥蜗杆传动

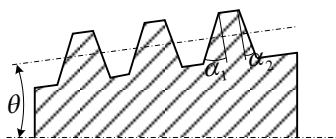


图5 锥蜗杆几何关系

3.蜗杆周向旋转原理

分段式蜗杆传动 (如图 6 所示), 其蜗杆由半截蜗杆轴和半截空心蜗杆组成的, 蜗轮齿面进行合理的修形, 使其能够适应蜗杆的剖分式设计。

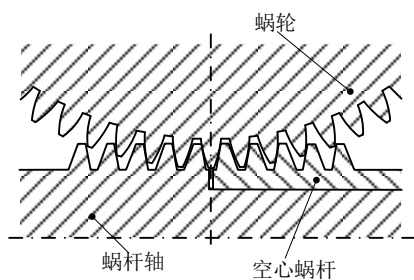


图 6 分段式蜗杆传动副

齿侧间隙调整及齿面磨损量补偿是在蜗杆轴固定、空心蜗杆受一定轴向预紧力的情况下进行的，通过旋转空心蜗杆，使得两截蜗杆的工作面与蜗轮齿发生接触，设置好齿侧间隙，用涨紧套将两截蜗杆固联。齿侧间隙的调整较方便，在磨损后重新调整齿侧间隙也能获得满意的接触状态，其空心蜗杆旋转量 h 与侧隙补偿量 δ 之间的关系为：

$$\delta = \frac{hP}{2\pi} \quad (7)$$

式中， P 为蜗杆导程。

德国 OTT 公司的分段式圆柱蜗杆传动如图 7 所示，其蜗杆轴的右侧齿面为工作面，空心蜗杆的左侧齿面为工作面，蜗杆轴驱动蜗轮沿逆时针方向旋转时，空心蜗杆的左侧齿面可以承受蜗轮的“回程冲击”，非工作面的齿形角较工作面为大，有利于提高蜗杆齿部强度。德国 peiseler、德国 Demmeler、法国 AllyTech、美国 mmk 等公司的连续分度高精度转台产品一般采用 OTT 分段式圆柱蜗杆传动，国内德州金宇也成功研制高精度分段式圆柱蜗杆传动副。此外，美国 Cone Drive 公司研制并推出了分段式环面蜗杆传动，如图 8 所示。该类蜗杆传动在精分度领域应用较为广泛，但由于蜗杆轴与空心蜗杆通过涨紧套固连，其受力结构不好且调整不便；正反转时分别只有其中一段蜗杆与蜗轮正常啮合，故其同时啮合的齿数是正常情况的一半，因而承载能力较低。



图 7 OTT 分段式圆柱蜗杆传动



图 8 Cone 分段式环面蜗杆传动

4、蜗轮轴向移动原理

- ① 变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动，如图 9 所示。该传动是在对斜平面包络环面蜗杆传动进行深入

分析的基础上提出的一种新型精密动力蜗杆传动形式。

变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动副，其斜平面齿轮的两侧齿面倾角不相等，轮齿沿轴向呈楔形，并使左右两侧齿面的接触线都落在轮齿偏薄的半边，因而通过轴向移位，可以实现全部齿侧间隙的合理调整及齿面磨损量的补偿。蜗轮轴向移动量 h 与侧隙补偿量 δ 之间的关系为：

$$\delta = h \tan(|\beta_1 - \beta_2|) \quad (8)$$

式中， β_1 和 β_2 为斜平面齿轮左右齿面倾角，且 $\beta_1 \neq \beta_2$ 。

隙可调式变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动除了具有斜齿平面蜗轮多齿啮合、承载能力和效率高的优点之外，还具有可制造精度高、齿侧间隙或空回量小、磨损可补偿等多优点，克服了威氏蜗杆传动存在的弱点，实现了威氏发明平面蜗轮的初衷。该传动副目前在多轴联动砂带磨床的分度台、电梯曳引机及舰艇稳定平台上得到一定的应用。但现有机床无法完成斜齿平面蜗轮的高精度加工；由于斜平面的轴向移动与周向转动不等效，故传动副无法进行精确调整侧隙和精确补偿磨损量，调整与补偿后需经过跑合才能达到正确的啮合关系。该传动副样机的传动精度 $43.2''$ ，空载回差小于 $50''$ 。



图 9 变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动

② 变齿厚渐开线齿轮包络环面蜗杆传动，如图 10 所示。该传动是为了克服变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动无法进行精确调整侧隙和精确补偿磨损量的缺点而提出，其蜗轮为两侧螺旋角不等的变齿厚渐开线齿轮，蜗杆由变齿厚渐开线齿轮齿面为母面包络而形成的环面蜗杆。

变齿厚渐开线齿轮包络环面蜗杆传动副，变齿厚渐开线齿轮两侧齿面螺旋角不相等，轮齿沿轴向呈楔形，并使左右两侧齿面的接触线都落在轮齿偏薄的半边，因而通过轴向移位，可以实现全部齿侧间隙的合理调整及齿面磨损量的补偿。蜗轮轴向移动量 h 与侧隙补偿量 δ 之间的关系为：

$$\delta = h \frac{|\tan \beta_1 - \tan \beta_2|}{\tan \beta_1 \tan \beta_2} \quad (9)$$

该传动副属于一次包络环面蜗杆传动并继承了 TI 蜗杆传动的优点，其同时啮合齿数多，具有承载能力高的优点；同时，蜗轮采用变齿厚渐开线齿轮，可利用成形法分别对两侧齿面进行高精度的磨削加工，环

面蜗杆齿面可由与变齿厚渐开线齿轮齿形一致的修磨轮进行高精度的珩齿加工，因而传动副可实现高精度加工；蜗轮采用两侧螺旋面螺旋角不等的变齿厚渐开线齿轮，其轮齿齿厚沿其轴向逐渐变化，基于螺旋面的轴向移动与周向转动等效原理，通过轴向移动变齿厚渐开线齿轮实现传动副的齿侧间隙可调整；此外，变齿厚渐开线齿轮采用高硬度耐磨材料，环面蜗杆采用中等硬度普通合金材料，且每一周期内环面蜗杆齿面的工作次数是变齿厚渐开线齿轮齿面的数十倍，故在负载运行中主要磨损环面蜗杆齿面，而变齿厚渐开线齿轮齿面几乎不磨损，因此，通过轴向移动变齿厚渐开线齿轮实现传动副的齿面磨损量可补偿。该传动副样机的传动精度 $21.3''$ ，空载回差小于 $25''$ 。



图 10 变齿厚渐开线齿轮包络环面蜗杆传动

5. 蜗轮周向旋转原理

① 剖分式正平面齿轮包络环面蜗杆传动 (威氏蜗杆传动)，如图 11 所示。该传动副的蜗杆齿面是以正平面为母面并按啮合关系作展成运动形成的包络面，蜗轮为沿齿宽中央平面剖分的平面齿轮，通过相对于蜗轮周向转动两半截蜗轮，便可以达到调整或补偿齿侧间隙的目的。蜗轮周向旋转量 h 与侧隙补偿量 δ 之间的关系为：

$$\delta = hr_2 \quad (10)$$

式中， r_2 为平面齿轮的分度圆半径。

若是一般蜗轮蜗杆传动时，剖分蜗轮结构会减小齿面的接触区；而由于平面齿轮包络环面蜗杆传动的接触区位于中间平面的一侧，故剖分式蜗轮不会减小蜗轮齿面接触区，且同时有多对齿啮合。但当传动比较小时，蜗杆齿面将产生严重根切；两半截蜗轮分别于与蜗杆左右两齿面同时接触，故导致齿面容易磨损且传动效率低；剖分式蜗轮错位消除原理的受力不佳且调整不便。

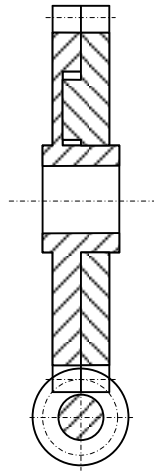


图 11 剖分析正平面齿轮包络环面蜗杆传动

② 无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动，如图 12 所示。该传动的蜗杆是以蜗轮齿面为原始母面包络展成的环面蜗杆，蜗轮轮齿则是两个能够绕其自身轴线转动的滚子，蜗轮由两个蜗轮组成，滚子均匀分布在每个蜗轮圆周上，通过绕蜗轮周向调整两个蜗轮轮体的安装位置，可使滚子始终与环面蜗杆两侧齿面接触，从而实现侧隙可调。蜗轮周向旋转量 h 与侧隙补偿量 δ 之间的关系为：

$$\delta = hr_2 \quad (11)$$

式中， r_2 为滚子蜗轮的分度圆半径。

该传动不仅具有滚子包络环面传动效率高及啮合齿数多等优点，还具有侧隙可调及零侧隙的特点。但滚子的结构使其滚子支撑轴较小，故承载能力较低；剖分式蜗轮错位消除原理的受力不佳且调整不便。



图 12 无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动

6. 齿面修行预紧原理

如图 13 所示的滚子包络环面蜗杆传动中，对其环面蜗杆齿面进行修形，使其入口端产生较大间隙、出口端产生较小过盈量，进而使得该传动副形成无侧隙啮合。该精密传动副的过盈量大小通过预先设计获得，无法进行调整，且其齿面磨损后的齿面磨损量无法补偿，但由

于其齿面之间为滚动摩擦，故磨损较小、精度寿命较长。日本 SANKYO、深圳蓝蓝科技等公司在专业生产该精密滚子包络环面蜗杆传动副，主要应用于机床第四轴和第五轴等领域。

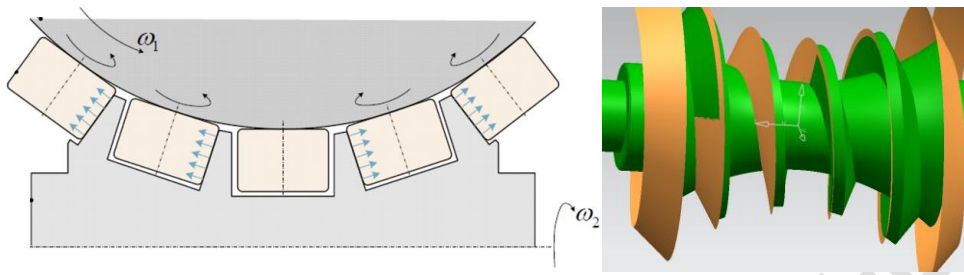


图 13 滚子包络环面蜗杆齿面修行原理

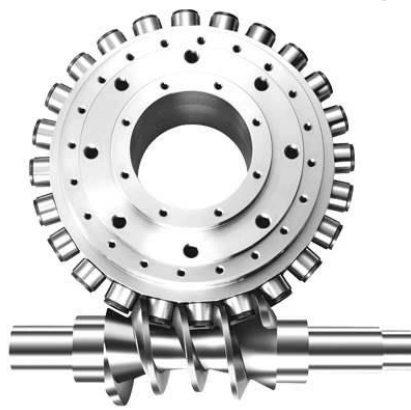


图 14 无侧隙滚子包络环面蜗杆传动

针对上述精密蜗杆传动的磨损量补偿机理和侧隙调控方法等特点，目前常规精密传动领域多采用双导程圆柱蜗杆传动副，精密重载传动领域多采用 OTT 分段式圆柱蜗杆传动副和侧隙可调式环面蜗杆传动副，高速精密传动领域多采用无侧隙滚子包络环面蜗杆传动副。