

# 蜗杆传动的发展及其分类\*

摘要: 回顾了蜗杆传动的发展历程, 并阐述了各种蜗杆传动的优缺点。从蜗杆传动中的首创体外形、齿部位置及啮合区域、首创面齿廓三个方面出发对蜗杆传动进行分类, 以元素周期表为原型得出蜗杆传动系统分类表, 表中各类型、各系列及各形式之间在几何结构和传动性能上存在一定的普遍性和规律性。基于国内外蜗杆传动的发展和现状分析, 就目前我国工业发展的特点及对蜗杆传动的需求, 预测了今后蜗杆传动的研究热点和发展趋势。研究内容能有目的、有方向地指导我们改造现有蜗杆传动和研发新型蜗杆传动。

关键词: 蜗杆传动 发展历程 分类表 发展趋势

中图分类号: TH132.44

## 0 前言

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。此外, 在运动传动中, 它具有对传动系统上游误差的缩敛作用, 因而除被广泛应用于作动力传动外, 一直是机床及精密仪器精密圆分度机构的首选部件。

由于蜗杆传动属交错轴传动, 蜗轮与蜗杆工作齿面间存在较大的相对滑动速度, 故蜗杆传动的主要失效形式是严重磨损和齿面胶合, 如何降低齿面间的摩擦、改善齿面间的润滑性能、提高其承载能力、传动效率和精度寿命等问题, 一直为国内外有关科技界所关注, 研究并提出了各种形形色色的蜗杆传动。其中以普通圆柱蜗杆传动(英、美、中等国)、尼曼蜗杆传动(德、美、日、中、俄等国)、亨得利蜗杆传动(美、俄等国)、平面二次包络环面蜗杆(中国)等应用最为广泛<sup>[1]</sup>。

本文阐述了各种蜗杆传动的发展历程及其优缺点, 对蜗杆传动进行了系统分类, 并指出了蜗杆传动的发展方向 and 趋势。

## 1 蜗杆传动的发展历程

蜗杆传动的历史悠久, 其原理研究可以追溯到二千三百多年前, Archimedes(阿基米德, 公元前

287-212 年)提出利用螺旋运动推动齿轮旋转的方法, 发明了阿基米德蜗杆传动卷扬机<sup>[2-3]</sup>, 如图 1 所示。十六世纪, D Vinci(达芬奇)在其手稿中提出“环面蜗杆传动”的概念<sup>[2-3]</sup>, 如图 2 所示。

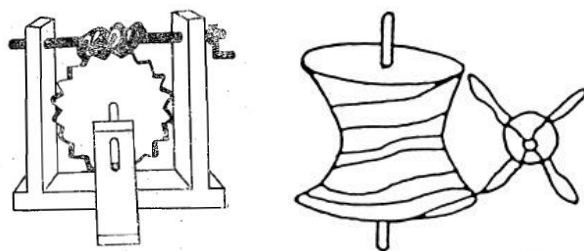


图 1 阿基米德蜗杆传动卷扬机 图 2 环面蜗杆传动锥形  
(1) 亨得利蜗杆传动

1765 年, 英国人 Hindley(亨得利)首次提出直廓环面蜗杆传动, 因此也称之为“亨得利蜗杆传动”, 如图 3 所示。1909 年美国人 S Cone(柯恩)将其开发成功, 命名为“Cone Drive”, 1925 年成立 Cone 公司进行生产, 1954 年成立 Ex-Cell-O 子公司, 进行专业化规模化生产。至 20 世纪 90 年代, Cone Drive 已经达到 25000 套每年, 中心距为 5~48 吋。Cone Drive 的蜗杆不能磨削, 因此其齿面硬度为 30~40HRC, 齿面采用抛光; 蜗轮采用飞刀加工, 其工艺技术十分复杂并对外保密<sup>[1]</sup>。

三十年代开始, 苏联许多科技工作者对直廓环面蜗杆传动的工艺原理和工艺装备开展了大量研究, 提出了蜗杆的倒坡修形、抛物线修形和对称修形等理论和工艺, 较好地掌握了其制造技术, 并推广应用于各种机械装备中。五十年代以后, 该传动随各种苏制设备进口而在我国广泛应用, 郑州机械

科学研究所等单位对其展开了设计、加工及修行等方面的研究<sup>[1]</sup>。



图 3 亨得利蜗杆传动

## (2) 威氏蜗杆传动

1922 年美国格里森公司总工程师 E Wildhaber<sup>[4]</sup> (威尔德哈卜) 提出一种由一正平面蜗轮与以其为工具齿轮并按啮合关系包络展成的一环面蜗杆构成的环面蜗杆传动, 称为“威氏蜗杆传动”(Wildhaber Worm Drive), 如图 4 所示。这种传动的蜗杆齿面是以正平面为母面, 按蜗轮与蜗杆的啮合关系作展成运动形成的包络面, 因此用简单的方法即可实现齿面磨削, 这一优点使得该蜗杆可以采用淬火钢制造, 以承受重的静载荷和低速载荷。此外, 该传动的蜗杆与蜗轮同时啮合的齿数多; 蜗轮齿面为平面, 齿廓为直线, 易于精确加工, 容易获得高精度, 其齿距误差可达  $0.25''$  以内; 由于其蜗轮齿两侧面的接触区成反对称分布, 故当将其沿齿宽中央平面剖分制造时, 通过相对转动两个蜗轮, 便可以调整或补偿齿侧间隙的目的, 因此适用于作精密分度蜗轮传动。

我国六十年代便对威氏蜗杆传动开展研究, 并先后应用于河南豫西机床厂作滚齿机分度蜗轮、首钢炼钢转炉倾翻机构和南京天文台望远镜等。但该传动由于受到蜗杆齿根根切的限制, 一般只能用于传动比较大的场合。



图 4 威氏蜗杆传动

## (3) 尼曼蜗杆传动

1935 年, 德国慕尼黑工业大学 G Niemann(尼曼) 教授提出圆弧齿圆柱蜗杆传动<sup>[5]</sup>, 又称“尼曼蜗杆

传动”(Niemann Worm Drive)或“ZC 蜗杆传动”, 并于 1940 年获得专利, 如图 5 所示。该蜗杆传动齿面间呈凸凹接触、接触线法向诱导法曲率小, 因而具有承载能力高、润滑效果好等优点。1953 年这种蜗杆作为商品出售<sup>[6]</sup>, 厂商标记为“CAVEX”, 故又称“CAVEX 蜗杆传动”, 德国著名的富兰德公司(Flender)将该产品系列化, 并经多次改进, 进行大批量生产, 产品销往世界各地。

五十年代以来, 前苏联齿轮学专家 F Litvin<sup>[7]</sup> 和他的学生对圆弧齿圆柱蜗杆传动进行了深入的研究, 发表了一系列论文, 并在 ZC 蜗杆传动的基础上, 改进制造了 ZCI 型蜗杆传动。

国内对圆弧齿圆柱蜗杆传动的研究始于六十年代, 并创造了可车削的轴面圆弧的 ZC3 型蜗杆传动<sup>[8, 9]</sup>。1969 年完成了部颁标准《圆弧齿圆柱蜗杆减速器》草案, 开始批量生产, 1979 年将草案正式修订为部颁标准。1986 年在部颁标准的基础上进一步修订为国家标准《圆弧圆柱蜗杆减速器》<sup>[10]</sup>, 齿形改为可磨削的 ZCI 型<sup>[11]</sup>。



图 5 尼曼蜗杆传动

## (4) 斜面包络环面蜗杆传动

1951 年, 日本 Y. Sato(佐藤申一)在威氏蜗杆传动的基础上发明了斜齿平面蜗轮传动, 蜗轮齿面相对轴线倾斜一角度  $\beta$ 。这种传动克服了威氏蜗杆传动只能适于大传动比的弱点, 将传动比范围扩展到中、小传动比。并由植田(Rikei)齿轮株式会社成功地用于减速器生产, 产品商标为“PLANA WORM”, 这种传动虽然制造简单, 蜗杆蜗轮均可磨削, 但其接触线与相对速度的夹角及诱导法曲率等表征润滑性能及接触强度指标不如圆弧齿圆柱蜗杆传动, 故其承载能力也稍差。1969 年日本石川昌一获得了平面包络环面蜗杆传动的专利, 专利介绍了与威氏蜗杆传动相比, 平面包络环面蜗杆传动的蜗轮可以用展成法加工, 生产效率得到了提高, 承载能力、传

动效率也有了明显的提高等优点<sup>[12]</sup>。

六十年代开始,国内首钢机械厂、第二重型机械厂及上海精密机床研究所等单位对斜齿平面蜗轮传动在轧机压下蜗轮及滚齿机分度蜗轮方面的应用展开了制造工艺及工装设备方面的科技攻关。

1999年重庆大学张光辉<sup>[13]</sup>通过对斜平面包络环面蜗杆传动进行深入啮合分析而巧妙设计提出一种新型精密动力蜗杆传动形式——侧隙可调式变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动,如图6所示。该传动的蜗轮轮齿的两侧齿平面倾角不等,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,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,是迄今所见优点最全面的高性能精密重载蜗杆传动。



图6 侧隙可调式变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动

#### (5) 端面啮合蜗轮蜗杆传动

1954年,美国学者O Sarri发明了端面蜗轮传动,它是由一蜗杆与端面蜗轮所组成<sup>[14]</sup>。其中蜗杆可以为锥蜗杆也可以为圆柱蜗杆,前者与端面蜗轮啮合也称为锥蜗杆传动,如图7所示,后者与端面蜗轮啮合被称为蜗螺传动<sup>[15]</sup>,如图7所示。美国伊利诺斯州工具零件有限公司(ITW)在制造加工端面蜗轮传动副和将其应用于不同的工程领域的先行者,他们也获得了“SPIROID”和“HELICON”专利,并使之成为了他们公司的商标。不同于传统蜗杆传动副,端面蜗轮传动的蜗轮轮齿分行在端面上,具有同时参与啮合齿数多、承载能力强、润滑条件好、蜗轮材质能以钢代铜、侧隙可调及啮合平稳无噪音等优点<sup>[16]</sup>。

美国F Litvin<sup>[17, 18]</sup>、俄罗斯V Goldfarb<sup>[14]</sup>、中

国农业大学董学朱、西南科技大学熊矢以及太原重型机械学院等大量的学者和科研机构对锥蜗杆传动的设计制造等进行了全面的研究。



图7 锥蜗杆传动 图8 蜗螺传动

#### (6) 超环面行星蜗杆传动

1966年,美国Coulter系统公司M Kuehnle于提出超环面行星蜗杆传动<sup>[19]</sup>,如图9所示。超环面行星蜗杆传动机构是由中心蜗杆组合件和凹形槽定子组成,中心蜗杆组合件包括环面中心蜗杆、行星轮组和行星架三部分,行星轮的轮齿可以是滚珠、滚柱和滚锥。七十年代,德国亚森工业大学的H Peeken等人对这一传动形式进行过较为全面的研究,讨论了其承载能力、啮合强度和加工工艺等问题,并与Coulter公司合作,成功研制出试验样机<sup>[20]</sup>。1984年Richard L<sup>[21]</sup>提出采用剖分式外齿圈和以双锥蜗杆组合件为行星轮的超环面行星蜗杆传动。

我国从八十年代开始,陆续出现有关超环面行星蜗杆传动的报道,我国的研究人员主要是从啮合理论、传动结构及加工工艺等方面进行探索与研究;1984年,武汉水运工程学院陈定方等设计出国内首台超环面传动样机;1986年,大连工学院王景连等展开了该种新型传动的啮合理论研究;1993年,台湾Tai-Her Yang<sup>[22]</sup>提出以蜗轮和锥蜗杆的组合件为行星轮的超环面行星蜗杆传动;1996年,哈尔滨工业大学的姚立刚<sup>[23]</sup>博士在深入啮合理论研究的同时,研制出国内首台球形齿超环面行星蜗杆传动试验样机;燕山大学的许立忠<sup>[24]</sup>等人从1996年开始对该种传动进行深入研究,在超环面行星蜗杆传动的传动效率、接触疲劳强度、弹流润滑理论和摩擦磨损理论方面都卓有成效,证明了超环面行星蜗杆传动具有较高的传动效率,一般可达97%以上。





图 9 超行星环面蜗杆传动

### (7) TI 蜗杆传动

1968年,德国德累斯登工业大学提出一种无修正且可以精确磨削的新型球面蜗杆传动<sup>[25]</sup>,即渐开面包络环面蜗杆传动(TI 蜗杆传动),并通过样机试验证明了 TI 蜗杆上有适当的载荷分布、多齿瞬时接触、具有高可靠性;1995年日本学者牧充<sup>[26, 27]</sup>等通过齿面接触分析及试验研究验证了 TI 蜗杆传动的有效性。

在国内,1977年太原工学院朱景梓<sup>[28]</sup>等与太原钢铁公司合作,研制出 TI 蜗杆传动样机并进行传动性能试验,证明 TI 蜗杆传动副的效率比阿基米德圆柱蜗杆传动要高、齿面磨合良好且能够传递较高的载荷;1981年太原工学院段德荣<sup>[29]</sup>推导了二次包络 TI 蜗杆传动的啮合理论,并系统分析了齿面接触情况及界限曲线规律等;1982年南通市机械研究所张希康<sup>[30, 31]</sup>探讨了 TI 蜗杆传动中螺旋角的合理选择和接触线的分布等情况;天津大学王树人<sup>[32]</sup>、詹东安<sup>[33, 34]</sup>等推导了 TI 蜗杆传动的包络理论,建立了考虑加工误差和装配误差的啮合理论体系,得出一次包络 TI 蜗杆传动对误差的敏感性小,提出了精修磨的 TI 蜗杆磨削方法;天津大学孙月海<sup>[35-37]</sup>等分析得出 TI 蜗杆齿面磨削所需的精确砂轮廓形,磨削试制硬齿面 TI 蜗杆传动副,如图 10 所示,并进行传动性能试验研究并得出 TI 蜗杆传动副在较低的载荷下具有较好的传动性能,随着载荷的增加齿面的摩擦磨损加剧。



图 10 TI 蜗杆传动

### (8) 二次包络环面蜗杆传动

1972年,日本学者酒井高男<sup>[38, 39]</sup>等发表了“空间交错轴齿轮传动中二次作用的研究”的论文,指出在交错轴齿轮传动中,齿面上的某些点可与其相啮合的齿面接触两次,提出可展齿面二次包络环面蜗杆传动的思想,对二次包络蜗杆传动中的一系列理论及实践问题进行了论述;1980年酒井高男<sup>[40]</sup>等提出了以锥面为媒介齿面的环面蜗杆传动;日本住友重工株式会社一直致力于双锥面二次包络环面蜗杆副的研究和推广,其 HEDCON 系列减速器即采用双锥面二次包络环面蜗杆副<sup>[41]</sup>。

在国内,1974年重庆大学张光辉<sup>[42, 43]</sup>因参编《机械工程手册》中包络蜗杆传动部分到首钢机械厂现场调研收集平面蜗轮传动资料,发现并肯定首钢机械厂平面反包络蜗轮副具有平面二次包络的萌芽,并报告建议冶金部立项研究获批准,因而于1975年与首钢合作开展研究,于1976年研究成功平面二次包络环面蜗杆传动,该传动的蜗杆可淬火并用平面砂轮磨削,蜗轮可以采用滚刀加工,蜗轮副的齿面精度得以提高,传动副多齿啮合且瞬时成双线接触、接触线法向诱导法曲率小且润滑角大,因此该传动的齿面接触应力小、易形成润滑油膜、抗胶合抗磨损能力强、承载能力大传动效率高,性能全面超过直廓环面蜗杆,经美国 Cone Drive 公司测试平面二次包络环面蜗杆传动副的承载能力为其相应产品的2.2倍,认为“是蜗杆传动的重大突破,具有世界先进水平”,为表彰工人阶级的创造性,原冶金部将其命名为“首钢-71型蜗轮副<sup>[44]</sup>”,如图 11 所示。

基于直廓环面蜗杆齿面不能精确磨削和平面二次包络蜗杆传动的蜗轮滚刀无法铲齿等缺陷,张光辉<sup>[45]</sup>于1981年提出指锥二次包络环面蜗杆传动,该传动的蜗杆齿形与直廓环面蜗杆相近,但加工工艺优于直廓环面蜗杆且可铲磨蜗轮滚刀;为了解决平面二次包络环面蜗杆传动在多头低速比范围内应用时齿面根切及边齿变尖严重等矛盾,1986年张光辉<sup>[46]</sup>提出以球面为包络媒介面的球面二次包络环面蜗杆传动;1999年张光辉<sup>[3]</sup>基于平面包络环面蜗杆齿面只能单面磨削、加工精度和效率低等问题,提出用大直径双面锥形砂轮磨削包络环面蜗杆,即利用锥面在锥底半径较大和锥角较大时,锥面在微小

区域上近似于平面这一特征,在蜗杆磨削加工时用一直径较大的双面称锥形砂轮近似代替平面砂轮磨削包络环面蜗杆,这样就能在一次安装调整磨头和蜗杆完成蜗杆两侧齿面的磨削加工,而不同基圆半径的蜗杆加工则仅需要调整砂轮修整器的修整角度,从而大大地简化了在蜗杆加工中机床工装的调整,提高了蜗杆的制造效率和提高加工精度,此种蜗杆传动称之为准平面二次包络环面蜗杆传动。

1988年焦作矿业学院胡来容<sup>[47]</sup>等提出圆环面型二次包络环面蜗杆传动;2009年武汉科技大学赵亚平<sup>[48, 49]</sup>提出双圆环面二次包络环面蜗杆传动,并详细分析了该传动的啮合特性、接触线分析及修正加工等。



图 11 平面二次包络环面蜗杆传动

#### (9) 活动齿蜗轮蜗杆传动

1984年德国 V Siegmund<sup>[50, 51]</sup>等提出一种滚柱包络环面蜗杆传动,首次将蜗杆传动中齿面间的滑动摩擦转换为滚动摩擦,克服了传统蜗杆传动中齿面滑动带来的效率低、发热大及易胶合等缺点,但由于滚柱与支撑轴颈为滑动不差所以任存在较大的滑动摩擦损耗;1986年日本提出了滚珠环面蜗杆传动,在蜗轮与环面蜗杆之间加入了钢球作为蜗轮齿,并在钢球和蜗轮母体球窝内布满小钢珠以减小钢球与蜗轮母体之间的滑动摩擦<sup>[52]</sup>;1985年日本加藤正名<sup>[53, 54]</sup>等提出针轮蜗杆传动,并对其结构设计、加工工艺、传动效率及润滑条件等问题进行了全面的研究;日本三共(SANKYO)株式会社成功地将滚柱包络环面蜗杆传动作为减速器生产,并开发出 RA 及 RY 等系列。

在国内,80年代初东北重型机械学院路懿<sup>[55]</sup>等就开始从事体内循环滚珠弧面蜗杆传动的研究,对其啮合理论、回珠曲线及加工原理等做了大量有益的研究;作为国家“七五”科技攻关项目,重庆大学张光辉<sup>[56]</sup>等人在80年代末提出滚锥包络环面

蜗杆传动,并进行了啮合理论、参数优化、样机制造及性能试验等方面的系统研究,这种蜗杆传动是以滚锥作为母面包络展成滚锥包络环面蜗杆廓面,再以滚锥作为蜗轮齿与蜗杆廓面相啮合,具有传动效率高、承载能力大、使用寿命长及制造简单等优点;1997年长沙铁道学院刘鹤然<sup>[57]</sup>提出钢球包络蜗杆传动,具有结构简单、安装方便、传动效率高及使用寿命长等优点;2007年重庆机床厂金良治<sup>[58]</sup>等提出利用常规制造及装配工艺就能制造出的低成本高精度钢柱蜗轮-环面蜗杆传动副,其精度完全取决于计量水准而不受制于高精度的专用设备,目前可达3级精度,并已运用于高精度蜗轮母机的精密分度;2008年西华大学王进戈<sup>[59]</sup>等提出无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动,如图12所示,该传动中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,该传动不仅具有滚子包络环面传动效率高、啮合齿数多、承载能力强等优点,还具有侧隙可调及零侧隙的特点。



图 12 无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动

#### (10) 内啮合蜗轮蜗杆传动

1925年,美国学者 Adams T<sup>[60]</sup>发明一种用于手拉葫芦的内啮合蜗轮传动,其蜗轮为一具有内齿的内蜗轮,蜗杆为两段反向的锥螺纹组成;1967年, Bond J<sup>[61]</sup>发明一种以滚珠为啮合介质的内啮合蜗轮传动机构;1996年,日本 Hoyashita S<sup>[62]</sup>对桶状蜗杆与内蜗轮啮合的切削刃齿廓进行了计算;2001年,匈牙利尼赖吉哈佐学院的 G őr L ász l 63 等对车削成形的椭球蜗杆传动进行了啮合理论、成形原理及齿面建模等方面的系列研究;2009年,重庆大学张光辉、陈永洪<sup>[64]</sup>提出内齿轮包络鼓形蜗杆传动,如图13所示,并以平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆为重点,首次研究了其啮合几何学、啮合性能及参数优化设计方法,探究了鼓形蜗杆及内齿轮的齿面加



工工艺及检测方法,试制了首台平面齿内齿轮一次包络鼓形蜗杆传动样机并进行传动性能试验,结果表明该传动是一种体积小重量轻的重载传动形式。

1960年,美国 Popper B<sup>[65]</sup>等提出一种由一外螺纹蜗杆与一内螺纹蜗杆组成的双蜗杆传动形式;1968年 Van Voorhis D M<sup>[66]</sup>提出一种具有内啮合蜗杆传动的行星减速装置,该传动副由外齿圈和内螺纹蜗杆组成,其内螺纹蜗杆嵌套在外齿圈之上;1990年,美国学者 MacPhee J<sup>[67]</sup>发明一种用于印刷机上墨装置中摆动辊筒的内啮合蜗杆传动,该传动由一外齿轮与一内螺纹蜗杆相啮合,其整个外齿轮位于蜗杆内部。



图 13 平面齿内齿轮包络鼓形蜗杆传动

#### (11)精密蜗杆传动

精密蜗杆传动副作为精密分度或精密运动机构而得到广泛地应用。要求传动副具备齿侧间隙可调、并能够实现齿面磨损后的补偿等功能。精密蜗杆传动按其齿侧间隙调整方法可分为如下几种<sup>[68]</sup>:

##### 1) 改变中心距调整法

在实际应用中,常通过改变普通圆柱蜗杆传动的中心,来实现调整传动副齿侧间隙的目的。该方法调整简便,但破坏了正确的啮合关系,造成齿面接触不良,磨损较快。

##### 2) 蜗杆轴向调整法

1959年, F Franke<sup>[69]</sup>提出双导程圆柱蜗杆传动,其蜗杆的左、右齿面具有不等的导程,因而其蜗杆轴向齿厚沿轴向递增或递减,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,如图 14 所示。但该传动存在以下的不足: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 14 双导程圆柱蜗杆传动

##### 3) 蜗杆周向调整法

德国 OTT 公司和美国 Cone Drive 公司先后推出了分段式精密蜗杆传动,如图 15 和图 16 所示。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分段式设计。

齿侧间隙调整是在蜗杆轴固定、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。



图 15 OTT 分段式蜗杆传动



图 16 Cone 分段式环面蜗杆传动

##### 4) 蜗轮轴向调整法

前述的侧隙可调式变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动<sup>[13]</sup>,其蜗轮轮齿的两侧齿平面倾角不等,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,通过沿蜗轮轴向移动,可以实现全部齿侧间隙的合理调整。

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,陈永洪<sup>[70-71]</sup>提出变齿厚渐开线齿轮包络环面蜗杆传动,如图 17 所示。样机传动精度累计误差为  $54.95''$  及短周期误差为  $23.32''$ ;传动副侧隙调整至最小  $28.88''$ ;磨损量可有效补偿,补偿后传动精度不变。



图 17 变齿厚渐开线齿轮包络环面蜗杆传动

### 5) 蜗轮周向调整法

前述的威氏蜗杆传动<sup>[4]</sup>，由于其蜗轮齿两侧面的接触区成反对称分布，故当将其沿齿宽中央平面剖分制造时，通过相对于蜗轮周向转动两半个蜗轮，便可以达到调整或补偿齿侧间隙的目的，因此适用于精密蜗杆传动。

前述的无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动<sup>[59]</sup>，其蜗轮由两半个蜗轮组成，滚子均匀分布在每半个蜗轮圆周上，通过绕蜗轮周向调整两半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，从而实现其侧隙可调。

## 2 蜗杆传动的系统分类

科学的分类源于人们对客观事物的内在矛盾及其运动规律的系统认识，不仅能深刻地揭示事物的本质，而且能井然有序地指明事物之间的复杂联系，预示事物的未来，并给人们指出研究该事物的正确方向和方法，在自然科学界，门捷列夫元素周期表是这方面的一个典范。可见对种类繁多的蜗杆传动进行科学系统地分类具有重要地指导意义。

1965 年张光辉<sup>[72]</sup>教授在太原工学院第五次科学报告会上提出：从蜗杆传动及齿轮包络蜗杆的本质入手，基于蜗杆传动之间内在矛盾和差异，将蜗杆科学地分为五类、四型、八式，共 160 中传动，并首次提出了诸如“首创体”、“创成体”及“变异度”等重要概念。在一对共轭曲面中，范成另一曲面的曲面为“首创面”，该曲面所组成的构件为“首创体”；由首创面所范成的曲面为“创成面”，该曲面所组成的构件为“创成体”。在蜗杆传动中，蜗轮和蜗杆均可作为首创体，即为齿轮包络蜗杆传动和蜗杆包络蜗轮传动，且两者之间可随首创体的直径、头数(齿数)及螺旋升角等参数变化而转换，是一由量变到质变的过程。

在此基础上进一步优化调整，从首创体外形、轮齿位置及首创面齿廓三个方面出发，对蜗杆传动进行科学系统地分类如下：

首先：在蜗杆包络蜗轮中，作为首创体的蜗杆的几何形状可以为圆柱体、圆锥体、凸圆弧回转体及凹圆弧回转体四种型式；在齿轮包络蜗杆中，作为首创体的齿轮同样具有圆柱体、圆锥体、凸圆弧回转体及凹圆弧回转体四种型式的几何形状，但其相互之间差别不大，可以视为对首创体的修形，故将其归为一类。因此从包络中首创体形状的观点出发可以将蜗杆传动分为以下五大类型：(I)圆柱蜗杆包络蜗轮传动；(II)锥蜗杆包络蜗轮传动；(III)凸环面蜗杆包络蜗轮传动；(IV)凹环面蜗杆包络蜗轮传动；(V)齿轮包络蜗杆传动。

其次：首创体的轮齿可以位于其外圆周、端面或内圆周上。同时，在包络过程中，整个空间区域将由首创体包络产生一个接触线场，取接触线场的不同区域可得不同的创成体，同样可以使轮齿位于创成体的外圆周、端面或内圆周上。因此从轮齿位置的观点出发，可以将蜗杆传动分为以下五大系列：(A)外啮合(正常啮合)系列；(B)端面蜗轮啮合系列；(C)端面蜗杆啮合系列；(D)内蜗轮啮合系列；(E)内蜗杆啮合系列。

最后：首创体的齿廓形状将直接影响创成体的齿廓形状及蜗杆传动的啮合性能。首创体齿廓可以是某一曲线按一定运动关系形成的轨迹面，也可以是某一曲面按一定运动关系展成的包络面，还可以是某种滚动物体形成的活动齿面。因此从首创体齿廓的观点出发可以将蜗杆传动分为以下十四种形式：(i)轨迹面(i1.直线轨迹面；i2.圆弧线轨迹面；i3.渐开线轨迹面；i4.其他曲线轨迹面)；(ii)包络面(ii1.平面包络面；ii2.锥面包络面；ii3.圆环面包络面；ii4.渐开面包络面；ii5.其他曲面包络面)；(iii)活动齿面(iii1.滚球活动齿面；iii2.滚柱活动齿面；iii3.滚锥活动齿面；iii4.滚针活动齿面；iii5.其他活动齿面)。

由于以上三种分类观点之间相互独立，因此将其各自相互组合，得蜗杆传动的系统分类表如图 18 所示。其中每一种蜗杆传动可以通过“类型号-系列号-形式号”进行表示，如渐开线圆柱蜗杆传动可以表示为“I-A-i3”，尼曼蜗杆传动可表示为“I-A-ii3”，

平面二次包络环面蜗杆传动可以表示为“IV-A-ii1”，

一次包络 TI 蜗杆传动可以表示为“V-A-i3”。

| 系列<br>类型                 | A<br>正常啮合系列 | B<br>端面蜗轮啮合系列 | C<br>端面蜗杆啮合系列 | D<br>内蜗轮啮合系列 | E<br>内蜗杆啮合系列 | 齿廓形式  |
|--------------------------|-------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---|
| I<br>圆柱蜗杆<br>包络蜗轮        |             |               |               |              |              | ii1 直线轨迹面<br>ii2 圆弧线轨迹面<br>ii3 渐开线轨迹面<br>ii4 其他曲线轨迹面                    |
| II<br>锥蜗杆<br>包络蜗轮        |             |               |               |              |              | ii1 平面包络面<br>ii2 锥面包络面<br>ii3 圆环面包络面<br>ii4 渐开面包络面<br>ii5 其他曲面包络面       |
| III<br>凸环面<br>蜗杆<br>包络蜗轮 |             |               |               |              |              |   |
| IV<br>凹环面<br>蜗杆<br>包络蜗轮  |             |               |               |              |              |   |
| V<br>齿轮<br>包络蜗杆          |             |               |               |              |              | iii1 滚球活动齿面<br>iii2 滚柱活动齿面<br>iii3 滚锥活动齿面<br>iii4 滚针活动齿面<br>iii5 其他活动齿面 |

图 17 蜗杆传动分类表

该分类表以元素周期表为原型、从蜗杆传动之间的内在矛盾进行划分，其不仅囊括了现有的所有蜗杆传动形式，同时还包含了许多未知的蜗杆传动形式，各类型、各系列及各形式的蜗杆传动之间在几何结构和传动性能上都存在一定的普遍性和规律性，这对我们改造现有蜗杆传动和研发新型蜗杆传动具有指导性作用。

### 3 蜗杆传动的发展趋势

从蜗杆传动的发展历程可以看出，蜗杆传动的历史虽然很悠久，但得到迅速的发展还是从上世纪五、六十年代开始的，尤其是近三十年来，无论是研究的形式及内容，都涉及了很宽的领域。随着空间啮合理论的不断突破、制造加工技术的迅速发展、计算工具的完备及新材料的产生，出现了各种新型的蜗杆传动与变态蜗杆传动。与此同时，还利用了许多提高各种蜗杆传动承载能力、传动效率及传动精度的相关措施并都取得了显著的效果，使蜗杆传

动的研究及应用达到了相当高的技术水平。

总结起来，蜗杆传动的发展方向和趋势主要有以下几方面：

#### (1) 由轨迹面蜗杆向包络面蜗杆方向发展

包络面蜗杆的齿面能精确磨削，其齿面加工精度高、粗糙度低且硬度高，从而减摩性能及动压油膜的形成能力远优于轨迹面蜗杆。目前，轨迹面的阿基米德圆柱蜗杆传动、直廓环面蜗杆传动现已逐渐被包络面的渐开线圆柱蜗杆传动、锥面包络圆柱蜗杆传动及包络环面蜗杆传动等所取代。其中二次包络环面蜗杆传动，因其多齿啮合、双线接触、承载能力高、润滑效果好及寿命长等优点，仍将会是今后的研究重点。

#### (2) 向精密重载方向发展

长期以来，国内外通常把蜗杆传动分为“运动传动”和“动力传动”两大类。前者主要用于机床及仪器仪表等作精密分度或精密运动机构，主要考虑如何提高蜗杆传动的“精度”；后者主要用于冶



金矿山及石油化工等机械设备作减速器，主要考虑如何使蜗杆传动达到“重载”。随着生产力和工业技术的发展，机床分度装置、武器俯仰装置、炮舰倾摆装置等对蜗杆传动提出了“精密”和“重载”的双重要求。侧隙可调式变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动<sup>[13]</sup>开启了精密重载蜗杆传动的先河，而精密重载将会是今后蜗杆传动领域研究的主流方向。

### (3) 由正常啮合向变态啮合方向发展

随着空间啮合理论研究的进展，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合理的选择，出现了一批能满足特殊要求变态蜗杆传动。比如：为了获得小中心距、多齿啮合、高承载能力及侧隙可调等特性，提出了端面啮合的锥蜗杆传动和蜗螺传动；为了满足体积小、重量轻的要求，提出了内啮合蜗杆传动和研发了内啮合蜗轮传动；为了减低齿面间的摩擦、改善齿面间的润滑性能、将共轭齿面间的滑动摩擦转化为滚动摩擦，提出了以滚珠、滚珠等为介质的活动齿蜗杆传动。随着工业的发展及各种特殊工况要求的提出，变态蜗杆传动此后将会更为多样化。

### (4) 由传统的钢-铜材料向新型材料方向发展

为了降低成本、提高承载能力，并随着界面摩擦学及材料科学等的发展，合金钢、巴氏合金、塑料及铝锌基合金等材料已逐步成为传统铜蜗轮材料的替代品。

## 4 结论

(1) 阐述了现有的 30 余种蜗杆传动在国内外的的发展历程及其优缺点；

(2) 从蜗杆传动中的首创体外形、轮齿位置及首创面齿廓三个方面出发，将蜗杆传动系统地分类为 350 种形式；

(3) 指出二次包络环面蜗杆传动及精密重载蜗杆传动将是今后的发展重点，变态蜗杆传动及新材料蜗轮将是今后的研究热点。

## 参 考 文 献

- [1] 中国齿轮专业协会.中国齿轮工业年鉴 2010[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2010.
- [2] DUDAS I. The theory and practice of worm gear drives [M]. London: Penton Press, 2000.
- [3] CROSHER W P. Design and application of the worm gear [M]. New York: ASME Press, 2002.
- [4] WILDHABER E. Wildhaber worm drive: USA, US3386305[P].1966-04-28.
- [5] 尼曼(著),余梦生,倪文馨(译).机械零件[M].北京:机械工业出版社, 1985.
- Niemann G, YU Mengsheng, NI Wenyin. Mechanical element[M]. Beijing: Machinery Industry Press,1985.
- [6] 许衡烈.三菱 CAVEX 蜗杆传动装置[J].二重译丛, 1982, 9(4): 26-65.
- XU Henglie. CAVEX worm drive[J]. Er zhong yi cong, 1982, 9(4): 26-65.
- [7] LITVIN F. L, FUENTES A. Gear geometry and applied theory [M]. second ed. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [8] 杨兰春.圆弧齿圆柱蜗杆传动[M].太原:山西人民出版社,1984.
- YANG Lanchun. Arc tooth cylindrical worm drive[M]. Taiyuan: Shanxi Pople's Press,1984.
- [9] 王树人.圆弧圆柱蜗杆传动[M].天津:天津大学出版社,1991.
- WANG Shuren. Arc cylindrical worm drive[M]. Tianjin: Tianjin University Press,1991.
- [10] GB/T9147-1988.圆弧圆柱蜗杆减速器[S].
- GB/T9147-1988. Arc cylindrical worm drive[S].
- [11] 许衡烈.磨削凹齿面圆柱蜗杆副传动啮合原理 [M].重庆:重庆大学油印,1981.
- XU Henglie. Meshing principle of grinding arc cylindrical worm drive[M]. Chongqing: Chongqing University mimeographed,1981.
- [12] 重庆大学机械系蜗杆传动科研小组编译.蜗杆传动文集 [M].重庆:重庆大学油印,1976.
- Translated by worm drive scientific research group, department of mechanical, Chongqing University. Corpus of worm drive[M]. Chongqing: Chongqing University mimeographed,1976.
- [13] 张光辉.侧隙可调式平面包络环面蜗杆传动.中国:CN1257974A[P].2000-06-28.
- ZHANG Guanghui. The backlash adjustable plane enveloping hourglass worm driving. China: CN1257974A[P].2000-06-28.

- [14] GOLDFARB V. I. What we know about spiroid gears [M]//DATONG Q, BINGKUI C, CHAO L. Proceeding of the international conference on mechanical transmissions. Chongqing: Science Press. 2006:19-26.
- [15] 周先德. 从复合共轭曲面的观点探讨蜗螺传动[J]. 齿轮, 1980.04, 9-15.  
ZHOU Xiande. Discussion on helicon worm drive from the viewpoint of complex conjugate surfaces[J]. Gear, 1980.04, 9-15.
- [16] 太原重型机械学院科研组. 锥蜗杆传动专辑[J]. 科技通讯, 1975, 1-35.  
Taiyuan heavy machinery institute research group. Album of spiroid worm[J]. Science and technology communication, 1975, 1-35.
- [17] LITVIN F L, ARGENTIERI G, DONNO M D, et al. Computerized design, generation and simulation of meshing and contact of face worm-gear drives[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 189(1): 785-804.
- [18] LITVIN F L, DONNO M D. Computerized design and generation of modified spiroid worm-gear drive with low transmission errors and stabilized bearing contact[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 162(1): 187-201.
- [19] 王旭. 风力发电用超环面行星蜗杆传动性能模拟与优化设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.  
WANG Xu. The performench simulation and optimization of toriodal drive for wind driven generator[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [20] 张春丽. 新型行星蜗杆传动的啮合理论与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.  
ZHANG Chunli. Meshing theory and experimental study on a new model of planetary-worm gear[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999.
- [21] RICHARD L. Planetary worm gear apparatus and methods of constructing and utilizing same, USA, US4697476[P]. 1984-08-06.
- [22] YANG T-H. Planetary worm type gear and application drive, USA, 5387162[P]. 1993-05-27.
- [23] 姚立刚. 超环面行星蜗杆传动的啮合分析和加工方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996.  
YAO Ligang. Study on meshing analysis and processing method of the toriodal drive[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1996.
- [24] XU L, HUANG Z, YANG Y. Mesh Theory for Toriodal Drive [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(3): 551-557.
- [25] 段路茜. TI 蜗杆传动啮合理论研究及优化设计 [D]. 天津: 天津大学, 2004.  
DUAN Luqian. A study on meshing theory and optimal design of TI worm gearing[D]. Tianji: Tianji University, 2004.
- [26] MAKI M, OKAMOTO K, MIDORIKAWA I. A study on the hourglass worm gearing whose wheel has the helical teeth(1st report) [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 1995, 61(2): 362-366.
- [27] OKAMOTO K, MAKI M. A study on the hourglass worm gearing whose wheel has the helical teeth(2nd report) [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 1996, 62(2): 264-266.
- [28] 朱景梓, 刑永进, 谢佩娟, 等. 渐开线齿轮包络弧面蜗杆传动的试验研究[J]. 太原工学院学报, 1983, 1(1): 38-46.  
ZHU Jingzi, XING Yongjin, XIE Peijuan, et al. An experimental investigation of the involute enveloping worm gear drive[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1983, 1(1): 38-46.
- [29] 段德荣. 渐开线二次包络弧面蜗杆传动的研究 [D]. 太原: 太原工学院, 1981.  
DUAN Derong. Study on involute double enveloping hourglass worm drive[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 1981.
- [30] 张希康. TI 型渐开面蜗杆传动螺旋角的合理选择 [J]. 机械工程学报, 1982, 18(3): 86-92.  
ZHANG Xikang. Reasonable selecting on helix angle of TI worm drive[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1982, 18(3): 86-92.
- [31] 张希康. TI 型环面蜗杆传动瞬时接触线分析及其应用[J]. 齿轮, 1987, 11(5): 1-5.  
ZHANG Xikang. Tooth contact analysis and application of TI worm drive[J]. Gear, 1987, 11(5): 1-5.
- [32] WANG S, ZHAN D, LIU H, et al. Tooth contact analysis of toriodal involute worm mating with involute helical gear [J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(7): 685-691.
- [33] 詹东安, 吴序棠. TI 蜗杆与渐开线斜齿轮传动的接触分析 [J]. 重型机械, 1997.05, 5-8.  
ZHAN Dongan, WU Xutang. Analysis of teeth contact of TI worm and involute helical gear[J]. Heavy Machinery, 1997.05, 5-8.
- [34] 詹东安, 吴序棠. TI 环面蜗杆砂轮磨齿原理 [J]. 机械科学与技术, 1997, 16(6): 1055-1058.  
ZHAN Dongan, WU Xutang. The principle of gear

- grinding with TI hourglass worm grinding wheel[J]. Mechanical Science and Technology,1997,16(6):1055-1058.
- [35] 孙月海,段路茜,王树人,等.基于接触线的二次包络 TI 蜗杆传动啮合性能分析[J].机械工程学报,2005,41(6):44-48.  
SUN Yuehai, DUAN Luqian, WANG Shuren, et al. Contact performance analysis of double enveloping TI worm gearing based on contact lines[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(6):44-48.
- [36] 孙月海,卢华武,王树人.磨削 TI 蜗杆的砂轮廓形[J].机械工程学报,2008,44(2):170-174.  
SUN Yuehai, LU Huawu, WANG Shuren. Profile of grinding wheel for grinding TI worm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2008,44(2):170-174.
- [37] 孙月海,卢华武,杨文彦,等.硬齿面 TI 蜗杆副的研制与试验研究[J].机械工程学报,2011,47(9):182-186.  
SUN Yuehai, LU Huawu, YAN Wenyan, et al. A study on manufacture and experiment of hardened TI worm gearing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(9):182-186.
- [38] SAKAI T, MAKI M. An investigation on secondary action on skew gears [J]. Journal of Engineering for Industry, 1974, 96(1): 25-32.
- [39] SAKAI T, MAKI M, UESUGI S, et al. A study on hourglass worm gearing with developable tooth surface [J]. Journal of Mechanical Design, 1978, 100(3): 451-9.
- [40] 重庆大学蜗杆传动科研组.酒井高男论文选集[M].重庆:重庆大学油印,1981.  
Translated by worm drive scientific research group of Chongqing University. Selected papers of Takao Sakai[M]. Chongqing: Chongqing University mimeographed,1981.
- [41] 朱肖虎.双锥面二次包络环面蜗杆副优化设计及制造[D].杭州:浙江大学,2011.  
ZHU Xiaohu. Optimization and manufacture of dual conical surfaces-generated double enveloping hourglass worm gear pair[D]. Hangzhou, Zhejiang University,2011.
- [42] 重庆大学,首钢机械厂.新型弧面蜗杆(平面二次包络弧面蜗杆)传动[M].重庆:重庆大学油印,1976.  
Chongqing University, Shougang Machinery Factory. A novel hourglass worm drive[M]. Chongqing: Chongqing University mimeographed,1976.
- [43] 重庆大学蜗杆传动科研组.平面二次包络弧面蜗杆传动的研究与应用[J].重庆大学学报,1978,1(4):1-18.  
Worm drive scientific research group of Chongqing University. Research and application of planar double enveloping hourglass worm drive[J]. Journal of Chongqing University,1978,1(4):1-18.
- [44] 首钢机械厂,重庆大学,北京钢铁学院,等.首钢-71 型蜗轮副[M].北京:首钢机械厂油印,1978.  
Shougang Machinery Factory, Chongqing University, Beijing Institute of Iron and Steel, et al. SG-71 worm drive[M]. Beijing: Shougang Machinery Factory mimeographed,1978.
- [45] 邓明,张光辉,王进戈.指锥面二次包络环面蜗杆减速机的研制与试验[J].机械传动,1997,21(4):20-23.  
DENG Ming, ZHANG Guanghui, WANG Jinge. Developing and testing for cone double enveloping hourglass worm drive[J]. Mechanical Transmission,1997, 21(4):20-23.
- [46] 张光辉,谭建平.球面二次包络弧面蜗杆传动的理论研究[J].重庆大学学报,1988,10(1):42-49.  
ZHANG Guanghui, TAN Jianping. Theory investigation of sphere re-enveloping hourglass worm drive[J]. Journal of Chongqing University,1988,10(1):42-49.
- [47] 胡来容,王小林.圆环面型二次包络环面蜗杆传动的啮合理论研究和性能评价[C]//张光辉.蜗杆学术研讨会论文.重庆:重庆大学油印.1988:491-516.  
HU Lairong, WANG Xiaolin. Study on theory and performance of torus double enveloping hourglass worm drive[C]//ZHANG Guanghui. Symposium of worm drive. Chongqing: Chongqing University mimeographed. 1988: 491-516.
- [48] ZHAO Y, KONG J, LI G, et al. Computerized simulation of tooth contact and error sensitivity investigation for ease-off hourglass worm drives [J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(8): 778-790.
- [49] ZHAO Y, SU D, ZHANG Z. Meshing analysis and technological parameters selection of dual tori double-enveloping toroidal worm drive [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(9): 1269-1685.
- [50] 杨伟(译).滚动蜗杆传动装置[J].郑州机械研究所齿轮资料,1985,37(3):1-12.  
YANG Wei. Scroll worm drive[J]. Gear information of zhengzhou machinery research institute, 1985,37(3):1-12.
- [51] GETRIEBE. Neue Patentanmeldungen[J]. Konstruktion, 1986,38(3):15-16
- [52] 卜忠林.滚动式点啮合环面蜗杆传动的强度分析[D].大连:大连理工大学,2006.  
BO Zhonglin. Strength analysis of globoidal worm gearing with roller teeth and point engagement[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2006.



- [53] WEI Y L, HIROKAWA S, KATO M. A study of pin-wheel globoidal worm gearing:2nd report, machining and efficiency tests [J].Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C,1987,53(487): 872-878.
- [54] WEI Y L, KATO M. A study of pin-wheel globoidal worm gearing:3rd report, lubrication between pin and arc-groove [J].Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C,1987,53(495): 2341-2346.
- [55] 路懿,毛梦云.滚珠弧面蜗杆传动的加工原理及探究[J].机械设计,1989,7(3):39-43.  
LU Yi, MAO Mengyun. Study on manufacture of ball enveloping hourglass worm[J]. Journal of Machine Design,1989,7(3):39-43.
- [56] 张光辉,王进戈,杨念增.滚锥包络环面蜗轮副的研制与试验[J].重庆大学学报,1992,15(5):8-11.  
ZHANG Guanghui, WANG Jingge, YANG Nianzeng. Development and test on rolling cone enveloping hourglass worm pair[J]. Journal of Chongqing University, 1992,15(5):8-11.
- [57] 刘鹤然.钢球包络环面蜗杆传动[J].机械传动,1997,(3): 52.  
LIU Huran. Steel ball enveloping hourglass worm drive[J]. Mechanical Transmission,,1997,(3): 52.
- [58] 金良治,金朝华,隆林.高精度钢柱蜗轮-弧面蜗杆副.中国:CN101016931A[P].2007-03-01.  
JIN Liangzhi, JIN Chaohua, LONG Lin. High precision steel column enveloping hourglass worm drive. China: CN101016931A[P].2007-03-01.
- [59] 王进戈,张均富,洪雷.无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动机构.中国:CN101290042A[P].2008-04-14.  
WANG Jingge, ZHANG Junfu, HONG Lei. Non-backlash double-roller enveloping hourglass worm drive. China: CN101290042A[P].2008-04-14.
- [60] ADAMS T E. Internal worm gear. USA: US1594987[P]. 1925-02-19.
- [61] BOND J C. Worm gear mechanism. USA: US3489026[P]. 1967-11-18.
- [62] HOYASHITA S. Barrel worm-shaped tool with conjugate cutting-edge profile generated from tooth profile of internal gear [J]. The Japan Society of Mechanical Engineers,1996, 62(593):284-290.
- [63] LSZL P G. Internal worm gear pairs[D]. Miskolc; University of Miskolc, 2001.
- [64] Yonghong Chen, Guanghui Zhang, Bingkui Chen, et al. A novel enveloping worm pair via employing the conjugating planar internal gear as counterpart[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 67: 17-31.
- [65] POPPER B, PESSEN D W. The twinworm drive—a self-locking worm-gear transmission of high efficiency [J]. Journal of Engineering for Industry,1960,82(3):191-198.
- [66] VOORHIS D M V. Internal worm and speed reducer using an internal worm.USA: US3552225[P]. 1968-10-24.
- [67] MACPHEE J. Internal worm drive and oscillating roller assembly for use in inking systems for printing presses. USA: US5054393[P].1990-04-26.
- [68] 邱昕洋.钢制变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动的关键技术研究[D].重庆;重庆大学, 2010.  
QIU Xinyang. Research on key technologies of steel planar wormgear enveloping hourglass worm gears[D] . Chongqing: Chongqing University.2010.
- [69] FRANKE F. Worm gear.USA: 2959977[P]. 1959-01-13.
- [70] 陈永洪, 陈燕, 王进戈, 等.精密重载型变齿厚渐开线齿轮包络环面蜗杆传动. 中国, ZL201410011144.7[P]. 2017-01-18.
- [71] CHEN Y, CHEN Y, LUO W, ZHANG G. A novel backlash-adjustable and wear-compensable hourglass worm drive: computerized design, simulation of meshing and stress analysis[J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2016, 10(2): 1-20.
- [72] 张光辉.蜗杆传动的分类及齿轮包络蜗杆传动的几个问题 [C]//朱景梓.太原工学院第五次科学报告会议论文.太原;太原工学院油印.1965:1-23.  
ZHANG Guanghui. The classification of worm gearing and the essence of gear enveloping worm[C]//ZHU Jingzi.The No.5 science conference papers of Taiyuan University of Technology.Taiyuan. Taiyuan University of Technology mimeographed.1965:1-23.