

无侧隙端面啮合蜗杆传动研究综述

邓星桥¹, 王珏翎², 陈守安¹, 王进戈¹

(1. 西华大学机械工程与自动化学院, 四川成都 610039; 2. 成都市工业职业技术学校机械工程系, 四川成都 610218)

摘要:消除齿侧间隙对传动精度的影响和追求高的传动精度以实现精确的运动变换是国内外精密传动研究亟待解决的一个重大科学问题。针对这一问题, 国内外主要提出了优化制造工艺、利用新型传动结构以及采用控制系统补偿这3类解决方案, 本文在研究和分析国内外学者运用上述方法解决的优缺点的基础上得出利用新型机械结构应是最佳解决方案。为此, 首次提出一种新颖的端面啮合蜗杆传动装置, 此传动装置通过两段分别啮合的方式可有效消除蜗轮传动装置中的齿侧间隙。

关键词:机械零件及传动; 无侧隙; 端面啮合; 蜗杆传动

中图分类号:TH132.44 **文献标志码:**A

Research overview of anti-backlash end face engagement worm gearing

DENG Xingqiao¹, WANG Jueling², CHEN Shouan¹, WANG Jingge¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Chengdu Industrial Vocational Technical College, Chengdu, Sichuan 610218, China)

Abstract: Eliminating the negative effect of gear backlash on transmission precision so as to achieve precise motion transformation remains a problem to be solved in the field of precision transmission. To date, optimization of manufacturing process, new transmission structure and control system are mainly used to solve the above scientific problem, however, the new transmission structure is undoubtedly the best method compared with the methods above based on the analysis of advantages and disadvantages for various methods. In doing so, this paper originally proposes a type of transmission, an anti-backlash end face engagement worm gearing, with certain advantages of no-backlash, high precision and high operating efficiency over other gears and gear systems.

Keywords: mechanical parts and drive; anti-backlash; end face engagement; worm gearing

1 无侧隙蜗杆传动的意义

精密齿轮传动机构的研究属于机械工程学科的基础, 关系到国家装备的性能、可靠性与安全性, 对学科的发展和重大装备基础部件的开发起着支撑作用^[1]。

收稿日期: 2014-09-18; 修回日期: 2014-11-05; 责任编辑: 陈书欣

基金项目: 国家自然科学基金(51305356); 教育部春晖计划项目(14202505)

作者简介: 邓星桥(1982—), 男, 四川江安人, 副教授, 博士, 主要从事新型机械传动、汽车碰撞方面的研究。

E-mail: 317186437@qq.com

邓星桥, 王珏翎, 陈守安, 等. 无侧隙端面啮合蜗杆传动研究综述[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(2): 111-117.

DENG Xingqiao, WANG Jueling, CHEN Shouan, et al. Research overview of anti-backlash end face engagement worm gearing[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(2): 111-117.

当前,国内外精密齿轮传动研究的难点与热点逐渐集中在追求高的齿轮传动精度以实现精确的运动变换和负载功率匹配^[1-2]。在微电子、光电子、生物医学、航空航天、国防工业、先进制造、超精加工、微/纳米等领域,为精确实现对工作负载的直线和回转定位控制,通常采用各种形式的精密齿轮传动装置。但是,传统的精密齿轮传动装置由于存在齿侧间隙,使输出与输入之间经常产生延时与滞后,同时引起啮合冲击,自激励振动,整个系统的传动精度、位置精度都会随之降低,在一些特殊的工况下甚至导致整个系统无法正常使用。显然,齿侧间隙、摩擦、磨损等一系列问题,使得传统的齿轮传动无论是在动静特性、传动效率、体积质量、可靠性等方面都难以满足现代工业对高精密、快速和复合定位的需求^[3-5]。

由此,消除齿侧间隙对传动精度的影响与追求高的传动效率和承载能力势必成为未来新型精密齿轮传动方式探索和研究的主要方向^[6]。例如:在激光约束核聚变工程中需要对光栅实现5个自由度的超精密姿态调整,直线和回转精度要求分别为20 nm和1 μ rad,航空遥感相机像移补偿需要采用回转精度为30 μ rad以上的精密传动机构,传统的齿轮传动方式要达到这一要求,就需要解决传动中齿侧间隙带来的回程误差问题。然而,传统的齿轮传动为了保证齿轮副正常的啮合和传动,避免轮齿摩擦发热膨胀而卡死和补偿传动过程中所产生的热变形、弹性变形以及制造和安装误差等,共轭齿的2个非工作齿廓之间通常留有齿侧间隙。研究表明,如果不改变传统的啮合方式和结构形式,单纯通过改进制造工艺和利用误差补偿控制的手段以消除或降低传统齿轮传动中齿侧间隙引起的回程误差等一系列问题是难以实现的,因为传统的齿轮传动一旦齿侧间隙过小或为零时就极易导致轮齿卡死和折断、困油、承载能力降低、噪音变大、传动装置温度急剧上升等问题^[7-13]。

基于上述思想,现代工业迫切需要探索和发展精密齿轮传动的新原理和新方法,如何发展和创新传统的齿轮啮合理论、啮合方式和结构形式以消除传动系统中的回程误差是当前精密传动领域科技工作者亟待解决的科学问题。尽管许多科技工作者和科研机构已投入了大量的研究,但是,这种既能消除传动系统中的回程误差又能自动补偿齿面磨损、承载能力大、传动效率高、动态响应特性好的新型齿轮传动装置却鲜有见诸文献。故深入开展对此科学问题的研究具有非常广阔的工程应用前景和重大的科学研究意义,无侧隙端面啮合蜗杆传动的研究旨在解决这一科学问题。

2 无侧隙蜗杆传动的国内外研究现状

目前国内外著名的齿轮传动研究机构和学者为了解决齿侧间隙引起的回程误差、振动冲击等问题,主要采用以下3大类方法^[14-21]。

1) 采用优化设计方法,改进制造及装备工艺

有学者根据设计的最小齿侧间隙值,定量分析了影响齿侧间隙的关键参数,给出了各影响因素与齿侧间隙之间的计算公式,并提出了控制齿侧间隙的加工工艺和方案^[13-18]。这类方法通过改进制造及装备工艺等,在一定程度上能达到控制齿侧间隙的目的,但是这种方法往往受加工条件的限制,并不能将各影响因素控制在设计范围内,因此不能保证齿侧间隙值,更无法消除传动系统中的回程误差。

2) 采用控制的方法补偿齿侧间隙

KALANTARI^[19]等在齿面的接触区域与间隙区域分别采用不同的线性控制方案以补偿齿侧间隙带来的不利影响,WARNECKE^[20]等和MEI^[21]等提出在保证最小齿侧间隙的前提下,通过在齿侧间隙区前增加脉冲信号来调整输入以达到补偿齿侧间隙所引起的延时、滞后等问题。李俊阳^[22]等亦针对渐开线内啮合圆柱齿轮副的回差进行了控制补偿研究,YU^[23]等采用频域的方法对伺服系统的侧隙进行补偿控制。实际上NORDIN^[24]等在总结近几年采用控制补偿齿侧间隙的相关研究时,就得出这样的结论:采用控制补偿齿侧间隙的方法只能减少输入与输出之间的传动误差,齿侧间隙仍然存在,因此并不能消除齿侧间隙引起的啮合冲击、振动、噪音等一系列问题。

3) 采用能消除或减少齿侧间隙的新型齿轮传动装置

FURUYA^[25-26]等提出采用双电机双传动链分别负责驱动装置正反转来消除齿侧间隙,或者通过双片齿轮并使用弹簧来消除齿侧间隙,以及通过变齿厚渐开线圆柱齿轮副施加轴向预紧力以消除齿侧间隙。钟文斌^[27]等提出采用双齿轮消除机构,通过采用胀套联结,同时使与消除轴啮合的两齿轮传动链往相反方向旋转,从而工作齿圈与其啮合的2个齿轮轮面反向贴紧,以达到消除的目的。但是这些方法不但使制造工艺变

复杂,而且还增加了制造成本,传动装置的体积和质量也使其使用场合受限,并容易产生动载荷、增加振动和噪音。几种解决齿侧间隙的蜗杆传动装置如图1所示。

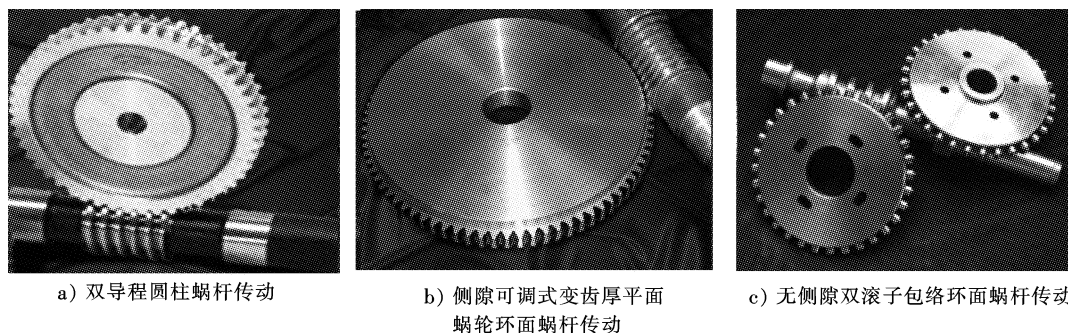


图1 几种解决齿侧间隙的蜗杆传动装置

Fig. 1 Several worm gears in solving backlash problem

基于上述思想,蜗杆传动作为齿轮传动的一种特殊形式,由于具有承载能力大、结构紧凑、传动平稳、噪音小等特点成为传动专家考虑用于消除的理想机构,如:威尔德哈卜^[28]提出的正平面一次包络环面蜗杆传动,正平面一次包络环面蜗杆传动的蜗轮齿两侧面的接触区域成反对称分布,故当将其沿齿面中央平面剖分制造时,通过相对转动两半个蜗轮,便可以调整或补偿齿侧间隙的目的,适用于精密分度蜗轮传动,其主要不足在于:由正平面包络形成的蜗杆,当传动比稍小时,蜗杆入口端的齿面将产生根切;由于采用错位消除的缘故,两半蜗轮分别与蜗杆左右两齿面同时接触,蜗杆传动齿面间的相对滑动速度较大,故导致齿面容易磨损,传动效率较低;若采用键连接蜗轮与轴,为保证其中半个蜗轮相对另半个蜗轮错位传动,务必要将蜗轮的键槽随错位加宽,这给整个传动的侧隙调整带来不便。

双导程圆柱蜗杆传动^[29](也称复合模数蜗杆传动)是蜗杆左右齿面的导程及导程角加以改变的蜗轮副,如图1 a)所示,该传动已被国内外应用于滚齿机等精密分度机构中,其主要缺点是加工蜗轮时需要复合模数滚刀铲磨且精密制造困难,根据实际经验,双导程蜗轮蜗杆齿侧间隙调整可以少至0.010~0.015 mm(普通蜗轮蜗杆副一般只能达到0.03~0.08 mm)^[30],尽管如此也难以满足高精度传动中无回程误差的要求。

张光辉^[31]提出的侧隙可调式变齿厚平面蜗轮环面蜗杆传动,如图1 b)所示,该传动通过调整变齿厚蜗轮的轴向位置即可调节蜗轮与蜗杆的齿侧间隙,具有啮合齿数多,承载能力大等优点,其蜗杆可以进行淬火并采用平面砂轮磨削、易于精密加工。同时,曹西京^[32]等提出了双蜗杆传动,邱新桥^[33]提出了可减小传动间隙的双蜗杆传动机构。郭兴龙^[34]等提出了双斜齿轮结构和直齿轮系结构等。这些传动各有优点,但都面临着一些不足,如加工困难、应用场合受到一定限制、较难推广应用等。

随着研究的深入以及空间啮合理论的发展,各国的学者已开始考虑在两构件之间加入消除机构,如:国外的RATKO^[35]等提出了一种利用内外2个花键的双段方式来消除齿侧间隙的机构;LUMPKIN^[36]等提出了一种可消除间隙的行星齿轮传动,该机构运动时,一个专用的扭矩机构会产生一个扭力使得第2个行星齿轮在与第1个行星齿轮相反方向上运动从而达到消除间隙的目的;KENNETH^[37]等提出了一种可以减少传动侧隙的装置,该装置通过调整两半齿轮的相对角度来消除齿侧间隙。

此外,很多学者利用在蜗轮蜗杆两构件之间加入滚柱、滚锥、球或其他组件来消除齿侧间隙,并以此将共轭齿面间的滑动摩擦变为滚动摩擦^[38-40]。如图1 c)所示为本文参与研究的无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动课题。此课题中邓星桥^[39]提出利用两半蜗轮确保在同一齿槽分别有左右2个滚子与蜗杆的左右齿面啮合来消除齿侧间隙。研究发现双滚子包络环面蜗杆具有传动精度高、使用寿命长、传动效率高等特点,由于蜗杆齿面由滚子包络而成,除具有滚子包络环面蜗杆传动啮合齿数多、啮合效率高等优点外,还具有零间隙传动和高精度寿命的特点,适用于精密分度、精密传动和精密动力传动等领域^[39-41]。但是,研究后发现此传动存在如下2个非常突出的问题:一方面蜗轮轮齿由于加工误差和失配误差引起的轮齿边缘接触和点接触极易致蜗轮轮齿折断,因蜗轮轮齿的强度和刚度很难保证也就致其难以应用于高速重载等传动领域;另一方面当蜗杆齿面发生磨损后齿侧间隙不容易调整。

综上所述,第3类解决方案把解决齿侧间隙的问题放在解决产生问题本身的机构上面,抓住了矛盾的关键和解决问题的核心,是解决齿轮传动中由齿侧间隙引起回程误差等问题的最佳方案。然而限于条件,目前此类方案所提的传动装置虽然都各具优点并能够在一定程度上减少齿侧间隙或消除齿侧间隙,却由于部分传动元件多、体积大、结构复杂,很难适用于要求传动精度高、承载能力大、机构紧凑的伺服驱动系统的传动装置,而一些传动又存在啮合效率低,不能自动消除齿面磨损所产生的新侧隙,较难实现零间隙传动等问题,难以满足现代工业对精密齿轮传动高精度、高啮合效率、高承载能力、精确快速复合定位等的要求。

3 无侧隙端面蜗杆的提出及问题

上述学者对精密齿轮传动领域所做出的贡献是毋庸置疑的,基于他们的研究和贡献,本文总结出解决齿侧间隙问题的较佳途径:通过改变传统齿轮的啮合方式或结构形式,形成一种新的传动结构,以发展和创新传统齿轮啮合原理与方法,消除当前精密传动领域传动系统中科技工作者亟待解决的回程误差问题。

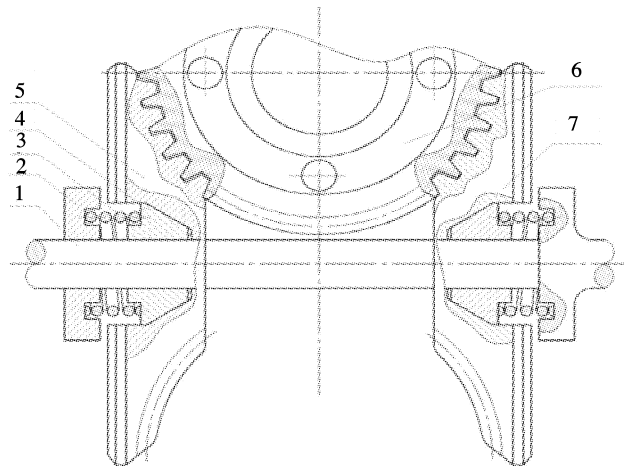
本文在无侧隙双滚子包络环面蜗杆的研究基础之上,首次提出无侧隙平面包络端面啮合蜗杆传动,传动的工作原理如图2所示。

无侧隙平面包络端面啮合蜗杆传动的特点在于:蜗杆利用端面啮合的形式和左右两段蜗杆错位布置的结构方式,左段蜗杆#5和右段蜗杆#7之间通过一连接轴#1实现蜗杆传动装置的连接,其中连接轴#1为动力输入轴,可实现正反转运动,

左段蜗杆#5的右齿面与蜗轮#6的左齿面始终保持接触,用于传动装置的正向传动,而右段蜗杆#7的左齿面始终与蜗轮轮齿#6的右齿面保持接触,用于传动装置的反向传动;当轮齿发生磨损时,具有自锁功能的调整弹簧#3和楔形调整机构#4就会自动进行补偿,进而实现蜗杆在正向与反向传动过程中的自动消除。例如:此结构在正向传动时依靠左段蜗杆#5与蜗轮啮合,而在反方向时则依靠右段蜗杆#7与蜗轮啮合,这样不但保证了在传动时均有较好的齿侧间隙用以储存润滑油和啮合齿面间有较好的润滑作用以外,还能克服反向传动时由于齿侧间隙引起的传动误差,此结构在要求高传动精度的场合非常适用,如:数控机床的回转工作台,雷达回转装置,天文望远镜的回转装置,火炮的回转装置等。此外,此种结构形式和啮合方式打破传统平面包络蜗杆传动始终保有蜗杆喉部齿面的结构形式,提出双段蜗杆且端面啮合的方式,利用弹簧楔形机构实现自动消除,也克服了传统蜗杆由于蜗杆喉部较细承载能力受限的问题。

但从图2中可以看出,蜗杆的端面究竟应该取哪段依然是一个难点和亟待解决的问题,基于这种思想,本文这种蜗杆未来的研究难点之一势必要首先考虑如图3所示的不同结构给蜗杆传动啮合性能和传动性能带来的影响和差异。

此外,是否已经完全消除齿侧间间隙的测试也是一个难题,从前期研究经验提出利用图4所示的方法来测试侧隙的消除情况应该是可行的,但其实际效果还有待进一步验证:在蜗轮#7的输出端接上辅助装置#6,在实验台上放置一传感器#9,当装置随输出端的蜗轮轴一起运动时,每经过传感器#9,都有相应的记录信号,由此通过正反转的记录信号可以分析无侧隙平面包络端面啮合蜗杆传动装置消除回程误差的情况。



1—连接轴;2—轴向定位装置;3—调整弹簧;4—楔形调整机构;
5—左段蜗杆;6—蜗轮;7—右段蜗杆。

图2 无侧隙平面包络端面啮合蜗杆传动工作原理示意图

Fig. 2 Working principle of anti-backlash planar enveloping end face engagement worm gearing

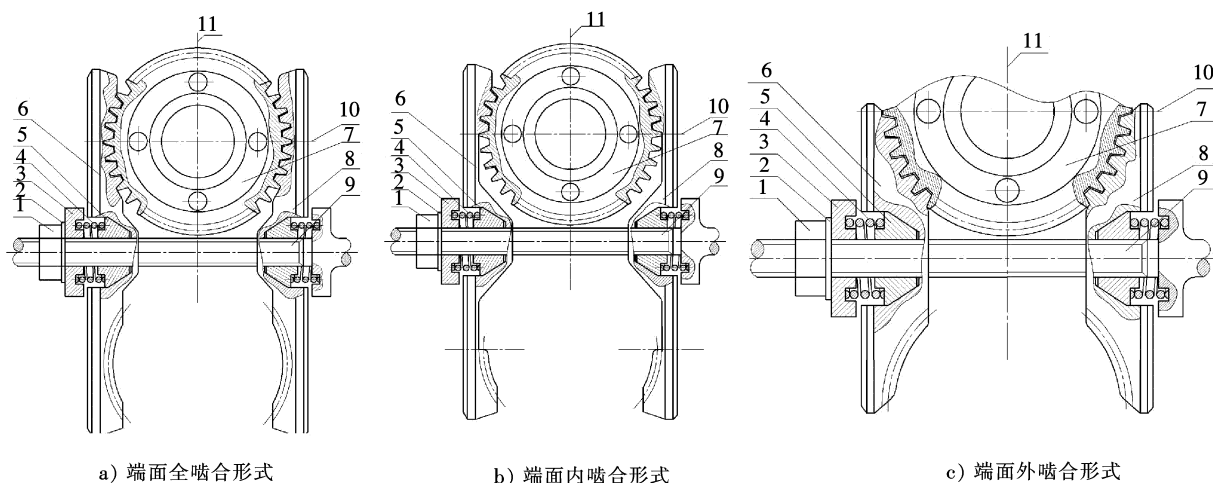
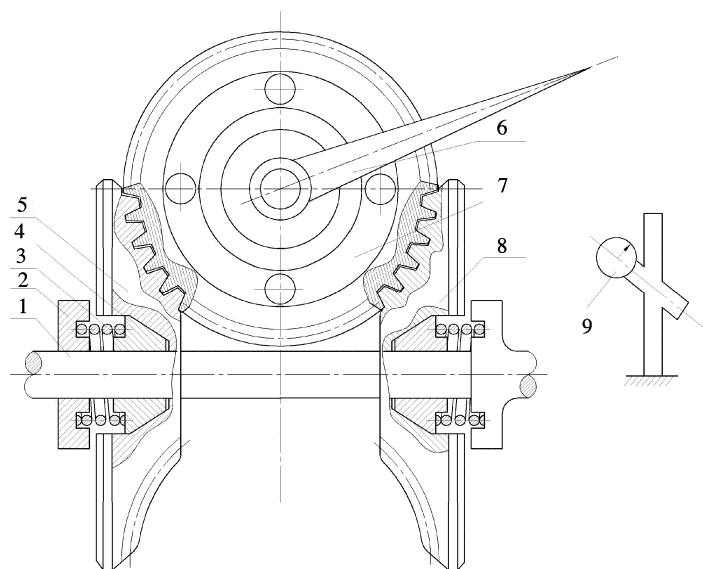


图 3 蜗杆与蜗轮的不同啮合形式

Fig. 3 Different engagement types of the worm and the gear



1—连接轴; 2—轴向定位装置; 3—调整弹簧; 4—楔形调整机构;
5—左段蜗杆; 6—辅助装置; 7—蜗轮; 8—右段蜗杆; 9—传感器。

图 4 无侧隙平面包络端面啮合蜗杆传动消除侧隙情况的检测方案

Fig. 4 Detection of backlash elimination for anti-backlash planar enveloping end face engagement worm gearing

4 结 语

无侧隙平面端面蜗杆传动装置是在基于现有科学工作者对精密齿轮传动领域研究的基础上,为消除当前精密传动领域传动系统中亟待解决的回程误差问题,通过对蜗杆传动装置啮合方式和结构形式上的原始创新而首次提出的一种新颖的传动方式。

与传统的齿轮传动相比,它具有如下优点。

1)采用包络蜗杆端面啮合的方式,继承了包络蜗杆承载能力大、传动精度高、易于精密加工等优点,还由于蜗杆喉部不再有蜗杆齿,由此可在实现大中心距传动的同时把蜗杆传动装置变得更紧凑、结构更合理。

2)利用双段蜗杆的错位布置以及通过蜗杆在轴方向的移动来消除传动的侧隙,由于不会改变传动副的中心距,这样可避免普通蜗杆传动中通过蜗杆沿蜗轮径向移动来调整啮合侧隙,因为后一种方式改变了传动的中心距也就极易引起齿面接触情况变差、磨损加剧、轮齿卡死等;同时,因双段蜗杆的错位布置与自动消除机构的共同作用,可通过输入轴的正转与反转运动实现装置的无侧隙正反转传动,且单段端面蜗杆齿间

均留有齿侧间隙以保证正常的传动和良好的润滑;具有无啮合冲击、传动效率高、发热量低、摩擦功耗小等优点,且机构简单,加工制造容易。

3) 弹簧楔形消除机构具有自锁功能,可在轴向自动补偿轮齿磨损的减薄量,由此能自动消除普通蜗杆传动中由轮齿磨损引起的齿侧间隙,满足传动系统实现精确运动变换和快速复位定位等要求。

尽管此种新型的机构提出通过了非常严密的科学论证(将在随后的一系列论文中发表),但是其实际的效果是否带来革命性的变化或者能否在前人的基础上取得更进一步的进展,还有待后面的深入研究。

可以预见,无侧隙端面啮合蜗杆传动未来研究重点将会集中在以下几个方面:

- 1) 无侧隙端面啮合蜗杆传动空间啮合原理及微分几何特性的研究;
- 2) 无侧隙端面啮合蜗杆传动制造方法和装配工艺的研究;
- 3) 无侧隙端面啮合蜗杆传动装置承载能力的研究;
- 4) 无侧隙端面啮合蜗杆传动实验装置与台架实验的研究。

参考文献/References:

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料学部. 学科发展战略研究报告(2011—2020)[R]. 北京:科学出版社,2011.
Materials and Engineering Department of National Natural Science Foundation of China. The Research Report of Disciplinary Development Strategy(2011—2020)[R]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 温诗铸,黎明. 机械学发展研究战略[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
WEN Shizhu, LI Ming. Mechanics Development Strategy Study[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [3] LITVIN F L, FUENTES A. Gear Geometry and Applied Theory [M]. 2th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [4] 卜炎. 机械传动装置设计手册(2)[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
BU Yan. The Mechanical Transmission Device Design Manual(2)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1998.
- [5] 美国未来学研究所,美国机械工程师协会. 机械工程未来20年发展预测[M]. 中国机械工程学会译. 华盛顿:[s. n.], 2008.
Center of American Futures Study, American Society of Mechanical Engineers. The Forecast for the Next 20 Years the Development of Mechanical Engineering[M]. Translated by Mechanical Engineering Society. Washington:[s. n.], 2008.
- [6] 中国机械工程学会生产工程分会. 机械制造科技发展研究报告[R]. 北京:[s. n.], 2008.
Production Engineering Branch of Chinese Mechanical Engineering Society. The Study Report of Machinery Manufacturing and Technology Development[R]. Beijing:[s. n.], 2008.
- [7] 甘学辉,侯东海,吴晓玲. 斜齿齿轮泵无侧隙啮合困油特性的研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 145-149.
GAN Xuehui, HOU Donghai, WU Xiaoling. Research on trapping property of no clearance helical gear pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(2): 145-149.
- [8] 杨学华. 机械设计中齿轮传动侧隙的解决方法[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2007, 32(5): 9-13.
YANG Xuehua. A solution to the drive gear backlash in the mechanical design[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Science and Technology), 2007, 32(5): 9-13.
- [9] DENG Xingqiao, WANG Jing, HORSTEMEYER M F, et al. Parametric study of meshing characteristics with respect to different meshing rollers of the anti-backlash double-roller enveloping worm gear[J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 134(8): 1004-1015.
- [10] LAGERBERG A, EGARD B S. Backlash gap position estimation in automotive power trains[A]. Ruropean Control Conference ECC'03 [C]. Cambridge:[s. n.], 2003: 457-463.
- [11] BRAUER J. Transmission error in anti-backlash conical involute gear transmission: A global-local Fe approach[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41(5): 431-457.
- [12] 周向雷,张卫. 齿轮传动齿侧间隙消除结构分析[J]. 冶金设备, 2012(sup): 26-27.
ZHOU Xianglei, ZHANG Wei. Analysis about gear clearance elimination in the gear transmission[J]. Metallurgical Equipment, 2012 (sup): 26-27.
- [13] 李新年. 高精度少齿差减速器的传动回差精度控制[J]. 船舶工程, 2003, 25(6): 28-30.
LI Xinnian. Accuracy control of driving backlash of speed reducer with high accuracy and low gear-tooth error[J]. Ship Engineering, 2003, 25(6): 28-30.
- [14] 周广武,王家序,李俊阳,等. 滤波减速器回差精度分析与控制[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(8): 608-614.
ZHOU Guangwu, WANG Jiayu, LI Junyang, et al. Analysis and control on the backlash of filtering gear reducer[J]. Sciencepaper Online, 2010, 5(8): 608-614.
- [15] 付圣林. 齿轮传动回差对传动精度的影响[J]. 光电技术应用, 2003(5): 51-54.
FU Shenglin. Influence of retrace tolerance on gear driving precision[J]. Electro-optics and Passive Countermeasures, 2003(5): 51-54.
- [16] 何航红. 齿侧间隙对齿轮系统动力学行为的影响[J]. 机械设计与制造, 2012(7): 281-283.
HE Hanghong. Effects of backlash on dynamics behavior of gear system[J]. Machinery Design and Manufacture, 2012(7): 281-283.

- [17] 童仁平. 球磨机齿轮啮合间隙的合理选择及调整[J]. 矿山机械, 2014, 42(2): 122-125.
TONG Renping. Reasonable selection of gear meshing clearance and adjustment[J]. Mining and Processing Equipment, 2014, 42(2): 122-125.
- [18] YANG Zheng, SHANG Jianzhong, YU Naihui, et al. Effects of shrink range and preload on dynamics characteristics of anti-backlash geared rotor-bearing system with composite mesh stiffness[J]. Journal of Vibroengineering, 2013, 15(4): 1642-1655.
- [19] KALANTARI R, FOOMANI M S. Backlash nonlinearity modeling and adaptive controller design for an electromechanical power transmission system[J]. Scientia Iranica Transaction B: Mechanical Engineering, 2009, 16(6): 463-469.
- [20] WARNECKE M, JOUANEH M. Backlash compensation in gear trains by means of open-loop modification of the input trajectory[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(3): 620-624.
- [21] MEI Z Q, YANG R Q, LIANG C, et al. The study of backlash compensation and its application in the robot checking the filter[J]. International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2005, 25(3/4): 396-401.
- [22] 李俊阳, 王家序, 肖科, 等. 渐开线内啮合圆柱齿轮副的回差控制与补偿[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(7): 43-48.
LI Junyang, WANG Jiaxu, XIAO Ke, et al. Backlash control and compensation for internal meshing involute spur gears[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(7): 43-48.
- [23] YU Shen, LI Yang. A frequency-domain approach for backlash compensation controller[J]. ICIC Express Letters, 2012, 6(10): 2731-2738.
- [24] NORDIN M, GUTMAN P O. Controlling mechanical systems with backlash: A survey [J]. Automatica, 2002, 38(10): 1633-1649.
- [25] FURUYA N, TOBA H, OGURI T, et al. Backlash compensation of reduction gears by twin motor cooperative control (1st report): Study on compensation method using backlash model[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2007, 73(4): 502-506.
- [26] FURUYA N, OGURI T, MASHIMA A, et al. Backlash compensation of reduction gears by twin motor cooperative control (2st report): Study on compensation method using backlash model[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2008, 74(10): 1107-1112.
- [27] 钟文斌, 田贵磊, 肖圣龙. 双齿轮消隙结构的研制与分析[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 105-107.
ZHONG Wenbin, TIAN Guilei, XIAO Shenglong. A prsearch and analysis on one structure of double gear anti-backlash[J]. Machinery Design and Manufacture, 2014(4): 105-107.
- [28] 埃乃斯特·威尔德哈卜. 蜗轮传动蜗杆传动文集[Z]. 重庆大学蜗杆传动科研组, 译. 重庆: [s. n.], 1976.
WILDHARBER E. Worm Drive/Worm Drive Anthology [Z]. Translated by Chongqing University Research Group of Driving for Worm Drive. Chongqing: [s. n.], 1976.
- [29] 钱光瑾. 双导程蜗杆传动副[J]. 新技术新工艺, 1983(5): 22-25.
QIAN Guangjin. Double pitch worm gear[J]. New Technology and New Process, 1983(5): 22-25.
- [30] 曹可虎, 王立娅, 王娟, 等. 双导程蜗轮蜗杆测绘与计算[J]. 中国设备工程, 2007(8): 22-24.
CAO Kehu, WANG Liya, WANG Juan, et al. Double lead worm gear and worm of surveying and mapping and calculated[J]. China Plant Engineering, 2007(8): 22-24.
- [31] 张光辉. 侧隙可调式平面包络环面蜗杆传动[P]. 中国专利: 99117383, 1999-12-24.
ZHANG Guanghui. Backlash Adjustable Plane Enveloping Hourglass Worm Gearing[P]. CN: 99117383, 1999-12-24.
- [32] 曹西京, 张淳, 刘昌祺, 等. 双蜗杆传动在精密数控分度中的应用[J]. 陕西科技大学学报, 2003, 21(1): 70-72.
CAO Xijing, ZHANG Chun, LIU Changqi, et al. Application of double-worm in precise NC index equipment[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2003, 21(1): 70-72.
- [33] 邱新桥. 可减小传动间隙的双蜗杆传动机构[J]. 机械制造, 2003(7): 51.
QIU Xinqiao. Double worm drive mechanism of reduce the driving gap[J]. Machinery, 2003(7): 51.
- [34] 郭兴龙, 王刚, 李凯. 消除传动副间隙的几种结构[J]. 机械工程师, 2002, 16(10): 64-65.
GUO Xinglong, WANG Gang, LI Kai. Several worm gears of solving backlash[J]. Mechanical Engineer, 2002, 16(10): 64-65.
- [35] RATKO M, DAMIR M. Gear Backlash Elimination and Adjustable Gear Backlash Mechanism[P]. US: 6997076, 2006-02-14.
- [36] LUMPKIN T, WOLF T. Methods and Apparatus for Minimizing Backlash in a Planetary Mechanism[P]. US: 7121973, 2006-10-17.
- [37] KENNETH A, ELISE NIELSEN H, NILS-OLOF H. Apparatus for Reducing Gear Train Backlash[P]. US: 7086302, 2006-08-08.
- [38] LAI Tashi. Geometric design of roller drives with cylindrical meshing elements[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(1): 4055-4067.
- [39] 邓星桥. 无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动的研究[D]. 成都: 四川大学, 2011.
DENG Xingqiao. Study on the Anti-backlash Double-roller Enveloping Hourglass Worm Gearing[D]. Chengdu: Sichuan University, 2011.
- [40] 吴莎, 高永生, 谢文强. Volterra 核函数在齿轮裂纹故障识别上的应用[J]. 河北科技大学学报, 2010, 31(6): 538-541.
WU Sha, GAO Yongsheng, XIE Wenqiang. Application of Volterra kernel function in gear crack failure diagnosis[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2010, 31(6): 538-541.
- [41] 姚芳萍, 李金华. 章动齿轮传动中直齿内锥齿轮加工及在线检测研究[J]. 河北工业科技, 2010, 27(5): 294-296.
YAO Fangping, LI Jinhua. Study on the processing and on-line measurement of spur internal bevel gears in nututation gear drive[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2010, 27(5): 294-296.