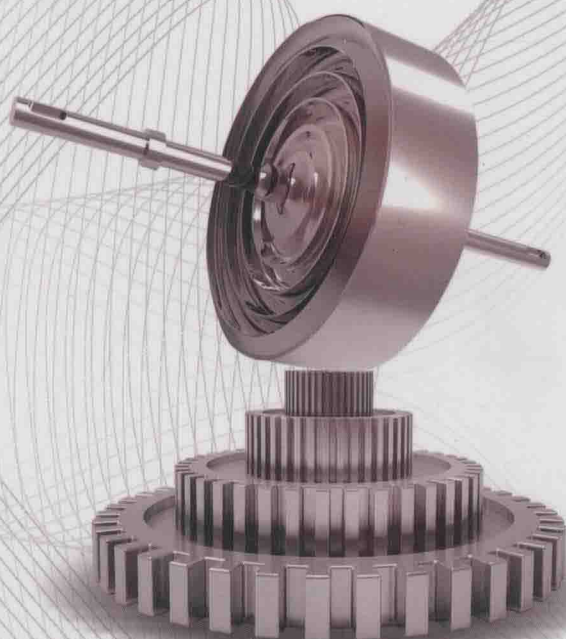




滚子包络环面蜗杆传动的 理论与制造实践

邓星桥 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



滚子包络环面蜗杆传动的 理论研究与制造实践

邓星桥 著



机械工业出版社

本书以新型滚子包络蜗杆传动的探索实践研究为起点,较为详细地阐述了滚子包络蜗杆传动的基本理论、加工制造方法、实验研究,是作者自博士研究以来对一系列新型精密滚子包络蜗杆传动的研究集成。本书具体内容如下:通过齿轮啮合原理构建了滚子包络蜗杆传动的啮合方程,利用 Matlab 软件求得了滚子包络蜗杆传动的空间啮合曲线,通过三维建模软件获得了滚子包络蜗杆传动的精确 3D 模型,并根据滚子包络蜗杆传动的啮合原理改装了相应的机床,最后通过搭建的实验平台获得了相应的传动性能数据。

本书可作为高等院校机械设计及理论专业研究生和高年级本科生的选修课教材,也可作为从事精密传动研究的工程技术人员和研究人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

滚子包络环面蜗杆传动的理论研究与制造实践 / 邓星桥著. —北京:机械工业出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-111-59445-1

I. ①滚… II. ①邓… III. ①环面蜗杆传动 IV. ①TH132.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 052401 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王 良 责任校对:李 伟

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

170mm × 240mm · 11 印张 · 186 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59445-1

定价: 45.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心: (010) 88361066

销 售 一 部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 68326643 封面无机械工业出版社专用防伪标均为盗版

序 言

精密齿轮传动在机械工程领域具有不可替代的重要作用，相关基础研究的价值不言而喻。作为一种重要的齿轮传动方式，蜗杆传动在超精加工、微电子、光电子、生物医学、航空航天等先进制造领域得到了广泛的应用，直接影响着国家重大装备的性能、可靠性和安全性。

邓星桥博士在新型精密蜗杆传动理论与实践方面进行了新的尝试和探索，从十年前研制无侧隙双滚子包络环面蜗杆开始，连续在国际、国内期刊上发表了一系列研究成果，“十年磨一剑”，厚积薄发，凝聚成这本专著。

本专著从滚子包络环面蜗杆传动的啮合理论出发，基于现代计算技术和三维建模技术阐释了全空间下的滚子包络环面蜗杆传动的不同结构形式，从数学原理上首次揭示了从普通蜗杆传动到端面啮合蜗杆传动，再到内啮合蜗杆传动、具有变传动比的蜗杆传动、具有功率分流作用的多负载蜗杆传动和无侧隙滚子包络蜗杆传动等一系列蜗杆传动方式的内在机理及科学规律，对推出新的高品质蜗杆传动产品具有重要的理论指导意义。

这本专著凝聚了邓星桥博士十年来的研究心血，勾勒出作者的研究历程。本专著所研究的新型蜗杆传动在一定程度上可以替代当前的一些复杂传动结构，且传动方式更简单、传动效率更高，为现代工业精密传动提供了新的解决方案。本专著适合作为机械传动方面研究人员学习蜗杆啮合理论、蜗杆加工、蜗杆应用等的参考教材。

我很高兴接受邓星桥博士的邀请为本专著作序。希望这本专著的出版能够为我国蜗杆传动领域的发展起到有益的推动作用，为中国工业技术发展做出贡献。

石照耀

2017年12月17日于北京

自序

精密传动技术在现代工业中扮演着非常重要的角色，在常用的齿轮传动系统中，齿侧间隙既在保证传动中的良好润滑性能方面起到特殊作用，又严重制约了齿轮传动的精度，这一问题一直困扰着各国的齿轮传动科技工作者。为解决这一问题，科技界的学者们付出了大量的心血，从机械结构、制造工艺、控制理论等不同角度进行了颇具成效的研究，并取得了大量丰硕的成果。

我于2004年跟随王进戈教授从事蜗杆传动方面的研究，并一直探讨解决蜗杆传动齿侧间隙问题的方法和技术，但一直未取得突破性的进展，几多方案均被否定，研究一度受阻，我也因在足球机器人比赛上做了一些小事，基于多种原因的考虑，临快毕业，根据导师的意见把毕业论文转换为足球机器人方面的研究。直到2007年，经过多年的思考，我的导师王进戈教授提出了一种“无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动”的新颖结构形式，并获得了国家自然科学基金的资助。这一年，我也考取了四川大学的博士，继续跟随王进戈教授做博士，因为已经有了一定的齿轮啮合理论基础，且有国家自然科学基金的支持，和导师商量后决定继续从事新型蜗杆传动方面的研究。

在博士学习四年期间，在导师的指导下，我和师弟洪雷、吴江、李伟、田中亮、师妹王凯等人对无侧隙包络环面蜗杆传动的啮合理论、建模方法、有限元仿真等开展了一系列较为深入的研究，同时对此新型蜗杆传动的制造加工工艺、机床改造、试验台的搭建、型式测试等进行调研和准备。此间还有幸到重庆大学机械传动国家重点实验室进行了短暂的学习，得到了著名蜗杆传动专家张光辉教授

的指点,并结识了邱昕洋、陈永洪等优秀青年才俊,现在回想起来依然历历在目。

2011年4月完成了无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动的理论、加工、实验等一系列工作后顺利博士毕业,我随即到美国密西西比州立大学作为期一年的访问学者,跟随国际知名的力学专家 Mark. F Horstemeyer 教授学习有限元仿真方面的技术。在此期间我尝试性地按照 SCI 论文标准写了第一篇蜗杆方面的文章,经 Mark. F Horstemeyer 教授的语言润色后,投在 ASME 的 *Journal of Mechanical Design* 上,一等就是一年的审稿期,期间来回三次大修改,几乎放弃,终于在第四次被接受,并于 2012 年成功发表,这是我人生的第一篇 SCI 文章,且是在机械领域知名杂志上发表,欣喜之情难以言表。

受此鼓舞,我相信无论做什么,只要认真做,终归会有成果的。同时,我也觉得蜗杆传动的研究应该还是有前途的,虽然是冷门且经过几百年的发展已经很难有颠覆性的创新性成果出现,但正是因为这样,国内研究的人就少,竞争也少,最后坚守下来就是一片天地。

2013 年,我以“无侧隙平面包络端面啮合蜗杆传动”为题申报国家自然科学基金项目青年基金并成功获批,由此更坚定了我继续从事蜗杆传动研究的道路。期间我与我协带的硕士研究生陈守安解出了环面蜗杆传动的全包络环面接触线方程,这是我第一次发现了平面包络环面蜗杆传动在空间的全啮合形式,由此也触发了我的灵感,先后申报包含《一种平面包络内啮合蜗杆传动装置》在内的四项蜗杆发明专利,并全部获批。截至 2017 年 6 月已经发表了七篇蜗杆传动方面的 SCI 高水平论文。

2016 年无意在网上看到一个五轴数控机床回转工作平台的视频,居然发现与我们研究的滚子包络环面蜗杆一模一样,心生感慨,由此萌发了将我这十年的研究成果编撰成书的想法。本书主要从滚子包络环面蜗杆传动的啮合理论出发,分析全空间接触的不同结构

形式，并对不同结构的蜗杆形式进行了对比分析研究，还对滚子包络蜗杆传动的加工方式、型式试验等进行了实践。其包含了我在博士期间的部分研究成果，这是为了更好、更系统地对滚子包络环面蜗杆传动进行系统分析，也为了给后面的研究者提供一个完整的脉络和思路。

在撰写本书的过程中，我的导师王进戈一直给予指导，我的研究生江源渊、冯志鹏、张攀一直在帮我整理相关资料，前期研究中得到了洪雷、吴江等师弟的大力支持和帮助，在此一并致谢！同时感谢北京工业大学的石照耀教授对本书提出的宝贵意见！

2017年适逢我导师王进戈教授60大寿，恰借此书献给我尊敬的王进戈老师！

本书的出版获得国家自然科学基金项目的资助（No. 51305356 \ No. 51575456），特别感谢！同时特别感谢西华大学流体及动力机械教育部重点实验室提供的帮助！

鉴于作者水平有限，恳请各位读者批评指正！

2017年12月于西华苑

目 录

序言

自序

第 1 章 滚子包络环面蜗杆传动研究的意义	1
参考文献	11
第 2 章 数学基础	17
参考文献	23
第 3 章 滚子包络环面蜗杆传动原理	24
3.1 双滚子包络环面蜗杆传动的工作原理及单滚子蜗轮的组成结构	24
3.2 蜗杆齿面成形原理	27
3.3 通用坐标系设置及各坐标系之间的变换	30
3.4 蜗轮蜗杆的相对速度与相对角速度	35
3.5 蜗轮无偏转角啮合函数与啮合方程	38
3.6 有偏转角蜗轮蜗杆各标架的底矢变换	41
3.7 有偏转角蜗轮蜗杆的相对速度与相对角速度	45
3.8 蜗轮有偏转角啮合函数与啮合方程	48
3.9 蜗轮齿面上的接触线	49
3.10 蜗杆齿面螺旋线方程	50
3.11 啮合面方程	50
3.12 二界函数和二界曲线	50
3.13 蜗杆齿面及其一界函数和一界曲线	51
3.14 诱导法曲率	53
3.15 润滑角	54
3.16 自转角	55
3.17 齿面接触点处的相对卷吸速度	55

3.18 滚子自转速度	56
第4章 滚子包络环面蜗杆传动的建模方法	57
4.1 蜗轮蜗杆的建模方法	57
4.2 不同蜗杆传动的三维模型	64
第5章 滚子包络环面蜗杆传动的设计参数分析	70
5.1 诱导法曲率	71
5.2 润滑角	71
5.3 参数对圆柱滚子包络蜗杆性能的影响	71
5.4 参数对圆锥滚子包络蜗杆啮合性能的影响	97
5.5 圆柱滚子接触线	122
第6章 蜗杆传动的优化设计	127
6.1 蜗杆参数的选择	128
6.2 参数分析	130
第7章 滚子包络环面蜗杆副的制造方法	138
7.1 利用四轴四联动数控机床磨削蜗杆齿面	138
7.2 利用改装的滚齿机磨削蜗杆齿面	146
7.3 利用数控机床进行加工	158
7.4 利用改装车床及3D打印加工内啮合蜗杆传动	160
第8章 滚子包络环面蜗杆传动的实验	162
8.1 试验原理与设备	162
8.2 试验设备与安装	164
8.3 实验结果	165
8.4 端面啮合及内啮合蜗杆传动的实验	167

第 1 章 滚子包络环面蜗杆传动 研究的意义

蜗杆传动主要用于两轴交错、传动比大、传递功率不太大或间歇工作的场合。由于具有传动平稳、噪声小、冲击载荷小且具有自锁性等优点，作为机械传动中的一种重要传动方式在国防、航空、航天、冶金、造船、建筑、化工等行业得到广泛的应用。滚子包络环面蜗杆传动的研究与实践旨在弥补传统蜗杆传动中的传动效率及传动精度低问题，期望其能在精密传动领域发挥更大的功用。本书所提出的一系列新型蜗杆传动在理论上很大程度都可以替代当前的一些复杂传动结构，且将会使传动方式更简单、传动效率更高、使用寿命更长。

追溯蜗杆传动的发展历史，最早应是公元前二百多年的古希腊著名科学家、哲学家、数学家、物理学家、力学家阿基米德（Archimedes，公元前 287—公元前 212 年）所提出的利用螺旋运动推动齿轮旋转的方法，其发明了阿基米德蜗杆传动卷扬机。16 世纪，天才达芬奇（D. Vinci）在其手稿中首次提出了“环面蜗杆传动”的概念，如图 1.1 所示。

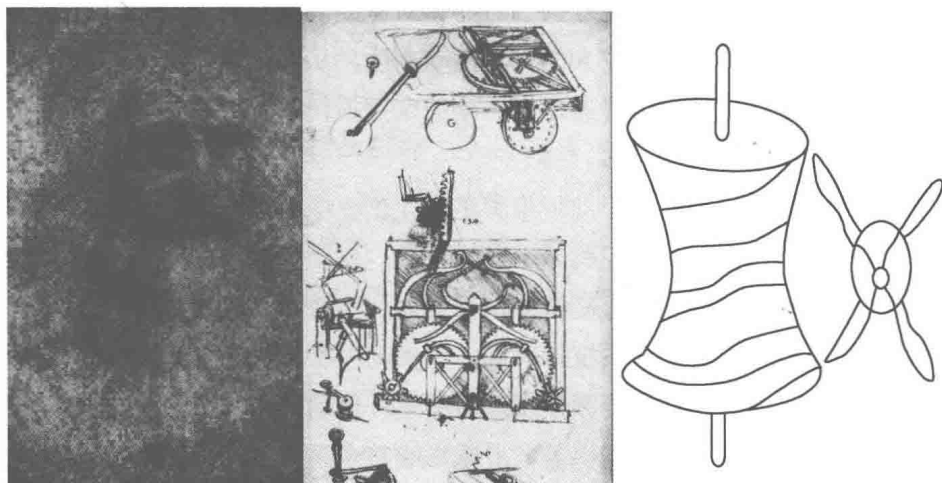


图 1.1 达·芬奇与其提出的环面蜗杆传动

此后，从 1765 年英国人亨得利（Hindley）首次提出的直廓环面蜗杆传动

到1935年,德国慕尼黑工业大学尼曼(G. Niemann)教授提出圆弧齿圆柱蜗杆传动,又称“尼曼蜗杆传动”(Niemann Worm Drive)或“ZC蜗杆传动”,再到我国国内齿轮专家发明的平面二次包络环面蜗杆传动,整个蜗杆传动历史在两千多年的发展进程中,出现了种类繁多的各式蜗杆传动,这些产品极大地推动了人类科技的进步,同时也在人类工业文明的活动过程中扮演着越来越重要的角色。

但在分析现存大量蜗杆传动的优缺点时,我们发现普遍具有以下显著两大缺点:

1. 普通蜗杆传动存在齿侧间隙

原因在于为了在啮合齿廓之间形成润滑油膜,避免因轮齿摩擦发热膨胀而卡死,其共轭齿的两个非工作齿廓之间必须留有间隙,此间隙称为齿侧间隙,简称侧隙。为保证蜗杆副正常的啮合和传动,此侧隙通常用以储藏润滑油并用来补偿传动所产生的热变形、弹性变形、制造和安装误差等。但是,在需要正反转的传动中,齿侧间隙的存在会产生齿间冲击,同时影响齿轮传动的平稳性。

2. 普通蜗杆传动在传动过程中容易发生磨损

其主要原因在于传动副在共轭齿面处相对运动速度总大于蜗杆圆周速度或蜗轮圆周速度,因此在任何位置接触点的相对速度都不会为零且始终处于滑动摩擦状态,即啮合齿轮间有较大的相对滑动速度,从而会导致齿面的磨损、发热和能量的消耗,这就使得普通蜗杆传动的摩擦损耗功率大,传动效率低,齿面磨损快,精度寿命低。

上述缺点使得普通蜗杆传动很难满足现代工业中高精度、高效率传动的要求。例如在工业机器人、数控机床、印刷设备、自动火炮和雷达等的传动系统中,对蜗杆传动部分不仅要求高精度及长寿命,还要求高效率。普通蜗杆传动中的啮合侧隙必然会给这些系统带来冲击、振动、噪声、降低系统随动精度和稳定性等问题。尤其是在需要频繁正反转的蜗杆传动伺服驱动系统中,啮合间隙的存在将会引起较大的累积误差,严重影响整个系统的传动精度、位置精度和动态响应特性。同时普通蜗杆传动啮合齿面间的滑动摩擦,不可避免地存在齿面磨损较严重的问题。由于这种问题的存在,导致机器正常使用一段时间后,其啮合侧隙明显增大、传动精度降低,甚至整个系统无法正常使用。因

此, 这些系统特别需要一种传动间隙为零, 齿面磨损缓慢, 最好是一种能自动消除由齿面磨损产生的齿侧间隙的新型蜗杆传动装置, 并期望具有高精度、长寿命及高啮合效率的优点。

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, 主要采用以下三类方法:

1. 采用优化设计方法, 改进制造及装备工艺

李新年、周广武、付圣林等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。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。事实上由于存在传动构件的制造缺陷、安装不准确、工作条件和失效时间等问题, 即使是制造最精确的齿轮也不可能实现无侧隙传动, 通常还由于传动构件的几何误差(尺寸误差和形状误差), 常导致齿侧间隙随着相互作用表面磨损的增加而增大, 因此并不能将各影响因素控制在设计范围内, 更不能保证齿侧间隙值, 也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 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 等以及 Mei 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。国内的李亦针等对渐开线内啮合圆柱齿轮副的回程误差进行了控制补偿的研究, Shen 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 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、噪声等一系列问题。

3. 采用能消除或减少齿侧间隙的新型齿轮传动装置

Furuya 提出采用双电动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。但是这些方法不但使得制造工艺变得复杂, 还增加了制造成本, 传动装置的体积和重量也让其使用场合受限, 并

容易产生动载荷,增加振动和噪声。

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、噪声小等特点,成为传动专家考虑用于消除的理想机构。为了解决蜗杆传动中的侧隙问题,很多学者做了大量的研究,如:

Wildharber 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,便可以达到调整或补偿齿侧间隙的目的,适用于作精密分度蜗杆传动。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;若采用键联接蜗轮与轴,为保证其中半个蜗轮相对另半个蜗轮错位传动,势必要将蜗轮的键槽随错位加宽,这将给整个传动的侧隙调整带来不便。

已提出的消除或减少齿侧间隙的蜗杆传动有多种形式。如图 1.2 所示的是一种双导程蜗杆传动(复合模数蜗杆传动),这一设计方法目前已较为广泛地应用于各种精密传动场合用以代替传统蜗杆。双导程蜗杆传动最好的应用例子是在机床的分度表或车床的分度头上。由于双导程蜗杆的螺纹两侧具有不同的节距,所以该蜗杆的齿厚是可变的。齿厚的差异是线性的,且取决于两螺旋面间节距的差异,在这种类型的蜗杆传动中,齿隙减小是蜗杆与蜗轮轴位移的结果。

双导程蜗杆使用两个不同的螺距值常会导致另一种结果:每个齿的齿廓在其两侧各不相同。因此,在双导程蜗杆中,建议使用不同的齿廓角,使齿的工作面不被限制在一个侧面,而且也有助于避免蜗轮的齿短缺。

双导程蜗杆传动还有一个缺点,就是此蜗杆必须有相当大的轴向行程,以减少齿隙,这可能会导致蜗杆传动尺寸增加。这种传动机构使接触面积减少,从而降低了它的承载能力,或易在高负载下快速损坏。此外,对于每一个蜗轮蜗杆的完全回转,只有一个非齿隙位置,其他位置都存在齿隙,其大小取决于蜗杆螺纹两侧的节距差。

双导程蜗杆是蜗杆左右齿面的导程及导程角加以改变的蜗杆副,其最大的特点就是蜗杆在轴方向移动并可以获得任意的齿隙,蜗杆有带内孔及带轴的两类型(图 1.2)。双导程蜗杆是通过调整蜗杆的轴向位置来调整传动的齿侧

间隙以补偿轮齿磨损的减薄量,该传动在国内外已被应用于滚齿机等的高精度机构中。其主要缺点是加工蜗轮时需要复合模数滚刀铲磨以及精密制造困难,且蜗轮与蜗杆啮合传动同时接触的齿数少,承载能力低,易磨损,精度寿命短,精密制造成本高,难以满足高速精密传动或重载精密传动的要求。

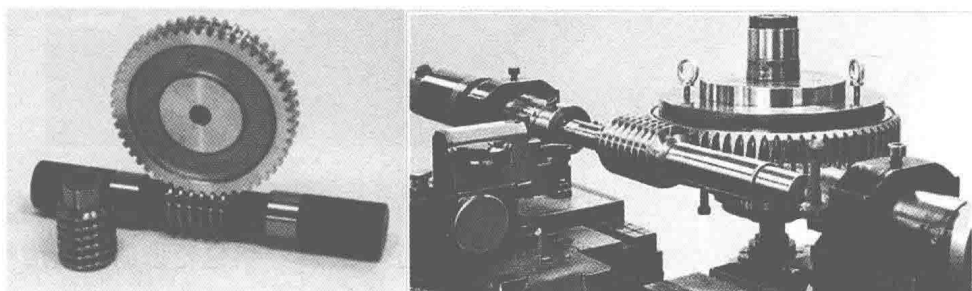


图 1.2 双导程蜗杆传动

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 1.3 所示。蜗杆由半截蜗杆轴和半截空心蜗杆组成,蜗轮齿面进行了合理的修形,使其能够适应蜗杆的剖分式设计。

齿侧间隙调整在蜗杆轴固定,并且空心蜗杆受一定轴向预紧力的情况下进行,通过旋转空心蜗杆,使两截蜗杆的工作面与蜗轮齿发生接触,设置好齿侧间隙,用胀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。

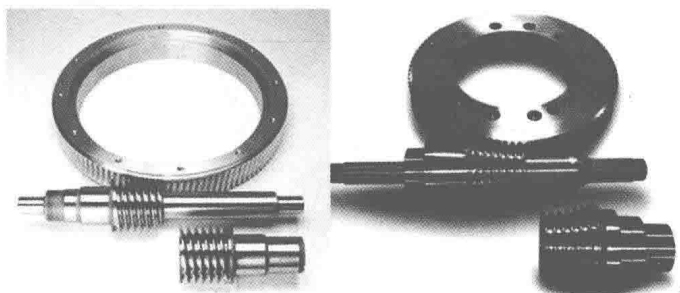


图 1.3 OTT 公司分段式精密蜗杆传动

重庆大学的张光辉教授提出了一种侧隙可调式变齿厚平面蜗轮环面蜗杆传动,如图 1.4 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。但是该传动也有一些不足,如齿面摩擦因

数大、加工困难等。

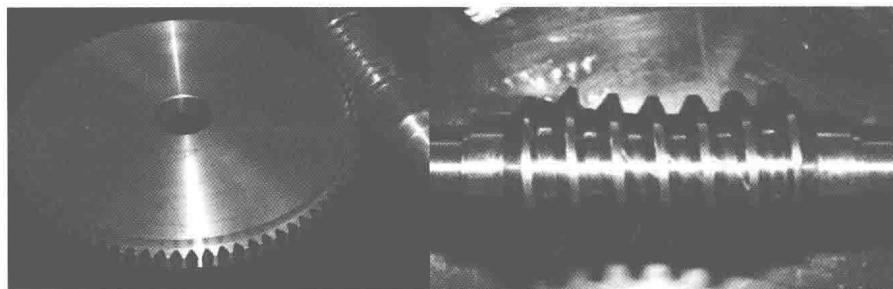


图 1.4 侧隙可调式变齿厚平面蜗轮环面蜗杆传动

Kacalak 在其无侧隙蜗杆传动专利中提出了一种利用蜗轮轮齿的自适应性来解决蜗杆传动中的齿侧间隙问题。其特别之处在于蜗轮的两侧面开有与轮毂孔同心的深的两个不同半径的环形切口（图 1.5a），蜗轮的切口深度大于蜗轮宽度的一半，其调整的原理在于两个相反位置的切口使蜗轮的轮辋具有径向和轴向的自适应性。

另外一种自适应的方式是通过使用一个波形弯薄壁将轮辋和轮毂两个组件联接来实现消除（图 1.5b），波形弯薄壁至少应有一个与蜗轮的轮辋同心。

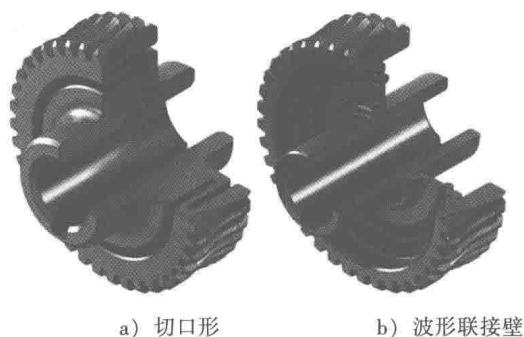


图 1.5 自适应蜗轮设计方案

Kacalak 还在此基础上提出了一种利用锥状的环形压力元件对分成两半的蜗杆进行齿侧间隙调整，此方案更易于加工和进行侧隙调整。如图 1.6 所示。

此外，Kacalak 基于上述原理又陆续提出了很多解决齿侧间隙的方案，分别如图 1.7、图 1.8、图 1.9 所示。

Kacalak 还提出了利用薄壁套筒和可调偏心压力机构的方式来无侧隙实现蜗杆传动，如图 1.10 所示。



图 1.6 可调侧隙蜗杆传动

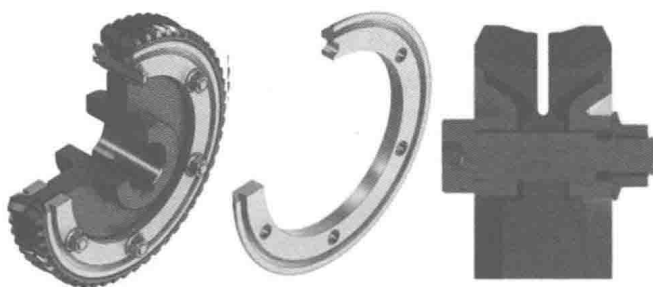


图 1.7 使用螺栓调节侧隙的蜗杆传动

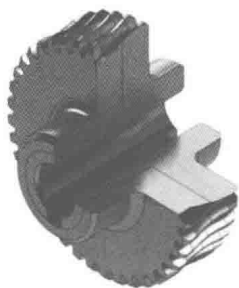


图 1.8 利用两半式涡轮调整齿侧间隙



图 1.9 利用内圆盘调整齿侧间隙



图 1.10 一种无侧隙蜗杆传动

图 1.5 和图 1.10 中的每一个解决方案都会导致蜗轮的圆周向蜗杆轴靠近。由于套筒的弹性变形,它有可能完全消除由构件制造缺陷或位置偏离造成的齿隙。当施加的压力足够大时,齿隙消除,蜗轮齿完全接触蜗杆,此外,套筒的局部弹性变形也存在。所施加压力大的唯一缺点就是增加了蜗杆和蜗轮齿的表面压力,蜗轮齿面极容易受损。

为了解决这一问题,Kacalak 团队提出了另外一种利用蜗杆来解决齿侧间隙的方法(图 1.11)。该传动装置将蜗杆设计为中空,并利用弹性锥形装置进行蜗杆在轴向的调节。这个方案的优点在于调整侧隙非常容易,可以在传动机构工作的时候进行,不管传动机构在哪个方向工作,在受力齿面的啮合区域都有良好的润滑条件。蜗杆空心部分的自适应性对减少动力过剩有正面影响,也有助于抑制振动。

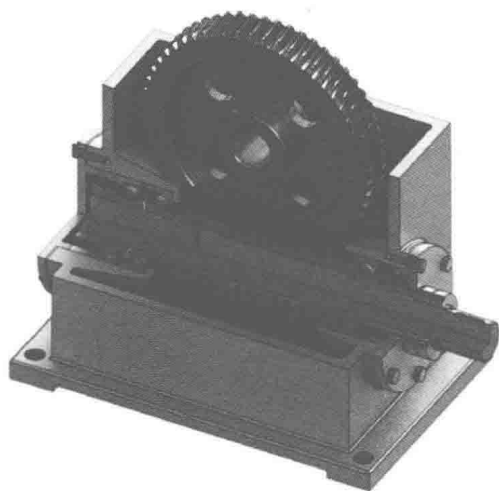


图 1.11 具有局部轴向自适应蜗轮蜗杆传动的设计

此外,为实现无侧隙传动,曹西京提出了一种双蜗杆传动,邱新桥提出了一种可减小传动间隙的双蜗杆传动机构,郭兴龙提出了一种双斜齿轮结构和一种直齿轮轮系结构等。国外的 Ratko 提出了一种利用内外两个花键组合的方式来消除齿侧间隙的机构,如图 1.12 所示;Ted Lumpkin 提出了一种可消除间隙的行星齿轮传动,该机构运动时,一个专用的转矩机构会产生一个扭力使得第二个行星齿轮在与第一个行星齿轮相反的方向上运动从而达到消除间隙的目的,如图 1.13 所示;Kenneth Ask 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,如图 1.14 所示。