

DOI: 10.3901/JME.2011.07.001

# 减速器的分类创新研究\*

梁锡昌<sup>1</sup> 吕宏展<sup>1,2</sup>

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044;
2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 宁波 315201)

**摘要:** 针对目前装备领域对各类减速装置的特殊要求,为系统高效地开发出适合特殊需要的各种减速装置,对减速器发展的历史沿革进行研究,从结构上系统地对各类减速器进行新的类别归属。从创新思维的角度提出对基于运动学、动力学、结构学等方面对减速器的减速器原理分为四类的新方法。并对基于斜面逆螺旋减速器原理、圆周游标减速器原理、柔轮变形和工质变性减速原理的各类减速器特点、存在问题进行分析。同时,结合工程实际和应用领域对各类特殊减速器进行创新思维来源探索和创新实践分析。结果表明,按照新的分类方法对各种减速器创新的系统化分类研究,可以多角度地为各类减速器纵向创新研究和工程需求提供新的思路,也便于为不同类别减速装置的减速特点进行横向对比研究。

**关键词:** 减速器 创新 系统化 分类 解决方案

**中图分类号:** TG457.23

## Research on Categorizing Innovation of Speed Reducers

LIANG Xichang<sup>1</sup> LÜ Hongzhan<sup>1,2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044;
2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201)

**Abstract:** Targeted at the special requirements of various speed reduction devices in the equipment field, in order to systematically and efficiently develop a variety of speed reduction devices for special needs, the historical development of speed reducers are investigated and structurally innovative characteristic and rules are categorized systematically. A new research method is advanced from the perspective of creative thinking, which divided speed reducers into four categories based on the kinematics, dynamics and structural theory. Meanwhile, innovative thinking sources exploration and innovative practice analysis are implemented by research on problems with a variety of speed reducers and engineering practices which combined with such speed reduction principles as reverse spiral bevel, circle venire, fleshliness deformation and functional material. The results indicate that the systematic classification research on speed reducers' innovation can provide some comprehensive and novel thinking for the future speed reducers research and application and also facilitate horizontal comparison study on different categories of speed reducer devices.

**Key words:** Speed reducers Innovation Systematic Categorizing Solutions

## 0 前言

在机械传动领域,减速器作为连接动力源和执行机构之间的中间装置,其发展已经有几千年的历史沿革。我国最早有史书记载的具有齿轮传动机构的装置出现在西汉,晋代《西京杂记》记载有:“司南车,驾四,中道”<sup>[1]</sup>,即指南车,IFTOMM 齿轮

委员会主席,著名齿轮专家 DUDLEY 誉之为“古代齿轮技术的里程碑”<sup>[2]</sup>,这也是具有文字可考最早的齿轮减速机构,也是今天各种减速装置的雏形。

减速器的发展已有数百年的历史,已经发展出多种形式的减速器,对于装备产业作出了重要贡献。目前面临的任务是,继续推动减速器的创新发展。如何才能全面推动减速器的创新?笔者认为,首先应研究工程实际应用的需求,目前需求有大传动比减速器、高功率密度减速器、高精度减速器、低噪声减速器、超大功率减速器、微型减速器、直径限

\* 重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC,2008AB3037)。20100516 收到初稿,20101215 收到修改稿

制减速器和质量限制减速器等。迄今为止，这些问题均未能很好地解决。

近半个世纪以来，现代计算机技术促进了减速器设计方法<sup>[3]</sup>、误差分析<sup>[4]</sup>、结构优化、接触分析、动态性能等研究的发展，但在结构及传动原理上，发展缓慢。本文结合创新实践和工程实际，对目前成熟减速器、推广减速器及在研减速器的输入原理、减速原理和输出原理进行了系统研究，探索新一代减速器的创新体系和方法，为减速器的后续研究提供借鉴。

## 1 减速装置的系统分类

从减速器的发展水平来看，目前已有多种减速器产品，如下表所示。已经成熟并已标准化的产品

表 各类减速器系统比较

序号	减速原理	举例	技术成熟度/市场细分	优缺点
1	一般齿比减速	圆柱齿轮减速 摆线针轮减速器	传统/成熟/占据主要市场 很成熟/中比范围占据主要市场	减速比不大，体积较大 制造工艺复杂，制造精度要求高
2	少齿差减速	三环减速器 二环减速器	正在试推广阶段/市场份额很小 技术不成熟/试向市场推广	冲击噪声大，安装调整要求高 结构简单、速比范围宽，传递功率不能太大
3	三齿轮减速	行星减速器	技术较成熟	减速零件多，径向尺寸大
4	谐波减速	谐波减速器	技术成熟，结构尚需完善/占据高端市场	结构紧凑，速比范围大，工艺复杂，成本高
5	斜面减速	螺旋作动器	研究阶段/待推向市场	结构紧凑，功率密度高，不适用于全转动
6	活齿减速	活齿减速器	尚存在关键技术问题待突破/市场上尚无	结构紧凑，减速输出机构集成，易发热
7	工质变性	磁触变无级变速器	研究阶段/市场尚无	振动小、噪声低、无级变速

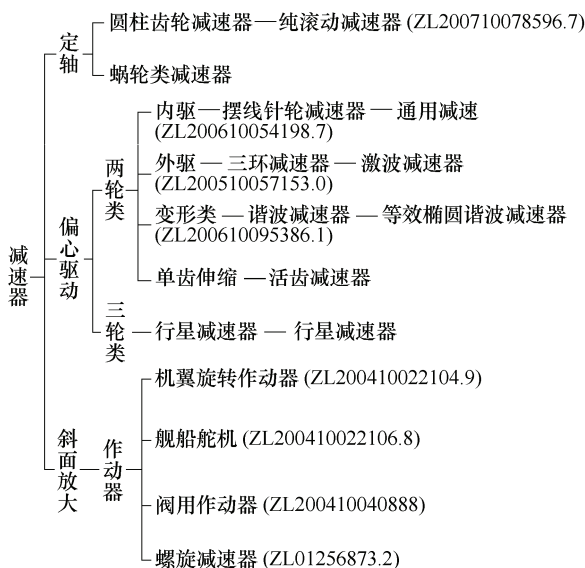


图1 减速器的系统分类

有：圆柱齿轮减速器、蜗轮减速器、行星齿轮减速器、摆线针轮减速器<sup>[5]</sup>和谐波减速器<sup>[6]</sup>等；已经提出并正在推广的产品有：三环减速器、活齿减速器等；近年来提出并申请专利的有：滤波减速器<sup>[7-8]</sup>、激波减速器<sup>[9]</sup>、旋转作动器<sup>[10]</sup>、纯滚动减速器<sup>[11]</sup>和等效椭圆谐波减速器<sup>[12]</sup>等。

总体来讲，在新兴产业如航空航天、机器人、医疗器械等发展的需求下，需要创新结构简单紧凑、传递功率大、噪声低、传动平稳的高性能减速器。图1中，从结构上将减速器分为三大类：定轴传动、偏心驱动、斜面放大，基于这些分类，纵向地从创新思维的角度提出四种减速器的创新思维方法，部分已申请中国发明专利，本文将其中的典型创新进行探讨分析，以期为读者提供借鉴。

从而将旋转运动转变为直线运动，最典型的应用是滚珠丝杆和蜗轮蜗杆机构。梁锡昌等<sup>[13-14]</sup>在承担某型飞机研制的课题中，对基于斜面放大原理的直线运动—旋转运动的逆螺旋机构进行了研究，研制出了飞机机翼旋转或折叠作动器，并申请了发明专利，其原理及实物如图2所示。

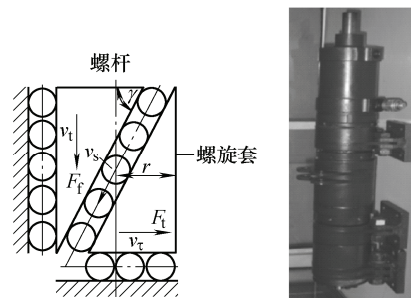


图2 斜面螺旋原理及实物

图2中， $F_f$ 是来自动力源螺杆的推力， $F_t$ 是大升角运动放大后螺旋套的圆周力， $v_t$ 是螺杆的运动速度， $v_s$ 是螺旋套的圆周线速度， $v_c$ 是钢球沿螺旋槽运动速度。其运动关系如下

$$v_t = \omega r \quad (1)$$

## 2 基于斜面逆螺旋的创新

### 2.1 高功率密度特种传动减速器

传统的斜面螺旋对力的放大是通过连续旋转的斜面将沿斜面运动的圆周力在其正交方向放大，

$$v_t = v_\tau \tan \gamma = \omega r \tan \gamma \tag{2}$$

$$v_s = \sqrt{v_t^2 + v_\tau^2} = \frac{v_\tau}{\cos \gamma} \tag{3}$$

式中， $\omega$  是螺旋套的输出角速度， $\gamma$  是螺旋槽升角， $r$  是作动器旋转半径。本机构的动力参数如下

$$M = rP\eta \tan \gamma \tag{4}$$

$$F = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)p_0 \tag{5}$$

$$F_t = P\eta \tan \gamma \tag{6}$$

式中， $M$  是螺旋套输出转矩， $F$  是螺杆的轴向推力， $p_0$  是液压力， $D$ 、 $d$  分别为液压缸结构参数， $F_t$  是螺旋套上均布圆周力， $\eta$  是作动器的工作效率。其样机如图 3 所示，分别是机翼旋转或折叠作动器( $M_p=2 \text{ kN}\cdot\text{m}$ )和驱动内置式高功率密度舰船舵机<sup>[15]</sup>( $M_s=75 \text{ kN}\cdot\text{m}$ )，本减速器的特点是：结构紧凑、受载均匀、功率密度高、传动链短、传动平稳、噪声低，通过大升角螺旋的放大，将直线运动转换为转动。

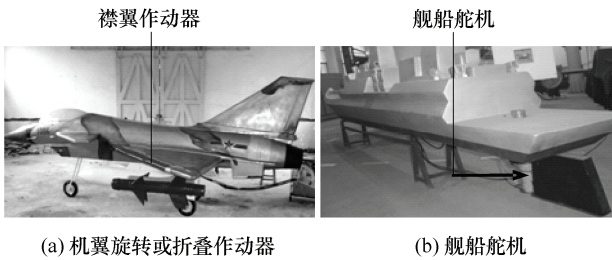


图 3 高功率密度特种减速器样机

### 2.2 逆螺旋机器人关节

与通用减速器相比，机器人关节减速器要求具有传动链短、体积小，功率大，质量小，易于控制等特点。综合斜面原理减速器的优点，在国家高技术研究发展计划(863 计划)的支持下，梁锡昌等<sup>[16-17]</sup>设计完成了基于逆滚动螺旋结构的机器人系列关节的创新研究，如图 4 所示。



图 4 机器人关节

逆螺旋特种传动机构为今后的高功率密度，低噪声、低能耗的特种减速器的开发提供了新的思路，通过控制螺旋升角和机构径向尺寸实现输出转矩的放大，在目前的各类通用减速器中，功率密度最大。另外，基于这种斜面减速原理，又设计出一种转—

直—转型螺旋减速器<sup>[18]</sup>，它可以实现全转动。

### 3 偏心驱动的圆周游标减速原理创新

圆周游标减速原理是利用具有相对运动的、存在度量差的两运动件的微差累积来实现减速器的力矩放大和低速输出。为便于系统化研究，把具有少齿差转动特征的各类减速器，都可归结为圆周游标减速传动。但是，目前的各类通用少齿差减速器又不同程度的存在一些问题。为此，对圆周游标传动原理的减速器进行了系统化理论和实践研究。

#### 3.1 纯滚动减速器

赫兹理论所给出的接触应力计算公式是没有考虑摩擦力的，宋乐民<sup>[19]</sup>认为，把齿面摩擦因数减少一半，点蚀极限负荷可以提高 4 倍，纯滚动减速器的创新思维来源于渐开线少齿差行星传动中啮合滑动摩擦问题。研究表明，轮齿间的相对滑动再加上轮齿间的摩擦作用是影响齿面接触疲劳强度的重要因素<sup>[20-22]</sup>。一对内啮合齿轮副如图 5 所示， $B$  是内齿轮 2 与外齿轮 1 理论啮合线  $N_1N_2$  上任意一点， $v_{B2}$  和  $v_{B1}$  分别是两齿轮在点  $B$  处的绝对线速度，由齿轮接触条件和相对运动理论， $v_{B2}$  和  $v_{B1}$  在啮合线  $N_1N_2$  上的投影必须相等，即

$$v_{B1} \cos \alpha_{B1} = v_{B2} \cos \alpha_{B2} \tag{7}$$

在啮合点  $B$  两轮齿间的相对移动速度为

$$v_{B12} = v_{B1} \sin \alpha_{B1} - v_{B2} \sin \alpha_{B2} \tag{8}$$

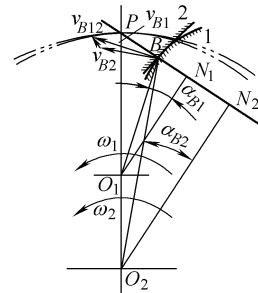


图 5 轮齿啮合运动分析

一对啮合轮齿间的这种相对移动的存在，对齿轮的齿面接触疲劳强度、润滑摩擦情况、转速性能、降噪等在一定程度上都有很大的影响。为了消除少齿差行星传动内啮合副间的相对移动摩擦对减速器性能的影响，梁锡昌等<sup>[11]</sup>发明设计了纯滚动减速器，工作截面图如图 6 所示。

轮齿的齿形采用具有标准压力角的渐开线齿形，在内齿轮 1 与外齿轮 3 之间通过弹性隔离套 4 将齿轮滚柱 2 均匀圆周布置。这样，啮合过程中两轮齿之间  $v_{B12}$  产生的滑动摩擦就转换为与齿轮滚柱之间的滚动摩擦，弹性隔离套补偿齿轮滚柱产生的

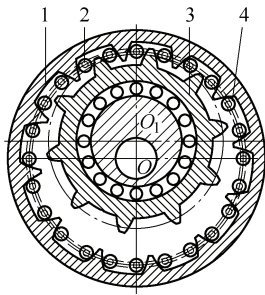


图 6 纯滚动减速器

1. 内齿轮 2. 滚柱 3. 外齿轮 4. 弹性隔离套

位移量, 轮齿脱离啮合后, 弹性隔离套复位, 滚柱回到原来位置, 准备下一个循环。若内齿轮固定, 则其单级传动比

$$i = -z_1 / (z_2 - z_1) \quad (9)$$

式中,  $z_1$ ,  $z_2$  分别为外齿轮 3 和内齿轮 1 的齿数。

按照计入摩擦后工程应用中轮齿表面接触疲劳应力计算方法<sup>[23]</sup>, 则纯滚动减速器齿面接触疲劳强度满足

$$Z_E Z_H \sqrt{\frac{2KT_i u + 1}{d_1^3 \varphi_d u}} \sqrt{\frac{1 + 3f^2}{1 - f \tan \alpha}} \leq [\sigma_H] \quad (10)$$

式中,  $f$  为纯滚动减速器的齿面和齿轮滚柱间的滚动摩擦因数;  $Z_E$  为齿面和滚柱间的弹性系数;  $Z_H$  是纯滚动啮合系数;  $T_i$  为输入转矩;  $K$  为载荷系数;  $u$  是齿数比;  $\varphi_d$  是齿宽系数;  $\alpha$  为压力角。

纯滚动减速器是基于圆周游标减速原理的一类在改变轮齿间的力的作用状态的一种创新, 它保留了少齿差行星传动的结构紧凑的优点, 回差小, 精度高, 使轮齿在齿面接触疲劳强度上有了改进, 提高了效率。

### 3.2 通用减速器

多年来, 在少齿差行星传动的研究中, 动力输出一直是困扰少齿差行星减速器发展的一个瓶颈, 机械设计手册中介绍的两种 2K-H 型传动方式, 在传动原理上是正确的, 但在传递动力上是很难实现的, 它直接将负载的反作用力通过双联齿轮作用于第一级的输入端, 这在根本上违背了减速器动力放大逐级传递的原则, 在做滤波减速器试验时在效率分析中, 发现了这一问题。一些专著中提出了几种输出机构, 但没有得到大规模推广应用。摆线针轮减速器使用了销轴式输出机构, 它继承了 K-H-V 型减速器的大速比、紧凑的优点, 但其结构复杂、制造精度高、工艺复杂; 三环减速器<sup>[24]</sup>是近几年发展起来的一种新型的少齿差环板式减速器, 它将输出机构进行了变异, 形成了一种曲柄连杆式的新输出机构, 但其加工、安装、调整要求高, 振动冲击噪

声大; 活齿传动利用活齿的径向运动滤去了行星轮的平动而将运动和动力输出。

通用减速器是基于圆周游标减速原理在动力输出与分配方面的创新, 它克服了机械设计手册中少齿差行星传动中动力不能输出、传动效率低的缺点, 巧妙的设计了一种同步机构, 通过同步器  $z_1 z_2$  的运动滤波及反作用载荷承受, 将动力稳定输出, 其结构如图 7 所示。其单级传动比

$$i = z_3 / (z_3 - z_4) \quad (11)$$

式中,  $z_3$ ,  $z_4$  分别为输出齿轮 3 和行星轮 4 的齿数, 方向同输入转速方向。

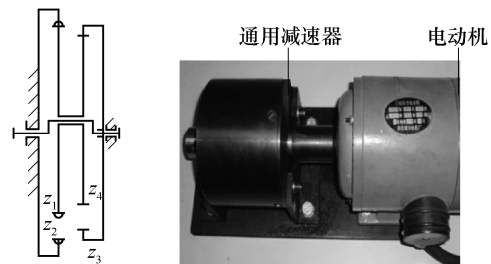


图 7 通用减速器结构及实物

 $z_1, z_2$ ——同步器  $z_3$ ——输出轴  $z_4$ ——行星轮

通用减速器在输入端应用一同步机构将行星轮的平动进行滤波及卸载, 同时实现了运动的传递和动力的平稳输出, 从根本上解决了滤波减速器中因负载反作用力造成的啮合紊乱, 动力不能传递的问题。其优点是, 速比范围宽、结构紧凑、承载能力大、质量轻、效率高、制造装配成本低, 最简单的只有 4 个零件。这是圆周游标减速器原理一类减速器的稳定动力输出方式的创新, 并申请了中国发明专利<sup>[25]</sup>。

## 4 基于柔轮变形的创新

谐波减速器是柔轮传动的典型, 近几年, 国内外学者对谐波减速器的研究比较多, 并取得了一些成果<sup>[26-27]</sup>。但是, 谐波减速器又存在以下问题: 长筒的杯形柔轮使谐波减速器轴向尺寸、柔轮啮合的不确定性增加; 短筒杯形柔轮的变形力和应力随着筒长的减小而急剧增加; 非纯滚动接触等问题。

基于杯形柔轮的变形及存在的问题, 对谐波减速器的激波器、杯形柔轮进行了研究, 使柔轮和输出机构分开工作, 其结构及输入输出如图 8 所示: 在输入端, 等效椭圆谐波减速器用标准轴承 3、4 在凸轮上对称布置(图 8b), 形成新的激波器; 在中间机构柔轮上, 将杯形柔轮变成直筒形; 在输出端, 同样采用标准轴承 8、9 对称布置。

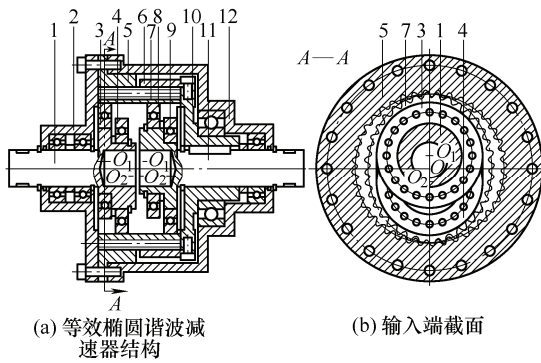


图8 等效椭圆谐波减速器

1. 输入轴 2. 左盖 3,4. 滚动轴承 5. 刚轮 6. 输出圆柱内齿轮  
7. 柔轮 8,9. 滚动轴承 10. 右盖 11. 输出轴 12. 机壳

等效椭圆谐波减速器的这种传动结构的改变,缩短了传统谐波减速器的轴向尺寸,消除了柔轮的变形对其应力的影响,提高了柔轮的寿命和轮齿啮合效率;在制造工艺上,使直筒柔轮的制造成本降低、精度提高;在装配上,应用轴承标准件,降低了生产成本,提高了效率。此外,根据需要,可以通过均布轴承标准件的个数,形成多次激波。

## 5 基于工质变性的创新

基于工质变性的减速器创新是新型功能材料在传动领域应用的典型,也是应用新材料的性能进行无齿传动研究一次尝试。目前,功能材料作为传动介质研究比较多的有电流变材料、磁流变材料、磁致伸缩材料等。主要进行了磁流变材料的研究与应用。

磁流变传动原理上利用磁流变体材料的剪切式工作模型如图9,在输入转子1和输出转子2之间填充磁流变材料3,当输入转子1在外力 $F$ 的作用下,通过电流控制的磁场强度 $B$ 改变磁胶的流变性,使之在毫秒间由触变状态变成固体或类固体,在克服剪切屈服强度后,带动从动转子输出,通过电流的调控实现自动控制和无级变速。

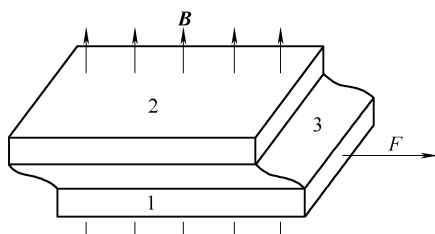


图9 磁流变工质变性传动原理

1. 输入转子 2. 输出转子 3. 磁流变体

2002年,梁锡昌等<sup>[28]</sup>就开始了磁流变无级变速器的研究,由于磁流变液的化学物理性质久置后不

稳定,影响了磁流变功能材料在机械工程中的应用,发明设计了磁胶,它从根本上解决了磁粉、磁流变液的锈蚀、沉降团聚等问题,磁性能优越,传递力矩大,为新一代传动及减振器件的开发提供了新的思路,尤其用于机器人柔性指关节、汽车三器(刹车器、离合器、减振器)方面的研究,并申请了多项中国发明专利<sup>[29-33]</sup>。

## 6 结论

(1) 基于斜面逆螺旋减速器是高功率密度、低噪声、大力矩应用场合的首选,已由只有液压直线驱动的作动器机构发展到转一直一转结构的电动机驱动大力矩减速机构,并应用于400 kN·m船舶舵机。

(2) 基于圆周游标减速器原理是将少齿差各形式减速器的系统化归纳,通用减速器解决了2K-H传动原理中负载反作用力造成的运动紊乱而不能传递动力的问题,是目前最简单的大速比范围减速器,已应用于某油田的采油设备中。

(3) 基于柔轮变形的等效椭圆谐波减速器,使谐波减速器的动力性能提高,寿命延长,制造工艺成本降低。

(4) 基于工质变性的减速装置是新一代无齿传动发展的新领域,将新型功能材料和机械相结合,在重庆大学机械传动国家重点实验室的减速器性能试验中,效果明显,是减速器系统化创新的新思路。

## 参 考 文 献

- [1] 刘仙洲. 中国机械工程发明史第一编[M]. 北京: 科学出版社, 1962.
- [2] LIU Xianzhou. Innovation history of Chinese mechanical engineering (Part I)[M]. Beijing: Scientific Press, 1962.
- [3] 梁桂明. 齿轮技术的创新和发展[J]. 中国工程科学, 2000, 2(3): 1-6.
- [4] LIANG Guiming. Innovation and trend of gears technology[J]. Engineering Science, 2000, 2(3): 1-6.
- [5] JI Aimin, HUANG Quansheng, XU Huanmin, et al. Design system of the two-step gear reducer on case-based reasoning[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(5): 671-679.
- [6] ZHU Fumin, LI Wanli, MAROPOULOS P G. Tolerance analysis of a planetary gear reducer under cad circumstance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(3): 342-345.
- [7] JOONG H S, SOON M K. On the lobe profile design in a

- cycloid reducer using instant velocity center[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41: 596-616.
- [6] GAO Wei, FURUKAWA M, KIYONO S, et al. Cutting error measurement of flexspline gears of harmonic speed reducers using laser probes[J]. Precision Engineering 2004, 28: 358-363.
- [7] 梁锡昌, 王家序. 滤波减速器: 中国, ZL200510057123.X[P]. 2005-11-23.  
LIANG Xichang, WANG Jiayu. Filtering gear reducer: China, ZL200510057123.X[P]. 2005-11-23.
- [8] 潘继生, 梁锡昌. 新型滤波减速器的效率分析及试验[J]. 机械传动, 2007, 31(5): 88-90.  
PAN Jisheng, LIANG Xichang. Efficiency analysis and experiment of a new type of filtering gear reducer[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2007, 31(5): 88-90.
- [9] 梁锡昌, 王家序. 激波减速器: 中国, ZL200510057153.0 [P]. 2007-12-19.  
LIANG Xichang, WANG Jiayu. Activating gear reducer: China, ZL200510057153.0 [P]. 2007-12-19.
- [10] 梁锡昌, 蒋建东, 李润方, 等. 特种螺旋传动机构的研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 106-110.  
LIANG Xichang, JIANG Jiandong, LI Runfang, et al. Research on a special screw transmission mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 106-110.
- [11] 梁锡昌, 潘继生. 纯滚动减速器: 中国, ZL200710078596.7 [P]. 2007-11-07.  
LIANG Xichang, PAN Jisheng. Pure rolling reducer: China, ZL200710078596.7 [P]. 2007-11-07.
- [12] 梁锡昌, 庄小红. 等效椭圆谐波减速器: 中国, ZL200610095286.1 [P]. 2007-06-06.  
LIANG Xichang, ZHUANG Xiaohong. The equivalent elliptical harmonic gear drive: China, ZL200610095286.1 [P]. 2007-06-06.
- [13] 梁锡昌. 飞机机翼旋转或折叠作动器: 中国, ZL200410022104.9 [P]. 2005-01-12.  
LIANG Xichang. Rotary or folding actuator of aircraft wings: China, ZL200410022104.9 [P]. 2005-01-12.
- [14] 梁锡昌, 王光建, 郑小光. 基于螺旋机构的旋转作动器研究[J]. 航空学报, 2003, 24(3): 282-285.  
LIANG Xichang, WANG Guangjian, ZHENG Xiaoguang. Research on rotary actuator based on screw device[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(3): 282-285.
- [15] 梁锡昌, 吕宏展, 陈文胜, 等. 驱动内置式高功率密度舰船舵机[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(6): 701-707.  
LIANG Xichang, LÜ Hongzhan. High power density ship steering gear with built-in driving mechanism [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(6): 701-707.
- [16] 梁锡昌, 王光建. 机器人电谱纵关节: 中国, ZL 03117452.3 [P]. 2003-08-20.  
LIANG Xichang, WANG Guangjian. Robot electronic vertical joints: China, ZL 03117452.3 [P]. 2003-08-20.
- [17] 梁锡昌, 郑小光. 机器人液螺横关节: 中国, ZL03117453.1 [P]. 2003-08-20.  
LIANG Xichang, ZHENG Xiaoguang. Robot hydraulic spiral transverse joints: China, ZL03117453.1 [P]. 2003-08-20.
- [18] 梁锡昌. 螺旋减速器: 中国, ZL01256873.2 [P]. 2002-10-16.  
LIANG Xichang. Spiral reducer: China, ZL01256873.2 [P]. 2002-10-16.
- [19] 宋乐民. 齿形与齿轮强度[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.  
SONG Lemin. Teeth and gear strength [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1987.
- [20] 廖海平, 曾翠华. 考虑齿间滑动摩擦的齿轮接触疲劳强度计算[J]. 机械设计与制造, 2007(5): 11-13.  
LIAO Haiping, ZENG Cuihua. Calculation of gearing contact fatigue strength considering sliding friction between teeth [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(5): 11-13.
- [21] 高创宽, 周谋, 亓秀梅. 齿面摩擦力对齿轮接触应力的影响[J]. 机械强度, 2003, 25(6): 642-645.  
GAO Chuankuan, ZHOU Mou, QI Xiumei. Effect of gear tooth friction force on gear contact stress[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(6): 642-645.
- [22] 夏延秋, 丁津原, 马先贵, 等. 摩擦因数对齿轮接触疲劳寿命的影响[J]. 机械传动, 2002, 26(1): 48-49.  
XIA Yanqiu, DING Jinyuan, MA Xiangui, et al. Effect of Friction coefficient on gear contact fatigue life [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2002, 26(1): 48-49.
- [23] 沈伟, 徐辅仁. 齿间摩擦对齿轮轮齿表面接触疲劳强度的影响[J]. 机床与液压, 2001(6): 70-73.  
SHEN Wei, XU Furen. The effect of the friction between teeth on the contact fatigue strength of the tooth surfaces of a gearing [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2001(6): 70-73.
- [24] 陈宗源, 刘昭文, 王志德. 三环式减速(或增速)传动装置: 中国, CN85106692 [P]. 1987-08-12.  
CHEN Zongyuan, LIU Zhaowen, WANG Zhide. Tricyclic

- speed reduction(or acceleration) transmission mechanism: China, CN85106692 [P]. 1987-08-12.
- [25] 梁锡昌. 通用减速器: 中国, ZL200610054198.7 [P]. 2006-09-13.  
LIANG Xichang. General reducer: China, ZL2006-10054198.7 [P]. 2006-09-13.
- [26] OGUZ Kayabasi, FEHMI Erzincanli. Shape optimization of tooth profile of a flexspline for a harmonic drive by finite element modelling [J]. *Materials and Design*, 2007, 28: 441-447.
- [27] 王长明, 阳培, 张立勇. 谐波齿轮传动概述[J]. *机械传动*, 2006, 30(4): 86-88.  
WANG Changming, YANG Pei, ZHANG Liyong. Summary of status on the harmonic gear driving technology[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2006, 30(4): 86-88.
- [28] 梁锡昌, 蒋建东. 磁流变无级调速技术的研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(9): 146-149.  
LIANG Xichang, JIANG Jiandong. Research on magnetorheological continuously variable transmission technology[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(9): 146-149.
- [29] 梁锡昌, 吕宏展. 一种不沉淀磁流变液: 中国, CN101266861 [P]. 2008-09-17.  
LIANG Xichang, LÜ Hongzhan. A non-sedimentary magneto-rheological fluid: China, CN101266861 [P]. 2008-09-17.
- [30] 梁锡昌, 王家序, 吕宏展. 磁胶: 中国, CN101630558 [P]. 2010-01-20.  
LIANG Xichang, WANG Jiaxu, LÜ Hongzhan. Magnetic colloid: China, CN101630558 [P]. 2010-01-20.
- [31] 梁锡昌, 王家序, 吕宏展. 磁胶无级变速器: 中国, CN101581343 [P]. 2009-11-18.  
LIANG Xichang, WANG Jiaxu, LÜ Hongzhan. Magnetic-colloid CVT: China, CN101581343 [P]. 2009-11-18.
- [32] 梁锡昌, 王家序, 吕宏展. 磁胶制动器: 中国, CN101581345 [P]. 2009-11-18.  
LIANG Xichang, WANG Jiaxu, LÜ Hongzhan. Magnetic-colloid brake: China, CN101581345 [P]. 2009-11-18.
- [33] 梁锡昌, 吕宏展, 肖山. 磁胶阻尼结构及利用该结构制作的减振器: 中国, CN101709754A [P]. 2010-05-19.  
LIANG Xichang, LÜ Hongzhan, XIAO Shan. Magnetic-colloid damping structure and damper: China, CN101709754A [P]. 2010-05-19.

---

作者简介: 梁锡昌, 男, 1934 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为 CAD/CAM 及机电一体化。

E-mail: lxc@cqu.edu.cn

吕宏展, 男, 1979 年出生, 博士研究生。主要研究方向为精密传动与控制及功能材料器件研究。

E-mail: hongzhanlv@126.com