

滚珠丝杠副的发展趋势

北京机床研究所 肖正义

早在 19 世纪末就发明了滚珠丝杠副,但很长一段时间未能实际应用,因制造难度太大。世界上第一个使用滚珠丝杠副的是美国通用汽车公司萨吉诺分厂,它将滚珠丝杠副用于汽车的转向机构上。1940 年,美国开始成批生产用于汽车转向机构的滚珠丝杠副,1943 年,滚珠丝杠副开始用于飞机上。精密螺纹磨床的出现使滚珠丝杠副在精度和性能上产生了较大的飞跃,随着数控机床和各种自动化设备的发展,促进了滚珠丝杠副的研究和生产。从 50 年代开始,在工业发达的国家中,滚珠丝杠副生产厂家如雨后春笋般迅速出现,例如:美国的 WARNER-BEAVAR 公司、GM-SAGINAW 公司;英国的 ROTAX 公司;日本的 NSK 公司、TSUBAKI 公司等。我国早在 50 年代末期开始研制用于程控机床、数控机床的滚珠丝杠副。40 多年来,由于滚珠丝杠副具有高效率、高精度、高刚度等特点,被广泛应用于机械、航天、航空、核工业等领域。现在,滚珠丝杠副已成为机械传动与定位的首选部件。滚珠丝杠副的发展主要在以下几方面。

1 滚珠丝杠副的种类

由于滚珠丝杠副的使用不断普及,使用领域不断扩大,对滚珠丝杠副的要求也越来越多,普通规格的滚珠丝杠副已远远满足不了使用要求,如航天航空领域、小型精密测试装置、电子仪器以及半导体装置等基本都需要公称直径 $d_0 \leq 12\text{mm}$,导程 $Ph = 0.5 \sim 2.5\text{mm}$ 的微型滚珠丝杠副。日本 NSK 公司已开发出公称直径 $d_0 = 4\text{mm}$,导程 $Ph = 0.5\text{mm}$ 的世界最小导程微型滚珠丝杠副。半导体插件装置、小型机器人等需要微型大导程滚珠丝杠副,以满足高速驱动要求。

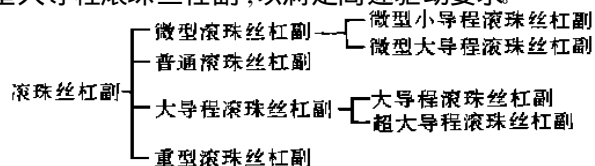


图 1 滚珠丝杠副分类

随着机械产品向高速、高效、自动化方向发展,工业机器人、数控锻压机械、加工中心以及机电一体化自动机械等,其进给驱动速度不断提高,大导程滚珠丝杠副的出现,满足了高速化的要求。日本 NSK 公司已开

发出公称直径 \times 导程为: $15\text{mm} \times 40\text{mm}$ $16\text{mm} \times 50\text{mm}$ $20\text{mm} \times 60\text{mm}$ $25\text{mm} \times 80\text{mm}$ 超大导程滚珠丝杠副,快速进给速度达 180m/min

滚珠丝杠副按照常规分类如图 1

现国内外文献上对滚珠丝杠副还没有统一的分类,但各国一般是按以下原则进行分类的,普通滚珠丝杠副一般指公称直径 $d_0 = 16 \sim 100\text{mm}$,导程 $Ph = 4 \sim 20\text{mm}$,螺旋升角 $\lambda < 9^\circ$ 。

微型滚珠丝杠副指公称直径 $d_0 \leq 12\text{mm}$ 的滚珠丝杠副。对于导程 $Ph \leq 3\text{mm}$ 的滚珠丝杠副称为微型小导程滚珠丝杠副,螺旋升角 $\lambda > 9^\circ$ 的滚珠丝杠副称为微型大导程滚珠丝杠副。

大导程滚珠丝杠副指公称直径 $d_0 \geq 16\text{mm}$,螺旋升角 $1^\circ \geq \lambda > 9^\circ$ 或导程 $\frac{1}{2}d_0 \leq Ph \leq d_0$ 的滚珠丝杠副,对于螺旋升角 $\lambda > 1^\circ$ 称为超大导程滚珠丝杠副。

重型滚珠丝杠副指公称直径 $d_0 \geq 125\text{mm}$ 的滚珠丝杠副。

2 滚珠丝杠副结构

滚珠丝杠副的结构传统分为内循环结构(以圆形反向器和椭圆形反向器为代表)和外循环结构(以插管

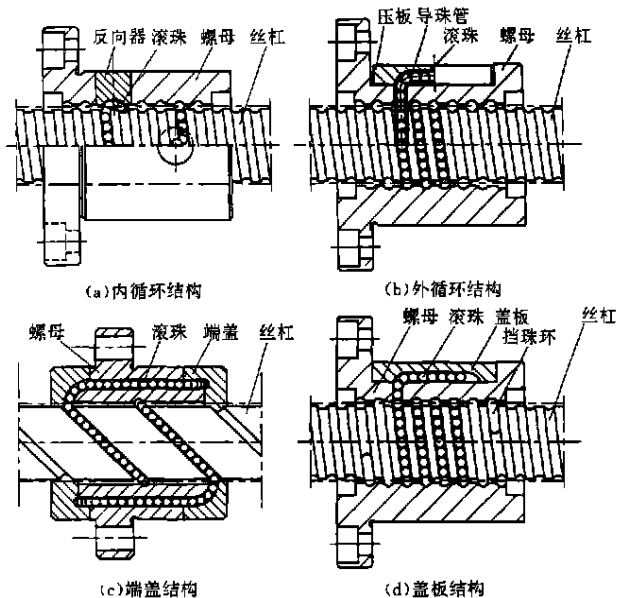


图 2 滚珠丝杠副主要结构

为代表)两种。这两种结构也是最常用的结构。这两种

结构性能没有本质区别,只是内循环结构安装连接尺寸小;外循环结构安装连接尺寸大。目前,滚珠丝杠副的结构已有 10 多种,但比较常用的主要有(图 2,附表):内循环结构;外循环结构;端盖结构;盖板结构

内循环结构反向器的形状有多种多样,但是,常用的外形就是圆形和椭圆形。由于圆形滚珠反向通道较短,因此,在流畅性上不如椭圆形结构。现在,最好的反向器结构为椭圆形内通道结构,由于滚珠反向不通过丝杠齿顶,类似外循环结构,因此,消除了丝杠齿顶倒角误差给滚珠反向带来的影响。但由于制造工艺较复杂,影响了这种结构的推广。

附表 滚珠丝杠副结构特点比较

种 类	特 点	循环圈数		螺母尺寸
		圈数	列数	
内循环结构	通过反向器组成滚珠循环回路,每一个反向器组成 1 圈滚珠链,因此承载小。适应于微型滚珠丝杠副与普通滚珠丝杠副。	1	2 列以上	小
外循环结构	通过插管组成滚珠循环回路,每一个插管至少 1.5 圈滚珠链,因此,承载大。适应于小导程、一般导程、大导程与重型滚珠丝杠副。	1.5 以上	1 列以上	大
端盖结构	通过螺母两端的端盖组成滚珠循环回路,每个回路至少 1 圈滚珠链,承载大。适应于多头大导程、超大导程滚珠丝杠副。	1 以上	2 列以上	小
盖板结构	通过盖板组成滚珠循环回路,每个螺母一个盖板,每个盖板组成至少 1.5 圈滚珠链。适应于微型滚珠丝杠副。	1.5 以上	1	中

3 滚珠丝杠副精度

过去,为了获得高的定位精度,主要通过提高滚珠丝杠副本身的精度来实现,因此,对滚珠丝杠的导程累积误差要求很高,给滚珠丝杠副的制造带来困难,使滚珠丝杠副的生产成本加大。特别是高精度滚珠丝杠副,只有通过数控螺纹磨床或激光反馈螺纹磨床加工才能达到。随着科学技术的不断发展,人们掌握了数控补偿技术,因而,不需要很高精度的滚珠丝杠副,也能获得高的定位精度。为了适应数控补偿技术的要求,国际标准 ISO 3408-3-1992 以及部颁标准 JB3162. 2-92 都对滚珠丝杠副的行程变动量作了要求,如有效行程内行程变动量、任意 300mm 行程内行程变动量、 α 弧度内行程变动量。其目的就是要控制滚珠丝杠副行程误差的直线性,也即滚珠丝杠副行程误差线性化。为数控误差补偿创造条件。

4 滚珠丝杠副性能

随着科学技术的不断发展,人们对滚珠丝杠副的要求也越来越高,为了使机械产品能实现高的定位精度且能平稳运行,这就要求滚珠丝杠副不但有高的精度,而且运转平稳,无阻滞现象。滚珠丝杠副运转是否平稳,主要取决于滚珠丝杠副预紧转矩的变动量,不同转速下滚珠丝杠副的滚珠链运动的流畅性不同,因此,滚珠丝杠副的预紧转矩也不相同。国际标准 ISO 3408-3-1992 以及部颁标准 JB3162. 2-92 规定了在转速为 100r/min 时,滚珠丝杠副预紧转矩的允差。

由于存在加工误差,如:滚珠丝杠中径尺寸全长不一致,丝杠、螺母的导程误差,丝杠与螺母的滚道齿形误差以及螺纹滚道的粗糙度等,使滚珠丝杠副的动态预紧转矩在丝杠螺纹全长上是不恒定的,这直接影响驱动系统的平稳性,因而也影响滚珠丝杠副的定位精度。因此,滚珠丝杠副预紧转矩变动量的大小是反映滚珠丝杠副性能好坏的重要指标。

近几年来,人们对滚珠丝杠副的预紧转矩变动量的大小开始重视起来,以前人们只重视滚珠丝杠副综合行程误差曲线,现在也开始重视滚珠丝杠副预紧转矩的曲线。因为有了这两条曲线,滚珠丝杠副的性能就能很好地反映出来。

为了满足上述要求,北京机床研究所先后研制了滚珠丝杠副综合行程误差测量仪和预紧转矩测量仪。应用现代化的测量手段和高精度的传感器,在测量过程中能实时显示行程误差曲线和预紧转矩曲线,并打印出完整的测量报告,为衡量滚珠丝杠副的总成质量,提供了可靠的检测手段。

随着数控机床的发展,“高速、高效”成为各厂家追求的目标,对于高速驱动与定位部件,国外已有直线电动机问世,开始用于加工中心,快速进给速度达到 160m/min 以上,加速度达 4g 以上,向滚珠丝杠副提出严峻的挑战。但由于直线电动机存在价格昂贵、控制系统复杂,需采取措施解决磁铁吸引金属切屑、强磁对人身危害以及发热等缺点,在近一段时间很难得到普及。滚珠丝杠副仍是现在高速驱动的最优先选择,国外大部分高速加工中心仍使用滚珠丝杠副。为了达到高速驱动目的,设计时在提高电动机转速(电动机最高转速可达 4000r/min)的同时,使用大导程滚珠丝杠副,导程可达 32mm。如日本马扎克公司在 FF660 机床上使用滚珠丝杠副,机床快速移动速度达 90m/min,加速度达 1.5g。

从前,担心大导程滚珠丝杠副驱动对加工中心精度的影响,设计时取导程 $PH \leq 10\text{mm}$ 。随着科学技术的进步,从 1999 年日本国际机床展览会上可看出,

液体静压谐波摩擦传动装置的研制

超精密加工技术国防科技重点实验室 杨 辉 吴明根
哈尔滨工业大学 董 申

摘要 在分析谐波齿轮传动和摩擦传动的基础上,设计制造了一种新颖的传动装置——液体静压谐波摩擦传动装置,该装置既具有谐波齿轮传动的大减速比特性,又具有摩擦传动的无空程、无正反程误差等特性,可以满足超精密加工机床大行程高分辨率微量进给的要求。

关键词 谐波齿轮 摩擦传动 微量进给

1 问题的提出

谐波齿轮传动由于具有体积小、重量轻、噪声低、侧隙回差小、精度高、速比大、负载能力高、效率高等特点,在高精度的精密机械伺服传动系统中得到了广泛应用。但是将此机构应用于超精密机床的微量进给部件以实现 $0.01\mu\text{m}$ 的微量进给则还存在着许多问题,诸如运动精度、回差、工作平稳性等都不能满足超精密机床的要求。摩擦传动在超精密机床中已经得到了广泛应用,这种驱动方式具有结构简单、无空程及反向间隙,能获得平滑运动等优点。但是要进行超精密定位,则需要高精度高分辨率的电动机,这对于滚珠丝杠传动方式同样如此。为此,能否将谐波齿轮传动和摩擦传动两种方式结合起来,形成一种新颖的传动方式,既具有谐波齿轮传动的大减速比特性,同时又具有摩擦传动的无空程、无正反程误差等特性,从而满足超精密加工机床的使用要求。

2 液体静压谐波摩擦传动机构的设计

根据谐波齿轮传动副的传动规律,其传动可以看

作柔齿轮与刚齿轮两条共扼的特征曲线在波发生器的作用下作无滑动贴展运

动^[1],所以是否可以用光滑薄壁筒替代柔齿轮,以光滑的刚性环替代刚齿轮,同时选择合适的谐波发生器,从而达到同样的目的。以上正是谐波摩擦传动的设计思路。刚轮内壁是一个理想真圆,柔轮是等厚的薄壁圆筒,在特殊的双波发生器的作用下薄壁圆筒产生变形,使

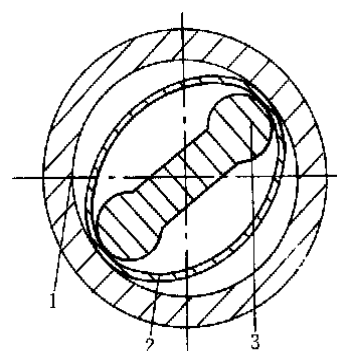


图 1 谐波摩擦传动结构原理图
1. 刚轮 2. 柔轮 3. 波发生器

其外圆与刚性环的内壁真圆发生无滑动的贴展运动,这种机构应既具有谐波传动大减速比的特性,又具有摩擦传动无反向间隙的特点(图 1)。

谐波发生器是使柔轮产生连续变形波的构件,是使柔轮保持原始特征曲线的构件。因此它的结构形式和几何参数决定柔轮构件的受力状态。考虑到微量进给驱动的要求,如启动力矩和摩擦力矩小才不至于影

现在大部分高速加工中心都使用大导程滚珠丝杠副。

滚珠丝杠副在高速驱动时主要存在的问题是:噪声、温升、精度。滚珠丝杠副噪声产生的原因主要有:滚珠在循环回路中的流畅性、滚珠之间的碰撞、滚道的粗糙度、丝杠的弯曲等。滚珠丝杠副的温升主要是由滚珠与丝杠、螺母、反向器之间的摩擦及滚珠之间的摩擦产生的。要解决上述问题首先应从滚珠丝杠副的结构设计开始,对存在的问题采取措施;另一方面,从工艺上

解决,通过合理的工艺流程,提高产品的内在质量;选取适当的滚珠丝杠副预紧转矩;减小滚珠丝杠副的预紧转矩的变动量,使滚珠丝杠副适应高速驱动的要求。

总之,随着社会的不断发展,用户对滚珠丝杠副的要求越来越严,要求也多样化,促使滚珠丝杠生产厂不断提高产品质量,开发新品种,以满足用户的需求。

作者:肖正义,北京密云水库北京机床研究所,邮编:101512
(编辑 徐鸿根)