

程光仁 施祖康 张超鹏 编著



滚 珠

螺旋传动设计基础

机械工业出版社

滚珠螺旋传动设计基础

程光仁 施祖康 张超鹏 编著

*

责任编辑：冯铤

封面设计：王伦

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $10 \frac{5}{8}$ · 字数 230 千字

1987年8月北京第一版·1987年8月北京第一次印刷

印数 0,001—3,900 · 定价：2.45 元

*

统一书号：15033·6751

编者的话

具有独特机械特性的滚珠螺旋传动，目前已在各种机械设备、数控机床、精密机械、测量仪器和自动控制系统中成为重要的传动元件，并在国内外获得了广泛的应用和发展。

为了进一步研究和推广运用滚珠螺旋传动的技术，我们编著了这本书。其内容共分十一章，较为系统地叙述了滚珠螺旋传动的工作原理和特点、构造与类型；滚珠螺旋传动的摩擦特性、受力与变形、额定负荷容量计算；滚珠螺旋传动的设计计算、循环返回与防止逆转装置、防护与润滑设计；滚珠螺旋机构测试，以及其现状与发展方向等问题；并附有计算实例，供读者参阅。

本书可供从事机械设计、自动控制和滚珠螺旋传动的研究设计人员、工程技术人员阅读参考，也是高等院校有关专业的教学参考书。

参加本书编著的有程光仁同志（第一、五、十一章）、施祖康同志（第二、三、四、八、九章）、张超鹏同志（第六、七、十章）。南京市科学技术服务部副总工程师郭德宏同志负责主审，对书稿内容提出了许多宝贵意见。在编著过程中，我们还得到了机械部北京机床研究所、南京工艺装备制造厂、汉江机床厂等有关单位的支持和协助，在此表示深切的感谢。

由于水平所限，书中谬误之处在所难免，恳切希望读者提出批评指正。

作者

一九八五年七月

常用符号

公称直径(半径)	$d_0(r_0)$
滚道半径	R
螺旋升角	λ
导程	L
接触角	β
滚珠直径(半径)	$d_b(r_b)$
滚珠数	z
列数	K
有效圈数	j
丝杠螺纹外径	d
丝杠螺纹内径	d_1
丝杠螺纹有效长度	l
丝杠支承间距离	l_0
螺母外径	D
螺母内径	D_1
螺母高度	H
螺母行程	S
摩擦系数	μ
摩擦角	ρ'_1
轴向工作载荷	F
轴向平均载荷	F_m
轴向最大工作载荷	F_{max}
预紧力	F_P
最大转速	n_{max}
平均转速	n_m

传动扭矩(驱动扭矩)	T
起动摩擦力矩	M
额定动负荷	C_d
额定静负荷	C_{d0}
传动效率	η
材料弹性模量	E
材料剪切模量	G
材料泊松比	μ
丝杠轴最小横剖面积	A
丝杠轴惯矩	J
丝杠转动惯量	I

目 录

常用符号

第一章 滚珠螺旋传动综述	1
一、滚珠螺旋传动的工作原理	1
二、滚珠螺旋传动的特点	1
三、滚珠螺旋传动的构造与分类	7
1. 滚道型面的形状与特性	7
2. 滚珠循环方式与特点	9
3. 滚珠螺旋传动的轴隙调整及其预紧形式	18
4. 滚珠螺旋传动的尺寸系列、精度规范、材料与热处理	28
第二章 滚珠螺旋传动的运动特性与摩擦	36
一、滚珠的运动与摩擦	36
1. 滚珠在平面上的运动特性与摩擦	36
2. 几个力作用下滚珠的运动与受力情况	38
二、滚珠螺旋副中滚珠的运动与受力分析	41
1. 滚珠螺旋副中滚珠的运动特性	41
2. 滚珠螺旋副中工作滚珠的受力特点	46
3. 钢球的滑移	47
三、滚珠螺旋副的摩擦与效率	52
1. 摩擦	52
2. 传动效率	61
四、双螺母预紧滚珠螺旋副的摩擦力矩	64
第三章 滚珠螺旋副的弹性接触变形	72
一、滚珠螺旋副应力与变形分析基础	72
1. 滚珠螺旋副的简化力学模型	72
2. 两自由弹性体的接触问题	73
3. 滚珠与丝杠滚道及螺母滚道的接触情况	80

VI

二、单螺母滚珠螺旋副的弹性接触变形问题	85
三、双螺母预紧结构滚珠螺旋副的受力分析	87
四、双螺母预紧条件下滚珠螺旋副的轴向弹性变形量计算	91
五、制造误差对滚珠螺旋副轴向弹性接触变形量的影响	94
六、应用举例	102
第四章 滚珠螺旋副的额定负荷容量	105
一、滚珠螺旋副的额定静负荷容量	106
二、滚珠螺旋副的额定动负荷容量	109
1. Lundberg-Palmgren 滚动疲劳统计理论	109
2. 滚珠螺旋的螺母工作行程对承载能力的影响	114
3. 滚珠螺旋的额定动负荷	118
三、计算举例	125
第五章 滚珠螺旋传动的设计计算	135
一、滚珠螺旋传动系列尺寸的选择	135
1. 强度计算	135
2. 稳定性计算	144
3. 临界速度计算	147
二、滚珠螺旋传动的驱动力矩和效率计算	149
三、设计计算的步骤与实例	151
1. 设计计算步骤	151
2. 计算实例	152
四、滚珠螺旋传动简化算法	154
1. 受力分析	154
2. 工作滚珠的计算	155
3. 工作寿命的分析	157
4. 设计步骤与方法	161
5. 计算实例	163
第六章 滚珠螺旋副循环返回装置	167
一、概述	167

二、内循环反向器的设计与分析	168
1. 内循环反向器回珠槽的几种设计	168
2. 五次抛物线型回珠曲线及反向器设计	171
三、外循环反向器的设计	190
1. 套筒-螺旋槽式反向器的设计	190
2. 插管式反向器的设计	193
第七章 滚珠螺旋传动防止逆转装置	203
一、对滚珠螺旋传动中防逆转装置的要求	204
二、防逆转装置的结构和工作原理	205
三、自锁器的选择和计算	210
1. 单向自锁器	210
2. 滑块拨叉自锁器——双向自锁器	224
3. 自锁器主要工艺及使用特点	229
第八章 滚珠螺旋传动系统设计	231
一、概述	231
二、滚珠螺旋副的传动精度	233
三、滚珠螺旋传动系统的刚度	239
1. 丝杠的刚度	240
2. 滚珠螺母体的变形量及其刚度	244
3. 支承轴承的轴向变形量及刚度	246
4. 滚珠螺旋传动系统总的动态变形量及综合弹性刚度 系数	248
四、滚珠螺旋传动系统的驱动力矩	248
1. 丝杠的加速力矩 T_G	249
2. 丝杠的驱动力矩 T_D	249
3. 滚珠螺旋的阻力矩 T_{PL}	251
4. 滚珠螺旋传动系统的摩擦力矩 T_f	252
5. 滚珠螺旋副的起动力矩 T_S	252
6. 脉冲马达的负载力矩 T_M	252

五、滚珠螺旋的热变形和预拉伸	254
1. 滚珠螺旋的温升	256
2. 滚珠螺旋的热变形	257
3. 减少热变形影响的措施	259
第九章 滚珠螺旋的润滑、密封及防护装置	266
一、润滑	266
1. 润滑油功用	266
2. 对润滑剂的要求	267
3. 润滑剂对滚珠螺旋摩擦及磨损的影响	267
4. 润滑剂的选择	271
5. 润滑方式、润滑装置及润滑剂的补充和更换	271
6. 特殊使用环境下的润滑	273
二、密封	275
1. 密封的作用与要求	275
2. 密封装置的种类与结构	276
三、防护	278
1. 防护装置的要求与种类	278
2. 滚珠螺旋传动的安全防护装置	278
3. 机床防护中的滚珠螺旋防护罩	280
第十章 滚珠螺旋机构的测试	285
一、滚珠螺旋机构的主要性能指标和测试目的	285
二、滚珠螺旋机构主要性能指标的理论表达式	285
三、JL-Ⅰ型精密螺旋测试仪	289
四、螺旋机构位移精度的测量	299
五、滚珠螺旋副静负荷测试	307
六、滚珠螺旋副跑合与寿命试验机	309
第十一章 滚珠螺旋传动的现状及其发展方向	314
一、发展概况	314
二、发展方向	318

1. 产品高精度化	318
2. 运转速度的提高	319
3. 产品规格的扩大	319
4. 普通型和特殊型的发展并进	320
5. 新产品和配套元件的开拓	322
6. 科研动向	324
参考文献	324

第一章 滚珠螺旋传动综述

螺旋传动是应用非常广泛的机械传动之一，最常见的一种是滑动螺旋传动。但是，由于滑动螺旋传动的接触螺旋面间存在着较大的滑动摩擦阻力，故其传动效率低、磨损快、使用寿命短，已不能完全适应现代机械传动在高速度、高效率、高精度等方面发展的要求。至于液体静压螺旋传动，则因其传动装置较复杂，维修也不甚方便，故其应用受到了一定限制。滚珠螺旋传动（或称滚珠丝杠传动）则是为了满足上述要求而发展起来的一种新型传动机构。

一、滚珠螺旋传动的工作原理

滚珠螺旋传动是在丝杠与螺母旋合螺旋槽之间放置适量滚珠作为中间传动体，借助滚珠返回通道，构成滚珠可在闭合回路中反复循环运动的螺旋传动。

如图 1-1 所示。当丝杠或螺母转动时，滚珠被推动在闭合回路中形成滚珠链的反复循环运动。这样，丝杠与螺母的相对运动借助于滚珠链的作用，把滑动接触变成了滚动接触。因此，滚珠螺旋传动相对于滑动螺旋传动而言，其螺旋运动机理，概括地说来，就是以滚动摩擦代替了滑动摩擦。这也是滚珠螺旋传动具有独特的技术性能的物理本质所在。

二、滚珠螺旋传动的特点

滚珠螺旋传动与滑动螺旋传动、静压螺旋传动相比，具有如下的特点：

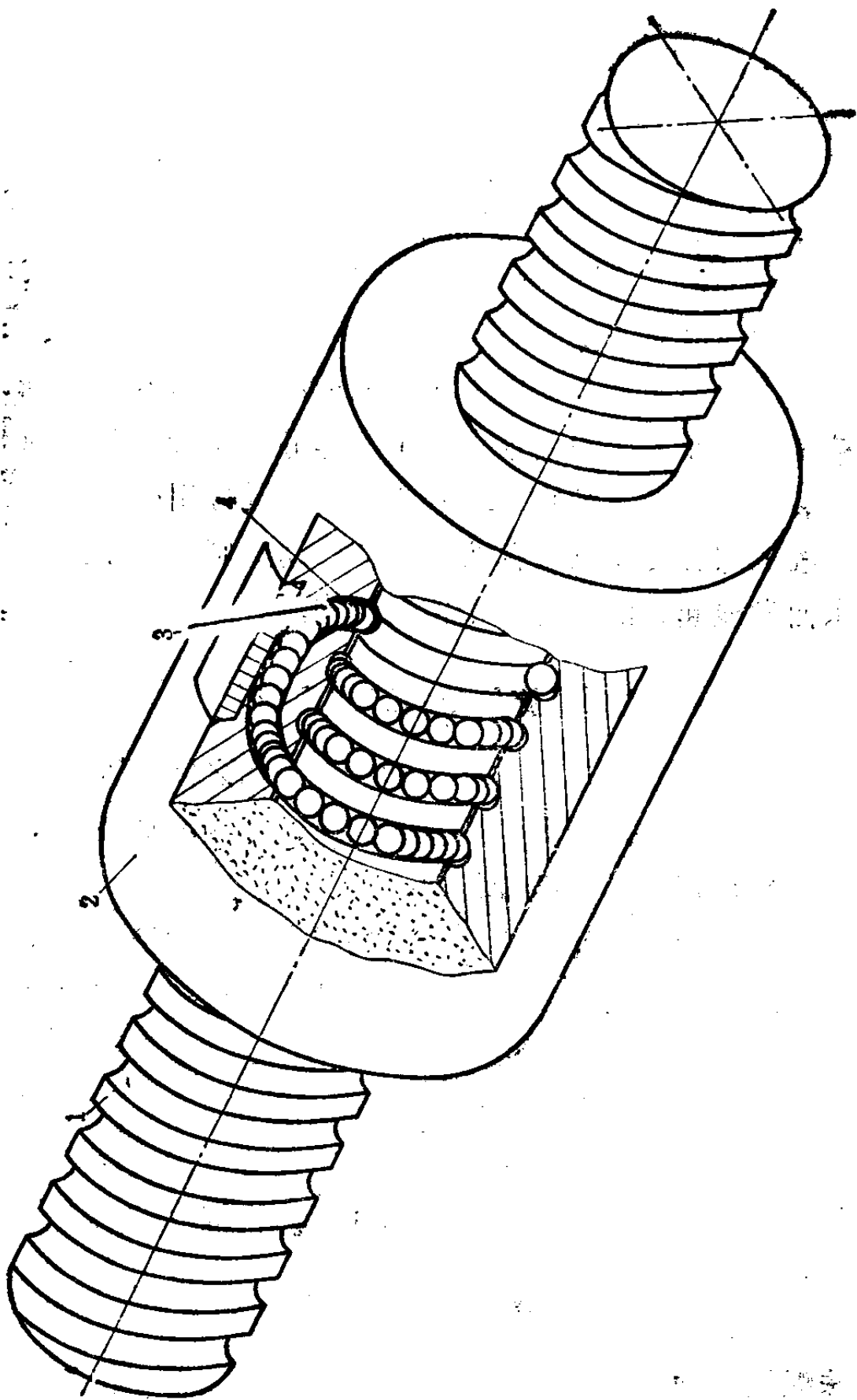


图 1-1
1—丝杠 2—螺母 3—滚珠返回通道 4—滚珠

(1) 传动效率高

对于滑动螺旋传动来说，在定期润滑的条件下，丝杠与青铜（或铸铁）螺母间的滑动摩擦系数 f' 在 $0.06 \sim 0.15$ 之间，摩擦阻力大，传动效率低（一般低于 40% ）。然而，滚珠螺旋传动的摩擦系数经实验测得，一般为 $0.0025 \sim 0.0035$ 。显然，其传动摩擦阻力大大减小，传动效率得到很大提高。如图 1-2 a 所示：当摩擦系数 $\mu = 0.003$ 、螺旋升角 $\lambda = 2^\circ$ 时，传动效率可达 90% 以上；当螺旋升角 $\lambda = 3^\circ$ 时，传动效率可升至 95% 以上；当 λ 再度增大时，传动效率的理论值可高达 98% ，但其增加的速率缓慢了。这些效率的数值，相当于滑动螺旋传动的 $2 \sim 4$ 倍。这样，滚珠螺旋传动相对滑动螺旋传动来说，就能以较小的动力推动较大的负荷，而功率消耗只有滑动螺旋传动的 $1/4 \sim 1/2$ ，不仅能大大减轻操纵者的劳动强度，而且对机械小型化、启动后的颤动和滞后时间的减少，以及节省能源等方面，都具有重要意义。

(2) 传动的可逆性

滚珠螺旋传动不仅正传动效率（简称正效率）高，而且逆传动效率（简称逆效率）也几乎同样高达 98% （图 1-2 b）。它既可把回转运动变成直线运动（简称正传动），又可将直线运动变成回转运动（简称逆传动）。因此，与滑动螺旋传动相比，突出的不同点是传动具有可逆性。滚珠螺旋传动的正传动与逆传动关系如图 1-3 所示。

当然，滚珠螺旋传动的逆效率高，一方面固然带来了逆传动的好处，但另一方面却不如滑动螺旋传动那样具有自锁能力。在某些机构中，特别是垂直升降机构中使用滚珠螺旋传动时，必须设置防逆转装置。因此，与滑动螺旋传动相比，带来了机构比较庞杂的缺点。但与静压螺旋传动相比，

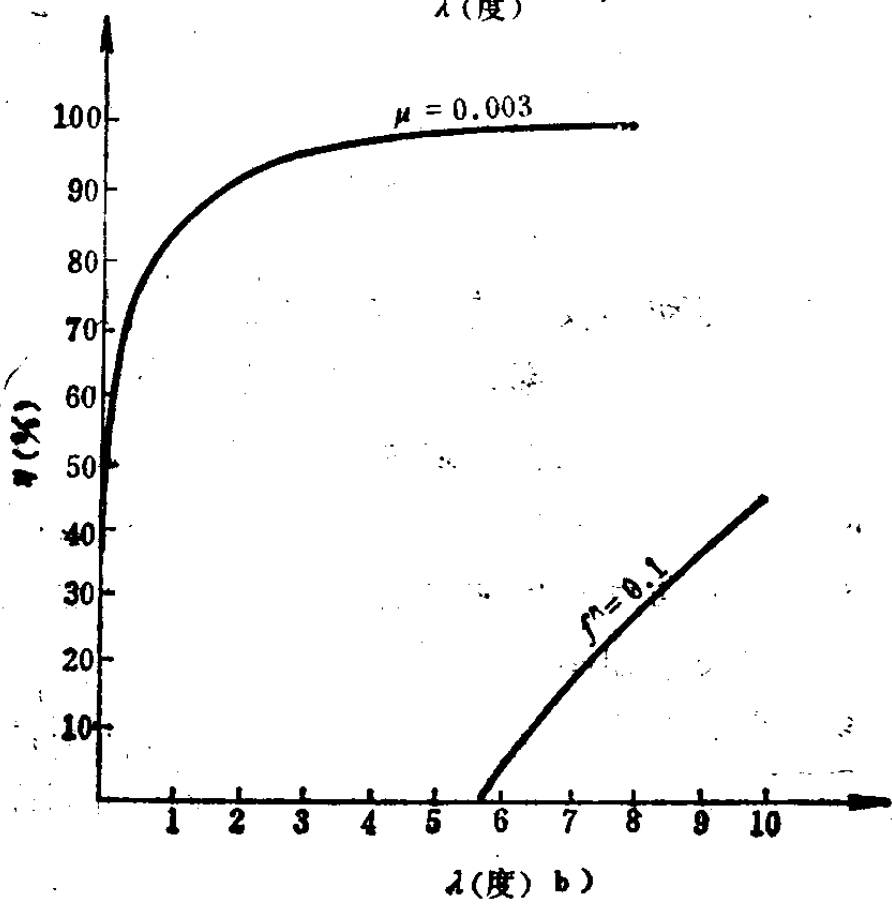
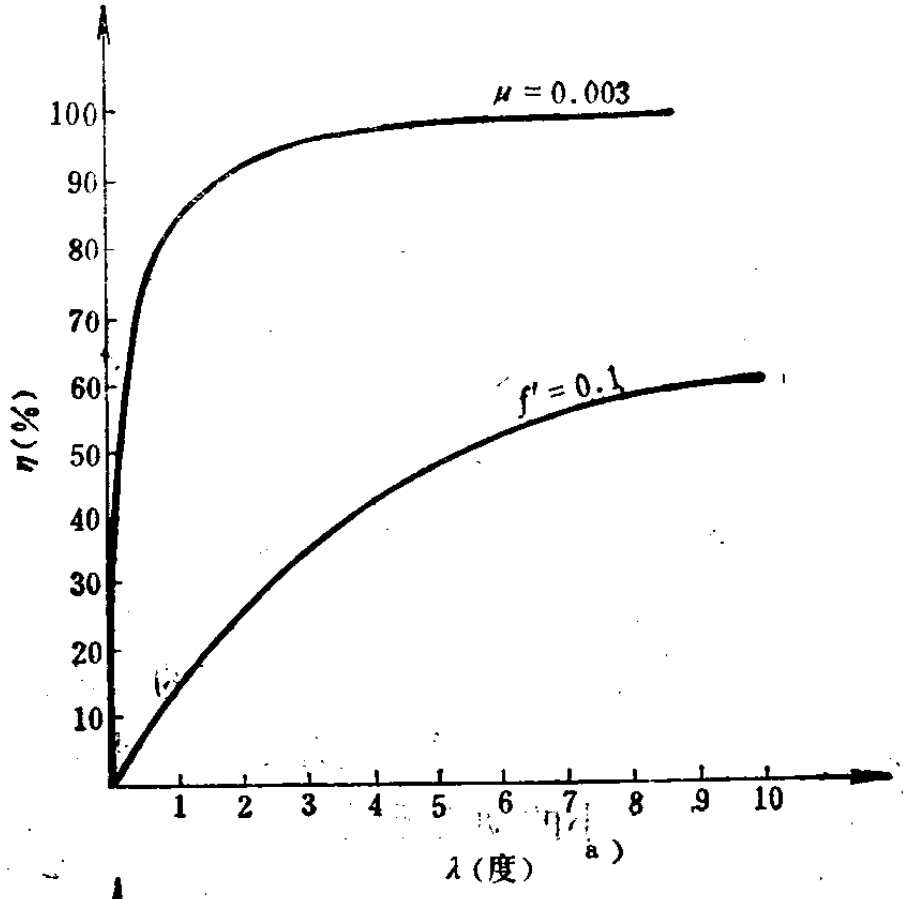
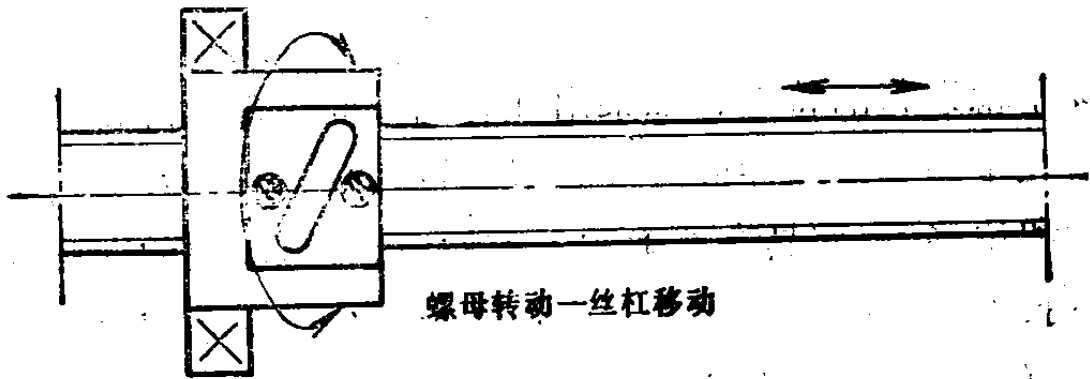
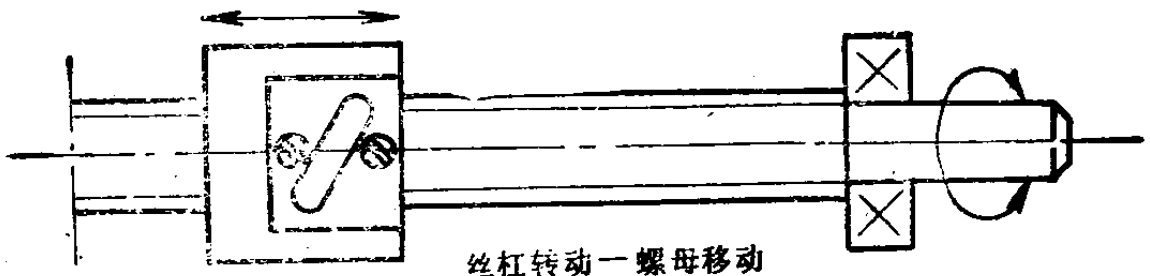
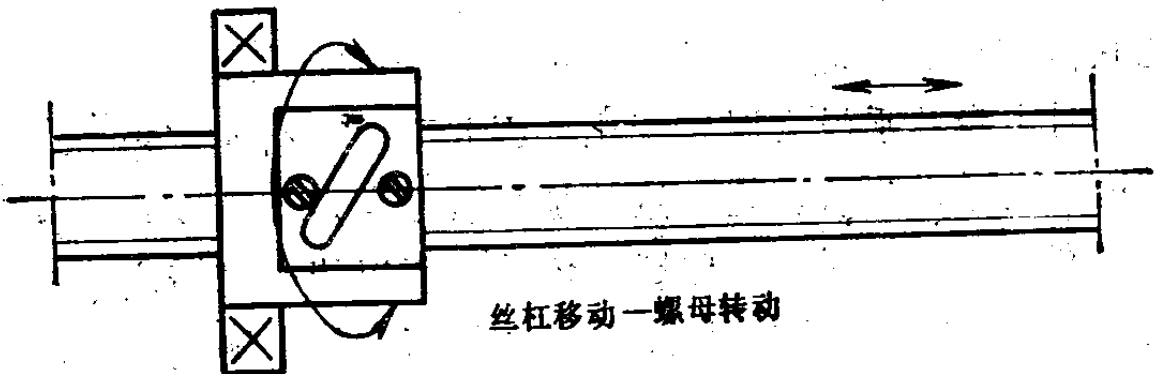
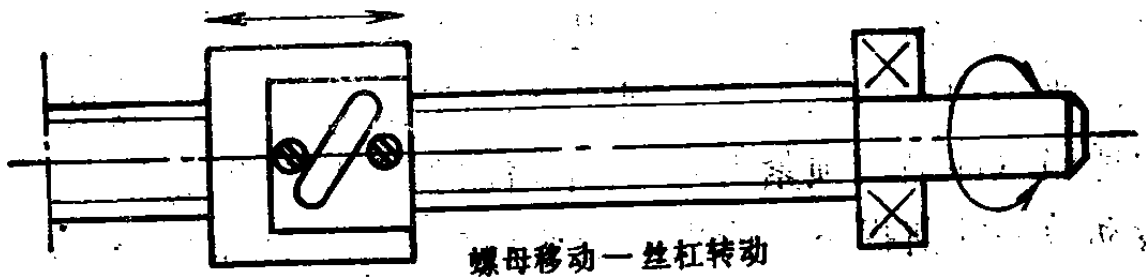


图 1-2
a) 正效率 b) 逆效率



a)



b)

图 1-3

a) 回转运动变直线运动 b) 直线运动变回转运动

机构仍属简单紧凑，也易于维修。

(3) 同步性能好

由于滚珠螺旋传动的滚动摩擦特性，摩擦阻力几乎与运转速度无关，静摩擦力矩极小，启动摩擦力矩与运动摩擦力矩接近相等，因此，运转启动时无颤动，低速下运转无爬行。这不但缩短了启动的时间，消除了在滑动螺旋传动中那种滑移现象，而且大大提高了传动的灵敏度和准确度，具有持续平稳运行的特点。如果用几套同样的滚珠螺旋传动同时驱动几个相同的部件或装置时，包括启动的同时性、运行中的速度和位移等，都具有准确的一致性，这就是所说的同步性。这种技术特性已成功地应用到各种具有同步要求的机构中。

(4) 传动精度高

传动精度主要是指进给精度和轴向定位精度。经过淬硬和精磨螺纹滚道后的滚珠螺旋副，本身就具有较高的进给精度。高精度滚珠螺旋副，导程累积误差可达 $5\mu\text{m}/300\text{mm}$ 以上。当采用预紧螺母时，则能完全消除轴向间隙。如果预紧力适当（即最佳预紧力），在不增加驱动力矩和基本不降低传动效率的前提下，能提高传动系统的刚度和定位精度；在带有反馈系统的滚珠螺旋传动中，通过机电补偿伺服系统，能获得较高的重复定位精度。由于滚珠螺旋传动的摩擦小，工作时本身几乎没有温度变化，因此不但进给速度稳定，而且丝杠尺寸也非常稳定，这就是具有很高定位精度和重复定位精度的重要原因。滚珠螺旋传动之所以能在高精度的数控机床、多工序自动数控机床、精密机床和精密测量仪器中获得广泛应用，特别是成了要求灵敏而精确配合的伺服系统所不可缺少的配套元件，其重要原因是因其传动精度高。

(5) 使用寿命长

滚珠螺旋副的丝杠、螺母和滚珠都经过淬硬，而且滚动摩擦产生的磨损极小，故螺旋副经长期使用仍能保持其精度，工作寿命很长，这是滑动螺旋副无法比拟的。一般说来，滚珠螺旋副的寿命比滑动螺旋副高5~6倍，而在某些使用场合下可高达10倍左右。使用寿命长这一优点，可相对地弥补滚珠螺旋传动制造成本较高的不足。

三、滚珠螺旋传动的构造与分类

滚珠螺旋传动主要由丝杠、螺母和滚珠等所组成。根据构造的差异和类型的不同，其工作特性、传动精度和制造工艺也不同。对于丝杠的构造来说，除螺纹滚道型面的形状有所不同外，各种类型丝杠的结构基本都相同。滚珠螺母的构造，主要与滚珠循环装置采用的类型及调隙预紧的形式有关。而滚珠循环装置的结构，则对滚珠螺旋传动的设计、制造、精度、寿命、成本以及轴隙调整等均有重要的影响，对滚珠流畅性的好坏更有直接关系。

各种结构形式的滚珠螺旋副，主要区别在于螺纹滚道型面的形状、滚珠循环的方式、轴向间隙调整的预紧方法等三个方面。

1. 滚道型面的形状与特性

螺纹滚道型面是指通过滚珠中心作螺旋线的法截平面与丝杠、螺母螺纹滚道面的交线。这个滚道型面的几何形状、尺寸以及材料的机械性质，对滚珠螺旋传动的承载能力、摩擦特性、轴向刚度和轴隙调整均有较大影响。基于上述各因素的考虑，目前国内应用得最广的滚道型面，有单圆弧形和双圆弧形两种，如图1-4所示。

滚珠与滚道型面接触点的公法线与通过滚珠中心的丝杠