

滚珠丝杠副及自锁装置

饶振纲 王勇卫 编著

国防工业出版社

339831

滚珠丝杠副及自锁装置

饶振纲 王勇卫 编著



国防工业出版社

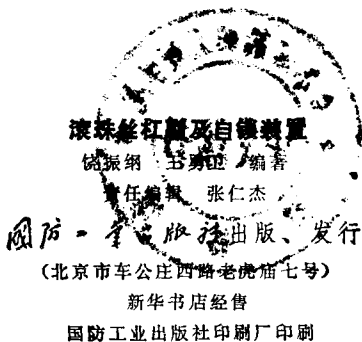
DW02/16

内 容 简 介

本书较全面地介绍了滚珠丝杠副及自锁装置设计方面的内容。全书分为两篇，第一篇滚珠丝杠副(含第一章~第八章)、第二篇自锁装置(含第九章~第十二章)，共十二章。

本书系统地论述了滚珠丝杠副的工作原理、特点、结构型式、精度、尺寸系列、设计计算步骤、滚珠丝杠副的选用和加工工艺等问题。对于自锁装置部分，编写了自锁装置的楔紧原理、滚柱自锁装置、楔块自锁装置和滑块自锁装置，共四章内容。并且分别论述了上述自锁装置的结构、工作原理、楔角公式、自锁条件、设计计算和强度验算及许用锁紧力矩计算等问题。

本书可供从事机械传动的、尤其适用从事精密机械传动的技术人员使用，同时也可作为机器制造类有关专业的师生参考。



850×1168 1/32 印张8¹/₄ 212千字
1990年2月第一版 1990年2月第一次印刷 印数：0,001—2,060册

ISBN 7-118-00262-3/TH18 定价：5.10元

前 言

滚珠丝杠副是一种新型的传动机构。它是在丝杠与螺母之间以滚珠（钢球）为滚动体的螺旋传动元件，因而可使丝杠和螺母之间的相对运动变为滚动。由于滚珠丝杠副具有高效率（一般 $\eta > 90\%$ ）、高精度及高速特性、耐磨损性和运动可逆性等许多优异特性，所以，滚珠丝杠副作为高效（节能）和精密的先进传动机构，在国内外已引起了广泛的兴趣和重视。尽管滚珠丝杠副的产生和发展只经历了数十年的历史，但其应用范围已远远超出了机床工业、汽车工业等部门，而涉及到国民经济、国防军工系统等各个领域。滚珠丝杠副之所以能够获得如此迅速和广泛的应用，除了它本身具有上述优良的机械传动特性外，还由于滚珠丝杠副具有较高的使用价值，它可以像滚动轴承那样，作为一种标准的配套构件由专业厂家组织生产，并能方便地提供给广大的用户选用；尤其是可以作为在特殊的条件和环境下使用的配套传动构件。例如，需要运动可逆、运动同步和瞬时高低速转换，或在高温、低温、高压、真空、强磁场、无润滑和腐蚀介质等条件下，均能保持良好的传动性能。因此，它已被广泛地用作动力驱动、精密定位、自动控制和运动转换等机构。

《滚珠丝杠副及自锁装置》包括了滚珠丝杠副和自锁装置两方面的内容。由于滚珠丝杠副具有运动的可逆性，但对于需要实现自锁的滚珠丝杠传动机构，却必须设置自锁装置（即防止逆转传动装置）。一般需要将滚珠丝杠副与自锁装置配套使用，以确保滚珠丝杠传动机构的自锁性能。所以，自锁装置是滚珠丝杠传动机构不可缺少的一种配套机构。

近几年来，我们想编写《滚珠丝杠副及自锁装置》一书，不仅是由于这个课题新颖，而且我们已深深地感受到：滚珠丝杠

副的广泛应用与广大用户缺乏这方面的参考资料之间的矛盾非常突出。另外，我们也想作一次厂校合作编书的尝试，主观认为这样可以充分利用专业工厂和院校的有利条件，相互取长补短，力求做到理论联系实际。总之，我们编写此书的目的在于为从事机械传动方面的工程技术人员及有关大专院校的师生提供设计和选用滚珠丝杠副及自锁装置所需的参考资料。

本书分为两篇，共十二章。第一篇滚珠丝杠副，包括第一至第八章；第二篇自锁装置，包括第九至第十二章。本书系由饶振纲同志为主执笔编写；王勇卫同志为本书提供了部分资料，并且参与了部分章节的编写工作。另外，王勇卫同志还校阅了本书的全部内容，并提出了不少具体的修改意见。

本书在编写过程中，首先得到了编者所在工厂和学校的领导及同志们的支持和鼓励。此外，还得到有关厂所和学校的热情帮助和支持，他们曾给我们提供了不少的参考资料。南京科技开发公司副总工程师郭德斌同志认真地审阅了本书的全部原稿，且提出了许多宝贵的意见和建议。我们谨在此表示衷心地感谢。

鉴于我们的理论水平和实践经验所限，难免有欠妥或谬误之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一篇 滚珠丝杠副	7
第一章 滑动丝杠副	7
§ 1-1 滑动丝杠副概述	7
一 滑动丝杠副的特点	7
二 滑动丝杠副的传动方式	8
§ 1-2 滑动丝杠副的设计计算	10
一 丝杠、螺母的精度和表面粗糙度	10
二 滑动丝杠副的计算	13
三 滑动丝杠副的材料	22
第二章 滚珠丝杠副的工作原理、特点及结构型式	24
§ 2-1 滚珠丝杠副的工作原理及特点	24
一 滚珠丝杠副的工作原理	24
二 滚珠丝杠副的特点	25
§ 2-2 滚珠丝杠副的结构型式	26
一 螺纹法向截型	26
二 滚珠循环方式	29
§ 2-3 消除轴向间隙的调整预紧方式	35
一 垫片调整方式	36
二 螺纹调整方式	36
三 齿差调整方式	37
四 弹簧调整方式	38
§ 2-4 预紧力的确定及预紧后的摩擦力矩	38
一 预紧力的确定	38
二 预紧后的摩擦力矩	43
第三章 滚珠丝杠副的精度和系列尺寸	42
§ 3-1 滚珠丝杠副的精度	42
一 国外滚珠丝杠副精度标准的概况	42

二 国内滚珠丝杠副精度标准的概况	44
三 机械工业部标准《滚珠丝杠副精度》	53
四 部标准与行业标准的近似对应	56
五 滚珠丝杠副精度等级的合理选用	57
§ 3-2 滚珠丝杠副的系列尺寸	60
一 国际标准化组织(ISO)的系列尺寸	60
二 我国滚珠丝杠副的系列尺寸	62
第四章 滚珠丝杠副的设计计算	82
§ 4-1 主要几何尺寸的计算	82
一 螺纹滚道的主要尺寸	82
二 滚珠丝杠的主要尺寸	84
三 滚珠螺母的主要尺寸	85
§ 4-2 滚珠丝杠副承载能力的计算	86
一 滚珠丝杠副的额定动载荷 C_a 的计算	86
二 滚珠丝杠副的额定静载荷 C_{0a} 的计算	87
第五章 滚珠丝杠副的选用	89
§ 5-1 滚珠丝杠副的选用原则	89
一 在高速或较高速度和定工作载荷的情况下滚珠丝杠副的选用	90
二 在变工作载荷和变转速的情况下滚珠丝杠副的选用	91
三 在承受动载荷的情况下滚珠丝杠副的选用	92
四 按额定静载荷选用滚珠丝杠副	95
§ 5-2 滚珠丝杠副的刚度计算	96
一 滚珠丝杠的轴向变形	97
二 滚珠与螺纹滚道间的接触变形	98
三 支承滚珠丝杠的轴承的轴向变形	99
§ 5-3 滚珠丝杠副稳定性验算	101
§ 5-4 滚珠丝杠副临界转速的验算	105
第六章 滚珠丝杠副的驱动力矩及传动效率	108
§ 6-1 滚珠丝杠副的驱动力矩	108
一 无预紧情况下的驱动力矩	108
二 有预紧情况下的驱动力矩	110
§ 6-2 滚珠丝杠副的传动效率	112
一 无预紧情况下的传动效率	112
二 有预紧情况下的传动效率	113
§ 6-3 滚珠丝杠副的润滑, 密封及防护	116
一 滚珠丝杠副的润滑	116

二 滚珠丝杠副的密封与防护	122
§ 6-4 滚珠丝杠副的安装及使用	127
一 滚珠丝杠副的安装	127
二 滚珠丝杠副的使用注意事项	128
第七章 反向器设计	130
§ 7-1 反向器概述	130
§ 7-2 三次抛物线回珠曲线的设计	133
一 滚珠中心的螺旋线	134
二 回珠曲线的形成	135
三 系数 A 、 B 的确定	136
四 反向器外形尺寸和特征点坐标的确定	138
五 回珠曲线到丝杠轴的距离 ρ 的计算	140
§ 7-3 五次抛物线型回珠曲线的设计	143
一 五次抛物线型回珠曲线的形成	143
二 反向器外形尺寸和特征点坐标的确定	145
三 五次抛物线型回珠曲线的计算举例	148
四 回珠曲线的简单评述	148
第八章 滚珠丝杠副的材料、工艺及测试	152
§ 8-1 滚珠丝杠副的材料及其热处理	152
一 滚珠丝杠副的材料	152
二 滚珠丝杠副的热处理工艺	156
§ 8-2 滚珠丝杠副的加工工艺及测试	159
一 滚珠丝杠副的加工和装配工艺	159
二 滚珠丝杠副的测试	163
第二篇 自锁装置	175
第九章 自锁装置导论	175
§ 9-1 防止逆传动的方法	175
一 采用本身不能逆传动的电、液脉冲马达、步进电机等驱动元件	176
二 采用自锁装置	176
三 采用电磁或液压制动器	180
§ 9-2 自锁装置的楔紧原理及对自锁装置的要求	181
一 自锁装置的楔紧原理	181
二 对自锁装置的要求	187
第十章 滚柱自锁装置	188
§ 10-1 滚柱自锁装置结构及工作原理	188

一	滚柱自锁装置的结构	188
二	滚柱自锁装置的工作原理	191
§ 10-2	楔角公式及自锁条件	193
一	楔角公式	193
二	自锁条件	194
§ 10-3	滚柱自锁装置的设计计算	198
一	确定计算力矩 M_e	198
二	计算几何参数	199
三	计算弹力 F	204
§ 10-4	滚柱自锁装置的强度验算及许用锁紧力矩计算	206
一	强度验算	206
二	许用锁紧力矩 $[M_2]$ 的计算	208
第十一章	楔块自锁装置	210
§ 11-1	楔块自锁装置结构及工作原理	210
一	楔块自锁装置的结构	210
二	楔块自锁装置的工作原理	212
§ 11-2	楔角公式及自锁条件	214
一	楔角公式	214
二	自锁条件	216
§ 11-3	楔块自锁装置的设计计算	219
一	确定计算力矩 M_e	219
二	计算几何参数	219
三	确定楔块数目 Z	222
§ 11-4	楔块自锁装置的强度验算及许用锁紧力矩计算	223
一	强度验算	223
二	许用锁紧力矩 $[M_2]$ 的计算	224
第十二章	滑块自锁装置	226
§ 12-1	滑块自锁装置结构及工作原理	226
一	滑块自锁装置的结构	226
二	滑块自锁装置的工作原理	227
§ 12-2	楔角公式及自锁条件	228
一	楔角公式	228
二	自锁条件	231
§ 12-3	滑块自锁装置的设计计算	235
一	确定计算力矩 M_e	236
二	计算几何参数	236

§ 12-4 滑块自锁装置的强度验算及许用锁紧力矩的计算·····	238
一 强度验算·····	238
二 许用锁紧力矩 $[M_2]$ 的计算·····	240
§ 12-5 滑块自锁装置、楔块自锁装置和滚柱自锁装置性能的比较·····	242
一 自锁条件的比较·····	242
二 承载能力的比较·····	243
§ 12-6 对数螺线自锁装置简介·····	244
一 概述·····	244
二 楔角公式及自锁条件·····	245
三 设计计算·····	249
四 对数螺线自锁装置与双圆弧楔块自锁装置的比较·····	250
主要参考文献·····	251

绪 论

滚珠丝杠副是一种新型的螺旋传动元件，它的产生和发展只经历了数十年的历史，然而它在国内外工程技术界人士中已引起了广泛的兴趣和重视。当今，滚珠丝杠副在机床工业、汽车工业、自动控制系统、航空工业、船舶工业和兵器工业等各个部门皆获得了日益广泛的应用。在此较短的时期内，它之所以能够得到如此迅速的发展和较普遍的应用，主要的原因是由于滚珠丝杠副具有高效率和高精度的特点，并具有优越的高速特性和耐磨损性及运动可逆性等特性；这些特点都是普通丝杠副不可能具备的。总之，它具有许多良好的机械传动性能。所以，滚珠丝杠副已成为非常有效的、普遍适用的螺旋传动元件。此外，它又可以像滚动轴承那样，由专业厂家组织生产和供应，向用户提供一种新颖的配套元件；广大用户可根据各自的需要方便地进行选用和订购。

关于滚珠丝杠副的产生和发展以及它的主要特性如下：

一 以滚动代替滑动

大家知道，由于普通丝杠副具有滑动摩擦的特性，因此，它的传动效率很低，其效率值约为 $0.3\sim 0.4$ 。

远在一百多年前，就有人设想在丝杠和螺母之间安放滚珠，使丝杠与螺母之间的相对运动由滑动变为滚动（图 0-1），以此来减少摩擦损失，从而有利于提高其传动效率。这一科学的设想，后来终于变成了现实。1940 年，在汽车的转向机构上引人注目地



图0-1 以滚动代替滑动

出现了第一根滚珠丝杠副（图 0-2），它使得汽车方向盘的操纵变得大为轻快平稳，传动效率高达 0.9 以上。此后，随着滚珠丝

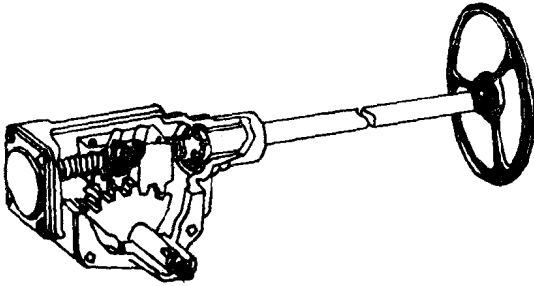


图0-2 汽车的转向机构

杠加工技术的发展，特别是在四十年代初期出现了高精度的螺纹磨床后，精密的滚珠丝杠副就顺利地诞生了。在1943年，第一根较精密的滚珠丝杠副应用于飞机上。1947年，数字控制机床的出现，滚珠丝杠副就成了数控机床较理想的进给元件。时至今日，滚珠丝杠副所具有的独特的优良性能已成为现代机器设备所必需的。目前，在航空、宇航、石油钻井和科学测量仪器等工业，使用高效、精密丝杠传动的数量日益增多。

为了使滚珠丝杠副在工作过程中能够始终保持滚动摩擦，则滚珠就应该在螺母内循环流动。目前，在滚珠丝杠副中，较典型的滚珠循环方式为：内循环和外循环（详见 § 2-2）。

二 极高的传动效率

由于滚珠丝杠和螺母的螺纹滚道与钢制滚珠之间运动时是滚动摩擦，其摩擦系数为 0.002~0.005，仅为滑动摩擦系数的 2% 左右。也就是说，当丝杠运动由滑动变成滚动后，其摩擦损失可以减少到极小的程度，而传动效率可提高到 0.9 以上，约为滑动丝杠副传动效率的 2~4 倍。可见，采用滚珠丝杠副传递运动，可以节约动力 $1/2 \sim 3/4$ ，大大地减轻了操作者的劳动强度和大幅地降低了能耗。所以，各种机械上采用的滑动丝杠副几乎都可

以用滚珠丝杠副来代替。例如，螺旋千斤顶、铣床升降台、水坝闸门、大型阀门、汽车转向机构、雷达定位器、起重运输机械、装卸设备和升降机以及火炮的高低瞄准机等许多机械装置都可以采用高效率的滚珠丝杠副。

三 极高的精度

在滚珠丝杠副问世后，由于出现了高精度的螺纹磨床及其他先进的加工方法和技术途径，使得制造高精度的滚珠丝杠副成为可能。极高的精度乃是滚珠丝杠副的主要特性之一。

高精度数控机床、精密机床、精密测量仪器采用的滚珠丝杠副，要求其导程精度同精密量具一样高。日本、英国和美国都已能制造基本导程极限偏差为 $2\mu\text{m}$ 、任意 300mm 螺纹长度内导程公差为 $5\mu\text{m}$ 的滚珠丝杠副。其应用实例有螺纹磨床的母丝杠和精密测量仪器的基准进给丝杠。

在日本，由于驱动滚珠丝杠副的脉冲马达性能的提高，用微调控制的每转一步距的脉冲马达与导程为 10mm 的滚珠丝杠副直接联接，便可以实现一个脉冲移动 $1\mu\text{m}$ 的精确控制。

近年来，我国南京工艺装备厂、汉江机床厂和北京机床研究所都已经能够制造基本导程极限偏差为 $3\mu\text{m}$ 、任意 300mm 螺纹长度内导程公差为 $10\mu\text{m}$ 的产品。也能从一批产品中挑选出基本导程极限偏差为 $2\mu\text{m}$ 、任意 300mm 螺纹长度内导程公差为 $5\mu\text{m}$ 的产品。由于螺纹磨床精度修正反馈技术(激光、计算机)的采用，制造精度正在进一步提高。

四 轴向间隙为零

一般滑动丝杠副不可能完全消除丝杠和螺母之间的轴向间隙，即使采用两个螺母也只能减少丝杠的轴向间隙，不可能达到轴向间隙为零，因为一旦使其间隙为零，丝杠就被咬住而不能转动了。但是，由于滚珠丝杠副摩擦小、效率高，采用两个螺母(或单螺母错距)可使滚珠丝杠与螺母间的轴向间隙为零，而不致影响丝杠运动的灵活性。此外，还可以通过调节，对滚珠丝杠副施加一定程度的预紧力，这样不仅能完全消除其轴向间隙，而

且有较高的轴向刚度，丝杠仍可以灵活地转动。这个特性对提高机床的进给精度、减少零件的粗糙度和延长刀具寿命都具有重要的意义。一般经过预紧的滚珠丝杠副可以达到定位精度为 $\pm 10 \mu\text{m}/300\text{mm}$ ，重复定位精度为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

由于滚珠丝杠副的摩擦损失极小，工作时几乎没有温度变化，运动中没有阻滞和滑移，故进给速度稳定。这就是导致滚珠丝杠副具有极高定位精度和重复定位精度的重要原因。

五 使用寿命长

由于滚珠丝杠副中的主要零件，如丝杠、螺母和滚珠等均选用综合机械性能较好的钢材并经过热处理，具有很高的硬度和很好的表面粗糙度。再加上滚珠与丝杠、螺母之间变成滚动摩擦后，磨损大大减少，因而滚珠丝杠副具有良好的耐磨性能。即使滚珠丝杠和螺母的滚道由于磨损而产生了一些间隙，但仍然可以通过调整间隙和采用预紧的方法，而能继续使用，并能保持良好的传动精度和运动特性。由此可见，滚珠丝杠副的使用寿命较长。

六 精确的同步运动

所谓滚珠丝杠副的运动同步性，就是将两套（或两套以上）滚珠丝杠副应用在两个（或两个以上的）部件（或装置）上时，这些滚珠丝杠副传递的运动（包括启动和运行的速度及移动的距离）一致。由于滚珠丝杠副的运动极为灵活、轻便，反应非常灵敏，消除了机械滞后和爬行等现象，所以，滚珠丝杠副的运动能够精确同步。对于滚珠丝杠副的这一特性已被成功地应用到许多对运动有同步性要求的地方。如在喷气式飞机上采用了许多套滚珠丝杠副来操纵其副翼转动同步，以保证飞机副翼动作一致（若动作不一致，则飞机就会失去平衡）。另外，如双柱立式车床、双柱龙门刨床、双柱龙门铣床，其升降刀架横梁所用的两根丝杠都有同步运动的要求，采用滚珠丝杠副，则能达到精确同步的目的。

七 运动的可逆性

我们知道，普通滑动丝杠副只能将回转运动转变为直线运动。例如，回转丝杠可使螺母作直线移动，或者回转螺母可使

丝杠作直线移动(图 0-3)。这是由于滑动丝杠副的摩擦阻力矩很大,使滑动丝杠产生自锁,从而使其运动成为不可逆。而滚珠丝杠副的摩擦阻力矩很小,其逆转效率很高,不能够进行自锁,从而使其运动成为可逆。它不仅能将回转运动转变成直线运动,还

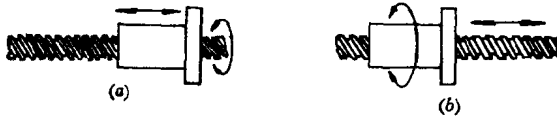


图 0-3

能将直线运动转变为回转运动。也就是说,推动滚珠螺母,可使滚珠丝杠回转(图 0-3, a),或推动滚珠丝杠,可使螺母回转(图 0-3, b)。这就是滚珠丝杠副运动的可逆性。利用滚珠丝杠副运动的可逆性,可以制成力矩放大器,即当输入一个较小的力矩时,通过该力矩放大器可获得一个很大的输出力矩。

但是,事物总是一分为二的。由于滚珠丝杠副的摩擦很小,即运动太灵活了,故大多数滚珠丝杠副不能自锁。因此,在不允许产生逆转的地方,如机床工作台的升降系统和火炮的高低瞄准机构等处均需要设置专门的防止逆转的自锁机构。

鉴于滚珠丝杠副的逆转效率很高、运动太灵活而不能自锁的情况,为了使其能实现正常的传动和精确的定位,则应该采用各种可靠的自锁装置与其配套使用。换句话说,在实际应用中,自锁装置是大多数滚珠丝杠副不可缺少的附件,彼此应配合使用。

八 广阔的发展前景

滚珠丝杠副的产生虽然已有四十多年的历史,但它仍处在发展的阶段。近几年来,国内外滚珠丝杠副的规格正在向两极化发展,即向微型化和大型化两方面发展。日本 NSK 公司发展了一种微型滚珠丝杠副尺寸系列,直径从 4 到 14mm,导程从 1 到 3 mm,主要用作精密测量仪器、小型机床、电子计算机的打印机、精密光学机械、半导体加工机械等设备的进给丝杠。

南京工艺装备厂根据用户的需要，已试制成功微型滚珠丝杠副尺寸系列，直径从6到16mm，基本导程（螺距）从2到5mm，主要用于仪器仪表、小型机械、医疗器械、电子设备、伺服机构、随动系统和精密光学机械等。

据有关资料报导，英国 Coventry 精密量具工具公司制造的大型滚珠丝杠副为：直径203mm、长度18.3m，能承受100 t 动载荷和200 t 静载荷，现用于炼钢设备。该公司曾制造过直径102mm、长度10.98m的滚珠丝杠副，用于欧洲某核电站。日本最长的磨制滚珠丝杠副长达11m，用于大型车床。美国 Beaver 公司生产的大型滚珠丝杠副直径5英寸（127mm）、长度41英尺（约12.5m），用于雷达天线定位器。

近几年来，南京工艺装备厂在努力发展大型滚珠丝杠副方面也做了许多工作。该厂现在已能生产直径120mm，长度5m的大型滚珠丝杠副。目前正在试制长度超过6m的滚珠丝杠副产品。

另外，在高温、低温、无润滑、水中或露天等特殊条件下工作的滚珠丝杠副都属于正在发展的特殊用途的产品。美国飞机上应用的滚珠丝杠副约占全部产品需用量的30%。英国 Lucas 公司以生产航空用滚珠丝杠副著称，除用于飞机襟翼和尾翼操纵机构外，还用于飞机起落架的着陆机构。例如，超音速“协和号”飞机襟翼操纵用的滚珠丝杠副位于喷气发动机后面，其工作温度高达250~500°C。

总之，滚珠丝杠副这一新型的传动元件，现仍处在研究和发展阶段。在滚珠丝杠副的基础理论、产品设计、制造工艺和测试技术等各个方面，还有许多的技术问题有待于进一步解决。为了迅速发展和提高我国的滚珠丝杠副的技术水平，目前我国机械工业应根据专业化协作原则进行改革，加强基础攻关，进一步开展对滚珠丝杠副的科学研究工作，使它能更好地为四个现代化服务。可以相信，随着我国工业现代化水平的提高，滚珠丝杠副的发展将具有极广阔的前景。

第一篇 滚珠丝杠副

第一章 滑动丝杠副

§ 1-1 滑动丝杠副概述

根据《机械原理》可知，所谓丝杠传动就是由丝杠副联接相邻构件而组成的传动机构。在机械传动中，丝杠副是较常用的机构之一。

丝杠传动（或称螺旋传动）可以把旋转运动变为直线运动，也可以把直线运动变为旋转运动。丝杠传动既可以传递能量或动力，也可用来传递运动或用来调整零件的相互位置。因此，在机床、起重设备、锻压机械、测量仪器、船舶、飞机及火炮、火箭发射装置等传动机构中都广泛地应用了丝杠副。最常见的丝杠副为滑动丝杠副和滚珠丝杠副两种。本章仅讨论滑动丝杠副，以此作为研究滚珠丝杠副的基础知识。

一 滑动丝杠副的特点

滑动丝杠副具有如下特点：

（1）结构简单、制造容易

由于滑动丝杠副为一般的丝杠、螺母所组成，故其结构简单、制造容易。

（2）减速传动比大

由于当丝杠转过一周时，螺母只移动一个导程，而导程可以做得很小，因此，采用滑动丝杠副可以得到很大的减速比。

（3）摩擦阻力大、传动效率低

由于滑动丝杠副的工作面为滑动摩擦，故其摩擦阻力大，传