

冯虎田等◎编著

滚珠丝杠副 动力学与设计基础



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

滚珠丝杠副动力学与设计基础

冯虎田 等编著



机械工业出版社

滚珠丝杠副具有传动精度和效率高、同步性能好、磨损小、寿命长和可逆性等优良工作性能,在工业领域得到广泛应用,已成为数控机床、装备制造、航空航天、汽车交通等行业领域中的关键功能部件之一。本书系统介绍作者近十年来在滚珠丝杠副的运动学与动力学、弹性接触与变形理论、摩擦机理与特性、设计与检测方法等方面的研究成果。包括:滚珠丝杠副传动原理与特点;滚珠丝杠副和行星滚柱丝杠副的运动学和动力学分析;滚珠丝杠副弹性接触变形与刚性;滚珠丝杠副传动过程中的摩擦机理与特性;滚珠丝杠副的额定静动载荷和典型失效方式;滚珠丝杠副的设计与计算;滚珠丝杠副循环返回装置和防止逆转装置;滚珠丝杠副系统设计方法;滚珠丝杠副润滑、密封及防护装置;滚珠丝杠副测试方法与技术;最后介绍了滚珠丝杠副发展方向及趋势。本书可供相关企业、从事相关行业和科研工作的技术人员、教师和研究生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

滚珠丝杠副动力学与设计基础/冯虎田等编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-111-48305-2

I. ①滚… II. ①冯… III. ①滚珠丝杠—副传动—动力学—研究 IV. ①TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 242048 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王天湛 责任编辑:谢景

封面设计:周军

北京汇林印务有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.75 印张 · 380 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-48305-2

定价: 51.80 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

服务咨询热线:(010)88361066

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010)68326294

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

(010)88379203

教育服务网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

金书网:<http://www.golden-book.com>

前 言

由于滚珠丝杠副具有传动精度和效率高、同步性能好、磨损小、寿命长和可逆性等优良工作性能，在工业领域得到广泛应用，已成为数控机床、装备制造、航空航天、汽车交通等行业领域中的关键功能部件之一。随着滚珠丝杠副朝着高速度、高精度、高负载、复合化和智能化的方向发展，如何实现其结构创新与优化、制造技术提升与加工工艺改进成为滚珠丝杠副生产企业面临的关键问题。要解决这一问题，首先必须在滚珠丝杠副基础理论方面进行深入研究，建立滚珠丝杠副传动的系统理论和方法。

国内外学者和滚珠丝杠副生产企业在滚珠丝杠副基础理论方面进行了大量研究与应用，特别是国家科技重大专项的项目支持，推动了滚珠丝杠副产品性能不断提升。二十多年来，作者所在课题组在滚珠丝杠副基础理论方面进行了系统研究，并与国内主要滚珠丝杠副生产企业合作应用于产品生产，取得了良好的经济效益和社会效益。

本书系统介绍作者近十年来在滚珠丝杠副的运动学与动力学、弹性接触与变形理论、摩擦机理与特性、设计与检测方法等方面的研究成果，共分十三章进行了详细阐述。第一章介绍滚珠丝杠副传动原理与特点。第二章对滚珠丝杠副和行星滚柱丝杠副的运动学和动力学进行了介绍与分析。第三章主要讨论了滚珠丝杠副弹性接触变形与刚性。第四章主要讨论了滚珠丝杠副传动过程中的摩擦机理与特性。第五章和第六章分别介绍了滚珠丝杠副的额定静动载荷和典型失效方式。第七章主要讨论了滚珠丝杠副的设计与计算方法。第八章和第九章分别讨论了滚珠丝杠副循环返回装置和防止逆转装置。第十章讨论了滚珠丝杠副系统设计方法。第十一章讨论了滚珠丝杠副润滑、密封及防护装置。第十二章讨论了滚珠丝杠副测试方法与技术。最后一章介绍了滚珠丝杠副发展方向及趋势。

本书第一章由冯虎田撰写，第二章由王禹林、祖莉撰写，第三章由李春梅（上海出版印刷高等专科学校）、陶卫军撰写，第四章由李春梅、陶卫军撰写，第五章由欧屹、冯虎田撰写，第六章由冯虎田撰写，第七章由祖莉、梁医撰写，第八章由梁医、祖莉撰写，第九章由欧屹、冯虎田撰写，第十章由陶卫军、王禹林撰写，第十一章由王禹林、欧屹撰写，第十二章由冯虎田、韩军撰写，第十三章由冯虎田撰写。

张云、朱倩、杨蕾、陶丽佳、徐光远、潘国义、周长光等参加全书的编辑与校验工作，在此表示感谢。特别是《金属加工》杂志社王天谏主编及张森给予本书大量好的建议，做了辛勤的校订工作，在此表示深深感谢。

本书研究内容得到南京理工大学前辈和同行们的大力支持，在此表示感谢。在本书的撰写过程中，参阅了国内外许多学者的著作、论文和研究报告，特在此对他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限，书中的不足和欠妥之处在所难免，敬请读者和专家们批评指正！

作者：冯虎田

目 录

前言

第一章 滚珠丝杠副传动综述	1
第一节 滚珠丝杠副发展历程	1
第二节 滚珠丝杠副传动工作原理	5
第三节 滚珠丝杠副传动特点	6
一、传动效率高	7
二、传动的可逆性	7
三、同步性能好	10
四、传动精度高	10
五、使用寿命长	11
第四节 滚珠丝杠副传动构造与分类	11
一、滚道型面形状与特性	11
二、滚珠循环方式与特点	12
第五节 滚珠丝杠副尺寸系列、精度规范、材料与热处理	16
一、尺寸系列	16
二、精度规范	16
三、主要几何尺寸	16
四、材料和热处理	17
第二章 滚珠丝杠副运动学与动力学分析	19
第一节 简介	19
第二节 坐标变换	20
第三节 接触角分析	21
第四节 滚珠的运动分析	24
一、滚珠的速度	24
二、滑滚比	29
第五节 滚珠的力分析	31
一、惯性力和惯性矩	31
二、摩擦力和力矩,阻力和离心力	34
三、摩擦因数、阻力和离心力分析	37
第六节 机械效率分析	40
第七节 行星滚柱丝杠运动学和动力学分析	42
一、坐标变换及接触点位置	42
二、运动分析	44
三、动载荷分析	49
四、效率分析	50

参考文献	51
第三章 滚珠丝杠副弹性接触变形	53
第一节 滚珠螺旋副应力与变形分析基础	53
一、滚珠螺旋副的简化力学模型	53
二、两自由弹性体的接触问题	54
第二节 影响滚珠丝杠轴向接触刚度因素	56
一、滚道型面及相关结构参数	56
二、滚珠的列数、圈数及工作滚珠数确定	57
三、滚珠循环及滚珠丝杠副预紧方式	58
四、预紧力确定	61
第三节 单螺母滚珠丝杠副轴向接触刚度	62
一、赫兹点接触理论	62
二、滚珠丝杠副接触点处主曲率	64
三、螺旋滚道面方程求解	65
四、轴向接触变形与接触刚度	69
五、影响因素分析	71
第四节 双螺母滚珠丝杠副轴向接触刚度	73
一、双螺母预紧滚珠丝杠副的受力分析	73
二、双螺母预紧滚珠丝杠副的变形分析	74
三、双螺母预紧滚珠丝杠副轴向接触变形的求解及分析	76
四、双螺母预紧滚珠丝杠副轴向接触刚度的求解及分析	77
五、双螺母滚珠丝杠副轴向接触刚度影响因素的分析	78
第五节 滚珠丝杠副和行星式滚柱丝杠副静刚度比较	79
一、理论分析	79
二、行星滚柱丝杠副的载荷分布及变形	79
三、数值计算及结果分析	81
第六节 小结	82
参考文献	82
第四章 滚珠丝杠副摩擦机理及特性	83
第一节 概述	83
第二节 滚珠丝杠副摩擦力矩产生机理	83
一、弹性滞后阻力摩擦	84
二、滚珠与滚道面间差动滑动摩擦	85
三、滚珠与滚珠间滑动摩擦	85
四、滚珠在循环返回装置中摩擦	86
五、自旋滑动摩擦	88
六、润滑剂粘滞摩擦	88
第三节 摩擦力矩分析模型	89

一、由预紧载荷引起的摩擦力矩	89
二、摩擦力矩分析模型	92
第四节 滚珠丝杠副弹流润滑分析	92
一、Reynolds 方程	93
二、点接触弹流油膜厚度	93
三、滚珠丝杠副的润滑状态判别	95
四、润滑弹流膜特征	95
第五节 滚道制造误差对摩擦力矩的影响分析	95
一、载荷对滑动摩擦因数的影响	95
二、滚道加工误差对摩擦力矩影响的平均效应	96
第六节 摩擦力矩波动频率的讨论	97
第七节 小结	97
参考文献	98
第五章 滚珠丝杠副额定载荷	99
第一节 概述	99
第二节 滚珠丝杠副额定静载荷	100
一、滚珠丝杠副额定静载荷定义	100
二、静态负载极限	100
三、滚珠丝杠额定静载荷计算	102
第三节 滚珠丝杠副的额定动载荷	104
一、Lundberg-Palmgren 滚动疲劳统计理论	104
二、滚珠螺旋的螺母工作行程对承载能力的影响	112
三、滚珠丝杠副的额定动载荷	114
第四节 计算实例	123
参考文献	126
第六章 滚珠丝杠副典型失效分析	127
第一节 表面损伤失效	127
一、接触疲劳	127
二、磨损	128
三、腐蚀	129
第二节 严重变形	129
第三节 断裂失效	130
一、丝杠中频淬火后磨削产生裂纹	131
二、钢珠破裂	132
三、反向器凹陷或断裂	132
四、滚珠丝杠肩部断裂	132
第四节 运动间隙过大	132
一、丝杠预紧及预紧力丧失问题	132

二、扭转变形问题	133
三、轴承选用不当	133
四、支承座的表面平行度或平面度超差	134
五、螺母座或轴承刚度不足	134
六、螺母座或轴承座组装不当	134
七、电动机与滚珠螺杆结合不当	134
第五节 卡滞	134
一、发生卡滞	134
二、动作不顺畅	135
第六节 温升	135
一、润滑影响	135
二、预紧力影响	136
三、预拉伸影响	136
四、 Dn 值影响	136
第七节 小结	136
第七章 滚珠丝杠副传动设计及计算	137
第一节 滚珠丝杠传动系列尺寸选择	137
一、强度计算	137
二、稳定性计算	142
三、临界速度计算	144
第二节 滚珠丝杠传动驱动力矩和效率计算	145
第三节 设计计算步骤与实例	146
一、设计计算步骤	146
二、计算实例	147
第四节 滚珠丝杠传动简化算法	148
一、受力分析	148
二、工作滚珠的计算	149
三、工作寿命的分析	150
四、设计步骤与方法	153
第五节 行星滚柱丝杠设计	154
一、行星滚柱丝杠的结构	154
二、行星滚柱丝杠的参数	154
三、滚柱的布置	156
四、内齿圈和滚柱的端齿轮设计	157
五、行星滚柱丝杠的设计	158
六、精密传动机构行星滚柱丝杠的几何建模	158
七、材料选择及处理	160
第六节 数控机床滚珠丝杠可靠性优化设计	161
一、滚珠丝杠副静载荷的可靠性设计	161

二、滚珠丝杠副动载荷的可靠性设计	162
第七节 滚珠丝杠副的智能化设计	164
一、滚珠丝杠副选型智能化	164
二、基于 Pro/E 的滚珠丝杠参数化设计	165
第八节 计算实例	167
一、计算动载荷	168
二、选择滚珠丝杠副的系列尺寸	170
三、传动效率和驱动力矩计算	170
四、稳定性验算	170
五、临界转速计算	170
参考文献	172
第八章 滚珠丝杠副循环返回装置	173
第一节 概述	173
第二节 内循环反向器设计与分析	174
一、内循环反向器回珠槽的设计	174
二、五次抛物线型回珠曲线及反向器设计	175
第三节 外循环反向器设计与分析	188
一、套筒—螺旋槽式反向器的设计	188
二、插管式反向器的设计	189
三、滚珠丝杠副中滚珠与反向器的碰撞	195
第四节 滚珠丝杠副反向间隙调整方法	197
一、反向间隙测量	198
二、反向间隙调整方法	199
参考文献	202
第九章 滚珠螺旋传动防止逆转装置	203
第一节 对滚珠螺旋传动中防逆转装置的要求	203
第二节 防逆转装置的机构和工作原理	204
第三节 自锁器的选择和计算	206
一、单向自锁器	206
二、滑块拨叉自锁器——双向自锁器	213
三、自锁器主要工艺及使用特点	215
第十章 滚珠丝杠副系统设计	217
第一节 概述	217
第二节 滚珠丝杠副传动精度	218
一、间隙修正	220
二、导程误差修正	220
第三节 滚珠丝杠副传动系统的刚度	221

一、丝杠的刚度	222
二、滚珠螺母体的变形量及其刚度	224
三、支承轴承的轴向变形量及刚度	225
四、滚珠丝杠副传动系统总的动态变形量及综合弹性刚度系数	226
第四节 滚珠丝杠副传动系统驱动力矩	226
一、丝杠的加速力矩	227
二、丝杠的驱动力矩	227
三、滚珠螺旋的阻力矩	228
四、滚珠丝杠副传动系统的摩擦力矩	228
五、滚珠丝杠副的起动力矩	228
六、步进电动机的负荷力矩	228
第五节 滚珠丝杠副的热变形和预拉伸	229
一、滚珠丝杠副的温升	230
二、滚珠丝杠副的热变形	230
三、减少热变形影响的措施	231
第六节 丝杠对机床精度及稳定性的影响和解决方法	232
一、丝杠螺距误差	232
二、丝杠热变形误差	233
第七节 滚珠丝杠副的支撑单元设计选型	233
一、一端固定、一端自由方式	234
二、两端支承方式	234
三、一端固定、一端支承方式	234
四、两端固定方式	235
参考文献	236
第十一章 滚珠丝杠副润滑、防护及装配	237
第一节 润滑	237
一、润滑剂的功能	237
二、润滑剂对滚珠丝杠副摩擦及磨损的影响	237
三、对润滑剂的要求	239
四、润滑剂的选择	240
五、特殊使用环境下的润滑	240
六、润滑方式、润滑装置及润滑剂的补充和更换	242
第二节 冷却	244
第三节 防锈和表面处理	245
第四节 密封	245
第五节 防护	247
一、滚珠螺旋传动的安全防护装置	247
二、机床防护中的滚珠丝杠副防护罩	247
第六节 装配与调整	248

一、机床中滚珠丝杠的安装方式	248
二、滚珠丝杠的安装方法	250
三、滚珠丝杠的预拉伸	252
参考文献	256
第十二章 滚珠丝杠副性能测试与试验	257
第一节 滚珠丝杠副主要性能指标	257
一、滚珠丝杠副传动效率与摩擦力矩	257
二、定位（重复定位）精度、噪声、加速度、温度及温位移	257
三、轴向静刚度	258
四、轴向额定静载荷、动载荷及使用寿命	258
五、精度保持性与可靠性	259
第二节 精密滚珠丝杠副摩擦力矩测试	259
一、测试原理及方法	259
二、测试台构成	260
第三节 滚珠丝杠副综合性能动态测试	261
一、测试原理及方法	261
二、测试台构成	262
第四节 滚珠丝杠副轴向静刚度测试	263
一、测试原理及方法	263
二、数据采集系统	264
第五节 滚珠丝杠副精度保持性与寿命测试	265
一、测试原理	265
二、试验台构成	267
三、试验方法	268
第六节 滚珠丝杠副可靠性试验	269
一、试验原理	270
二、试验台构成	270
三、试验方法	271
参考文献	272
第十三章 滚珠丝杠副发展趋势	273
一、滚珠丝杠副产品高精度化是高档数控机床基本要求	273
二、滚珠丝杠副驱动方式日趋多样化	273
三、“滚动体”创新派生出高刚度重载产品	274
四、滚珠丝杠副运转速度大幅度提高，满足高速化、高加减速要求	275
五、产品规格扩大，普通型和特殊型发展并进	279
六、从单一性能检测发展为综合性能全方位检测	282
七、在几何量精度动态检测基础上向滚道型面误差测量拓展	283
八、精度保持性及可靠性成为今后行业研究重中之重	284

第一章 滚珠丝杠副传动综述

第一节 滚珠丝杠副发展历程

早在1874年,美国专利就记载有采用滚珠丝杠副(原理)传动的螺旋压力机。1879年德国专利和1906年英国专利,也都介绍过滚珠丝杠副传动的不同设计方法。一百年前,我国已有滚珠丝杠副(原理)传动的记载,早期的结构形式和现在的基本相似。但是由于生产力发展水平和制造工艺技术的限制,未能制造出真正使用的滚珠丝杠副。1940年,美国首先将滚珠丝杠副用于汽车转向机构上才真正成为商品。由于设计技术、制造工艺特别是精密螺纹磨削技术的发展,至1943年,才把精密滚珠丝杠副传动用于航空机械。

由于滚珠丝杠副具有独特的优良技术性能,引起了世界许多国家的高度重视,滚珠丝杠副传动的应用,随之也就扩展到其他的工作母机和加工机械上,尤其在飞行体和飞机方面的用量得到稳定增长。从20世纪50年代开始,应用滚珠丝杠副传动技术的国家日益增多,如美、英、意、日等工业发达国家,都先后建立了一个到几个专业厂,从事滚珠丝杠副的生产。由于滚珠丝杠副传动与滚动轴承同属“滚动化元件”,在机理方面有许多共性,可以说滚珠丝杠副传动是由滚动轴承演化而来的,并且又在汽车、航空工业中最先应用,故一些建厂较早的专业厂,总是同轴承厂、汽车厂、飞机厂联系在一起。日本“NSK”、“TSUBAKI”公司,意大利“SKF”公司,都是有名的轴承制造厂,当时年产滚珠丝杠副均在万套以上;英国“Rotax”公司系英国“Lucas”航空公司分厂,当时年产三万套以上;美国的“Saglnaw”公司乃是GM通用汽车公司分公司,当时年产滚珠丝杠副竟达几万套之多。所有这些厂家,都建立了从原材料供应、检验方法、钢珠配套、冷热加工、精密磨削和测试设备等完整的生产体系,以适应成批生产需要。

随着机床自动化发展,特别是1965年数控机床出现,促进了滚珠丝杠副产品品种和规格的发展。产品质量和产量的提高,进一步推动了设计技术和制造工艺的进步,迅速研制出加工滚珠螺母的专用机床。如GPA、Matix N070、Matix N069等大、中、小规格和内、外螺纹磨床配套生产;采用了旋风铣削法以代替传统的螺纹车削;采用冷轧丝杠新工艺,大幅度地提高了滚珠丝杠副的生产率,缩短了生产周期,降低了成本,反过来又促进了滚珠丝杠副品种和规格的扩大、质量和产量的进一步提高、理论研究

的发展、系列化和普及化的推广等方面的重大发展。

以日本为例，就可以看出滚珠丝杠副传动的发展规模。日本 1958 年试制成功，1959 年开始生产产业机械用滚珠丝杠副，随即生产用于汽车转向机构的滚珠丝杠副，进而推广到机床和一般机械进给传动和定位机构，投入了大量生产。1967 年，制订并公布了世界上第一个滚珠丝杠传动国家标准——JIS B1191，“MAS”机床制造者协会又制订了数控机床用滚珠丝杠传动精度规范。20 世纪 70 年代，日本滚珠丝杠传动厂家规格委员会在 ISO/TC39—WG7 促使下，到 1974 年又在国内 ISO/TC39 合同委员会内设立滚珠丝杠传动专门委员会，大力开展工作，于 1978 年组成滚珠丝杠传动专门委员会，对以前制订的 JIS B1191 提出修正案并进行了审议，除了将以前的 JIS 分为 JIS B1191（一般用滚珠丝杠副）和 JIS B1192（精密滚珠丝杠副）之外，还明确规定了各种术语的定义。同时对精密滚珠丝杠副的精度等级重新分为 C-1、C-3、C-5 三级，一般用滚珠丝杠传动的精度等级分为 C-7、C-10 两级，并使单个导程误差和累积导程误差的允许值与基本公差等级一致起来，而且还规定了丝杠和螺母装配精度的测量方法及规格值；对轴端形状和尺寸规定了五种形式，其目的是为了消除滚珠丝杠传动因制造轴端形状、尺寸的不一致而在生产和成本上带来不利的影响。1969 年 5 月，ISO 组织 TC39 技术委员会在华盛顿召开第四次工作会议，将滚珠丝杠副传动标准定为国际标准，并研究设置了滚珠丝杠副传动专门委员会（即 WG7），其代号为 ISO/TC39—WG7。该委员会制订并经 TC39 技术委员会通过了 ISO/DIS3048 国际标准化草案，并就滚珠丝杠副传动的专门用语及其意义，以及允许精度等作出了决定，就计算方法和测试方法的统一问题取得了一致看法。目前，日本的精密滚珠丝杠副同欧美各国一样，已成为数控机床、多工序自动数控机床、精密机床、精密测量仪器等精密进给传动和精密定位不可缺少的配套元件。在不长的时间内，就使高精度用途和大负荷用途的滚珠丝杠副传动生产成本迅速下降。NSK 在世界各地设有 4 所技术研究中心（日本、美国、欧洲、中国），技术研究中心担负着产品开发研究所需的评价试验、寿命试验和产品品质的验证等任务。技术研究中心对产品开发的研究成果、对生产的指导和产品品质的管理起到了很大的作用。

20 世纪中叶西方国家重工业迅猛发展，钢铁冶金工业、航空航天、重型军事装备、大飞机、大船、大型发电设备、第一代核电站等，催生了一批大（重）型数控机床及大型、重载滚珠丝杠副产品。例如：早期英国 Coventry 公司研制的直径 203mm、长 1.83m（内装 500 个 $\phi 15.075\text{mm}$ 钢球）的重载滚珠丝杠副，能承受 200t 载荷，用于炼钢设备；直径 102mm、长约 11m 用于核电站的耐热大型滚珠丝杠副。美国 Beaver 公司研制的直径 127mm、长 12.5m 的产品，则在大型雷达自动跟踪定位系统中大显身手。日本 NSK 公司也成功推出多款该类产品：用于超大型数控龙门铣床的滚珠丝杠副，直径 140mm、长 15m、导程 32mm。而直径 300mm、长 16m、自重达 9.5t 的“巨无霸”滚珠丝杠副产品，创世界之最。为了降低惯性力矩，NSK 还曾推出滚珠蜗母条（Ball

Rack), 并成功应用于超长行程的重型装备。英国 LUCAS-Rotax 公司专为飞机、航空航天、空港设备配套高可靠性大型空心滚珠丝杠副。近年来, 德国 Rexroth、A. M、INA、BLIS, 美国 LSI、Thomson, 西班牙 Korta、SHUTON, 日本 THK 以及中国台湾 HIWIN、PMI 等公司都相继推出大(重)、超长滚珠丝杠副和大规格、高刚度重载滚柱直线导轨副。早期的大型滚珠丝杠副直径大, 承载滚珠数量多(多列、多圈), 多采用外插管循环方式, 整体结构大而笨重。制造技术方面受工艺装备限制, 长丝杠在螺纹磨床上多采用工件穿过主轴孔逐段接刀磨削的方式, 或者采用分段制造再拼接至所需长度。螺纹的旋风铣削工艺虽然早已应用, 但基本上还属于低精度软、硬铣水平, 多用于粗加工和半精加工。

我国生产滚珠丝杠副始于 1958 年。五十多年来, 大约经历了四个阶段。第一阶段是 1958 ~ 1973 年, 为试制和间断单件生产; 第二阶段是 1973 ~ 1978 年, 为按系列化标准分工布点小批生产, 并开始了基础理论研究; 第三阶段是 1978 ~ 1982 年, 为学习国外先进技术, 展开基础元件攻关、进行产品更新换代; 第四阶段是 1982 年以后, 产品进入国内、国际市场, 参加 ISO 组织, 成立工作组开展对口活动, 进行综合性能攻关, 开创了新局面。我国现已初步形成了一百多个生产和科研单位, 拥有一千多人的专业队伍。近年来, 在行业中开展的理论研究、科学试验、技术攻关、产品更新换代等方面取得了较好成绩。如在原有系列化草案的基础上, 进一步修订系列化标准, 先后对内、外循环等九种新老产品完成了系列化设计, 研制了各种精度、性能检测仪器及试验设备。工艺上采用了开槽淬火、中频淬火、离子氮化等新技术, 投产的大型丝杠淬火机可以处理直径大于 100mm、长度为 10m 的丝杠。此外, 还开发了冷轧丝杠、空心丝杠、微型和特殊材料的滚珠丝杠副, 以满足航空航天、兵器、船舶、高铁、核电站等部门的需要。试制了激光反馈螺纹磨床、数控螺纹磨床、数控螺纹旋风铣床等新产品, 填补了国内空白。

目前国内滚珠丝杠副传动已开始批量系列化生产, 并进一步标准化, 产品规格不断更新, 质量和产量都有大幅度提高。在精度方面, 能稳定生产长度在 1500mm 以内的 P1 级滚珠丝杠副, 并能稳定生产长度在 4m 以下的 P2 ~ P3 级精密滚珠丝杠副, 还能生产 P4 ~ P5 级大型滚珠丝杠副。目前成本已大大降低, 特别是长度在 1m 以内的滚珠丝杠副, 价格降低了 50% 以上。进入 21 世纪, 中国装备制造业的重工业化出现了快速发展的态势。从最近几届中国国际机床展会 (CIMT) 上便能看出, 参展的大(重)型 CNC 机床以及大型、重载、超长滚动功能部件产品一届比一届更多, 更有新意。以 CIMT2009 展会为例, 滚动功能部件参展商中海外 13 家、大陆 7 家, 它们都竞相推出大型、重载、超长产品, 成为数控机床关键功能部件展品中十分引人注目的亮点。汉江机床有限公司利用自行开发的 SK7450 × 10m 超长 CNC 丝杠磨床, 整体精磨出 10m 精密滚珠丝杠副; 南京艺工和博特精工都引进了德国 Leistriz 公司最新的 PW300HP 型 8mCNC 旋风铣床, 硬精铣出整体 8m 以上的大型滚珠丝杠副。博特精工推出了用于冶

金设备和军工装备的行星式滚柱丝杠副。台湾 HIWIN 公司则推出了高刚度重载交叉滚柱丝杠副。大型、重载、精密、高速等高端产品在全球金融危机大环境中，将成为带动中国滚动功能部件产业走出低谷、继续向前发展的主导产品。

在科研方面，对疲劳寿命、额定动静负荷的计算、反向器空间曲面数学模型 CAD 软件的研究等，都取得了显著的成果。特别在国家科技重大专项的支持下，取得了多项攻关成果。汉江机床 GQ161.5 × 40 重型滚珠丝杠副，该丝杠副用户要求额定动载 203t，额定静载 879t，垂直安装，应用于汽车制造行业的冲压机床。为满足用户使用及承载要求，该丝杠采用中径为 $\phi 161.5\text{mm}$ ，导程 40mm，钢球 $\phi 30\text{mm}$ ，使用的钢球直径是目前国内之最，随着钢球的增大，淬硬层深度要求较深，给加工工艺及热处理工艺带来了较大难度，经过多次加工工艺及淬火试验，利用先进淬火设备，保证淬硬层深度，最终克服了在技术和加工设备方面的困难，成功研制出该重型滚珠丝杠副。汉江机床为 2013 年主机厂参展新产品配套滚动功能部件，如青海华鼎重型机床公司研发的 DLC-25GA 铁路专用机床、CKA8013B 铁路专用机床、DLC-15G 铁路专用机床，秦川机床研发的 YK7230 数控磨齿机，宝鸡机床研发的 CK7620P 数控车床，宁夏新瑞长城机床公司研发的 LS12 数控车床、LG63T 全功能数控车床，重庆机床研发的 Y3120 数控滚齿机，重庆九原机械公司研发的 VG635 立式数控铣床，重庆宏钢机床公司研发的 CX63/40L 数控车床，天津北闸口仪表机床厂研发的 CK6150Z 数控车床等。此外，汉江机床还为成飞、西飞的高端进口设备提供专项的替代新产品，与北京机电院、安阳鑫盛、中卫大河、天水机床等签订了项目合作协议，项目产品高速、重载、精密滚动功能部件将同时在这四家国内著名的主机厂家进行应用验证，形成应用示范。南京工艺与沈阳机床股份有限公司中捷立式加工中心事业部、齐重数控装备股份有限公司、齐齐哈尔二机床（集团）有限责任公司、南京二机齿轮机床有限公司签订了项目合作协议，国家科技重大专项产品高速、重载、精密滚动功能部件将同时在这四家国内著名的主机厂家进行应用验证，形成应用示范。为沈阳机床卧式精密加工中心 HMS125P 提供滚珠丝杠副、滚动导轨副配套；为中捷机床五轴联动加工中心 GMC1230U 提供滚珠丝杠、滚动导轨副配套；为沈阳机床高速龙门五轴加工中心 GMC2550u 提供滚珠丝杠副、滚动导轨副配套；为四川长征机床高速龙门五轴加工中心 GMC2500H/2X60A 提供滚珠丝杠副、滚动导轨副配套。同时专项产品为主机厂配套如下：武汉重型机床 TK6916AS 落地镗床主轴箱 Y 轴定位系统，CH5116、CH5231、CKD5240 数控立式车床，CK5235 双柱重型数控立式车床；德州德隆（集团）机床有限责任公司 ZXK2103A 数控深孔钻床三坐标轴定位系统；齐二机床 CK5225M 数控双柱立式车床；无锡机床 MK8450 数控轧辊磨床；桂林机床 XK2320 数控龙门铣床；无锡市飞象精密机床制造有限公司 M11200 宽砂轮无心磨；宜昌长机科技有限责任公司齿轮机床等。截止 2014 年 3 月，专项开发的新产品已为沈阳机床股份有限公司 HTC40n 型高速车削中心、VMC850e 精密立式加工中心，为齐重数控精密立车，为齐齐哈尔二机床（集团）有限

责任公司精密镗床，为南京二机齿轮机床有限公司齿轮机床提供产品配套，为四川普什宁江机床有限公司精密卧式加工中心、精密滚齿机提供产品配套，为青海一机数控机床有限责任公司精密卧式加工中心提供产品配套。山东博特完成高速精密滚珠丝杠副 KD4016X2200、KD4020X2450 批量生产，新产品在昆明机床、济南二机床、沈阳机床高档数控机床上推广使用。大连高金开发的三维外循环滚珠丝杠副 4016、5512，端侧循环滚珠丝杠副 32-55，导程 12mm、16mm 和 20mm 高速重载滚珠丝杠副 6316、8016 大批量应用于大连机床的加工中心及数控车床中。

近几年来，我国滚珠丝杠传动的应用范围大幅扩展到民用工业和国防工业各部门。南京工艺为雷达、空中加油机、导弹及核潜艇核反应堆阀门等提供配套，可靠性明显提升。汉江机床开发用于高速铁路“转辙机滚珠丝杠副”，经过 120 万次无故障运行，其使用寿命超过国外同类产品，成为高铁项目替代进口首选。山东博特在重载行星滚柱丝杠副方面取得突破，有效替代进口，目前在坦克、导弹发射架等军工方面得到了应用，成功研制开发多款微型丝杠产品，用于运-20、坦克瞄准系统等相关军工产品。可以预期，滚珠丝杠副传动具有的优越技术性能，在各类 NC、CNC（数控）机床、加工中心、精密机床和精密测量仪器、现代化武器装备、原子能反应堆传动装置，以及各种自动化控制的驱动系统，都会要求提供更多精密、高速、重载滚珠丝杠副。但也应看到，我国滚珠丝杠传动发展与国外先进国家相比差距还甚大，急需在理论研究、科学试验、工艺技术工业管理等方面开展大量工作。

第二节 滚珠丝杠副传动工作原理

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、高精度等方面的发展要求。

为了减小丝杠传动副的摩擦和提高传动效率，国内外已普遍采用以滚动摩擦代替滑动摩擦原理，简称“滚化”原理，创造了滚珠丝杠副这种先进的新型传动机构。对于滚珠丝杠副，其结构上最明显的特征是：构件间的可动联接通常不是借助于运动副本身，而是在丝杠和螺母两构件之间利用中间元件（滚珠）来实现的。滚珠丝杠副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，构成滚珠在闭合回路中循环的螺旋传动机构。如图 1-1、1-2 所示。当丝杠或螺母传动时，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，丝杠和螺母的相对运动借助于滚珠链的作用，把滑动

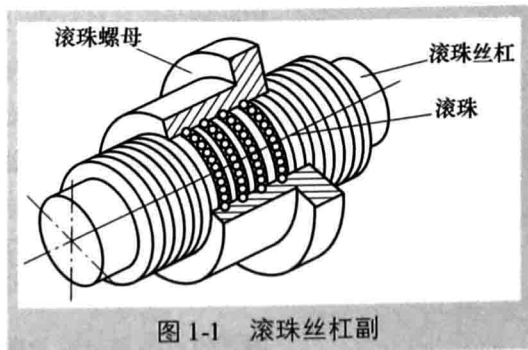


图 1-1 滚珠丝杠副