

冯虎田等◎编著



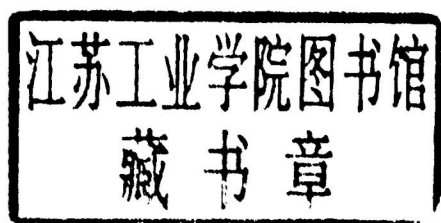
**滚珠丝杠副**  
**综合性能测量方法与技术**



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 滚珠丝杠副综合性能测量 方法与技术

冯虎田 等编著



机械工业出版社

大型精密螺纹可以实现长距离重载直线传动，是制约大型装备自主研发的最具代表性核心部件，也是各类大型重载机床的关键功能部件。本书强调精密滚珠丝杠的性能测试技术研究，详细介绍滚珠丝杠副性能测试方法与试验技术，以及相关的性能试验设备，具体包括：精密滚珠丝杠副综述、滚珠丝杠行程误差测量方法与技术、丝杠滚道型面误差测量方法与技术、高速滚珠丝杠综合性能动态测试方法与技术、滚珠丝杠摩擦力矩测量方法与技术、滚珠丝杠副预紧力测试方法与技术、滚珠丝杠副使用寿命检测与可靠性综合试验。本书可供相关企业、从事相关行业和科研工作的技术人员、教师及研究生参考使用。

### 图书在版编目（CIP）数据

滚珠丝杠副综合性能测量方法与技术/冯虎田等编著. —北京：机械工业出版社，2011.4

ISBN 978-7-111-34117-8

I. ①滚… II. ①冯… III. 滚珠丝杠—性能检测 IV. ①TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 060599 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：王天谔 责任编辑：朱光明

版式设计：王晓青 封面设计：周 军

北京汇林印务有限公司印刷

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.5 印张 · 380 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-34117-8

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

销售服务中心电话：(010) 88361066

购书热线电话：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着近年来国家装备制造业振兴规划和数控机床发展战略的实施,对国产滚珠丝杠副性能提升和产品升级提出了更高的要求,具有高速度、高精度和高负载能力的高性能滚珠丝杠副已成为滚珠丝杠产品发展的趋势。在这种发展趋势下,首先需要在滚珠丝杠副的设计、制造技术和加工工艺上不断提高和努力创新,同时也对滚珠丝杠副精度和性能检测方法与技术提出了越来越高的要求。事实上,在滚珠丝杠副生产过程中,针对其精度和性能的相关检测技术已成为保证产品质量和新产品研发成功必需的一种基础手段,相关检测设备与仪器在国产滚珠丝杠副性能提升与产品升级中起着不可替代的作用。

近二十多年来,国内外学者和滚珠丝杠副生产企业对滚珠丝杠副精度和性能检测方法与技术进行了大量研究和应用,取得了丰硕成果。作者在滚珠丝杠副精度和性能检测技术上进行了系统研究,与国内汉江机床有限公司、北京霹西自动化技术有限公司等主要滚珠丝杠副生产企业合作开发了一系列滚珠丝杠副精度与性能检测仪器与设备,取得了良好的经济效益和社会效益。

本书系统介绍了作者近十年来在滚珠丝杠副精度和性能检测方法与技术方面的研究成果,共分七章对滚珠丝杠副精度和性能检测的基本理论、方法技术以及系统开发进行了详细阐述。第一章介绍滚珠丝杠副检测技术发展趋势及现状。第二章主要讨论滚珠丝杠副行程误差检测方法与技术,并对所开发的测量仪器及其检测性能进行介绍与分析。第三章主要讨论滚珠丝杠外螺旋滚道型面误差的检测方法与技术,对其中一些算法进行了详细分析。第四章主要讨论了高速滚珠丝杠副综合性能动态测量方法与技术。第五章对滚珠丝杠副摩擦力矩测量方法与技术进行讨论,对所开发的摩擦力矩测量仪进行了介绍。第六章对滚珠丝杠副预紧力测量方法与技术进行介绍与分析。第七章从提高滚珠丝杠副使用寿命出发,主要讨论滚珠丝杠副使用寿命检测与试验技术。

本书第一、二章由冯虎田、张合、欧屹撰写,第三章由王禹林、冯虎田、李春梅撰写,第四章由冯虎田、韩军撰写,第五章由李春梅、冯虎田撰写,第六章由冯虎田、李春梅、殷爱华撰写,第七章由陶卫军撰写。另外,屠国俊、陶丽佳、丁梅、金娜、吴晓枫、张春健、吴景春、黄宽等参加全书的编

辑、校验工作，在此表示感谢。

本书研究内容得到南京理工大学和汉江机床有限公司等单位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

<b>第一章 精密滚珠丝杠副综述</b> .....	1
<b>第一节 绪论</b> .....	1
一、传动精度高 .....	2
二、传动效率高 .....	2
三、传动的可逆性 .....	3
四、同步性能好 .....	3
五、使用寿命长 .....	3
<b>第二节 国外滚珠丝杠副性能研究现状</b> .....	3
<b>第三节 国内滚珠丝杠副性能研究现状</b> .....	5
<b>第四节 改善高速滚珠丝杠副性能技术措施</b> .....	7
一、高速低噪声的轴向返回结构创新设计技术 .....	7
二、滚珠丝杠副冷却结构设计技术 .....	9
三、滚珠循环返回装置 .....	9
四、制造精度和定位精度 .....	10
五、螺母主传动技术 .....	10
六、减振降噪、自润密封技术 .....	11
七、摩擦磨损机理分析技术 .....	11
八、原材料及热处理制造技术 .....	12
九、高速、重载、精密滚珠丝杠副优化设计 .....	12
十、加工工艺技术 .....	13
<b>参考文献</b> .....	14
<b>第二章 滚珠丝杠行程误差测量方法与技术</b> .....	15
<b>第一节 绪论</b> .....	15
一、丝杠行程误差测量方法 .....	15
二、丝杠行程误差动态测量原理 .....	17
<b>第二节 丝杠行程误差测量系统</b> .....	19
一、基于双频激光丝杠行程误差测量系统 .....	19
二、基于长圆光栅丝杠行程误差测量系统 .....	27

三、测量系统主轴控制系统 .....	28
第三节 测控软件系统设计 .....	30
一、系统要求 .....	30
二、流程设计 .....	31
三、控制功能 .....	32
四、测量软件 .....	32
第四节 行程误差补偿 .....	34
一、温度对丝杠加工影响 .....	34
二、丝杠温升计算模型 .....	34
三、工件温升和热变形关系 .....	35
四、工件温升和热变形的简化计算 .....	36
五、温度变化引起丝杠热膨胀误差补偿 .....	41
六、长光栅栅线绝对位置误差分割补偿 .....	42
七、其他补偿问题 .....	42
第五节 丝杠导程综合精度标准的分析及误差优化算法 .....	43
一、丝杠副验收标准分析 .....	43
二、实际平均行程偏差求取方法 .....	43
三、丝杠误差分量求取优化算法 .....	44
第六节 丝杠动态测量仪检定规程与测量数据 .....	47
一、技术要求 .....	48
二、仪器外观要求 .....	48
三、检定条件 .....	49
四、检定项目 .....	49
五、测量仪的几何精度检定方法 .....	50
六、测量仪测量精度检验 .....	53
七、检定结果处理和检定周期 .....	54
八、测量数据及测量结果统计分析 .....	54
第七节 小结 .....	57
参考文献 .....	58
<b>第三章 丝杠滚道型面误差测量方法与技术 .....</b>	<b>59</b>
第一节 概述 .....	59
一、引言 .....	59
二、滚珠丝杠滚道型面主要几何参数 .....	60
三、滚珠丝杠滚道型面误差测量国内外研究现状 .....	61

第二节 测量系统总体设计	65
一、设计要求与性能参数指标	65
二、测量系统检测方案	66
三、系统总体构成	66
四、系统硬件配置	68
第三节 测量仪机械系统设计	69
一、概述	69
二、主轴箱设计	71
三、测量架和工作台设计	80
四、尾架设计	87
五、导轨设计	93
六、床身设计	95
第四节 电动机控制模块设计	97
一、电动机控制要求	97
二、电动机选型	98
三、电动机控制模块设计	100
第五节 滚道型面采集模块设计	102
一、滚珠丝杠滚道型面测量方式选择	102
二、传感器选型	102
三、采集模块组成与数据采集传输存储	105
第六节 算法设计与数据分析	106
一、轮廓曲线数据构成与数据划分	107
二、螺纹滚道数据分析与误差计算	108
第七节 试验数据与算法验证	115
一、试验对象	115
二、算法处理步骤	115
三、结果比较	117
第八节 系统软件设计	118
一、参数设置模块	120
二、动态测量模块	120
三、数据分析处理模块	121
四、数据维护	121
五、系统功能测试	123
第九节 小结	123
参考文献	124



<b>第四章 高速滚珠丝杠综合性能动态测试方法与技术</b> .....	127
第一节 绪论.....	127
第二节 系统构成.....	129
一、丝杠运行平台.....	129
二、测试系统构成.....	131
三、测试系统框架.....	131
四、传感器安装.....	132
五、软件功能.....	134
第三节 测试系统平台与模块设计.....	135
一、数据采集结构.....	135
二、参数测量模块设计.....	135
三、电动机控制模块设计.....	145
四、数据分析模块设计.....	148
五、报表查询.....	156
六、测试平台框架设计.....	158
第四节 性能参数测量与分析.....	162
一、温度测量与温位移测量分析.....	163
二、加速度测量分析.....	165
三、噪声测量分析.....	167
四、定位精度测量分析.....	169
第五节 电磁干扰分析.....	171
一、电磁干扰产生原因.....	171
二、电磁干扰信号的传播方式.....	171
三、抗电磁干扰的措施.....	171
第六节 小结.....	173
参考文献.....	174
<b>第五章 滚珠丝杠副摩擦力矩测量方法与技术</b> .....	175
第一节 滚珠丝杠副摩擦力矩测量意义及研究状况.....	175
一、滚珠丝杠副摩擦力矩测量意义.....	175
二、滚珠丝杠副摩擦力矩测量的研究现状.....	175
第二节 摩擦磨损机理.....	176
一、滚珠与丝杠螺母的接触特性.....	176
二、滚珠丝杠副摩擦力矩产生机理.....	180
三、摩擦力矩分析模型.....	186

四、滚珠丝杠副弹流润滑分析	189
第三节 滚珠丝杠副摩擦力矩测量系统设计	193
一、系统总体构成	193
二、硬件系统选型	196
三、测控系统测量原理	204
四、系统软件设计	206
五、系统抗干扰设计	208
六、数据处理和信号分析	212
七、软件操作界面和功能	224
参考文献	229
第六章 滚珠丝杠副预紧力测量方法与技术	231
第一节 概述	231
第二节 双螺母滚珠丝杠副预紧	232
一、双螺母预紧结构分类	232
二、预紧力对使用性能的影响及其范围的确定	234
三、制造误差对预紧力的影响	237
四、预紧力与空载预紧力矩的关系	242
第三节 双螺母滚珠丝杠副预紧力测试系统	243
一、测试系统要求	243
二、双螺母滚珠丝杠副预紧力间接测量法	244
三、双螺母滚珠丝杠副预紧力直接测量法	245
第四节 PVF <sub>2</sub> 预紧力传感器设计	246
一、PVF <sub>2</sub> 结构及特性	246
二、PVF <sub>2</sub> 的特性	247
三、PVF <sub>2</sub> 敏感元件设计	248
四、电路	250
第五节 PVF <sub>2</sub> 预紧力传感器性能试验	255
一、线性误差测量	256
二、滞后性误差测量	257
三、重复性误差测量	258
四、灵敏度测量及其误差计算	259
五、泄放试验	261
六、模拟加载试验	262
第六节 双螺母滚珠丝杠副预紧力测量	266

一、双螺母滚珠丝杠副预紧力的直接测量	266
二、 $M_{10}-F_p$ 试验	267
第七节 小结	269
参考文献	270

<b>第七章 滚珠丝杠副使用寿命检测与可靠性试验</b>	<b>271</b>
第一节 概述	271
第二节 滚珠丝杠副使用寿命与可靠性	272
一、滚珠丝杠副的使用寿命	272
二、使用寿命检测与可靠性试验	273
第三节 滚珠丝杠副可靠性试验方法	275
一、滚珠丝杠副可靠性试验基础	275
二、滚珠丝杠副可靠性工程试验	276
三、滚珠丝杠副可靠性测定试验	282
四、滚珠丝杠副可靠性验证试验	285
第四节 滚珠丝杠副可靠性评估	289
一、可靠性评估基本方法	289
二、滚珠丝杠副可靠性评估	291
三、滚珠丝杠副系统可靠性分析	296
第五节 滚珠丝杠副可靠性设计与优化	299
一、滚珠丝杠副结构特点与设计要求	299
二、滚珠丝杠副可靠性设计与优化	299
三、可靠性管理技术	301
第六节 小结	302
参考文献	302

# 第一章 精密滚珠丝杠副综述

## 第一节 绪 论

滚珠螺旋传动是在丝杠和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运动。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的作用，把滑动接触变成了滚动接触。因此，滚动螺旋传动相对于滑动螺旋传动而言，其螺旋传动机理，概括地说就是以滚动摩擦代替了滑动摩擦。这也是滚动螺旋传动具有独特的技术性能的物理本质所在。滚珠丝杠副是应用广泛的机械传动之一，其主要功能是将旋转运动转换成线性运动，或将转矩转换成轴向反复作用力，同时兼具高精度、可逆性和高效率的特点。滚珠丝杠副是由丝杠、螺母、滚珠等零件组成的机械元件，如图 1-1 所示。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<sup>[1]</sup>。滚珠丝杠副有良好的工作性能：传动效率高；传动精度和定位精度高；允许高速传动；磨损小、寿命长；经调整预紧后，可实现无间隙传动。

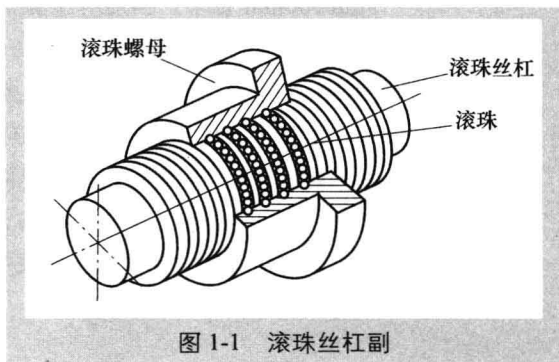


图 1-1 滚珠丝杠副

滚珠螺旋传动装置诞生于 1874 年，但直到 1940 年，美国通用汽车公司萨吉诺分厂将滚珠丝杠副用于汽车的转向机构上，滚珠丝杠副才开始被广泛应用于工业领域。在 20 世纪 50 年代，数控机床的诞生和自动化机械的发展提高了滚珠丝杠副的加工技术，大大推动了滚珠丝杠副的专业化生产。20 世纪 70 年代后期，以微电子技术发展为主导的第三次工业革命，使滚珠丝杠副应用日益广泛，滚珠丝杠副的专业化生产进一步提高。当前世界上先进的工业国家几乎都有若干个颇具规模的滚珠丝杠副专业生产厂，例如美国的 WARNER-BEAVER 公司、GM—SAGINAW 公司，英国的 ROTAX 公司，日本的 NSK 公司、TSUBAKI 公司，法国的 ALE，意大利的 SKF 等<sup>[2]</sup>。

1958 年，我国就曾将滚珠丝杠副成功应用于数控机床上。1964 年，自行研制出

第一套滚珠丝杠副。随着产品应用范围的不断扩大及制造水平的逐渐提高,我国滚珠丝杠副制造技术主要经历了下面几个发展阶段:1964~1982年,以北京机床研究所、汉江机床厂、南京工艺装备制造厂和南京理工大学为主,主要瞄准日本等先进产品技术进行模仿创新,并逐渐形成具有中国特色的产品工艺格局;1982~1991年,完成较为详细的部颁标准 JB 3162—1991《滚珠丝杠副》的修订,逐步形成以汉江机床有限公司、南京工艺装备制造厂、山东济宁博特精密丝杠制造有限公司、北京机床研究所为主要产研基地的全国专业化配套厂;1991~1998年,国内企业已经能够批量生产 P1 级高精度滚珠丝杠副,行业内制定了相应的滚珠丝杠副国家标准 GB/T 17587—1998《滚珠丝杠副》,该标准等效于 ISO 3408:1991《滚珠丝杠副》国际标准。

当前,高性能的滚珠丝杠副已成为滚珠丝杠副产品发展的趋势。所谓高性能就是指在高速度的基础上,丝杠副具有高精度稳定性,达到高刚性、大负载、自润滑、低噪声、小温升和长寿命等性能。要实现滚珠丝杠副的高性能,就需要在滚珠丝杠副的设计、制造及试验检测技术上不断的创新。

### 一、传动精度高

滚珠传动精度主要是指丝杠的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丝杠副具有较高的进给精度。高精度滚珠螺旋副,导程累积误差在  $5\mu\text{m}/300\text{mm}$  以下。当采用预紧螺母时,能完全消除轴向间隙。如果预紧力适当,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。并且由于滚珠螺旋传动的摩擦小,运行过程中的温升小,因此不但进给速度稳定,而且丝杠尺寸也非常稳定,具有较好的定位精度和重复定位精度。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。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,重要原因是其传动精度高。

### 二、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在 0.06~0.15 之间,摩擦阻力大,传递效率低(一般低于 40%)。然而,滚珠螺旋传动的摩擦系数经试验测得,一般为 0.002 5~0.003 5。显然,其传动摩擦阻力大大减小,传动效率得到很大提高。当摩擦系数  $\mu=0.003$ 、导程角  $\lambda=2^\circ$  时,传动效率可达 90%以上;当导程角  $\lambda=3^\circ$  时,传动效率可升至 95%以上;当  $\lambda$  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 2~4 倍,因此,滚珠螺旋传动相比滑动螺旋传动,就能以较小的动力推动较大负荷,而功率消耗只有滑动螺旋传动的 1/4~1/2,这不仅能大大减

轻操作者的劳动强度,而且对机械小型化、起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。

### 三、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)也同样高达98%。它既可把回转运动变成直线运动(简称正传动),又可把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,其突出的不同点是传动具有可逆性。当然,滚珠螺旋传动的逆效率高,一方面固然说明逆传动的长处,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,必须安装防逆转装置。因此,较滑动螺旋传动,带来了机构相对较复杂的缺点。但与静压螺旋传动相比,机构仍属简单紧凑,也易于维修。滚珠丝杠副螺旋传动过程中没有滑动粘滞摩擦,消除了传动过程中可能出现的爬行现象。滚珠丝杠副主要实现两种传动方式:将回旋运动变成直线运动,或将直线运动变成回旋运动。因此,与滑动螺旋传动相比,滚珠螺旋传动具有可逆性特点。

### 四、同步性能好

由于滚珠螺旋传动的滚动摩擦特性,摩擦阻力几乎与运动速度无关,静摩擦力矩极小,起动摩擦力矩与运动摩擦力矩接近相等,因此,运动起时无颤动,低速下运转无爬行。这不但缩短了起动的时问,消除了类似在滑动螺旋传动中的滑移现象,而且大大提高了传动的灵敏度与准确度,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,包括起动的同时性、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。

### 五、使用寿命长

由于滚珠丝杠副的丝杠、螺母和滚珠都经过淬硬和其他表面工艺处理,滚动摩擦产生的磨损极小,因此滚珠丝杠副的实际寿命要远高于滑动丝杠副。而且滚珠螺旋副经长期使用仍能保持其精度,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,而在某些特殊场合可高达10倍。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。

## 第二节 国外滚珠丝杠副性能研究现状

国外许多丝杠副生产厂家如日本THK、NSK从20世纪70年代开始研究试验,驱动线速度20~40m/min,90年代末达80m/min,而现在最高线速度达到120m/min,

并已成功应用于数控机床。根据最新资料显示,NSK 公司在试验条件下已经使滚珠丝杠副的线速度提高到 200m/min。欧洲一些发达国家也在 20 世纪 90 年代开始研制高速丝杠副,其运动速度达到 90m/min。

检测技术方面,日本 NSK 公司采用计算机对检测数据进行自动判别和处理,在 LMS 型 3m 激光丝杠动态检测仪上加了一套“导程精度自动评定系统”。它主要完成如下三个功能:(1)迅速完成数据处理,输出导程误差曲线,并根据 JIS 或 ISO 滚珠丝杠副标准判断出精度等级;(2)通过对图形放大、滤波获得精确数据,对误差进行统计分析;(3)对导程误差进行谐波分析。检测方式上,NSK 公司采用动态连续测量,为了获得与实际滚珠丝杠副工作状态接近的各种性能数据,NSK 研制了卧式连续动态预紧力矩测量机,安装在生产现场。使用时,可以自动使滚珠丝杠仪在高速状态下跑合 50 个回合,然后自动转入低速状态并开始自动测量和记录。在滚珠丝杠副检测的多功能化方面,联邦德国林德纳公司研制了 GMM—4 导程测量仪,对于各种不同牙型的丝杠,可以同时完成螺纹中径、单面导程误差和双面导程误差的测量。并且,能够对装配后的滚珠丝杠副同时进行综合导程精度和空载预紧力矩的测量。随着现代测试技术的快速发展,光电技术、数字化技术、微处理技术、图像显示技术和自动化技术得到了广泛的应用,智能化技术、柔性测试、计算机辅助测试等也得到了广泛的发展及应用,丝杠动态测量仪的研究也向高精度、快速化、智能化、模块化的方向发展。

国外对滚珠丝杠副的研究主要集中在日本、瑞典、德国、美国和韩国,虽然相关的文献并不多,但所研究的内容基本涵盖了丝杠副的结构、运动学、接触变形、刚度、载荷与寿命、摩擦、润滑、噪声、温升和热场分布等问题。日本长岗技术大学的学者五十岚昭南和德长靖在 1987~1995 年间,就滚珠丝杠副的噪声问题发表了五个研究报告。这五个报告以外循环管式滚珠丝杠副为研究对象,试验研究了滚珠丝杠副的噪声特性和几种典型噪声的产生原因,采用局部覆盖法辨别了钢球与导珠管的冲击噪声,研究波纹度频谱与噪声频谱的对应关系。他们的研究仅限于插管式丝杠副,没有涉及端盖式高速丝杠副,没有给出滚珠丝杠副中各种噪声机理。针对总体噪声美国威斯康辛大学的 Lin.M.C 对滚珠丝杠副的运动学和动力学作了初论研究,Hual-T.等采用中性轴理论,对滚珠的运动状态作了分析。前苏联学者 Belyaev.G 等研究了滚珠在回珠管中力的传递特性,回珠管几何参数与滚珠的流畅性之间的关系。日本学者 Y.ShidaT 等利用滚道控制理论研究了滚珠丝杠副中钢球接触力与运动规律,并将研究结果用于滚珠丝杠副的效率估计。Shimoda 研究了负载分布和制造误差对刚性的影响。Nakashima Katuhiro 和 FujiKazukiI 研究单螺母和双螺母预紧滚珠丝杠副的刚性。Belyaev 等研究了参数误差对实际接触角的影响,并给出了接触角选择的建议。海德汉公司的滚珠丝杠副研究报告从进给系统的结构、进给系统的刚度、滚珠丝杠轴承和滚珠丝杠全长上的温度分布几个方面研究了滚珠丝杠副系统的定位精度。日本早稻田

大学的 Shimoda.H 研究了端盖式结构的滚珠丝杠副滚珠循环过程中受到的阻力。日本学者 Murase.Z 等研究了不同润滑条件下滚珠丝杠副的静摩擦力矩。前苏联学者 Belayev.G 等研究了润滑剂对滚珠丝杠副磨损和温升的影响。罗马尼亚的 Olaru.D 等基于滚珠受力的平衡建立了新的摩擦力矩模型,利用数值计算方法分析了速度和载荷对总摩擦力的影响。日本长冈技术大学的 Euevarra.Domini.s 等研制了滚珠丝杠副跑合机,通过在线监测摩擦力矩的变化控制跑合过程,使滚珠丝杠副的力矩更平稳。韩国学者 Wons.Yun 等研究了滚珠丝杠的热伸长对数控机床的影响。Ahn.J.Y.等通过建模研究了滚珠丝杠副的实时温度分布和传递,并设计了监测器观察丝杠上的热源和实时温度分布。英国浦项工学 Kims.K 等利用有限元分析方法研究了滚珠丝杠副在不同转速和停止间隔下的二维热场分布,并利用实际测量结果验证了分析模型。日本学者 Ka.Jir.等测量了滚珠丝杠副的温升,利用测量结果计算了热传导,并根据测量结果和热传导理论分析了丝杠副上的热分布情况。Koderahik 等开发了光学测温系统,通过该系统得到了滚珠丝杠副的热分布,根据热分布情况估计了滚珠丝杠的热伸长。

### 第三节 国内滚珠丝杠副性能研究现状

滚珠丝杠副自 1874 年在美国获得专利至今已经有一百多年的历史了,而在我国却只有四十多年的开发研制、专业生产的历史。在这种情况下,我国滚珠丝杠副产业的发展水平与国外的水平相比就出现了较大的差距。从产品总体水平来看,我国滚珠丝杠副的性能落后于发达国家名牌产品,尤其是高性能、高档次的产品(高速、高精度、特高精度、低噪声等)与 NSK、THK、Rexroth 等知名企业有明显的差距,成为制约国产高档数控机床发展的瓶颈。

自 1964 年我国自行研制出第一套滚珠丝杠副以来,随着产品应用范围的不断扩大及制造水平的逐渐提高,滚珠丝杠副制造技术在经历了起步、发展、成熟阶段之后,现在已经进入了赶超世界先进水平的阶段。

我国自 20 世纪 50 年代以来,北京机床研究所、南京理工大学、华中科技大学和山东大学等单位对滚珠丝杠副做了大量的研究工作,这些研究主要围绕反向器结构和回珠曲线设计、接触变形和刚度计算、丝杠磨削精度控制以及丝杠副的检测技术等方面。瓦轴集团的王希悦等对插管式滚珠丝杠副回程角的设计计算进行了研究;毕兴国、曾政华、卜庆国等研究了内循环反向器的空间曲线设计方法;翁新根、韩琦等研究了圆弧型返回回珠曲线的设计;彭福提出了凸轮曲线结合螺旋线的回珠曲线;南京理工大学张超鹏等提出了五次抛物型回珠曲线的设计方法;南京理工大学沈守范研究了正螺旋面型回珠曲线的设计;马志等从几何角度研究了反向器结构;北京机床研究所和北京试验机滚珠丝杠副科技攻关组研究了内循环浮动式反向器的摩擦特性。这些研究多是在 20 世纪 80 年代进行的,对滚珠丝杠副的国产化以及提高国产丝杠滚道



反向的流畅性起到了决定性的作用。南京理工大学施祖康、沈守范等研究了滚珠丝杠副的接触变形和刚度问题,对提高丝杠副的静态刚度起到了积极的作用。西安交通大学梅雪松等对滚珠丝杠螺母副的载荷分布与制造误差之间的关系进行了理论分析,东南大学的黄寿荣分析了滚珠丝杠副摩擦力矩的影响因素,上海江宁机床厂的赵训贵针对丝杠螺纹滚道误差对接触角和变位导程及摩擦力矩的影响及相互关系进行了分析。上述工作限于试验条件,只进行了理论上的分析,没有进行试验验证。山东大学的宋现春,华中科技大学的宋洪涛、徐志良、王永业、徐健等研究了滚珠丝杠磨削精度的控制,对磨削过程中丝杠的温升和热变形进行了估计和预报,采用前馈和激光反馈等方法对误差进行补偿。这些工作开展于20世纪末、21世纪初,对于提高国产丝杠副的螺距加工误差起到了决定性作用,大大缩短了国产丝杠副与国外先进产品精度指标。20世纪90年代,华中理工大学的阳佳、宾鸿赞对滚珠丝杠副导程误差的计算机辅助测量进行了研究。近些年来,北京机床研究所焦洁、南京理工大学冯福田、殷爱华等对滚珠丝杠副的测量工作开展了卓有成效的研究,开发了滚珠丝杠螺距误差测量仪和综合性能试验台等测试设备。这些研究工作对完善滚珠丝杠副测试技术,以及提高国产滚珠丝杠副的精度与性能指标起到了非常重要的作用。

哈尔滨工业大学的王波,国防科技大学的郑子文、李圣怡研究了丝杠副进给系统的微动特性,利用滚珠丝杠副进给系统实现了纳米级的定位。山东大学的张涛通过对滚珠丝杠副和伺服系统的转距测量,建立了工作台的模型,并进行了仿真研究。上述研究都是以滚珠丝杠副进给系统为研究对象,从使用的角度出发,而不是针对滚珠丝杠副产品本身的研究。山东大学的姜洪奎博士进行了大导程滚珠丝杠副的动力学分析和加工方法的研究,建立了考虑导程角的接触变形模型,应用ADAMS软件对滚珠在回珠管中的动力学进行了仿真分析,提出了同时改变砂轮安装角度和滚道截型的大导程螺母加工方法。另外,中国台湾国立成功大学的Ehinchungwei, JenFinLin对滚珠丝杠副的动力学进行了理论分析,分析中考虑了变接触角和弹性变形,但没与丝杠副的具体性能建立直接的联系,所以也无法用试验去验证其理论分析的正确性。

上述这些研究工作的开展对国产滚珠丝杠副的发展起到了非常重要的作用,使国产丝杠副的精度指标基本接近了国外先进产品,性能指标也得到了提高。但是在噪声、摩擦力矩等性能指标以及润滑等方面的研究基本处于空白状态,基础研究的缺乏直接导致了国产滚珠丝杠副高速性能与国外产品的差距逐渐在加大。对于滚珠丝杠副这样的精密机械来说,技术必须要有理论和试验依据,光靠观摩或模仿是行不通的,要提高国产丝杠副的高速性能,加强基础研究是必经之路。

目前国内在滚珠丝杠副摩擦力矩的影响因素和波动原因、合理的润滑参数以及高速下的噪声机理方面的研究基本上还处于空白状态,对这些问题还没有一个非常统一的认识,行业内也迫切需要这方面的理论和试验研究为提高产品性能提供科学依据。目前,我国在滚珠丝杠副产业上与国外还有很大的差距,其中丝杠副检测技术不