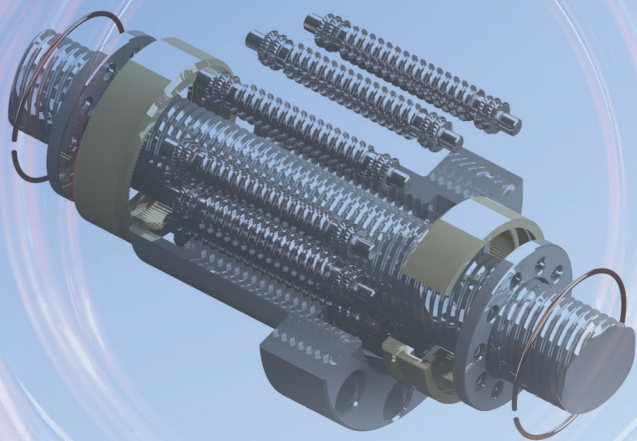




# 行星滚柱丝杠传动 ——啮合原理

刘更 马尚君 付晓军 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 行星滚柱丝杠传动 ——啮合原理

刘 更 马尚君 付晓军 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

行星滚柱丝杠是一种可将旋转运动和直线运动相互转化的机械传动机构,本书主要介绍其传动原理相关内容。全书共8章,首先详细介绍五种常用的行星滚柱丝杠传动工作原理、典型行星滚柱丝杠传动运动原理和参数匹配设计方法。其次建立无误差/含误差行星滚柱丝杠传动的啮合模型和运动学模型,讨论结构参数与误差对其啮合状态与运动学特性的影响。最后给出基于拉格朗日方程和牛顿第二定律的行星滚柱丝杠传动的动力学模型,并对不同使用工况下该传动机构的动力学特性进行仿真分析。附录中介绍有关章节用到的基础理论知识。

本书可作为高等院校机械及相关专业师生的参考书和教材,也可作为相关行业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

行星滚柱丝杠传动:啮合原理/刘更,马尚君,付晓军著. —北京:科学出版社,2019.2

ISBN 978-7-03-060008-0

I. ①行… II. ①刘… ②马… ③付… III. ①丝杠传动-研究 IV. ①TH139

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第294313号

责任编辑:杨丹 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年2月第一版 开本:720×1000 B5

2019年2月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:307 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

行星滚柱丝杠是一种可将旋转运动和直线运动相互转化的机械传动机构。它通过多个滚柱与丝杠和螺母之间的多点螺旋曲面啮合来传递运动及动力，与现有常用的滚珠丝杠传动相比，具有承载力高、刚性大、寿命长、动态性能良好和安装及维护方便等优点，是智能装备和装备自动化的关键功能部件，在航空、航天、船舶、石化、电力、食品包装、医疗器械等领域中具有广阔的应用前景。

自 1942 年瑞典人 Carl Bruno Strandgren 发明行星滚柱丝杠以来，对其基础理论的研究进展一直比较缓慢。近年来，随着制造技术的进步和应用需求领域的不断增加，行星滚柱丝杠传动受到国内外高校和科研生产企业极大的重视，得到了一系列系统深入的研究，已在国内外机电装备中初步凸显了其大推力、高精度和高功率密度的优势。同时，相关研究成果不断增加，已成为国内外机电传动和伺服控制领域学者关注的焦点之一。

本书作者长期从事机械传动方面的研究。初次接触行星滚柱丝杠传动，作者就被其多点、多副、多体的传动特点所吸引，随后带领课题组围绕行星滚柱丝杠传动机构展开研究。对行星滚柱丝杠参数匹配设计、啮合原理、运动原理等相关理论和方法进行了系统深入的研究，完成了从理论推导到参数优化匹配设计的关键步骤，并将其应用于样机研制等有关工程问题中。虽然行星滚柱丝杠传动已经得到广泛重视，初步显示了其广阔的应用前景，但是目前国内外尚没有关于行星滚柱丝杠传动原理的书籍公开出版。基于此，本书作者总结自己的研究成果和国内外相关研究文献，全面系统介绍行星滚柱丝杠传动原理的基本内容，为读者学习掌握相关知识以及进行产品设计提供参考。

全书共 8 章，详细介绍五种常用的行星滚柱丝杠传动工作原理、典型行星滚柱丝杠传动运动原理、参数匹配设计、无误差/含误差行星滚柱丝杠传动的啮合模型、运动学模型以及基于拉格朗日方程和牛顿第二定律的动力学模型等。本书对行星滚柱丝杠传动啮合原理和运动原理相关内容的介绍图文并茂、通俗易懂、系统详尽，注重理论、方法与工程应用的结合，这不仅有利于读者学习相关基础理论知识，也有利于相关企业掌握行星滚柱丝杠传动复杂的参数匹配设计知识。本书系统整理了作者的研究成果，并且广泛参考了国内外相关代表性论著，在此向各位作者表示感谢。

美国得克萨斯大学阿灵顿分校副校长、西北工业大学客座教授 Teik C.Lim,

浙江大学谭建荣院士，西安电子科技大学段宝岩院士，以及重庆大学秦大同教授等对作者研究工作给予的极大支持和帮助，使作者受益匪浅。在本书初稿完成后，各位专家提出了许多宝贵意见，在此表示深深的谢意。

本书研究工作先后得到了国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家自然科学基金和科研院所课题等项目的支持。陕西省机电传动与控制工程实验室教师佟瑞庭、周勇、吴立言以及研究生张文杰、乔冠、雷鑫、党金良、董永、李亚杰等为本书做出了贡献，在此一并表示衷心感谢。

受专业与水平所限，本书在取材和论述中难免有不足之处，敬请广大读者提出宝贵意见。

作者

2018年6月

# 目 录

前言	
符号表	
第 1 章 绪论	1
1.1 行星滚柱丝杠传动简介	1
1.1.1 行星滚柱丝杠传动的工作原理	1
1.1.2 行星滚柱丝杠传动的结构形式和分类	1
1.2 行星滚柱丝杠传动的应用	5
1.2.1 行星滚柱丝杠传动的应用领域	5
1.2.2 基于行星滚柱丝杠的 EMA 应用	6
1.3 行星滚柱丝杠传动啮合原理与运动特性研究现状	10
1.3.1 行星滚柱丝杠传动参数设计研究现状	10
1.3.2 行星滚柱丝杠传动啮合特性研究发展历程	11
1.3.3 行星滚柱丝杠运动学和动力学研究现状	13
1.4 本书主要内容	15
参考文献	16
第 2 章 行星滚柱丝杠运动原理	19
2.1 标准式行星滚柱丝杠运动原理	19
2.1.1 角速度关系	19
2.1.2 螺纹旋向定义	20
2.1.3 螺母螺纹旋向和头数关系	21
2.1.4 丝杠螺纹旋向和头数关系	22
2.1.5 滚柱的圆周分布	24
2.2 反向式行星滚柱丝杠运动原理	24
2.2.1 角速度关系	24
2.2.2 丝杠螺纹旋向和头数关系	25
2.2.3 螺母螺纹旋向和头数关系	26
2.3 差动式行星滚柱丝杠运动原理	28
2.3.1 角速度关系	28

2.3.2	滚柱个数与头数关系 .....	29
2.3.3	导程关系 .....	30
2.4	考虑节圆偏移的行星滚柱丝杠运动学分析 .....	31
2.4.1	节圆偏移产生机理 .....	31
2.4.2	考虑节圆偏移的运动学方程 .....	32
2.4.3	滑动角计算 .....	34
2.4.4	滚柱轴向位移计算 .....	35
2.4.5	滚柱偏移对导程的影响 .....	36
2.4.6	滑动速度计算 .....	37
2.4.7	无量纲化 .....	38
2.4.8	算例 .....	39
	参考文献 .....	41
<b>第3章</b>	<b>行星滚柱丝杠参数匹配设计</b> .....	<b>42</b>
3.1	标准式行星滚柱丝杠参数匹配设计条件 .....	43
3.1.1	滚柱与螺母相互滚动条件 .....	43
3.1.2	滚柱与螺母无相对轴向位移条件 .....	44
3.1.3	螺纹副与齿轮副同心条件 .....	45
3.1.4	滚柱空间布置条件 .....	45
3.1.5	滚柱与丝杠螺旋线不干涉条件 .....	46
3.1.6	螺纹头数与滚柱个数关系 .....	47
3.1.7	滚柱齿与螺纹正确啮合条件 .....	48
3.1.8	滚柱装配条件 .....	48
3.2	滚柱参数匹配设计 .....	49
3.2.1	滚柱参数匹配设计基本思路 .....	49
3.2.2	由螺纹参数推导齿轮参数及其流程 .....	50
3.2.3	由齿轮参数推导螺纹参数及其流程 .....	53
3.2.4	虚拟建模和装配方法 .....	56
3.2.5	滚柱螺纹旋向设计 .....	61
3.2.6	常见参数匹配组合 .....	63
3.3	反向式行星滚柱丝杠参数匹配设计方法 .....	64
3.3.1	反向式行星滚柱丝杠参数匹配条件 .....	64
3.3.2	反向式行星滚柱丝杠与标准式行星滚柱丝杠参数匹配的区别 .....	65
3.3.3	反向式行星滚柱丝杠参数匹配设计举例 .....	65
	参考文献 .....	66

---

<b>第 4 章 行星滚柱丝杠的啮合特性</b> .....	68
4.1 螺旋曲面方程 .....	69
4.2 基于螺旋曲面的解析啮合模型 .....	74
4.2.1 螺旋曲面的相切接触条件 .....	74
4.2.2 丝杠和滚柱之间的接触位置与轴向间隙 .....	76
4.2.3 螺母和滚柱之间的接触位置与轴向间隙 .....	78
4.3 其他行星滚柱丝杠啮合模型 .....	80
4.3.1 基于螺旋曲面离散的数值啮合模型 .....	80
4.3.2 基于螺旋曲线的解析啮合模型 .....	82
4.4 不同啮合模型的结果对比与螺旋曲面的轴向间隙分布 .....	83
4.4.1 不同行星滚柱丝杠啮合模型的计算结果对比 .....	83
4.4.2 啮合螺旋曲面的轴向间隙分布 .....	85
4.5 结构参数对标准式行星滚柱丝杠啮合特性的影响 .....	86
4.5.1 螺距影响 .....	86
4.5.2 牙侧角影响 .....	88
4.5.3 滚柱轮廓半径影响 .....	90
参考文献 .....	91
<b>第 5 章 考虑误差的行星滚柱丝杠啮合特性</b> .....	93
5.1 行星滚柱丝杠误差的描述 .....	93
5.1.1 牙型误差和螺纹的分头误差 .....	93
5.1.2 丝杠、滚柱和螺母偏斜 .....	95
5.2 考虑误差的标准式行星滚柱丝杠啮合模型 .....	97
5.2.1 改进的相切接触条件 .....	97
5.2.2 螺纹牙编号规则 .....	98
5.2.3 丝杠和滚柱的啮合方程 .....	100
5.2.4 螺母和滚柱的啮合方程 .....	102
5.3 标准式行星滚柱丝杠啮合特性与间隙向量方向的关系 .....	105
5.4 标准式行星滚柱丝杠啮合特性与误差关系 .....	107
5.4.1 牙型误差 .....	107
5.4.2 螺纹分头误差 .....	110
5.4.3 滚柱和螺母的偏斜 .....	114
参考文献 .....	117
<b>第 6 章 考虑误差的行星滚柱丝杠传动运动学</b> .....	118
6.1 偏心误差与位置误差 .....	118

6.1.1	偏心误差	118
6.1.2	位置误差	120
6.2	间隙与刚体接触约束条件	121
6.2.1	螺纹牙之间的轴向间隙	121
6.2.2	滚柱和保持架之间的径向间隙	124
6.2.3	滚柱和内齿圈之间的法向间隙	125
6.2.4	滚柱浮动区域	127
6.2.5	螺母附加刚体位移	128
6.3	考虑误差的标准式行星滚柱丝杠运动学模型	129
6.3.1	含误差的齿轮副传动比	129
6.3.2	含误差的螺母轴向移动速度	130
6.4	实例计算	133
6.5	结构和装配参数及其误差对滚柱浮动区域的影响	136
6.5.1	滚柱卡滞状态的判断方法	136
6.5.2	滚柱个数、滚柱与保持架的名义径向间隙	137
6.5.3	螺母安装角以及丝杠和保持架的初始旋转角度	138
6.5.4	螺母和保持架销孔的位置误差	140
6.5.5	丝杠、螺母、保持架和滚柱的偏心误差	140
6.6	结构和装配参数及其误差对轴向间隙和传动误差的影响	142
6.6.1	滚柱个数	142
6.6.2	螺纹分头误差	143
6.6.3	螺母安装角以及丝杠和保持架的初始旋转角度	144
6.6.4	螺母、丝杠和保持架的偏心误差	147
6.6.5	滚柱浮动轨迹	150
	参考文献	152
<b>第 7 章</b>	<b>基于拉格朗日方法的行星滚柱丝杠刚体动力学</b>	<b>153</b>
7.1	标准式行星滚柱丝杠的刚体动力学模型	153
7.1.1	标准式行星滚柱丝杠的系统动能	153
7.1.2	标准式行星滚柱丝杠的广义力	155
7.1.3	标准式行星滚柱丝杠的拉格朗日方程	161
7.2	反向式行星滚柱丝杠的刚体动力学模型	163
7.2.1	反向式行星滚柱丝杠的系统动能	163
7.2.2	反向式行星滚柱丝杠的广义力	165
7.2.3	反向式行星滚柱丝杠的拉格朗日方程	171

---

7.3 标准式行星滚柱丝杠动态特性的参数敏感性分析 .....	173
7.3.1 丝杠和滚柱的摩擦系数 .....	173
7.3.2 丝杠转速 .....	175
7.3.3 螺母负载 .....	177
7.4 反向式行星滚柱丝杠动态特性的参数敏感性分析 .....	179
7.4.1 螺母和滚柱的摩擦系数 .....	179
7.4.2 螺母转速 .....	181
7.4.3 丝杠负载 .....	182
参考文献 .....	184
<b>第 8 章 基于牛顿第二定律的行星滚柱丝杠刚体动力学 .....</b>	<b>185</b>
8.1 坐标系的建立 .....	185
8.2 受力分析 .....	188
8.2.1 螺纹牙之间的接触力 .....	188
8.2.2 保持架、内齿圈和滚柱之间的受力 .....	189
8.2.3 丝杠与滚柱之间的摩擦力 .....	190
8.2.4 螺母与滚柱之间的摩擦力 .....	191
8.3 标准式行星滚柱丝杠的动力学模型 .....	193
8.3.1 丝杠动力学方程 .....	193
8.3.2 滚柱动力学方程 .....	194
8.3.3 螺母动力学方程 .....	196
8.3.4 保持架动力学方程 .....	197
8.4 不同动力学模型的计算结果对比 .....	198
8.5 摩擦系数、螺母负载和结构参数的影响 .....	199
8.5.1 接触螺纹间摩擦系数 .....	199
8.5.2 保持架和滚柱间摩擦系数 .....	200
8.5.3 螺母负载 .....	202
8.5.4 滚柱个数 .....	203
8.5.5 螺距和牙侧角 .....	203
参考文献 .....	206
<b>附录 A 速度瞬心求解方法 .....</b>	<b>208</b>
参考文献 .....	209
<b>附录 B .....</b>	<b>210</b>
附录 B1 坐标的齐次变换 .....	210
附录 B2 曲面的参数化表示 .....	212

附录 B3 曲面相切接触条件 .....	213
参考文献 .....	214
<b>附录 C</b> .....	<b>215</b>
附录 C1 拉格朗日方程 .....	215
附录 C2 牛顿第二定律 .....	216
参考文献 .....	217
<b>附录 D 平面库埃特流动理论</b> .....	<b>218</b>
参考文献 .....	219
<b>附录 E 三维弹性体滚动接触理论</b> .....	<b>220</b>
参考文献 .....	222

# 符号表

$a_i$	牙顶高
$a_{RN}$	滚柱与螺母中心距
$a_{RS}$	滚柱与丝杠中心距
$a_{En}$ 、 $b_{En}$	接触区域 $A_{En}$ 的长半轴与短半轴
$b_i$	牙底高
$b$	滚柱齿轮齿宽
$c_i$	半牙厚
$c^*$	齿轮顶隙系数
$d_i$	中径
$d_{Sa}$	丝杠螺纹大径
$d_{Ra}$	滚柱螺纹大径
$d_{Rg}$	滚柱齿轮节圆直径
$d_{Rga}$	滚柱齿轮齿顶圆直径
$d_{Rgf}$	滚柱齿轮齿根圆直径
$d_{lm}^{pq}$	曲面 $l_l$ 和 $l_m$ 之间的间隙向量
$e_S$	丝杠偏心误差的幅值
$e_q$ 、 $e_{qg}$	滚柱# $q$ 螺纹和直齿相对于销轴偏心误差的幅值
$e_{qr}$ 、 $\phi_{qr}$	滚柱# $q$ 旋转轴与其销轴的距离和相位角
$e_N$ 、 $e_{Ng}$ 、 $e_p$	螺母、内齿圈和保持架偏心误差的幅值
$e_{lm}^{pq}$	单位矢量，表示曲面 $l_m$ 移动的方向
$F_{Nz}$	作用在螺母上的轴向载荷
$F_{qs}^k$ 、 $F_{qn}^k$	接触力 $F_{qs}^{q_c, k}$ 和 $F_{qn}^{q_c, k}$ 的幅值
$F_{qs}^{all}$ 、 $F_{qn}^{all}$	丝杠和滚柱# $q$ 以及螺母和滚柱# $q$ 之间接触力的总和
$F_{qn}$ 、 $F_{qs}$	滚柱螺纹所受螺母和丝杠的接触力
$F_{qn,x}$ 、 $F_{qs,x}$	滚柱螺纹所受螺母和丝杠的径向力
$F_{qn,y}$ 、 $F_{qs,y}$	滚柱螺纹所受螺母和丝杠的切向力

$F_{qnz}$ 、 $F_{qs_z}$	滚柱螺纹所受螺母和丝杠的轴向力
$F_{qg_y}^\ell$	接触力 $F_{qg}^{q_c, \ell}$ 的横向分量
$F_{qp_x}^\ell$ 、 $F_{qp_y}^\ell$	$F_{qp}^{q_c, \ell}$ 的径向分量和横向分量
$f_{qp}^{q_c, \ell}$	作用在滚柱# $q$ 的第 $\ell$ 个销轴上的摩擦力 ( $\ell=1,2$ )
$f_{Sq}^{P, k}$	滚柱# $q$ 的第 $k$ 个螺纹牙作用在丝杠上的摩擦力
$f_{Nq}^{P, k}$	接触点 $o_{Nq}^k$ 处的摩擦力
$f_{qn}^{q_c, k}$	作用在滚柱# $q$ 的第 $k$ 个螺母侧螺纹牙上的摩擦力
$f_{qs}^{q_c, k}$	作用在滚柱# $q$ 的第 $k$ 个丝杠侧螺纹牙上的摩擦力
$f_{Rsq}^P$	坐标系 $o_{p_q}-x_{p_q}y_{p_q}z_{p_q}$ 中丝杠作用在滚柱# $q$ 上的摩擦力
$f_{Rnq}^P$	坐标系 $o_{p_q}-x_{p_q}y_{p_q}z_{p_q}$ 中螺母作用在滚柱# $q$ 上的摩擦力
$F_{qs}^{q_c, k}$ 、 $F_{qn}^{q_c, k}$	作用在滚柱# $q$ 的第 $k$ 个螺纹牙上的在丝杠侧和螺母侧的接触力
$F_{qg}^{q_c, \ell}$	作用在滚柱# $q$ 的第 $\ell$ 个直齿上的接触力 ( $\ell=1,2$ )
$F_{qp}^{q_c, \ell}$	作用在滚柱# $q$ 的第 $\ell$ 个销轴上的接触力 ( $\ell=1,2$ )
$F_{Sq}^{P, k}$	滚柱# $q$ 的第 $k$ 个螺纹牙作用在丝杠上的接触力
$F_{Np}^\ell$	螺母和保持架之间的接触力
$F_{Nqg}^{P, \ell}$	内齿圈和滚柱上第 $\ell$ 个直齿的接触力
$F_{Nq}^{P, k}$	接触点 $o_{Nq}^k$ 处的接触力
$F_{Rsq}^P$	在坐标系 $o_{p_q}-x_{p_q}y_{p_q}z_{p_q}$ 中丝杠作用在滚柱# $q$ 上的接触力
$F_{Rnq}^P$	在坐标系 $o_{p_q}-x_{p_q}y_{p_q}z_{p_q}$ 中螺母作用在滚柱# $q$ 上的接触力
$h_N$	螺母初始位置
$h_p^\ell$ 和 $r_p^\ell$	保持架 # $\ell$ 的厚度与半径
$h_q$	接触点 $o_{qp}^1$ 和 $o_{qp}^2$ 之间的轴向距离
$h_g$	接触点 $o_{qp}^1$ 和 $o_{qg}^1$ 的轴向距离
$h_a^*$	滚柱齿顶高系数
$H$	螺纹牙高
$H'$	齿轮齿高
$H_i$	零件坐标系 $o_i-x_iy_iz_i$ 向整体坐标系 $O-XYZ$ 转换的旋转矩阵
$H_{xi}$	绕 $x_i$ 轴的旋转矩阵
$H_{yi}$	绕 $y_i$ 轴的旋转矩阵
$H_{zi}$	绕 $z_i$ 轴的旋转矩阵

$H_{p_q}$	坐标系 $o_{p_q}-x_{p_q}y_{p_q}z_{p_q}$ 向整体坐标系 $O-XYZ$ 转换的旋转矩阵
$H_{q_i}^{p_q}$	坐标系 $o_{q_i}-x_{q_i}y_{q_i}z_{q_i}$ 向局部坐标系 $o_{p_q}-x_{p_q}y_{p_q}z_{p_q}$ 转换的旋转矩阵
$H_{q_c}^{p_q}$	坐标系 $o_{q_c}-x_{q_c}y_{q_c}z_{q_c}$ 向局部坐标系 $o_{p_q}-x_{p_q}y_{p_q}z_{p_q}$ 转换的旋转矩阵
$H_{N_q}^{p_q}$	坐标系 $o_{N_q}-x_{N_q}y_{N_q}z_{N_q}$ 向局部坐标系 $o_{p_q}-x_{p_q}y_{p_q}z_{p_q}$ 转换的旋转矩阵
$H_{En}^{Nq}$	坐标系 $o_{En}-x_{En}y_{En}z_{En}$ 向坐标系 $o_{N_q}-x_{N_q}y_{N_q}z_{N_q}$ 转换的旋转矩阵
$i$	$i=S, N, q$ , 分别代表丝杠、螺母和滚柱# $q$
$i_{SR}$	丝杠与滚柱啮合传动比
$i_{NR}$	螺母与滚柱啮合传动比
$J_S$	丝杠的转动惯量
$J_N$	螺母的转动惯量
$J_q$	滚柱# $q$ 的转动惯量
$J_p^l$	保持架# $l$ 的转动惯量
$j$	丝杠或螺母的螺纹编号, $j=1, 2, \dots, n_i$
$k$	滚柱的螺纹牙编号
$K$	正整数
$k_m$	丝杠和滚柱节圆直径比
$k_{Rs}, k_{Rn}$	滚柱在丝杠侧和螺母侧的螺纹牙编号
$k'_{Rn}, k'_{Rs}$	滚柱# $q^*$ 上与螺母和丝杠相接触螺纹牙的编号
$k_N$	螺母螺纹牙编号
$l_{AA'}$	滚柱和螺母啮合点 $A$ 与点 $A'$ 的相对轴向位移
$l_{BB'}$	滚柱和丝杠啮合点 $B$ 与点 $B'$ 的相对轴向位移
$l_i$	第 $i$ 个滚柱的大段螺纹相对小段螺纹的位置
$l_0$	相邻滚柱在轴向的间距
$L_i$	丝杠、螺母或滚柱# $q$ 的导程
$l_i$	行星滚柱丝杠副实际导程
$l_{RN}$	滚柱相对于螺母的轴向位移
$L_{RN}^r$	滚柱相对于螺母只自转时产生的轴向位移
$L_{RN}^p$	滚柱相对于螺母只公转时产生的轴向位移
$L_{RS}^s$	滚柱螺纹在丝杠螺纹中纯滑动产生的轴向位移
$L_{RR}^s$	滚柱螺纹自旋纯滑动产生的轴向位移
$L_N^a$	螺母的轴向位移

$L_{RS}$	滚柱相对于丝杠的轴向位移
$L_{RS}^r$	滚柱相对于丝杠只自转时产生的轴向位移
$L_{RS}^a$	丝杠转动时滚柱相对丝杠的轴向位移
$L_S^a$	丝杠的轴向位移
$L_S^S$	丝杠的总行程
$L_T$	归一化滚柱总轴向位移
$L_{RS}^T$	总行程中滚柱相对于丝杠的轴向位移
$L_{RS}^p$	滚柱相对于丝杠只公转时产生的轴向位移
$L_{RN}^a$	丝杠转动时滚柱相对螺母的轴向位移
$L_{SN}$	丝杠相对于螺母的轴向位移
$L_S^{\alpha_0}$	丝杠螺旋线相差 $\alpha_0$ 角时, 其螺旋线轴向位移
$L_R^{\beta_0}$	滚柱螺旋线相差 $\beta_0$ 角时, 其螺旋线轴向位移
$L_N^{n_{roller}}$	螺母螺旋线相差 $360^\circ / n_{roller}$ 时, 其螺旋线轴向位移
$m_q$	滚柱# $q$ 的质量
$m_g$	滚柱齿轮模数
$m_N$	螺母的质量
$m_\ell^i$	保持架 # $\ell$ 的质量
$M_{S_z}$	作用在丝杠上的力矩
$M_{ipr}^\ell$	作用在保持架 # $\ell$ 上的润滑油/脂的拖动力矩
$\text{mod}(n_T / 2)$	$n_T / 2$ 的余数
$M_{i q n}^{q c, k}$	作用在滚柱# $q$ 的第 $k$ 个螺母侧螺纹牙上的摩擦力矩
$M_{N i q}^{p, k}$	接触点 $o_{Nq}^k$ 处的摩擦力矩
$n_{roller}$	滚柱的个数
$n_i$	头数
$n_T$	滚柱螺纹牙总数
$\mathbf{n}_i^j$	丝杠、滚柱或螺母螺旋曲面在对应零件坐标系 $o_i-x_i y_i z_i$ 中的外法线向量
$\mathbf{n}_{S q}^{p q}$	局部坐标系 $o_{p q}-x_{p q} y_{p q} z_{p q}$ 中, 曲面 $\Pi_{SB}$ 在接触点 $o_{S q}$ 处的外法线向量
$\mathbf{n}_{RS q}^{p q}$	局部坐标系 $o_{p q}-x_{p q} y_{p q} z_{p q}$ 中, 曲面 $\Pi_{qU}$ 在接触点 $o_{S q}$ 处的外法线向量
$\mathbf{n}_{S q}^{p q, k_s}$	局部坐标系 $o_{p q}-x_{p q} y_{p q} z_{p q}$ 中, 第 $k_s$ 个丝杠螺纹牙的螺旋曲面 $\Pi_{SB}$ 在接触点 $o_{S q}^{k_s}$ 处的法向量

$\mathbf{n}_{Rsq}^{pq, k_{rs}}$	局部坐标系 $O_{Pq} - x_{Pq} y_{Pq} z_{Pq}$ 中, 第 $k_{rs}$ 个滚柱螺纹牙的螺旋曲面 $\Pi_{qU}$ 在接触点 $o_{Sq}^{k_{rs}}$ 处的法线向量
$\mathbf{n}_{qB, \vec{z}_q}$	齿面 $\Pi_{qg1}$ 和 $\Pi_{Ng1}$ 或齿面 $\Pi_{qg2}$ 和 $\Pi_{Ng2}$ 啮合时, 齿面在接触点 $G_q$ 处的法线方向
$\mathbf{n}_{Sq^*}^{k_{rs}}, \mathbf{n}_{Rsq^*}^{k_{rs}}$	螺旋曲面 $\Pi_{SB}$ 和 $\Pi_{q^*U}$ 在接触点 $o_{Sq^*}^{k_{rs}}$ 处的单位法向量
$\mathbf{n}_{Rnq^*}^{k_{rs}}$	螺旋曲面 $\Pi_{q^*B}$ 在接触点 $o_{Nq^*}^{k_{rs}}$ 处的单位法向量
$O_{Sq}$	丝杠和滚柱# $q$ 之间的接触点
$O_{Nq}$	螺母和滚柱# $q$ 之间的接触点
$O_{lm}$	曲面 $\Pi_l$ 和 $\Pi_m$ 之间的接触点
$O_{Sr}, O_S$	丝杠旋转轴与螺纹节圆的中心
$O_q, O_{qg}, O_{qp}$	分别表示滚柱# $q$ 的螺纹节圆、直齿和销轴的中心
$O_{tr}$	丝杠、螺母或滚柱# $q$ 的偏斜旋转点
$O_{qt}$	滚柱# $q$ 的旋转轴中心
$O_R$	滚柱自转轴中心
$O$	初始位置滚柱回转中心
$O'$	相邻滚柱回转中心
$O_{Nout}, O_N$	螺母外圆和螺纹分度圆的中心
$O_{Ng}, O_p$	内齿圈和保持架的中心
$O_{Hq}, O_{Hq,0}$	销孔# $q$ 的实际中心点位置和其理想位置
$o_{qg}^\ell$	内齿圈与滚柱上第 $\ell$ 个直齿的接触点
$o_{qp}^\ell$	滚柱# $q$ 和保持架# $\ell$ 之间的接触点 ( $\ell=1,2$ )
$o_{qs}^k, o_{qn}^k$	滚柱# $q$ 上第 $k$ 个螺纹牙在丝杠侧和螺母侧的接触点
$o_{Sq}^{k_{rs}}$	第 $k_{rs}$ 个滚柱螺纹牙螺旋曲面 $\Pi_{qB}$ 与所对应丝杠螺旋曲面 $\Pi_{SU}$ 的接触点
$o_{Nq}^{k_{rs}}$	第 $k_{rs}$ 个滚柱螺纹牙螺旋曲面 $\Pi_{qU}$ 与所对应螺母螺旋曲面 $\Pi_{SB}$ 的接触点
$O_{Sq}$	丝杠和滚柱接触点 $o_{Sq}$ 在 $x_{Pq} y_{Pq} z_{Pq}$ 平面中的投影
$O_{Nq}$	螺母和滚柱接触点 $o_{Nq}$ 在 $x_{Pq} y_{Pq} z_{Pq}$ 平面中的投影
$ o_{qt} o_{qp} $	点 $o_{qt}$ 和点 $o_{qp}$ 之间的距离
$ o_{Hq} o_{qp} $	点 $o_{Hq}$ 和点 $o_{qp}$ 之间的距离
$\overline{o_{qg} G_q}, \overline{o_{Ng} G_q}$	直齿和内齿圈几何中心至接触点 $G_q$ 的向量
$O_{Pq} - x_{Pq} y_{Pq} z_{Pq}$	局部坐标系
$O_i - x_i y_i z_i$	零件坐标系

$o'_i-u_i v_i w_i$	截面坐标系
$o'_S-t_S n_S b_S$	丝杠接触螺旋曲线在接触点处的 Frenet 坐标系
$O-XYZ$	整体坐标系
$P$	丝杠、螺母或滚柱# $q$ 的螺距
$P_{Pq}$	局部坐标系 $o_{Pq}-x_{Pq} y_{Pq} z_{Pq}$ 的原点在整体坐标系 $O-XYZ$ 中的位置向量
$P_i$	零件坐标系 $o_i-x_i y_i z_i$ 的原点 $o_i$ 在整体坐标系 $O-XYZ$ 中的位置向量
$P_{i\tau}$	零件的旋转点 $o_{i\tau}$ 在坐标系 $O-XYZ$ 中的位置矢量
$P_{o_{Hq\tau}}^{Hq}$	圆心 $o_{Hq\tau}$ 在坐标系 $o_{Hq}-x_{Hq} y_{Hq} z_{Hq}$ 中的位置向量
$P_{q_n}^{En,k}$	接触区域 $\Omega_{Nq}$ 内的切向力
$q$	滚柱# $q$ ( $q=1, 2, \dots, n_{\text{roller}}$ )
$q^*$	同时与丝杠和螺母相接触的滚柱编号
$r_i$	名义半径
$r_{Ng}、r_{qg}$	内齿圈和滚柱直齿的分度圆半径
$r_{Sg}$	丝杠齿轮节圆半径
$r_{Rg}$	滚柱齿轮节圆半径
$r_{Rga}$	滚柱齿轮齿顶圆半径
$r_{Tq}、O_{Tq}$	圆弧 $\Gamma_{qU}$ 在平面 $u_q w_q$ 中的半径与圆心
$r_{Sg}^c、\phi_{Sg}^c$	丝杠的啮合半径与啮合偏角
$r_{RSq}^c、\phi_{RSq}^c$	滚柱# $q$ 在丝杠侧的啮合半径与啮合偏角
$r_{Sa}$	丝杠的牙顶圆半径
$r_{Na}$	螺母的牙顶圆半径
$r_{qa}$	滚柱的牙顶圆半径
$r_{q\text{pin}}$	滚柱# $q$ 上销轴的半径
$r_{Sg}^{k_S}$	第 $k_S$ 个丝杠螺纹牙与滚柱# $q$ 对应的啮合半径
$r_{RSq}^{k_{Rq}}$	第 $k_{Rq}$ 个滚柱螺纹牙在丝杠侧的啮合半径
$r_{Nq}^{k_N}、\phi_{Nq}^{k_N}$	第 $k_N$ 个螺母螺纹牙的啮合半径与啮合偏角
$r_{Rnq}^{k_{Rn}}、\phi_{Rnq}^{k_{Rn}}$	第 $k_{Rn}$ 个滚柱螺纹牙的啮合半径和啮合偏角
$r_i^j(u_i, \theta_i)$	丝杠、螺母或滚柱螺旋曲面在对应零件坐标系 $o_i-x_i y_i z_i$ 中的方程
$r_i^{Pq}$	丝杠、滚柱和螺母螺旋曲面在局部坐标系 $o_{Pq}-x_{Pq} y_{Pq} z_{Pq}$ 中的方程
$r_i^j$	丝杠、螺母和滚柱螺旋曲面在各零件坐标系 $o_i-x_i y_i z_i$ 中的方程