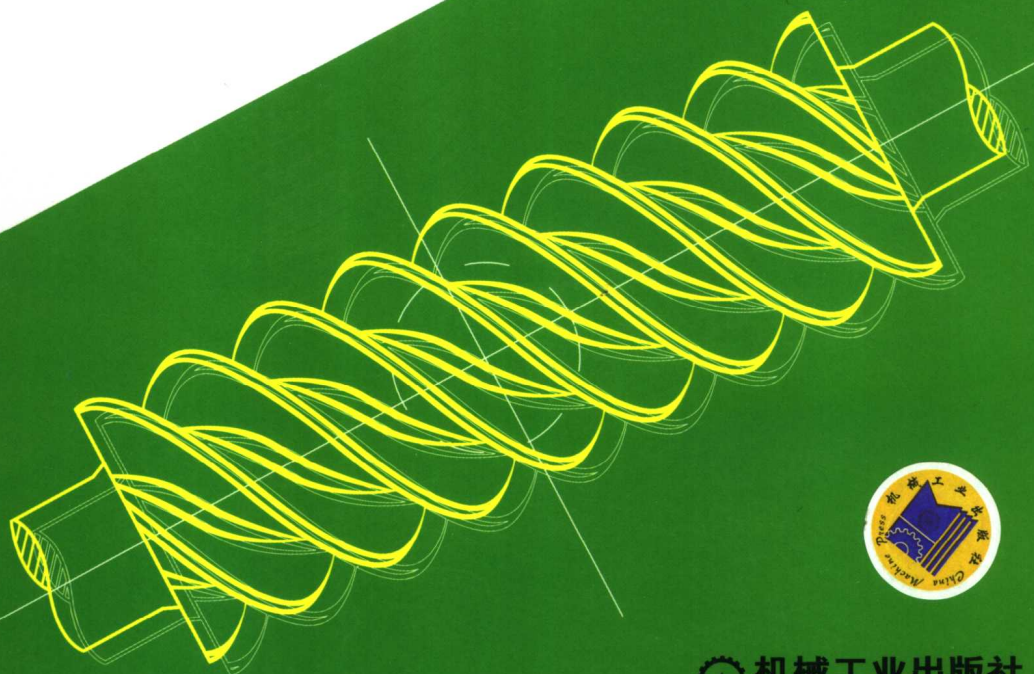


董学朱 编著

环面蜗杆传动

设计和修形



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

环面蜗杆传动设计和修形

董学朱 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍平面、锥面和双锥面二次包络环面蜗杆传动及直廓环面蜗杆传动的啮合理论、设计和修形。书中为各类环面蜗杆传动的啮合状态描绘出清晰图形,在此基础上进行传动类型分类和修形参数筛选;推荐首选传动类型和修形参数选择范围。此外,对环面蜗杆传动进行齿面失配接触分析,并对失配修形进行了介绍。

本书可供从事机械设计及制造的工程技术人员和高等学校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

环面蜗杆传动设计和修形/董学朱编著. —北京:机械工业出版社, 2004.6

ISBN 7-111-14629-8

I. 环… II. 董… III. 蜗杆-机械传动装置-机械设计
IV. TH132.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 055069 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:熊万武 版式设计:冉晓华 责任校对:樊钟英

封面设计:解辰 责任印制:石冉

北京中兴印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·8.75 印张·338 千字

0001—3000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

环面蜗杆传动，多齿双线接触、齿面诱导法曲率较小，接触应力小；滑动角接近 90° ，有利于齿面间的弹性流体动力润滑。其承载能力大，传动效率高，广泛用于各种机械的减速传动装置。

美国、俄罗斯多用直廓环面蜗杆传动，其中美国著名品牌“Cone Drive”已有将近 80 年的历史。从 20 世纪 70 年代初开始，我国推广应用“首钢 71 型”平面二次包络环面蜗杆传动。日本则开发双锥面二次包络环面蜗杆传动，形成了 HEDCON 减速器系列。

20 世纪 80 年代中期，文献 [12、13] 对直廓环面蜗杆传动和平面二次包络环面蜗杆传动作过系统介绍，对其推广应用起了良好作用。但在此后，环面蜗杆传动方面的研究成果及生产厂家和用户的经验，至今尚无系统总结；近期出版的手册中，环面蜗杆传动的设计，除采用新标准之外，多沿用早先的设计方法，在修形方面未见新的内容。本书系统地向读者介绍近年来我国在环面蜗杆传动方面的一些新研究成果。

直廓环面蜗杆传动与二次包络环面蜗杆传动的几何计算公式相似；各种环面蜗杆传动同属一类，只是加工蜗杆的产形面不相同（直廓环面蜗杆的产形面退化成直线刀刃）。本书中对不同的环面蜗杆传动采用相同的研究方法，部分还采用了统一的计算公式，不仅把问题简化，而且还找到了它们的共同规律。书中以大量计算数据为各类环面蜗杆传动的啮合状态描绘出比较清晰的图形；在此基础上对修形参数进行筛选；得到简明实用的 I、II 型传动分类准则；向用户推荐首选的传动类型及修形参数选择范围。

文献中多关注环面蜗杆传动接触齿面的诱导法曲率和滑动角等微观啮合质量参数的研究。然而，根据使用要求给出传动比、蜗杆转速和传递的功率之后，中心距 a 及其他参数已基本确定，唯有对接触质量影响较大的产形面倾角 β 还有选择的余地。但是， β 值又被环面蜗杆边齿顶变尖和根切等因素限制在很小的范围内。总之，难于通过改变环面蜗杆传动的几何参数来改善其微观啮合质量。

本书则在环面蜗杆几何尺寸基本确定的情况下，通过修形改变蜗轮齿面结构和接触区，避开或自然地切去蜗轮齿面接触质量差的部位，通过控制齿面的宏观啮合质量，提高其承载能力。啮合分析表明，有各种修形方案可供提高宏观啮合质量选择。实践中，根据宏观啮合质量分析结果，选择平面二次包络 II 型环面蜗杆传动用于船舶减速装置，提高了承载能力，已取得良好效果^[33]。

双锥面二次包络环面蜗杆传动工艺性好,又可用于多头蜗杆。日本 HEDCON 减速器系列的功率表中,这种传动有很高的承载能力。我国近年来的研究^{[38][40]}同样表明,这种传动有良好的使用前景。本书对双锥面二次包络环面蜗杆传动的微观和宏观啮合质量进行了系统研究,在此基础上推荐首选传动类型以及砂轮直径、砂轮轴线倾角和修形参数的选择范围,为这种传动在我国的应用作了理论方面的准备。

环面蜗杆传动多齿双线接触的负面影响是对误差和变形十分敏感。对制造和装配误差,尚可通过跑合、配对安装和用垫片调整蜗杆和蜗轮的轴向位置等措施,将其影响降到最小。但工作过程中不可避免产生的变形,常会引起齿面偏磨而降低蜗杆副的使用寿命,需要采用失配修形,增加齿面对误差和变形的自适应能力。本书中采用齿面相切法和齿面零间隙法,对环面蜗杆传动进行失配齿面接触分析,并进行了失配修形研究。

直廓环面蜗杆传动的几何计算方法,经过长期应用和改进,已经比较成熟。二次包络环面蜗杆传动的几何计算方法,除产形面倾角之外,基本上由直廓环面蜗杆传动的计算公式演变而来。本书仍沿用现有公式计算环面蜗杆传动的几何参数和尺寸。关于承载能力计算,直廓环面蜗杆传动采用 JB/T 7936—1999 的功率表;平面二次包络环面蜗杆传动采用 GB/T 16444—1996 的功率表。书中着重介绍文献中未深入研究而又比较重要的一些问题,包括:1) 环面蜗杆传动的修形和宏观啮合质量分析;2) 双锥面二次包络环面蜗杆传动的啮合质量分析;3) 环面蜗杆副的齿面失配接触分析和失配修形。关于环面蜗杆传动的结构、材料及热处理、润滑和冷却、制造工艺及精度方面的内容可在手册中查到,书中不赘述。

笔者进行的环面蜗杆传动研究,得到高等学校博士学科点专项科研基金资助,先后参加过研究工作的有康密军、冯晓云、王红梅、沈韶华、吴忠和毕诚等研究生。

研究工作得到过张德华高级工程师及沈蕴方教授的帮助,特此致谢。

恳请读者不吝指出书中的错误和缺点。

董学朱
2003 年 8 月

目 录

前言

绪论	1
0.1 环面蜗杆副的形成、分类和特点	1
0.1.1 环面蜗杆的形成	1
0.1.2 环面蜗杆的分类	1
0.1.3 环面蜗杆副的分类	3
0.1.4 环面蜗杆传动的特点	3
0.2 环面蜗杆传动的发展	5
0.2.1 直廓环面蜗杆传动的发展	5
0.2.2 关于环面蜗杆螺旋面的磨削展成	6
0.2.3 平面一次包络环面蜗杆传动	7
0.2.4 二次包络环面蜗杆副的发展	8
0.3 环面蜗杆副啮合质量评价	9
0.3.1 环面蜗杆副微观啮合质量的评价	9
0.3.2 环面蜗杆副宏观啮合质量的评价	10
0.4 环面蜗杆副的失配修形	12
0.4.1 失配修形的目的	12
0.4.2 失配接触分析方法	12
0.4.3 失配修形方法	13
第1章 二次包络环面蜗杆传动的啮合理论	14
1.1 坐标系的建立和修形参数	14
1.1.1 坐标系的选择	14
1.1.2 环面蜗杆的修形	15
1.1.3 坐标变换	16
1.2 包络环面蜗杆的产形面	16
1.2.1 产形平面的方程	16
1.2.2 产形锥面的方程	17
1.2.3 双锥产形面的方程	18
1.3 包络环面蜗杆的螺旋面及其曲率参数	21
1.4 二次包络环面蜗杆副的啮合	25
1.5 蜗轮齿面瞬时接触线奇点轨迹	29
1.5.1 $\Phi_{\Sigma} = 0$ 时蜗轮齿面的共轭区 Σ_{2A} 和 Σ_{2B}	29

1.5.2 $\Phi_{a2} = 0$ 的条件	30
1.5.3 蜗轮齿面接触线有奇点的几种传动类型	31
1.6 瞬时接触线和各界线的图形	34
1.6.1 接触线参数和界线参数的求解	34
1.6.2 接触线和各类界线的换算	35
第2章 直廓环面蜗杆传动的啮合理论	36
2.1 直廓环面蜗杆螺旋面及其曲率参数	36
2.1.1 直廓环面蜗杆的螺旋面	36
2.1.2 直廓环面蜗杆螺旋面的曲率参数	38
2.2 直廓环面蜗杆副的啮合分析	40
2.3 蜗轮齿面上瞬时接触线的奇点轨迹曲线 N	42
2.4 直廓环面蜗杆副瞬时接触线的求解	44
第3章 直廓环面蜗杆传动设计	46
3.1 直廓环面蜗杆传动的主要参数	46
3.2 直廓环面蜗杆传动的几何参数计算	48
3.3 直廓环面蜗杆传动的承载能力计算	50
3.3.1 蜗杆的许用输入功率计算	50
3.3.2 直廓环面蜗杆副的寿命计算	53
3.3.3 承载能力算例	53
第4章 二次包络环面蜗杆传动设计	55
4.1 平面二次包络环面蜗杆传动设计	55
4.1.1 平面二次包络环面蜗杆传动的几何参数	55
4.1.2 平面二次包络环面蜗杆传动承载能力计算	59
4.2 锥面和双锥面二次包络环面蜗杆传动设计	61
第5章 蜗轮齿面结构及蜗杆齿厚	63
5.1 齿面接触区的边界	63
5.2 蜗轮齿面的结构分析	67
5.3 环面蜗杆的齿厚	70
5.3.1 蜗杆轴平面齿廓	70
5.3.2 环面蜗杆喉部分度圆齿厚	71
5.3.3 环面蜗杆的边齿顶厚	73
5.3.4 蜗杆边齿顶变尖时齿顶圆弧半径的修正	74
5.3.5 砂轮顶宽、蜗杆边齿顶厚和齿顶圆弧半径修正计算	74
第6章 平面二次包络环面蜗杆副的修形	85
6.1 平面二次包络环面蜗杆副的几何参数选择	85
6.1.1 可供选择的主要参数	85

6.1.2 蜗轮的压力角 α 和蜗杆导程角 γ	85
6.1.3 传动比 i_{12} 对产形面倾角 β 的限制	86
6.1.4 压力角 α 对蜗杆边齿顶厚和根切的影响	89
6.1.5 标准环面蜗杆传动参数的选择	89
6.2 平面二次包络环面蜗杆副的接触线和蜗轮齿面结构	94
6.2.1 蜗轮齿面上有瞬时接触线奇点轨迹 N 的传动	94
6.2.2 蜗轮齿面上无接触线奇点轨迹曲线 N 的传动	98
6.3 区分传动类型的准则和修形参数的筛选	102
6.3.1 单参数修形时区分传动类型的准则	103
6.3.2 修形参数的筛选	109
6.3.3 综合修形时区分传动类型的准则	109
6.4 平面二次包络环面蜗杆副传动类型的选择	112
6.4.1 修形后蜗轮齿面结构的变化	112
6.4.2 蜗杆双线接触区长度的确定	114
6.4.3 传动类型的选择	117
6.5 平面二次包络环面蜗杆副修形参数的选择	118
6.5.1 II 型传动修形参数的选择	118
6.5.2 角修形传动修形量的选择	127
第 7 章 锥面二次包络环面蜗杆副的修形	131
7.1 锥面二次包络环面蜗杆副的几何参数选择	131
7.1.1 几何参数对蜗杆边齿顶厚的影响	131
7.1.2 几何参数对蜗杆根切的影响	132
7.1.3 几何参数对接触线分布的影响	133
7.1.4 几何参数对微观啮合质量的影响	135
7.1.5 锥面二次包络环面蜗杆副几何参数选择	137
7.2 锥面二次包络环面蜗杆副的接触线和蜗轮齿面结构	139
7.2.1 蜗轮齿面上有接触线奇点轨迹曲线 N 的传动	139
7.2.2 I 型和 II 型传动	143
7.3 区分 I 型和 II 型传动的准则和修形参数的筛选	146
第 8 章 双锥面二次包络环面蜗杆副的修形	152
8.1 几何参数和工艺参数对双锥面包络环面蜗杆齿厚和根切的影响	152
8.1.1 双锥面二次包络环面蜗杆副的几何参数和工艺参数	152
8.1.2 砂轮轴线倾角和砂轮半径对边齿顶厚的影响	153
8.1.3 砂轮轴线倾角和砂轮半径对蜗杆根切的影响	154
8.2 双锥面二次包络标准环面蜗杆传动	155
8.3 蜗轮齿面上存在接触线奇点轨迹曲线 N 的修形传动	166
8.3.1 双锥面二次包络 Δb 修形环面蜗杆传动	166

8.3.2 双锥面二次包络角修形环面蜗杆传动	167
8.4 双锥面二次包络Ⅰ型和Ⅱ型环面蜗杆传动	172
8.4.1 Ⅰ型和Ⅱ型传动的特点	172
8.4.2 传动类型的区分和修形参数的筛选	174
8.4.3 传动类型和修形参数的选择	178
8.5 平面、锥面和双锥面二次包络环面蜗杆副比较	182
8.5.1 平面和双锥面二次包络环面蜗杆副啮合性能比较	182
8.5.2 锥面与双锥面二次包络环面蜗杆副啮合性能比较	189
8.5.3 包络环面蜗杆产形面的选择	192
第9章 直廓环面蜗杆副的修形	194
9.1 原始型和 Δb 修形直廓环面蜗杆传动	194
9.1.1 原始型直廓环面蜗杆传动	194
9.1.2 直廓 Δb 修形环面蜗杆传动	196
9.2 直廓角修形环面蜗杆传动	198
9.3 Ⅰ型和Ⅱ型直廓环面蜗杆传动	200
9.3.1 直廓Ⅰ型环面蜗杆传动	200
9.3.2 直廓Ⅱ型环面蜗杆传动	202
9.3.3 Δa 和 Δi 综合修形	207
9.4 对现有主要修形方法的分析	210
9.4.1 抛物线修形法	210
9.4.2 抛物线修形算例	212
9.4.3 高次方曲线修形	214
9.4.4 变参数修形曲线的方程	219
9.4.5 变参数修形直廓环面蜗杆传动算例	222
9.4.6 现有三种修形方法的分析	224
9.5 直廓环面蜗杆副传动类型和修形参数的选择	225
9.5.1 传动类型的选择	225
9.5.2 修形参数的选择	226
9.5.3 直廓Ⅱ型环面蜗杆副的算例	229
第10章 环面蜗杆传动齿面的失配接触分析和失配修形	235
10.1 概述	235
10.2 环面蜗杆及蜗轮的切齿啮合分析	236
10.3 齿面相切接触分析法	240
10.3.1 环面蜗杆副的接触迹线	240
10.3.2 环面蜗杆副的瞬时传动比和运动误差	243
10.3.3 齿面的接触区	243
10.4 齿面零间隙接触分析法	245

10.4.1 齿面活动标架的建立	246
10.4.2 齿面零间隙接触分析法	246
10.5 平面二次包络环面蜗杆副的失配修形	249
10.5.1 平面二次包络环面蜗杆副的失配接触分析	249
10.5.2 平面二次包络环面蜗杆副的失配修形	250
10.6 双锥面二次包络环面蜗杆副的失配修形	251
10.6.1 双锥面二次包络环面蜗杆副的失配接触分析	251
10.6.2 双锥面二次包络环面蜗杆副失配修形	253
10.7 二次包络环面蜗杆副失配修形接触分析小结	261
附录	263
附录 A 矢量的回转	263
A.1 圆矢量函数和球矢量函数	263
A.2 回转矩阵	264
附录 B 坐标变换	265
B.1 矢量的坐标变换	265
B.2 点的坐标变换	265
B.3 坐标变换回转矩阵法	266
参考文献	267

绪 论

0.1 环面蜗杆副的形成、分类和特点

环面蜗杆包围蜗轮或圆柱齿轮形成环面蜗杆副。蜗杆的分度曲面为圆环内表面的一部分。蜗杆和蜗轮互相包围时,又称为双包围蜗杆副。

0.1.1 环面蜗杆的形成

蜗杆螺旋面由便于制作的直线刀刃车刀、平面砂轮、角度铣刀和锥面砂轮加工成(见图0-1~图0-5)。刀具装在回转刀座(简称刀座)上,刀座回转轴线与蜗杆轴线交错, O_d 和 O_1 为其公垂线分别在刀座轴线和蜗杆轴线上的垂足。蜗杆不修形时,刀座轴心 O_d 与蜗杆轴线的距离等于被加工蜗杆副的中心距 a ;刀座与蜗杆的轴交角 $\Sigma=90^\circ$;蜗杆与刀座的速比 i_{ld} 等于蜗杆副的传动比 i_{12} 。在刀座轴心 O_d 与蜗杆轴线所在的蜗轮中间平面上,由半径为 r_b 的蜗轮主基圆(或称蜗杆成形圆)和蜗杆齿廓确定刀具位置:车刀的直线刀刃或铣刀和砂轮的直母线应与蜗轮主基圆相切,并与蜗杆齿廓重合或相切。蜗杆回转时,刀座按速比 i_{ld} 转动,直线刀刃在蜗杆上的轨迹曲面、平面或锥面的包络面为环面蜗杆的螺旋面。

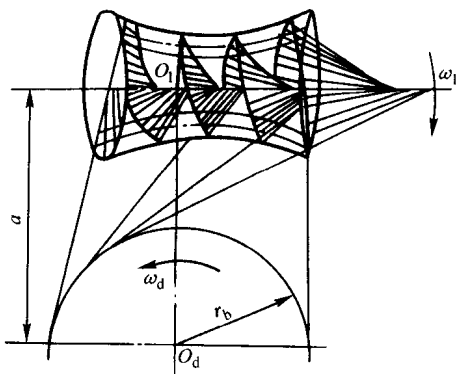


图0-1 由直线刀刃形成环面蜗杆螺旋面

图0-1为由直线刀刃形成的环面蜗杆螺旋面。

图0-1为由直线刀刃形成的环面蜗杆螺旋面。

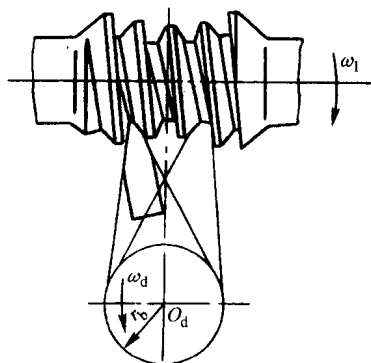


图0-2 直廓环面蜗杆

0.1.2 环面蜗杆的分类

(1) 直廓环面蜗杆 图0-2所示为由直线刀刃车刀加工成的环面蜗杆,其轴向截面齿廓为直线,称之为直廓环面蜗杆。曾被译为球面蜗杆或圆弧面蜗杆,国外又称为Hindley蜗杆。蜗杆螺旋面为刀刃直线的轨迹曲面,是不可展直纹面。

可以用渐开线代替直线，用渐开线插齿刀加工环面蜗杆的螺旋面；加工出的环面蜗杆则与直齿或斜齿渐开线圆柱齿轮相配。虽然这种蜗杆副制作简便，但由于渐开线插齿刀外径受限制，只能用于小中心距的传动，未能推广使用。

(2) 平面包络环面蜗杆 图 0-3 所示为用平面砂轮精磨环面蜗杆一侧螺旋面。在蜗轮中间平面上，砂轮平面与蜗轮主基圆和蜗杆齿廓相切；砂轮平面与刀座轴线的夹角 β 为产形面倾角，可以根据需要在一定范围内取值。由砂轮平面展成蜗杆齿槽一侧螺旋面为可展直纹面。

(3) 锥面包络环面蜗杆 图 0-4 所示为用单锥面为产形面，用锥面砂轮精磨蜗杆一侧螺旋面。在蜗轮中间平面上，砂轮锥面直母线与蜗轮主基圆和蜗杆齿廓相切；将砂轮平面绕该直母线转过产形面倾角 β (图中未示出)，确定其位置。 β 角可根据需要在一定范围内取值。砂轮锥面展成蜗杆齿槽一侧的螺旋面。

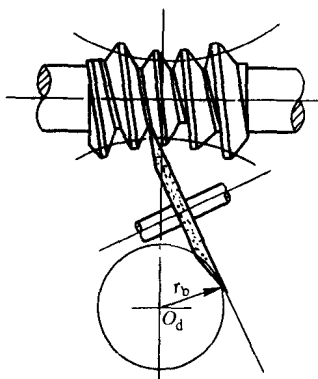


图 0-3 平面包络环面蜗杆

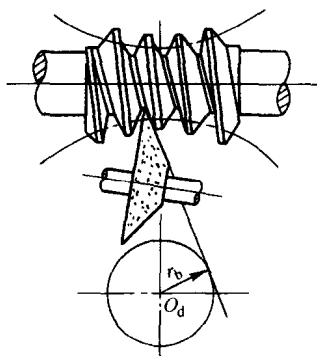


图 0-4 锥面包络环面蜗杆

(4) 双锥面包络环面蜗杆 图 0-5 所示为对称于砂轮中间平面的两锥面精磨蜗杆齿槽两侧螺旋面。砂轮中间平面与其轴线的交点 O_0 在蜗轮中间平面上，砂轮轴线与蜗轮中间平面重合时，砂轮两锥面母线与主基圆相切。根据需要在一定范围内将砂轮绕刀座与砂轮轴线的公垂线 $\overline{O_0O_d}$ 转砂轮轴线倾角 β (图中未示出)。砂轮的双锥面展成蜗杆齿槽两侧螺旋面。

文献中还可以见到以渐开柱面或渐开螺旋面展成的环面蜗杆，但由于渐开面包络环面蜗杆及滚刀难于制作，未得到推广使用。对这种蜗杆传动的承载能力和传动效率尚无深入研究。

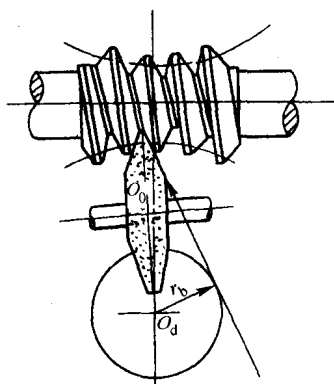


图 0-5 双锥面包络环面蜗杆

0.1.3 环面蜗杆副的分类

(1) 直廓环面蜗杆副 (TA 蜗杆副) 以直廓环面蜗杆的螺旋面为滚刀或剃齿刀产形面; 按蜗杆副的中心距 a 、蜗杆和蜗轮的轴向位置及轴交角 $\Sigma = 90^\circ$, 安装滚刀或剃齿刀和蜗轮坯; 按蜗杆副的传动比 i_{12} 作相对运动展成配对的蜗轮, 得到直廓环面蜗杆副。

(2) 平面一次包络环面蜗杆副 图 0-6^[49] 所示, 以平面包络环面蜗杆与平面齿轮 (图 0-6a) 或斜平面齿轮 (图 0-6b) 相配的蜗杆副称为平面一次包络环面蜗杆副, 又称平面蜗轮副, 简称 P 蜗轮副。齿轮的齿面为平面或斜平面, 其端面齿廓为直线。一次包络指的是用展成法加工蜗杆, 而平面齿轮不用展成法加工。

渐开面包络环面蜗杆与渐开线圆柱齿轮相配, 称为渐开面一次包络环面蜗杆副。这种传动可以不用制作蜗轮滚刀, 渐开线齿轮可以达到很高精度, 但渐开面包络环面蜗杆难于制作, 目前在生产中还未推广应用。

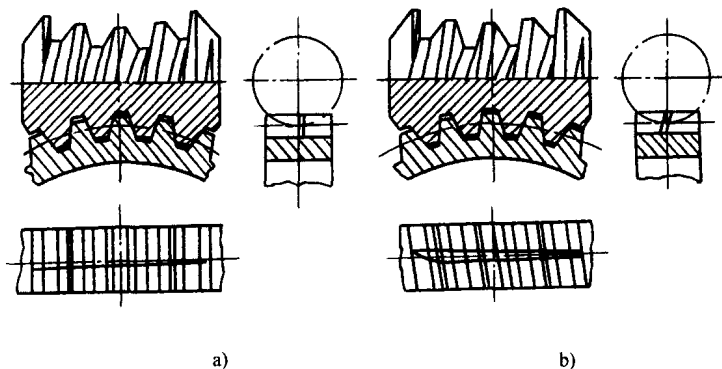


图 0-6 平面一次包络环面蜗杆副

a) 直平面齿轮的蜗杆副 b) 斜平面齿轮的蜗杆副

(3) 二次包络环面蜗杆副 以一次包络得到的平面、锥面和双锥面包络环面蜗杆螺旋面为滚刀产形面, 按蜗杆副中心距 a 、蜗杆和蜗轮轴向位置及轴交角 $\Sigma = 90^\circ$ 安装滚刀和轮坯, 刀具和轮坯按蜗杆副传动比 i_{12} 作相对运动展成相配蜗轮, 得到二次包络环面蜗杆副。平面二次包络环面蜗杆副简称 TP 蜗杆副。锥面 (单锥面) 二次包络环面蜗杆副简称 TK 蜗杆副。

0.1.4 环面蜗杆传动的特点

(1) 环面蜗杆传动的优点 与圆柱蜗杆传动比较, 环面蜗杆传动有以下优点:

1) 同时接触齿数多, 蜗杆啮入端双线接触 蜗杆包围蜗轮, 合理选择修形参数可以有效地利用蜗杆全长, 多齿同时接触, 而且蜗杆啮入端双线接触, 使分

摊到每一接触点的载荷较小。

2) 齿面瞬时接触线形状有利于齿面间的弹性流体动力润滑 交错轴蜗杆传动, 齿面接触点处的相对滑动速度很大, 齿面易磨损和胶合, 相接触齿面间是否产生承载油膜和油膜的厚度是评价啮合质量的关键。根据弹性流体动力润滑理论可以近似地算出油膜厚度, 但更简便而又直观的办法是通过相对滑动速度与瞬时接触线的夹角——滑动角, 来评价齿面的润滑条件。环面蜗杆传动滑动角接近 90° , 润滑条件好。

3) 瞬时接触线法向的诱导法曲率小 二次包络的蜗轮齿面接触区, 一般由滚刀产形螺旋面一次接触产生的蜗轮齿面原接触区 Σ_{2A} 和产形螺旋面二次接触产生的新接触区 Σ_{2B} 组成。蜗杆副新接触区 Σ_{2B} 的瞬时接触线法向诱导法曲率很小, 齿面接触应力小。

由于上述优点, 环面蜗杆传动的承载能力大, 传动效率高。图 0-7^[52] 为传动比 $i_{12}=40$, 蜗杆转速 $n_1=1000\text{r/min}$ 时, 直廓环面蜗杆传动与圆柱蜗杆和圆弧齿圆柱蜗杆传动承载能力的对比。图 0-7 中, T_2 为蜗轮转矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$), a 为中心距 (mm)。

在国内外, 环面蜗杆传动广泛用于矿冶、石化、起重运输、船舶、动力和轻工机械的传动装置, 经济效益十分显著。

(2) 环面蜗杆传动的缺点及采取的措施

1) 对误差和变形十分敏感 多齿双线接触固然可降低齿面各接触点的负荷, 但多余约束使齿面对误差十分敏感, 由失配啮合分析可以发现, 微小的误差都会导致齿面边缘接触。为解决此问题, 在生产中采取的措施是:

成对跑合蜗杆副, 提高其接触质量; 配对装配, 并用调整垫片保证蜗杆和蜗轮的轴向位置; 增加蜗杆轴系的刚度, 防止轴承松动引起蜗杆轴向位移。

2) 蜗杆及蜗轮滚刀或剃齿刀难制作 环面蜗杆修形和加工蜗轮刀具的制作都十分复杂。近年来, 对环面蜗杆传动的修形进行了较深入的研究, 修形参数的选择逐渐趋于合理; 计算机数控机床的使用, 简化了环面蜗杆和蜗轮滚刀的制作。

将环面蜗杆传动标准化、系列化和专业化生产, 可提高产品质量和生产率, 降低成本。环面蜗杆传动专业化生产厂家, 我国有首都钢铁公司机械厂和天津华

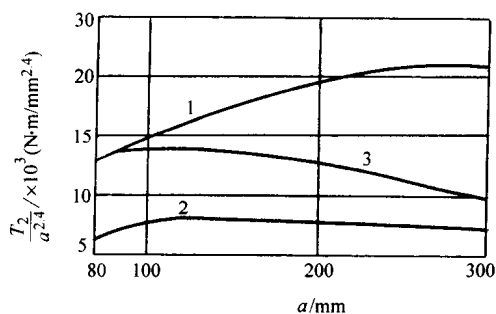


图 0-7 三种蜗杆传动承载能力比较

1—直廓环面蜗杆 2—圆柱蜗杆

3—圆弧齿圆柱蜗杆

盛昌齿轮有限公司等；美国有 Textron 集团的 CONE 公司；日本有住友重机械工业株式会社。

0.2 环面蜗杆传动的发展

0.2.1 直廓环面蜗杆传动的发展

图 0-8 所示为 1897 年文献中介绍的 Hindley 蜗杆加工方法^[49]：先按中心距 $a = r_1 + r_2$ (r_1 ——蜗杆喉部分度圆半径； r_2 ——蜗轮分度圆半径) 确定刀座轴心 O_d 的位置；以蜗轮分度圆为基准安装车刀，使其处于图 0-8 中双点划线位置；使蜗杆与刀座的速比与蜗杆副的传动比相同，进行蜗杆螺旋面的第一次加工。然后，将刀座回转轴心 O_d 与蜗杆轴线的距离增加为 $a_d = a + \Delta a$ ；车刀在刀座径向位置也相应增加 Δa ，使其处于图 0-8 中实线位置；蜗杆与刀座的速比不变，对蜗轮螺旋面进行终加工。与第一次加工相比，由蜗杆喉部向两端，车刀切入逐渐加深，蜗杆齿槽逐渐加宽，齿厚逐渐减薄。这种加工方法是直廓环面蜗杆修形的锥形，但相配蜗轮用飞刀加工，与现今同时对蜗杆和滚刀修形有本质不同。由于当时未弄清楚环面蜗杆副的啮合特性，工艺水平又不高，与圆柱蜗杆传动相比，无论在承载能力方面或传动效率方面，Hindley 蜗杆传动尚未显示出明显优势，在 20 世纪前未得到推广应用。

1909 年美国弗吉尼亚州的 S.I.Cone 研制成直廓环面蜗杆传动，命名为“Cone Drive”^[31]。1925 年取得相关专利后，成立 CONE 公司进行专业化生产，使直廓环面蜗杆传动性能有很大改善，在生产中得到推广应用。1931 年起 CONE 公司成为 Michigan Tool 公司的一个分公司，二战期间，“Cone Drive”用于飞机和潜艇的传动装置，生产规模扩大。1954 年起 CONE 公司成了 Ex-Cell-O 公司的子公司，1981 年开始对蜗杆螺旋面加工等关键

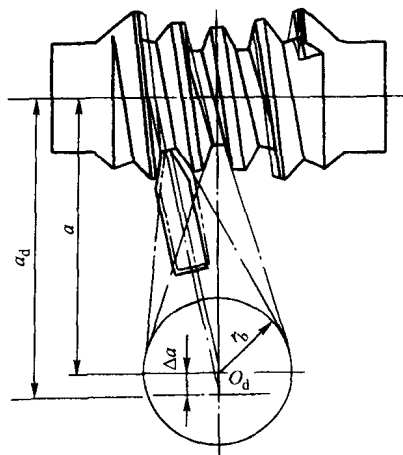


图 0-8 Hindley 蜗杆加工方法

工序实现了计算机数控加工。1991 年 CONE 公司成了 Textron 集团的一家分公司，20 世纪 90 年代年产“Cone Drive”减速器达到 25000 套；中心距范围由 5~28in，最大可达 1300mm；蜗杆头数（齿数）可达 12。

“Cone Drive”蜗杆螺旋面硬度为 30~40HRC。大中型蜗杆和单件生产的小型蜗杆用车刀加工螺旋面；大批量生产的小型蜗杆，用每齿只有一个侧刀刃的盘

状铣刀加工螺旋面。蜗杆螺旋面经过抛光处理,表面粗糙度为 $R_a 0.1 \mu\text{m}$ 。蜗轮用铲背整体滚刀滚齿。蜗杆副经过跑合后配对装配使用。

文献中未见到关于“Cone Drive”蜗杆修形的具体报道。

前苏联于 20 世纪 40 年代末,对直廓环面蜗杆传动的啮合理论、设计和制造进行了系统研究^[48,51,52],并在生产中推广应用。早期,前苏联学者们推崇原始型双线接触的直廓环面蜗杆传动;20 世纪 50~60 年代进行了大量试验研究之后,提出了提高齿面接触质量的措施:蜗杆倒坡^[51];蜗杆和蜗轮滚刀修形^[52]。

倒坡在蜗杆两端两侧螺旋面上进行:靠近蜗杆喉部分度圆,保留约两个弧齿距长的原始型蜗杆螺旋面;蜗杆从离开喉部分度圆约一弧齿距开始向两端,齿厚逐渐减薄,两端齿厚最薄。对加工蜗轮的滚刀或剃齿刀的产形螺旋面不倒坡。倒坡的目的在于减少制造和装配误差及变形产生的冲击,同时也为了改善啮入端的润滑条件。

修形是略微改变原始型直廓环面蜗杆螺旋面,改善其啮合条件,对蜗杆螺旋面和滚刀产形面进行相同的修形。比较有代表性的是抛物线修形^[52],根据环面蜗杆螺旋面的实际磨损情况确定修形规律。

直廓环面蜗杆副经跑合后,在不同的运行阶段测量蜗杆环面上螺旋线的磨损情况表明,工作初期磨损不均匀,啮入端磨损最快。当蜗杆应力循环次数 $N_{L1} > 10^7$ 时,螺旋面磨损趋于均匀,以此时的螺旋面为修形后的蜗杆螺旋面。原始型的蜗杆螺旋线与修形后的螺旋线的差值为修形量,沿蜗杆分度环面弧长度量,修形曲线为抛物线(详见本书第 9 章)。

修形不仅缩短了直廓环面蜗杆传动的跑合时间,而且改善了啮合质量。

从 20 世纪 50 年代中期开始,直廓环面蜗杆传动在我国得到广泛应用,国产直廓环面蜗杆减速器的中心距为 50~1200mm;环面蜗杆头数为 1~6。文献[12]对直廓环面蜗杆的啮合理论、设计和制造作了全面总结:介绍了各种修形方法;给出齿面啮合分析的计算公式;对齿面接触线分布规律、齿面接触线法向的诱导法曲率和滑动角进行了计算。根据计算结果可以对直廓环面蜗杆传动的微观啮合质量作出评价。文献[41]、[42]中对直廓环面蜗杆传动的宏观啮合质量——蜗轮齿面结构和接触区分布状况进行了研究;对直廓环面蜗杆修形进行分类;对现有各种修形方法进行啮合分析,并对啮合质量作出评价,在此基础上推荐首选的传动类型和修形参数选择范围。

0.2.2 关于环面蜗杆螺旋面的磨削展成

“Cone Drive”从开始专业化生产至今已有近 80 年的历史,至今仍采用软齿面、车加工后抛光的蜗杆螺旋面。这种设计和工艺方法能长久使用归结为以下原因:齿面结构及瞬时接触线分布合理,承载能力大,效率高;直线齿廓的环面蜗杆和滚刀便于加工和检验;软齿面蜗杆和锡青铜蜗轮跑合效果好。

硬齿面环面蜗杆能提高承载能力但需要磨削展成其螺旋面。国内外不少研究者希望磨削展成的环面蜗杆齿廓近似于直线。但实践表明,用磨齿的方法难于保证蜗杆齿廓接近直线。指状砂轮得到的齿廓接近直线,但只能用于大型蜗杆,且生产率低;采用盘形砂轮磨削直廓环面蜗杆,不但砂轮的修整十分复杂,而且在加工过程中需要按一定规律改变砂轮轴线倾角,工艺十分复杂。直廓环面蜗杆螺旋面的磨削问题至今未得到解决。

近年来 CONE 公司研制成高强度蜗杆副“Power Drive”^[31],“是与 Cone Drive 生成母面不同的新型硬齿面环面蜗杆副,蜗杆齿磨削成形”。图 0-9 为 $a = 100\text{mm}$, $i_{12} = 40/1$ 的“Power Drive”和“Cone Drive”许用输入功率的对比。蜗杆转速 $n_1 < 300\text{r/min}$ 时,两者承载能力接近; $n_1 = 1500\text{r/min}$ 时,“Power Drive”的蜗杆许用输入功率高出 50%。

在“Power Drive”出现以前,文献[51]曾介绍过用双锥面盘形砂轮磨削展成硬齿面蜗杆,砂轮轴线倾角 β 为常值,等于蜗杆喉圆上的导程角。不但蜗杆轴线截面齿廓不是直线,而且蜗杆分度环面螺旋线不同点的齿廓也不相同。加工蜗轮时,保证其齿面与蜗杆螺旋面共轭。虽然蜗轮材料用的只是铝铁青铜,但台架试验结果其承载能力与调质蜗杆和锡青铜蜗轮的直廓环面蜗杆传动接近。

以上两例说明,环面蜗杆的磨齿不能受直线齿廓的束缚,必须另找出路。

0.2.3 平面一次包络环面蜗杆传动

1922 年美国 Wildhaber 发明平面蜗轮副。20 世纪 50 年代初文献中对斜平面蜗轮副已有介绍(见图 0-6),文献[49]中称之为 Hourglass 蜗杆副。平面蜗轮副又称为平面一次包络环面蜗杆副,作为动力传动,国外曾用于减速器,最小传动比为 10;上世纪 60 年代初,我国现在的郑州机械研究所和首都钢铁公司机械厂合作研制成 $a = 540\text{mm}$ 的平面蜗轮副用于 30t 转炉的传动装置。

平面蜗轮可以逐齿修磨,能达到很高精度,适用于精密分度装置。1964 年以后,我国将平面蜗轮副用于修复齿轮加工机床,并在中小型普通滚齿机批量生产中使用^[21];20 世纪 80 年代初研制成 2.16m 望远镜大型精密平面蜗轮副^[23]:中心距 $a = 1140\text{mm}$,传动比 $i_{12} = 720/1$,模数 $m = 3\text{mm}$,精度超过了当时标准 JB162—60 的 3 级。

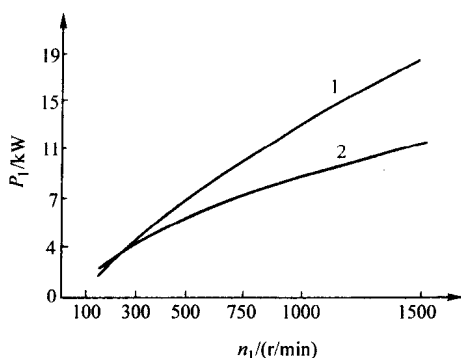


图 0-9 硬齿面和软齿面环面蜗杆副的
许用输入功率
1—Power Drive 2—Cone Drive