

实用机械传动设计手册

主 编 张 展

副主编 姚振甫

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本手册全面系统地介绍了渐开线圆柱齿轮传动、圆弧圆柱齿轮传动、锥齿轮与准双曲面齿轮传动、蜗杆传动、渐开线行星齿轮传动、摆线针轮行星传动、谐波齿轮传动、减速器、带传动和链传动等机械传动装置的设计计算、精度规范及其应用实例,列入国家最新标准和设计规范,同时给出了齿轮加工工艺守则、变位齿轮设计用的封闭图等,并对当代传动装置的国内外水平及其发展趋势也作了论述。

本手册在编写时注重科学性和实用性,叙述简明、实用、便查。可供从事机械传动设计与制造的广大工程技术人员和工科院校师生参考。

实用机械传动设计手册

主 编 张 展

副主编 姚振甫

责任编辑 董 明 董芳明

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

化工出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1994年6月第 一 版

1994年6月第一次印刷

印数:1-5 100 000

开本:787×1092 1/16

印张:82

字数:1 919 000

ISBN 7-03-003797-9/TH·22

定价:78.00 元

前 言

为了适应现代化建设的需要,满足广大工程技术人员贯彻国家最新标准和设计规范的需求,以便提高设计质量和设计效率,我们编写了《实用机械传动设计手册》。

我们知道,机械传动是机械中使用量大面广的传动装置。本手册列入了渐开线圆柱齿轮传动、圆弧圆柱齿轮传动、锥齿轮及准双曲面齿轮传动、蜗杆传动、渐开线行星齿轮传动、摆线针轮行星传动、谐波齿轮传动、减速器、带传动和链传动。每一章均以概述、几何计算、强度计算、精度规范和典型工作图等部分进行论述。同时,为了便于变位齿轮的设计,手册中列有外啮合齿轮封闭图 77 幅、内啮合齿轮封闭图 127 幅、直齿锥齿轮传动封闭图 48 幅、2K-H 型行星齿轮传动封闭图 44 幅、少齿差行星传动封闭图 16 幅、零齿差传动封闭图 5 幅。书中列入国家最新标准,如渐开线圆柱齿轮精度(GB10095-88),齿条精度(GB10096-88),锥齿轮和准双曲面齿轮精度(GB11365-89),圆柱蜗杆、蜗轮精度(GB10089-88),以及通用机械渐开线圆柱齿轮承载能力简化计算方法(GB10063-88),锥齿轮承载能力计算方法(GB10062-88),齿轮传动装置清洁度(GB11368-89)等等。其中齿轮精度等标准,是国家技术监督局近年要强行贯彻的标准。

在机器设备中,机械传动装置是重要的组成部分之一,机械传动的质量、性能和寿命直接影响着机器的性能和可靠性。由于传动装置的损坏而引起设备的故障、差错,会造成巨大的损失。因此,世界各国对机械传动技术都十分重视,其生产水平是一个国家工业水平的象征之一。

随着机械工业的发展,目前机械传动装置朝大型、精密、高速、成套和自动化方向发展,有的则向小型、轻量化方向发展,技术水平不断提高。为了使机器在国际市场中具有更大的竞争能力,机器传递的功率愈来愈大,速度愈来愈快,精度愈来愈高,技术经济指标愈来愈先进。本手册中,对世界当代机械传动装置的水平及其发展趋势作了介绍,可供我国发展传动装置的借鉴。手册中引用了国内、外最新资料,是大量实践经验的总结。同时,还列有大量实用的线图和数据,便于实际应用。

本手册编写时注重科学性和实用性,力求简明、实用、便查,以求具有自己的特色和新意。

本手册由张展、姚振甫、王毅和张国林编著,主编张展,副主编姚振甫。限于编者的学识水平,书中不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

1993 年 8 月于上海

目 录

前 言	i
概 论	1
第一章 渐开线圆柱齿轮传动	12
1.1 渐开线圆柱齿轮基本齿廓及模数系列	12
1.1.1 渐开线圆柱齿轮基本齿廓(GB1356-88)	12
1.1.2 国外圆柱齿轮常用基本齿廓及其参数	13
1.1.3 渐开线圆柱齿轮模数(GB1357-87)	13
1.1.4 基节表	15
1.2 圆柱齿轮传动的几何计算	20
1.2.1 外啮合标准圆柱齿轮传动	20
1.2.2 齿轮与齿条传动	23
1.2.3 交错轴斜齿轮传动(旧称螺旋齿轮传动)	23
1.2.4 内啮合标准圆柱齿轮传动	25
1.2.5 外啮合变位齿轮传动及其几何计算	28
1.2.6 内啮合变位齿轮传动及其几何计算	46
1.2.7 用图表法计算变位齿轮的几何参数	62
1.2.8 圆柱齿轮传动的质量指标	76
1.2.9 齿厚控制尺寸的计算	84
1.3 渐开线圆柱齿轮传动的强度计算	102
1.3.1 轮齿的主要失效形式与强度计算的出发点	102
1.3.2 圆柱齿轮强度设计的原则和基本参数的选择	103
1.3.3 圆柱齿轮传动的作用力计算	105
1.3.4 主要尺寸的初步确定	110
1.3.5 渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法(GB3480-83)	111
1.3.6 渐开线圆柱齿轮胶合承载能力计算方法(GB6413-86)	154
1.3.7 通用机械渐开线圆柱齿轮承载能力简化计算方法	163
1.4 渐开线圆柱齿轮精度与齿条精度	200
1.4.1 渐开线圆柱齿轮精度(GB10095-88)	200
1.4.2 齿条精度(GB10096-88)	235
1.4.3 机床圆柱齿轮精度标准	247
1.5 圆柱齿轮结构及其工作图	260
1.5.1 齿轮画法(GB4459.2-84)	260
1.5.2 渐开线圆柱齿轮图样上应注明的尺寸数据(GB6443-86)	270
1.5.3 圆柱齿轮结构	273

1.5.4	插齿、滚齿退刀槽(JB/ZQ4239-86)	277
1.5.5	齿轮孔与轴的轻热压配合(带键)(JB/ZQ4285-86)	278
1.5.6	用GB3480-83 标准计算圆柱齿轮传动承载能力的实例	279
第二章	圆弧圆柱齿轮传动	293
2.1	圆弧圆柱齿轮传动的基本原理和特点	293
2.1.1	基本原理	293
2.1.2	特点	294
2.2	滚刀法面齿形	294
2.3	圆弧齿轮几何计算	295
2.3.1	几何尺寸计算	295
2.3.2	测量尺寸计算	296
2.4	圆弧圆柱齿轮传动强度计算	299
2.4.1	圆弧齿轮的失效形式	299
2.4.2	基本参数的选择	300
2.4.3	圆弧圆柱齿轮传动主要尺寸的初步确定	301
2.4.4	齿根弯曲强度的校核计算	301
2.4.5	齿面接触强度的校核计算	306
2.5	圆弧圆柱齿轮精度(JB4021-85)	307
2.6	双圆弧齿轮传动	325
2.6.1	双圆弧齿轮传动的特点	325
2.6.2	双圆弧圆柱齿轮的基本齿廓(GB12759-91)	325
2.6.3	双圆弧齿轮的啮合特点	327
2.6.4	几何尺寸计算	329
第三章	锥齿轮与准双曲面齿轮传动	330
3.1	概述	330
3.1.1	分类	330
3.1.2	常用主要术语	330
3.1.3	传动特点和用途	334
3.2	几何计算	336
3.2.1	直齿锥齿轮传动的几何计算	336
3.2.2	弧齿锥齿轮与准双曲面齿轮传动的几何计算	360
3.2.3	等高曲线齿锥齿轮(克林贝格锥齿轮)	375
3.3	锥齿轮传动强度计算	397
3.3.1	锥齿轮承载能力计算方法(GB10062-88)	397
3.3.2	锥齿轮胶合承载能力计算方法(GB11367-89)	433
3.4	锥齿轮和准双曲面齿轮精度(GB11365-89)	443
3.5	锥齿轮结构与工作图	473
3.5.1	锥齿轮图样上应注明的尺寸数据(GB12371-90)	474
3.5.2	弧齿锥齿轮切齿方法与设备	475

第四章 蜗杆传动	480
4.1 概述	480
4.2 圆柱蜗杆传动基本参数及其几何计算	481
4.2.1 圆柱蜗杆基本齿廓(GB10087-88)	481
4.2.2 圆柱蜗杆模数和直径(GB10088-88)	482
4.2.3 蜗杆直径系数 q 与导程角 γ	484
4.2.4 圆柱蜗杆传动基本参数(GB10085-88)	485
4.3 圆柱蜗杆传动的强度计算	496
4.3.1 齿上受力的分析及滑动速度	498
4.3.2 强度计算和刚度验算	499
4.3.3 圆柱蜗杆传动的效率及散热计算	502
4.4 圆柱蜗杆、蜗轮精度(GB10089-88)	503
4.5 蜗杆、蜗轮结构与工作图	532
4.5.1 计算实例与工作图	533
4.5.2 圆柱蜗杆、蜗轮图样上应注明的尺寸数据(GB/T12760-91)	536
4.6 环面蜗杆传动	541
4.6.1 环面蜗杆传动的分类及特点	541
4.6.2 环面蜗杆传动的形成原理	542
4.6.3 环面蜗杆传动的基本参数及选择	543
4.6.4 环面蜗杆传动的设计计算	546
4.6.5 平面二次包络环面蜗杆传动的精度(ZBJ19021-89)	555
4.6.6 平面二次包络环面蜗杆传动设计计算示例	559
4.7 锥蜗杆传动	563
4.7.1 锥蜗杆的特点	563
4.7.2 锥蜗杆和锥蜗轮的相对位置和最佳旋转方向	563
第五章 渐开线行星齿轮传动	564
5.1 2K-H 型行星齿轮传动	564
5.1.1 行星齿轮传动概论	564
5.1.2 传动比的计算	569
5.1.3 行星齿轮传动齿数的选配	584
5.1.4 行星齿轮传动的变位系数选择及其几何计算	610
5.1.5 行星齿轮传动的效率与测试	634
5.1.6 C-I 封闭行星传动的传动比和效率计算	647
5.1.7 行星齿轮传动的均载机构	650
5.1.8 行星齿轮传动的强度计算	661
5.1.9 主要构件的强度计算	667
5.1.10 大功率高速行星齿轮传动	678
5.1.11 行星差动机构	681
5.2 3K 型行星齿轮传动	683

5.2.1	3K 型行星齿轮传动的传动比计算	684
5.2.2	3K 型行星齿轮传动齿数的选配	686
5.2.3	3K 型行星齿轮传动的强度计算	697
5.2.4	3K 型行星齿轮传动的效率	700
5.3	渐开线少齿差行星传动	710
5.3.1	概述	710
5.3.2	渐开线少齿差行星传动的原理与结构型式	711
5.3.3	渐开线少齿差行星传动的传动比计算	723
5.3.4	少齿差行星传动啮合参数选择及其几何计算参数表	727
5.3.5	渐开线少齿差行星齿轮传动效率的计算	740
5.3.6	渐开线行星齿轮减速器产品质量分等(JB/ZQ8067-89)	752
5.4	NGW 型行星齿轮减速器的基本参数与技术要求	757
第六章	摆线针轮行星传动	761
6.1	概述	761
6.1.1	传动比计算	761
6.1.2	摆线针轮行星传动的结构型式	761
6.2	摆线针轮行星传动的啮合原理	766
6.2.1	摆线针轮传动的啮合齿廓	766
6.2.2	摆线针轮传动的平稳性	769
6.2.3	摆线针轮连续啮合的条件	770
6.2.4	摆线针轮的变幅	770
6.2.5	内、外啮合摆线针轮理论齿廓的主要几何参数	773
6.3	摆线轮齿廓曲线及有关参数的选择	774
6.3.1	摆线轮齿廓曲线	774
6.3.2	摆线轮齿廓的根切	777
6.3.3	短幅系数 K_1 及针径系数 K_2 的选择	780
6.4	摆线针轮行星传动中作用力的分析	782
6.4.1	针齿作用在摆线轮上的载荷	783
6.4.2	销轴作用在摆线轮上的载荷	785
6.4.3	转臂轴承作用在摆线轮上的载荷	786
6.5	摆线针轮行星减速装置的强度计算	787
6.5.1	摆线针轮行星减速装置的主要失效形式	787
6.5.2	材料与许用应力	787
6.5.3	摆线轮与针齿的强度计算	789
6.5.4	W 输出机构的强度计算	795
6.5.5	转臂轴承的选择	796
6.6	摆线针轮行星减速装置的设计步骤	797
6.7	传动效率	800
6.8	主要零件的公差配合及典型工作图	803

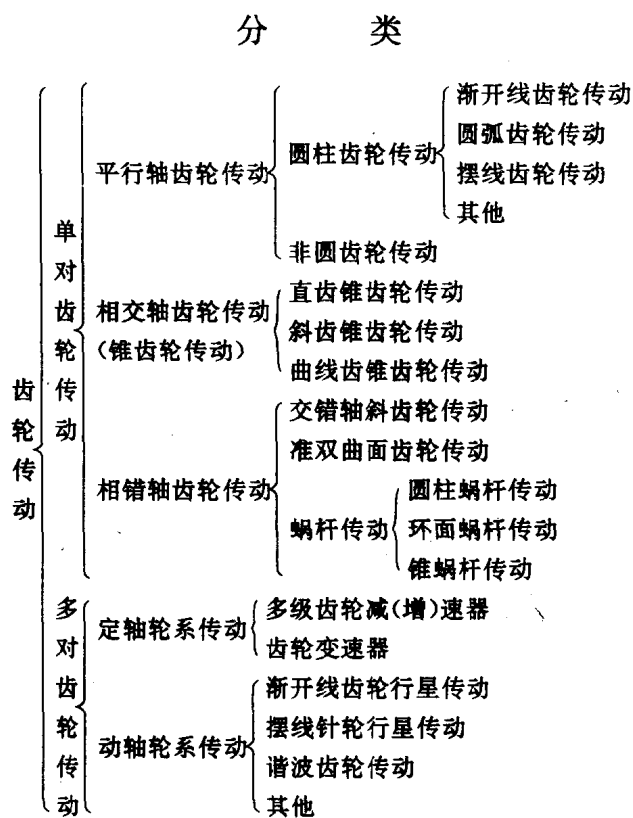
6.8.1	主要零件的公差配合	803
6.8.2	主要零件的典型工作图	804
6.9	摆线针轮减速机型式及基本参数	807
第七章	谐波齿轮传动	820
7.1	概述	820
7.1.1	基本原理	820
7.1.2	谐波齿轮传动的运动学计算	821
7.2	谐波齿轮传动的设计计算	821
7.2.1	谐波齿轮传动啮合的几何计算	821
7.2.2	谐波齿轮传动的强度计算	824
7.3	谐波齿轮传动主要零件的材料及结构设计	826
7.3.1	主要零件的材料	826
7.3.2	柔轮的结构设计	826
7.3.3	刚轮的结构设计	829
7.3.4	波发生器的结构设计	829
7.4	谐波齿轮传动的散热和润滑	832
7.5	XB 型谐波齿轮减速器	833
第八章	减速器	840
8.1	概述	840
8.1.1	减速器传动比的分配	840
8.1.2	减速器的典型结构	844
8.1.3	齿轮、蜗杆减速器结构尺寸	850
8.1.4	减速器的润滑及密封	873
8.2	减速器的基本参数及箱体形位公差	884
8.2.1	圆柱齿轮减速器基本参数(GB10090-88)	884
8.2.2	圆柱齿轮减速器箱体形位公差(JB/ZQ4282-86)	902
8.2.3	圆锥齿轮减速器箱体形位公差(JB/ZQ4283-86)	903
8.3	各种标准减速器	908
8.3.1	圆柱齿轮减速器(ZBJ19004-88)	908
8.3.2	圆柱蜗杆减速器(JB/ZQ4390-86)	943
8.3.3	圆弧圆柱蜗杆减速器(GB9147-88)	953
8.3.4	ZK 行星齿轮减速器(ZBJ19018-89)	978
8.4	减速器有关测试要求	998
8.4.1	齿轮装置噪声声功率级测定方法(GB6404-86)	998
8.4.2	验收试验中齿轮装置机械振动的测定(GB8543-87)	1011
8.4.3	齿轮传动装置清洁度(GB11368-89)	1018
8.4.4	圆柱齿轮减速器通用技术条件(ZBJ19009-88)	1020
8.5	齿轮与蜗杆传动装置的装配	1027
8.5.1	圆柱齿轮及锥齿轮传动装置的装配	1027

8.5.2 蜗杆传动装置的装配	1033
8.5.3 行星齿轮传动装置的装配	1036
8.6 油杯和油标	1039
第九章 带传动	1048
9.1 V 带的结构和规格	1048
9.1.1 普通 V 带(GB1171-89)	1048
9.1.2 技术要求	1049
9.2 V 带传动的设计计算	1051
9.2.1 V 带传动额定功率的计算(GB11355-89)	1054
9.2.2 带轮的材质、表面粗糙度及平衡(GB11357-89)	1055
9.3 带轮	1060
9.4 设计计算实例	1064
第十章 链传动	1067
10.1 套筒滚子链传动	1067
10.2 滚子链传动的设计计算	1067
10.2.1 $v > 0.6\text{m/s}$ 的滚子链传动的设计计算	1070
10.2.2 $v \leq 0.6\text{m/s}$ 的低速链传动的设计计算	1074
10.3 滚子链链轮	1075
10.3.1 链轮的齿形	1075
10.3.2 链轮的主要尺寸	1079
10.3.3 链轮的材料及齿面硬度	1080
10.3.4 链轮的结构	1080
10.3.5 链轮的公差、技术要求及工作图	1084
附录 I	1087
I.1 滚刀加工外啮合齿轮封闭图	1087
I.2 插齿刀加工内啮合齿轮封闭图	1117
附录 II	1160
II.1 齿轮加工工艺守则(JB/Z307.9-88)	1160
II.2 齿轮结构与箱体焊接规范(德国 SMS 公司设计资料)	1171
II.3 平面包络环面蜗杆减速器(ZBJ19021-89)	1178
II.4 NGW 型行星齿轮减速器(JB1799-76)	1199
II.5 双排直齿行星减速器——大功率、重载行星齿轮减速器	1226
II.6 釜用立式行星齿轮减速器	1256
II.7 船用立式行星减速器(GB11870-89)	1259
II.8 JZQ 系列减速器	1262
II.9 专用减速器	1275
参考文献	1294

概 论

齿轮是使用量大面广的传动元件,自 1765 年欧拉(L. Euler)创立渐开线圆柱齿轮以来,至今已有二百多年的历史。迄今高速齿轮最大功率已达 73 549.9kW,最大齿轮质量达 200t,最高转速达 10 万 r/min,最高圆周速度高达 300m/s,其中不少齿轮的圆周速度保持在 165—220m/s,小至仪表齿轮,可见其应用之广。

0.1 齿轮传动的分类和特点



特 点

- 1) 瞬时传动比恒定,工作平稳性高。非圆齿轮传动的瞬时传动比应按所需变化规律设计。
- 2) 传动比范围大,可用于减速或增速。行星传动的零件少而传动比可很大。
- 3) 速度(节圆圆周速度)和传动功率范围大。可用于各种高速($v > 40\text{m/s}$)、中速和低速($v < 25\text{m/s}$)传动;功率可从小于 1W 到高达 73 549.9kW。

- 4) 传动效率高。例如,精度高的一对渐开线圆柱齿轮,效率可达 99% 以上。
- 5) 结构紧凑,适用于近距离传动。行星传动可用于同轴或偏心距很小的传动。
- 6) 制造成本高。需用专用设备、刀具和各种测量仪器。
- 7) 无过载保护作用。精度不高的齿轮在传动时,噪声、振动和冲击较大。

0.2 齿轮传动的选型原则

1) 考虑使用条件,如对传动结构尺寸、重量、效率、功率、速度、传动比、可靠性的要求等。对以上要求应作全面分析,如大功率长期运转的固定式设备,应着重提高其齿轮传动的效率;对短期间歇运转的移动式设备,则主要要求结构紧凑;对重要的齿轮传动,要求其可靠性高。

2) 考虑工艺条件,如生产厂的工艺水平、设备条件、生产批量等。

3) 考虑合理性、先进性和经济性等。

4) 参考已有或类似机械的使用经验选型。尽可能选用结构和工艺较简单的传动,如平行轴齿轮传动。

各类齿轮传动的主要特点和适用范围,见表 0-1,供选型时参考。

表 0-1 各类齿轮传动的主要特点和适用范围

名 称		主要特点	适用范围			
			传动比	传动功率	速度	应用举例
渐开线圆柱齿轮传动		传动的速度和功率范围很大,传动效率高,一对齿轮可达 98~99.5%,精度愈高,效率愈高;对中心距的敏感性小,装配和维修比较简便;可以进行变位切削及各种修形、修缘,以适应提高传动质量的要求;易于进行精确加工	单级 1~8, 最大到 10 两级到 45 三级到 75	到 25 000kW 最大 73 549.9kW	到 150m/s 最高 300m/s	应用非常广泛
圆弧圆柱齿轮传动	单圆弧圆柱齿轮传动	接触强度高;效率高;磨损小而均匀;没有根切现象;弯曲强度低于渐开线齿轮;不能做成直齿	同上	高速传动 可达 6 000kW 低速传动 输出转矩 达 1.2MN·m (117.7t·m) 功率达 4800kW	到 100m/s	高速传动如用于鼓风机、制氧机、汽轮机;低速传动如用于轧钢机械、矿山机械、起重运输机械等
	双圆弧圆柱齿轮传动	除具有单圆弧齿轮的优点外,弯曲强度也高于渐开线齿轮;可用同一把滚刀加工一对齿轮;传动平稳;振动和噪声较单圆弧齿轮小				
锥齿轮传动	直齿锥齿轮传动	轴向力小,可用滑动轴承;比曲线锥齿轮制造容易;可制成鼓形齿	1~8	367.75kW	<5m/s	用于机床、汽车、拖拉机及其他机械中轴线相交的传动
	曲线齿锥齿轮传动	比直齿锥齿轮传动平稳;噪声小;承载能力大。由于螺旋角产生轴向力,轴承应考虑止推问题	1~8	3677.5kW	>5m/s, ≥40m/s 需磨齿	用于汽车驱动桥传动、机床、拖拉机等传动

续 表

名 称			主要特点	适用范围			
				传动比	传动功率	速度	应用举例
准双曲面齿轮传动			比弧齿锥齿轮传动更平稳。利用偏置距增大小轮直径,因而可以增加小轮刚性,实现两端支承。沿齿长方向有滑动。需用双曲面齿轮油	1~10,用于代替蜗杆传动时可达 50~100	735. 5kW	>5m/s	最广泛用于越野及小客车,也用于卡车。可用以代替蜗杆传动
蜗杆传动	圆柱蜗杆传动	普通圆柱蜗杆传动	传动比大;工作平稳;噪声较小;结构紧凑;在一定条件下有自锁性。效率低	8~80	到 200kW	$v_s \leq 15 \sim 35$ m/s	多用于中、小负荷、间歇工作的情况下,如轧钢机压下装置、小型转炉倾动机构等
		圆弧圆柱蜗杆传动	接触线形状有利于形成油膜;主平面共轭齿面为凸凹齿啮合;传动效率及承载能力均高于普通圆柱蜗杆传动				
	环面蜗杆传动		接触线和相对速度夹角接近 90°,有利于形成油膜;同时接触齿数多,当量曲率半径大,因而承载能力大,一般比普通圆柱蜗杆传动大 2~3 倍	5~100	到 4500kW		轧机压下装置、各种绞车、冷挤压机、转炉、军工产品以及其他冶金矿山设备
	锥蜗杆传动		同时接触齿数多;齿面得到充分润滑和冷却;易形成油膜;承载能力高;传动平稳;效率高于圆柱蜗杆传动;制造和装配简单	10~359			适用于要求结构紧凑的场合
渐开线齿轮行星传动	渐开线齿轮行星传动 (2K-H 型)		体积小;重量轻;承载能力大;效率高;工作平稳。2K-H 型行星齿轮减速器与普通圆柱齿轮减速器比较,体积和重量可减小 50%左右,效率可提高 3%左右	2K-H 型 单级 2.8~12.5 两级 14~160 三级 100~2000	2K-H 型 达 6500kW	高低速均可	2K-H 型主要用于冶金、矿山、起重运输等低速重载机械;也用于压缩机、制氧机、船用等高速传动
	渐开线少齿差行星传动 (K-H-V 型)		传动比大;齿形容易加工;装拆方便;结构紧凑;效率约 80~90%。行星齿轮的中心轴承受径向力较大	单级 10~160	最大 45kW 常用 ≤ 10 kW		用于农业、轻工业、化工、电工机械、仪表、机床和附件;起重运输、工程机械等
摆线针轮行星传动			传动比大;传动效率较高,单级传动(带针齿套) $\eta = 90 \sim 94\%$;运转平稳;噪声低;结构紧凑;体积小;重量轻;在功率与传动比相同条件下,体积和重量约为定轴式减速器的 50~70%;过载和耐冲击能力较强;故障少;寿命长;维护简单。转臂轴承受径向力较大	单级(减速) 11~87 (一般为奇数) 两级 121~7569 多级 10° 或更大	0.1~245kW 常用 0.8~100kW		用于石油、化工、起重运输、冶金、矿山、机械、地质、轻工、纺织、医药等部门

续 表

名 称	主要特点	适用范围			
		传动比	传动功率	速度	应用举例
谐波齿轮传动	传动比大,范围宽;元件少,体积小,重量轻,在相同条件下可比一般齿轮减速器的元件少一半,体积和重量可减少20—50%;同时啮合的齿数多,双波传动在受载情况下同时啮合齿数可达总数的20—40%,故承载能力高,且误差可相互补偿,故运动精度高。可采用调整波发生器达到无侧隙啮合,运转平稳,噪声低;可通过密封壁传递运动;传动效率高,$i=100$时,$\eta=69-90\%$,$i=400$时,$\eta=80\%$,且传动比大时,效率并不显著下降。但主要零件柔轮的制造工艺较普通齿轮复杂	单级 1.002 ~1.02(波发生器固定,柔轮主动时) 50~500(柔轮或刚轮固定,波发生器主动时) 采用行星波发生器 150~4000 采用复波可达 2×10^6	几瓦到 几十千瓦		主要用于航空、宇航飞行器、雷达系统、造船、汽车、坦克、机床、纺织、起重机械、医疗设备等部门,如机床进给分度机构,自动控制系统中的执行机构和数字传递装置,光学机械中的精密谐波齿轮传动;用于化工设备、大型绞盘、起重运输设备和重载动力谐波齿轮传动;用于高压、高真空的密封式谐波齿轮传动等

0.3 齿轮技术发展概况

渐开线齿轮的原理自1765年欧拉(L. Euler)提出渐开线齿形以来有很大的发展。1837年威里斯(R. Willis)提出渐开线齿轮中心距变化不影响传动比的理论,并提出 14.5° 压力角的齿形制。1873年霍普(Hoppe)首先提出变位齿轮概念,以后在20世纪变位齿轮又得到广泛而深入的研究,直到50年代加夫里连柯(В. А. Гавриленко)提出封闭图的概念,又经格罗曼(М. Б. Громан)、鲍洛托夫斯基(И. А. Болотовский)等制作了可供实用的封闭图,从而比较完满地解决了变位系数的选择问题。

根据著名美国齿轮专家德得利(D. W. Dudley)的观点,自1890年至1990年这百年中齿轮技术的进展,大致可划分为四个时期,每个时期齿轮技术的进展都用齿轮设计和齿轮制造方面具有代表性的若干重大事件来表征。

1) 1890—1930年 齿轮设计和制造方面的主要进展有:渐开线和摆线齿形得到应用,压力角为 14.5° 的渐开线齿轮得到使用;初步建立了齿轮承载能力计算式。齿轮传动的的基本类型主要有:直齿轮、斜齿轮、锥齿轮和蜗杆传动。发明了滚齿机、插齿机和磨齿机,并得到了广泛使用。能加工大型齿轮,并用铸铁研具进行研磨,从而达到较高的精度。

2) 1930—1960年 齿轮设计和制造方面的进展主要有:一般情况下使用压力角为 20° 的渐开线齿轮,而对于宇航器和飞机中使用的高承载能力齿轮,则常常使用压力角为 25° 的渐开线齿轮。直齿、斜齿圆柱齿轮承载能力计算公式得到发展。对齿廓和螺旋线开始

进行修整,这一措施提高了齿轮的承载能力,锥蜗杆型齿轮得到发展。用多头滚刀滚齿,发明了剃齿机,且剃齿法在切齿后的精加工中得到了广泛应用(抛光、研齿很少应用)。发明了带插刀头的插齿机床,并在快速切齿中使用。测量渐开线、螺旋线以及齿距的量仪取得了很大进展。发展了齿轮抗胶合 EP(极压)添加剂。

3) 1960—1980 年 在齿轮设计和制造方面的进展主要有:基本上所有的动力传动齿轮都设计成渐开线齿轮。借助于中心距的变位,压力角在 20° — 25° 范围内变化,而切齿刀具通常采用 20° 的标准压力角。早先的直齿和斜齿轮承载能力计算公式得到很大改进。用滚压和珩磨精加工齿轮得到了应用。剃齿加工变得更为复杂,多种剃齿法和工艺得到应用。切齿机床和磨齿机床精度更高,对要求严格的齿轮,须检查齿根过渡曲线处在切齿时造成开裂,或者磨削时发生的灼伤和磨削裂纹,已能采用刮削的方法来加工比通常可加工硬度高得多的硬齿面齿轮。

4) 1980 年至今 齿轮设计和制造方面的进展主要有:重合度为 2 以上的特高齿形的直齿轮经常得到使用。为降低噪声,某些斜齿轮也制造成特高齿形。初步明确,齿轮的点蚀计算公式中必须考虑接触区弹性流体动力润滑油膜厚度问题,并把它作为一个重要的参变量来计算。初步明确认识到,即使在容许限度范围内,点蚀、磨损等类的损伤也能导致轮齿折断失效(甚至对未曾损伤的轮齿,在承受相当载荷时也会发生这种情况)。对于航空和舰船用的齿轮,钢的冶金质量得到了严格控制。新的齿轮材料得到了发展,这些材料具有高得多的强度和承受高温的能力。许多过去全钢齿轮设计为非金属齿轮设计所取代(为的是降低大批量生产中的齿轮成本,并解决工作条件不允许齿轮在油液中运转时的润滑问题)。用刮削法或用 CBN 切削法精加工硬齿面齿轮。大切削量加工中采用 CBN 磨削。用砂轮进行高速磨削。比磨削效果更好的珩齿工艺取得重大进展。齿轮几何精度多数采用自动检测。钢质齿轮的热处理过程得到更严密的控制,以满足更为严格的工程技术要求。非金属材料齿轮大量自动化生产。在工厂里和在对振动噪声有要求的领域里,大功率的齿轮传动必须经常进行监测(因为即使对于设计制造都很成功的齿轮传动装置来说,工程技术要求和环境条件的要求都已显得十分严格了)。

反映目前齿轮研究状况和水平的另一侧面,是当前齿轮实际承载能力的水平。根据多年来技术的发展和经验的积累,可用齿轮承载能力指标来表征齿轮的强度,另一方面这一指标也大致反映了目前齿轮设计和制造技术所达到的实际水平。目前常用的齿轮承载能力指标主要有系数 K 和 U 。 K 主要表征轮齿表面疲劳强度指标; U 主要表征轮齿弯曲强度指标。可按下列两式进行计算

$$K = (F_t/bd_1)(u \pm 1)u$$

$$U = F_t/bm$$

式中 F_t —— 齿轮分度圆上的圆周力, N;

b —— 齿宽, mm;

d_1 —— 小齿轮分度圆直径, mm;

m —— 模数, mm;

u —— 齿数比。

系数 K 和 U 目前所能达到的水平见表 0-2, 数据可作为初估设计齿轮传动的重要依据。

表 0-2 齿轮承载能力指标(可用于初估设计计算)

使用场合	钢质齿轮最低硬度		循环次数	精度	K 系数 N/mm ²	U 系数(单位负荷) N/mm ²
	小齿轮	大齿轮				
透平驱动发电机	225HB	210HB	10 ¹⁰	高精度	0.69	45
	335HB	300HB	10 ¹⁰	高精度	1.04	59
	59HRC	58HRC	10 ¹⁰	高精度	2.79	83
内燃机驱动压缩机	225HB	210HB	10 ⁹	高精度	0.48	31
	335HB	300HB	10 ⁹	高精度	0.76	38
	58HRC	58HRC	10 ⁹	高精度	2.07	55
一般工业用传动装置、 斜齿轮(驱动和被驱动装置 扭矩都相对平稳)	225HB	210HB		中高级精度	1.38	38
	335HB	300HB		中高级精度	2.07	48
	58HRC	58HRC		中高级精度	5.52	69
大型工业用传动装置、直齿 轮卷扬机、转窑、轧机等(被 驱动装置有中等冲击)	225HB	210HB		中等精度	0.83	24
	335HB	300HB		中等精度	1.24	31
	58HRC	58HRC		中等精度	3.45	41
航空航天、斜齿轮(单对)	60HRC	60HRC		高精度	5.86	117
航空航天、斜齿轮(行星)	60HRC	60HRC		高精度	4.14	76
车辆传动装置、斜齿轮	59HRC	59HRC	4×10 ⁷	中高级精度	6.20	124
车辆末级驱动、Ⅱ 齿轮	59HRC	59HRC	4×10 ⁶	中高级精度	8.96	124
大批生产的商业用小型齿 轮(节线速度小于 5m/s)	320HB	酚醛塑料层片	4×10 ⁷	中等精度	0.34	
	320HB	尼龙	10 ⁷	中等精度	0.24	
小机(配)件齿轮(节线速度 小于 2.5m/s)	200HB	锌合金黄铜	10 ⁶	中等精度	0.10	
	200HB	或铝合金	10 ⁶	中等精度	0.10	

0.4 齿轮技术的发展趋势

随着社会的发展、时间的推移,齿轮技术进展的步伐越来越迅速。近年来,工业发达国家制造的机械装置向着大型、精密、高速、成套和自动化方向发展,有的则向小型、轻量化方向发展,从而推动了齿轮技术的进步。

概括起来说,当今世界各国齿轮技术发展的总趋势是向六高、二低、二化的方向发展。六高即高承载能力、高齿面硬度、高精度、高速度、高可靠性和高传动效率;二低即低噪声、低成本;二化即标准化、多样化。与新技术革命的发展也紧密结合起来,具体表现在以下三个方面。

1. 齿轮的设计与研究方面

① 硬齿面、高精度将继续是齿轮技术发展的主流,在这方面的研究将继续深入进行。可以预计,相应的齿轮承载能力设计计算公式也将有很大的改进。

② 电子计算机在齿轮设计、制造、分析(CAD/CAM/CAA)方面得到更为广泛深入的应用,优化设计、可靠性设计、有限元分析等新的设计方法更普遍得到实际应用。设计周期大大缩短,设计质量大大提高,以获得更先进更可靠的齿轮产品。

③ 渐开线硬齿面齿轮仍占主导地位,行星齿轮等其他新型传动将迅速发展,如行星传动、摆线斜轮传动、谐波传动、减速电机和环面蜗杆副、尼曼蜗杆以及各种新型的传动装置等。由于具有体积小,重量轻,传动比范围大,成本低等优点发展十分迅速,大有赶上传统齿轮传动之势,并成为一个重要的发展方向。

④ 不同应用领域内齿轮品种规格的标准化和多样化。齿轮规格、参数、尺寸的标准化有利于专业化生产,提高生产率和产品质量,并可降低成本。而产品的多样化则可适应不同场合的需要。有些大型专业工厂,如德国ZF工厂生产的8~9种基型齿轮箱,每一基型可派生出十几种变型,可满足欧洲大部分车辆的需要—标准化和多样化相结合是齿轮技术发展又一趋势。

⑤ 高性能齿轮的研究与应用扩展到更广泛领域,不仅是在强度、寿命、精度、可靠性方面,而且在动力学性能如噪声、冲击、振动诸方面的研究都有重要的发展,与之相应的齿廓修形和齿向修整技术发展更臻完善。对于齿轮的质量及其控制将从技术角度上有更深入的认识,齿轮质量等级的划分将在更为详尽的技术条件基础上逐步建立起来。

⑥ 齿轮传动的摩擦学方面取得了重大的进展,尤其是润滑技术的发展,这主要指的是油品和添加剂这两个方面,润滑工程将成为一个十分重要的领域。

⑦ 齿轮传动将更多地从动力系统的角度进行总体考虑,即把发动机、齿轮传动装置和执行机构综合成为一个整体的动力机组,对该机组的噪声、振动、安装、拆卸以及维护保养等统一联系起来考虑,以组合成为一个整体性能优良的成套动力装置。

⑧ 为了解决工程实践中的实际问题,将有更多的设计和研究力量投入基础应用试验研究、预生产试验研究、生产试验以及对机组在使用现场的测试和评价分析研究等,并根据需要逐步发展机电一体化的产品,用微电子技术对机组的温度、裂纹、噪声、振动、运行品质进行动态监控。因而对于飞机、舰船、车辆(卡车、拖拉机、推土机等)有严格要求的齿轮传动,将可能有一种自始至终的随机监控仪。

2. 齿轮制造技术方面

① 用切削和磨削两种方法精加工硬齿面齿轮的制造技术都将进一步继续发展。这主要包括:提高磨齿的精度、效率和自动化程度;发展超硬滚切(刮削)技术和硬齿面珩齿技术。德国法舍尔公司的内齿圈珩轮珩磨机,对提高齿轮热处理后的精度有明显效果,可提高齿形、齿向精度1~2级,浇铸珩轮的母轮精度容易控制,珩齿中啮合重合度较大,深受用户欢迎。

② 内齿轮加工技术进一步发展,主要是:发展高效率、高精度和高自动化程度的插齿技术,包括采用硬质合金插刀和大批量生产精密内齿轮时用的拉刀拉削技术,以及采用车齿、剃齿、珩齿工艺加工内齿轮,而对大型内齿轮采用滚齿加工工艺等。

③ 剃齿技术也将继续发展,主要是提高剃齿精度,并包括径向剃齿、中硬齿面剃齿和大型齿轮剃齿等。

④ 对于大批量生产的齿轮,重要的发展趋势是:所有的制造和检验功能全盘自动化。

⑤ 发展新的齿轮量仪和监测系统,这将使齿轮质量以及齿轮质量控制这两方面都将有显著的进展。由于齿轮误差理论的进展和计算机应用以及光电技术等的发展,推动了齿轮量仪的新进展,尤其是在微电脑控制与数据处理方面将进展较快。此外,对于大型齿轮的测量,在机、在线测量,加工后测量和手提式现场测量的方法和量仪也都将进一步发展。在航天、航空齿轮制造中使用的各种提高和控制质量的方法,将逐步推广应用到一般工业用齿轮传动中去,齿轮的精度和材料的冶金质量都将处于严密的控制之下。

⑥ 刀具方面,加工硬齿面齿轮的高效、强力切削刀具将继续发展。在采用超硬高速钢和硬质合金滚刀的基础上 TiN 涂层滚刀也将广泛应用。此外,为提高切削用量和满足硬齿面齿轮的加工,还采用错齿滚刀、波纹滚刀、加长滚刀、内齿轮滚刀以及装配滚刀、多片组装滚刀等。在磨削加工方面,CBN 磨轮的应用引起了广泛的兴趣和关注。预计在高效精加工硬齿面齿轮的刀具方面可能还会有新的进展。

⑦ 齿轮加工机床方面,高效率、高精度、高刚度和高度自动化的齿轮加工机床将进一步得到发展。例如,为适应于硬齿面的高速高精度滚切,应发展静、动和热刚度好的高效、高精度滚齿机,并配以电子分度和数控技术等,以提高机床的自动化程度,至于高效、高度自动化的磨齿机也将有进一步发展。

⑧ 硬齿面齿轮制造的工艺流程也将不断发展,例如,切齿→淬齿→超硬滚切(刮削);切齿→淬硬→超硬滚齿→磨齿;滚齿→剃齿→淬硬→超硬剃齿;切齿→淬硬→珩齿以及切齿→淬硬→CBN 磨轮磨齿等流程。此外,为适应对多品种、中小批量的需求,估计柔性制造系统和成组技术也将在齿轮制造业中得到广泛的应用,特别是计算机辅助制造(CAM)的推广应用。

⑨ 热弹变形修形技术的应用,为了使齿轮在受载后齿面接触均匀,以保证齿轮运行的可靠性和降低振动噪声,热弹变形修形技术有着重要的意义。根据国外的试验研究表明,修形可以明显提高承载能力,约 50~100%。

高速与重载齿轮的齿面接触区的严格要求,是国外公司在制造中的注意重点。为了达到大、小配对齿轮的合理接触部位(齿高与齿长两个方向),在磨齿或剃齿中,大、小齿轮是配对制作的,即配磨或配剃的。

⑩ 齿面镀铜、齿根喷丸、齿根圆角等配套工艺的应用。高速重载齿轮的制造中,普遍采用上述配套工艺,以提高齿轮的承载能力。根据国外研究表明,齿面镀铜(10 μ m),可以提高齿轮初期运行中抗胶合能力 50%以上,齿根喷丸硬化可以提高轮齿弯曲强度 30%。

一些需要特殊考虑的方面,如喷丸处理、镀层、激光辐射处理和齿轮润滑剂的制造等方面的问题,预计在今后 20 年或更长的时间内将有较大的发展。

3. 齿轮材料与热处理方面

① 齿轮的新材料——金属的或非金属的新材料都将进一步发展。这些新材料的成份与传统使用的材料的成份与热处理方法有很大不同。金属材料方面,例如,等温淬火球墨铸铁(ADI)方面的研究,目前正由许多企业和组织提供资金并通过国际间的合作来共同发展这种材料。初步研究结果表明,这些材料与常用钢和铸铁相比有以下主要特点:工