

实用 齿轮设计 计算手册

张展 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



实用齿轮设计 计算手册

主 编 张 展
副主编 张国瑞 张焕武



机械工业出版社

前 言

齿轮是先进制造业的基础之一，是应用面最广、使用量最多的传动件，齿轮及齿轮传动装置的设计和制造能力，从一个方面反映了一个国家基础工业的发展水平。

科技的发展，促进了工业产品的更新换代。企业要在市场竞争中处于优势地位，产品必须始终保持领先水平。要不断向用户提供能耗低、效率高、寿命长、价格便宜的新产品。产品设计决定着产品的质量优劣、性能高低和性价比水平，产品设计是决定产品在市场上是否有竞争力的重要环节。

随着改革开放的深入发展，国内、国际交流日益增多，标准修订加速，产品更新加快。新原理、新结构、新技术、新工艺、新产品不断涌现。为适应科研、生产与教学的需求，满足广大工程技术人员提高齿轮传动装置的设计水平和实际使用能力的需要，我们编写了《实用齿轮设计计算手册》(Practical Gear Design and Calculation)一书。

书中编入了与齿轮设计有关的设计资料、最新国家标准和设计规范。编写了渐开线圆柱齿轮传动、星形齿轮传动、锥齿轮和准双曲面齿轮传动、蜗杆传动、2K-H型和3K型行星齿轮传动、渐开线少齿差行星齿轮传动、摆线针轮行星传动、销齿传动、小模数齿轮传动、齿轮常用材料及热处理、齿轮减速器的设计计算等内容。在编写过程中，力求突出科学性、先进性、实用性，使广大工程技术人员既了解最新资料，使用起来又非常方便。

本书由张展任主编，张国瑞、张焕武任副主编。参加编写者有李力行、刘述斌、何卫东、李欣、周新刚、卢梦龙、张弘松、成秀兵、张玉圣、孙长法等。其中张展编写第1、2、5~9、12、13章，第14章的一部分，以及第3章附录和书后附录；上海交通大学张国瑞教授编写第4、10章；大连交通大学李力行、何卫东、李欣教授编写第11章；刘述斌博士、高级工程师编写第3章1、2部分；上海华杰机电装备制造有限公司张焕武教授级高级工程师编写第14章的一部分，又参加书稿部分整理工作；江苏金象减速机有限公司孙长法高级工程师参与第7章编写；周新刚、卢梦龙高级工程师参与第2章、第8章编写；张弘松、成秀兵、张玉圣参与第14章编写。全书由张展统稿。

本书在编写过程中得到张焰庆、王永胜、张鹏飞、曾建峰、季晓昕、姚伟民、侯德宝、李秋武、刘国锦、徐开元、陈智辉、李运秋、孔霞、徐哲、谭正明、王海静、宁凤莲、蔡云龙、殷学泉、张绍明、鲁晓娟、朱琴、孟繁惠、鲁国学等诸位专家的大力支持，在此深表谢意！

本书各作者虽然长期从事齿轮传动装置的研发、设计和制造工作，书中融入了他们的工作体会和实践经验，但限于水平，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1 齿轮的历史与发展趋势	1
1.1 齿轮的历史	1
1.2 我国的齿轮传动	2
1.3 发展趋势	6
2 齿轮传动的特点	8
3 齿轮传动的类型	9
4 齿轮传动类型的选择原则	10
5 行星齿轮传动的特点和优越性	16
6 国内外概况	17
第 2 章 圆柱齿轮传动的设计计算	26
1 基本齿廓及模数系列	26
2 圆柱齿轮传动的几何尺寸计算	34
3 变位齿轮传动与变位系数选择	45
3.1 变位齿轮的功能	45
3.2 外啮合圆柱齿轮变位系数的选择	45
3.3 用线图法选择外啮合圆柱齿轮的变位系数	49
3.4 内啮合变位齿轮传动及变位系数的选择	52
4 用图表法计算变位齿轮的几何参数	58
5 用线图法计算变位齿轮的几何参数	73
6 圆柱齿轮齿厚的测量与计算	84
6.1 齿厚	84
6.2 公法线长度	85
6.3 分度圆弦齿厚	103
6.4 固定弦齿厚	108
6.5 量柱距尺寸的计算	110
7 圆柱齿轮传动的啮合质量指标	112
8 齿廓修形和齿向修形	120
8.1 齿廓修形	121
8.2 齿向修形	124
8.3 中国与世界主要工业国家的齿轮磨齿机概况	126
9 圆柱齿轮精度制 (GB/T 10095.1—2008、GB/T 10095.2—2008)	129
9.1 齿轮精度标准适用范围	130

9.2 齿轮偏差的定义及代号	130
9.3 齿轮精度等级及选择	131
9.4 齿轮检验	135
9.5 齿轮坯	161
9.6 表面结构的影响	166
9.7 轴中心距和轴线平行度	168
9.8 轮齿接触斑点	170
9.9 侧隙	172
9.10 新旧标准对照	186
9.11 各国圆柱齿轮公差等级对照	190
10 圆柱齿轮的结构	190
第3章 圆柱齿轮承载能力计算	197
1 工业用直齿轮和斜齿轮接触强度与弯曲强度计算方法 (GB/T 19406—2003/ISO 9085; 2002)	197
1.1 适用范围	197
1.2 基本计算公式	197
1.3 有关数据及系数的确定	198
1.4 计算实例	220
2 AGMA 直齿轮和斜齿轮接触强度与弯曲强度计算方法 (AGMA 2101—D04)	223
2.1 适用范围	223
2.2 基本计算公式	224
2.3 有关数据及系数的确定	224
2.4 使用 AGMA 标准计算实例	242
3 附录	243
3.1 接触应力 (Hertz) 公式的推导	243
3.2 齿面接触应力基本值 σ_{H0} 计算公式的建立	244
3.3 齿根弯曲应力基本值 σ_{F0} 计算公式的建立	249
第4章 星形齿轮传动的设计计算	253
1 概述	253
2 星形齿轮传动形式及其特点	253
3 浮动均载机构	256
3.1 均载机构的作用及其类型	256
3.1.1 均载机构的作用	256
3.1.2 均载机构的类型	256
3.2 均载机构浮动量的确定	258
3.2.1 太阳轮 (或内齿圈) 偏心误差引起的浮动量	259
3.2.2 星轮轴孔位置误差引起的浮动量	259
3.2.3 星轮偏心误差引起的浮动量	259
3.2.4 星轮架偏心误差引起的浮动量	260

3.2.5 各误差引起浮动件（太阳轮或内齿圈）的总位移量	260
3.3 浮动件浮动量的确定	261
3.3.1 采用齿式联轴器	261
3.3.2 采用动花键	261
3.4 载荷不均匀系数	262
3.4.1 载荷不均匀系数的计算	262
3.4.2 计算与实测比较	268
4 星形齿轮传动零部件的强度计算	270
5 端面齿轮传动在直升机上的应用	270
第5章 齿轮常用材料及热处理	272
1 齿轮常用材料	272
1.1 齿轮常用钢	272
1.2 国内外常用的齿轮材料	283
1.3 铸造齿轮用钢的化学成分及力学性能	295
1.4 齿轮常用的铸铁	296
1.5 齿轮用有色金属	298
1.6 齿轮用非金属材料	300
1.7 齿轮用材的选择原则	301
2 齿轮热处理	304
2.1 钢制齿轮的热处理	304
2.2 铸铁齿轮的热处理	338
3 齿轮材料质量及热处理工艺要求（GB/T 3480.5—2008）	343
第6章 锥齿轮和准双曲面齿轮传动的设计计算	357
1 锥齿轮基本参数	357
2 锥齿轮及准双曲面齿轮传动特点	358
2.1 锥齿轮传动特点	358
2.2 准双曲面齿轮传动特点	360
3 锥齿轮及准双曲面齿轮的特殊术语及定义	361
3.1 齿轮各部主要名称及代号	361
3.2 轮齿各部主要名称及定义	361
3.3 齿线	362
3.4 螺旋角及螺旋方向	362
3.5 齿高特点	363
3.6 重合度	363
4 锥齿轮及准双曲面齿轮的应用范围	363
5 锥齿轮及准双曲面齿轮的设计	365
5.1 分度圆直径的选择	366
5.2 齿数及模数的选择	366
5.3 齿宽的确定	368

5.4 螺旋角的选择	368
5.5 螺旋方向的确定	368
5.6 准双曲面齿轮的偏置矩	368
5.7 压力角的选择	369
5.8 齿侧间隙的选择	369
5.9 锥齿轮的变位	370
6 锥齿轮传动的几何计算	371
6.1 轴交角 $\Sigma = 90^\circ$ 锥齿轮传动的几何计算	371
6.2 轴交角 $\Sigma \neq 90^\circ$ 弧齿锥齿轮的几何计算	395
6.3 零度齿锥齿轮的几何计算	395
6.4 弧齿锥齿轮切齿根切验算	396
6.5 摆线齿锥齿轮的几何计算	396
7 准双曲面齿轮的几何计算	403
7.1 弧齿准双曲面齿轮的几何计算	403
7.2 摆线齿准双曲面齿轮的几何计算	410
7.2.1 HN 型准双曲面齿轮	410
7.2.2 HG 型准双曲面齿轮	410
8 锥齿轮传动的设计计算	414
8.1 锥齿轮的轮齿受力分析	414
8.2 锥齿轮主要尺寸的初步确定和主要参数的选择	415
8.3 锥齿轮承载能力计算方法	416
8.3.1 概述和通用影响系数 (GB/T 10062.1—2003)	416
8.3.2 齿面接触疲劳 (点蚀) 强度计算 (GB/T 10062.2—2003)	443
8.3.3 齿根弯曲强度计算 (GB/T 10062.3—2003)	452
8.4 圆柱齿轮、锥齿轮和准双曲面齿轮胶合承载能力计算方法	479
8.4.1 闪温法 (GB/Z 6413.1—2003)	479
8.4.2 积分温度法 (GB/Z 6413.2—2003)	502
8.5 设计计算实例	531
8.6 锥齿轮的接触强度简化计算	535
9 锥齿轮公差	537
9.1 公差等级	537
9.2 锥齿轮齿坯公差	541
9.3 锥齿轮和齿轮副的检验与公差	542
9.4 锥齿轮副侧隙	542
9.5 图样标注	547
9.6 锥齿轮结构	548
9.7 锥齿轮工作图上应注明的尺寸数据	549
第7章 蜗杆传动的设计计算	553
1 蜗杆传动概述	553

2 普通圆柱蜗杆传动	555
2.1 普通圆柱蜗杆传动的主要参数	555
2.2 普通圆柱蜗杆传动的几何尺寸计算	564
2.3 普通圆柱蜗杆传动的承载能力计算	566
2.4 实现合理啮合部位和制造“人工油函”的措施	572
2.5 蜗杆、蜗轮的结构	573
2.6 普通圆柱蜗杆传动的设计实例	574
2.7 圆柱蜗杆、蜗轮精度 (GB/T 10089—1988)	579
3 圆弧圆柱蜗杆传动	598
3.1 轴向圆弧齿圆柱蜗杆 (ZC ₃) 传动	598
3.2 环面包络圆柱蜗杆 (ZC ₁) 传动	604
4 平面二次包络环面蜗杆传动的设计及测试	613
4.1 平面二次包络环面蜗杆传动的设计	613
4.2 平面二次包络环面蜗杆传动的试验实例	617
4.3 典型零件图	622
第8章 2K-H (NGW) 型行星齿轮传动的设计计算	624
1 传动比的计算	624
1.1 2K-H (NGW) 型行星轮系的传动比计算	627
1.2 行星差动轮系的转速计算	630
1.3 周转轮系中行星轮转速的计算	634
2 行星齿轮传动齿数的选配	642
2.1 行星齿轮传动齿数选配的约束条件	642
2.2 2K-H (NGW) 型行星齿轮传动的齿数选配方法	649
2.3 双排 2K-H 型行星齿轮传动的配齿方法	652
2.4 齿数的选择	662
2.5 多级行星传动的传动比分配	671
3 行星齿轮传动的变位系数选择和几何计算	672
3.1 初配齿数	672
3.2 行星齿轮传动的变位方法及变位系数的选择	674
3.3 内啮合齿轮传动几何尺寸的计算	676
4 均载机构	677
4.1 均载机构的选择及误差计算	677
4.2 常用的均载机构	679
4.3 油膜浮动的均载装置	686
5 行星齿轮传动强度的简化计算	695
5.1 转矩 T_1 的确定	695
5.2 强度计算	697
5.3 计算实例	698
6 GB/T 19406—2003 的简化计算	699

6.1 基本计算式	699
6.2 齿面接触疲劳强度校核计算	700
6.3 齿轮弯曲疲劳强度校核计算	703
7 典型零件的设计与计算	709
7.1 齿轮结构的设计与计算	709
7.2 行星架的结构设计与计算	717
8 行星齿轮传动的效率与测试	729
8.1 齿轮传动的效率	729
8.2 行星齿轮传动效率的一般公式	732
8.3 2K-H 型行星齿轮传动的效率	734
8.4 行星齿轮传动效率的测试	739
9 NGW 行星齿轮减速器 (JB/T 6502—1993)	742
9.1 类型与应用	742
9.2 基本参数	746
9.3 技术要求	747
第9章 3K (NGWN) 型行星齿轮传动的设计计算	761
1 3K 型行星齿轮传动的传动比计算	761
2 3K 型行星齿轮传动齿数的选配	763
3 3K 型行星齿轮传动的强度计算	773
3.1 行星轮的受力和圆周力的计算	773
3.2 行星齿轮传动的强度计算	773
4 3K 型行星齿轮传动的效率	776
第10章 渐开线少齿差行星齿轮传动的设计计算	784
1 概述	784
2 传动形式及其特点	785
2.1 K-H-V (N) 型传动装置及其特点	785
2.1.1 按输出机构形式分	785
2.1.2 按减速器的级数分	792
2.1.3 按安装形式分	793
2.2 2K-H (NN) 型少齿差传动装置及其特点	793
2.3 锥齿少齿差行星齿轮传动装置及其特点	795
2.4 K-H-V 与 2K-H 结合型传动装置 (RV 传动) 及其特点	795
3 传动比与效率计算	796
3.1 传动比计算	796
3.2 效率计算	798
4 少齿差内齿轮副变位系数的选择与几何参数的计算	801
4.1 少齿差内啮合齿轮副的干涉	801
4.2 变位系数的选择	802
4.2.1 内啮合正变位齿轮引起的变化	802

4.2.2 变位系数的选择方法	804
4.3 少齿差内齿轮副几何参数的计算与示例	830
4.4 零齿差内齿轮副几何参数的计算	834
4.4.1 零齿差内齿轮副的啮合方程式	834
4.4.2 零齿差内齿轮副的主要几何限制条件	835
4.4.3 确定变位系数的方法	835
4.4.4 零齿差内齿轮副几何参数的计算与示例	836
5 少齿差行星齿轮传动的强度计算	844
5.1 作用力的分析	844
5.1.1 销轴式输出机构	844
5.1.2 浮动盘式输出机构	845
5.1.3 零齿差式输出机构	846
5.2 少齿差行星齿轮传动主要零件的常用材料	847
5.3 轮齿的强度计算	847
5.3.1 轮齿强度计算条件式	847
5.3.2 齿形系数	848
5.4 输出机构的强度计算	849
5.5 转臂轴承的选择	851
6 渐开线少齿差行星齿轮减速器主要零件的工作图	852
第 11 章 摆线针轮行星传动的设计计算	858
1 概述	858
1.1 摆线针轮行星减速器的结构	858
1.2 摆线针轮行星传动的特点	860
1.3 摆线针轮行星传动几何要素代号	860
2 摆线针轮行星传动的啮合原理	862
2.1 摆线针轮传动的齿廓曲线	862
2.2 摆线轮齿廓曲线的方程	864
2.2.1 摆线轮的标准齿形方程式	864
2.2.2 通用的摆线轮齿形方程式	864
2.3 摆线轮齿廓的曲率半径	866
2.4 复合齿形	869
2.4.1 齿形干涉区的界限点(起止点)	869
2.4.2 干涉后的摆线轮齿顶圆半径	870
2.4.3 复合齿形设计	871
2.5 二齿差摆线针轮行星传动	876
2.5.1 二齿差摆线针轮行星传动的齿廓	876
2.5.2 二齿差传动摆线轮齿廓的修顶	877
3 摆线针轮行星传动的基本参数和几何尺寸计算	880
3.1 摆线针轮行星传动的基本参数	880

3.2 摆线针轮行星传动的几何尺寸	882
3.3 W 机构的有关参数与几何尺寸	884
4 摆线针轮行星传动的受力分析	885
4.1 针轮齿与摆线轮齿啮合的作用力	885
4.1.1 在理想标准齿形无隙啮合时, 针轮齿与摆线轮齿啮合的作用力	885
4.1.2 修形齿有隙啮合时, 针轮齿与摆线轮齿啮合的作用力	886
4.2 输出机构的柱销(套)作用于摆线轮上的力	895
4.2.1 判断同时传递转矩的柱销数	896
4.2.2 输出机构的柱销(套)作用于摆线轮上的力	897
4.3 转臂轴承的作用力	898
5 主要件的强度计算	898
5.1 齿面接触强度计算	898
5.2 针齿销的抗弯强度和刚度计算	899
5.3 转臂轴承的选择	900
5.4 输出机构圆柱销的强度计算	900
6 摆线针轮传动的优化设计	901
6.1 参数优化设计(优选 a 与 r_p)	901
6.2 摆线轮齿形的优化设计	905
7 摆线针轮行星传动的技术要求	908
7.1 零件的要求	908
7.2 装配的要求	913
7.3 摆线针轮减速器的质量分等标准	914
8 设计计算公式与实例	920
9 主要零件的工作图	924
10 大型摆线针轮行星传动的结构简介	928
11 RV 减速器	929
11.1 RV 传动原理与特点	929
11.1.1 传动原理	929
11.1.2 传动特点	929
11.2 RV 传动受力分析	930
11.3 RV 传动效率分析	933
11.4 机器人用 RV 传动的设计要点	935
11.4.1 摆线轮的优化修形	935
11.4.2 摆线轮与针齿啮合力的分析	936
11.4.3 RV 传动的回差分析	939
11.4.4 RV 传动的传动误差分析	946
11.4.5 RV 传动的刚度分析	953
第 12 章 销齿传动的设计计算	963
1 概述	963

2 特点与应用	963
3 销齿传动的工作原理	964
3.1 外啮合销齿传动	964
3.2 内啮合销齿传动	965
3.3 销齿条传动	965
4 销齿传动的几何计算	966
5 销齿传动的强度计算	968
6 销齿传动公差	970
7 销轮轮缘的结构形式	971
8 齿轮齿形的绘制	971
9 设计实例与典型工作图	973
第 13 章 小模数齿轮传动的设计计算	979
1 概述	979
1.1 分类与特点	979
1.2 传动类型的选择	980
1.3 模数和齿数的确定	980
2 小模数渐开线圆柱齿轮传动	981
2.1 小模数渐开线圆柱齿轮基本齿廓 (GB/T 2362—1990)	981
2.2 几何计算	981
2.2.1 直齿标准圆柱齿轮传动的几何计算	981
2.2.2 变位齿轮传动的几何计算	982
2.2.3 斜齿圆柱齿轮传动的几何计算	986
2.2.4 齿条传动的几何计算	991
2.2.5 交错轴斜齿轮副的几何计算	991
2.3 小模数渐开线圆柱齿轮精度 (GB/T 2363—1990)	994
3 小模数锥齿轮传动	1014
3.1 小模数锥齿轮基本齿廓 (GB/T 10224—1988)	1014
3.2 几何计算	1014
3.3 小模数锥齿轮精度 (GB/T 10225—1988)	1017
4 小模数蜗杆传动	1029
4.1 小模数圆柱蜗杆基本齿廓 (GB/T 10226—1988)	1029
4.2 几何计算	1030
4.3 小模数圆柱蜗杆、蜗轮精度 (GB/T 10227—1988)	1036
5 小模数齿轮传动的结构	1051
5.1 齿轮的结构	1051
5.2 箱体的结构形式	1059
5.3 常用的齿轮材料	1059
6 小模数渐开线齿轮传动精度计算方法	1060
6.1 可调中心距小模数渐开线圆柱齿轮传动精度计算方法 (SJ/T 2923—1988)	1060

6.2 小模数渐开线圆柱齿轮传动链精度计算方法 (SJ/T 2557—1984)	1065
7 齿轮制图标准格式示例	1070
8 小模数齿轮传动装置	1072
8.1 小模数圆柱齿轮减速器通用技术条件 (GB/T 12473—1990)	1072
8.2 小模数圆柱齿轮减速器基本参数和尺寸 (QJ 2014—1990)	1073
8.2.1 外形和安装尺寸	1073
8.2.2 传动比公称值及其分配	1074
第 14 章 齿轮减速器的设计	1077
1 减速器的设计程序	1077
2 通用圆柱齿轮减速器的主要参数	1078
3 减速器的结构和零部件设计	1086
4 风力发电机组的传动装置	1104
4.1 三种机型	1104
4.2 风电机组齿轮箱	1104
4.3 齿轮箱的技术要求	1105
4.4 几种风电传动装置介绍	1105
4.5 设计中的几个问题	1108
4.6 制造中的几个问题	1112
4.7 试验与测试	1114
4.8 风电齿轮箱的结构图	1115
5 减速器加载试验方法	1123
5.1 通用齿轮装置形式试验方法 (JB/T 5077—1991)	1123
5.2 圆柱齿轮减速器加载试验方法 (JB/T 9050.3—1999)	1129
6 润滑方式与装置	1134
6.1 常用润滑方式	1134
6.2 常用润滑件	1138
6.2.1 油杯	1138
6.2.2 油标	1141
6.2.3 油枪	1145
6.2.4 润滑管件	1146
6.3 稀油润滑装置	1147
6.4 润滑油泵	1163
6.4.1 DCLP 润滑油泵	1163
6.4.2 CB-B 型齿轮泵	1164
6.4.3 BB-B 型摆线齿轮液压泵	1164
7 润滑与冷却	1169
7.1 齿轮传动装置的润滑	1169
7.2 减速器的冷却	1179
7.2.1 功率损耗与效率	1179

7.2.2 自然冷却	1180
7.2.3 强制冷却	1182
8 密封件	1184
8.1 减速器的密封	1184
8.2 机械密封用 O 形橡胶圈	1185
8.3 油封	1190
8.4 汉升油封	1196
8.5 宝色霞板公司 (德国) 的油封	1197
8.6 密封胶	1200
9 齿轮传动的噪声及其控制	1201
10 齿轮装置的验收规范	1204
10.1 空气传播噪声的试验规范 (GB/T 6404.1—2005/ISO 8579-1; 2002)	1204
10.2 验收试验中齿轮装置机械振动的测定 (GB/T 6404.2—2005/ISO 8579 -2; 1993)	1225
附录	1235
附录 A 齿轮基本术语	1235
附录 B 齿轮磨损和损伤的基本类型术语 (GB/T 3481—1997)	1239
附录 C 行星传动常用术语	1240
参考文献	1248

第1章 概 论

1 齿轮的历史与发展趋势

1.1 齿轮的历史

齿轮传动是近代机器中最常见的一种机械传动,是传递机器动力和运动的一种主要形式,是机械产品的重要基础零部件。它与带、链、摩擦、液压等机械传动相比,具有功率范围大、传动效率高、圆周速度高、传动比准确、使用寿命长、结构尺寸小等一系列特点。因此,它已成为许多机械产品不可缺少的传动部件,也是机器中所占比重最大的传动形式。齿轮的设计与制造水平将直接影响到机械产品的性能和质量。由于齿轮在工业发展中的突出地位,致使齿轮被公认为工业化的一种象征,也是一个国家工业水平的象征之一。

齿轮传动技术经历了长期的历史发展过程。公元前400~200年,中国古代就开始使用齿轮,在我国山西出土的青铜齿轮是迄今已发现的最古老齿轮,作为反映古代科学技术成就的指南车就是以齿轮机构为核心的机械装置。但从17世纪末,人们才开始研究能正确传递运动的轮齿形状。18世纪,欧洲工业革命以后,齿轮传动应用日益广泛,先是发展摆线齿轮,而后是渐开线齿轮。

早在1694年,法国学者Philippe De La Hire首先提出渐开线可作为齿形曲线。1733年,法国人Camus M.提出轮齿接触点的公法线必须通过中心连线上的节点。他考虑了两齿面的啮合状态,明确建立了关于接触点轨迹的概念。1765年,瑞士的Euler L.提出渐开线齿形解析研究的数学基础,阐明了相啮合的一对齿轮,其齿形曲线的曲率半径和曲率中心位置的关系。后来,Savary进一步完成这一方法,成为现在的Euler-Savary方程。对渐开线齿形应用作出贡献的是Robert Willis,他提出中心距变化时,渐开线齿轮具有角速比不变的优点。1873年,德国工程师Hoppe提出了对不同齿数的齿轮在压力角改变时的渐开线齿形,从而奠定了现代变位齿轮的思想基础。

直至19世纪末,展成切齿法的原理及利用此原理切齿的专用机床与刀具的相继出现,使齿轮加工具有较完善的手段后,渐开线齿形才显示出巨大的优越性。切齿时,只要将切齿刀具从正常的啮合位置稍作移动,就能用标准齿轮刀具在机床上切出相应的变位齿轮。1908年,瑞士MAAG公司研究并制造出展成法加工的插齿机。接着,英国BSS、美国AGMA、德国的DIN等相继对变位齿轮提出了多种计算方法。

为提高动力传动齿轮的使用寿命并减小其尺寸,英国人Humphris在1907年最早发表了圆弧齿形的设想。1926年,瑞士人Wildhaber取得了法面圆弧齿形斜齿轮的专利权。1955年,原苏联工程师Novikov在完成实用性研究后进入工业应用。1970年,

英国 Rolls-Royce 公司工程师 Studer 取得了双圆弧齿轮的美国专利。与此同时,我国与原苏联,以及日本等国对双圆弧齿形进行了一系列开发研究,并获得了普遍的应用成果。

1.2 我国的齿轮传动

建国初期,我国基本上没有齿轮产品的生产能力。经过第一、二个五年计划的建设,我国初步形成了一套包括机床、汽车、重型机械、电站设备、石油化工与通用设备等的机械制造能力。同时,相应的齿轮制造业也随着发展起来,到 1963 年左右,我国已不仅能成批生产齿轮及其装置,而且普通规格的齿轮机床、刀具、量仪也能由国内制造。1970 年后,国家为了上水平,新建与改建一批生产齿轮及齿轮箱的专业厂与车间,并从国外引进一批关键设备,使齿轮产品的生产能力和水平上了一个台阶。到 1980 年初,当时结合发展硬齿面齿轮制造技术与齿轮产品的更新换代,进一步装备了一批齿轮制造企业,这就基本上形成了我国齿轮制造业的完整体系。

齿轮传动在我国的发展是从渐开线齿廓起步的。渐开线齿轮在技术上最成熟,应用最具备条件,因而使用也最普遍,并在机械传动设计中占有主导地位。渐开线齿廓具有中心距敏感性小,可进行各种变位和修形设计,易于进行精密加工、互换性好等一系列优点。从 20 世纪 50 年代起,在一般与重要的设备传动系统中,都采用渐开线齿轮。限于当时的制造水平,多数齿轮传动采用定轴式结构,普遍使用以调质热处理为主的所谓软齿面齿轮,其制造精度相当于 GB/T 10095.1~2—2008 的 8~9 级。由于渐开线软齿面齿轮表面接触强度薄弱,加之一般质量水平不高,在使用中往往出现早期失效,尤其在一些承载较重的场合,使用寿命较低。1958 年以后,我国开始研究与应用单圆弧齿轮。这种齿轮主要靠轴向传递运动,其端面齿廓理论上呈点啮合,因而降低了对齿廓的技术要求;在垂直于齿面瞬时接触线方向,诱导曲率半径较大;再有,齿面润滑性能较好,因此,在软齿面条件下其齿面接触强度与渐开线齿轮相比有显著提高。从 20 世纪 60 年代起,单圆弧齿轮在国内获得了广泛应用。1970 年以后,我国由单圆弧齿轮发展为双圆弧齿轮,即由单凸圆弧或单凹圆弧组成齿廓改变为由凸凹圆弧上下分段组成的单一齿廓形式,也就是说,大、小齿轮的基本齿廓是一致的。它简化了切齿工艺,大大提高了轮齿的弯曲强度,使圆弧齿轮的技术达到了更完善的程度。这对于同样参数与尺寸的软齿面圆柱齿轮,圆弧齿轮的工作寿命高于渐开线齿轮,特别是应用在一些重负荷、大功率的齿轮传动中,取得了良好的效果。

20 世纪 70 年代末,随着国外机械产品的引进与齿轮制造水平的提高,齿面经渗碳淬火、渗氮或感应淬火处理的所谓硬齿面渐开线齿轮开始为人们所重视。这种齿轮由于齿面硬度高、轮齿精度好而大大提高承载能力和使用寿命,并因结构尺寸小使齿轮装置的成本大为降低。20 世纪 80 年代末,我国已初步具备了硬齿面渐开线齿轮的制造能力,齿轮加工精度一般为 6~7 级,高精度齿轮可达 4~5 级。与此同时,双圆弧齿轮的硬齿面技术也有新的发展,研制成功齿面经渗氮处理的硬齿面双圆弧齿轮,且已在大功率高参数齿轮传动装置上推广应用。近来,又在成功应用珩齿新工艺基础上,开发出超

硬滚切（也称刮齿）圆弧齿轮的精加工工艺，将会进一步扩大硬齿面圆弧齿轮的应用范围。

为避免根切、减少传动结构尺寸、提高齿面接触强度，变位齿轮的应用日益增多。一般根据齿轮的工作条件、材料热处理状况，以及性能指标的要求，选取各自不同的变位系数。近年来，有的重载齿轮为了降低齿面接触应力，提高抗胶合能力，设计大变位系数的齿轮传动，使最大滑动率接近相等；有的开式齿轮为抗磨损与提高齿轮弯曲强度，选择总变位系数尽可能大的正变位设计，使齿轮在不改变结构、不增加制造成本的条件下，提高承载性能与使用寿命，充分发挥了变位齿轮的优越性。

实践已经证明：符合理论齿廓与理论齿向的齿轮传动不一定具有良好的动态性能。重要的齿轮传动通常设计为修形齿轮。现在，不仅那些有降噪要求的机床与车辆齿轮需要齿顶修形（也称修缘）或齿向修鼓形，而且发展为整个齿廓与齿向进行不同方式的修形设计。特别对于大功率高速或重载齿轮传动，由于受到轮齿变形与制造安装误差等影响，因静态齿面接触情况的改变，造成齿轮运转中的振动与偏载。一般对6级精度以上的圆柱齿轮传动，都可进行修形设计，这种轮齿修形的概念已较普遍地应用在其他类型的齿轮传动中。

各类齿轮的行星传动是近20年来发展较快的一种传动形式，它是一种至少有一个齿轮的几何轴线绕中心轮轴线回转的齿轮传动。因此种传动采用数个行星轮或一个行星轮的多个轮齿同时传递负荷，并利用了内啮合的组合形式，因而具有体积小、重量轻、速比范围大、传动效率高、噪声小等优点，广泛用于冶金、矿山、起重运输、通用、化工、航天等设备上，作为增速、减速与变速的传动装置。在有些要求结构紧凑的场合或是同轴线传动的情况下，它已替代了一批平行轴结构的定轴传动。

渐开线齿轮行星传动一般用于大、中功率的增、减速传动，而各种少齿差式的行星传动主要使用在中、小功率的大减速比传动。所谓少齿差即是在内齿轮啮合副中，其内齿轮与外齿轮的齿数差很少而得名。对于渐开线齿轮少齿差行星传动与摆线针轮少齿差行星运动来说，其基本原理与计算方法相同，其行星运动的产生，并无单独的行星轮而是由其中的外齿轮通过一转臂轴承的偏心作用所致。渐开线少齿差中的外齿轮一般是不磨齿的，因而加工简便，成本低。摆线少齿差中的外齿轮（摆线轮）是齿面渗碳淬火磨齿的。传动效率较高，但需专用加工设备，因为是成批生产，成本不会太高，应用面越来越广，它是目前我国齿轮减速器中年产量最大的一种。另一种谐波齿轮少齿差行星传动是依靠柔性材料制成的外齿轮所产生的可控弹性变形来传递运动。常应用于传动功率不大、运动精度高、回差小、结构更为紧凑的大速比传动装置，特别适合于仿生机械、医疗机械、电子设备及航空航天装置上要求高动态性能的伺服系统中使用。

锥齿轮与准双曲面齿轮根据其类型、制造精度与材料热处理的不同，具有各自的应用范围。在车辆与航空方面，较多采用弧齿锥齿轮，并长期沿用美国的格里森（Gleason）制，多年来已形成一整套比较成熟的设计与工艺方法。也有一些采用奥利康（Oerlikon）制，这种锥齿轮是在延伸外摆线锥齿轮铣齿机上加工的。20世纪90年代后，针对重型、矿山设备中大型曲线齿锥齿轮的需要，连续从国外引进由德国克林贝格