

李学艺 曾庆良 江守波 著

# 渐开线圆柱齿轮传动智能设计 及啮合仿真分析



科学出版社

# 渐开线圆柱齿轮传动智能设计 及啮合仿真分析

李学艺 曾庆良 江守波 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

渐开线圆柱齿轮传动是机械设备中最常用、最典型的传动形式,其设计制造的智能化水平对实现现代机械产品开发的智能化具有至关重要的作用。本书对渐开线圆柱齿轮传动的智能设计与啮合仿真分析技术进行了系统研究与实现。首先根据齿轮传动原理实现了渐开线圆柱齿轮传动的参数化初步设计及强度校核,然后基于精确的边界约束对齿轮传动进行了结构优化,并对齿轮变位系数的优选进行了探讨。为了对圆柱齿轮传动的啮合性能及强度进行精确分析,利用现代 CAD 与 CAE 技术,在 ANSYS 平台下实现了圆柱齿轮传动的参数化有限元建模与啮合仿真分析,有效获取了齿轮传动过程中任意啮合位置的啮合特性,为齿轮疲劳寿命分析及进一步优化提供依据。

本书可作为高等院校机械类专业研究生和教师的参考书或教材,也适于机械传动尤其是齿轮传动相关领域的科研技术人员阅读,还可供从事数字化设计与仿真分析的高校师生及技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

渐开线圆柱齿轮传动智能设计及啮合仿真分析/李学艺,曾庆良,江守波著.  
—北京:科学出版社,2016  
ISBN 978-7-03-048807-7

I. 渐… II. ①李…②曾…③江… III. 圆柱齿轮-齿轮传动-智能设计  
IV. TH132.417

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 132917 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:郭瑞芝  
责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:287 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

齿轮机构是各种机械设备中应用最广的动力和运动传动装置之一,并且通常是这些设备的关键部件,其工作性能与寿命直接影响设备的整机性能与寿命。与其他常用机构相比,齿轮机构结构复杂、制造和安装精度要求高、受工作环境的影响大,其结构设计及优化问题一直是机械制造领域的难点问题。随着现代科技的迅猛发展和先进制造技术的持续进步,机械产品的开发向轻量化、智能化和柔性化方向发展,制造企业及相关技术人员必须快速响应市场需求,及时高效地提供高性能、长寿命、低成本、易维护的具有市场竞争力的产品。渐开线圆柱齿轮传动作为最常用、最典型的齿轮传动机构之一,其设计制造的智能化水平对机械产品开发的智能化发展具有至关重要的作用。随着先进制造工艺和制造装备的不断发展,渐开线圆柱齿轮传动的制造工艺与装备取得了长足的进步,但是受其结构及工作性能复杂性的影响,在设计方法和手段方面仍相对滞后,目前仍以传统的经验设计作为主要设计手段,不能适应当前产品开发智能化、轻量化发展的要求,因此提高渐开线圆柱齿轮传动的智能化设计水平是制造业智能化、信息化发展的必然要求。计算机仿真技术和有限元技术的快速发展与广泛应用有效弥补了传统机械设计方法难以精确分析复杂外形零件受载、变形等工作特性的缺陷,为齿轮等复杂产品零件的设计计算与仿真分析提供了行之有效的工具。

本书结合传统齿轮设计方法的快捷性与有限元仿真分析的准确性对渐开线圆柱齿轮传动的智能化设计与啮合仿真分析方法进行研究,并在此基础上开发渐开线圆柱齿轮智能设计及面向 ANSYS 平台的仿真分析系统。该系统利用经典齿轮设计理论可实现渐开线圆柱齿轮传动的参数化初步设计与强度校核计算、基于精确边界约束的齿轮结构优化和齿轮变位系数的优选;然后结合 ANSYS 软件的瞬态仿真分析功能与静接触分析功能,对设计的渐开线圆柱齿轮副进行参数化瞬态啮合分析与静接触分析,有效获取齿轮副在任意啮合位置的载荷、应力、应变等啮合特性参数及相应的变化规律,为齿轮副的精确疲劳寿命分析与进一步结构优化提供可靠的保证。本书的主要素材是作者及课题组成员近十年研究积累的成果,主要内容源于多个纵向科研项目和企业委托项目。相关技术已在企业进行了应用实践,并取得了良好的效果,部分关键技术已先后在国内外多个高水平学术期刊上发表,得到了行业内专家的认可。

山东科技大学万丽荣教授、钟佩思教授、张鑫教授、王全为教授、丁淑辉副教授、王成龙副教授、魏军英讲师和王亮讲师为本书的撰写提供了技术指导。已毕业

的硕士研究生李超超、李三帅和王权参与了本书相关课题的研究,书中包含他们的部分研究成果。在读研究生吕永刚、王宁宁、张庆雪、韩文广、赵丹丹和崔燕芳参与了部分章节的编写与文字整理工作。中国煤炭科工集团太原研究院有限公司王步康副总经理、天地科技股份有限公司黄学文研究员、中国计量科学研究院力学与声学计量科学研究所王金涛副研究员为本书相关成果的获取提供了大量帮助。

本书的研究成果是在国家自然科学基金(51375282)、泰山学者建设工程专项经费、山东省自然科学基金(ZR2015EM017、ZR2014EEM021)、山东省科技发展计划课题(2014GGX103043)、山东科技大学领军人才发展计划的资助下取得的。同时,科学出版社为本书出版提供了支持。作者向所有对本书出版提供了帮助的朋友和单位表示诚挚的感谢。

在本书撰写的过程中,参考了国内外专家和同行的大量论文、著作,在此表示感谢。除所列主要参考文献之外,书中还参考了网络等媒体上的文献资料,由于有些资料来源无法考证,难以指明其准确出处,在此一并向这些文献作者表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 概述                   | 1  |
| 1.1 渐开线圆柱齿轮传动及其应用特点        | 1  |
| 1.2 渐开线圆柱齿轮传动参数化设计及优化技术    | 2  |
| 1.2.1 渐开线圆柱齿轮传动参数化设计       | 2  |
| 1.2.2 渐开线圆柱齿轮结构优化          | 3  |
| 1.2.3 渐开线圆柱齿轮变位系数优选        | 5  |
| 1.3 渐开线圆柱齿轮传动仿真分析技术        | 6  |
| 1.3.1 渐开线圆柱齿轮参数化实体建模       | 6  |
| 1.3.2 渐开线圆柱齿轮静接触分析         | 7  |
| 1.3.3 渐开线圆柱齿轮瞬态啮合仿真分析      | 8  |
| 1.4 本章小结                   | 9  |
| 参考文献                       | 9  |
| 第 2 章 渐开线圆柱齿轮传动参数化设计及强度校核  | 14 |
| 2.1 参数化设计及强度校核的总体流程        | 14 |
| 2.2 渐开线圆柱齿轮传动参数化初步设计       | 15 |
| 2.2.1 初步设计的详细流程            | 15 |
| 2.2.2 齿轮传动参数化设计的实现过程       | 19 |
| 2.3 初步设计及强度校核过程中的数据自动查取    | 22 |
| 2.3.1 初步设计及强度校核过程中的数据处理方法  | 22 |
| 2.3.2 工程数据自动查取的实现          | 23 |
| 2.3.3 工程数据处理的细节问题          | 29 |
| 2.4 本章小结                   | 30 |
| 参考文献                       | 30 |
| 第 3 章 基于精确约束条件的渐开线圆柱齿轮结构优化 | 31 |
| 3.1 渐开线圆柱齿轮结构优化的理论基础       | 31 |
| 3.1.1 优化变量                 | 31 |
| 3.1.2 目标函数                 | 31 |
| 3.1.3 约束条件                 | 32 |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 3.2 基于精确约束条件的渐开线圆柱齿轮结构优化方法·····      | 33        |
| 3.2.1 渐开线圆柱齿轮结构优化中的强度约束条件分析·····     | 33        |
| 3.2.2 精确约束条件优化方法的实现过程·····           | 36        |
| 3.3 两级渐开线圆柱齿轮联合优化问题的数学模型·····        | 38        |
| 3.3.1 联合优化问题的优化变量·····               | 38        |
| 3.3.2 联合优化问题的目标函数·····               | 39        |
| 3.3.3 联合优化问题的约束条件·····               | 40        |
| 3.3.4 两级传动联合优化的细节问题·····             | 44        |
| 3.4 两级渐开线圆柱齿轮结构优化及对比分析·····          | 45        |
| 3.4.1 两级渐开线圆柱齿轮结构优化计算·····           | 45        |
| 3.4.2 与传统优化方法的对比分析·····              | 46        |
| 3.5 本章小结·····                        | 47        |
| 参考文献·····                            | 48        |
| <b>第4章 渐开线圆柱齿轮变位系数的优选</b> ·····      | <b>49</b> |
| 4.1 变位系数对齿轮强度的影响及选择原则·····           | 49        |
| 4.1.1 变位系数对齿轮强度的影响·····              | 49        |
| 4.1.2 变位系数的常用选择原则·····               | 49        |
| 4.2 渐开线圆柱齿轮变位系数优选的数学模型·····          | 52        |
| 4.2.1 渐开线圆柱齿轮变位系数优选的实现·····          | 52        |
| 4.2.2 变位系数优选问题的优化变量·····             | 52        |
| 4.2.3 变位系数优选问题的目标函数·····             | 53        |
| 4.2.4 变位系数优选问题的约束条件·····             | 53        |
| 4.3 单级渐开线圆柱齿轮变位系数优选及对比分析·····        | 55        |
| 4.3.1 单级渐开线圆柱齿轮变位系数优选计算·····         | 55        |
| 4.3.2 与传统优选方法的对比分析·····              | 58        |
| 4.4 本章小结·····                        | 59        |
| 参考文献·····                            | 59        |
| <b>第5章 基于B样条曲面的渐开线圆柱齿轮精确建模</b> ····· | <b>60</b> |
| 5.1 面向CAE分析的渐开线圆柱齿轮精确造型方法·····       | 60        |
| 5.1.1 渐开线圆柱齿轮齿廓曲面成形原理·····           | 60        |
| 5.1.2 渐开线圆柱齿轮参数化精确建模方法·····          | 65        |
| 5.2 基于均匀双三次B样条插值的齿面造型·····           | 66        |
| 5.2.1 基于IGES接口的均匀双三次B样条曲面插值技术·····   | 66        |
| 5.2.2 渐开线圆柱齿轮齿面点阵的提取·····            | 68        |
| 5.2.3 齿轮齿廓曲面的形成·····                 | 72        |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 5.3 基于 IGES 曲面与 APDL 命令流的齿轮实体建模 ..... | 74         |
| 5.3.1 APDL 实现齿轮建模参数化的方法 .....         | 74         |
| 5.3.2 渐开线圆柱齿轮实体模型的生成 .....            | 74         |
| 5.4 渐开线圆柱齿轮参数化无侧隙啮合装配 .....           | 80         |
| 5.5 本章小结 .....                        | 83         |
| 参考文献 .....                            | 83         |
| <b>第 6 章 渐开线圆柱齿轮传动啮合仿真分析 .....</b>    | <b>85</b>  |
| 6.1 齿轮啮合仿真分析方法 .....                  | 85         |
| 6.1.1 齿轮啮合弹性接触基本原理 .....              | 85         |
| 6.1.2 齿轮啮合仿真分析实施步骤 .....              | 87         |
| 6.2 渐开线圆柱齿轮传动有限元建模 .....              | 88         |
| 6.2.1 基于重合度的齿轮副简化实体建模 .....           | 89         |
| 6.2.2 齿轮副自适应映射网格模型生成 .....            | 90         |
| 6.2.3 齿轮副齿面接触模拟 .....                 | 98         |
| 6.3 渐开线圆柱齿轮瞬态啮合仿真分析 .....             | 101        |
| 6.3.1 瞬态啮合分析实现方法 .....                | 101        |
| 6.3.2 瞬态啮合性能分析 .....                  | 104        |
| 6.4 渐开线圆柱齿轮副任意啮合位置静接触分析 .....         | 112        |
| 6.4.1 齿轮副任意位置啮合的实现方法 .....            | 112        |
| 6.4.2 齿轮副静接触分析 .....                  | 115        |
| 6.5 本章小结 .....                        | 118        |
| 参考文献 .....                            | 118        |
| <b>第 7 章 影响渐开线圆柱齿轮仿真分析的关键因素 .....</b> | <b>119</b> |
| 7.1 影响齿轮啮合仿真分析的主要因素 .....             | 119        |
| 7.2 齿轮结构参数对啮合性能的影响 .....              | 123        |
| 7.2.1 齿根圆角半径的影响 .....                 | 123        |
| 7.2.2 齿宽的影响 .....                     | 128        |
| 7.3 计算参数对齿轮啮合仿真的影响 .....              | 130        |
| 7.3.1 网格密度的影响 .....                   | 130        |
| 7.3.2 载荷系数的影响 .....                   | 133        |
| 7.3.3 摩擦系数的影响 .....                   | 135        |
| 7.3.4 接触刚度系数的影响 .....                 | 140        |
| 7.4 本章小结 .....                        | 144        |
| 参考文献 .....                            | 144        |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第 8 章 渐开线圆柱齿轮传动智能设计及仿真分析系统开发        | 146 |
| 8.1 系统的开发思路及总体框架                    | 146 |
| 8.1.1 开发思路                          | 146 |
| 8.1.2 总体框架                          | 147 |
| 8.1.3 各模块功能简介                       | 148 |
| 8.1.4 系统开发工具及运行环境                   | 150 |
| 8.2 渐开线圆柱齿轮传动参数化结构设计及优化系统开发         | 153 |
| 8.2.1 目标函数及约束条件                     | 153 |
| 8.2.2 优化算法的选择及设置                    | 153 |
| 8.2.3 优化模块动态链接库文件的生成                | 154 |
| 8.3 面向 ANSYS 应用平台的渐开线圆柱齿轮啮合仿真分析系统开发 | 156 |
| 8.3.1 ANSYS 参数化设计语言                 | 156 |
| 8.3.2 系统与 ANSYS 平台的参数交互             | 157 |
| 8.3.3 应用实例                          | 164 |
| 8.4 本章小结                            | 194 |
| 参考文献                                | 195 |
| 附录                                  | 196 |

# 第 1 章 概 述

## 1.1 渐开线圆柱齿轮传动及其应用特点

齿轮传动是机械传动中最重要的传动形式之一,具有效率高、工作性能可靠、传动比稳定等特点,其传递的功率可高达数十万千瓦<sup>[1]</sup>,因此被广泛应用于各种减速器和机械传动系统。齿轮传动形式多样,按照齿轮结构的不同,可分为圆柱齿轮传动、锥齿轮传动、非圆齿轮传动等,其中圆柱齿轮传动由于结构形式简单、设计制造相对容易,在各种机械装置中应用最为广泛。齿轮啮合传动是通过啮合齿轮的共轭齿廓来实现的,为了保证齿轮传动的准确性与运动平稳性,齿廓曲线的设计不仅要满足传动比的要求,还需综合考虑其承载能力的高低、加工制造的难易以及对中心距偏差的敏感性等因素。对于定传动比齿轮而言,齿廓曲线可采用渐开线、摆线、抛物线、圆弧和余弦曲线等,综合考虑上述各种因素,渐开线齿形比其他齿形具有更多的优点,如传动比恒定不变、中心距变动不影响传动比、渐开线齿廓之间的正压力方向不变等,因此渐开线齿轮在生产中得到了最为广泛的应用<sup>[2]</sup>。

渐开线圆柱齿轮传动分为渐开线直齿圆柱齿轮传动与渐开线斜齿圆柱齿轮传动。直齿圆柱齿轮端面齿廓为渐开线,在支撑轴无变形的理想条件下为全齿宽啮合,实际承载时受轴与齿轮的变形、齿轮副在轴上不对称布置等因素的影响,直齿圆柱齿轮传动在齿宽方向会产生偏载,无法实现全齿宽啮合,严重影响承载能力与齿轮寿命。此外,直齿圆柱齿轮啮合传动时,接触线与轴向平行,卸载时轮齿同时进入和脱离啮合,导致传动平稳性差,冲击、振动和噪声较大。斜齿圆柱齿轮传动有效地克服了直齿圆柱齿轮的上述缺点,其法截面齿廓为渐开线,啮合传动时接触线与齿轮轴线有交角,齿轮轮齿沿齿向逐渐进入和脱离啮合,所受载荷是逐渐加上且逐渐卸掉的,与直齿圆柱齿轮相比,传动平稳,冲击、振动和噪声较小,因此在承载能力和运动平稳性要求较高的场合,多采用斜齿圆柱齿轮传动。

标准圆柱齿轮传动虽具有设计简单、互换性好等优点,但也有一些不足之处,如齿轮齿数少于某特定齿数时会发生根切现象、实际中心距不等于标准中心距时无法安装或侧隙过大、一对啮合齿轮中大小齿轮的承载能力与寿命相差较大等。为了改善标准齿轮的上述不足,须对标准齿轮进行必要的修正,目前采用最广泛的是变位修正法。齿轮变位是通过改变齿轮加工刀具与轮坯的相对位置来实现的,刀具远离轮坯中心,加工的齿轮为正变位齿轮。反之,若刀具趋近轮坯中心,加工的齿轮为负变位齿轮。与标准齿轮相比,变位齿轮的分度圆、基圆与齿距均不变,

但齿厚、齿槽宽、齿廓曲线的工作段、齿顶高、齿根高等都发生了变化。齿轮变位修正的程度取决于变位系数,若两啮合齿轮的变位系数均为零,则为标准齿轮传动;若两齿轮的变位系数符号相反且大小相等,则为等变位齿轮传动;若两齿轮变位系数之和不等于零,则为不等变位齿轮传动。通过变位修正法制造渐开线圆柱齿轮,不仅可以避免根切现象,还可以配凑中心距、提高齿轮副的承载能力和缩小机构的结构尺寸,并且不会增加加工制造的难度,因此变位齿轮传动在各种机械中得到了广泛的应用。

目前机械产品的开发向轻量化、智能化和集成化方向发展,需要设计人员快速把握市场的需求,及时地推出适合市场需要、充满竞争力的新产品。渐开线圆柱齿轮传动作为一种典型的齿轮传动机构,其设计制造在现代机械产品开发中占有十分重要的地位。随着制造技术的不断发展,渐开线圆柱齿轮传动的制造工艺与装备已相对比较成熟。但受其结构及工作性能复杂性的影响,其设计技术多年来相对滞后,仍以传统的经验设计法为主要设计手段,难以满足当前制造业智能化、轻量化发展的要求,因此提高齿轮传动机构的智能化设计水平已成为制造业必须面对和解决的重要技术内容。渐开线圆柱齿轮传动的智能设计涉及机械传动、材料力学、计算机仿真和有限元等多个技术领域,是一项复杂的系统工程,要实现其智能化设计,须解决两大技术问题,即渐开线圆柱齿轮传动参数化设计及优化技术和渐开线圆柱齿轮传动仿真分析技术。

## 1.2 渐开线圆柱齿轮传动参数化设计及优化技术

### 1.2.1 渐开线圆柱齿轮传动参数化设计

与大多数机械零件相比,齿轮机构的设计比较复杂,不仅涉及齿数、压力角、中心距等数十个结构参数,还需考虑载荷、工作环境等工况参数,设计过程中需同时满足齿根弯曲、齿面接触等多种强度准则,计算量大且需要使用大量的经验公式,因此采用传统的手工设计方法过程繁杂、效率低、不适于后续的改进与结构优化。多年来,国内外许多学者与工程技术人员基于不同的应用平台和编程环境,对渐开线圆柱齿轮传动的数字化设计及智能技术进行了大量研究,尤其是在参数化设计与校核方面取得了大量研究成果。南京航空航天大学李迪<sup>[3]</sup>根据齿轮强度计算的国家标准,在 MATLAB 环境下分别实现了行星齿轮齿面接触强度、齿根弯曲强度校核的计算,并开发了齿轮强度计算模块。合肥工业大学黄康等<sup>[4]</sup>利用 C 语言开发了齿轮强度计算数据库,对涉及齿轮强度计算的表格、线图实现了规范化管理,并基于该数据库结合 CAD 技术开发了齿轮传动设计系统,可根据设计数据自动生成工程图。王英姿等<sup>[5]</sup>对齿轮传动参数化设计过程中的数据处理问题以及系统构建问题进行了研究,对设计过程中的数表处理、线图的表达、设计参数的圆整处

理等内容进行了研究与实现,最后在 Visual Basic(VB)环境下开发出了齿轮传动参数化设计系统,有效提高了齿轮设计效率。强增、陈定方、殷国富、翁妙凤等先后对齿轮传动设计专家系统进行了研究和开发,解决了专家系统知识库、数据库、推理机制策略构建等诸多关键问题,实现了齿轮传动的方案自动设计、强度自动校核等功能<sup>[6-9]</sup>。肖志信、朱学凯、贺艳、于春丽等先后在 VB 集成开发环境下,基于参数化、模块化设计思想,实现了齿轮传动设计中各种表格和线图的查询与提取,开发了具有良好人机界面的齿轮传动设计系统,有效提高了设计效率与质量,大大降低了设计工作中的数据查阅及计算强度<sup>[10-13]</sup>。罗斐<sup>[14]</sup>分析了齿轮传动设计过程中图表数据的特点,提出了对国家标准和设计手册中的相关数据、公式、表格、曲线进行程序化处理的有效方法。太原理工大学刘晓洁<sup>[15]</sup>基于齿轮传动的快速设计理论、方法和技术,以 Access 作为数据库,同样在 VB 环境下开发了齿轮传动比优化分配模块,可以根据用户的需求自动选择齿轮传动类型及几何参数,并通过后续的三维建模处理,实现了渐开线齿轮设计、校核、建模及装配的一体化。在齿轮系统开发及应用方面,郑州机械研究所渐开线圆柱齿轮减速器为研究对象,经过多年的研究,自主开发了齿轮传动参数化设计系统,该系统不仅可以实现齿轮参数的设计与计算,还具有计算机绘图功能,为减速器的设计和生产提供了高效、可靠的工具<sup>[16]</sup>。此外,南京华强时代软件工程有限公司采用国内外最新标准,结合国内外齿轮最新研究成果和实践经验开发的渐开线圆柱齿轮设计专家系统,具有原始设计、精度计算、强度校核及齿轮测绘等功能模块。由于 VB 编程相对于其他软件开发语言具有简单、易用、高效等特点,对开发人员的编程技能要求较低,所以上述齿轮传动设计系统绝大多数是基于 VB 开发的。国外对齿轮传动参数化设计的研究起步较早,已开发了许多成熟的参数化设计软件。瑞士 KISSsoft 公司开发的 KISSsoft 齿轮设计软件是一款享誉全球的齿轮设计、齿轮传动系统设计及轴和轴承设计的专业软件工具,也是世界上功能最强、覆盖面最宽、技术最深、实用性最强,集传动系统选配、设计与开发为一体的大型专业软件,其专业领域包括风电齿轮箱、汽车变速箱及机械工业齿轮箱等,应用于汽车、航空航天、船舶、工程机械、农业机车、风力工业等领域。英国 Romax 公司开发的 Romax Designer 软件主要用于齿轮传动系统虚拟样机的设计和分析,在传动系统设计领域享有盛名,能完成包括圆柱齿轮传动在内的各种齿轮传动系统的设计分析,包括平行轴传动系、相交轴传动系、行星齿轮传动系的解决方案,覆盖了从概念设计,部件强度、可靠性等具体设计,到系统振动噪声预估等设计内容,此外,英国 SMT 公司的 MASTA 软件和 Dontyne Systems 公司的 Gear Production Suite 软件都具有参数化设计功能。

### 1.2.2 渐开线圆柱齿轮结构优化

传统的齿轮设计方法采用了大量的经验公式,对许多影响因素进行了近似处

理,为了保证强度、寿命和可靠性等要求,还需使用安全系数,因此设计结果偏安全。这样不仅浪费材料和增加制造成本,也会影响设备重量和整机性能,因此需要对传统法设计的齿轮结构进行优化。随着优化理论以及计算机数值分析技术的发展,国内外学者对齿轮的结构优化问题进行了大量研究并取得了丰硕的研究成果。华南理工大学迟永滨等<sup>[17]</sup>研究了给定中心距下圆柱齿轮的优化方法与策略,重点考虑了运行效率和全局最优性。东北大学刘颖等<sup>[18]</sup>对单级直齿圆柱齿轮传动的可靠性优化设计方法进行了探讨,建立了以体积为目标函数的可靠性优化数学模型,并给出了实现方法。王保民和陈惠等<sup>[19,20]</sup>基于 MATLAB 软件优化工具箱实现了两级圆柱齿轮减速器的结构优化。高明信<sup>[21]</sup>采用 FORTRAN 语言,对两级展开式直齿圆柱齿轮进行了参数优化设计,所选取的优化方法为内点法,在构造惩罚函数时使用了鲍威尔方法,并采用两次插值方法进行了一维搜索,设计计算的过程比较详细和精确。

同国内学者相比,国外研究人员在处理齿轮传动的结构优化问题时,往往还考虑使用寿命、动载系数等其他因素。Thompson 等<sup>[22]</sup>针对多级圆柱齿轮减速器的优化问题,提出了最小体积与齿面疲劳寿命的多目标权衡优化方法,在降低减速器总体积的前提下,同时保证了各齿轮具有足够的齿面疲劳寿命。Vetadjokoska<sup>[23]</sup>对行星齿轮传动的多目标优化问题进行了研究,建立了相应的数学模型,采用“最小值-最大值”概率逼近方法求解,编写了优化程序,并证明了该方法的可行性和有效性。Tudose 等<sup>[24]</sup>以两级斜齿轮减速器传动优化设计问题为研究对象,在考虑了减速器中轴和轴承等辅助零件尺寸匹配的前提下,对该减速器使用两种优化算法进行了多目标自动最优设计,同样对优化问题中的最小总体积和最长有效寿命进行了权衡分析,优化结论可推广到后续的多级齿轮传动。美国加利福尼亚大学的 Vanderplaats 等<sup>[25]</sup>对齿轮优化问题进行了深入探讨,建立的齿轮传动优化问题数学模型不仅考虑了最小体积、最小尺寸等常规目标,还考虑了齿轮的动载系数、最长寿命、弯曲强度、齿面接触疲劳强度、点蚀等因素,提出了目标函数和约束条件可以互换的优化原则,并在 NASA 刘易斯研究中心(Lewis Research Center)所提供的 COPES/ADS 齿轮优化程序的基础上,分别针对圆柱齿轮传动和圆锥齿轮传动开发了通用性更强的优化程序。Tripathi 等<sup>[26]</sup>针对现有多级行星齿轮传动多目标优化往往集中于单对直齿或斜齿圆柱齿轮的缺陷,分别使用经典的 SQP 序列规划法和新开发的 NSGA-II 方法完成了行星齿轮传动的优化问题。Fauroux 等<sup>[27]</sup>基于框架方法对减速器的三维尺寸进行全方位优化,以减速器中传动机构的最小容积作为优化目标对减速器结构进行优化。Rao 等<sup>[28]</sup>采用 4 种不同的混合优化方法,针对四级圆柱齿轮传动中的约束和无约束优化问题进行了详细地研究。Hiroyuki 等<sup>[29]</sup>在考虑润滑、齿轮修形等条件下,对微型减速器的尺寸以及工作性能的优化问题进行了探讨。Datseris<sup>[30]</sup>以最小体积为优化目标,提出了启发式离

散-组合齿轮传动优化方法,并证明了该方法的优化效率比自适应优化、随机梯度优化等其他方法的效率都要高。由此可见,在理论深度上,国外学者在齿轮传动的优化方面所做的科研工作要相对深入,考虑的因素也更加全面。

### 1.2.3 渐开线圆柱齿轮变位系数优选

齿轮变位对于改善齿轮的啮合性能、提高齿轮的承载能力具有非常重要的影响,同时可以起到配凑中心距的作用。由于变位系数的选取通常是在满足强度条件、根切条件、重合度条件等诸多限制条件下,以达到某种工作性能为目标而寻求最优的变位系数,所以其本质上属于优化问题。在近几十年里,国内外很多学者对圆柱齿轮变位系数选取问题进行了深入研究。

国内方面,现有的齿轮变位系数选取通常采用线图法或封闭图法,其中线图法是哈尔滨工业大学王知行<sup>[31]</sup>针对封闭图法的缺点提出的,与德国 DIN3992 标准、瑞士 VSM15525 标准、封闭图等方法相比,线图法在处理直齿圆柱齿轮传动时简便快捷、准确度高。周振东等<sup>[32]</sup>针对线图法在处理斜齿圆柱齿轮传动时的不足,对线图法进行了改进,提出了“当量法面啮合角”的概念,使之可用于各种圆柱齿轮传动的设计。唐锦茹<sup>[33]</sup>、沈永鹤<sup>[34]</sup>根据变位系数选择的基本条件和质量要求,以两齿轮保持最佳的抗弯强度为最优目标,建立了变位系数优选问题的数学模型,并在计算机上编程实现。程友联等<sup>[35]</sup>以等弯曲强度为理论依据,给出了按这种原则分配变位系数的图解法,并绘制了主动轮、从动轮的几何系数线图,可以根据齿轮的材质、中心距是否确定等进行变位系数的分配。封闭图法和线图法可以保证两齿轮具备大致相等的滑动率或者弯曲强度,但是选取变位系数时需手工查取图表,精度较低,因此近年来设计人员开始采用计算机编程来实现变位的精确优选分配。

国外方面,齿轮变位系数选取时所考虑的限制因素、采取的方法较国内更广泛。Antal<sup>[36]</sup>以等滑动率为最优目标,在 MATLAB 中实现了斜齿圆柱齿轮传动变位系数的分配问题,弥补了以往方法只能针对直齿圆柱齿轮的不足。Arikan<sup>[37]</sup>对非标准中心距直齿圆柱齿轮变位系数的选取进行了探讨,在保证重合度、齿厚等必要限制条件和已知总变位系数的前提下,给出了不同目标下的变位系数配对组合。Baglioni 等<sup>[38]</sup>研究了变位系数对直齿圆柱齿轮传动效率的影响,在保证齿轮最大承载能力、一定的磨损安全系数和尽可能小的振动噪声等条件下,对圆柱齿轮的齿形参数和变位系数进行了优选。Spitas 等<sup>[39]</sup>基于复合形法,以尽可能提高齿根抗弯曲能力和保持两齿轮具备相等的抗点蚀能力为优化目标,对圆柱齿轮进行了优化,并采用二维光弹法验证了优化结果的有效性。Li<sup>[40]</sup>研究了变位系数对齿面接触强度、齿根弯曲强度等性能参数的影响,并利用有限元法进行了验证。Mirica 等<sup>[41]</sup>分析了 DIN3992、PD6457、ISO/TR4467 等现有变位系数分配方法,以保证齿根弯曲强度安全系数为条件,对不同的方法进行了详细的比较。Houser 等<sup>[42]</sup>以

齿形参数和变位系数为优化变量,将结构优化和变位系数的优选相结合,建立了总体优化问题的数学模型。

## 1.3 渐开线圆柱齿轮传动仿真分析技术

### 1.3.1 渐开线圆柱齿轮参数化实体建模

传统的齿轮设计及优化是基于机械原理、材料力学等基础理论总结出来的设计理论和长期实践归纳出的设计经验来实现的,在设计过程中进行了大量简化,采用了大量经验公式和线图,难以对设计结果进行准确评价与优化。随着 CAD 和 CAE 技术的发展与应用,国内外许多学者采用仿真模拟技术对齿轮传动啮合过程进行仿真分析,有效克服了传统设计方法的缺陷,为齿轮传动的精确设计与优化提供了技术保证。

实体模型的构建是齿轮传动仿真分析的前提和基础。为了准确模拟齿轮啮合过程,必须建立齿轮传动的真实模型。与一般机械零件相比,齿轮齿面为复杂曲面,建立真实齿面的精确模型比较困难,目前常用的方法有两种:一是利用齿轮啮合原理推导齿面方程,根据齿面方程建立齿轮模型;二是模拟切齿加工过程生成齿轮模型。在基于啮合原理建立齿轮模型方面,逢明华等<sup>[43]</sup>推导了斜齿轮渐开线和齿根过渡曲线方程,并在 MATLAB 下构建了齿廓曲面和齿根过渡曲面,结合齿顶圆、齿根圆方程,在 MATLAB 中模拟生成了不同参数类型的斜齿轮齿廓曲面。杜新宇等<sup>[44]</sup>在 MATLAB 中精确计算了渐开线和螺旋线的方程,将计算的数据点导入 UG 软件,运用相关实体建模命令建立了圆柱齿轮的实体模型。罗善明等<sup>[45]</sup>利用端面齿形沿螺旋线拉伸的方式在 Pro/E 软件中完成了渐开线斜齿轮的参数化建模,并研究了齿轮副有侧隙虚拟装配方法。孟凡净等<sup>[46]</sup>利用啮合原理和微分几何分别推导了弧齿直齿轮及斜齿轮的齿面方程,在 MATLAB 中计算得到齿面数据点云,基于 Pro/E 软件的曲面拟合功能获取齿廓曲面并进而完成齿轮实体模型的构建与装配。Yang<sup>[47]</sup>根据推导的齿面方程实现了非对称轮齿斜齿轮的实体建模与装配。在模拟切齿加工生成齿轮模型方面,中南大学唐进元等<sup>[48]</sup>在 CATIA V5 中构建了螺旋锥齿轮的 SGM 法虚拟加工几何模型,获取了齿面数据点,再利用 NURBS 曲面造型理论对齿面数据点进行曲面重构,生成了包含齿轮工作齿面及齿根过渡曲面的完整齿廓曲面,最后建立了适于 LTCA 加载接触分析的齿轮副网格模型。重庆大学栾小东<sup>[49]</sup>开发了一套齿轮切齿仿真软件,可以用来模拟直齿轮和螺旋锥齿轮在虚拟刀具条件下的加工,并建立齿轮的实体模型。Fetvacı 等<sup>[50]</sup>对传统的非对称直齿轮的加工模拟进行了研究,开发了一套计算机程序,通过二维平面图形的动态显示来模拟刀具加工和齿廓曲面的生成。

现有的绝大多数商用 CAD/CAE 软件,如 Pro/E、SolidWorks、UG 和 CATIA 等均可用于渐开线圆柱齿轮传动的实体建模,但直接使用这些 CAD 软件完成渐开线圆柱齿轮传动的建模比较繁杂,不便于后续的调整与修改,因此许多学者基于不同的 CAD 软件进行了二次开发,构建了简便实用的齿轮参数化实体设计系统。秦朗等<sup>[51]</sup>在 AutoCAD 2000 环境下采用 VB 编程实现了渐开线直齿圆柱齿轮的参数化三维建模。何茂先、宋丽华等<sup>[52,53]</sup>在 Pro/E 平台下对直齿圆柱齿轮的参数化设计、实体建模、装配仿真与干涉检查进行了研究与实现,有效提高了齿轮设计开发效率。李臻<sup>[54]</sup>在 SolidWorks 平台下采用 Visual C++ 6.0 开发语言进行二次开发,实现了渐开线圆柱齿轮参数化实体造型,并开发了系统界面模块和齿形计算模块等,大大提高了齿轮设计效率。崔亮<sup>[55]</sup>基于渐开线齿轮的成形原理,在 UG 平台下完成了直齿圆柱齿轮的参数化建模及有限元分析。周学良等<sup>[56]</sup>在 UG NX 环境下利用 UG/Open 进行二次开发,实现了渐开线斜齿圆柱齿轮的参数化实体建模。肖石林等<sup>[57]</sup>阐述了利用 CATIA 软件的建模功能生成渐开线直齿圆柱齿轮的方法及步骤。王波<sup>[58]</sup>探讨了在 CATIA 环境中利用参数化公式实现渐开线斜齿轮建模的方法,并对参数化在产品中的重要性进行了说明。包家汉等<sup>[59]</sup>利用 APDL 和 UIDL,在 ANSYS 中实现了直齿圆柱齿轮的参数化建模与有限元强度分析。李常义、孙建国等<sup>[60,61]</sup>重点研究了基于 ANSYS 软件的渐开线圆柱齿轮参数化生成原理及技术实现方法,获得了良好的实际应用效果。

### 1.3.2 渐开线圆柱齿轮静接触分析

静接触分析是力学的一个分支,主要研究物体在力的作用下处于平衡的规律,以及如何建立各种力系的平衡条件,是研究力系简化和物体受力分析的基本方法。齿轮的静接触分析主要包括齿面接触应力分析和齿根弯曲应力分析等。在理论研究方面,1881 年,德国物理学家 Hertz 利用弹性力学方法推导出两弹性圆柱体接触面上的载荷分布公式,奠定了齿面接触强度计算的理论基础。1908 年,奥地利科学家 Videky 把 Hertz 接触应力理论首先应用于计算轮齿齿面应力,并绘出了沿啮合线最大接触应力变化图。Winter<sup>[62]</sup>指出了 Hertz 接触模型的粗略性,即 Hertz 公式适用于弹性范围内只承受法向压力的均质各向同性体,而准确的接触强度评估应考虑啮合轮齿间滑动、齿面的表面状况以及弹流润滑等因素。

近年来,随着计算机技术与有限元分析软件的发展,有限元理论得到了广泛应用,国外许多学者基于有限元理论对齿轮啮合过程中啮合刚度、应力分布与变化等进行了一系列的研究。Ohno 和 Tanak<sup>[63]</sup>基于三维有限元分析技术研究了齿廓修形齿轮啮合时的接触特性,对修形齿轮与未修形齿轮在不同啮合点时的接触应力进行了对比分析。Chen 和 Tsay<sup>[64]</sup>应用有限元软件 ABQUS 的静接触分析功能对斜齿圆柱齿轮的接触压力、综合应力与弯曲应力进行了分析计算,并与 Hertz 接触

应力进行了对比,结果表明,二者接触应力的变化趋势基本一致且数值接近。国内学者也对渐开线圆柱齿轮的静接触分析进行了大量研究。胡爱萍等<sup>[65]</sup>对外啮合直齿圆柱齿轮传动的接触强度计算进行了研究,绘制了渐开线外啮合标准直齿圆柱齿轮传动的应力比随两轮齿数比和小齿轮齿数的变化曲线。张芳芳等<sup>[66]</sup>在 CATIA 软件中实现了渐开线齿轮的参数化设计,并利用 CATIA 软件自带的 CAE 模块,结合渐开线齿轮传动原理,进行了齿轮有限元强度分析,并传统算法进行了对比。陈清胜<sup>[67]</sup>利用 ANSYS 软件对直齿圆柱齿轮进行了齿根应力分析,并为齿轮强度准确计算与结构优化提供了参考。陈赛克<sup>[68]</sup>在 ANSYS 环境下建立了轮齿平面有限元模型,并进行了应力分析计算。刘春旭<sup>[69]</sup>利用 ANSYS 软件计算了圆柱齿轮的齿根应力,并与理论值进行了比较分析。芮井中等<sup>[70]</sup>利用 ANSYS 软件提供的子模型技术,对有限宽度(齿宽系数为 0.03~1.2)渐开线直齿圆柱齿轮齿根附近的三维弹性应力场进行了详细分析,结果表明,齿根应力沿宽度分布是不均匀的,其最大值及相应位置与宽度有关,齿根附近总位移沿宽度分布也不均匀,在靠近端面附近有较明显的变化。

### 1.3.3 渐开线圆柱齿轮瞬态啮合仿真分析

传统的齿轮啮合分析和有限元静强度分析主要是针对齿轮特定的啮合位置进行的,而齿轮啮合过程所受载荷、应力大小及分布随着齿轮的运转呈周期性非线性变化,轮齿所受极限应力通常不在齿顶、齿根和节圆等特殊啮合位置,要准确分析齿轮的啮合特性及承载能力,需要精确把握齿轮在每一啮合位置的工作特性,即对齿轮的瞬态啮合情况进行准确分析。近年来,随着有限元技术和计算机仿真技术的迅速发展和广泛应用,齿轮瞬态啮合仿真分析已成为现代齿轮设计与优化的重要手段,并受到了国内外学者的普遍关注。

Lee<sup>[71]</sup>基于有限元法和多体动力学技术对直齿圆柱齿轮传动的动态接触特性进行了分析,并通过数值模拟论证了轮齿质量在齿轮动态分析中的重要性。Huang 等<sup>[72]</sup>基于齿轮传动基本原理推导了多种渐开线齿轮的齿面方程,采用 C 语言编程直接构建齿轮有限元网格模型,并在 LS-DYNA 软件中进行了圆柱齿轮动力学响应分析,通过实验对比验证了算法的有效性。Patil 等<sup>[73]</sup>基于 ANSYS 的 APDL 建立了渐开线直齿圆柱齿轮的参数化模型,利用拉格朗日乘子接触算法计算啮合齿轮副在啮合过程中的应力,并对传动过程中摩擦系数对接触特性的影响进行了分析研究。Romlay<sup>[74]</sup>提出一种基于瞬态有限元法的直齿圆柱齿轮静应力及动力学特性分析方法,利用有限元瞬态分析技术构建静应力分析与动力学特性分析复合模型,将静应力分析与动力学分析合并处理,通过求解计算获取齿轮工作周期中任意啮合位置的应力情况和动力学特征,仿真实例表明,动力学特性系数对齿轮副的应力分析有较大影响。Jiang 等<sup>[75]</sup>对 NGW 型渐开线行星齿轮传动的瞬