

航空弧齿锥齿轮摩擦学 设计与制造

王延忠 著



科学出版社

航空弧齿锥齿轮摩擦学设计与制造

王延忠 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了航空弧齿锥齿轮的结构特点、摩擦润滑行为特征、强度计算和加工方法。对航空弧齿锥齿轮加载接触啮合性能进行了深入分析；详细阐述了实际工况下航空弧齿锥齿轮的各种润滑与摩擦状态，对航空弧齿锥齿轮摩擦与动态特性进行了分析；初步研究了摩擦润滑条件下航空弧齿锥齿轮的数控加工方法；探讨了高速重载弧齿锥齿轮的相关试验方法。

本书可供从事机械设计和制造工程的技术人员和大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空弧齿锥齿轮摩擦学设计与制造/王延忠著. —北京：科学出版社，2014. 11

ISBN 978-7-03-042460-0

I. ①航… II. ①王… III. ①航空发动机-弧齿锥齿轮-摩擦-研究
IV. ①V232. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 268352 号

责任编辑：毛 莹 王正飞/责任校对：桂伟利

责任印制：霍 兵/封面设计：迷底书装

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 11 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2014 年 11 月第一次印刷 印张：16 1/2

字数：395 000

定价：68.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

弧齿锥齿轮是航空动力传动系统的关键元件,对航空发动机、直升机等装备的工作性能具有重要的影响,其设计与加工技术一直被各发达国家所重视,是国家工业装备发展的核心技术之一。航空弧齿锥齿轮工作在高速、重载、大能流密度工况下,啮合过程中的摩擦与润滑状态不断变化,齿轮瞬时温升极高,加之其结构复杂,多采用薄壁板壳类结构,航空弧齿锥齿轮的动态问题十分突出,进一步影响齿轮的摩擦与润滑状态,因此航空弧齿锥齿轮的设计与制造技术十分复杂,国外对我国严格保密。我国航空技术开展较晚,与世界主要发达国家之间存在较大差距,目前,高性能航空弧齿锥齿轮的设计与加工技术已经成为制约我国航空发动机、直升机等装备向高速、大功率、轻量化和长寿命等方向发展的重要因素。

摩擦学作为当今世界发展最快的学科之一,对工程应用的各个领域和相关技术的发展产生着深刻的影响。航空弧齿锥齿轮的摩擦与润滑状态十分复杂,其性能直接影响齿轮的啮合与传动。随着现代工业对航空弧齿锥齿轮各方面要求的不断提高,齿轮在啮合过程中产生的摩擦与润滑问题将越来越突出,可以断定,齿轮摩擦学的研究必将成为高性能航空弧齿锥齿轮发展所面临的重要课题,同时,它也是新一代航空弧齿锥齿轮技术发展所必需的途径与方法。

本书从航空弧齿锥齿轮的摩擦与润滑分析入手,着眼于摩擦与润滑对航空弧齿锥齿轮啮合性能的影响,立足于实际工况与工程问题,落脚于航空弧齿锥齿轮的数控加工方法与技术,是对新一代航空弧齿锥齿轮动力传动系统设计与加工的一种有益的探索与发展。书中系统并较完善地对航空弧齿锥齿轮摩擦学所涉及的主要关键问题进行了阐述,从改善其摩擦学性能的角度,对新一代航空弧齿锥齿轮的分析、设计与加工等方法与技术进行了介绍,所包含的内容密切贴合目前设计与使用过程中遇到的突出问题,符合工程实际需求。第1章对航空弧齿锥齿轮的特点及其摩擦学与加工技术进行了介绍;第2章重点阐述了航空弧齿锥齿轮在实际工况下的啮合性能分析方法与内容;第3章对航空弧齿锥齿轮的弹流润滑问题进行了详细阐述;第4章阐述了实际工况下航空弧齿锥齿轮的润滑与摩擦状态的研究成果;第5章针对航空弧齿锥齿轮的喷油润滑方式进行了专门研究;第6章针对航空弧齿锥齿轮的结构和高速特点,对其摩擦与动态特性进行了介绍;第7章阐述了满足摩擦与润滑性能的航空弧齿锥齿轮的数控加工方法;第8章对航空弧齿锥齿轮的相关试验方法进行了介绍。

弧齿锥齿轮摩擦学设计所涵括的内容非常广泛,涉及多个不同学科领域知识。在我国航空传动发展与实践过程中,新问题、新要求不断出现,本书是作者多年来从事航空弧齿锥齿轮摩擦润滑、设计加工研究成果的总结,同时也是对作者多年所承担的国家自然科学基金、航空科学基金、教育部博士点基金、国防项目等研究工作成果的总结。在历时五年的研究工作中,作者深感当今国内外科学理论发展之快,所用来分析问题的技术手段日新月异,需要不断去学习和研究。

本书所进行的弧齿锥齿轮传动研究工作，得到了国家 863 项目的资助，先后参加研究工作的有周元子、牛文韬、唐文、陈燕燕、侯良威、吴灿辉、彭伟、雷震天、孙振宇、李圆等十几名研究生。其中，牛文韬博士参与本书统稿、整理工作，在此表示感谢。

本书研究工作得到了我的老师——鄂中凯教授、蔡春源教授、周济教授、周云飞教授、吴复兴教授的指导、支持、鼓励！鄂中凯教授对本书进行审核，并提出宝贵意见。在此，心中对几位老师的感激、崇敬之情无以言表。

研究工作得到赵兴福研究员、陈聪慧研究员、郭梅研究员、李国权研究员、郇极教授、陈良玉教授、程乃士教授、谢里阳教授的支持，特此致谢。

吴晓铃教授对本书各章进行认真审核，提出宝贵意见，在此表示感谢。

感谢在本书漫长的准备、成稿过程中，我的妻子刘晓雁、女儿王端、父母及家人给予我耐心、理解和毫无怨言的一贯支持！

书中若有不足和疏漏之处，敬请读者批评指正。

王延忠

2014 年 9 日

北航绿园

目 录

第 1 章 航空弧齿锥齿轮摩擦学概述	1
1.1 航空弧齿锥齿轮的结构与特点	1
1.2 航空弧齿锥齿轮的摩擦与润滑理论综述	2
1.2.1 齿轮的润滑理论	2
1.2.2 齿轮的摩擦与热理论	5
1.3 弧齿锥齿轮的加工制造技术综述	8
1.3.1 弧齿锥齿轮的切齿原理	8
1.3.2 弧齿锥齿轮的数控加工	9
1.3.3 弧齿锥齿轮的性能分析技术	9
1.3.4 弧齿锥齿轮加工系统	11
1.4 小结	12
第 2 章 航空弧齿锥齿轮在实际工况下的啮合性能	13
2.1 弧齿锥齿轮的边缘接触分析	13
2.1.1 齿面的点矢函数	13
2.1.2 齿顶边缘接触分析	17
2.1.3 齿端边缘接触分析	20
2.2 弧齿锥齿轮加载接触分析	21
2.2.1 弧齿锥齿轮实际接触迹的确定	21
2.2.2 弧齿锥齿轮在重载作用下的运动误差	23
2.2.3 轮齿间的载荷分配	24
2.2.4 弧齿锥齿轮接触点曲率与接触区求取	25
2.3 高速弧齿锥齿轮啮合过程的齿面速度分析	28
2.4 弧齿锥齿轮轮齿强度分析与计算	30
2.4.1 轮齿弯曲强度	30
2.4.2 齿面接触强度计算	34
2.5 航空弧齿锥齿轮胶合与闪温性能分析	36
2.6 航空弧齿锥齿轮动态性能分析	39
2.6.1 弧齿锥齿轮动力学模型的建立	39
2.6.2 固有频率	40
2.6.3 行波共振转速	43
2.6.4 动载激振力的 DLTCA 计算	43
2.6.5 行波共振应力	46
2.7 小结	47

第3章 适合工程计算的航空弧齿锥齿轮弹流润滑数值方法	48
3.1 点接触等温弹流润滑的数学模型	48
3.1.1 点接触等温弹流润滑数值求解的控制方程	48
3.1.2 数值求解中的无量纲化	50
3.2 点接触热弹流润滑的数学模型	50
3.2.1 热弹流 Reynolds 方程	51
3.2.2 温度对润滑油的影响	51
3.2.3 弹流润滑中的热效应与控制方程	52
3.2.4 热弹流润滑基本方程的无量纲化	53
3.3 适用于重载条件下的点接触弹流润滑数值算法	54
3.3.1 点接触弹流润滑数值算法分析	54
3.3.2 加权牛顿有限元法	55
3.3.3 不同载荷下的弹流润滑计算对比分析	59
3.3.4 点接触热弹流润滑计算与分析	62
3.4 高速重载弧齿锥齿轮热弹流润滑计算与分析	68
3.4.1 弧齿锥齿轮热弹流计算坐标系的建立	68
3.4.2 航空弧齿锥齿轮热弹流润滑方程组	68
3.4.3 航空弧齿锥齿轮热弹流计算参数确定	69
3.4.4 航空弧齿锥齿轮模型参数	70
3.5 小结	74
第4章 航空弧齿锥齿轮乏油润滑分析	76
4.1 弧齿锥齿轮乏油润滑分析	76
4.1.1 乏油润滑的判定	76
4.1.2 乏油润滑计算模型	79
4.1.3 不同乏油程度的油膜特性	80
4.2 弧齿锥齿轮短时间断油无损伤润滑分析	84
4.2.1 短时间断油的数学模型	84
4.2.2 油箱油量对断油润滑温度的影响	87
4.2.3 不同断油时间控制点下中心油膜温度	87
4.2.4 转速对中心油膜温度的影响	88
4.3 航空弧齿锥齿轮无油润滑性能分析	88
4.3.1 失油条件下油膜消失时间与温度变化	88
4.3.2 无油润滑下齿面摩擦系数的影响因素分析	91
4.4 航空弧齿锥齿轮无油润滑下的摩擦传热行为分析	96
4.4.1 传热分析模型	96
4.4.2 无油润滑运转的传热行为分析	99
4.4.3 轮齿温度有限元分析	104
4.5 不同润滑油对齿轮温度的影响分析	110
4.6 航空弧齿锥齿轮摩擦润滑分析系统	112

4.6.1 集成系统开发工具	113
4.6.2 分析系统组成	113
4.7 小结	117
第5章 航空齿轮气液共相润滑分析与设计	118
5.1 高速重载齿轮气液多相不完全油雾形成机理	118
5.1.1 齿轮喷油润滑下气液多相射流的数学模型	118
5.1.2 高速齿轮喷油润滑射流的计算流体动力学建模	119
5.1.3 高速航空齿轮对喷油气液多相射流的激荡作用	120
5.2 高速航空齿轮机匣内气液共相流体的黏度特性	121
5.2.1 不完全油雾在高速运动状态下的黏度特性	121
5.2.2 弹流润滑计算中的不完全油雾黏度模型	122
5.3 气液共相流体中含气率对润滑状态的影响	123
5.4 基于计算流体动力学的航空齿轮喷油润滑时变状态分析	126
5.4.1 航空齿轮喷油润滑过程分析	126
5.4.2 直齿轮喷油数学模型	127
5.4.3 齿轮喷油润滑的计算流体动力学模型	127
5.4.4 计算结果与分析	128
5.5 喷油润滑参数对气液多相流体状态的影响与设计	130
5.5.1 喷油嘴方位参数的定义	130
5.5.2 喷油角度计算与分析	131
5.5.3 喷油位置计算与分析	132
5.6 喷油润滑下航空齿轮的温度分析方法	133
5.6.1 喷油润滑下齿轮的对流换热系数	133
5.6.2 齿面的对流换热状态分析	135
5.6.3 稳态热分析模型	136
5.6.4 瞬时闪温与冷却模型	136
5.6.5 喷油条件下高速直齿轮的精确动态热计算	137
5.7 航空弧齿锥齿轮喷油润滑射流影响因素分析	140
5.7.1 入口存在径向速度喷油过程分析	141
5.7.2 喷油 CFD 模型的建立	141
5.7.3 喷油嘴入口速度对喷射方向的影响	142
5.7.4 喷油嘴长径比对喷射方向的影响	144
5.8 高速重载齿轮传动喷油润滑系统的工程化设计	147
5.8.1 某型航空机匣供油系统油管和喷嘴的仿真计算	147
5.8.2 满足齿轮最高温度要求的喷油润滑供油量设计	150
5.9 小结	155
第6章 航空弧齿锥齿轮在摩擦与润滑状态下的动力学	156
6.1 航空弧齿锥齿轮结构振动建模	156
6.1.1 模型概述	156

6.1.2	弹性齿轮轴建模	157
6.1.3	轴承建模	162
6.1.4	轮齿啮合接触建模	163
6.1.5	转矩载荷激励	167
6.1.6	系统动力学方程	167
6.2	航空弧齿锥齿轮啮合摩擦建模	168
6.2.1	弹流和乏油润滑摩擦系数	169
6.2.2	边界润滑摩擦系数	169
6.2.3	无油润滑摩擦系数	170
6.2.4	耦合摩擦的系统动力学方程	171
6.3	航空弧齿锥齿轮动力学特性分析	174
6.3.1	弧齿锥齿轮动力学分析方法	174
6.3.2	基本时变参数	177
6.3.3	弧齿锥齿轮的响应特性	179
6.3.4	航空弧齿锥齿轮耦合摩擦的稳定性	183
6.3.5	耦合摩擦的稳态 RMS 响应	184
6.4	小结	186
第7章	基于摩擦与润滑的航空弧齿锥齿轮的数控加工技术	187
7.1	弧齿锥齿轮五轴加工原理	187
7.1.1	刀位啮合计算	187
7.1.2	展成运动	189
7.1.3	弧齿锥齿轮 NC 展成加工机床运动变换	191
7.1.4	轮齿加载条件下的数控加工技术	193
7.2	弧齿锥齿轮 NC 展成加工非线性误差与进给步长	196
7.2.1	刀具轨迹的离散逼近误差	196
7.2.2	非线性误差分析计算	197
7.2.3	走刀步长和轮坯转角步长确定	198
7.3	航空弧齿锥齿轮参数对润滑特性的影响	199
7.3.1	弧齿锥齿轮传动基本参数对润滑特性的影响	201
7.3.2	机床切齿调整参数对齿轮弹流润滑的影响	203
7.4	满足航空弧齿锥齿轮无油润滑要求的加工技术	206
7.4.1	保证航空弧齿锥齿轮啮合轮侧隙的控制方法	206
7.4.2	航空弧齿锥齿轮加工参数数值优化方法	207
7.4.3	给定弹流润滑状态下的机床切齿调整参数研究	209
7.4.4	不同润滑状态与摩擦特性的航空弧齿锥齿轮加工	217
7.5	小结	219
第8章	高速重载航空弧齿锥齿轮摩擦润滑试验方法	220
8.1	相似原理在高速重载航空弧齿锥齿轮性能试验中的应用	220
8.1.1	相似基本原理	220

8.1.2 高速重载弧齿锥齿轮润滑特征提取的相似性试验方法	221
8.1.3 高速重载齿轮齿根弯曲应力的相似性方法	226
8.2 高速重载航空弧齿锥齿轮齿面温度的相似试验方法	228
8.2.1 试验原型的计算结果	228
8.2.2 试验设备及加载过程	229
8.2.3 试验测试结果与分析	231
8.3 超高速航空弧齿锥齿轮啮合动态性能相似试验	232
8.3.1 原型齿轮啮合性能分析及缩比相似模型参数	232
8.3.2 试验装置及验证方法	237
8.3.3 测试结果分析	239
8.3.4 原型与试验结果的频域相似程度比较	240
8.4 小结	241
参考文献	242
符号列表	249

第1章 航空弧齿锥齿轮摩擦学概述

1.1 航空弧齿锥齿轮的结构与特点

弧齿锥齿轮是航空发动机和直升机等传动系统的核心、关键零件,要求具备承载能力大、体积质量小、可靠性高、噪声低、高速旋转条件下运转平稳等特点^[1]。随着航空发动机和直升机性能指标不断提高,机械传动系统的工作条件日益苛刻。传统的设计方法和加工技术已经不能满足现代弧齿锥齿轮的设计要求^[2],高速重载的弧齿锥齿轮在啮合过程中的润滑和动态问题十分突出,造成齿轮轮齿胶合(图 1-1)、断裂等失效与故障(图 1-2),使用寿命严重不足。如何从摩擦学角度研究弧齿锥齿轮在空间胶合接触的全过程,确定其润滑状态,改善接触区内外部不良因素,减少齿面之间的摩擦磨损,防止齿轮的点蚀、胶合和行波共振,建立齿轮加工工艺体系,提高传动的可靠性,是高速重载航空弧齿锥齿轮设计发展的重要方向。

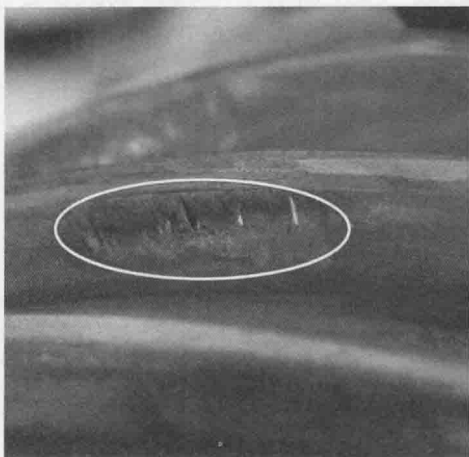


图 1-1 某航空弧齿锥齿轮的胶合擦痕

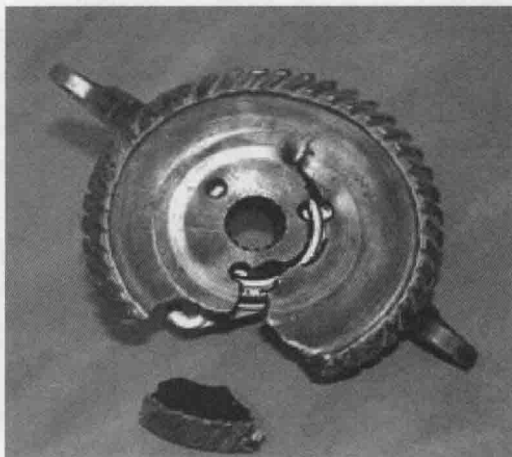


图 1-2 某发动机弧齿锥齿轮的振动断裂

齿轮的摩擦学性能对传动系统的啮合性能、强度、稳定性、振动噪声和使用寿命等具有重要影响^[3]。在航空弧齿锥齿轮的啮合过程中,轮齿在重载高速下的速度、载荷和动态特性决定了所能形成的润滑和摩擦状态,而轮齿的摩擦和润滑状态反过来又对齿轮的啮合过程产生影响。航空弧齿锥齿轮轮齿啮合过程中产生的瞬时极高摩擦热导致了齿轮啮合区局部的温升^[4,5],局部的高温破坏了轮齿之间的润滑油膜,是轮齿发生胶合失效的主要原因。研究表明,齿面的点蚀和胶合与其润滑状态有着极其密切的联系,用摩擦、润滑理论作为齿面点蚀和胶合的判定依据更为准确,因此弧齿锥齿轮的摩擦学设计制造在高性能齿轮传动系统中的应用就尤为重要。

航空弧齿锥齿轮的齿面复杂,齿面的形状和加工精度对齿轮的啮合性能及摩擦、润滑特性具有重要的影响。如何在通用机床上通过数控加工实现设计齿面^[6,7],以及根据不同

工况调整设计齿面,达到最佳摩擦特性,是航空弧齿锥齿轮数控加工所面临的重要课题。因此,对于新一代航空弧齿锥齿轮,在设计之初就应该对其摩擦学性能进行充分考虑,在制造过程中对齿面进行调整并保证精度,设计并加工出具有良好摩擦学特性的航空弧齿锥齿轮传动系统,是当今技术先进国家大力投入的前沿技术^[8],是先进航空发动机和直升机研制的直接需求,但也是航空弧齿锥齿轮传动系统向高速、重载、高可靠性发展的瓶颈问题,其复杂性主要体现在以下几个方面。

(1) 航空弧齿锥齿轮的润滑状态复杂多变。航空弧齿锥齿轮通常在高速重载下工作,啮合齿面间的润滑油膜对保证齿轮的稳定工作具有非常重要的作用。由于弧齿锥齿轮复杂的齿面形状和运动状态,所以对齿面间形成的润滑油膜的影响因素非常多,这就造成了航空弧齿锥齿轮润滑状态的多变。在供油充分的理想条件下,齿轮工作在弹流润滑状态,两齿轮间可以形成良好的润滑油膜;当齿轮的供油条件发生改变时,如飞行姿态的改变,或润滑设计的不合理,齿轮间的油膜将逐渐变薄,即工作在乏油润滑状态;随着供油条件和齿轮温度持续的变坏和升高,齿面间的油膜被彻底破坏,两齿面摩擦接触,即工作在无油润滑状态。

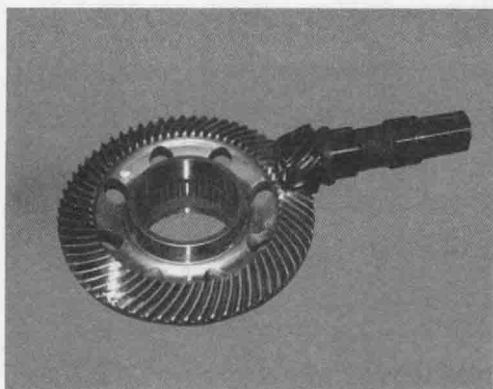


图 1-3 航空弧齿锥齿轮的薄壁板壳结构

(2) 航空弧齿锥齿轮传动性能参数之间相互影响。为了符合航空结构的减重要求,航空弧齿锥齿轮常设计为大直径薄辐板、薄壁壳形轴或其组合结构,如图 1-3 所示。在齿轮的啮合过程中,轮齿的变形和振动会对齿轮的传动误差,以及啮合点的润滑状态产生影响,而啮合点间形成的润滑油膜会通过阻尼的方式对齿轮的振动产生影响。在高速重载条件下,齿轮的振动变形问题非常突出,薄壁板壳弹性振动和轮齿啮合参数振动都可能造成航空弧齿锥齿轮在一定工况条件下的

共振响应,齿轮的振动很有可能在齿面间形成瞬时极高的动载荷,产生闪温而破坏油膜,造成齿轮的磨损与胶合。

航空弧齿锥齿轮的摩擦学设计是一门复杂的工程技术,所涵盖的学科领域非常广,主要包括航空弧齿锥齿轮复杂齿面的流体润滑计算、高速重载啮合齿面的摩擦磨损分析、复杂空间环境下的齿轮传热与温度获取,以及航空弧齿锥齿轮精确齿面的数控加工实现。本书对航空弧齿锥齿轮摩擦学设计的主要技术进行阐述与讨论,为工程设计提供方法与指导。

1.2 航空弧齿锥齿轮的摩擦与润滑理论综述

1.2.1 齿轮的润滑理论

齿轮的润滑经历了从古典润滑理论到弹流动力润滑理论的发展过程,并在此基础上形成了一门跨学科的理论研究体系^[9,10]。随着试验与计算技术的不断发展,国内外学者在边界润滑和乏油润滑等润滑方面进行了深入而广泛的研究,从而也推动了齿轮润滑在该领域内的发展。

1. 弹流润滑理论

最早将流体润滑理论运用在齿轮上的是 Martin^[11]，他将齿轮齿条的啮合视为圆柱在平面上的滚动来求解雷诺方程，但是由于忽略了接触的弹性变形和流体的黏压效应，无法解释齿轮在传动过程中存在油膜的现象。随后很多学者开始从不同的角度寻求对刚性润滑理论的改进。Grubin^[12]首次将 Reynolds 方程和 Hertz 理论相结合，并考虑了压力对润滑介质的黏度和密度的影响，通过解析推导，得到了线接触等温全膜弹流问题的一个近似解，形成了弹性流体动力润滑，如图 1-4 所示。

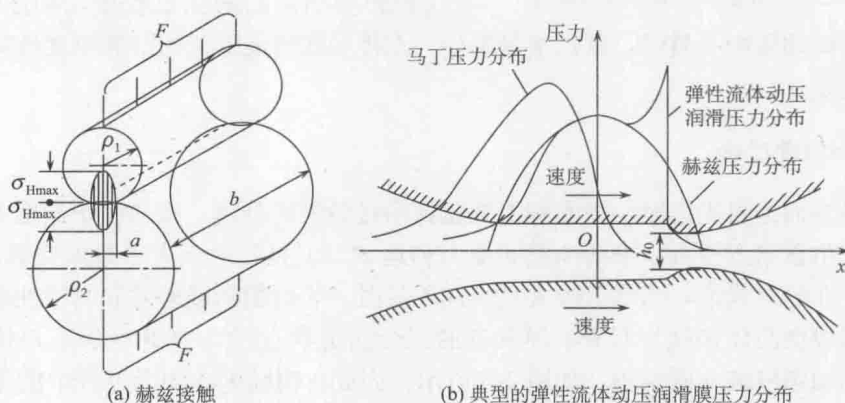


图 1-4 赫兹接触和弹流润滑

Dowson、Higgson^[13]和 Akin^[14]将弹流润滑理论应用于各类齿轮的润滑分析中，其研究认为轮齿在每个啮合循环所需要的时间远远大于润滑油流过 Hertz 接触区的时间，用任意瞬时位置的接触曲率半径、滚动速度来描述接触状态，而不研究这些参数的变化率对弹流的影响，可将轮齿接触时非稳态润滑问题转化为一系列局部稳态等温弹流润滑问题来研究。

目前比较成熟的齿轮传动弹流润滑理论都是基于稳态工况条件下提出的，实际上，一对轮齿在传动过程中，虽然传递的功率和回转速度保持不变，但是轮齿齿面上接触点的载荷、曲率半径、卷吸速度和轮齿啮合刚度等参数始终处在变化之中，即齿轮传动的润滑状态属于非稳态工况^[15]，因此，齿轮润滑问题的研究应考虑这种非稳态效应。在非稳态润滑中，需要考虑瞬时载荷和齿廓的变化。

由于温度对润滑油的黏度和密度都会产生影响，所以对其进行热弹流分析十分必要。在热弹流润滑分析中，需要引入能量方程，在数值迭代过程中通过求解能量方程便可得到润滑油膜的温度，再根据温度修正润滑油的黏度和密度等参数。

2. 乏油润滑理论

当齿轮啮合点充分供油时，啮合区能够形成全膜润滑状态，在很多情况下，齿轮并不能保持在良好的润滑环境下运转，例如，有时润滑油有供应得不到保证，这样齿轮将会在乏油的状态下啮合运转^[16,17]，接触区的润滑膜就会变薄。航空弧齿锥齿轮一般处在高速

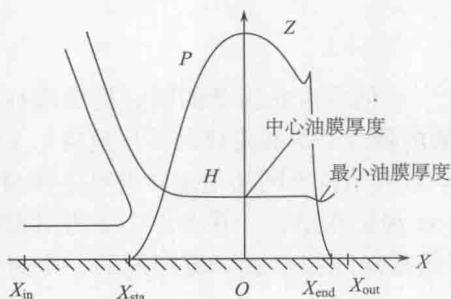


图 1-5 乏油润滑中的油膜位置起始点

油膜起始点离油膜中心越远，则供油量越少，在接触区所能形成的油膜厚度越薄，齿轮的润滑状态越差。

3. 混合润滑理论

当接触表面绝对光滑时，弹流润滑油膜将两接触表面分隔，施加在摩擦副上的载荷由油膜承担，由雷诺方程可以求解油膜的受力和运动。但是，对于大多数航空弧齿锥齿轮，接触表面并非绝对光滑，当载荷较大且供油不足时，表面粗糙度通常和润滑油膜处于一个数量级，形成微凸体接触与润滑油膜共存的混合润滑状态^[18]，在此状态下，接触点的载荷由润滑油和粗糙峰共同承担，如图 1-6 所示。因此，粗糙度在润滑过程中的作用成为摩擦学研究的重点之一。

根据建模过程中对粗糙度处理方式的不同，研究粗糙度对摩擦性能影响的方法通常可以分为统计方法和确定性方法。统计方法针对表面粗糙度的特点采用统计学的方法将粗糙度的影响整合成一系列的影响系数，并将此系数耦合到雷诺方程中进行求解。统计方法的优点是计算量较小、节省计算时间，因此在粗糙表面摩擦问题

的研究初期被广泛应用，为研究粗糙表面摩擦积累了大量的数据和经验。随着计算机硬件的提高和数值计算的发展，确定性方法的研究得到快速发展。确定性方法不再计算粗糙度的影响系数，而是将测量的工程实际表面数据或者简化的表面数据作为数值计算模型的输入参数，粗糙表面数据直接体现在控制方程中。根据确定性方法的特点，计算区域的网格需要足够的细化，通常网格大小应该小于粗糙度尺度，保证粗糙度的影响可以在数值计算中体现。为了提高混合润滑的计算效率，可将快速傅里叶变换引入接触体的弹性变形计算，并合理选择网格密度。

混合润滑研究多以齿轮、轴承等零件为工程背景，把相互接触的零件抽象成点、线接触方式，从理论上分析不同因素对摩擦性能的影响。将混合润滑理论应用到工程实际零件上时，常需要根据零件的几何尺寸和传动要求对混合润滑模型加以修正，特别是采用有限元法进行疲劳寿命分析时，需要知道零件可能的失效位置，而零件的几何形状对计算结果有严重影响。混合润滑理论为研究零件表面粗糙度对零件工作性能的影响提供了理论支

重载恶劣工作环境下，在某些特定的条件下，例如，在执行任务时齿轮箱被击中导致润滑油泄露，这时润滑油供应不足并逐渐减少，齿轮处于乏油润滑状态。如何在这种状况下避免齿轮发生胶合失效，提高齿轮的乏油润滑能力是非常重要的。

乏油时油膜厚度的减少与入口区状态，尤其是入口区位置和油膜厚度有很大联系。在对乏油润滑的数字计算中，通常以润滑油膜起始点为参数代表润滑油供油的充足程度，如图 1-5 所示，

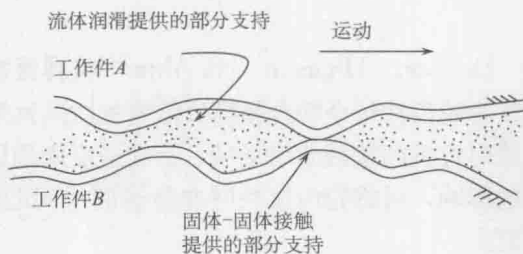


图 1-6 混合润滑示意图

撑。轮齿表面粗糙度在改变润滑效果的同时,也会影响亚表面的应力和应变分布,从而影响齿轮的失效位置。齿轮齿面的刮伤和点蚀是齿面的主要失效形式,通过对齿轮摩擦性能的分析,可以预测齿轮的刮伤和点蚀失效。

4. 喷油润滑理论

航空弧齿锥齿轮的转速非常高,在工程实际中,大多数采用喷油方式对其进行润滑^[19]。研究证明,喷油参数和供油量选择正确与否,对齿轮传动的抗胶合能力、抗点蚀能力、减轻振动、减小噪声和改善传动效率等有重要影响。随着齿轮的发展,国际上已形成许多供油观点^[20],但尚无定论,这种状况给齿轮传动的润滑设计带来很大困难,其原因是现有资料中的供油观点,是在不同历史时期形成的,它们体现了当时各国齿轮发展的水平。由于其研究方法皆属唯象科学范畴,所以都存在一定的条件性。随着“硬齿面齿轮”在国际兴起,齿轮技术有了飞速发展,承载能力和圆周速度大幅度提高。硬齿面齿轮和“软齿面齿轮”相比,若尺寸相同,其传递功率可增大10倍以上;若传递功率相同,其尺寸可缩小1/2以上,体积可缩小1/10。显然,齿轮在传动中所产生的摩擦热量也迅速增加。由于依靠从轮齿中传出热量的润滑方法没有新的进展,其冷却能力远不能满足硬齿面齿轮对冷却的需要,也很难达到上述硬齿面齿轮的传动指标。国际上解决冷却不足的主要办法是提高齿轮材料的使用温度,美、俄等国已研制出使用温度高达315℃、齿面硬度不低于HRC58的齿轮材料。可以通过对润滑方法的研究,大幅度降低齿面的瞬时温度,用一般耐温材料研制出性能相同、甚至更高的硬齿面齿轮传动装置。因此,喷油润滑方法的研究已成为高速齿轮发展的迫切需要。

研究喷油润滑的重点之一是对喷油的流体和齿轮的润滑过程进行仿真。随着计算机技术的发展,新兴起了计算流体动力学学科,为喷油润滑、润滑油射流的计算提供了有利的条件与保障。计算流体动力学技术是一种计算机模拟技术,它集流体力学、数值计算方法和计算机图形学于一体,能够对喷油过程的流体进行分析。

研究喷油润滑的另一个重点是气液多相流。从喷油嘴喷出的润滑油射流在高速状态下与环境中的空气相互作用并混合,形成了气液多相射流。啮合点的润滑状态由能够喷至啮合点的气液多相流体的性质和多少决定,因此在喷油润滑分析中,必须对气液多相流体的流体性质及其在喷油润滑过程中的状态进行研究。

1.2.2 齿轮的摩擦与热理论

1. 齿轮的摩擦模型

摩擦模型大体可以分为两类:静态摩擦模型和动态摩擦模型。静态摩擦模型是将摩擦力描述为相对速度的函数,描述了摩擦的静态特性,但是静态摩擦模型的建模通常假设在静摩擦阶段界面间没有任何运动,然而从力学角度来看,无论在法向还是切向上接触都是柔性的。动态摩擦模型是将摩擦力描述为相对速度和位移的函数,既可以描述摩擦的静态特性,也可以描述其动态特性,因此动态摩擦模型更能够较为真实地描述界面摩擦状态。后面对几种新型的摩擦模型进行介绍。

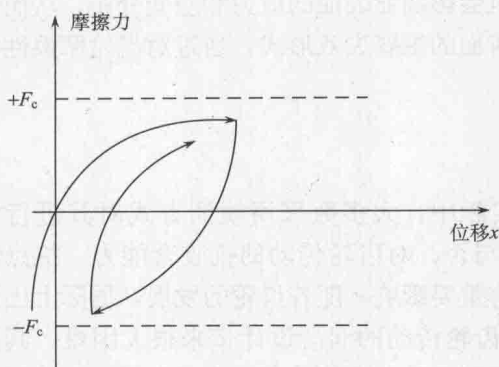


图 1-7 摩擦力和位移关系的曲线

(1) Dahl 模型。

Dahl^[21]在多次对含有滚动轴承的伺服系统进行摩擦试验的基础上,发现在未达到最大静摩擦力之前,界面间的接触峰会产生类似于弹簧行为的变形,因此会有有一个微小的位移(预滑动位移)。Dahl 采用了一个微分方程来描述这种行为,出发点是描绘代表摩擦力和位移关系的曲线,如图 1-7 所示。

(2) Bliman-Sorine 模型。

Bliman-Sorine^[22]模型是受 Dahl 模型的启发, Bliman 和 Sorine 是基于 Rabinowicz^[23]的试验得出的。该模型是一个二阶 Dahl 模型,可以看成两个一阶 Dahl 模型的并联。摩擦量取决于 $\text{sgn}(v)$ 和空间变量 s :

$$s = \int_0^t |v(\tau)| d\tau$$

在 Bliman-Sorine 模型中,摩擦只是路径的函数,与系统沿路径运行速度无关。该模型作为空间变量 s 的线性系统可表述为

$$\frac{dx_s}{ds} = Ax_s + Bv_s$$

式中, $v_s = \text{sgn}(v)$ 。

(3) 纯时滞模型。

Hess 和 Soom^[24]研究了单向振动速率信号为输入情形下的摩擦力响应,发现随着振动频率的增加,摩擦-速率特性为滞环状,以稳态摩擦曲线为中心,滞环的尺寸随频率增加而增加。试验中检测到的摩擦滞后现象,很可能是由液体油膜动力学引起的。Hess 和 Soom 提出了时间延迟模型来描述这种行为:

$$f(t) = C_0 V(t-a) + \frac{C_1}{1 + C_2 V^2(t-a)}$$

式中, V 为速率; a 为延迟时间,发现其在测量条件下滞后时间为 3~9ms; C_0 、 C_1 、 C_2 分别为正常数。该模型侧重于相对滑动速度的拟合,时间滞后模型非常好地描述了试验观测到的摩擦记忆行为。

(4) 鬃毛模型。

Haessig^[25]等提出了鬃毛模型,试图从微观角度来解释两表面间接触点的特性。假设两个相对运动的摩擦表面之间为弹性鬃毛接触,下表面的刚度大于上表面,由于相对运动导致鬃毛弹性变形,产生摩擦力,当相对运动速度足够大时,鬃毛之间产生滑动。鬃毛模型的简化原理如图 1-8 所示。

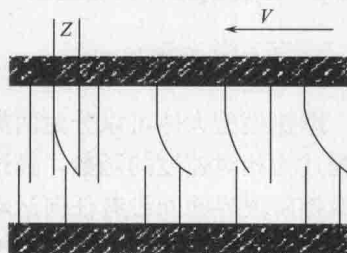


图 1-8 鬃毛模型原理

(5) 复位积分器模型。

Haessig 与 Friedland 在鬃毛模型的基础上提出复位积分器模型^[25],该模型是为了减

少鬃毛模型的计算量而设计的,其便于分析计算,同时也保留了鬃毛模型描述微黏滞摩擦现象的能力。该模型在不考虑由于相对运动导致刚毛弹性变形的情况,利用一个附加状态 z 来确定结合部位的应力。

(6) 集成模型。

Armstrong 等提出了参数集成模型^[26],它实际上是将摩擦在四个阶段所表现的不同特性与时间依赖特性(增加的静摩擦力和摩擦记忆现象)集成在一起,较为全面地描述了摩擦的特性,是一种较完善的模型。

(7) Karnopp 模型。

Karnopp 模型对零速度附近的机械运动的非线性动态特性进行了描述,如图 1-9 所示。图中 D_p 和 D_m 为最大静摩擦力, C_p 和 C_n 为库仑摩擦力, B_p 和 B_m 为斜率。

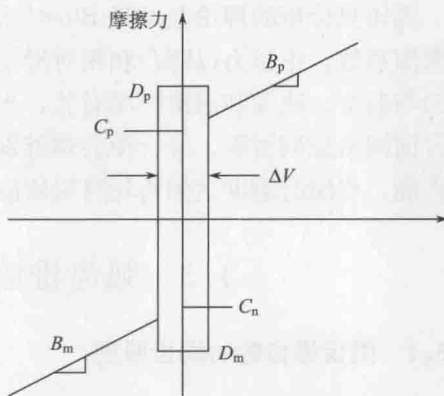


图 1-9 Karnopp 模型

(8) Lugre 模型。

在瑞典兰德工程技术学院和法国格勒诺布尔实验室的共同努力下,法国学者 Canudas

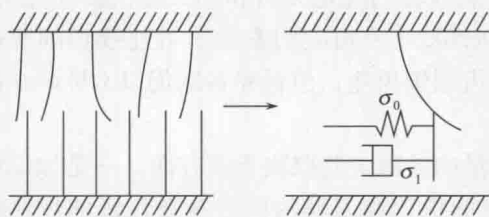


图 1-10 Lugre 模型简图

de Wit 在 Dahl 模型的基础上提出了 Lugre 模型^[27]。该模型是 Dahl 模型的扩展,同时采纳了鬃毛模型的思想,假定两摩擦表面之间是弹性鬃毛接触,下表面材料的刚度大于上表面。由于切向力作用,鬃毛产生变形,从而导致摩擦力;当切向力足够大时,鬃毛进一步变形,以致产生滑动,如图 1-10 所示。

2. 齿轮的磨损分析

齿轮磨损是指齿轮在啮合传动中掺入啮合轮齿的表面材料逐渐减少和齿面形状发生变化的现象。啮合传动过程中,啮合轮齿表面由于相对运动而产生磨损,使齿面表面形状发生变化,破坏了原来的齿形,从而使齿轮传动的振动加剧、噪声增大。齿轮磨损已经作为一种重要的失效形式被提出来,也得到人们足够的重视。

磨损的成因和表现形式非常复杂,因此分类方法也很多。现代摩擦学按照磨损机理将磨损分成六大基本类型,即黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、冲击磨损及微动磨损。为了解释磨损现象的共同本质,人们提出了各种各样的理论,如克拉盖尔斯基的疲劳磨损理论、美国麻省理工学院建立的剥层理论、磨损的能量理论等。克拉盖尔斯基的疲劳磨损理论是累积理论,它考虑接触表面粗糙度的影响,是循环变应力引起的一种破坏形式,该理论适合于疲劳磨损、磨料磨损和黏着磨损;美国麻省理工学院建立的剥层理论,以金属的错位为基础,分析亚表层金属的塑性变形与断裂行为,认为金属的磨损过程是表面下裂纹的生成使表面材料沿平行方向一层一层地剥落的过程;磨损的能量理论,认为磨损是摩擦的结果,是能量转化和消耗的过程,可用于分析磨料磨损和腐蚀磨损。由于影响磨损的因素多种多样,包括载荷、速度、温度、润滑剂、环境介质、表面粗糙度和材料性能等,而这些因素