



强力旋压连杆衬套分析与试验

■ 赵俊生 著



科学出版社

强力旋压连杆衬套分析与试验

赵俊生 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

连杆衬套是柴油机的主要滑动轴承之一,本书汇集了作者近年来从事柴油机连杆衬套的研究成果。全书针对大功率、高密度柴油机连杆衬套,阐述了连杆衬套强力旋压加工技术的具体实施;应用数值仿真手段研究了旋压成形过程中材料流动规律、旋压力变化规律;基于BP神经网络和遗传算法的工艺参数优化方法,对连杆衬套旋压工艺参数进行了优化设计;分析了相关参数对衬套孔径变形、接触强度、微动特性的影响;结合平均流量模型和表面峰元接触理论,探讨了考虑挤压效应的平均流量模型的求解方法,分析了表面粗糙度、半径间隙对衬套润滑特性的影响规律;研制了模拟连杆衬套实际工况的摆动摩擦副摩擦磨损模拟试验台,并对强力旋压连杆衬套进行了摩擦磨损模拟试验。

本书可作为机械设计及理论专业师生的参考书,也可供从事柴油机连杆衬套设计的相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

强力旋压连杆衬套分析与试验/赵俊生著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-042702-1

I. ①强… II. ①赵… III. ①柴油机-强力旋压-连杆-衬套-研究
IV. ①TK423.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 289212 号

责任编辑:裴 育 邢宝钦 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 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>

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 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 12 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:278 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

内燃机是国民经济中工业、农业、交通、国防等各个领域应用最广泛的动力装置。滑动轴承作为现代化、大功率、高密度内燃机(包括柴油机、汽油机)的关键零部件,已成为发动机提高功率、减少燃油消耗、提高运行可靠性的制约因素之一。因此,内燃机滑动轴承的设计、制造技术越来越受到各方面的高度重视。

内燃机滑动轴承主要包括曲轴主轴承、连杆大头轴承、连杆小头轴承(衬套)、止推轴承以及凸轮轴轴承。连杆轴承承受着很高的非稳定载荷,属于典型的动载滑动轴承。由于内燃机轴承的位置结构受到严格的限制,且工作条件恶劣,所以内燃机轴承在结构和设计方面有许多特殊性。随着内燃机轴承润滑理论及设计计算方法的深入研究,尤其是电子计算机技术的发展和普及,近代内燃机轴承的设计计算方法更完善、更可靠、更系统。因此,有效的分析与试验是设计高承载力、长寿命内燃机轴承的基础和保证。

为实现动力装备“平台轻量化、装备数字化、体系网络化”的目标,满足未来车辆“轻量化、信息化”跨越式发展的需要,车辆动力系统进一步向大功率、轻量化、高紧凑的方向发展,在提高输出功率的同时需进一步缩小体积、减轻重量,以提高单位体积功率。当前,高功率密度柴油机在高转速、高爆压和紧凑性等设计指标条件下,其内部的高速运动机件在极高的气压载荷和惯性载荷的边界条件下工作,对连杆轴承提出了更高的要求。不同于其他滑动轴承,摩擦副活塞销-衬套具有相对摆动运动的特点,同时由于活塞销-衬套摩擦副采用飞溅润滑方式,润滑条件更为恶劣,将导致衬套表面的摩擦磨损进一步恶化。因此,进行高强度、低磨损、抗磨损的连杆轴承分析及试验研究,是目前大功率柴油研发中急需解决的关键问题之一。

在连杆衬套的研制、分析、试验中影响因素错综复杂,涉及多门学科技术,如材料科学、成形工艺、流体力学、固体力学、数值仿真、物理化学等内容。因此,多学科的综合分析与应用是连杆衬套摩擦学设计的显著特点。连杆衬套的摩擦磨损现象发生在表面层,影响因素繁多,使得理论分析和试验研究都较为困难,因而数值仿真与试验研究的相互促进和补充是连杆衬套摩擦学设计的必要手段。

与国外相比,我国柴油机关键摩擦副的摩擦学设计技术发展相对滞后,针对柴油机连杆轴承的分析、设计及试验方面的著作较少。目前已有内燃机滑动轴承的书籍出版,但大多针对一般回转滑动轴承的设计、分析;而且材料、工艺、仿真、试验相互独立,试验方法都是针对轴承材料的疲劳试验、摩擦磨损试验、抗咬合试验。针对柴油机连杆衬套摆动摩擦副的系统分析、模拟实际工况的摩擦磨损试验还很少见。

中北大学从“九五”以来,将内燃机动压滑动轴承设计技术、润滑性能分析技术应用大功率柴油机连杆轴承的分析、设计及试验研究,自主研制了摆动摩擦副摩擦磨损模拟试验台,可为各种高、中、低速柴油机进行连杆衬套设计、摩擦磨损模拟试验;应用成形过程的有限元数值模拟技术,结合塑性强化工艺,自主研制了与多种高、中、低速柴油机配套的连杆衬套,取得了部委生产许可证,研发能力在国内处于领先地位,在大功率柴油机连杆轴承设计、分析及试验方面积累了较为丰富的研究成果。

为此,本书结合作者多年来的科研积累,从柴油机连杆衬套的材料、加工工艺、数值仿真、强度计算、润滑分析,以及摩擦磨损模拟试验等方面予以论述,使读者对连杆衬套分析及试验获得全面的了解,为从事柴油机设计的相关工程技术人员、高等院校师生及科研人员提供参考。全书共 8 章,第 1 章阐述连杆衬套的相关技术及应用现状;第 2 章系统阐述大功率、高密度柴油机使用的强力旋压衬套的机理、工艺、质量控制及强力旋压加工的技术实施;第 3 章针对锡青铜连杆衬套强力旋压,研究其成形过程中材料流动的规律、旋压力的变化规律、等效应力-应变的变化规律,以及错距旋压和无错距旋压各工艺参数对成形质量的影响规律;第 4 章以虚拟正交试验的有限元分析结果为样本,建立强力旋压成形工艺参数与成形质量评价参数之间的 BP 神经网络模型,给出一种基于 BP 神经网络和遗传算法的工艺参数优化方法,并对连杆衬套强力旋压工艺参数进行优化设计;第 5 章应用有限元法进行连杆小头-衬套-活塞销三体接触强度分析,分析衬套结构尺寸、材料特性及压配过盈量对孔径变形的影响,以及热变形对衬套变形及配合间隙的影响;第 6 章利用接触力学理论和有限元法,分析连杆摆角、衬套过盈量和摩擦系数等关键参数对衬套微动特性的影响规律;第 7 章结合平均流量模型和表面峰元接触理论,探讨考虑挤压效应的平均流量模型的求解方法,分析表面粗糙度、半径间隙对衬套润滑特性的影响;第 8 章介绍研制的模拟连杆衬套实际工况的摆动摩擦副摩擦磨损模拟试验台,并对强力旋压连杆衬套进行摩擦磨损模拟试验。

本书是在参阅大量专业文献,总结作者近年来教学经验和科研成果的基础上撰写而成的,可供从事相关科研的研究生参考,也可供从事滑动轴承摩擦学设计的工程技术人员阅读。

由于涉及范围较广,而本书的篇幅有限,在取材和论证方面存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

在本书的撰写过程中,得到中北大学樊文欣教授等同事以及葛丹丹、杜平、冯志刚、吕伟等研究生的热情支持和帮助,在此对他们表示真诚的感谢。

赵俊生

2014 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究进展	2
1.2.1 强力旋压成形技术的研究现状	2
1.2.2 有限元数值模拟在旋压成形中的应用	3
1.2.3 人工神经网络在工艺参数优化中的应用	4
1.2.4 遗传算法在塑性成形中的应用	4
1.2.5 衬套润滑性能的研究现状	5
1.2.6 国内外滑动轴承磨损试验研究现状	7
1.3 本书的意义和内容	9
1.3.1 研究意义	9
1.3.2 研究内容	10
参考文献	11
第 2 章 柴油机连杆衬套材料及加工工艺	15
2.1 引言	15
2.2 连杆衬套材料及加工工艺	15
2.2.1 连杆衬套材料概述	15
2.2.2 衬套加工工艺	17
2.3 强力旋压加工技术	18
2.3.1 工艺分类	18
2.3.2 强力旋压机理	20
2.3.3 强力旋压工艺	21
2.3.4 旋压件质量控制	24
2.3.5 缺陷的种类与控制	26
2.4 连杆衬套强力旋压加工技术实施	26
2.5 小结	30
参考文献	31
第 3 章 连杆衬套旋压成形数值仿真	32
3.1 引言	32

3.2 连杆衬套强力旋压成形数值模拟	32
3.2.1 衬套样件设计及仿真参数的确定	32
3.2.2 连杆衬套旋压成形有限元建模	33
3.3 数值模拟结果与分析	37
3.3.1 旋压力的分布状况	37
3.3.2 应力应变的分布状况	39
3.3.3 材料的流动	41
3.3.4 材料的堆积分析	42
3.4 无错距强力旋压成形过程影响因素分析	43
3.4.1 旋轮工作角的影响	43
3.4.2 旋轮圆角半径的影响	47
3.4.3 台阶旋轮与双锥面旋轮的对比分析	49
3.4.4 旋轮进给速度的影响	53
3.4.5 主轴转速的影响	55
3.4.6 旋轮与芯模间隙的影响	56
3.4.7 坯料温度的影响	59
3.4.8 减薄率的影响	62
3.5 错距强力旋压成形过程影响因素分析	64
3.5.1 旋轮有无错距比较	64
3.5.2 错距旋压旋轮结构参数的确定	66
3.5.3 旋轮轴向间距的影响	68
3.5.4 旋轮径向间距的影响	71
3.6 小结	73
参考文献	73
第4章 基于BP神经网络和遗传算法的强力旋压衬套工艺参数优化	75
4.1 引言	75
4.2 强力旋压连杆衬套虚拟正交试验	75
4.2.1 强力旋压成形质量参数和工艺参数	75
4.2.2 工艺参数对强力旋压成形质量的影响	77
4.2.3 强力旋压连杆衬套虚拟正交试验设计	80
4.2.4 试验结果与分析	81
4.3 强力旋压工艺参数BP神经网络建模	84
4.3.1 强力旋压连杆衬套神经网络建模	84
4.3.2 网络训练样本数据的确定	86
4.3.3 网络模型的训练和精度的检验	88

4.4 基于遗传算法的强力旋压工艺参数优化	90
4.4.1 强力旋压工艺参数优化模型	90
4.4.2 工艺参数的遗传优化	91
4.5 小结	94
参考文献	94
第5章 连杆衬套孔径压缩配合收缩量分析	96
5.1 引言	96
5.2 简化连杆衬套弹性理论分析	97
5.2.1 圆筒紧配合弹性理论概述	97
5.2.2 压配状态下的衬套应力应变分析	98
5.2.3 工作状态下的衬套变形分析	102
5.3 连杆小头-衬套-活塞销三体接触强度分析	104
5.3.1 连杆小头-衬套过盈配合强度的影响因素分析	104
5.3.2 怠速工况强度分析	106
5.3.3 比压与衬套最大等效应力	107
5.3.4 不同衬套的接触特性分析	109
5.3.5 油槽对衬套应力应变的仿真分析	113
5.4 连杆衬套的热结构耦合分析	117
5.4.1 热应力模型的建立	117
5.4.2 两种材质连杆衬套随温度变化的应力应变分析	120
5.5 小结	122
参考文献	122
第6章 连杆衬套过盈配合微动特性分析	124
6.1 引言	124
6.2 连杆衬套过盈配合有限元分析	125
6.2.1 连杆衬套有限元建模	125
6.2.2 边界条件的处理	126
6.2.3 连杆和衬套有限元计算结果	128
6.3 爆压时刻衬套的微动特性	132
6.3.1 爆压时刻衬套的接触压力和摩擦应力规律	133
6.3.2 滑移距离的提取	134
6.3.3 爆压时刻衬套的微动幅值规律	135
6.4 不同连杆摆角下衬套的微动特性	140
6.4.1 连杆摆角对衬套接触压力和摩擦应力的影响	140
6.4.2 连杆摆角对衬套微动幅值的影响	144

6.4.3 连杆摆角对衬套摩擦功的影响	148
6.5 不同过盈量下衬套的微动特性	150
6.5.1 过盈量对衬套接触压力和摩擦应力的影响	150
6.5.2 过盈量对衬套微动幅值的影响	154
6.5.3 过盈量对衬套摩擦功的影响	157
6.6 不同摩擦系数下衬套的微动特性	159
6.6.1 摩擦系数对衬套接触压力和摩擦应力的影响	159
6.6.2 摩擦系数对衬套微动幅值的影响	160
6.6.3 摩擦系数对衬套摩擦功的影响	164
6.7 小结	165
参考文献	166
第7章 表面粗糙度对衬套润滑特性的影响	168
7.1 引言	168
7.2 平均流量模型及峰元接触理论	169
7.2.1 平均流量模型	169
7.2.2 边界条件及初始条件	170
7.2.3 流量因子的计算	170
7.2.4 峰元承载模型	171
7.2.5 载荷方程	171
7.3 平均流量模型数值计算方法及结果分析	172
7.3.1 有限差分法求解平均流量模型	172
7.3.2 方程求解过程及流程	174
7.3.3 压力分布	176
7.3.4 油道宽度对最大油膜压力的影响	180
7.3.5 不同时刻的最小油膜厚度	180
7.4 连杆衬套润滑特性分析	183
7.4.1 承载特性	183
7.4.2 润滑过程中的摩擦力	184
7.5 表面粗糙度对润滑特性的影响	187
7.5.1 表面粗糙度对表面峰元承载的影响	187
7.5.2 表面粗糙度对膜厚比的影响	188
7.5.3 表面粗糙度对峰元摩擦力的影响	189
7.6 半径间隙对衬套润滑性能的影响	191
7.7 小结	192
参考文献	193

第 8 章 强力旋压连杆衬套摩擦磨损模拟试验	194
8.1 引言	194
8.2 连杆衬套摩擦磨损模拟试验台研制	194
8.2.1 试验装置的设计原则	194
8.2.2 试验台研制	195
8.3 连杆衬套摩擦特性试验	200
8.3.1 试验方案	200
8.3.2 实测数据频谱分析	201
8.3.3 不同载荷下摩擦系数随加载频率的变化	203
8.3.4 不同配合间隙下摩擦系数随加载频率的变化	205
8.3.5 不同宽度下摩擦系数随加载频率的变化	208
8.4 连杆衬套磨损试验及磨损因素影响分析	209
8.4.1 试验方案	209
8.4.2 磨损因素影响分析	211
8.5 不同材料对摩擦磨损特性影响的试验研究	216
8.5.1 试验方案	216
8.5.2 试验结果分析	216
8.6 小结	220
参考文献	221

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

内燃机是国民经济中工业、农业、交通、国防等各个领域应用最广泛的动力装置。滑动轴承作为现代化、高速、体积更紧凑的内燃机(包括柴油机、汽油机)的关键部件,已成为发动机提高功率、减少燃油消耗、提高运行可靠性的制约因素之一。因此,内燃机滑动轴承设计、制造技术越来越受到各方面的重视。

内燃机滑动轴承主要包括曲轴主轴承、连杆大头轴承、连杆小头轴承(衬套)、止推轴承以及凸轮轴轴承。作为内燃机摩擦副的主要轴承,连杆轴承承受着很高的非稳定载荷,即动载荷,属于典型的动载滑动轴承。由于内燃机轴承的位置结构受到严格的限制,且工作条件恶劣,所以内燃机轴承在结构和设计方面有许多特殊性。随着内燃机轴承润滑理论及设计计算方法的深入研究,尤其是电子计算机技术的发展和普及,近代内燃机轴承的设计计算方法更完善、更可靠、更系统。正确的设计、有效的分析是内燃机轴承高承载力、长寿命的基础和保证^[1]。

由于内燃机工作过程的周期循环间歇性,以及曲柄连杆机构的不平衡惯性载荷的作用,内燃机轴承具有以下特点^[2]。

1) 轴承承受的载荷大小、方向瞬时变化

四冲程内燃机,曲柄转 720° 为一循环周期;二冲程柴油机,曲柄转 360° 为一工作循环。因此,相应的内燃机轴承的载荷也是周期变化的动载荷。载荷变化周期随内燃机工作循环而异。交变动载荷导致轴承工作表面材料产生交变应力,是轴承疲劳失效的主要原因。

2) 轴承表面速度变化大

轴颈在周向旋转运动的同时,瞬时伴有径向挤压运动。即轴颈摩擦副运转过程中,其相对运动存在瞬时有有效角速度为零的时刻,此时刻旋转油膜压力为零,轴承表面油膜厚度极小,可能发生轴颈表面与轴瓦工作表面之间的瞬时接触,导致二体磨损或三体磨损现象。

3) 轴承工作温度较高

内燃机轴承受燃烧室高温影响,加之轴承内部产生的摩擦热,导致轴承表面工作温度较高,其温度可达 $100\sim 170^\circ\text{C}$ 。较高的工作温度引起润滑油黏度的降低及轴承合金材料机械性能的下降和劣化,严重时可能导致产生黏着磨损现象。

4) 润滑油的污染变质

发动机燃烧产物及冷却水系统的影响,有时会导致润滑系统中混入水分或杂质,或者添加剂分解损耗,造成润滑油稀释、老化、污染变质,进而引起轴承油膜厚度的变化及轴承工作表面的腐蚀磨损。

5) 轴承的变形复杂,难以计算和测量

内燃机运转工作过程中,曲轴、连杆及轴承座本身结构以及热应力的影响,或者制造装配的误差,这些都会导致轴和轴承座的变形,引起载荷的集中,产生偏磨现象。对于多缸柴油机,轴承副的变形和轴承载荷的精确计算都极为困难。

6) 润滑油黏度除了随温度变化,还随压力变化

未来车辆动力系统进一步向着大功率、轻量化、高紧凑的方向发展,在提高输出功率的同时,要求进一步缩小体积、减轻重量,以提高单位体积功率。大功率、高密度柴油机在高转速、高爆压和紧凑性等设计指标条件下,其内部的高速运动机件将在极高的气压载荷和惯性载荷的边界条件下工作,对轴承强度提出了更高的要求。不同于一般滑动轴承,摩擦副活塞销-衬套具有相对摆动运动的特点,同时活塞销-衬套摩擦副采用飞溅润滑方式,润滑条件较为恶劣,导致衬套表面的摩擦磨损进一步恶化。因此,研制大载荷、高强度、低磨损、耐磨损、长寿命的新型连杆衬套,是目前急需解决的重要课题^[3]。

1.2 研究进展

1.2.1 强力旋压成形技术的研究现状

为了制作更精良的产品,在普通旋压的基础上,强力旋压工艺逐渐发展而成^[4]。它最早用在加工器皿、容器等民用工业领域,出现在第二次世界大战前后的瑞典、德国等欧洲国家^[5]。20世纪50年代强力旋压技术开始进入应用阶段,国外一些大公司开始使用该技术,主要有波音、格鲁门、通用电气、福特等。经过大量的生产经验积累,各个公司已经开始了工艺参数的系统研究,并根据实际生产经验总结出一些公式对旋压力进行计算。到了60、70年代,强力旋压技术进入大发展阶段,强力旋压设备逐渐完善定型。在美国、德国、苏联、日本、意大利、英国、瑞士等一些技术先进的国家,已经研制出各种不同类型的旋压机两百余种,并且多数已经系列化生产。从80年代开始,在自动旋压机的基础上,逐渐发展了数控旋压机,这大大提高了旋压加工的质量。随着旋压技术的发展,旋压制品的精度也随着不断提高,其产品尺寸精度不逊于切削加工。

我国强力旋压技术研究从20世纪60年代开始,当时这项技术主要用于加工航空和特殊金属制品,至今也有了较快发展。在70年代,无论火箭导弹和航天技

术等国防工业领域还是民用工业领域都开始广泛应用强力旋压技术,因为它具有其他加工工艺所不具备的优异性。国外的旋压设备和技术被引进国内,通过国内研究人员的不断消化、吸收、创新,研制出各种新的产品。当时国内的数控滚返旋压机已达到了与国外相当的水平。北京有色金属研究总院于1977年倡议召开旋压会议,出版了大量与旋压技术相关的文集,至今共有十一届旋压技术交流大会文集出版,集中反映了全国旋压技术的科研成果。在旋压设备的研究方面,我国的研制水平取得了很大的发展,正在缩短与国外先进国家的差距^[6,7]。

在变形理论研究方面,国外的许多学者都进行了研究。例如,卡尔巴克赛格路(Kalpacioglu)和阿维佐(Avitzur)为了摆脱工艺参数设计时尝试法的盲目性,揭示旋压过程中材料的变形机理,曾分别对这一问题做了一些模型和解析。在国外研究筒形件旋压力的各种文献中^[8~15],叶山益次郎在文献[13]中提出的算法结果较好。文献[16]通过对变形机理所作出的初步研究分析,建立了一些概念,说明了强力旋压的实际现象;并提出了旋压力的计算方法,与其他的方法相比,不合理的假定较少,精度较高。国内研究方面,文献[17]通过对锥形件强力旋压力的测试、分析和模型试验得出的结果与实际测量的结果是基本一致的。文献[18]用光弹贴片法对强力旋压成形件中残余应力在壁厚方向的分布进行测定与分析,并对残余应力的成形机理进行理论研究。文献[19]分析了各个加工工艺参数,指出正确选用旋压工艺参数,并与合理的热处理方法相结合,可以加工出理想的大尺寸高精度的产品。文献[20]对强力旋压工艺特点进行了分析,并以此为基础建立起了数据库管理系统,为合理地进行工艺参数、工装参数的选择提供了理论依据,有效地避免了生产中的盲目性,提高了生产效率。

1.2.2 有限元数值模拟在旋压成形中的应用

数值模拟技术可以在产品生产之前对产品进行研究分析,为生产过程中可能遇到的一些问题与相关参数的选择提供理论的指导,可以有效避免生产中的偶然性,大大提高生产的效率,缩短研发新产品的周期。因此,有限元数值模拟技术被广泛地应用于各种金属塑性成形技术中^[21,22]。

20世纪90年代,随着计算机的发展和有限元方法的普及,越来越多的学者用数值模拟的方法对强力旋压成形过程进行分析,试图找到强力旋压过程中应力场、应变场分布,分析强力旋压过程的成形机理,解释强力旋压的变形规律^[23~25]。文献[26]~[28]在考虑旋轮的运动轨迹和旋轮的一些重要尺寸以及毛坯的运动,对筒形件反旋加工进行了数值模拟,研究发现旋轮作用区周向两侧存在两个产生切向收缩变形的区域,当两侧区域的收缩变形大于旋轮作用区的切向伸长量时,就产生了缩径;反之,则产生了扩径。文献[29]把有限元单元的数值模拟技术用于强力旋压工艺的辅助设计,以提高强力旋压产品研制水平。

文献[30]采用有限元法对强力旋压成形过程进行分析,得到了强力旋压成形过程中塑性不稳定流动情况。文献[31]在刚塑性有限元的基础上对筒形件强力旋压的平面变形力学模型进行数值模拟,获得了正旋工艺和反旋工艺的塑性流动速度场,以及应变和应变速率的分布。文献[32]对三轮强力旋压的成形过程进行模拟,建立了筒形件强力旋压的力学模型;运用大变形弹塑性有限元程序ADZNA进行分析,得到了强力旋压成形过程应力与应变场的分布规律。文献[33]对大直径薄壁筒形件错距旋压进行研究,得到了工艺参数对成形质量的影响,并对工艺参数进行优化计算,用优化的工艺参数进行试制的结果表明优化结果较好。文献[34]经过数值模拟得到了工艺参数对成形件内径尺寸精度的影响规律。文献[35]通过有限元模拟得到了筒形件壁厚方向上的残余应力,并讨论了工艺参数对残余应力的分布的影响。

1.2.3 人工神经网络在工艺参数优化中的应用

质量控制、精密加工、工艺优化等一系列问题在塑性加工领域中不可回避,人们对塑性产品不断增长的需求和加工过程提出了越来越多的要求,因此研究塑性成形制品质量的影响因素就显得很有必要。塑性成形工艺复杂、影响因素众多且工艺参数与成形质量之间没有显式形式,神经网络技术正是解决这些问题的一种行之有效的途径。因为它拥有非线性特征、信息分布性以及较强的联想能力^[36~38]。

加拿大Chun等建立了多层神经网络模型^[39],以铝合金热加工过程的工艺参数为输入,以材料性能指标为输出,实现了对材料性能的预测。文献[40]将人工神经网络技术应用到热轧中,对流动应力进行预测。国内也有很多学者将人工神经网络应用到塑性加工领域。文献[41]将神经网络技术应用于模具制造技术中,实现了对工况的检测、预报和控制。文献[42]针对筒形件强力旋压问题,用神经网络方法,实现了有限元前处理的参数预选,在减少工作量的同时减少了模拟误差。文献[43]以筒形件强力旋压成形的材料参数、工艺参数为输入,以旋压力最大值为输出,基于BP神经网络技术建立两者之间的映射关系,并用粒子群优化的方法实现了对筒形件强力旋压工艺参数的优化。

1.2.4 遗传算法在塑性成形中的应用

遗传算法作为一种随机化搜索方法,源于自然选择和遗传变异等生物进化机制,可以有效地解决复杂的适应性系统模拟和优化问题。从产生至今不断扩展应用领域,对于不同领域、不同学科的问题,它都可以作为一种通用的求解算法来使用。

在塑性成形领域,许多特殊的优化问题用传统的优化方法不能够有效解决,

因为这些优化问题的优化变量不连续并且与目标函数之间的关系复杂。例如,弯曲件的变形量优化^[44],半固态挤压^[45,46]、压铸^[47]、机械扩径^[48]、薄板冲压^[49]等加工过程的工艺参数优化,冲裁件的最小回弹量^[50]、自由曲线曲面造形优化等问题^[51]。遗传算法作为一种有效的全局搜索方法,与现代计算机强大的运算能力结合,为解决塑性成形领域中这些非线性、多目标的复杂优化问题提供了新的手段和方法。

在对强力旋压的工艺参数进行优化时,成形工艺参数和成形件质量之间没有明确的函数关系,遗传算法的群体搜索能够使其突破邻域搜索的限制,实现对整个解空间上信息的采集和探索,能有效地防止优化中出现局部最优解^[52]。因此,将这种优化方法用于强力旋压成形工艺参数优化中,对解决这一具体实践问题可起到促进作用。

1.2.5 衬套润滑性能的研究现状

对润滑理论的最早研究是阿基米德求解了静止黏性流体问题,后来达·芬奇通过大量计算推导了黏性流体质量守恒方程,在17世纪润滑理论才慢慢地发展和建立起来。

17世纪牛顿通过大量的试验和运算最终为黏度下了定义,奠定了流体润滑的基础。19世纪80年代初,俄国科学家提出了流体润滑的第一个表达式,继而英国学者托耳在对铁路轴承的摩擦特性研究中发现了轴承油膜中有压力的分布,奠定了流体动压理论。该理论启发了英国学者雷诺(Reynolds)于1886年提出有关润滑剂中压力分布的方程(该方程就是著名的雷诺方程),并结合流体力学知识比较完整地解释了托耳的试验,从此奠定了流体动力润滑理论的数学基础。20世纪初,德国学者完成了对雷诺方程的基本试验验证;继而有人完成了无限长轴承的雷诺方程的积分。20世纪中期,窄轴承理论得到了发展。此后由于计算机的应用以及有限差分法和有限元法理论的发展,有限宽轴承的理论也得到进一步发展。经过长期研究,更多的理论和实践证明雷诺方程的正确性,它是静压润滑、动压润滑、动静压润滑、弹流性润滑和混合润滑等现代流体润滑理论研究的数学理论基础。

从1886年雷诺方程的建立到20世纪50年代以前,由于计算速度和计算工具的限制,人们在求解时对雷诺方程做了大量的简化,将变化的载荷看作稳载轴承,只按比压进行设计,无限短和无限长轴承理论就是很好的证明。

1904年,Sommerfeld求解了无限长轴承的压力分布^[53]。他在分析研究中一般把选择的对象看作一直稳定的状态,总结了相关问题的一些近似解法,如模拟解、小参数法等。在第二次世界大战之后,有限宽轴承的数值解得到了进一步发展,推进了流体润滑理论的发展。20世纪50年代后,流体静力学润滑理论开始被

广泛关注。在 60 年代,静力润滑理论、气体动力理论和弹性流体动力润滑理论得到了快速发展。此时,Dawson 求解出了广义的雷诺方程,该方程最大的特点就是计入了流体密度和黏度对润滑油厚度的影响。相继 Dowson^[54]又提出了热流体动力学分析的概念,称为 THD。该理论提出在轴承的润滑性能分析时应考虑两点:①轴承等部件导热性能;②温度对黏度的影响。滑动轴承润滑理论经过大量学者进行多年的研究和验证,慢慢形成一套比较完整的新的润滑理论,称为热弹性流体动力润滑理论。该理论提出在进行润滑分析时考虑机械变形和热效应的影响。诸多因素的考虑使得润滑理论的计算结果更接近工程实际。在低速轻载情况下的热流体动力分析已取得一定的成果,但是弹性变形对润滑油膜的影响也较大。轴承在大载荷下会有较大的变形,严重地影响油膜形成,所以在进行轴承润滑分析时需要将变形考虑在内,形成了 TEHD 分析。润滑分析时,TEHD 和 THD 分析在数值计算方法上没有本质上的区别,取决于是否进行耦合分析,TEHD 将弹性变形及热性变形进行了耦合分析^[55]。

由于数值计算技术的提高和流体润滑理论本身的发展,人们开展了对动载轴承油膜压力和轴心轨迹的研究工作,其中最具有代表性的算法有三种:移动率法、汉法和 Holland 法。

移动率法是美国 Cornell 大学 Booker 教授提出的,其原理为按照 Ocyirk 短轴承理论和周向条件取 Gumbel 条件求出油膜压力的解析解,依据载荷和油膜力的平衡条件求出轴心运动方程。移动率法有别于其他方法的重要特点是在不必求解雷诺方程的情况下就能得到轴心运动方程。因此,该法在一定的精度下求解速度比较快,在内燃机滑动轴承设计中欧美国家应用此法比较多。但此法不宜用于精确的预测方法,因为移动率法采用了短轴承理论且不计供油特性^[56]。

汉法是德国 Karlsruhe 工业大学 Hahn 教授提出的。汉法取相同的轴向边界条件,在周向取统一的边界条件(如雷诺边界条件),求出压力分布。边界条件并未考虑进油槽内的压力等于进油压力,所以只适用于整圈周向进油槽或进油孔的轴承。该法从理论上说是比较精确的,但是多一个变量就增加了计算机的存储量,所以计算量比较大^[57]。

Holland 法是德国 Clausthal 工业大学 Holland 教授提出的。该法为克服动载荷造成的求解雷诺方程通解的困难,采用分离法处理雷诺方程,将雷诺方程分为旋转项和挤压项。该法提出将轴承副间的旋转运动和挤压运动分别考虑,并且按各自的边界条件独立求解,求解后再将旋转效应和挤压效应产生的承载力进行叠加,根据承载力和外载荷平衡的条件,导出轴心运动偏微分方程。该法在求解旋转效应的旋转油膜力时,采用 Sassenfeld 和 Walther 的计算值,该计算值是采用差分法按照雷诺边界条件对大量轴承进行数值分析得到的。该法求解挤压效应的挤压油膜力时,取 Meiners 的计算值。该法相对于汉法,提出将动载轴承中的油膜力看

作旋转油膜力和挤压油膜力的矢量和^[58,59]。从理论上讲,这肯定是不精确的,但是在实际应用中,结果在可以容许的范围内。上海交通大学内燃机轴承科研组用该方法经过大量的实践验证,结果与实际情况基本吻合。高明等研究了动载滑动轴承的轴心轨迹 Holland 法的改进,采取奖惩法控制迭代步长,通过合理控制偏位角变化率和优化选取初值,约束偏位角的变化,可以有效地提高计算精度,加快实际运算速度,实现了轴心轨迹的仿真中的 CAI 动态模拟,取得比较好的效果^[60]。但 Holland 法是把旋转效应和挤压效应分开考虑,再让各自的承载力矢量相加,这样在轴心轨迹必然会产生失真。1996 年,陈志恒等研究了四冲程内燃机活塞销轴承的轴心轨迹计算,验证了应用 Holland 法可以成功计算出柴油机活塞销的轴心轨迹和孔心轨迹,完成了轴承内部的润滑特性分析,为轴承的工作可靠性和结构合理性分析提供了参考依据^[61]。

1.2.6 国内外滑动轴承磨损试验研究现状

在摩擦学研究领域中,磨损研究占有很突出的地位。因为在一般机械零件的失效形式中,磨损失效几乎占了 90% 以上,所以磨损寿命的研究是当前国内外十分重视的研究课题。英国摩擦学重点研究课题 17 项中,与柴油机磨损寿命有关的就有 9 项,在其附加重点研究课题中还特别强调了混合润滑、磨粒磨损、添加剂、柴油机摩擦磨损等方面的研究^[62]。在德国摩擦学研究规划中也曾特别强调了滑动轴承材料、柴油机润滑剂、磨粒磨损、测试技术以及提高柴油机寿命等方面的研究。

轴承磨损寿命的研究主要涉及磨损机理的理论研究^[63],以及磨损过程中相互运动的两摩擦表面,各磨损相关参数的试验研究。例如,轴承材料;表面涂层及表面处理;边界润滑;磨粒磨损、润滑油及添加剂;载荷、转速、温度、尺寸结构对磨损量的影响等方面的研究。众所周知,上述课题的涉及面广,影响因素错综复杂。目前还没有一致公认的磨损理论,就试验技术而言,也是各有特点。每一种试验方法、试验技术、试验数据都有待实际效果的比较评价,这显然是一项广泛而长期的研究工作。

通常可将轴承磨损试验研究分为四种^[64,65]:

- (1) 轴承材料的磨损试验研究;
- (2) 轴承零件的磨损试验机试验研究;
- (3) 轴承零件的台架试验研究;
- (4) 轴承零件的实际工作环境的现场试验研究。

第一种研究方法对于选择机械性能及表面性能都适合的配对材料,以及判断轴承材料的耐磨性能十分有意义。后面三种都是轴承零件的磨损试验研究方法,可以对轴承零件的磨损寿命,以及磨损过程中,轴承的形状、尺寸、表面热处理、表