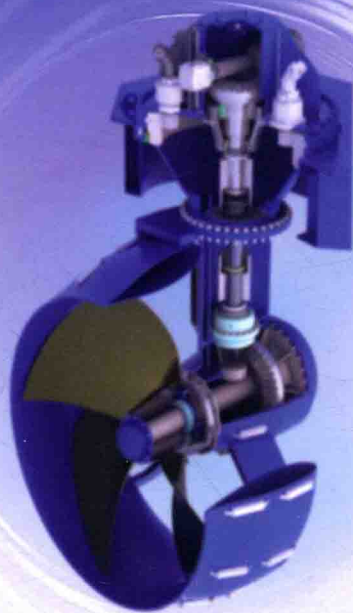




全回转推进器装配性能分析与优化

饶运清 邱浩波 曾文会 卢文龙 李新宇 著

 科学出版社

全回转推进器装配性能 分析与优化

饶运清 邱浩波 曾文会 卢文龙 李新宇 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对全回转推进器的装配工艺,系统阐述了可调距全回转推进器的装配性能分析方法,并通过对有关装配参数的优化来提高整机的装配性能,为全回转推进器装配性能的分析与设计优化提供了较为系统的理论和方法。主要包括:全回转推进器装配序列规划、装配误差分析与统计公差优化、轴系动态特性分析、桨毂结合面微动磨损分析、桨毂结合面和艉轴动密封分析与装配参数优化等,并结合具体实例介绍了上述有关理论方法的实际应用。

本书可供船舶及船用机械研究所或全回转推进器生产企业的有关科技人员使用,也可作为高等院校船舶与海洋工程、机械工程等相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

全回转推进器装配性能分析与优化/饶运清等著. —北京:科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-059839-4

I. ①全… II. ①饶… III. ①全回转推进-推进器-装配(机械)
IV. ①U671.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 268552 号

责任编辑:裴育 陈婕 纪四稳 / 责任校对:王萌萌

责任印制:张伟 / 封面设计:陈敬

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:400 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

开发深远海资源、维护领海安全、建设海洋强国是我国的重大战略。大型海洋作业平台、深海潜水器及其支持船、科学考察船、航母补给舰、管道和电缆敷设船等高服役性能海洋装备是开发深海资源、保护“海洋国土”的关键装备,也是实现我国由海洋大国向海洋强国跨越的迫切需求。高服役性能动力定位系统是大型海洋装备在恶劣海况下确保定位精度和平稳性的核心功能部件,对开发深远海资源、维护领海安全至关重要。全回转推进器是动力定位系统中的关键执行装备,但目前我国对大功率级别的全回转推进器的需求几乎依赖进口,这成为制约我国高服役性能海洋装备自主研制的瓶颈。

本书针对全回转推进器的装配工艺与装配性能,主要开展了有关全回转推进器关键部件的装配序列规划、装配误差分析与统计公差优化、轴系动态特性分析、结合面微动磨损分析与工艺优化、结合面动密封性能分析与优化等方面的基础研究,目的是通过对有关制造工艺与装配参数的优化来提高整机的装配性能与服役性能。

全书共9章。

第1章简要介绍全回转推进器的结构、工作原理及其海洋工况,并概述有关全回转推进器方面的一些研究现状。

第2章针对全回转推进器的装配序列规划问题,提出一种基于改进和声搜索算法的装配序列规划方法,并通过对全回转推进器进行子装配体分解、关键部件的装配序列规划等步骤求解关键部件的装配序列,验证了本章方法在实际应用中的可行性。

第3章针对全回转推进器回转机构中弧齿锥齿轮装配组件中存在的局部并联尺寸链问题,提出一种可快速方便求解不同类型的局部并行联接副的旋量模型,并对全回转推进器弧齿锥齿轮装配误差进行分析。

第4章建立面向实际工况的桨毂回转副装配误差分析模型,分析海洋实际工况对桨毂回转副装配间隙的影响。

第5章提出一种多样本检验策略及相应的启发式算法用于解决全回转推进器推进轴系组件的统计公差优化问题,应用该算法不仅可提高装配成功率,而且能降低该装配体的公差制造加工成本。

第6章针对全回转推进器的传动轴系,分析圆锥滚子轴承润滑特性,建立圆

锥滚子轴承综合刚度计算模型,并对全回转推进器传动轴系进行动力学建模及功率流优化。

第7章对全回转推进器工作过程中桨毂结合面的微动状态进行分析与磨损机理研究,并结合实际工况探索表面形貌以及润滑介质对桨毂结合面微动磨损的影响,提出采用 Ti_3SiC_2 涂层和新的材料制备工艺,以增强桨毂结合面材料的耐磨性。

第8章针对桨毂回转副密封性能,提出基于装配间隙的桨毂回转副密封性能预测模型和基于统计公差分析的优化模型,并以某石油钻井平台全回转推进器桨毂回转副的装配参数设计为例进行应用验证。

第9章针对全回转推进器的艉轴密封问题,建立唇型油封热力耦合模型,分析唇型油封的动密封性能;基于机械密封槽型结构建模及温度场分析,进行全回转推进器艉轴机械密封性能分析。

本书由饶运清、邱浩波、曾文会、卢文龙、李新宇等合著。其中,饶运清负责规划本书结构和统筹全书的编著工作;曾文会和饶运清撰写第1、3~5、8章;李新宇撰写第2章;邱浩波撰写第6章;卢文龙撰写第7章;邱浩波和李新宇撰写第9章。课题组博士生张坡、博士后翟文正以及硕士生龙晨曦、王达鹏、杨鹏、夏邓成、秦凯、罗显、谢晋等参与了有关研究并提供了相关材料。课题组科研助理陈立硕士生对全书初稿进行了整理与文字校对。

特别感谢科技部对本书研究工作的大力支持。本书所展示的研究成果是在国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“高服役性能海洋动力定位装备制造的基础研究”课题五“全回转推进装备动密封特性与敏感装配参数优化”(2014CB046705)的资助下取得的。

作为探索性研究成果,本书难免存在不完善之处,还望各位专家和广大读者不吝批评和指正。

饶运清

2018年3月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 海洋工况介绍	1
1.2 全回转推进器工作原理	2
1.3 全回转推进器主要结构	4
1.4 全回转推进器研究现状	6
1.4.1 全回转推进器装配序列规划研究现状	7
1.4.2 全回转推进器装配误差分析研究现状	9
1.4.3 全回转推进器轴系振动研究现状	11
1.5 全回转推进器研究意义	13
参考文献	13
第 2 章 全回转推进器装配序列规划	18
2.1 引言	18
2.2 装配序列规划问题及其模型	19
2.2.1 装配序列规划问题简介	19
2.2.2 装配序列规划模型	20
2.3 基于改进和声搜索算法的装配序列规划方法	25
2.3.1 和声搜索算法简介	25
2.3.2 改进和声搜索算法求解装配序列规划问题	28
2.3.3 算例验证与分析	32
2.4 全回转推进器装配序列规划实例	38
2.4.1 全回转推进器概述	38
2.4.2 子装配体分解方法概述	41
2.4.3 关键部件的装配序列求解	43
2.5 本章小结	48
参考文献	49
第 3 章 全回转推进器弧齿锥齿轮装配误差分析	50
3.1 引言	50
3.2 传统装配误差建模方法	50

3.2.1	极值法	50
3.2.2	统计法	51
3.2.3	三维公差分析方法	51
3.3	局部并联尺寸链装配误差建模方法	53
3.3.1	局部并联尺寸链介绍	53
3.3.2	第一类局部并联尺寸链求解方法	56
3.3.3	第二类局部并联尺寸链求解方法	58
3.4	实例分析	62
3.4.1	弧齿锥齿轮箱装配功能要求	63
3.4.2	并联尺寸链求解过程	64
3.4.3	结果比较分析	71
3.5	本章小结	73
	参考文献	74
第4章	全回转推进器桨毂回转副装配误差分析	77
4.1	引言	77
4.2	全回转推进器桨毂回转副实际工况下变形问题描述	77
4.3	实际工况下装配误差建模	79
4.3.1	基于修正雅可比模型的装配体公差建模	79
4.3.2	实际工况下零部件局部变形	81
4.3.3	实际工况下变形与装配误差耦合	81
4.4	实际工况下全回转推进器桨毂回转副负载分析	82
4.4.1	离心力负载	82
4.4.2	水动力负载	83
4.4.3	实际工况下桨毂回转副综合负载分析	84
4.5	实际工况下桨毂回转副桨毂结合面表面形变及装配间隙	87
4.5.1	螺旋桨有限元模型的建立	87
4.5.2	有限元分析结果	90
4.5.3	桨毂结合面实际工况变形与装配误差耦合	91
4.6	面向实际工况的桨毂回转副装配误差建模	92
4.6.1	装配误差分析	93
4.6.2	不同工况下螺旋桨桨毂结合面的性能	96
4.6.3	实际工况对桨毂结合面装配间隙的影响	100
4.6.4	考虑实际工况以及装配误差对桨毂结合面装配间隙的影响	104
4.7	本章小结	108
	参考文献	109

第 5 章 全回转推进器艉轴组件统计公差优化	110
5.1 引言	110
5.2 统计公差优化方法简介	110
5.3 统计公差优化问题	111
5.4 随机试验与多样本检验策略	113
5.4.1 基于蒙特卡罗仿真的随机试验	113
5.4.2 多样本检验策略	114
5.5 统计公差优化方法	116
5.5.1 布谷鸟搜索算法	117
5.5.2 遗传算法	118
5.5.3 粒子群优化算法	119
5.6 艉轴组件统计公差	119
5.6.1 装配误差分析	119
5.6.2 统计公差优化结果分析比较	122
5.6.3 基于不同策略的统计公差优化结果分析比较	124
5.6.4 基于多样本检验策略的统计公差优化结果分析与讨论	126
5.6.5 基于多样本检验策略的启发式算法统计优化结果分析与讨论	128
5.7 本章小结	129
参考文献	129
第 6 章 全回转推进器轴系动态特性分析与建模	132
6.1 引言	132
6.2 圆锥滚子轴承润滑特性分析	133
6.2.1 滚动体与内外滚道之间弹流润滑数学模型的建立	133
6.2.2 滚动体与内外滚道之间弹流润滑的数值计算	136
6.2.3 滚动体与内外滚道之间弹流润滑分析	138
6.3 圆锥滚子轴承综合刚度计算模型的建立	141
6.3.1 圆锥滚子轴承综合刚度理论基础	142
6.3.2 圆锥滚子轴承油膜刚度计算模型	144
6.3.3 圆锥滚子轴承接触刚度计算模型	150
6.3.4 滚动轴承综合刚度及其影响因素分析	152
6.4 全回转推进器传动轴系的动力学建模及功率流优化	154
6.4.1 传动轴系振动模型	155
6.4.2 传动轴系自由振动	156
6.4.3 传动轴系谱响应分析	158

6.4.4 传动轴系的功率流分析优化	163
6.5 本章小结	173
参考文献	173
第7章 服役工况下桨毂结合面微动磨损分析	175
7.1 引言	175
7.2 表面形貌对桨毂结合面微动磨损的影响	177
7.2.1 试验材料以及试验装置	177
7.2.2 试验过程	178
7.2.3 试验结果与分析	180
7.3 润滑条件对桨毂结合面微动磨损的影响	185
7.3.1 试验样件及试验装置	186
7.3.2 试验结果与分析	187
7.4 表面涂层对桨毂结合面微动磨损的影响	192
7.4.1 涂层常用材料	192
7.4.2 常用涂层的制备方法	193
7.4.3 实际工况下 Ti_3SiC_2 涂层实例分析	197
7.5 新制备工艺对桨毂结合面微动磨损的影响	202
7.5.1 3D 打印技术制备铜合金的发展现状	202
7.5.2 制备工艺	203
7.5.3 微动磨损试验及分析	203
7.6 本章小结	205
参考文献	206
第8章 桨毂回转副密封性能分析与统计公差优化	210
8.1 引言	210
8.2 桨毂回转副装配间隙分析与统计公差优化方法	210
8.2.1 桨毂回转副装配间隙分析	210
8.2.2 桨毂回转副统计公差优化方法	213
8.3 基于装配间隙的桨毂回转副密封性能预测与优化	215
8.3.1 基于装配间隙的桨毂回转副密封性能预测模型	215
8.3.2 基于统计公差分析的桨毂回转副密封性能优化模型	220
8.3.3 优化前后不同工况下实际密封性能对比分析	223
8.3.4 考虑实际工况与不考虑实际工况优化结果对比分析	225
8.4 桨毂回转副组件公差优化设计案例	226
8.4.1 案例背景介绍	226

8.4.2 推进器实际工况与内部零部件受力分析	228
8.4.3 桨毂结合面间隙分析与密封性能预测	234
8.4.4 桨毂回转副装配体三维公差优化设计	239
8.5 本章小结	242
参考文献	243
第9章 全回转推进器艉轴动密封分析与装配参数优化	244
9.1 引言	244
9.2 唇型油封热力耦合分析	244
9.2.1 唇型油封工作原理	245
9.2.2 唇型油封有限元模型的建立	246
9.2.3 唇型油封热力耦合模型的建立	253
9.3 唇型油封线接触弹流润滑性能研究	258
9.3.1 弹流润滑理论及油膜形成原理	258
9.3.2 润滑脂 Reynolds 方程的推导	259
9.3.3 润滑脂 Reynolds 方程的求解方法	264
9.3.4 计算结果及分析	267
9.4 唇型油封动密封性能研究	270
9.4.1 唇型油封泄漏率数学建模与分析	271
9.4.2 全回转推进器艉轴动密封性能分析	275
9.4.3 唇型密封泄漏率试验及结果分析	276
9.5 机械密封结构及温度场分析与优化	281
9.5.1 机械密封槽型结构模型	282
9.5.2 机械密封波度与锥度结构模型	283
9.5.3 机械密封结构与温度场分析	284
9.6 全回转推进器艉轴机械密封性能分析	289
9.6.1 机械密封极端环境下密封性能	289
9.6.2 装配参数同轴度对机械密封性能的影响	292
9.7 本章小结	294
参考文献	295
附录 某石油钻井平台作业工况下动力定位数值仿真完整数据	297

第1章 绪 论

1.1 海洋工况介绍

开发深远海资源、维护领海安全、建设海洋强国是我国的重大战略。大型海洋作业平台、深海潜水器及其支持船、科学考察船、航母补给舰、管道和电缆敷设船等高服役性能海洋装备是开发深海资源、保护“海洋国土”的关键装备,也是实现我国由海洋大国向海洋强国跨越的迫切需求。国务院发布的《“十二五”国家自主创新能力建设规划》已明确将高技术海洋装备列为制造业创新能力建设的重点。

高服役性能动力定位系统是大型海洋装备在恶劣海况下确保定位精度和平稳性的核心装备。全回转推进器是动力定位系统的核心,其推力方向可以相对于随船坐标系发生变化,故可以产生任意方向的推力以保证海洋平台/舰船的正常作业,例如,我国最大的钻井平台——海洋石油 981,按照南海极端海况设计,自重 3.1 万 t,配备了 8 台 4600kW 全回转推进器,可在全球定位系统(GPS)定位约 20m 精度的基础上,进一步将平台定位到米级的精度;同时,全回转推进器的设计海况高于平台本身的作业海况,在遭遇南海 200 年一遇的 17 级台风时,仍可确保平台的定位精度与平稳性。全回转推进器结构、运动复杂,在海洋工况下承受大风、大浪、洋流等交变载荷(如桨轴在平台旋转时的弯曲度可达直线航行时的 6 倍,而在紧急制动时更是高达 11 倍;在 2.3m 浪高情况下,桨轴会出现剧烈的侧向力矩波动,其幅度是静水情况下的 4~6 倍,使得桨轴上的侧向力矩在操纵过程中极易超载)。苛刻的服役环境和恶劣的工况对其定位的准确性、运行的可靠性、响应的灵敏性以及服役寿命等性能提出了极高要求。

目前,我国只能研制 2000kW 以下功率级别的全回转推进器,3500kW 功率级别的全回转推进器还处于试验摸索阶段(其整机高度达 7m,螺旋桨直径 3.3m,重达 55t,最大公称推力可达 58tf, $1\text{tf} \approx 9800\text{N}$),更高功率级别的全回转推进器完全空白,其关键动力部件制造技术长期被国外少数几家公司垄断。“海洋石油 981”配备的全回转推进器全部依赖进口。挪威的 Kongsberg、荷兰的 Wärtsilä、英国的 Rolls-Royce 等已具备 7000kW 以上功率级别全回转推进器的制造能力,且对中国严密封锁(即便是进口到国内的装备,其装配、调试与维修一律由外方人员实施)。要实现我国大功率(5000kW 以上)全回转推进器从无到有的跨越,迫切需要突破其制造的核心技术。

海水腐蚀与风、浪、流交变作用等极端环境要求大功率全回转推进器具备极高的服役性能,这对其制造技术提出了严峻挑战:①大型承力回转轴在锻造中产生应力分布不均,导致其在高达 $200\text{t} \cdot \text{m}$ 强交变载荷与腐蚀环境的交互作用下极易出现腐蚀疲劳,因此对成形工艺提出了极高要求;②高服役性能对导流管、可调距螺旋桨的表面形性状态、连接界面特性提出了苛刻要求,如焊接直径 5m 的变壁厚导流管,需同时控制变形量(小于总体尺寸的 1.5%)与残余应力,而现有制造手段根本无法达到;③恶劣工况要求灵敏的响应特性与长服役寿命,迫切需提升装配品质(如叶管装配间隙不得超过直径的 0.5% ,以高效响应外部扰动)与定量评价服役性能。

上层建筑直接受风的影响产生风压倾斜力矩。空气流动形成风,空气与水面摩擦力的存在使得水面承受切应力,气压变化、切应力、重力等综合作用下水面不断起伏形成浪。风作用于海面不仅产生不同尺度的风浪,同时使海面的外貌发生变化,产生浪花、飞沫等。在风的直接或间接作用下的海面所呈现的外貌称为海况。

船在波浪中受到六种力的作用:重力、惯性力、浮力、辐射流体动力、波浪扰动力、流体黏性力。船舶在波浪中运动时,会产生 12 种单向或者往复的运动,其中横摇、纵摇和垂荡对航行的影响最大。海浪包括风浪、涌浪和近岸浪。船的表现重力垂直于有效波面,在规则波和不规则波的作用下,船体受到浪的扰动力和扰动力矩,从而产生对应的响应函数。

洋流会对船体产生流体阻力。推进器向后拨水产生推力,而水流获得与推力方向相反的诱导速度。流速和转速与推力和转矩之间存在的关系称为水动力性能。

船体在海洋中受到风、浪、流等的综合作用,产生一定的运动,为了保持动态定位,螺旋桨需要通过产生不同方位角的推力和转矩来与之平衡。因此,全回转推进器受到的海洋工况归根结底是螺旋桨的水动力性能。

1.2 全回转推进器工作原理

高服役性能动力定位系统是大型海洋作业平台、深海潜水器、航母补给舰等在恶劣海况下确保定位精度和平稳性的核心装备,对开发深远海资源、维护领海安全至关重要。全回转推进器是动力定位系统中的关键执行装备,我国只具备制造 2000kW 以下功率级别的能力, 3500kW 以上大功率级别的完全依赖进口,西

方发达国家长期对其制造技术严密封锁。大功率全回转推进器已成为制约我国高服役性能海洋装备自主研制的瓶颈。

全回转推进器是可绕垂直轴 360° 回转的螺旋桨或导管推进器。它又称为 Z 型推进器、全向推进器、舵推进器、转向螺旋桨、旋回螺旋桨, 是通过伞齿轮系统传动机构使螺旋桨或导管推进器能在水平面内绕竖轴 360° 转动, 用以推进并操纵船舶的推进器。它的轴系布置呈 Z 形, 可同时起推进和操纵船舶的作用; 能任意改变推力的方向, 使船原地调头, 进退自如。对于船舶航行时左右前后的操纵性, 全回转推进器比导管推进器和平旋推进器好, 这是因为导管推进器虽然顺车时推力较大, 但在倒车时推力较差, 操纵性能也不够理想; 平旋推进器可以获得良好的操纵性能, 但机构复杂, 造价高, 易损坏; 而全回转推进器尽管没有舵, 但可以使螺旋桨的推力完全转换为相当于舵力的作用, 有利于操纵船舶, 而且其单位功率推力大, 后退推力和前进推力基本相同。这种推进装置可在车间中整个组装完成, 不需要水下作业, 安装及维修十分方便, 但因传动机构和大毂径带来较大的损失, 其效率一般较低, 而且机构复杂, 造价高, 常用于对操纵性要求很高的船, 如渡船等。

可调距螺旋桨(controllable pitch propeller, CPP)简称可调桨, 由桨叶、桨毂机构、配油器、液压系统及电子遥控系统等五大部件或系统组成。可调距螺旋桨的桨叶不固定在桨毂上, 而是围绕垂直于桨轴的轴线转动。利用桨毂内的操纵机构转动桨叶, 改变螺距角, 从而改变推力的大小和方向, 以适应舰艇前进、后退、停止和变速等要求。可调距螺旋桨可在不同航行工况下充分利用主机的功率和转速, 利用无级变速, 但构造复杂, 造价高, 维修难度大。定距螺旋桨结构简单、经济安全, 但不能在多种工况下充分发挥其性能。

在驾驶室操纵控制杆, 电液伺服控制系统通过配油机构将方向和油量都受控制的高压油输入位于螺旋桨桨毂中的伺服油缸, 并通过转叶机构驱动桨叶, 在全正车和全倒车范围内无级调节螺距角。对于任一规定的螺距角, 由主机驱动的以某一转速运转的螺旋桨将吸收的扭矩转化为推船前进的力或拉船倒退的力。

和单工作制的定距螺旋桨不同, 可调距螺旋桨是多工作机制机构, 可有效地协调船的多工况与单一主机的矛盾。它在非设计点的其他工况, 均能发挥主机螺旋桨的能力与效率, 提高船的性能。和定距螺旋桨动力装置相比, 可调距螺旋桨能提高 $3\% \sim 5\%$ 的综合效率, 具有节能的效果。

把螺距角从全正车调节到全倒车, 即可实现船舶的紧急制动, 不需要主机反转, 这对于不可倒车的燃气轮机动力装置的船舶来说具有特别重要的意义, 可调距螺旋桨船的紧急制动较定距螺旋桨船缩短制动距离 $30\% \sim 50\%$; 可调距螺旋桨船可在零至最大航速间无级调速, 具有优良的低速性能, 从而显著提高了船舶操纵

机动性能,给作业工况、离靠码头、通过狭窄航面带来莫大的方便与安全。

可调距螺旋桨具有优良的遥控性能,既有以节约主机燃料费用为目的的主机、可调距螺旋桨联合控制,还有以保护主机不超负荷为目的的负荷控制系统等。采用可调距螺旋桨装置能显著降低船员的劳动强度,易于实现船舶操纵自动化。

广泛采用可调距螺旋桨的船型有拖船、渔船、工程船(布缆船、挖泥船等)、调查船、科学考察船、油船、渡船、滚装船及破冰船等。

1.3 全回转推进器主要结构

海洋动力定位装置全回转推进器结构、运动复杂,整机动态特性与服役性能直接关系到海洋动力定位系统的精确定位与平稳控制,而装配作为制造的终端环节,是保障全回转推进器整机动态特性与服役性能的关键。推进器结构复杂,局部功能部件的串并联尺寸链繁多,且服役环境复杂,长期承受风、浪、流等交变外载荷作用,如在海洋环境和运行中载荷的交变扰动极易引起整机和结构变形,导致关键运动部件结合面失效。传统的装配性能分析技术难以考虑装配体中复杂的串并联尺寸链以及实际工况对装配误差的影响。

本书主要针对国内某船舶企业的核心产品可调距 Z 型传动全回转推进器(以下简称全回转推进器)进行相关研究,图 1.1 为全回转推进器三维结构图,图 1.2 为全回转推进器推进部位装配图。推进器由回转部位和推进部位组成,回转部位在三维结构图最上部,由电机带动回转轴做平面内 360° 转动,时刻改变推进器推力的方向。而推进部位即全回转推进器的主体也是本书的主要研究对象,包括弧齿锥齿轮箱、推进轴系组件和桨毂组件三部分,该部位主要通过改变转速来提供不同大小的推力。

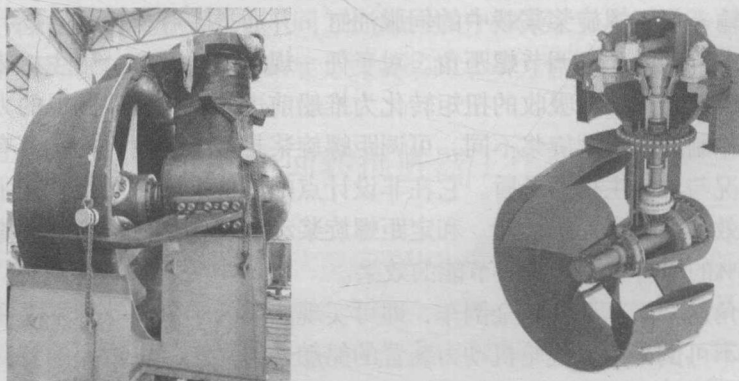


图 1.1 全回转推进器三维结构图

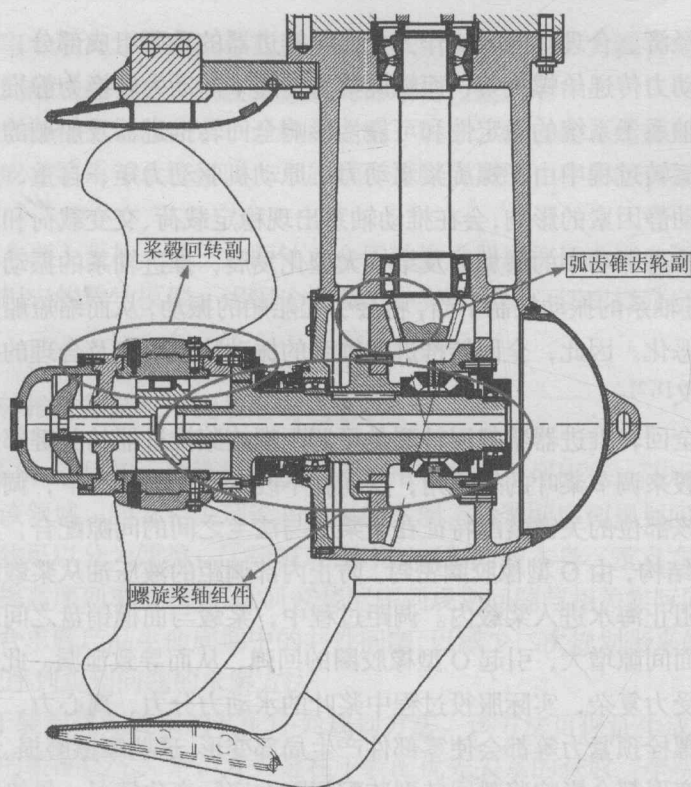


图 1.2 全回转推进器推进部位装配图

首先,本章所述的某型号全回转推进器有 300 种以上零件,零件数在 1000 个以上,而目前企业的装配规划方法较原始,主要依靠装配工程师根据经验和知识进行规划,存在效率低下和质量无法保障等问题,因此,装配规划方法亟待更新。同时,其推进系统中的弧齿锥齿轮箱齿轮副装配误差尺寸链传递关系复杂,串并联尺寸链同时存在,传统的公差建模分析技术难以精确预测其最终的装配误差,一旦忽视这些局部并联尺寸链,最终的装配误差计算结果精度较低,难以反映实际误差传递规律,最终难以进行准确合理的公差优化设计。

其次,艏轴组件的装配质量影响桨轴旋转过程中的偏心情况,导致异常振动等。该部位零部件装配关系简单,可通过相关装配误差计算方法计算出其装配误差,只需进行公差优化与分配即可。由于传统的基于极值法的公差优化与分配难以考虑加工制造过程中的随机误差与系统误差,优化后的零部件公差过紧,与实际不符,因此,需要一种新的统计公差优化方法来进行统计公差优化与分配,使

优化结果更经济、合理。同时,作为全回转推进器的重要组成部分,轴系子系统将原动机的动力传递给螺旋桨,而螺旋桨将传递来的动力转换为静推力推动船舶前进,因此轴系子系统的稳定性和可靠性影响全回转推进器及船舶的服役性能。推动轴系在运转过程中由于螺旋桨水动力、原动机驱动力矩、自重、船体变形、润滑液膜等动静因素的影响,会在推动轴系出现稳定载荷、交变载荷和瞬间载荷。随着全回转推进器功率的增加以及结构大型化发展,推进轴系的振动也越来越严重,若对推进轴系的振动控制不当,将会引起船舶的振动,从而缩短船舶的寿命,使服役性能恶化。因此,全回转推进器轴系的振动特性研究及合理的控制有着重要的实际意义^[1,2]。

最后,全回转推进器桨毂回转副是可调距螺旋桨推进器的关键部件,它可以通过调节桨毂来调节桨叶的螺距角,从而在不改变转速的情况下,调节推力的大小。然而,该部位的关键装配特征在于桨毂与法兰之间的间隙配合,且间隙之间是O型密封结构,由O型橡胶圈密封,防止内部调距的液压油从桨毂结合面流入海水,同时阻止海水进入桨毂内。调距过程中,桨毂与曲柄销盘之间的磨损等会使桨毂结合面间隙增大,引起O型橡胶圈的回弹,从而导致泄漏。此外,桨毂回转副部位的受力复杂,实际服役过程中桨叶的水动力分力、离心力、重力、温度和法兰上的螺栓预紧力等都会使零部件产生局部变形。这些摩擦磨损、设计公差、零部件局部变形都会影响桨毂回转副装配间隙的实际变化情况,最终影响其密封性能。因此,本章重点研究该部分实际工况的变形情况,以及面向实际工况的装配误差分析、统计公差优化与分配等,最终提高桨毂回转副的密封服役性能。

1.4 全回转推进器研究现状

全回转推进器有300种以上零件,零件数在1000个以上,属于复杂产品。从功能上看,其主要由推进单元、调距单元和回转单元组成。为了后期的装配改进和装配线自动化升级,需要进行其关键部件的装配系列规划研究,研究装配序列规划问题与实际加工、制造、装配等问题的结合,重点在于融合求解产品生命周期中的共性问题,以减少二次规划带来的额外成本。

目前,全回转推进器性能方面的研究主要集中在桨叶水动力性能、桨叶轴承的微动磨损等方面,例如,Godjevac等^[3]详细研究了海洋工况对全回转推进器桨叶轴承微动磨损的影响,这些研究很少从整机结构、局部零部件加工、制造误差、装配误差等方面分析其对全回转推进器服役寿命的影响。同时,由于零部件种类

繁多,局部串并联尺寸链广泛存在,并且实际工况中的热、力耦合变形等会导致零部件配合面的局部变形,致使整机或局部结构失效。

此外,全回转推进器轴系子系统由立轴、艉轴、锥齿轮、螺旋桨以及各轴承副等机构组成,轴系子系统组成一个质量弹簧阻尼系统,存在潜在振动的可能性危害。

因此,本书主要从上述三方面针对全回转推进器局部运动副实际工况中存在的问题建立相应的数学模型,用理论模型指导实际应用,切实提升全回转推进器的性能。

1.4.1 全回转推进器装配序列规划研究现状

20世纪80年代初,计算机辅助技术被用于装配序列研究,随后大量技术和方法被引入该领域。随着相关理论和技术的发展,对装配序列规划问题的研究逐渐深入,大致可以分为两类:①研究装配序列规划问题本身,重点在于提高装配建模精度和提高序列求解效率;②研究装配序列规划问题与相关实际问题的结合,重点在于融合求解产品生命周期中的共性问题,以减少二次规划带来的额外成本。

1) 装配序列规划问题的求解方法

(1) 基于装配优先关系的装配序列规划方法。该方法可保证生成的序列严格遵守零件间的装配优先关系,其关键在于装配优先关系的获取。李明宇^[4]提出一种问答法的人机交互方式来获取装配优先关系,该方法可以根据用户的回答自动提取出优先关系规则,再利用算法推导出符合优先关系规则的所有装配序列,但是当零件数量增加时,用户需回答的问题数量也呈指数上升。为解决该问题,Godjevac等^[3]改进了提问方法来减少提问的次数,但同时提高了回答问题的难度。该方法可以有效处理小规模装配序列规划问题,对大规模装配序列规划问题的处理效果较差。

(2) 基于割集法的装配序列规划方法。李明宇^[4]在前人研究的基础上提出了基于割集法的装配序列规划方法,该方法可根据零部件之间的联接关系建立零部件与或图,通过割集操作得到包含所有可行序列的装配与或图,再通过评价指标对所有可行序列进行评价后选出最优装配序列。同样,该方法在处理大规模问题时易出现节点组合爆炸问题而导致求解难度较大。

(3) 基于知识的装配序列规划方法。该方法将现有的各类知识转变为适当的逻辑后存储于知识库,通过将当前产品的特征与知识库进行匹配后,推理出合理的装配序列。该方法的关键在于知识库的建立和知识库的检索匹配过程。李荣等^[5]提出了一种基于连接结构知识的装配序列规划方法,以连接件为基础,应用面向