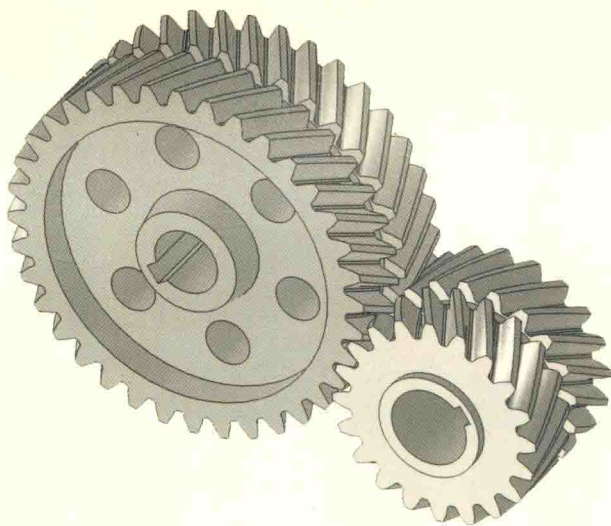


封闭差动人字齿轮传动系统 均载及动力学特性分析研究

朱增宝 朱如鹏 王传礼 潘地林 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

封闭差动人字齿轮传动系统 均载及动力学特性分析研究

朱增宝 朱如鹏 王传礼 潘地林 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍了封闭差动人字齿轮传动系统(大型舰船主减速器)的均载和非线性动力学特性领域的研究成果。本书主要内容包括封闭差动人字齿轮传动系统两级啮合齿轮的各种相位关系,人字齿时变啮合刚度与中间浮动构件人字齿轮接触切向刚度,传动系统两级各齿轮误差转化到啮合线等效位移,封闭差动人字齿轮传动系统静力学与动力学模型以及主要参数对传动系统静力学与动力学均载特性的影响,主要参数对传动系统动力学浮动特性的影响,多齿侧间隙、时变啮合刚度的封闭差动人字齿轮传动系统的多自由度扭转非线性动力学方程以及齿侧间隙、时变啮合刚度、阻尼、综合误差对传动系统非线性动态特性的影响。

本书可供从事机械设计、机械传动等领域研究的科技人员参考,也适合大学相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

封闭差动人字齿轮传动系统均载及动力学特性分析研究 / 朱增宝等著. — 北京:国防工业出版社, 2015. 1
ISBN 978-7-118-09605-7

I. ①封... II. ①朱... III. ①人字齿轮-差动齿轮传动-动力特性-研究 IV. ①TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 197841 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 9¼ 字数 156 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717



前 言

载荷均衡分配对于提高行星齿轮传动系统寿命、增大可靠性和减小振动尤为重要,强非线性的行星齿轮传动系统需要应用非线性动力学理论研究其振动特性,鉴于此,行星齿轮传动系统均载及非线性动力学特性已成当前研究的热点和难点问题。本书以封闭差动人字齿轮传动(大型舰船主减速器)为研究对象,通过研究其均载及非线性动态特性,为该传动系统的设计提供理论和技术支持。

在传动系统的啮合与切向刚度研究中,确定了传动系统两级啮合齿轮的各种相位关系,引入基于齿轮副瞬时总接触线长度推导出的斜齿轮时变啮合刚度公式按刚度并联方式计算人字齿时变啮合刚度,分析了人字齿轮啮合刚度波动小的原因。应用材料力学原理计算由单位载荷引起的轮齿位移即柔度,进而确定中间浮动构件人字齿轮接触切向刚度。

在传动系统的齿轮误差等效位移研究中,采用简谐函数推导了偏心误差、齿频误差转化到齿轮副啮合线上的等效位移公式;提出了一种齿轮传动几何误差转化为啮合线上的等效位移计算方法,按此方法推导出了传动系统两级各齿轮安装误差转化到啮合线等效位移的计算公式,进而建立了传动系统两级各齿轮误差转化到啮合线上等效位移的完整公式体系。

在传动系统的静力学均载特性研究中,建立了包含中间浮动构件的封闭差动人字齿轮传动系统静力学计算模型;确定了传动系统静力学均载系数计算公式,计算了传动系统的静力学均载系数;分析了传动系统主要参数对传动系统静力学载荷分配的影响,获得主要参数对传动系统静力学均载特性的影响规律。

在传动系统的动力学均载特性研究中,考虑了齿轮重量、时变啮合刚度、各种误差的影响,建立了包含中间浮动构件的封闭差动人字齿轮传动系统动力学计算模型;把动力学方程线性化,采用傅里叶级数法求解;确定了传动系统动力学均载系数计算公式,计算了传动系统的动力学均载系数;分析了传动系统主要参数对传动系统动力学载荷分配的影响,获得封闭差动人字齿轮传动系统动力学均载特性的变化规律。

在传动系统的动力学浮动特性研究中,建立了封闭差动人字齿轮传动系统

动态浮动量的计算方法,计算了传动系统两级各齿轮动力学浮动量,分析了传动系统的各种参数对传动系统动力学浮动量的影响。获得封闭差动人字齿轮传动系统动力学浮动特性的变化规律。

在传动系统的非线性动力学特性研究中,建立了多齿侧间隙、时变啮合刚度的封闭差动人字齿轮传动系统的多自由度扭转非线性动力学方程;应用 Newmark 数值法求解非线性动力学微分方程组,得到了传动系统的非线性动态响应结果;综合运用位移响应时间历程图、啮合力响应时间历程图、相图、庞加莱截面,分析了齿侧间隙、时变啮合刚度、阻尼、综合误差对封闭差动人字齿轮传动系统非线性动态特性的影响;获得了齿侧间隙、时变啮合刚度、阻尼、综合误差对啮合轮齿的受力、运动状态的影响规律。

特别感谢南京航空航天大学机电学院的鲍和云、靳广虎、李政民卿三位博士对本书的修改和审阅。本书的出版得到了安徽理工大学科技产业处、安徽理工大学机械工程学院和相关领导的大力支持,在此也表示真诚的感谢。

因作者水平有限,本书难免存在不足,希望读者批评指正。

作者
2014.4

目 录

常用符号表	1
第 1 章 绪论	7
1.1 封闭差动人字齿轮传动系统的均载及非线性动力学特性问题	7
1.2 行星齿轮传动系统动力学研究概述	8
1.2.1 行星齿轮传动系统动力学研究内容及发展历程	9
1.2.2 行星齿轮传动系统动力学分析模型	13
1.2.3 行星齿轮传动系统动力学求解方法	17
1.3 封闭差动行星齿轮传动系统研究现状	21
1.3.1 组合行星齿轮传动	21
1.3.2 封闭差动行星齿轮传动	22
1.3.3 封闭差动人字齿轮传动系统结构简介	22
第 2 章 啮合与切向刚度计算	24
2.1 引言	24
2.2 啮合相位	24
2.3 人字齿轮时变啮合刚度计算	25
2.3.1 人字齿轮的平均啮合刚度	25
2.3.2 人字齿轮的时变啮合刚度	26
2.4 中间浮动构件切向刚度计算	29
2.5 本章小结	32
第 3 章 齿轮误差等效位移计算	33
3.1 引言	33
3.2 偏心误差等效位移	34
3.3 齿频误差等效位移	37
3.4 安装误差等效位移	38

3.5	综合误差等效位移	41
3.6	本章小结	41
第4章	封闭差动人字齿轮传动系统静力学均载特性分析	42
4.1	引言	42
4.2	系统的静力学模型	43
4.3	齿轮副啮合线相对位移	45
4.3.1	齿轮中心位移的等效位移	45
4.3.2	齿轮副啮合线相对位移	48
4.4	系统静力学方程及求解	49
4.4.1	齿轮副的啮合力、齿轮的重力分量和行星轮的 离心力	49
4.4.2	系统静力学方程	50
4.4.3	静力学方程求解	52
4.5	静力学均载系数计算	52
4.6	静力学均载特性分析	53
4.6.1	差动级各行星轮和封闭级各星轮均载系数 变化曲线	53
4.6.2	输入功率对均载系数的影响	54
4.6.3	输入转速对均载系数的影响	54
4.6.4	支撑刚度变化对均载系数的影响	55
4.6.5	啮合刚度变化对均载系数的影响	56
4.6.6	螺旋角变化对均载系数的影响	57
4.6.7	齿轮重量对均载系数的影响	57
4.6.8	齿轮误差对均载系数的影响	58
4.7	本章小结	63
第5章	封闭差动人字齿轮传动系统动力学均载特性分析	65
5.1	引言	65
5.2	传动系统的动力学模型	65
5.3	系统的动力学平衡方程	67
5.3.1	齿轮副弹性啮合力	67
5.3.2	齿轮副啮合阻尼力	67
5.3.3	动力学平衡方程	68

5.4	动力学方程求解、均载系数计算	70
5.4.1	动力学方程求解	70
5.4.2	均载系数计算	74
5.5	动力学均载特性分析	75
5.5.1	差动级各行星轮和封闭级各星轮均载系数 变化曲线	75
5.5.2	输入功率对均载系数的影响	76
5.5.3	输入转速对均载系数的影响	77
5.5.4	支撑刚度对均载系数的影响	77
5.5.5	啮合刚度对均载系数的影响	81
5.5.6	螺旋角对均载系数的影响	83
5.5.7	齿轮重量对均载系数的影响	84
5.5.8	齿轮误差对均载系数的影响	85
5.6	本章小结	89
第6章	封闭差动人字齿轮传动系统动力学浮动特性分析	92
6.1	引言	92
6.2	浮动量计算	92
6.3	动力学浮动特性分析	93
6.3.1	齿轮浮动轨迹	93
6.3.2	输入功率对浮动量的影响	96
6.3.3	输入转速对浮动量的影响	97
6.3.4	支撑刚度对浮动量的影响	97
6.3.5	啮合刚度对浮动量的影响	99
6.3.6	螺旋角对浮动量的影响	100
6.3.7	齿轮重量对浮动量的影响	101
6.3.8	齿轮误差对浮动量的影响	102
6.4	本章小结	106
第7章	封闭差动人字齿轮传动系统非线性动态特性分析	108
7.1	引言	108
7.2	系统的非线性动力学模型	108
7.3	传动系统动力学平衡方程	110
7.3.1	齿轮副弹性啮合力	110

7.3.2	齿轮副啮合阻尼力	110
7.3.3	动力学基本方程	111
7.3.4	动力学方程坐标变换	112
7.3.5	无量纲化动力学方程	114
7.4	动力学求解方法	117
7.4.1	Newmark 法原理	118
7.4.2	积分初值的选择	119
7.4.3	系统静态变形计算	119
7.5	系统动态特性分析	120
7.5.1	标准参数条件下系统动态响应	120
7.5.2	齿侧间隙对系统动态特性的影响	121
7.5.3	人字齿时变啮合刚度对系统动态特性的影响	124
7.5.4	阻尼对系统动态特性的影响	126
7.5.5	综合误差对系统动态响应的影响	131
7.6	本章小结	132
参考文献		134

常用符号表

A_k	第 k 段微齿段截面积	B_{spi}	系统周期差动级外啮合均载系数
A_{mj}	星轮 Z_{mj} 安装误差	b	人字齿轮单个斜齿宽度
$A_{m\pi 1}$	第一阶谐波幅值	b_e	位移标称尺度
A_{pi}	行星轮 Z_{pi} 安装误差	b_{rmj}	封闭级内啮合齿侧间隙
A_{r1}	差动级内齿轮安装误差	b_{rmj3}	啮频周期封闭级内啮合均载系数
A_{r2}	封闭级内齿轮安装误差	b_{smj4}	啮频周期封闭级外啮合均载系数
A_{s1}	差动级太阳轮安装误差	b_{rpi}	差动级内啮合齿侧间隙
A_{s2}	封闭级太阳轮安装误差	b_{rpi1}	啮频周期差动级内啮合均载系数
$\overline{A}_{r1}$	A_{r1} 转化到 rpi 上的等效位移	b_{smj}	封闭级外啮合齿侧间隙
$\overline{A}_{r2}$	A_{r2} 转化到 rmj 上的等效位移	b_{spi}	差动级外啮合齿侧间隙
$\overline{A}_{rmj}$	A_{mj} 转化到 rmj 上的等效位移	b_{spi2}	啮频周期差动级外啮合均载系数
$\overline{A}_{rpi}$	A_{pi} 转化到 rpi 上的等效位移	C_{rm}	Z_{mj} 与 Z_{r2} 间阻尼系数
$\overline{A}_{s1}$	A_{s1} 在 spi 上的等效位移	C_{rp}	Z_{pi} 与 Z_{r1} 间阻尼系数
$\overline{A}_{s2}$	A_{s2} 在 smj 上的等效位移	C_{sm}	Z_{s2} 与 Z_{mj} 间阻尼系数
$\overline{A}_{smj}$	A_{mj} 转化到 smj 上的等效位移	C_{sp}	Z_{s1} 与 Z_{pi} 间阻尼系数
$\overline{A}_{spi}$	A_{pi} 转化到 spi 上的等效位移	C_γ	单位斜齿宽度的啮合刚度
B	截面形状系数	C	阻尼矩阵
B_m	封闭级均载系数	$\overline{C}$	无量纲动力方程阻尼矩阵
B_p	差动级均载系数	D_{c1}	差动级齿轮固定坐标系浮动量
B_{rm}	封闭级内啮合均载系数	D_{c2}	封闭级齿轮固定坐标系浮动量
B_{rmj}	系统周期封闭级内啮合均载系数	$D_{rmj}(t)$	Z_{mj} 与 Z_{r2} 间啮合阻尼力
B_{rp}	差动级内啮合均载系数	$D_{rpi}(t)$	Z_{pi} 与 Z_{r1} 间啮合阻尼力
B_{rpi}	系统周期差动级内啮合均载系数	$D_{smj}(t)$	Z_{s2} 与 Z_{mj} 间啮合阻尼力
B_{sm}	封闭级外啮合均载系数	$D_{spi}(t)$	Z_{s1} 与 Z_{pi} 间啮合阻尼力
B_{smj}	系统周期封闭级外啮合均载系数	E	材料弹性模量
B_{sp}	差动级外啮合均载系数	$\cdot E_{mj}$	封闭级星轮偏心误差
		E_{pi}	差动级行星轮偏心误差

E_{r1}	差动级内齿轮偏心误差	$eE_{spi}(t)$	$E_{s1}、E_{pi}$ 在 spi 上等效位移叠加
E_{r2}	封闭级内齿轮偏心误差	$e_{rmj}(t)$	rmj 上综合误差等效位移
E_{rmp}	封闭级内啮合齿频误差	$e_{rpi}(t)$	rpi 上综合误差等效位移
E_{rpi}	差动级内啮合齿频误差	$e_{smj}(t)$	smj 上综合误差等效位移
E_{s1}	差动级太阳轮偏心误差	$e_{spi}(t)$	spi 上综合误差等效位移
E_{s2}	封闭级太阳轮偏心误差	F	一对齿施加的任意载荷
E_{smj}	封闭级外啮合齿频误差	F_m	外啮合齿轮副的啮合力
E_{spi}	差动级外啮合齿频误差	F_{pi}	各行星轮 Z_{pi} 公转离心力
E_{μ}	材料弹性模量修正式	$F_{rmj}(t)$	封闭级内啮合的弹性啮合力
$\bar{E}_{nmj}$	E_{nmj} 在封闭级外啮合线上等效误差	$F_{rpi}(t)$	差动级内啮合的弹性啮合力
$\bar{E}_{pi}$	E_{pi} 在差动级外啮合线上等效误差	$F_{smj}(t)$	封闭级外啮合的弹性啮合力
$\bar{E}_{r1}$	E_{r1} 在差动级内啮合线上等效误差	$F_{spi}(t)$	差动级外啮合的弹性啮合力
$\bar{E}_{r2}$	E_{r2} 在封闭级内啮合线上等效误差	$\{F\}$	等效静力平衡力
$\bar{E}_{rmj}(t)$	E_{rmj} 在啮合线上的等效位移	f_{bk}	轮齿 k 段内任一点的弯曲变形
$\bar{E}_{rpi}(t)$	E_{rpi} 在啮合线上的等效位移	f_s	单齿的总剪切变形
$\bar{E}_{s1}$	E_{s1} 在差动级外啮合线上等效误差	G_k	剪切模量
$\bar{E}_{s2}$	E_{s2} 在封闭级外啮合线上等效误差	G_m	星轮 Z_{mj} 重量
$\bar{E}_{smj}(t)$	E_{smj} 在啮合线上的等效位移	$G_{mjH}(t)$	G_{mj} 的水平分量
$\bar{E}_{spi}(t)$	E_{spi} 在啮合线上的等效位移	$G_{mjV}(t)$	G_{mj} 的垂直分量
$\tilde{E}_{nmj}$	E_{nmj} 在封闭级内啮合线上等效误差	G_p	行星轮 Z_{pi} 重量
$\tilde{E}_{pi}$	E_{pi} 在差动级内啮合线上等效误差	$G_{piH}(t)$	G_{pi} 的横向分量
$eA_{rmj}(t)$	$A_{mj}、A_{r2}$ 在 rmj 上等效位移叠加	$G_{piV}(t)$	G_{pi} 的纵向分量
$eA_{rpi}(t)$	$A_{pi}、A_{r1}$ 在 rpi 上等效位移叠加	G_{r1}	内齿轮 Z_{r1} 重量
$eA_{smj}(t)$	$A_{s2}、A_{mj}$ 在 smj 上等效位移叠加	G_{r2}	内齿轮 Z_{r2} 重量
$eA_{spi}(t)$	$A_{s1}、A_{pi}$ 在 spi 上等效位移叠加	$G_{r1H}(t)$	G_{r1} 的横向分量
$eE_{rmj}(t)$	$E_{mj}、E_{r2}$ 在 rmj 上等效位移叠加	$G_{r1V}(t)$	G_{r1} 的纵向分量
$eE_{rpi}(t)$	$E_{pi}、E_{r1}$ 在 rpi 上等效位移叠加	$G_{r2H}(t)$	G_{r2} 的水平分量
$eE_{smj}(t)$	$E_{s2}、E_{mj}$ 在 smj 上等效位移叠加	$G_{r2V}(t)$	G_{r2} 的垂直分量
		G_{s1}	太阳轮 Z_{s1} 重量
		G_{s2}	太阳轮 Z_{s2} 重量
		$G_{s1H}(t)$	G_{s1} 的横向分量
		$G_{s1V}(t)$	G_{s1} 的纵向分量
		$G_{s2H}(t)$	G_{s2} 的水平分量

$G_{z1}(t)$	G_{z2} 的垂直分量	K_{r1}	内齿轮 Z_{r1} 支撑刚度
H	行星架	K_{r2}	内齿轮 Z_{r2} 支撑刚度
H_{c1}	差动级齿轮旋转坐标系横向位移	K_{rm}	Z_{mj} 与 Z_{r2} 间平均啮合刚度
H_{mj}	星轮 Z_{mj} 水平方向位移	$K_{rmj}(t)$	Z_{mj} 与 Z_{r2} 间时变啮合刚度
H_{pi}	行星轮 Z_{pi} 横向位移	K_{rp}	Z_{pi} 与 Z_{r1} 间平均啮合刚度
H_{r1}	内齿轮 Z_{r1} 横向位移	$K_{rup}(t)$	Z_{pi} 与 Z_{r1} 间时变啮合刚度
H_{r2}	内齿轮 Z_{r2} 水平方向位移	K_{s1}	太阳轮 Z_{s1} 支撑刚度
H_{s1}	太阳轮 Z_{s1} 横向位移	K_{s2}	太阳轮 Z_{s2} 支撑刚度
H_{z2}	太阳轮 Z_{s2} 水平方向位移	K_{sm}	Z_{s2} 与 Z_{mj} 间平均啮合刚度
$\bar{H}_{mj}$	H_{mj} 投影到 smj 上的等效位移	$K_{smj}(t)$	Z_{s2} 与 Z_{mj} 间时变啮合刚度
$\bar{H}_{pi}$	H_{pi} 投影到 spi 上的等效位移	K_{sp}	Z_{s1} 与 Z_{pi} 间平均啮合刚度
$\bar{H}_{s1}$	H_{s1} 投影到 spi 上的等效位移	$K_{spi}(t)$	Z_{s1} 与 Z_{pi} 间时变啮合刚度
$\bar{H}_{z2}$	H_{z2} 投影到 smj 上的等效位移	K_T	中间浮动构件切向刚度
$\tilde{H}_{mj}$	H_{mj} 投影到 rmj 上的等效位移	K_{Ti}	一对齿的切向刚度
$\tilde{H}_{pi}$	H_{pi} 投影到 rpi 上的等效位移	$\mathbf{K}$	传动系统刚度矩阵
$\tilde{H}_{r1}$	H_{r1} 投影到 rpi 上的等效位移	$\bar{\mathbf{K}}$	无量纲动力方程刚度矩阵
$\tilde{H}_{r2}$	H_{r2} 投影到 rmj 上的等效位移	k_0	单位接触线长度齿轮平均啮合刚度
h_k	第 k 段微齿段高度	k_m	齿轮副平均啮合刚度
i	差动级各行星轮标号	L	输出轴
I_k	第 k 微齿段截面惯性矩	$L(\tau)$	齿轮副瞬时总接触线长度
j	封闭级各行星轮标号	M	星轮个数
K_{f1q}	Z_{r1} 与 Z_{f1} 间切向刚度	$M(x)$	轮齿内任一点的总弯矩
K_{f1s2}	Z_{r1} 与 Z_{s2} 间扭转刚度	$M^0(x)$	单位力产生的弯矩
K_{f2q}	Z_{r2} 与 Z_{f2} 间切向刚度	M_{H1}	H 与 L 等效质量
K_{f2l}	Z_{f2} 与 L 间扭转刚度	M_{r1s2}	Z_{r1} 与 Z_{s2} 齿轮副等效质量
K_{g1q}	Z_{r1} 与 Z_{g1} 间切向刚度	M_{r2l}	Z_{r2} 与 L 等效质量
K_{g2q}	Z_{r2} 与 Z_{g2} 间切向刚度	M_{s1r1}	Z_{s1} 与 Z_{r1} 齿轮副等效质量
K_H	行星架在 r_H 处等效切向刚度	M_{s2r2}	Z_{s2} 与 Z_{r2} 齿轮副等效质量
K_{H1}	H 与 L 间扭转刚度	M_{sm}	Z_{s2} 与 Z_{mj} 齿轮副等效质量
K_m	星轮 Z_{mj} 支撑刚度	M_{sp}	Z_{s1} 与 Z_{pi} 齿轮副等效质量
K_p	行星轮 Z_{pi} 支撑刚度	$\mathbf{M}$	质量矩阵
		$\bar{\mathbf{M}}$	无量纲动力方程质量矩阵

m_1	差动级模数	S_k	第 k 微齿段上表面到节圆距离
m_2	封闭级模数	$S_{mj}(t)$	啮合线 rmj 上的相对位移
m_H	H 在 r_H 上的等效质量	$S_{pi}(t)$	啮合线 rpi 上的相对位移
m_L	L 在 r_L 上的等效质量	$S_{smj}(t)$	啮合线 smj 上的相对位移
m_m	Z_{mj} 基圆半径上等效质量	$S_{spi}(t)$	啮合线 spi 上的相对位移
m_p	行星轮质量	smj	封闭级齿轮副外啮合线
m_{r1}	Z_{r1} 基圆半径上等效质量	spi	差动级齿轮副外啮合线
m_{r2}	Z_{r2} 基圆半径上等效质量	T_2	r_{s2b} 上转矩
m_{s1}	Z_{s1} 基圆半径上等效质量	T_D	输入转矩
m_{s2}	Z_{s2} 基圆半径上等效质量	T_L	负载转矩
N	行星轮个数	T_m	啮合周期
N_c	行星轮/星轮个数	t	时间历程
n_s	输入转速	t_b	行星轮(星轮)基圆齿厚
P	输入功率	V_{c1}	差动级齿轮旋转坐标系纵向位移
P_D	T_D 在 r_{s1b} 上的等效力	V_{mj}	行星轮 Z_{mj} 垂直方向位移
P_L	T_L 在 r_L 上的等效力	V_{pi}	行星轮 Z_{pi} 纵向位移
p	齿轮副的基圆齿距	V_{r1}	内齿轮 Z_{r1} 纵向位移
q	单位齿宽柔度	V_{r2}	内齿轮 Z_{r2} 垂直方向位移
R_F	力 $F\cos\beta/2$ 作用节圆处距圆心距离	V_{s1}	太阳轮 Z_{s1} 纵向位移
R_k	第 k 微齿段上表面半径	V_{s2}	太阳轮 Z_{s2} 垂直方向位移
R_{k-1}	第 k 微齿段下表面半径	$\bar{V}_{mj}$	V_{mj} 投影到 smj 上的等效位移
R_{pb}	行星轮(星轮)基圆半径	$\bar{V}_{s1}$	V_{s1} 投影到 spi 上的等效位移
R_{r0}	内齿轮齿根圆半径	$\bar{V}_{s2}$	V_{s2} 投影到 smj 上的等效位移
R_{rb}	内齿轮基圆半径	$\tilde{V}_{mj}$	V_{mj} 投影到 rmj 上的等效位移
r_H	行星轮公转半径	$\tilde{V}_{pi}$	V_{pi} 投影到 rpi 上的等效位移
r_L	L 与 Z_{r2} 接触处距旋转中心距离	$\tilde{V}_{r1}$	V_{r1} 投影到 rpi 上的等效位移
r_{f1b}	浮动齿圈 Z_{f1} 分度圆半径	$\tilde{V}_{r2}$	V_{r2} 投影到 rmj 上的等效位移
r_{f2b}	浮动齿圈 Z_{f2} 分度圆半径	$X_{c1}(t)$	差动级齿轮固定坐标系横向位移
rmj	封闭级齿轮内外啮合线	X_{mj}	封闭级内啮合线位移
rpi	差动级齿轮内外啮合线	X_{pi}	差动级内啮合线位移
r_{s1b}	基圆半径	X_{smj}	封闭级外啮合线位移
r_{s2b}	太阳轮 Z_{s2} 的基圆半径		

X_{spi}	差动级外啮合线位移	α_1	差动级行星轮和内齿轮啮合角
$\bar{X}$	广义位移列向量	α_2	差动级太阳轮和行星轮啮合角
$\bar{X}$	无量纲相对位移坐标	α_3	封闭级星轮和内齿轮啮合角
x_1	小齿轮的变位系数	α_4	封闭级太阳轮和星轮啮合角
x_2	大齿轮的变位系数	β	螺旋角
x_H	行星架 H 扭转线位移	β_b	齿轮基圆螺旋角
x_{L_1}	L 与 Z_{f2} 间线位移	β_{pi}	行星轮偏心误差的初相位
x_{f1}	浮动齿圈 Z_{r1} 扭转线位移	β_{r1}	E_{r1} 的初相位
x_{f2}	浮动齿圈 Z_{f2} 扭转线位移	β_{mj}	E_{mj} 的初相位
x_{g1}	中间浮动构件 Z_{g1} 扭转线位移	β_{pi}	E_{pi} 的初相位
x_{g2}	中间浮动构件 Z_{g2} 扭转线位移	β_{s1}	差动级太阳轮相对水平轴初相位
x_{mj}	星轮 Z_{mj} 扭转线位移	β_{smj}	E_{smj} 的初相位
x_{pi}	行星轮 Z_{pi} 扭转线位移	β_{spi}	E_{spi} 的初相位
x_{r1}	内齿轮 Z_{r1} 扭转线位移	β_1	差动级太阳轮水平线与 spi 夹角
x_{r2}	内齿轮 Z_{r2} 扭转线位移	$\hat{\beta}_{r1}$	H_{r1} 与啮合线 rpi 的夹角
x_{s1}	太阳轮 Z_{s1} 线位移	$\hat{\beta}_{s1}$	H_{s1} 与啮合线 spi 的夹角
x_{s2}	太阳轮 Z_{s2} 扭转线位移	γ	Z_{s1} 中心线与啮合线夹角
$Y_{c1}(t)$	差动级齿轮固定坐标系纵向位移	γ_{rs}	内外啮合间的相位差
Y_k	第 k 微齿段上表面半齿宽	Δb	单齿弯曲柔度
Y_{k-1}	第 k 微齿段下表面半齿宽	$\Delta K_{mj}(t)$	Z_{mj} 与 Z_{r2} 间啮合刚度交变分量
Z_{f1}	差动级浮动齿圈	$\Delta K_{pi}(t)$	Z_{pi} 与 Z_{r1} 间啮合刚度交变分量
Z_{f2}	封闭级浮动齿圈	$\Delta K_{smj}(t)$	Z_{s2} 与 Z_{mj} 间啮合刚度交变分量
Z_{g1}	差动级中间浮动构件	$\Delta K_{spi}(t)$	Z_{s1} 与 Z_{pi} 间啮合刚度交变分量
Z_{g2}	封闭级中间浮动构件	Δs	单齿的剪切柔度
Z_{mj}	封闭级星轮及其齿数	ΔT_i	一对齿的柔度
Z_{pi}	差动级行星轮及其齿数	δ_1	A_{r1} 的位置角
Z_{r1}	差动级内齿轮及其齿数	δ_2	A_{s1} 的位置角
Z_{r2}	封闭级内齿轮及其齿数	δ_3	A_{r2} 的位置角
Z_{s1}	差动级太阳轮及其齿数	δ_4	A_{s2} 的位置角
Z_{s2}	封闭级太阳轮及其齿数	δ_{pi}	A_{pi} 的位置角
Z_{v1}	斜齿小齿轮当量齿数	δ_{mj}	A_{mj} 的位置角
Z_{v2}	斜齿大齿轮当量齿数	ε_α	齿轮端面重合度
α	压力角		

ε_{β}	齿轮副轴向重合度	Ω_m	封闭级静力学均载系数
μ	材料泊松比	$\Omega_{mj}(t)$	封闭级 j 个星轮静力学均载系数
ξ_{κ}	轮齿啮合阻尼比	Ω_p	差动级静力学均载系数
τ	无量纲时间	$\Omega_{pi}(t)$	差动级 i 个行星轮静力学均载系数
Φ	行星轮与太阳轮之间啮合相位差	ω	激励频率
Φ_{pi}	E_{pi} 与外啮合线夹角	ω_1	差动级啮合齿频
Φ'_{pi}	E_{pi} 在差动级内啮合线夹角	ω_2	封闭级啮合齿频
Φ_{ri}	E_{ri} 与内啮合线夹角	ω_{H1}	行星架转动角速度
Φ_{si}	E_{si} 与外啮合线夹角	ω_m	封闭级星轮转动角速度
ϕ_{d1}	差动级齿宽系数	ω_n	固有频率
ϕ_{d2}	封闭级齿宽系数	ω_{pH1}	行星轮相对行星架转动角速度
φ	接触角	ω_{r1}	差动级内齿轮转动角速度
φ_i	差动级第 i 个行星轮的初相位	ω_{r1H1}	Z_{r1} 相对行星架转动角速度
φ_j	封闭级第 j 个星轮的初相位	ω_{r2}	封闭级内齿轮转动角速度
φ_{r2}	封闭级内齿轮偏心误差初相位	ω_{s1}	差动级太阳轮转动角速度
φ_{s2}	封闭级太阳轮偏心误差初相位	ω_{s2}	封闭级太阳轮转动角速度
Ω	无量纲激励频率		

第1章 绪 论

1.1 封闭差动人字齿轮传动系统的均载及非线性动力学特性问题

本书研究内容来源于南京航空航天大学与中国船舶重工集团公司第七〇三研究所合作的国防预研项目“功率分流型行星齿轮传动系统均载分析与设计”,同时也是国家自然科学基金资助项目(7150080050)和航空科技创新基金项目(08B52004)的延伸。目的在于对封闭差动人字齿轮传动系统(大型舰船主减速器)的均载和非线性动力学特性进行分析和研究。

齿轮传动是机械传动中最为广泛的一种形式。现代工业机电系统绝大多数都包含齿轮传动装置。由于齿轮传动系统工作时产生的振动是大部分机械的振动和噪声来源,而齿轮传动系统的工作状态极为复杂,不仅载荷工况和动力装置多种多样,会出现由原动机和负载方面引入的外部激励,而且也会出现由时变啮合刚度、齿轮传动误差、齿侧间隙所引起的内部激励。因此,进行齿轮系统的动力学研究,寻求降低齿轮振动的措施,从而提高齿轮传动的动态特性,已成重要的研究课题^[1-7]。

行星齿轮传动、星型齿轮传动是非定轴轮系,在机构学上称为周转轮系。周转轮系利用多个行星轮/星轮来分担载荷,与普通齿轮传动相比,具有体积小、重量轻、结构紧凑、传递功率高、承载能力大等特点。因此,周转轮系传动被人们广泛用来代替普通齿轮传动作为减速、增速和变速机构^[8]。目前周转轮系传动不仅适用于高速大功率,而且在低速大转矩设备上也已推广采用,它几乎适用于一切功率、速度范围和一切工作条件,成为世界各国机械传动发展的重点^[9]。

单自由度星型轮系(封闭级)封闭二自由度差动行星轮系(差动级)的组合传动机构称为封闭差动行星传动系统。该传动系统利用多个行星轮/星轮来分担载荷,形成功率分流,具有体积小、重量轻、承载能力强等优点,在航空发动机主减速器、起重机构和船舶动力传动系统等很多领域得到广泛应用。本书研究的封闭差动行星传动系统采用了人字齿轮,书中称该传动系统为封闭差动人字

齿轮传动系统^[10]。

由于不可避免的制造、安装误差以及构件的变形等因素影响,致使行星轮/星轮的载荷分布是不均匀的。行星轮/星轮的载荷分布的均匀性是发挥封闭差动行星传动优点的前提条件。封闭差动人字齿轮传动系统输入的动力经过差动行星轮系和星型轮系两条路径传递到输出轴,不仅存在行星轮/星轮载荷的分配问题,而且存在差动行星轮系和封闭轮系的功率分流,由于两个轮系存在巨大差别的载荷,载荷在行星轮和星轮的分配呈现不同的特点。本书研究的封闭差动人字齿轮传动系统作为大型舰船主减速器,由于其尺寸大、重量大、载荷大、转速高,各行星轮/星轮能均匀地承担载荷,对于提高传动系统寿命,减小振动有着重要意义。因此研究封闭差动人字齿轮传动系统的均载特性有着重要的工程应用背景。

齿轮传动系统的激励包括内部激励和外部激励。外部激励是系统外部对系统的激励,主要指原动机的主动力矩负载的阻力和阻力矩,本书对外部激励不作研究。内部激励由啮合刚度、各种误差、齿侧间隙等构成,而齿侧间隙对齿轮传动系统的影响是强非线性的,所以齿轮传动系统是一个强非线性系统。在实际齿轮传动系统中,引起灾难性事故的原因常常是系统的异常振动(非工频振动),这种动态行为是无法用线性振动理论解释的^[11]。因此,进行封闭差动人字齿轮传动系统非线性动力学的研究非常重要。

目前对封闭差动行星传动系统的研究,主要为传动系统的动力学载荷特性和自由振动特性^[12-14],对于均载特性及非线性动态特性还没有充分地研究,对于各种误差对系统均载特性的影响还没有完全搞清楚,研究的深度和广度远未达到工程实际的要求,而工程应用迫切要求解决此问题。因此,深入研究封闭差动人字齿轮传动系统均载和非线性动力学特性,对于减小传动系统的振动和噪声,提高寿命和可靠性有着重要的理论和工程应用价值。

1.2 行星齿轮传动系统动力学研究概述

齿轮机构的发明历史久远,公元前三百多年,古希腊哲学家亚里士多德在《机械问题》一书中,阐述了齿轮传递旋转运动的原理。中国古代发明的指南车的核心机构就是齿轮机构。一直到18世纪的欧洲工业革命,齿轮传动的应用才较为普遍。到了20世纪初,渐开线齿轮逐渐确立主导地位。

齿轮传动产生的振动和噪声促使人们进行齿轮传动系统动力学研究。20世纪20年代,齿轮传动系统动力学的系统研究逐渐展开,开始时用单自由度系统研究单对齿轮副的动力学行为,通过理论计算和实验方法来确定轮齿的动载