

学校代号 10731

学 号 142085201006

分 类 号 TB114.3; TH114

密 级 公开



兰州理工大学
LANZHOU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

工程硕士学位论文

基于失效物理相关性的风电齿轮箱 可靠性分析

学位申请人姓名 杨腾飞

培 养 单 位 机电工程学院

导师姓名及职称 安宗文 教授 高建峰 高级工程师

学 科 专 业 机械工程

研 究 方 向 机械系统可靠性

论文提交日期 2017 年 4 月 20 日

学校代号：10731

学 号：142085201006

密 级：公开

兰州理工大学硕士学位论文

基于失效物理相关性的风电齿轮箱 可靠性分析

学位申请人姓名：杨腾飞

导师姓名及职称：安宗文 教授 高建峰 高级工程师

培 养 单 位：机电工程学院

专 业 名 称：机械工程

论文提交日期：2017 年 4 月 20 日

论文答辩日期：2017 年 6 月 8 日

答辩委员会主席：赵荣珍 教授

Reliability Analysis of Wind Turbine Gearbox Base on Physics of
Failure Relativity

by

YANG Tengfei

B.E. (Lanzhou University of Technology) 2014

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Mechanical Engineering

in the

School of Mechanical and Electronical Engineering

Lanzhou University of Technology

Supervisor

Professor An Zongwen

April, 2017

目 录

目 录	I
摘 要	III
Abstract	IV
插图索引	VI
附表索引	VII
符号及缩略语	VIII
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 国内外风电齿轮箱可靠性分析方法的发展现状	2
1.2.2 失效相关问题的研究现状	3
1.3 研究思路及主要内容	5
1.3.1 研究思路	5
1.3.2 研究内容	5
第 2 章 失效物理与机械系统可靠性理论	7
2.1 失效物理的概念	7
2.2 失效物理模型	8
2.3 机械系统可靠性建模理论和方法	12
2.3.1 机械产品可靠性建模的特点	12
2.3.2 独立假设理论	14
2.3.3 完全相关理论	14
2.3.4 简单界限理论及窄界限理论	14
2.3.5 性能退化理论	15
2.3.6 相关系数法	16
2.3.7 考虑应力相关性	17
2.3.8 Monte Carlo 仿真	18
2.4 本章小结	19
第 3 章 考虑失效模式相关的风电齿轮箱可靠性分析	20
3.1 考虑强度退化的失效相关联合分布	21
3.2 风电齿轮箱传动系统可靠性分析	22
3.3 本章小结	25
第 4 章 基于失效物理的风电齿轮箱失效相关机理分析	26

4.1 风电齿轮箱系统失效相关机理分析	26
4.1.1 零部件失效模式间失效相关机理分析	26
4.1.2 风电齿轮箱零部件间失效相关机理分析	29
4.2 本章小结	31
第 5 章 考虑共因失效的风电齿轮箱可靠性分析	33
5.1 风电齿轮箱失效相关故障树模型	33
5.2 风电齿轮箱失效相关可靠性分析	36
5.2.1 一级斜齿轮传动接触疲劳可靠性分析	36
5.2.2 二级斜齿轮传动接触疲劳可靠性分析	37
5.2.3 一级行星齿轮传动接触疲劳可靠性分析	38
5.2.4 风电齿轮箱系统可靠性分析	38
5.3 本章小结	39
第 6 章 结论与展望	40
6.1 全文总结	40
6.2 工作展望	41
参考文献	42
致 谢	46
附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文	47

摘 要

风电机组是风力发电系统的核心设备。齿轮箱作为风电机组的主要传动部分，具有长寿命和高可靠性等技术要求。对于风电齿轮箱而言，失效相关是一种普遍存在的现象，忽略系统失效的相关性，常常会导致过大的误差。齿轮箱的失效相关性主要有两个方面。一方面，齿轮箱中的零部件具有多种失效模式，各失效模式之间存在着失效相关性；另一方面，由于受同一输入转矩的作用，齿轮箱中各零部件之间存在着失效相关性。因此，本文以失效物理的角度从这两个方面出发，基于 1.5MW 水平轴风电齿轮箱的实际设计参数和工况参数，对风电齿轮箱及其零部件的可靠性进行研究。

主要研究结果包含以下三个方面：

(1) 针对齿轮两种失效模式间的失效相关，综合考虑应力相关和强度相关，利用失效物理应力强度模型结合全概率公式建立考虑强度退化的失效相关联合分布。从失效机理和本质上对风电齿轮箱进行可靠性分析。

(2) 通过失效物理应力强度模型，建立考虑强度退化的失效相关联合分布。从失效物理角度阐述了失效相关的实质是强度和应力中共同的随机变量间存在一定的隐性的非线性映射关联性。并对造成这种映射关联性的原因进行了探究。结果表明，引起这种映射关联性的根本原因是强度和应力中相关随机变量的波动性和分散性。

(3) 针对风电齿轮箱零部件间失效相关问题，以风电齿轮箱失效相关机理为依据，得到风电齿轮箱失效相关故障树模型。对风电齿轮箱故障树各失效部分，从失效物理的角度，利用失效物理应力强度模型结合强度退化建立各部分失效相关联合分布，得到共因失效下的风电齿轮箱失效物理可靠性模型。

关键词：风电齿轮箱；可靠性；失效物理；失效相关；联合分布；故障树

Abstract

The wind turbine is the key equipment of wind turbine system. Gearbox as the main transmission part of the wind turbine, with long life and high reliability and other technical requirements. For wind turbine gearbox, the failure-dependence is a common phenomenon, it often leads to excessive error when ignoring system's failure dependency. The failure-dependence existing in the wind turbine gearbox main has two aspects. On the one hand, the components in the gearbox have a variety of failure modes, the failure-dependence exists in between different failure modes; On the other hand, due to being affected by the same input torque, there is a failure-dependence between different components in the gearbox. Therefore, we depend on the two aspects and the 1.5MW horizontal axis wind turbine gearbox to study the reliability of wind turbine gearbox and its parts from the perspective of physics of failure.

The main findings include the following three aspects:

(1) For the failure-dependence between different failure modes of each individual gear in wind turbine gearbox, comprehensive considering the stress-dependence and strength-dependence, combining formula of total probability, establishing the failure-dependence joint distribution of considering strength degradation. Analyzing the reliability of wind turbine gearbox from the failure mechanism and nature.

(2) Use stress-strength model of physics of failure and combine strength degradation to establish the joint distribution of failure-dependence of the failure of parts. Revealing that the essence of failure-dependence is that it has a certain mapping correlation among the common random variables of strength and stress from the perspective of physics of failure. And explores the reasons for the formation of such a mapping correlation. The results show that the main reason for the formation of such a mapping correlation is fluctuation and dispersion of the common random variables of strength and stress.

(3) For failure-dependence between different components in wind turbine gearbox, based on mechanism of failure-dependence of wind turbine gearbox, get the fault tree model of failure-dependence of wind turbine gearbox. For the failure of parts of wind turbine gearbox fault tree, from the perspective of physics of failure, use stress-strength model of physics of failure and combine strength degradation to establish the joint distribution of failure-dependence of the failure of parts, get the reliability model of wind turbine gearbox based on physics of failure under common cause failure.

Keywords: wind turbine gearbox; reliability; physics of failure; failure-dependence; joint distribution; fault tree

插图索引

图 2.1 典型退化模型示意图	9
图 2.2 应力强度的干涉关系示意图.....	10
图 2.3 强度与应力随时间退化趋势示意图	11
图 3.1 风电齿轮箱传动系统结构简图	22
图 4.1 内齿轮失效相关联合分布值与应力随机变量 F_t 分散性之间的关系	28
图 4.2 内齿轮失效相关联合分布值与强度随机变量 HB 分散性之间的关系	28
图 4.3 内齿轮失效相关联合分布值与强度退化随机变量 ΔD 分散性间关系	29
图 4.4 失效相关联合分布的 Monte Carlo 仿真流程图	30
图 4.5 齿轮 4-5 失效相关联合分布与应力随机变量 F_t 分散性之间的关系	30
图 4.6 齿轮 4-5 失效相关联合分布值与强度随机变量 HB 分散性之间的关系	31
图 4.7 齿轮 4-5 失效相关联合分布值与强度退化随机变量 ΔD 分散性间关系	31
图 5.1 风电齿轮箱传动系统结构简图	34
图 5.2 齿轮 4-5 失效相关联合分布值与强度退化随机变量 ΔD 分散性间关系	34
图 5.3 接触疲劳失效相关联合分布值与载荷随机变量 F_t 分散性之间的关系	35
图 5.4 1.5MW 风电齿轮箱系统故障树模型	35

附表索引

表 3.1 风电齿轮箱的几何参数	22
表 3.2 齿轮失效相关随机变量均值及标准差	23
表 3.3 各齿轮切向载荷的均值及标准差	23
表 3.4 齿轮多失效模式的应力参数及其取值	23
表 3.5 齿轮箱传动系统各齿轮可靠度	24

符号及缩略语

C	强度/抗力
$f_c(c)$	强度分布函数
G	功能函数
R	结构可靠度
S	应力
$f_s(s)$	应力分布函数
$\varphi(t)$	标准正态分布概率密度函数
$\Phi^{-1}(\cdot)$	标准正态分布反函数

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

当今社会工业和经济高速发展，能源及能源引起的环境问题是影响人类社会发展和前进的主要障碍，因此清洁能源的发展已成为当下可持续发展的主流。风能是一种典型的清洁能源，它的特征是储能量大、分布较为广泛^[1]。因此，风力发电特别是以风力发电机方式为主的风力发电已在世界各国展开了突飞猛进发展。日前，世界风能协会技术委员会发布《风能 2050：逐步实现 100% 可再生能源供电》报告。目前，世界各国风电产业都在以较快的速度发展。报告预测，到 2050 年全球可实现 100% 可再生能源供电，其中风电占比达 40%^[2]。目前，风电产业继续领跑全球市场，风电产业规模呈现快速稳定的增长，风电产业的结构进一步得到合理的优化，下一个五年，将是我国风电产业提质增效的关键期，其发展重要性不言而喻。然而作为风能发电的核心关键设备风电机组，其设计和制造问题仍是当前推动风电产业不断向前迈进的主要问题。因此，进行风电机组及其核心部件的自主研发及提高其可靠性等方面的研究工作显得尤为重要。

齿轮箱是整个风电机组系统的核心传动部件，其设计、制造及可靠性反映着整机的制造水平。根据科学统计，源于齿轮箱的各种失效占到整个风电系统总的失效的 12%，有些风机的齿轮箱坏损率高达 40%~50%，其中更换率较为严重的甚至约为 90% 左右^[3]。因此，对于风电机组整机而言，研究其传动部分齿轮箱的可靠性具有重要意义。

关于风电齿轮箱系统，失效这种行为彼此相关关系是其失效行为的常见现象，如果不考虑系统零部件失效行为活动之间的相关关系，假定系统各零部件失效时彼此互不影响的情况下对风电齿轮箱系统进行可靠性分析与计算，工程实际偏差在所难免^[4]。齿轮箱的失效相关性主要表现在以下两个方面：(1) 机械零部件有多种失效模式，每种失效模式都会受到自身性能参数和外界载荷的综合影响作用，这就造成了零部件各个失效形式间彼此相互产生影响和干涉作用^[5]。(2) 由于受同一输入转矩作用，齿轮箱系统各零部件在受到外界载荷的同时对于承载力彼此互相分担，任何一部分的零部件的发生失效都会将这部分载荷移加至另外的部分，所以，会造成系统局部零部件的加速失效现象，因此，齿轮箱系统中不同零部件彼此之间的失效发生相互依赖^[6]。

根据失效物理累积损伤模型，风电齿轮箱各零部件失效过程可以看成某些性能参数逐步退化的过程，考虑到工程实际需要，根据具体的失效过程建立相应的性能退化模型使之成为了必要。

由于传统的独立失效假设理论已经不能适应于工程实际，与相关性有关的数学函数模型对相关性的本质描述又过于模糊，简单的舍弃性能退化因素的考虑又有悖于工程实际，因此，从失效物理的角度出发，从失效机理和本质上深入研究风电齿轮箱的失效相关性，并结合性能退化累积损伤模型对其进行可靠性分析，对指导风电齿轮箱的设计及制作和提升风电齿轮箱的可靠性水平和使用寿命具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内外风电齿轮箱可靠性分析方法的发展现状

由于风电产业在世界全球范围内的快速发展，使得风电设备设计制造相关产业呈现出生机勃勃的发展之势，风电机组的核心关键部件风电齿轮箱自然而然受诸多国内和国际学者和研究机构的聚焦和关注。风力发电的需求使得中国风电设备制造业发展迅猛，蔓延之势势不可当^[7]。世界各国风电技术发展的研究重心都转到了风电齿轮箱的研究以及相关工作，风电齿轮箱的设计制造研发等技术也逐渐向高精尖、大功率化、多样化及标准化的方向发展^[8]。然而令人感到遗憾的是，国内范围内设计制造的风机仍然存在着一些质量和可靠性以及设计制造等关键的技术问题有待解决。

可靠性对于风电齿轮箱传动系统是一项重要的质量稳定性指标，生产生活需求和风电产业结构不断地进行调整和发展，风电齿轮箱传动系统结构变得愈来愈复杂。因此，使得风电齿轮箱保持较高的运行稳定性和较高的寿命以及可靠度是我们研究风电齿轮箱可靠性的终极目的^[9]。目前，风电齿轮箱的可靠性研究方法理论中动力学优化分析设计、CAD 仿真技术、专家系统等相关理论方面在一定程度上提高了风电齿轮箱传动系统的运行可靠性。

Qin 根据风电齿轮箱的设计载荷谱及等效负载和压力的循环次数等数据对风电齿轮箱的进行了疲劳可靠性分析^[10]。根据实际随机风载工况，秦大同、邢子坤等建立了包括齿轮和轴承等零部件在内风电齿轮箱系统动力学分析预计模型，并对风电齿轮箱传动系统进行了可靠性分析预计和相关计算^[11]。Li 等基于数学可靠性模型对风电齿轮箱的强度目标和结构可靠性进行了相关优化设计^[12]。结合实际风速工况，陈涛等根据载荷以及强度对风电齿轮箱结构可靠性的影响，对其系统结构进行了优化和可靠性分析^[13]。在对风电齿轮箱系统动态特性分析的基础之上，Wang 等建立了包括轴承在内的齿轮传动系统的有限元分析模型，并且利用有限元的模态分析对 MW 级风电齿轮箱的可靠性进行了相关的验证^[14]。Su 结合齿轮及轴承等零部件运行过程中对齿轮箱系统可靠性的影响，利用 Romax WIND 软件构建了关于齿轮箱传动系统的有限元结构分析模型^[15]。关于风电齿轮箱可靠性的

检测, Niola 引进了一种新的检测方法, 给风电齿轮箱的失效预计和可靠性评估提供了新的途径和方法^[16]。Giger 通过行星齿轮传动机构获取高效的传动扭矩, 从而得到了一个最大的密实度和轻型结构, 改善了风电齿轮箱的结构, 提高了齿轮箱的可靠性^[17]。为了使风电发电机组适应固定的风速, 基于模型的设计方法, Hall 等对变速齿轮箱的相关性能进行了改造和设计, 提高了变速风力发电机在条件限制地区和局限地域的使用适用率^[18]。Sarper 在假设齿轮箱各零部件服从指数分布的前提下对齿轮箱传动系统进行了系统可靠性分析^[19]。平稳载荷下的风电机组系统模型的可靠性往往受到初始设计载荷的影响, Park 根据风电齿轮箱的输入载荷数据对此进行了相关的验证^[20]。在考虑风电齿轮箱各传动零部件等失效的情况下, Rao 和 Muljadi 分别对三级平行轴齿轮箱传动系统的各零部件及系统进行了可靠性分析与计算^[21]。考虑风电齿轮箱零部件的各种失效模式和工作负载情况, Smolders 和 Feng 等根据实际运行工况中风电齿轮箱的各种失效数据得到了多失效模式风电齿轮箱可靠度预计模型^[22]。考虑强度退化并对零部件的失效情况进行统计, Spinato 和 Tavner 建立了基于失效平均数据的风电齿轮箱数据分析及计算统计, 为风电齿轮箱的失效预判提供了新的途径与方法^[23]。Jack 和孙淑霞等综合风电齿轮箱的失效相关情况, 对风电齿轮箱的可靠性设计和机构设计进行了优化^[24-25]。钱松荣将行星齿轮传动的齿轮箱的太阳轮及各个行星轮的体积之和作为结构优化的目标函数, 对其进行了结构优化, 为机械系统结构优化提供了参考^[26]。通过 MASTA 软件对风电齿轮箱各零部件工况的仿真模拟, 然后综合分析其受载及失效损失情况, Zhao 预测出了齿轮箱传动系统机构设计的诸多不足之处, 对整个风电齿轮箱传动系统结构进行了相关优化^[27-28]。

尽管上述分别从不同角度对于风电齿轮箱的可靠性进行了不同程度的研究工作, 得出了若干理论方法, 并给出了一些相关的理论结论, 但仍存在若干不足之处:

(1) 上述文献在对风电齿轮箱可靠性研究分析和设计优化过程中忽略了性能退化对风电齿轮箱可靠性的影响, 偏离工程实际易产生误差。

(2) 现有的文献并没有较好的去阐述失效相关性对风电齿轮箱可靠性的影响, 在考虑风电齿轮箱系统失效相关时, 多采用数学模型, 且往往采用线性相关的粗糙处理, 既不能够真实的体现风电齿轮箱系统的相关结构关系, 也没有反映风电齿轮箱失效相关的本质机理和引起失效相关的相关原因, 对于风电齿轮箱失效相关性的描述比较模糊。

1.2.2 失效相关问题的研究现状

对于机械系统的失效相关性, 许多国内外学者进行了大量的、比较深入的研究工作, 并提出了许多数学及参数模型, 主要有基本 (BP) 参数模型^[29]、 β 因子

模型^[30]、多希腊字母模型 (MGL)^[31]、可靠性随机分析模型^[32]、概率冲击随机模型^[33]等。零部件失效的已知数据在很大程度上决定了零部件的失效概率,这是 (BP) 参数模型的基本核心特征,但是零部件的失效数据通常很难获得,所以在通过失效数据求解各零部件失效概率的时候,由于失效数据的不完整性,该模型的应用就会给系统可靠性分析计算造成较大的错误及误差^[34]。在对系统进行可靠性评估概率预计的过程中,多希腊字母参数模型 (MGL) 是进行系统结构优化时应用较为广泛的模型^[35]。考虑结构和系统的失效行为的特点以及对应的失效数据,黄祥瑞在早期将失效相关的方法及模型引进了到国内可靠性研究领域^[36]。考虑机械系统的失效混合信息,张鹏等利用可靠性预测的方法和相关理论,继而对串联机械系统的失效相关问题进行了相关的可靠性分析和研究^[37]。在失效相关的影响下,Jose 将系统可靠度进行重新布置,利用不同调整方法对失效相关下的不可修复机械系统进行了相关的可靠度分析和计算^[38]。考虑共因失效对多状态系统的影响,Li 在系统结构优化过程中引进广义生成函数,在多状态系统结构优化的过程中给出了新的方法与思路^[39]。考虑机械系统零部件多失效模式失效相关这一因素,何成铭利用系统结构界限理论对机械系统结构可靠度的上下界限值的优化问题进行了相关的探究,并且对整个机械系统的可靠性进行了系统地分析^[40]。

上述文献提出了许多关于系统内部各结构相关的建模方法,可是多数都是用线性的数学关系来表述各个变量之间的逻辑关系,然而系统结构中各相关变量之间的非线性关系并没有在模型中具体得以体现。对于这样的局限缺陷,韩文钦等将 Copula 数学模型及相关理论结合可靠性理论基础对系统可靠性进行分析研究,得到了相关的系统可靠性模型,为机械系统的可靠性建模提供了新的思路方法和切入点^[41]。为了说明工程实际中系统结构中各零部件之间明显存在的失效相关性,张明珠利用 Copula 数学函数分别对于系统结构完全相关和系统结构完全独立这两种情况下的系统结构各零部件之间的失效相关性进行了相关研究,并对系统结构可靠度进行了相关的计算及系统分析^[42]。易文德等把数学 Copula 函数运用在系统可靠性分析之中,以此来解决机械系统零部件的寿命相关问题,利用 Copula 函数与机械系统可靠度之间的函数关系,以此建立寿命相关的系统可靠性模型,说明了机械系统零部件间的寿命相关关系在机械系统可靠可靠性分析中的的重要影响作用^[43]。对于具有多失效模式的机械零部件失效相关问题,唐家银结合 Copula 函数模型建立了新的失效相关可靠度模型,并将其应用在了机械系统可靠性分析和计算之中^[44]。孙永波将 Copula 连接函数运用到了可靠性建模中来,建立了体现机械系统零部件间相关关系的可靠性模型^[45]。王正考虑失效相关性结合泊松过程构建出了机械系统动态可靠性模型^[46]。谢里阳提出了很多种失效相关可靠性分析和计算模型^[47]。

上述文献在一定程度上对失效相关性进行了直观的数学描述,并考虑了相关变量的非线性相关性,从数学角度上使对失效相关性的描述更迈进了一步。Copula 这一连接函数作为描述失效相关性的一种数学工具,显示出了其有力性和灵活性。但对于复杂的机械系统失效相关性分析,其本质上是根据数学模型的特点对于黑箱结构关系进行随机的嵌套,虽有较为严谨的数学相关理论作为支撑,但缺乏确定的对应的物理意义,无法反应数学关系与失效本质联系的逻辑映射,无论是混合还是嵌套,无论是零件级的失效模式间失效相关还是系统级的零部件间失效相关,均难以从失效机理上反应失效的本质。

对于机械零部件性能退化,赵建印根据性能退化数据给出了对应的可靠性分析建模方法^[48]。每一种基于失效物理的性能退化模型都是针对于特定的失效产品以及对应的失效模式过程,模型较强的针对性使得我们很难对失效物理性能退化过程给出统一的描述,对于这种特定的局限性,刘强以失效物理的角度和观点为出发点,提出了一种统一化的性能退化模型^[49]。

基于上述分析,本课题以失效物理的角度从失效相关的本质和机理出发,针对风电齿轮箱零件级的失效模式之间的失效相关和系统级的零部件间的失效相关这两种失效相关性问题的,以失效物理应力强度模型为基础,结合失效物理累积损伤模型,建立考虑性能退化的失效相关联合分布,结合故障树逻辑分析从而对风电齿轮箱进行可靠性分析。

1.3 研究思路及主要内容

1.3.1 研究思路

本文的研究体系为两个层面:考虑风电齿轮箱零部件(齿轮)失效模式间失效相关的系统可靠性分析和在共因失效条件下以整个齿轮箱系统为研究对象的考虑整个系统失效相关的可靠性分析。

从以上两个不同的层面入手,本文的研究思路是:以 1.5MW 水平轴风电齿轮箱为研究对象。首先,针对单个零部件(齿轮),从失效物理的角度,考虑其性能退化,建立多失效模式相关的齿轮可靠性模型,进而对风电齿轮箱进行可靠性分析。然后,对风电齿轮箱失效相关的本质机理和引起失效相关的原因进行探究。最后,在此基础上,针对风电齿轮箱零部件间失效相关问题,从失效物理的角度,建立共因失效下的风电齿轮箱系统失效相关故障树模型,从而对整个风电齿轮箱系统进行可靠性分析。

1.3.2 研究内容

在上述研究体系中,本文的研究内容主要包括以下三个部分:

(1) 考虑失效模式相关的风电齿轮箱可靠性分析

由于风电齿轮箱关键零部件齿轮具有多种失效模式，各失效模式间普遍存在失效相关现象，在风电齿轮箱可靠性分析中具有重要的影响作用。因此，本文从失效物理的角度，针对齿轮两种失效模式间的失效相关问题，综合应力相关和强度相关，结合强度退化，建立失效模式相关的齿轮可靠性模型，然后对齿轮箱系统进行可靠性分析。

(2) 基于失效物理的风电齿轮箱失效相关机理分析

机械系统具有普遍失效相关的特征。由于机械零部件自身各个失效模式间和机械系统零部件间均存在失效相关的现象。因此，为了探究风电齿轮箱失效相关的本质机理和引起失效相关的原因，本文通过失效物理应力强度模型，建立考虑强度退化的失效相关联合分布，从失效物理角度对其进行量化的探究。

(3) 考虑共因失效的风电齿轮箱可靠性分析

针对于风电齿轮箱零部件间失效相关问题，以风电齿轮箱的失效机理为依据，建立风电齿轮箱失效相关故障树模型，对于风电齿轮箱故障树中各失效部分，从失效物理的角度，利用失效物理应力强度模型，结合强度退化，建立各失效部分的失效相关联合分布，得到共因失效下的风电齿轮箱失效物理可靠性模型。

第 2 章 失效物理与机械系统可靠性理论

近年来,机械产品质量及可靠性都得到了很大幅度的提升,从简单的数据数学统计分析到当下基于物理层次失效本质和机理分析,可靠性分析也随之得到了进阶式的发展。借助获取的与失效本质相关的性能退化数据来建立对应的可靠性模型,并在此基础上进行可靠性分析。基于失效物理及性能退化的可靠性技术已经发展为包含各个基础学科的综合学科。基于失效物理及性能退化的可靠性技术主要以性能退化可靠性理论为基础,以此揭示机械产品零件或材料的失效本质和机理,并以此为依据对机械系统可靠性进行分析和可靠性预计判断。

利用失效物理的方法获得产品的失效信息及失效机理,为基于性能退化的机械系统可靠性建模提供原始的数据支撑,从而保证了建模的准确性和可靠性。运用模型进行可靠性分析和预计之后还可以反过来对系统结构优化和可靠性设计提供理论参考。由于可靠性试验数据不足而常常导致可靠性精度低的问题,根据分析结果结合相关数学模型对机械产品的可靠性进行分析,然后再根据分析结论对机械产品及机械系统的设计和结构优化进行改进。如此,可靠性相关指标就被融到了机械产品的可靠性设计之中了。

与失效物理相关的可靠性建模预计技术是一种结合数学和统计学的分析方法并从物理角度分析产品质量退化演变过程和产品失效变化规律的可靠性设计技术。在此基础上,再根据获取的有效信息及数据,就可以相对精准地探究出机械产品失效机理或失效发生的本质原因。机械可靠性建模的发展方向和难点是基于失效物理如何使产品特性及设计参数等设计因素都能够在机械可靠性模型中得以体现。要想得到准确性较高的机械可靠性模型,建立模型时就需要考虑尽可能多的尽可能全面的因素。与此同时,以此建立的机械可靠性模型也可以反过来为机械产品的可靠性设计和改进提供相关的设计依据。因此,基于失效物理的机械系统可靠性建模技术具有重要的研究意义。

2.1 失效物理的概念

失效物理(Physics of Failure, PoF)的概念最初出现于上世纪 50 年代末期,是研究产品在各种应力下发生失效的内在原因及其机理的科学,又称为可靠性物理。关于可靠性特别是电子可靠性工程,因为引起美国政府的关注而在在上世纪 60 年代初期得到快速蓬勃发展,因此,失效物理技术最早形成和发展于电子产品及元器件的可靠性研究,并在电子元器件的失效机理分析中广泛应用。

根据原始的失效数据和失效信息进行综合分析,寻找失效相关信息与零部件

各数学参数的逻辑关系，依此建立可靠度与各参数间关系的数学模型。鉴于失效物理与产品的失效行为密切相关，而在对产品及系统进行可靠性分析时又不可避免的要进行失效分析，所以失效物理和可靠性有着密不可分的关系。

到目前为止，相关可靠性研究工作者运用失效物理技术建立了很多失效物理模型，这些模型揭示了机械产品和电子元器件的性能退化和失效过程，在模型的建立过程中综合考虑了损伤及应力过载等影响产品可靠性的相关因素，这些模型可以综合运用于分析机械系统和电子部件可靠性分析及可靠性设计预计。产品为实现特定的功能将各元器件按照一定的结构关系进行组成，错误的组成关系往往会存在一定程度的缺陷，基于此陈云霞等人利用失效物理技术综合权衡电子电路的构成关系建立了电子可靠性预计模型并对航空机电产品的电子电路进行了可靠性分析计算^[50]。

除了从计量数理统计学角度计算失效率之外，实际上，关于对失效现象的分析，还可以将试验数据实际验证与数理统计的方法结合起来来研究失效原因及失效机理，基于失效本质原因进行可靠性设计改善，从而改善产品的质量和可靠性水平。基于失效物理的性能可靠性技术综合考虑产品性能退化因素及退化轨迹，依据原始失效数据及试验分析结果并以此进行可靠性预计判断、可靠性设计改进、可靠性综合分析等等。其最终目的在于得到产品失效的本质机理，以此为依据尽可能改进产品结构降低产品失效概率，从而提高产品的质量及可靠性水平。

2.2 失效物理模型

失效物理分析主要是考虑外加载荷对产品的作用后产品的性能变化情况，从产品构成中运用失效物理的观点，在应力与产品性能间建立相关对应的逻辑关系。通常情况下，产品受到载荷都较为稳定，在不考虑载荷突变和载荷冲击的情况下，确定载荷一般可以看作是一个定值，然而随着服役时间的增长，表征产品性能特征的某些随机参数会随时间的变化而发生变化，也就是所谓的性能退化，其退化轨迹和趋势各不相同也不确定。随着服役时间的推进，当产品性能特征参数的退化量超过特定的阈值时产品就会发生失效。因为产品性能退化的过程较为复杂和隐蔽，往往需要根据大量的失效实验和失效数据再加以分析才能得到其失效的本质原因和失效机理。然后依据失效物理分析的结果，建立产品外载荷产生的应力和表征产品性能特征参数两者之间的逻辑关系和数学模型，然后以此建立特定工况下的失效物理可靠性模型。失效物理模型主要由基于物理化学模型的产品性能退化模型和描述产品失效行为的物理化学模型组成，因此，得到失效物理模型需要综合运用物理、化学和数理统计等方面的方法和理论。

产品失效的原因有很多种，产品材料缺陷、产品结构设计优化错误、外在工

况恶劣等都是产品失效的主要原因。然而产品失效行为的内在材料的物理性或化学性是体现产品失效的本质原因和失效机理的直观反映。从产品的失效数据和失效行为来确定导致产品失效的内在本质原因及机理是失效物理可靠性分析的主要内容。

从产品失效的行为和失效数据出发，运用失效物理的观点去分析解释失效原因和失效机理，进而给产品可靠性分析提供相关的理论支持。这必须基于一定的失效物理模型。比较典型的模型有以下几种。

(1) 反应论模型

有些产品的失效是因为其组件或材料中的组成物质发生微观的物理或化学变化，导致产品内部其组件或材料发生了一些物理和化学变化等失效行为。产品内部结构和材料的性能发生了质的变化，这就使得产品的综合性能发生了退化，随着服役时间的推移，当产品性能低于某一特定阈值时就会失去该产品或该结构特有的功能，即发生失效。

假设可表征产品的性能的特征参数 η 和产品的性能之间有函数关系 $D=g(\eta)$ 。一般而言，表征产品性能的特征参数会随服役时间的变化而发生变化，因此产品性能也会随时间而变化。假设在 t 时间的特征参数为 $\eta=\eta(t)$ ，得到产品性能的时间关系式

$$D=g(\eta)=f(t) \quad (2.1)$$

这一退化趋势称为退化模型。图 2.1 为典型退化模型示意图。

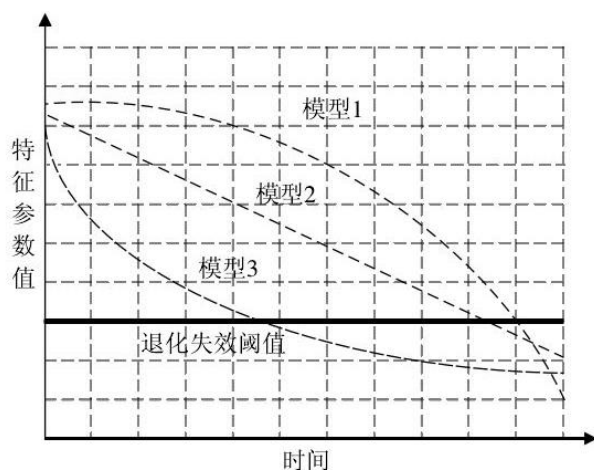


图 2.1 典型退化模型示意图

(2) 应力强度模型

机械系统由于受到外界载荷的作用，系统内部的结构会使其中零部件所受到的载荷放大，随之在机械零部件的内部产生应力。机械零部件受到的外界载荷而产生的应力与零部件强度间存在一定程度的相关关系。机械系统或机械零部件可靠性分析的主要内容就是权衡应力与强度之间的关系，避免其发生干涉产生失效

相关现象。通常情况下，机械系统中零部件所受的应力和零部件所具有强度都是随机的，所以，机械系统零部件的应力和强度通常用概率函数来表示说明。当零部件的强度 C 低于所受应力时，机械系统或零部件就会丧失特定既定的功能，即发生失效。这就是我们所说的应力强度模型。图 2.2 为应力强度的干涉关系示意图。

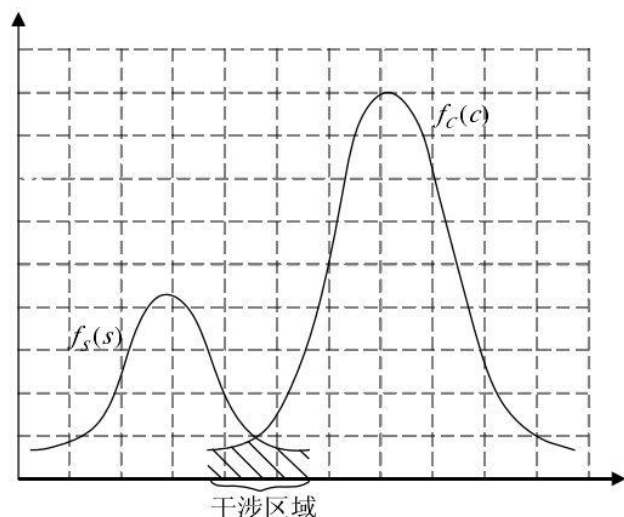


图 2.2 应力强度的干涉关系示意图

假设应力的分布为 $f_s(s)$ ，强度的分布为 $f_c(c)$ ，当两者发生干涉时认为产品失效，其失效概率为

$$\begin{aligned}
 F &= P\{C < S\} \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} f_c(c) \left[\int_c^{\infty} f_s(s) ds \right] dc
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

在应力强度干涉模型当中，认为系统的强度随时间发生退化，在此退化过程中，退化的发生可能由于疲劳、腐蚀、老化等原因造成。这类退化模型通常用来描述暴露在应力载荷当中的系统。当系统的环境载荷超过系统自身的强度时，系统失效，此建模过程一般认为系统的载荷与强度是相互独立的，载荷与强度均为随机变量。一些研究者分别假设系统的强度退化为确定的线性退化过程、随机增量过程来描述强度退化过程。此外，也有些学者认为系统的强度退化服从 Gamma 过程，冲击载荷服从 Poisson 过程，从而建立了产品的可靠性模型。

通常情况下，机械系统的可靠性分析和预计都可以用到应力强度模型。机械产品在最初服役时应力与强度间往往会留有充分的预留安全裕度，随着服役时间的推移机械产品的性能强度会逐渐的发生退化，最终导致强度和应力之间发生了干涉现象。当强度低于应力时机械产品就会发生失效，如图 2.3 所示。因此，应力强度模型和性能退化模型在实质上是同种失效模型。

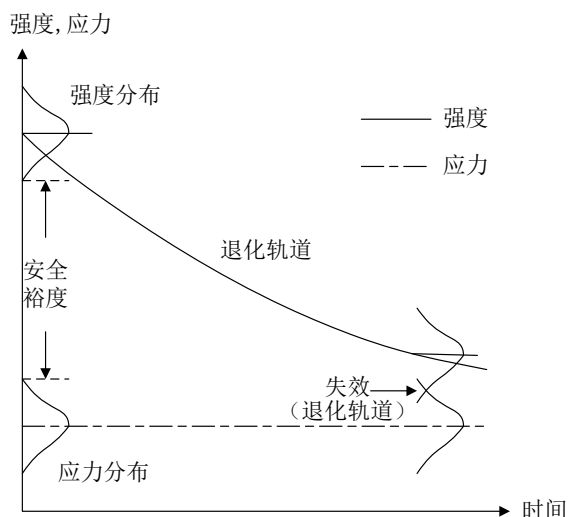


图 2.3 强度与应力随时间退化趋势示意图

(3) 累积损伤模型

机械产品受到外界载荷时内部材料就会产生损伤，性能就会发生退化，随着服役时间的变化，内部损伤和性能退化就会不断产生累积；当机械产品受到的外载荷而损失积累到一定程度超过产品强度的失效阈值以后即产品发生失效。

假设产品特征参数 η 只取决于退化速率 k 和退化时间 t 的乘积，而与外在机械载荷的加载方式无关。当 kt 值一定时，其退化量也一定。因而，像步进应力试验之类，其施加应力随时间改变，其特征参数退化量取决于 kt 的一次累积和 $\sum k_i t_i$ 或

积分值 $\int k(t)dt$ ，这称为累积退化率模型

$$\sum k_i t_i = f(\eta_T) \quad (2.3)$$

当机械产品受到的外载荷而损失积累到一定程度超过产品强度的失效阈值以后即产品发生失效。所以，累积损伤模型实际上也是性能退化模型的一种。

由此累积损伤模型可知，机械产品的失效往往体现在其代表自身性能特征的性能参数随时间的退化过程，由于各性能参数退化过程中呈现一定的随机性，所以，往往借助某些随机过程来描述性能退化。利用原始的失效数据和失效物理实验数据结合性能退化模型和累积损伤理论建立机械产品性能退化可靠性模型，然后借助此模型进行机械系统可靠性设计预计和可靠性分析，这就是失效物理和性能退化可靠性理论的核心思想内容。

2.3 机械系统可靠性建模理论和方法

随着制造业的不断前进和发展,机械制造业随着机械学科的不断成熟积累造成机械产品不断更代,高精尖类型的大型机械设备不断涌现,因而机械产品可靠性问题也随之变得越来越复杂。交叉学科的综合可靠性分析方法逐渐成为了主流。由于电子产品的可靠性起步较早,所以其可靠性技术的发展体系相对于较为完整和成熟,相比之下,由于机械系统自身结构的复杂再加上结构组成的多样性使得其可靠性发展过程中存在很多的障碍和局限,发展相对落后。随着工业生产和生产生活对机械产品的质量和可靠性需求的逐步提高,人们对于机械产品的可靠性相关问题投入了越来越多的研究与关注,特别是大型机械设备和精密机械仪器等,因此,机械系统可靠性的研究就显得越来越重要。

可靠性(Reliability)是产品(系统或零部件)所具有的与时间有关的质量指标,是产品在规定的条件下以及规定的时间内能够完成规定功能的能力;可靠度则是产品在这些条件下完成既定功能的概率。由上世纪 50 年代的电子产品可靠性问题出发,可靠性基本理论、方法以及模型得到了发展。1947 年提出了著名的在机械工程方面应用的应力-强度干涉模型,该模型为机械产品可靠性设计奠定了基础。到目前为止,此模型仍然广泛地应用于机械产品的可靠性设计。

时至今日,在国内外学术界和工程界的共同努力下,可靠性理论与方法及其在工程中的应用取得了重要进展。可靠性理论已从起初仅对电子元器件的单项研究,演变为对产品(或系统)生命周期内各个环节的系统性研究,内容涵盖了可靠性、维修保障性、可用性和安全性等各个方面。

为了实现既定的功能,各个机械零部件之间按照一定的结构组合在一起构成一个同一的整体,即机械系统。所以机械系统的可靠度通常体现在以下两个层面:

(1) 零件级层面,即机械零部件的可靠度,即组成机械系统结构的各零部件可靠度。机械系统中的零部件通常有多种失效模式,然后再下分到失效模式层面。

(2) 系统级层面,机械系统由各个不同零部件按照不同的结合方式组合在一起构成系统,系统不同的构成方式决定不同的失效相关情况,从而决定不同的系统可靠度。

依据机械零部件的可靠性模型,然后再按照既定的组成方式将其组合在一起,从而建立机械系统可靠性模型。在考虑系统失效相关时不但要考虑系统级层面的失效相关还要零件级层面各失效模式间的相关情况。

2.3.1 机械产品可靠性建模的特点

各零部件为了统一实现某一特定功能而按照特定的结构形式协同的组合在一起形成的系统称为机械系统。机械系统中的各零部件不但要各自发挥各自的功能

作用，而且彼此之间还要产生一定的相互作用。构成系统的各组成单元自身的可靠性和各单元间的组合方式以及各组成单元之间的相互关系都是影响系统的可靠性的主要因素。由于机械产品及机械系统构成形式相对比较多，所以，机械系统的可靠性设计和可靠性评估及可靠性分析都比电子产品较为繁琐，因此，那些电子系统可靠性模型应用在机械系统可靠性预计之中往往就会产生较大的工程误差。机械产品的可靠性具有如下特点：

(1) 在对机械系统进行可靠性进行分析时，由于机械产品本身的复杂性，机械系统的各零部件中很多都要特定加工并进行优化设计，很难得到统一的失效数据加以利用，这就要求我们先设计后实验验证而后再不断地改进。

(2) 机械零件的加工过程中常常受到加工工艺、加工设备操作等外因的影响，导致零部件结合时产生装配误差，零部件本身的失效率也会攀升。这种因素导致的失效没有原始数据可以利用，更无法进行相关可靠性分析和预计。

(3) 在实际工况下运行的机械产品，外在环境因素和环境条件的影响通常会导致机械产品其失效模式失效变化转移，不同失效模式发生失效的概率存在很大的不确定性，再加上零部件各失效模式之间还存在着失效相关性，所以，这类复杂情况根本无法用某种特定的数学函数模型进行描述。

(4) 一些结构组成复杂的机械产品，所受外载荷而产生的应力对产品可靠性的影响比周围环境因素对产品可靠性的影响要更为严重，这种失效实际工况下的可靠性实验很难进行，失效数据也很难获得。所以，基于此进行的可靠性试验得到的可靠性指标相对于真实可靠性之间的误差太大，对于可靠性预计分析没有参考价值。

(5) 不同于简单失效形式的电子产品，机械产品的失效模式的多样性决定了自身失效形式的复杂性，因此，近似认为其失效数据为指数分布是不科学的。

(6) 机械产品主要的失效机理为疲劳、腐蚀、磨损、开裂、变形，通常都近似遵循累积损伤模型。产品的设计、加工、工况、工作环境是与其失效相关的主要因素，其失效机理是往往是诸多因素的综合作用，根本无法简单的定量或定性进行描述。

(7) 机械系统的失效与各个零部件的结构连接和环境工况以及工况维护等有关等因素相关。系统出现故障通常来自于系统零部件构成的运行错乱故障。所以，机械系统可靠性与零件级的失效和系统级的失效都密切相关。电子可靠性理论虽然相对比较成熟，但是机械系统的多样性和复杂性是远非电子产品所能比拟的，本质上存在很大的差别，因此，机械系统的可靠性研究需要针对于特定的具体对象或系统分门别类的加以区分并进行深入的研究。

2.3.2 独立假设理论

假设机械零部件具有 n 种失效模式或联结形式为串联形式的机械系统有 n 个零件, R_i 是某机械零部件第 i 种失效模式下或串联机械系统第 i 个机械零部件的可靠度, 在不考虑失效模式间或系统零部件间失效相关的情况下, 则机械零件或机械系统的可靠度如公式(2.4)所示:

$$R_C = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.4)$$

式中, R_C 为零件或机械系统的预计可靠度。此理论的主要特点: 模型简单明了, 便于求解计算, 但模型的局限性在于只适合于零部件各个失效模式间或机械系统各个零部件间失效完全相互独立的工程情况。

2.3.3 完全相关理论

假设机械零部件中自身的各个失效模式间或机械系统中各个零部件间的失效与否都是完全相关的情况下, 则零件或机械系统的可靠度如公式(2.5)所示:

$$R_C = R_{i(\min)} = \min(R_1, R_2, \dots, R_n) \quad (2.5)$$

式中, R_C 为零件或机械系统的预计可靠度。如果机械零部件自身各个失效模式间完全相关, 则首先求出零部件自身各个失效模式下的可靠度值 R_i , 然后从中找出零部件各失效模式下的可靠度的最小值, 那么此时零部件的可靠度就等于这些可靠度的最小值。如果机械系统中组成系统的各个零部件间失效与否完全相关, 则首先求出机械系统中各个零部件的可靠度值 R_i , 然后从中找出各个零部件可靠度中这些可靠度的最小值, 那么机械系统的可靠度就等于这些可靠度的最小值。

2.3.4 简单界限理论及窄界限理论

通常情况下, 机械系统和机械零部件在实际工况下运行的过程中, 机械零部件自身各个失效模式间的失效与否或机械系统中各个零部件间的失效与否并非是绝对的。基于此, cornell 给出了一种界限范围界定理论, 首先利用传统的独立假设理论计算出完全独立时的零部件或机械系统可靠度的最小值 R_{\min} , 然后在根据完全相关理论计算出完全相关时的零部件或机械系统可靠度的最大值 R_{\max} , 那么, 工程实际中零部件或机械系统的可靠度 R_C 值往往介于这二个界限之间, 如公式(2.6)所示:

$$\prod_{i=1}^n R_i < R_C < R_{i(\min)} \quad (2.6)$$

简单界限理论的优点是: 对于实际工况运行下的机械零部件或机械系统, 简单界限理论给出了其可靠度的界定范围, 如果基于这样一个既定界限范围考虑机

械零部件失效模式间或机械系统零部件间的失效相关的话是较为准确的,对于工程实际可靠性分析和预计具有重要的研究意义和参考价值,另外,计算简单,应用方便。但是简单界限理论的局限性是:由于简单界限理论只提供一个大致可靠度范围,对于一些要求精度较高的机械零部件或机械系统可靠度分析而言,只能参考其可靠度边界,其可靠度分析与预计具有一定程度的局限性。同时,随着机械零部件失效模式的增多和机械系统零部件组成结构的复杂程度的增加,简单界限理论的边界值越来越宽,其工程参考价值也随之越来越低。

虽然窄界限理论中的二阶理论相对于一阶宽泛界限理论对失效概率的预计范围更加狭窄,在精度要求较高时有一定的应用优势。但同时也存在很多的局限性:求解过程比较繁琐,需要借助计算机设备进行求解,当失效相关的失效模式的个数超过 6 时,失效相关的求解过程就变得十分缓慢繁琐,如果对于多失效模式相关并且机械系统的零部件构成相对复杂的系统来说,往往无法进行求解计算。即使可以计算,其计算结果也是一个范围界限,精确程度并不高。

2.3.5 性能退化理论

产品从投入使用到最终功能丧失,在此过程中,由于受到多种因素的影响,产品的性能会发生退化。但是在此失效过程中,影响其失效的因素是多种多样的,可以将这些影响因素大致分为内部因素和外部偶发性因素。内部因素包括产品的磨损、腐蚀、疲劳、老化等;外部偶发性因素包括冲击、应力、负荷等。一般意义上,将由于内部因素造成的退化过程称为性能退化过程。

退化失效过程由连续退化和突增退化组成,突增退化即是冲击所造成的损伤。在动态的工作环境下,产品受到外界随机因素的影响,因而退化过程是随机的。连续退化通常用随机过程来描述,并且被认为是一个马尔可夫过程,即产品未来的状态取决于当前的状况,与之前的状态独立。对于退化过程的建模,通常有两类马尔可夫过程,其一是有限可数状态空间的离散时间马尔可夫过程,其二是具有独立增量的连续时间马尔可夫过程,如带有漂移特性的布朗运动、混合 Poisson 过程以及 Gamma 过程等。

产品在性能退化过程中,其随机性是描述性能退化过程中最难解决的问题。有些学者利用概率论来描述性能退化,通过给定的失效率函数或数据拟合,进而得到可靠度函数。该方法简单有效,已广泛应用于工程实际之中。然而,该方法并不能体现产品在退化过程中的随机性。随着随机过程理论不断发展,人们逐渐开始采用随机过程来描述产品的性能退化,并成了当前的一个研究热点。

造成产品退化的原因是多样的,对于磨损、腐蚀、裂纹增长和老化等退化机制,其退化路径一般不同。性能退化通常包括随机过程与冲击导致的突增退化量,其中的随机过程可用 Wiener 过程加以描述。对于产品的性能退化数据随时间的增

长差异增大的现象，Wiener 过程描述这一现象具有明显优势。由于 Wiener 过程具有独立增量的马尔可夫性，以及求解相对方便等特点，因此，Wiener 随机过程广泛应用于性能退化分析。

对于高可靠性、长寿命的产品来说，其失效数据的观测量有时是很难获取的，也就是说当失效数据很少或者无失效数时，基于退化建模的可靠性分析便成为一种有效的可靠性分析方法。将产品性能参数逐渐退化到一个临界阈值产生的失效定义为退化型失效。退化建模是基于失效机理退化轨迹的概率建模。

从可靠性分析的角度来看，通常将退化模型划为三类，即退化-阈值(degradation-threshold, DT)模型、退化-冲击(degradation-shock, DS)模型和退化阈值冲击(degradation-threshold-shock, DTS)模型。DT 模型是指产品的失效仅仅是由于其自身的性能退化过程造成的，在此建模过程中，不考虑其他外界因素的影响。也就是说，只要产品自身的性能退化量（如机械零件的磨损量，产品材料的老化等）达到某一阈值，产品即发生失效。DS 模型是指系统的失效是由于外部偶发性因素（如冲击、应力等）造成的，即只要产品的冲击载荷达到某一设定的失效阈值时，产品就会发生失效。而 DTS 模型则考虑的产品失效的两方面的因素，即在产品的实际使用过程中，既包含自身的性能退化过程，又会受到外部冲击过程影响，产品的失效是有两方面因素共同造成的。DT 模型认为，当产品的退化量超过了其临界失效阈值，产品将会发生失效，产品首次到达此水平的水平的时间称为首次通过时间。

在传统意义上，对可靠性进行分析时，通常使用现场数据或者加速退化数据来进行分析。但是，产品的可靠性越来越高，并且需要进行可靠性评估的产品在增加，因此在一个较为合理的时间范围内获得足够的失效数据通常是困难并且昂贵的。在这种情况下，使用退化模型方法来进行产品的可靠性分析就成为一个重要可行的方案。产品退化机理可以用一个或多个随机的退化过程来描述，而这些过程通常受到环境条件（如运行环境、操作过程）的影响。随着产品运行时间的增加，其自身性能不停发生退化，其可靠性也在不断降低。在工程领域当中产品的性能退化过程，这些性能退化过程通常主要包括磨损、腐蚀、疲劳、氧化、老化等内部退化过程。在产品的运行过程当中，产品的失效不是由一种退化模式造成的，在其失效过程当中，通常具有多个性能退化过程。并且在产品的失效过程当中，这些性能退化过程往往具有一定的相关性，产品最终的失效是由于累积的破坏量导致的。此外基于工程领域的研究成果，退化模型也广泛应用于钢铁、高速铁路、桥梁等领域。

2.3.6 相关系数法

在认识相关问题之初时，传统的分析方法是相关系数法。假设一个零件有两

种失效模式或一个系统有两个零件 A 和 B，对应的可靠度分别为 R_1 和 R_2 ，定义两失效模式或两个零件的可靠性指数分别如公式(2.7)、(2.8)所示：

$$\beta_1 = \Phi^{-1}(R_1) \quad (2.7)$$

$$\beta_2 = \Phi^{-1}(R_2) \quad (2.8)$$

式中， $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布反函数。

零件或系统的综合可靠性指数如公式(2.9)所示：

$$\beta = -\Phi^{-1}[1 - \Phi(\beta_1) \cdot \Phi(\beta_2)] \quad (2.9)$$

从而零件或系统的可靠性计算模型如公式(2.10)所示：

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\Phi \left(\frac{\beta + \sqrt{\rho}t}{\sqrt{1+\rho}} \right) \right]^2 \varphi(t) dt \quad (2.10)$$

上式中，当 $\beta_1 = \beta_2$ 时 $\beta = \beta_1 = \beta_2$ ； ρ 是两个失效模式或两个零件 A 和 B 之间的相关系数。 $\varphi(t)$ 是标准正态分布概率密度函数。

定义 G_1 和 G_2 分别如公式(2.11)、(2.12)所示：

$$G_1 = \sum_{j=1}^n A_{1j} \delta_j + \sum_{i=1}^m B_{1i} S_i \quad (2.11)$$

$$G_2 = \sum_{j=1}^n A_{2j} \delta_j + \sum_{i=1}^m B_{2i} S_i \quad (2.12)$$

上式中， δ_j 为第 j 个强度随机变量， S_i 为第 i 个应力随机变量； A_{1j} 、 A_{2j} 、 B_{1i} 、 B_{2i} 为线性组合系数。

G_1 和 G_2 的相关系数如公式(2.13)所示：

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{COV(G_1, G_2)}{\sqrt{D(G_1) \cdot D(G_2)}} = \frac{E(G_1 \cdot G_2) - E(G_1)E(G_2)}{\sigma_{G_1} \cdot \sigma_{G_2}} \\ &= \frac{\left(\sum_{j=1}^n A_{1j} A_{2j} \sigma_{\delta_j}^2 + \sum_{i=1}^m B_{1i} B_{2i} \sigma_{S_i}^2 \right)}{\sigma_{G_1} \cdot \sigma_{G_2}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

上式中 δ_{δ_j} 、 δ_{S_i} 、 σ_{G_1} 、 σ_{G_2} 分别为强度 δ_j 、应力 S_i ，安全裕度 G_1 和 G_2 的标准差。

由上式可以看出，相关系数不易确定。

2.3.7 考虑应力相关性

当对多种失效模式下的机械零件进行可靠性建模时，可以把整个零部件看成

是由不同失效模式组成的串联系统，然后对此串联系统进行可靠性建模分析。一个机械系统通常会有多个机械零部件构成，其中任何一个机械零部件的失效都会造成整个机械系统的失效，所以，对机械系统可靠性建模时，机械系统往往可以看作由多个机械零部件构成的串联系统，然后对此串联系统进行可靠性分析。

机械系统中各零部件本身失效模式间的失效相关现象主要有两方面，分别体现在零部件的强度相关和应力相关这两个方面。强度和应力的不均干涉和随机性造成了各失效模式之间存在很大失效关联性。而且失效模式间的失效相关性多表现为非线性关系，不能用传统的相关系数来描述。除此之外，系统中还往往存在着因结构关系而产生的系统结构失效相关问题。

2.3.8 Monte Carlo 仿真

Monte Carlo，又称概率随机抽样法或者概率模拟统计试验法。通过对模拟生成的随机变量数据进行分析计算，然后自动拟合相似数学模型或数学函数，对求解问题进行近似求解。其仿真的基本思路是：首先根据原始输入数据获得大量的随机样本，然后对这些随机样本进行概率近似统计并形成统计规律。根据概率统计规律，样本容量越大，其统计结果与工程实际就越接近。由于 Monte Carlo 方法无需确定各函数形式及各函数间的相对数学关系，对于复杂问题特别是复杂数学多重积分问题很容易得以求解，所以在可靠性数理分析中应用广泛。

在根据失效物理应力强度模型建立考虑相关性问题的可靠性模型时，当数学模型中遇到多重积分计算繁琐时可以根据相关模型参数对模型进行 Monte Carlo 仿真。用 Monte Carlo 方法进行仿真计算时的基本步骤如下：

(1) 建立概率统计模型。结合实际工程问题根据系统结构的各零部件逻辑关系，构建与实际问题相对应的数理统计概率模型。并依据此概率统计对问题进行求解。

(2) 确定常量和随机变量。确定模型之后，找到概率模型中涉及到的相关参数，分别确定相关参数中的常量和随机变量。

(3) 模拟抽样。对相关参数中的随机变量按照各自服从的分布类型进行随机抽样，然后不断调整和扩大样本容量进行模拟仿真。计算机会按照概率统计模型进行自动生成指定容量的样本，样本的容量越大，仿真模拟的结果就越符合工程实际，其结果也更为准确和可信。

(4) 概率统计分析。基于以上容量生成的大量样本，计算机会自动进行统计并获得各样本的概率统计值然后代入概率统计模型得到仿真模拟结果，问题得以求解。

2.4 本章小结

本章综述和介绍了机械系统可靠性建模的相关理论和方法，阐述了失效物理的概念和失效物理模型。详细介绍了几种主要的机械系统可靠性建模的理论方法和模型。介绍了 Monte Carlo 方法在处理失效物理相关性多重积分计算问题的一些基本步骤，该方法计算过程借助计算机运算，运算速度快，简单方便，且计算精度较高。

第3章 考虑失效模式相关的风电齿轮箱可靠性分析

风电齿轮箱是风力发电机的重要组成部分，其中失效相关是影响风电齿轮箱可靠性的主要问题之一。由于其零部件具有多种失效模式，各失效模式间具有失效相关性，这种失效相关性往往会对系统的可靠性产生较大的影响。

针对失效相关，许多学者进行了大量的研究工作。考虑机械系统的失效混合信息，张鹏等得到了基于失效数据信息的机械系统各结构单元的条件概率，继而对串联机械系统的失效相关问题进行了相关的可靠性分析和研究^[37]。在失效相关的影响下，Jose 将系统可靠度进行重新分配，利用不同分配方法对失效相关下的不可修复机械系统进行了相关的可靠度分析和计算^[38]。考虑机械系统零部件多失效模式失效相关这一因素，何成铭利用系统结构界限理论对机械系统结构可靠度的上下界限值的优化问题进行了相关的探究，并且对整个机械系统的可靠性进行了系统地分析^[40]。以上文献都只是简单的描述变量间的线性关系，并没有考虑变量间的非线性关系。Copula 这一连接函数作为描述失效相关性的一种数学工具，显示出了其有力性和灵活性。对于这样的局限缺陷，韩文钦等将 Copula 数学模型及相关理论结合可靠性理论基础对系统可靠性进行分析研究，得到了相关的系统可靠性模型，为机械系统的可靠性建模提供了新的思路方法和切入点^[44]。为了说明工程实际中系统结构中各零部件之间明显存在的失效相关性，张明珠利用 Copula 数学函数分别对于系统结构完全相关和系统结构完全独立这两种情况下的系统结构各零部件之间的失效相关性进行了相关研究，并对系统结构可靠度进行了相关的计算及系统分析^[45]。易文德等把数学 Copula 函数运用在系统可靠性分析之中，以此来解决机械系统零部件的寿命相关问题，利用 Copula 函数与机械系统可靠度之间的函数关系，以此建立寿命相关的系统可靠性模型，说明了机械系统零部件间的寿命相关关系在机械系统可靠可靠性分析中的的重要影响作用^[46]。对于具有多失效模式的机械零部件失效相关问题，唐家银结合 Copula 函数模型建立了新的失效相关可靠度模型，并将其应用在了机械系统可靠性分析和计算之中^[47]。孙永波将 Copula 连接函数运用到了可靠性建模中来，建立了体现机械系统零部件间相关关系的可靠性模型^[48]。

上述文献在一定程度上对失效相关性进行了直观的数学描述。但数学方法和数学模型的构建中缺乏明确的物理意义，无法反应数学关系与失效本质联系的逻辑映射，均难以从失效机理上反应失效的本质。因此，本文利用失效物理应力强度模型，从失效相关的本质和机理出发，针对风电齿轮箱零部件失效模式间的失效相关性问题的，考虑各失效模式下的强度退化，建立失效相关联合分布并对风电齿轮箱传动系统进行可靠性分析，为风电齿轮箱设计制造及可靠性分析提供相关

理论支撑。

3.1 考虑强度退化的失效相关联合分布

对于机械零部件而言，其强度退化是一个较为复杂的问题。对于不同的机械零部件其强度退化过程不尽相同。对于同一机械零部件，不同的材料、载荷及工况环境下其强度退化也各不相同。所以，对于机械零部件的强度退化过程，没有一个确定的随机过程能够准确且确定的描述强度退化的过程。一般情况下，我们考虑强度退化时可以近似的认为强度退化量服从正态分布，以此来描述强度退化的随机性。

齿轮是风电齿轮箱传动系统的主要零部件，其主要失效模式为弯曲疲劳失效和接触疲劳失效。根据图 2.3 所示的强度退化模型和失效物理应力强度模型见图 2.2^[52]，假设各失效模式强度退化量 ΔD 服从正态分布，则弯曲疲劳失效对应的功能函数如式(3.1)所示。

$$G_F = \delta_F - \Delta D_F - C_F F_t K_A K_v (K_{H\beta})^N K_{H\alpha} \quad (3.1)$$

接触疲劳失效对应的功能函数如式(3.2)所示。

$$G_H = \delta_H - \Delta D_H - C_H \sqrt{F_t K_A K_v K_{H\beta} K_{H\alpha}} \quad (3.2)$$

以上两个功能函数中包含多个相关的随机变量，说明两失效模式间存在应力相关，根据全概率公式，则考虑强度退化的失效相关联合分布齿轮可靠性模如式(3.3)所示。

$$\begin{aligned} R &= P\{G_F > 0, G_H > 0\} \\ &= P\left\{\delta_F - \Delta D_F - C_F F_t K_A K_v (K_{H\beta})^N K_{H\alpha} > 0, \delta_H - \Delta D_H - C_H \sqrt{F_t K_A K_v K_{H\beta} K_{H\alpha}} > 0\right\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

式中 N 、 C_F 、 C_H 分别如式(3.4)、(3.5)、(3.6)所示。

$$N = \frac{(b/h)^2}{1 + (b/h) + (b/h)^2} \quad (3.4)$$

$$C_F = \frac{1}{bm} Y_{Fa} Y_{Sa} Y_{\epsilon} Y_{\beta} \quad (3.5)$$

$$C_H = Z_H Z_E Z_{\beta} Z_{\epsilon} \sqrt{\frac{1}{d_1 b} \frac{u+1}{u}} \quad (3.6)$$

式(3.1)~式(3.6)中： δ_F 为齿轮弯曲疲劳强度； δ_H 为齿轮接触疲劳强度； ΔD_F 为齿轮弯曲疲劳强度退化量； ΔD_H 为齿轮接触疲劳强度退化量； F_t 为齿轮端面内分度圆上的名义切向力； K_A 为使用系数； K_v 是动载系数； $K_{H\alpha}$ 为计算接触强度的齿

间载荷分布系数； $F_{H\beta}$ 为计算接触强度的齿向载荷分布系数； b 为工作齿宽； m 为齿轮模数； h 为齿高； Y_{Fa} 为载荷作用于齿顶时的齿形系数； Y_{sa} 为载荷作用于齿顶时的应力修正系数； Y_{β} 为弯曲强度计算的螺旋角系数； Y_{ϵ} 为弯曲强度计算的重合度系数； u 为齿数比； d_1 为齿轮的分度圆直径； Z_H 为节点区域系数； Z_E 为弹性系数； Z_{β} 为接触强度计算的螺旋角系数； Z_{ϵ} 为接触强度计算的重合度系数。

3.2 风电齿轮箱传动系统可靠性分析

本文以 1.5MW 水平轴风电齿轮箱为研究对象，其结构简图如图 3.1 所示，风力发电机组的额定功率为 1.5MW，叶轮半径 28.8 m，叶轮额定转速 14.8 r/min，要求：风电齿轮箱的可靠度大于 0.95，使用寿命为 15~20 年。系统的总传动比为 93，精度等级为 6 级。

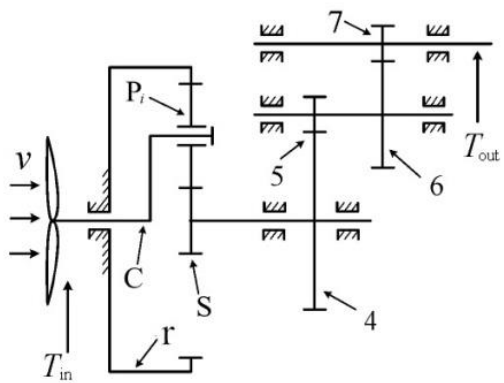


图 3.1 风电齿轮箱传动系统结构简图

图中， P_i 为行星轮； r 为内齿轮； S 为太阳轮； C 为行星架；4为中速级主动斜齿轮；5为中速级从动斜齿轮；6为高速级主动斜齿轮；7为高速级从动斜齿轮； T_{in} 为输入转矩； T_{out} 为输出转矩。

齿轮的材料和热处理工艺为：内齿轮的材料选用 42CrMo，调质后氢化处理；其余齿轮材料均选用 20CrMnTi，表面渗碳淬火处理。相关设计参数见表 3.1。

表 3.1 风电齿轮箱的几何参数

低速级	太阳轮	行星轮	内齿轮	模数	齿宽
	Z_s	Z_p	Z_R	$m(mm)$	$b(mm)$
	27	44	117	13	370
中速级	主动轮	从动轮	法向模数	螺旋角	齿宽
	Z_4	Z_5	$m_n(mm)$	$\beta(^{\circ})$	$b(mm)$
	104	23	10	10.5	350
高速级	主动轮	从动轮	法向模数	螺旋角	齿宽
	Z_6	Z_7	$m_n(mm)$	$\beta(^{\circ})$	$b(mm)$
	98	25	6.5	12.5	170

由于齿轮多失效模式失效相关联合分布中公共相关参数较多, 考虑到积分重数较多及计算时间较长, 现选取代表性参数视为随机变量见表 3.2 和表 3.3, 其他各相关参数视为常数处理见表 3.4。

表 3.2 齿轮失效相关随机变量均值及标准差

变量 齿轮	HB	K_v	ΔD_F	ΔD_H
齿轮 r	$N(280,14)$	$N(1.25,0.032)$	$N(35.25,10.05)$	$N(45.45,10.09)$
齿轮 p	$N(400,10)$	$N(1.25,0.032)$	$N(37.75,12.33)$	$N(42.75,12.11)$
齿轮 s	$N(430,15)$	$N(1.10,0.035)$	$N(30.06,11.12)$	$N(40.47,10.12)$
齿轮 4	$N(280,10)$	$N(1.12,0.040)$	$N(50.55,10.17)$	$N(45.15,10.36)$
齿轮 5	$N(450,5)$	$N(1.06,0.035)$	$N(42.17,10.52)$	$N(33.53,10.18)$
齿轮 6	$N(280,10)$	$N(1.11,0.037)$	$N(37.22,10.52)$	$N(30.14,10.20)$
齿轮 7	$N(440,5)$	$N(1.11,0.037)$	$N(40.02,10.37)$	$N(31.77,10.18)$

表 3.3 各齿轮切向载荷的均值及标准差

齿轮副	均值 μ	标准差 σ
太阳轮 s 与行星轮 p	$\mu_{F_t} = 3.5352 \times 10^5 \text{N}$	$\sigma_{F_t} = 1.7923 \times 10^3 \text{N}$
行星轮 p 与内齿轮 r	$\mu_{F_t} = 3.5352 \times 10^5 \text{N}$	$\sigma_{F_t} = 1.7923 \times 10^3 \text{N}$
斜齿轮 4-5	$\mu_{F_t} = 3.5195 \times 10^5 \text{N}$	$\sigma_{F_t} = 1.7843 \times 10^3 \text{N}$
斜齿轮 6-7	$\mu_{F_t} = 1.2459 \times 10^5 \text{N}$	$\sigma_{F_t} = 314.3914 \text{N}$

表 3.4 齿轮多失效模式的应力参数及其取值

	齿轮 r	齿轮 p	齿轮 s	齿轮 4	齿轮 5	齿轮 6	齿轮 7
Z_H	2.26	2.16	2.06	2.36	2.06	2.36	2.16
Z_ε	0.85	0.82	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
Z_β	1	1	1	0.99	0.99	0.99	0.99
Z_E	189.8	189.8	189.8	189.8	189.8	189.8	189.8
K_A	1.08	1.1	1.11	1.15	1.08	1.1	1.1
$K_{H\alpha}$	1.02	1.02	1.017	1.1	1.13	1.08	1.07
$K_{H\beta}$	1.598	1.665	1.688	1.708	1.652	1.422	1.355
Y_β	1	1	1	1	1	0.92	0.92
Y_ε	0.78	0.78	0.78	1.53	1.53	0.76	0.76
Y_{Fa}	1.87	2.16	2.21	1.06	1.13	1.91	1.93
Y_{Sa}	2.76	1.82	1.84	1.69	1.74	1.85	1.91
Y_{Fa}	1.02	1.02	1.017	1.1	1.13	1.08	1.07
$Y_{F\beta}$	1.54	1.60	1.62	1.65	1.6	1.38	1.32

已知表 3.2 中各随机变量的物理意义： HB 为齿轮的布氏硬度， K_v 为动载系数， ΔD_F 为齿轮弯曲疲劳强度退化量， ΔD_H 为齿轮接触疲劳强度退化量。并且表中各随机变量均服从正态分布。

以内齿轮为例，当齿轮的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度数据缺乏时，可由布氏硬度估算^[51]。即 $\delta_F = HBZ_F$ ； $\delta_H = HBZ_H - 68.95$ ， $Z_F \sim N(3.41, 0.14^2)$ ， $Z_H \sim N(2.76, 0.14^2)$ 。结合表 3.2 内齿轮强度退化数据，则考虑强度退化条件下的 δ_F 、 δ_H 的联合分布如下：

$$F_\delta(x, y) = P(\delta_F - \Delta D_F < x, \delta_H - \Delta D_H < y) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi\left(\frac{\frac{x+35.25}{hb} - 3.14}{0.14}\right) \times \Phi\left(\frac{\frac{y+114.4}{hb} - 2.76}{0.14}\right) \times \phi\left(\frac{hb-280}{14}\right) dhb \quad (3.7)$$

由式(3.3)、式(3.7)结合内齿轮设计参数和失效相关随机变量及应力参数可得到其考虑各失效模式强度退化和失效相关条件下内齿轮的可靠度：

$$R_r = P(G_F > 0, G_H > 0) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(1 - \Phi\left(\frac{\frac{0.00141986F_t K_v + 35.25}{hb} - 3.41}{0.14}\right) \right) \times \left(1 - \Phi\left(\frac{\frac{0.854559\sqrt{F_t K_v} + 114.4}{hb} - 2.76}{0.14}\right) \right) \\ \times \phi\left(\frac{hb-280}{14}\right) \times \phi\left(\frac{F_t - 353520}{1792.3}\right) \times \phi\left(\frac{K_v - 1.25}{0.032}\right) dhb dF_t dK_v \\ = 0.998070588$$

以上仅以内齿轮为例，同样，也可计算得到齿轮箱传动系统中其它各齿轮的考虑强度退化和失效相关条件下的可靠度见表 3.5。

表 3.5 齿轮箱传动系统各齿轮可靠度

齿轮	齿轮 R	齿轮 P	齿轮 S	齿轮 4
可靠度	0.998070588	0.998647058	0.998013333	0.997917647
齿轮	齿轮 5	齿轮 6	齿轮 7	
可靠度	0.998029411	0.998711764	0.997805882	

假设风电齿轮箱传动系统零部件之间失效不具相关性，根据表 3.5 数据，则考虑强度退化和失效相关条件下的风电齿轮箱传动系统可靠度：

$$R = R_R R_P^3 R_S \prod_{i=5}^7 R_i = 0.984595382$$

3.3 本章小结

本章针对风电齿轮箱零部件失效模式间的失效相关问题，综合应力相关和强度相关，考虑各失效模式下的强度退化，建立了齿轮失效相关联合分布，并对 1.5MW 风电齿轮箱传动系统进行可靠性分析。以失效物理的角度，揭示了失效相关的实质是零部件的强度和应力中公共随机变量具有一定的逻辑映射关联性。在分析零部件失效模式间失效相关的同时考虑强度退化更加贴合工程实际。

第4章 基于失效物理的风电齿轮箱失效相关机理分析

机械系统具有普遍失效相关的特征。由于机械零部件自身各个失效模式间和机械系统零部件间均存在失效相关的现象,因此,使机械系统的可靠性分析变得更加复杂。所以,在机械系统可靠性分析过程中对于失效相关这一问题特别是其机理的研究显得尤为重要。

关于失效相关问题,许多学者对其进行了许多研究工作,Hughes^[52]重在说明外在载荷及环境因素对相关失效的重要影响,而Dore^[32]则强调机械零部件的多样性往往会对机械系统的失效相关造成影响。近年来,人们对失效相关问题有了更加深入的研究和认识,提出了很多以原始的失效相关事件和失效相关数据为依据的系统经验模型,还有一些基于零部件失效概率为随机变量的基础理论模型。但在实际应用方面并不能反映失效相关机理,尚且存在不确定性和参数难以把握等问题。基于此,谢里阳,周金宇等从系统层的载荷强度干涉分析出发,建立了系统失效概率模型^[53]。虽然绕过了“各零部件失效独立”假设,但依旧没有直面失效相关及其机理问题。王正在系统层面上借助概率统计学针对失效相关性对系统失效概率特征的影响进行研究^[54]。唐家银,梁红琴等借Copula函数分别建立了相关性失效的k/n(G)系统可靠度计算模型^[55]和可靠性变量判定模型^[56]。以上文献从数学角度给出了失效相关性对系统可靠性的影响,但其模型构建缺乏物理性和确定性,不能反映产生这种影响的根源及机理。

基于以上分析,本文以风电齿轮箱为研究对象,对于零部件失效模式间的失效相关和系统零部件间的失效相关问题,通过失效物理应力强度模型,分别建立其考虑强度退化的失效相关联合分布,在揭示失效相关实质的同时并对产生失效相关的根源和机理进行探究,为机械结构可靠性设计和机械系统可靠性分析提供相关理论参考。

4.1 风电齿轮箱系统失效相关机理分析

通常情况下,机械零部件或机械系统在实际工况运行下,应同时考虑应力相关和强度相关。由于强度和应力中存在多个共同的随机变量,这些共因随机参数之间存在着隐性的非线性映射,这种映射关联性的外在表征即为失效相关性。而引起这些随机参数间存在映射关联性的根源往往与其参数本身的波动性和分散性有很大的关系。

4.1.1 零部件失效模式间失效相关机理分析

以内齿轮为例,其主要失效模式为弯曲疲劳失效和接触疲劳失效。根据失效

物理应力强度模型，假设各失效模式强度退化量 ΔD 服从正态分布，则弯曲疲劳失效对应的功能函数如式(4.1)所示：

$$G_F = \delta_F - \Delta D_F - C_F F_t K_A K_v (K_{H\beta})^N K_{H\alpha} \quad (4.1)$$

接触疲劳失效对应的功能函数如式(4.2)所示：

$$G_H = \delta_H - \Delta D_H - C_H \sqrt{F_t K_A K_v K_{H\beta} K_{H\alpha}} \quad (4.2)$$

以上两个功能函数中包含多个相关的随机变量，说明两失效模式间存在应力相关。

结合表 3.2 内齿轮强度退化数据，则考虑强度退化条件下的 δ_F 、 δ_H 的联合分布如式(4.3)所示：

$$\begin{aligned} F_\delta(x, y) &= P(\delta_F - \Delta D_F < x, \delta_H - \Delta D_H < y) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi\left(\frac{x+35.25}{hb} - 3.14\right) \times \Phi\left(\frac{y+114.4}{hb} - 2.76\right) \times \phi\left(\frac{hb-280}{14}\right) dhb \end{aligned} \quad (4.3)$$

由式(4.3)强度相关联合分布结合内齿轮设计参数和失效相关随机变量及应力参数可得到其考虑各失效模式强度退化和失效相关条件下内齿轮的失效相关联合分布 R_r 如式(4.4)所示：

$$\begin{aligned} R_r &= P(G_F > 0, G_H > 0) \\ &= P\left\{ \begin{aligned} &\delta_F - \Delta D_F - C_F F_t K_A K_v (K_{H\beta})^N K_{H\alpha} > 0, \\ &\delta_H - \Delta D_H - C_H \sqrt{F_t K_A K_v K_{H\beta} K_{H\alpha}} > 0 \end{aligned} \right\} \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(1 - \Phi\left(\frac{0.00141986 F_t K_v + 35.25}{hb} - 3.41\right) \right) \times \left(1 - \Phi\left(\frac{0.854559 \sqrt{F_t K_v} + 114.4}{hb} - 2.76\right) \right) \\ &\quad \times \phi\left(\frac{hb-280}{14}\right) \times \phi\left(\frac{F_t - 353520}{1792.3}\right) \times \phi\left(\frac{K_v - 1.25}{0.032}\right) dhb dF_t dK_v \end{aligned} \quad (4.4)$$

现保持各随机变量的均值不变，分别改变其应力随机变量 F_t 和强度随机变量 HB 及强度退化量 ΔD 的标准差，得到内齿轮失效相关联合分布值随应力随机变量 F_t 和强度随机变量 HB 分散性的变化分别如图 4.1、图 4.2、所示，内齿轮失效相关联合分布值随强度退化量 ΔD 分散性的变化如图 4.3 所示：

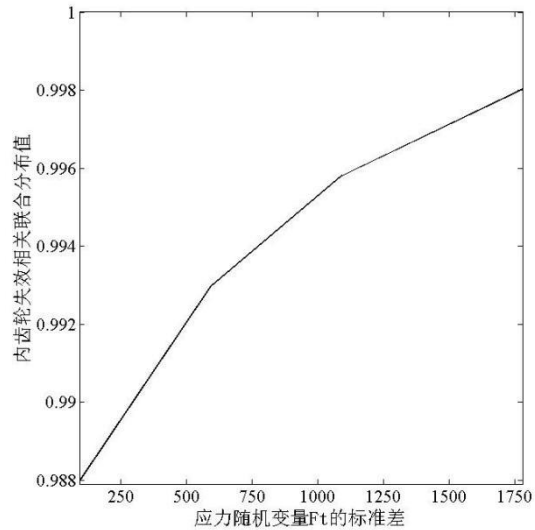


图 4.1 内齿轮失效相关联合分布值与应力随机变量 F_t 分散性之间的关系

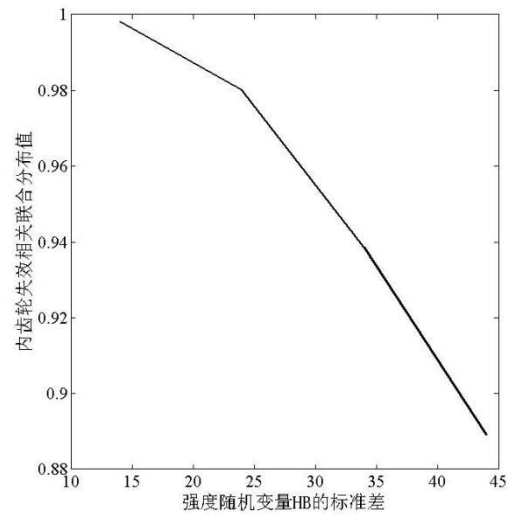


图 4.2 内齿轮失效相关联合分布值与强度随机变量 H_B 分散性之间的关系

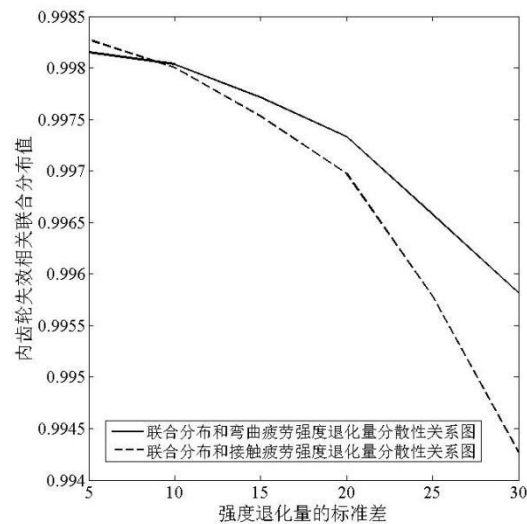


图 4.3 内齿轮失效相关联合分布值与强度退化随机变量 ΔD 分散性间关系

根据内齿轮失效相关联合分布值随各随机变量分散性的变化趋势图 4.1-4.3 可知，与应力相关的随机变量 F_i 的波动性和分散性会引起并加剧零部件失效模式间的失效相关，与强度相关的随机变量 HB 的波动性和分散性会减弱零部件失效模式间的失效相关，而强度退化随机变量 ΔD 的波动性和分散性会直接加剧强度的波动性，从而对失效相关也有一定的减缓作用。

4.1.2 风电齿轮箱零部件间失效相关机理分析

以 1.5MW 风电齿轮箱中速级传动一级斜齿轮 4-5 间失效相关为例，则一级斜齿轮失效相关部分的失效相关联合分布如(4.5)式所示：

$$R = P(G_{F4} > 0, G_{H4} > 0, G_{F5} > 0, G_{H5} > 0) = P \left\{ \begin{array}{l} \delta_{F4} - \Delta D_{F4} - C_{F4} F_{t4} K_{A4} K_{v4} (K_{H\beta 4})^{N_4} K_{H\alpha 4} > 0, \\ \delta_{H4} - \Delta D_{H4} - C_{H4} \sqrt{F_{t4} K_{A4} K_{v4} K_{H\beta 4} K_{H\alpha 4}} > 0, \\ \delta_{F5} - \Delta D_{F5} - C_{F5} F_{t5} K_{A5} K_{v5} (K_{H\beta 5})^{N_5} K_{H\alpha 5} > 0, \\ \delta_{H5} - \Delta D_{H5} - C_{H5} \sqrt{F_{t5} K_{A5} K_{v5} K_{H\beta 5} K_{H\alpha 5}} > 0 \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

其中 N_i 、 C_{Fi} 、 C_{Hi} ($i=4,5$) 如式(4.6)、(4.7)、(4.8)所示：

$$N_i = \frac{(b_i / h_i)^2}{1 + (b_i / h_i) + (b_i / h_i)^2} \quad (4.6)$$

$$C_{Fi} = \frac{1}{b_i m_i} Y_{Fa i} Y_{Sa i} Y_{\epsilon i} Y_{\beta i} \quad (4.7)$$

$$C_{Hi} = Z_{Hi} Z_{Ei} Z_{\beta i} Z_{\epsilon i} \sqrt{\frac{1}{d_{li} b_i} \frac{u_i + 1}{u_i}} \quad (4.8)$$

当联合分布求解积分重数过多计算时间较长求解较为繁琐时，可采用 Monte Carlo 进行计算求解^[57]，根据式(4.5)建立 Monte Carlo 仿真模型，代入表 3.1-3.4 中相应参数取值，由程序产生随机变量对应的随机数，按照仿真模型进行计算，具体的仿真流程图如图 4.4 所示。

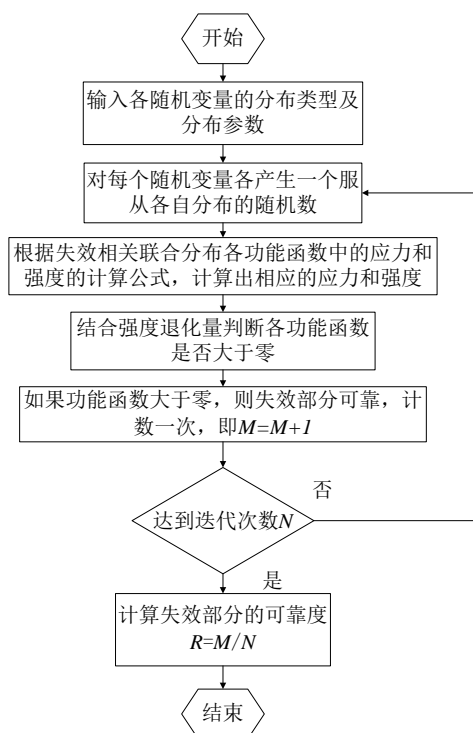


图 4.4 失效相关联合分布的 Monte Carlo 仿真流程图

现保持各随机变量的均值不变, 分别改变其应力随机变量 F_t 和强度随机变量 HB 及强度退化量 ΔD 的标准差, 得到风电齿轮箱一级斜齿轮 4-5 失效相关联合分布值随应力随机变量 F_t 和强度随机变量 HB 及强度退化量 ΔD 等随机变量分散性的变化分别如图 4.5、图 4.6、图 4.7 所示。

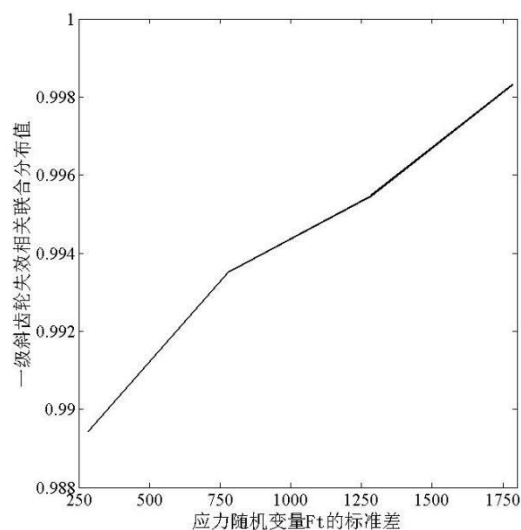


图 4.5 齿轮 4-5 失效相关联合分布与应力随机变量 F_t 分散性之间的关系

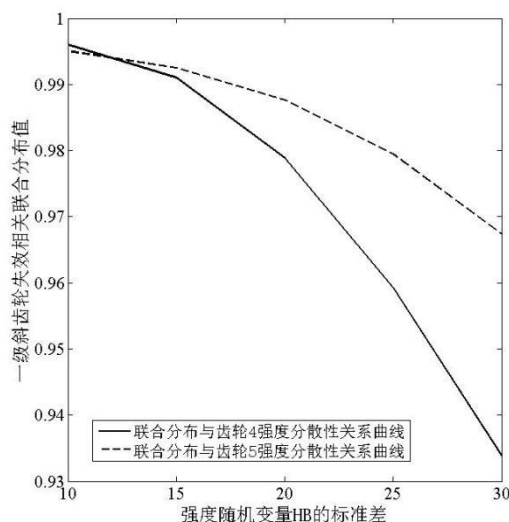


图 4.6 齿轮 4-5 失效相关联合分布值与强度随机变量 HB 分散性之间的关系

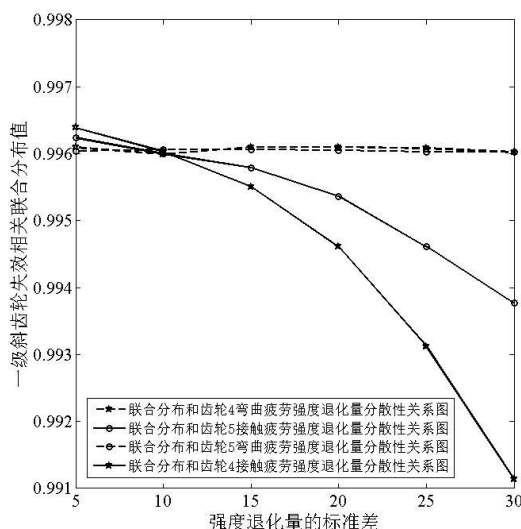


图 4.7 齿轮 4-5 失效相关联合分布值与强度退化随机变量 ΔD 分散性间关系

根据一级斜齿轮 4-5 失效相关部分可靠度随各随机变量分散性的变化趋势图 4.5-4.7 可知，与应力相关的随机变量 F_t 的波动性和分散性会引起并加剧风电齿轮箱零部件间的失效相关，而与强度相关的随机变量 HB 的波动性和分散性会减弱零部件间的失效相关性，另外，强度退化随机变量 ΔD 的波动性和分散性会直接加剧强度的波动性，从而对零部件间失效相关也有一定的减缓作用。

4.2 本章小结

针对风电齿轮箱失效相关问题，利用失效物理的方法建立失效相关联合分布模型，阐述了其失效相关的实质是强度和应力中共同的随机变量间存在一定的隐性的非线性映射关联性，结果表明，引起这种映射关联性的根本原因是强度和应

力中相关随机变量的波动性和分散性。无论零部件失效模式间的失效相关还是零部件间的失效相关，与应力相关的随机参数的波动性和分散性都会加剧失效相关的产生，与强度相关的随机参数的波动性和分散性都会对失效相关性有一定的减弱作用。强度退化过程中强度退化量的波动性和分散性会直接引起强度的波动性增大，从而进一步削弱失效相关性。所以，强度退化和失效相关有着紧密联系，在一定程度上间接影响着失效相关性的强弱。

第 5 章 考虑共因失效的风电齿轮箱可靠性分析

共因失效(common cause failure, 简称 CCF)是机械系统中普遍存在的一种相关失效形式, 由于共因失效这种失效相关性的存在, 在进行机械系统可靠性分析与可靠性建模的工程中, 问题的描述往往较为困难和复杂。由于“相关”是机械系统失效过程中的无法避免的一种现象, 如果不考虑零部件间彼此失效行为的关联的工程情况, 直接假定各零部件间失效彼此互不影响的情况下进行系统可靠性分析与计算, 则会造成较大的工程误差, 给可靠性的预计带来诸多严重的后果。

近年来, 人们对失效相关问题有了更加深入的研究和认识, 提出了很多以原始的失效相关事件和失效相关数据为依据的系统经验模型, 还有一些基于零部件失效概率为随机变量的基础理论模型。由于缺乏共因失效数据, 应用经验模型预测共因失效概率无法避免严重的不确定性。谢里阳等^[58]建立了故障树共因失效模型, 要求共因组元件具有相同的失效概率, 所以此模型只适用于电子系统并不适用于机械系统。周金宇等^[59]根据传统应力强度干涉模型建立了系统层面的共载模型, 虽然该模型数学分析计算结果较为理想, 但该模型只是绕过了“独立失效”假设, 并没有反映共因失效的内在机理。

综合以上分析, 现有的共因失效模型主要存在以下两个问题: (1)由于失效相关的隐含性, 对于特定的系统对象, 与失效相关有直接映射关系的载荷和强度很难界定; (2)不同的系统对象, 一般其失效相关的情况不尽相同, 一般性的描述较为宽泛, 在缺乏物理性的同时缺乏确定性和针对性, 其失效相关具体位置难以确定。

基于以上问题, 本文以特定的系统对象——风电齿轮箱为研究对象, 从失效物理的角度, 依据风电齿轮箱失效相关的机理, 建立风电齿轮箱失效相关故障树模型。对于确定的各失效相关部分, 建立共因失效下的考虑强度退化的失效相关联合分布, 并对整个风电齿轮箱系统进行可靠性分析。

5.1 风电齿轮箱失效相关故障树模型

本文以 1.5MW 水平轴风电齿轮箱为研究对象, 其传动系统采用一级 NGW 行星齿轮和两级斜齿轮平行轴传动, 其结构简图如图 5.1 所示。在该传动系统中行星齿轮传动为低速级, 斜齿轮副 4-5 为中速级, 斜齿轮副 6-7 为高速级。

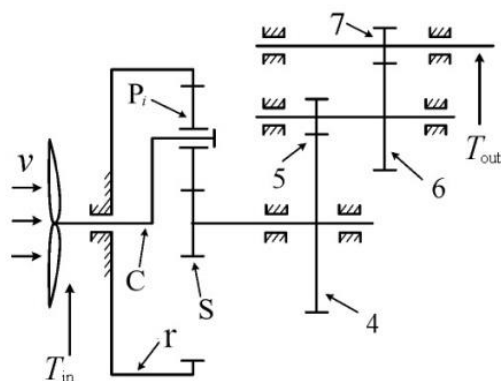
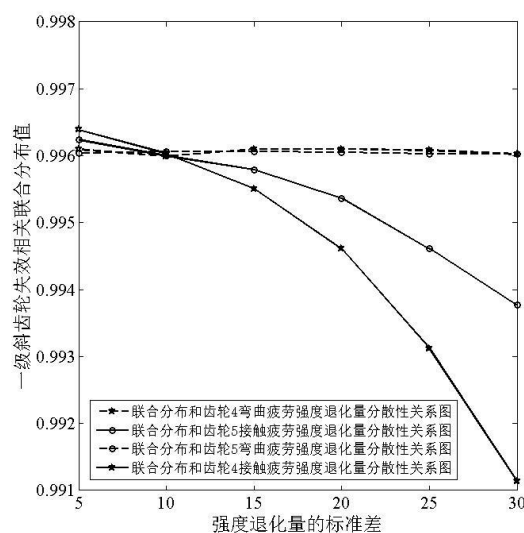


图 5.1 风电齿轮箱传动系统结构简图

由于受同一输入转矩因素影响，风电齿轮箱系统各零部件间均存在一定的失效相关性，即共因失效。

由第 4 章可知，由于共因载荷的分散性是引起机械系统零件间失效相关的本质原因，所以 CCF 引起的失效相关性源自于共因载荷的分散性，与应力相关的随机参数的波动性和分散性都会加剧失效相关的产生，与强度相关的随机参数的波动性和分散性都会对失效相关性有一定的减弱作用。强度退化过程中强度退化量的波动性和分散性会直接引起强度的波动性增大，从而进一步削弱失效相关性。

以齿轮箱一级斜齿轮 4-5 传动为例，结合表 3.1-3.4 相关参数数据，参照第 4 章的方法，利用失效物理应力强度模型结合强度退化建立失效相关联合分布值与强度退化分散性之间的关系如图 5.2 所示：


 图 5.2 齿轮 4-5 失效相关联合分布值与强度退化随机变量 ΔD 分散性间关系

由图 2 可看出，强度退化量的分散性和波动性对零部件间的失效相关有着明显的减弱作用。但在弯曲疲劳失效模式下，零部件间的失效相关非常微弱，对于风电齿轮箱整个系统失效相关而言，可以忽略不计。

以齿轮箱两级斜齿轮平行轴传动为例，设各齿轮切向载荷 F_t 服从正态分布，按照与图 5.2 相同的方法分别建立 4-6 和 5-7 两组不接触零件间的接触疲劳失效相关联合分布，得到其接触疲劳失效相关联合分布值与载荷分散性的关系如图 5.3 所示。

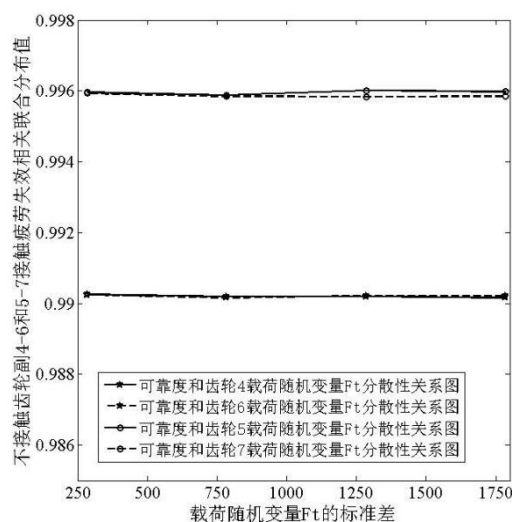


图 5.3 接触疲劳失效相关联合分布值与载荷随机变量 F_t 分散性之间的关系

由图 5.3 可知，随着载荷分散性的增大，齿轮箱中不接触零部件间并未出现明显的接触疲劳失效相关现象。

综上所述，风电齿轮箱内部两接触零部件间才存在接触疲劳失效相关性。

基于以上失效相关机理分析可得到共因失效下的风电齿轮箱系统故障树模型如图 5.4 所示：

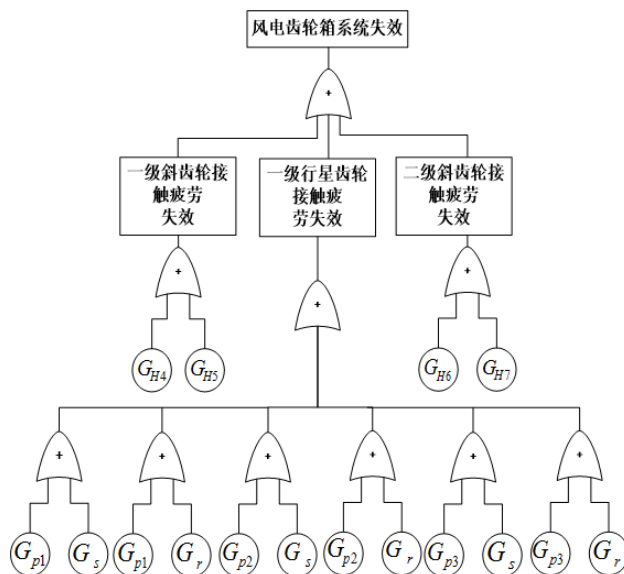


图 5.4 1.5MW 风电齿轮箱系统故障树模型

图 5.4 中各基本事件为零部件各自失效模式的功能函数，其中 $G_{p1} \sim G_{p3}$ 为三

个行星轮的接触疲劳失效功能函数, G_s 、 G_r 分别为太阳轮和内齿轮的接触疲劳失效功能函数, $G_{H4} \sim G_{H7}$ 为两级斜齿轮传动各齿轮对应的接触疲劳失效功能函数。

5.2 风电齿轮箱失效相关可靠性分析

齿轮是风电齿轮箱传动系统的主要零部件, 其主要失效模式为弯曲疲劳失效和接触疲劳失效。根据失效物理应力强度模型^[52], 假设各失效模式强度退化量 ΔD 服从正态分布, 则弯曲疲劳失效对应的功能函数如式(5.1)所示:

$$G_F = \delta_F - \Delta D_F - s_F \quad (5.1)$$

接触疲劳失效对应的功能函数如式(5.2)所示:

$$G_H = \delta_H - \Delta D_H - s_H \quad (5.2)$$

其中, s_F , s_H 分别为弯曲疲劳应力和接触疲劳应力。当齿轮的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度数据缺乏时, 可由布氏硬度估算^[54]。即 $\delta_F = HBZ_F$, $\delta_H = HBZ_H - 68.95$; $Z_F \sim N(3.41, 0.14^2)$, $Z_H \sim N(2.76, 0.14^2)$ 。 δ_F 为齿轮弯曲疲劳强度, δ_H 为齿轮接触疲劳强度, HB 为齿轮的布氏硬度, Z_F, Z_H 均服从正态分布。

5.2.1 一级斜齿轮传动接触疲劳可靠性分析

根据图 5.4 所示共因失效下的风电齿轮箱系统故障树模型, 可得到一级斜齿轮接触疲劳失效相关部分的失效相关联合分布如(5.3)式所示:

$$\begin{aligned} R_{H1} &= P\{G_{H4} > 0, G_{H5} > 0\} \\ &= P\left\{\begin{aligned} \delta_{H4} - \Delta D_{H4} - C_{H4} \sqrt{F_{t4} K_{A4} K_{v4} K_{H\beta 4} K_{H\alpha 4}} > 0, \\ \delta_{H5} - \Delta D_{H5} - C_{H5} \sqrt{F_{t5} K_{A5} K_{v5} K_{H\beta 5} K_{H\alpha 5}} > 0 \end{aligned}\right\} \end{aligned} \quad (5.3)$$

其中 C_{Hi} ($i=4,5$) 如式(5.4)所示:

$$C_{Hi} = Z_{Hi} Z_{Ei} Z_{\beta i} Z_{\epsilon i} \sqrt{\frac{1}{d_i b_i} \frac{u_i + 1}{u_i}} \quad (5.4)$$

考虑到强度相关, 结合表 3.2 一级斜齿轮 4-5 强度退化数据, 则考虑强度退化条件下的 δ_{H4} 、 δ_{H5} 的联合分布如式(5.5)所示:

$$\begin{aligned} F_{\delta}(x, y) &= P(\delta_{H4} - \Delta D_{H4} < x, \delta_{H5} - \Delta D_{H5} < y) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi\left(\frac{x+114.1}{hb} - \frac{2.76}{0.14}\right) \times \Phi\left(\frac{y+102.48}{hb} - \frac{2.76}{0.14}\right) \times \phi\left(\frac{hb-365}{5}\right) d h b \end{aligned} \quad (5.5)$$

由式(5.3)、式(5.5)结合一级斜齿设计参数和失效相关随机变量及应力参数可得到一级斜齿轮接触疲劳失效相关部分的可靠度 R_{H1} :

$$\begin{aligned}
 R_{H1} &= P(G_{H4} > 0, G_{H5} > 0) \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(1 - \Phi\left(\frac{0.86425223\sqrt{F_t K_v} + 114.1}{hb} - 2.76\right) \right) \times \left(1 - \Phi\left(\frac{1.549632773\sqrt{F_t K_v} + 102.48}{hb} - 2.76\right) \right) \\
 &\quad \times \phi\left(\frac{hb - 365}{5}\right) \times \phi\left(\frac{F_t - 351950}{1784.3}\right) \times \phi\left(\frac{K_v - 1.09}{0.040}\right) dhb dF_t dK_v \\
 &= 0.9893368
 \end{aligned}$$

5.2.2 二级斜齿轮传动接触疲劳可靠性分析

根据图 5.4 所示共因失效下的风电齿轮箱系统故障树模型，可得到二级斜齿轮接触疲劳失效相关部分的失效相关联合分布如(5.6)式所示：

$$\begin{aligned}
 R_{H3} &= P\{G_{H6} > 0, G_{H7} > 0\} \\
 &= P\left\{ \begin{aligned} &\delta_{H6} - \Delta D_{H6} - C_{H6} \sqrt{F_{t6} K_{A6} K_{v6} K_{H\beta6} K_{H\alpha6}} > 0, \\ &\delta_{H7} - \Delta D_{H7} - C_{H7} \sqrt{F_{t7} K_{A7} K_{v7} K_{H\beta7} K_{H\alpha7}} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.6)
 \end{aligned}$$

其中 C_{Hi} ($i=6,7$) 如式(5.7)所示：

$$C_{Hi} = Z_{Hi} Z_{Ei} Z_{\beta i} Z_{\epsilon i} \sqrt{\frac{1}{d_i b_i} \frac{u_i + 1}{u_i}} \quad (5.7)$$

由强度相关，结合表 3.2 二级斜齿轮 6-7 强度退化数据，则考虑强度退化条件下的 δ_{H6} 、 δ_{H7} 的联合分布如式(5.8)所示：

$$\begin{aligned}
 F_{\delta}(x, y) &= P(\delta_{H6} - \Delta D_{H6} < x, \delta_{H7} - \Delta D_{H7} < y) \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi\left(\frac{x + 99.09}{hb} - 2.76\right) \times \Phi\left(\frac{y + 100.72}{hb} - 2.76\right) \times \phi\left(\frac{hb - 360}{5}\right) dhb \quad (5.8)
 \end{aligned}$$

由式(5.6)、式(5.8)结合二级斜齿设计参数和失效相关随机变量及应力参数可得到二级斜齿轮接触疲劳失效相关部分的可靠度 R_{H2} ：

$$\begin{aligned}
 R_{H2} &= P(G_{H6} > 0, G_{H7} > 0) \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(1 - \Phi\left(\frac{1.41530188\sqrt{F_t K_v} + 99.09}{hb} - 2.76\right) \right) \times \left(1 - \Phi\left(\frac{2.492322793\sqrt{F_t K_v} + 100.72}{hb} - 2.76\right) \right) \\
 &\quad \times \phi\left(\frac{hb - 360}{5}\right) \times \phi\left(\frac{F_t - 124590}{314.3914}\right) \times \phi\left(\frac{K_v - 1.11}{0.037}\right) dhb dF_t dK_v \\
 &= 0.9967904
 \end{aligned}$$

5.2.3 一级行星齿轮传动接触疲劳可靠性分析

根据图 5.4 所示共因失效下的风电齿轮箱系统故障树模型, 可得到一级行星齿轮传动中行星轮和太阳轮、行星轮和内齿轮接触疲劳失效相关部分的失效相关联合分布分别如(5.9)、(5.10)式所示:

$$\begin{aligned} R_m &= P\{G_p > 0, G_s > 0\} \\ &= P\left\{\begin{aligned} \delta_p - \Delta D_p - C_p \sqrt{F_{tp} K_{Ap} K_{vp} K_{H\beta p} K_{H\alpha p}} > 0, \\ \delta_s - \Delta D_s - C_s \sqrt{F_{ts} K_{As} K_{vs} K_{H\beta s} K_{H\alpha s}} > 0 \end{aligned}\right\} \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} R_n &= P\{G_p > 0, G_r > 0\} \\ &= P\left\{\begin{aligned} \delta_p - \Delta D_p - C_p \sqrt{F_{tp} K_{Ap} K_{vp} K_{H\beta p} K_{H\alpha p}} > 0, \\ \delta_r - \Delta D_r - C_r \sqrt{F_{tr} K_{Ar} K_{vr} K_{H\beta r} K_{H\alpha r}} > 0 \end{aligned}\right\} \end{aligned} \quad (5.10)$$

其中 C_i ($i = p, s, r$) 如式(5.11)所示:

$$C_i = Z_{Hi} Z_{Ei} Z_{\beta i} Z_{\epsilon i} \sqrt{\frac{1}{d_{li} b_i} \frac{u_i + 1}{u_i}} \quad (5.11)$$

由强度相关, 结合表 3.2 一级行星齿轮传动中各齿轮的强度退化数据, 按照 5.2.1 和 5.2.2 同样的方法对式(5.9)和式(5.10)分别进行求解, 可得到一级行星齿轮传动中行星轮和太阳轮、行星轮和内齿轮接触疲劳失效相关部分的失效相关联合分布 R_m 、 R_n 分别为: $R_m = 0.99968374$, $R_n = 0.99967045$ 。则一级行星齿轮传动接触疲劳失效相关部分的可靠度 R_{H3} 为:

$$R_{H3} = R_m^3 R_n^3 = 0.9980641332$$

5.2.4 风电齿轮箱系统可靠性分析

根据图 5.4 风电齿轮箱系统故障树模型各失效部分的逻辑关系可得到共因失效下风电齿轮箱系统可靠度 R :

$$R = \prod_{i=1}^3 R_{Hi} = 0.984252347$$

为了讨论和验证共因失效对风电齿轮箱系统可靠性的影响, 当不考虑共因失效对风电齿轮箱系统可靠性影响即各零部件间失效相互独立时, 风电齿轮箱系统可靠度 R' :

$$\begin{aligned}
 R^* &= \prod_{i=1}^9 P(G_{Hi} > 0) = \prod_{i=1}^9 P(\delta_{Hi} - \Delta D_{Hi} > s_{Hi}) \\
 &= \prod_{i=1}^9 \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(1 - \Phi\left(\frac{s_{Hi} + \Delta D_{Hi} - 2.76}{0.14}\right) \right) \times \phi\left(\frac{hb - \mu_{HBi}}{\sigma_{HBi}}\right) \times \phi\left(\frac{F_t - \mu_{F_{ti}}}{\sigma_{F_{ti}}}\right) \right. \\
 &\quad \left. \times \phi\left(\frac{K_v - \mu_{K_{vi}}}{\sigma_{K_{vi}}}\right) dhb dF_t dK_v \right) \\
 &= 0.975365338
 \end{aligned}$$

结果表明，各零部件间失效独立时风电齿轮箱系统的可靠度低于考虑共因失效时风电齿轮箱系统的可靠度。其结果符合简单界限界定理论。即风电齿轮箱系统完全独立失效时系统可靠度等于界限可靠度的最小值，完全相关时，系统可靠度等于界限可靠度的最大值。

5.3 本章小结

针对共因失效下的风电齿轮箱零部件间失效相关问题，依据风电齿轮箱失效相关机理，从失效物理的角度对风电齿轮箱进行可靠性分析。结果表明，该模型符合界限理论，从失效物理角度体现了失效相关对系统可靠性的影响。与其他共因失效模型相比，该模型对共因失效的描述更具确定性和针对性。运用失效物理模型建立各失效相关部分联合分布，揭示了共因失效下零件间失效相关的实质为强度和应力中共同的随机变量间存在一定的非线性映射关联性。引起应力和强度中共因参数之间存在隐性非线性映射的原因是各个参数本身的分散性及波动性。即与应力和强度有关的相关参数的分散性及波动性是引起零部件间失效相关的本质原因。

第 6 章 结论与展望

6.1 全文总结

能源问题已成为当今社会最受关注的关键问题之一。随着全球能源和环境问题不断恶化和加深,新型能源中的清洁能源风能资源获得了世界范围内的广泛关注。中国是全球最大的人口大国,其能源的生产和消费都远远超过世界其他国家,经过将近半个世纪的发展,中国的风电产业的发展已经达到了历史从未有过的新高度。装机规模和发电量双双居于全球第一。在风电机组中,风电齿轮箱是将随机分散的风能转化为稳定输出的电能的关键转化系统,在这个过程中,齿轮箱传动系统通常受到不确定性外在随机载荷的作用,复杂工况和恶劣的环境条件往往会给风电齿轮箱系统造成严重的性能损伤,随着服役时间的推移,齿轮箱寿命和可靠度逐渐降低,零部件内部和系统零部件间开始发生失效干涉,即失效行为相关现象。为此,本文在国内外已有研究成果的基础上,以失效物理的角度,结合性能退化,围绕失效相关这基本问题,以 1.5MW 水平轴风电齿轮箱为研究对象,对风电齿轮箱进行可靠性分析。分别进行了考虑失效模式相关的风电齿轮箱可靠性分析和考虑共因失效的风电齿轮箱可靠性分析,并利用失效物理的方法对风电齿轮箱失效相关的机理进行了探究。目的是为风电齿轮箱的设计和制造及可靠性分析提供了理论支持。以下是本文的主要研究内容及主要结论:

(1) 考虑失效模式相关的风电齿轮箱可靠性分析。从失效物理的角度,针对齿轮两失效模式间的失效相关,综合考虑应力相关和强度相关,结合全概率公式建立了考虑强度退化的失效相关联合分布。从失效机理和本质上对风电齿轮箱进行可靠性分析,分析结果表明,失效相关的实质为齿轮的强度和应力中公共随机变量间具有一定的关联性,对风电齿轮箱传动系统的可靠性影响较大。

(2) 基于失效物理的风电齿轮箱失效相关机理分析。通过失效物理应力强度模型,建立考虑强度退化的失效相关联合分布。从失效物理角度阐述了失效相关的实质是强度和应力中共同的随机变量间存在一定的隐性的非线性映射关联性。并对造成这种映射关联性的原因进行了探究。结果表明,强度和应力中共同随机变量的波动性和分散性是造成此映射关系的主要原因,并且说明强度退化引起强度波动性和分散性增大也会对失效相关产生很大的影响。

(3) 考虑共因失效的风电齿轮箱可靠性分析。针对风电齿轮箱零部件间失效相关问题,以风电齿轮箱失效相关机理为依据,得到风电齿轮箱失效相关故障树模型。对风电齿轮箱故障树各失效部分,从失效物理的角度,利用失效物理应力强度模型结合强度退化建立各部分失效相关联合分布,得到共因失效下的风电齿

轮箱失效物理可靠性模型。结果表明，与传统的独立假设分析结果相比，该模型结果符合界限理论，揭示了共因失效下零件间失效相关的实质为强度和应力中共同的随机变量间存在一定的映射关联性。对于特定的机械系统对象，与其他共因失效模型相比，该模型对共因失效的描述更具确定性和针对性。

针对于机械系统复杂的失效相关性，以失效物理的角度，从失效本质和机理出发，结合概率论中的联合分布理论，建立考虑性能退化和多失效模式相关的零部件失效物理模型。揭示失效机理和物理本质的同时，也弥补了数学模型对于机械失效相关性描述的模糊性和不确定性，对其设计和制造及可靠性分析提供了理论支持。

从失效的根源和主要原因出发，结合故障树逻辑分析，对风电齿轮箱系统进行失效分析，根据系统级和零件级失效相关的物理本质机理，以共因失效为主线对风电齿轮箱系统进行拆分和整合，对其进行考虑共因失效相关性的可靠性分析，从失效物理的角度为复杂机械系统的失效相关性分析提供了一种思路。

6.2 工作展望

本文以风电齿轮箱传动系统为研究对象，基于失效物理结合性能退化对风电齿轮箱失效相关现象进行了探究，对风电齿轮箱进行了可靠性分析，并获得了相关的结论。但是，在整个课题研究的过程中还有若干的问题有待进一步商榷，还有一些后续工作需要进一步的研究。主要包括以下几个方面：

(1) 对于机械零部件而言，其性能退化是一个较为复杂的问题。对于不同的机械零部件其性能退化过程不尽相同。对于同一机械零部件，不同的材料、载荷及工况环境下其性能退化也各不相同。所以，对于机械零部件的性能退化过程，没有一个确定的随机过程能够准确且确定的描述性能退化的过程。本文在可靠性分析考虑性能退化时近似的认为性能退化量服从正态分布，以此来描述性能退化的随机性。该假设是否与性能退化的一般规律相吻合有待进一步探讨，是否真正符合性能退化的内在机制，有待工程实践的进一步验证。

(2) 本文基于失效物理的方法实现了机械系统的失效相关性建模和可靠性分析，并对失效相关的机理进行了探究。但是其分析过程中以平稳随机载荷为基础，并未考虑极端载荷和极端冲击对风电齿轮箱系统失效相关性的影响。因此，如何把极端载荷和冲击考虑在内与失效物理结合起来揭示机械系统失效相关性这一问题的本质是后续研究工作的重点。

参考文献

- [1] 陈涛. 小样本条件下风电齿轮箱传动系统动态可靠性预测方法[D]. [大连理工大学硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [2] 中国水电工程顾问集团公司新能源处. 规划先行有序发展[J]. 风能, 2011, (8): 36-38.
- [3] 吴佳梁, 王广良, 魏振山. 风力机可靠性工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [4] 王正, 谢里阳. 考虑失效相关的系统动态可靠性模型[J]. 兵工学报, 2008, 29(8): 985-989.
- [5] 张义民, 张旭方, 杨周, 等. 多失效模式机械零部件可靠性灵敏度设计[J]. 机械强度, 2009, 31(6): 926-931.
- [6] Rao S S. Reliability analysis and design of epicyclic gear trains[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1979, 101(3): 625-632.
- [7] 王辉, 李晓龙, 王罡, 等. 大型风电齿轮箱的失效问题及其设计制造技术的国内外现状分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1542-1549.
- [8] 何安平. 风电机组齿轮箱动静态特性的有限元分析[D]. [华中科技大学博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [9] 周金宇, 谢里阳, 钱文学. 载荷相关结构系统的可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 45-50.
- [10] Li Guoyun, Qin Datong. Analysis of accelerated fatigue test technology for wind turbines gearbox[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1252-1256.
- [11] 秦大同, 邢子坤, 王建宏. 基于动力学和可靠性的风力发电齿轮传动系统参数优化设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7): 24-31.
- [12] Li Yafeng, Xu Yuxiu, Li Guoxing. Optimization design of the wind turbine gearbox based on genetic algorithm method[J]. Materials Science Forum, 2012, 697-698.
- [13] 陈涛, 孙伟, 张旭等. 变风速条件下风电齿轮随机可靠性优化[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(5): 497-505.
- [14] Wang Haijun, Du Xuesong, Xu Xiangyang. Dynamic analysis and experimental study of MW wind turbine gearbox[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 86: 739-742.
- [15] Su Y, Wang C X and Jiang W. Analysis of wind turbine gearbox based on Romax WIND flexible FE structures[C]. In: 1st International Conference on Energy and Environmental Protection, ICEEP 2012. Switzerland: Trans Tech Publications, Switzerland, 2012: 669-674.
- [16] Niola V, Quaremba G, Avagliano V. A real time algorithm for monitoring the gearbox reliability test[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2009, 8(7): 866-875.
- [17] Giger U. and Arnaudov K. Redesign of a gearbox for 5MW wind turbines[C]. In: ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2011. Washington, DC, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 635-641.

- [18] Hall J, Mecklenburg C A, Chen Dongmei, et al. Wind energy conversion with a variable-ratio gearbox: Design and analysis[J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 1075-1080.
- [19] Sarper H. Reliability analysis of descent systems of planetary vehicles using bivariate exponential distribution[C]. In: 2005 Annual Reliability and Maintainability Symposium, and The International Symposium on Product Quality and Integrity. Alexandria, Virginia, USA: Institute of Electrical and Electronic Engineer, 2005, 165-169.
- [20] Park Y et al. Characteristics analysis of wind turbine gearbox considering fatigue loads caused by wind fluctuation[C]. In: ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2011. Washington, DC, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 611-620.
- [21] Rao S and Muljadi T. Reliability-based design of automotive transmission systems[J]. Reliability Engineering & Systems Safety, 1994, 46(2): 159-169.
- [22] Smolders K and Feng Y. Reliability analysis and prediction of wind turbine gearboxes[J]. European Wind Energy Conference, 2010.
- [23] Spinato F and Tavner P.J. Reliability of wind turbine subassemblies[J]. IET Renew Power Gener, 2009, 3(4): 387-401.
- [24] Jack W. Improving gearbox reliability[J]. Renewable Energy Focus, 2009, 10(2): 22-24.
- [25] 孙淑霞, 田芳, 顾宏民. 齿轮传动的可靠性优化设计[J]. 机械设计与制造, 2001, (05): 3-5.
- [26] 钱松荣. 行星齿轮箱的可靠性优化设计[J]. 机械设计与制造, 2004, (05): 3-4.
- [27] Zhao L. MASTA software for wind turbine gearbox design[C]. In: 2nd International Conference on Mechatronics and Intelligent Materials 2012, MIM 2012. Switzerland: Trans Tech Publications, Switzerland, 2012: 2259-2263.
- [28] O'Connor P D T. Commentary: reliability—past, present, and future[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2000, 49(4): 335-341.
- [29] 李翠玲, 谢里阳. 相关失效分析方法评述与探讨[J]. 机械设计与制造, 2007, 24(1): 4-5.
- [30] Fleming K N. A reliability model for common cause failures in redundant safety systems[R]. General Atomic Report, GA-13284, Pittsburgh, 1974.
- [31] Fleming K N, Hunnaman G W. Common cause failure considerations in predicting HTGR cooling system reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1976, 25: 171-177.
- [32] Dore P. Basic aspects of stochastic reliability analysis for redundancy systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1989, 24: 351-375.
- [33] Hokstad P. A shock model for common cause failure[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1988, 23: 127-145.
- [34] Vaurio J K. Availability of redundant safety systems with common mode and undetected failure[J]. Nuclear Engineering and Design, 1980, 58: 415-424.

- [35] Fleming K N, Mosleh A. Classification and analysis of reactor operating experience involving dependent events[R]. NP-3967. Electric Power Research Institute, 1985.
- [36] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [37] 张鹏, 张庆功, 胡启国. 改进的哈马邱尔算子在系统可靠性分析中的应用[J]. 机械强度, 2006, 28(1): 70-78.
- [38] Jose E R, David W C. Optimization of system reliability in the presence of common cause failures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92: 1421-1434.
- [39] Li C Y, Chen X, Yi X S, et al. Heterogeneous redundancy optimization for multi-state series-parallel systems subject to common cause failures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(3): 202-207.
- [40] 何成铭, 王健全, 吴炜. 考虑多模相关的机械系统可靠度优化模型[J]. 机械强度, 2010, 32(2): 233-237.
- [41] 韩文钦, 周金字, 孙奎洲. 失效模式相关的机械结构可靠性的 Copula 分析方法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(3): 278-281.
- [42] 张明珠. 基于 Copula 函数对相依部件系统可靠度的度量和改进[J]. 许昌学院学报, 2005, (3): 14-17.
- [43] 易文德, 卫贵武. 基于 Copula 函数的相依部件表决系统的可靠性研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2007, 32(6): 53-55.
- [44] 唐家银, 何平, 宋东利. 基于 Copula 函数的失效相关构件可靠度计算[J]. 机械强度, 2010, 32(5): 740-744.
- [45] 孙永波. 基于 Copula 的关联系统可靠性研究[D]. [重庆大学硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [46] 王正, 谢里阳, 李兵. 考虑失效相关的系统动态可靠性模型[J]. 兵工学报, 2008, 29(8): 985-989.
- [47] 谢里阳, 王正, 周金字, 等. 机械可靠性基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [48] 赵建印. 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究[D]. [国防科学技术大学硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [49] 刘强. 基于失效物理的性能可靠性技术及应用研究[D]. [国防科学技术大学硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [50] 陈云霞, 谢汶姝, 曾声奎. 功能分析与失效物理结合的可靠性预计方法[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1133-1138.
- [51] 林孟炽, 吕美航. 渐开线圆柱齿轮的可靠性计算[J]. 机械设计, 1985, 03: 31-40.
- [52] Hughes R P. A new approach to common cause failure[J]. Reli Eng, 1987, 17: 211-236.
- [53] 谢里阳, 周金字, 李翠玲, 王学敏. 系统共因失效分析及其概率预测的离散化建模方法[J]. 机械工程学报, 2006, 01: 62-68.

- [54] 王正, 王增全, 谢里阳. 失效相关系统的失效概率模型与寿命概率分布特征研究[J]. 兵工学报, 2015, 07: 1326-1333.
- [55] 唐家银, 何平, 郑杰, 赵联文, 李裕奇. 相关性失效 $k/n(G)$ 系统结构函数-可靠度计算的等效映射表征[J]. 数理统计与管理, 2014, 04: 682-690.
- [56] 梁红琴, 唐家银, 何平, 王健鹏. 机械零部件失效相依方向可靠性模型[J]. 西南交通大学学报, 2014, 03: 507-512.
- [57] 吴帅兵, 李典庆, 周创兵. 联合分布函数蒙特卡罗模拟及结构可靠度分析[J]. 工程力学, 2012, 09: 68-74.
- [58] 谢里阳, 何雪宏, 李佳. 机电系统可靠性与安全性设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [59] 谢里阳, 周金字, 李翠玲. 系统共因失效分析及其概率预测的离散化建模方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 62-68.

致 谢

本论文的开题定题和内容的研究工作是在我的导师安宗文教授的悉心指导和帮助下完成的，安老师严谨唯实的学术作风、一丝不苟的治学态度、渊博丰富的知识和高瞻远瞩的学术洞察力，深深的感染了我，使我受益匪浅。在这三年的研究生学习生涯中，安老师给予我大量帮助和关怀。学术论文的斟酌、修改及投稿，以及学位论文的选题、开题、研究过程、撰写、修改和定稿，处处凝结着安老师的用心和心血。安老师为我们提供了许多互相学习和锻炼自己的机会，为我们创造了一个良好的学习氛围和科研条件。生活中给予了我们无微不至的关心和照顾。在此谨向恩师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢！

感谢高建雄师兄和寇海霞师姐这三年在学习上给予我的帮助，同时感谢王海红、马强、李昊、董雅芸等同学在学习和生活中给予的帮助！在与他们进行学术问题的交流中，使我得到了很多帮助和启发。

感谢我的家人，因为他们的奉献、理解、关怀和支持，我才能安心顺利的完成学业！

最后，对文中所引著作、文献的作者表示最真诚的感谢！

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文

- [1] 安宗文, 杨腾飞. 基于失效物理相关性的风电齿轮箱可靠性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2016(已录用).
- [2] 安宗文, 杨腾飞. 基于失效物理的风电齿轮箱失效相关机理分析[J]. 机械设计, 2016(已录用).