

电子科技大学
UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

专业学位硕士学位论文

MASTER THESIS FOR PROFESSIONAL DEGREE



论文题目 风电齿轮箱的性能退化建模与可靠性分析

专业学位类别 工 程 硕 士

学 号 201822040626

作 者 姓 名 田和鑫

指 导 教 师 李彦锋 副教授

分类号_____密级_____

UDC^{注1}_____

学 位 论 文

风电齿轮箱的性能退化建模与可靠性分析

(题名和副题名)

田和鑫

(作者姓名)

指导教师_____李彦锋_____副教授

电子科技大学_____成 都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别_____硕士_____专业学位类别_____工 程 硕 士

工程领域名称_____机 械 工 程

提交论文日期_____2021.04.01_____论文答辩日期_____2021.05.31

学位授予单位和日期_____电子科技大学_____2021 年 06 月

答辩委员会主席_____

评阅人_____

注 1：注明《国际十进分类法 UDC》的类号。

Performance Degradation Modeling and Reliability Analysis of Wind Turbine Gearbox

A Master Thesis Submitted to
University of Electronic Science and Technology of China

Discipline: **Master of Engineering**

Author: **He-Xin Tian**

Supervisor: **Associate Prof. Yan-Feng Li**

School: **School of Mechanical and Electrical Engineering**

摘 要

风能是一种清洁能源，合理地利用风能可以极大缓解全球气候和环境的压力。风力发电是利用风能的重要手段，而风力发电机组是风能转化为电能的媒介。风电齿轮箱是风力发电机组中的核心组件之一，其结构复杂，组成零部件较多，故障模式呈现多样化。齿轮箱的设计、制造及可靠性能较好地体现整个机组的制造水平。因此，分析风电齿轮箱的可靠性是至关重要的。本文以某型号 2MW 风电齿轮箱为研究对象，主要开展了如下研究工作：

（1）应用传统的故障模式、影响及危害性分析（Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA）方法对整个风电齿轮箱进行故障分析，通过风险优先数确定风电齿轮箱系统中危害性较大的零部件。

（2）针对传统的 FMECA 方法在故障模式严酷度、发生频度和可探测度三个评价要素等级的描述、评价要素权重的确定以及故障模式重要程度排序三个方面存在的不足，引入模糊集理论量化专家评分；利用层次分析法和熵权法分别对三个评价要素的主客观权重赋值；应用逼近理想解排序法进行故障风险排序。通过改进的 FMECA 方法确定风电齿轮箱中零部件故障模式的危害性排序，并与传统方法所得结果进行对比。

（3）基于 Gamma 随机过程和 Copula 理论对风电齿轮箱高速级齿轮的疲劳强度退化失效模式进行研究。以 Gamma 随机过程描述齿轮强度退化失效过程，通过材料的 $P-S-N$ 曲线估计 Gamma 随机过程中的未知参数，构建齿轮强度退化失效过程模型。应用 Copula 函数模型来表征高速级传动系统中两齿轮和各齿轮失效模式间的相关关系，并通过 Monte Carlo 方法验证所建模型的可行性。

（4）根据外部冲击对产品性能退化失效过程的影响，对产品失效过程进行详细的描述，建立随机冲击下产品的竞争失效过程模型。考虑到模型函数难以得到解析解，采用 Monte Carlo 方法对所建模型的可行性进行验证，同时研究不同参数对产品可靠度的影响程度。

关键词：风电齿轮箱，FMECA，强度退化，Copula 函数，随机冲击

ABSTRACT

Wind energy is a kind of clean energy, and the rational use of wind energy can greatly alleviate the pressure on the global climate and environment. Wind power is an important means of utilizing wind energy, and wind turbine is the medium for converting wind energy into electrical energy. Wind power gearbox is one of the core components of wind turbine. It has complex structure, many components and diverse failure modes. The design, manufacturing and reliability of the gearbox can better reflect the manufacturing level of wind turbine. Therefore, it is very important to analyze the reliability of wind turbine gearbox. This paper takes a certain type of 2MW wind turbine as the research object, and mainly carries out the following research work:

(1) Traditional failure mode, effect and criticality analysis (FMECA) method is used to analyze the failure of the entire wind turbine, and the risk priority number is used to determine the more harmful parts in the wind turbine gearbox system.

(2) In view of the shortcomings of traditional FMECA in the description of the evaluation indexes of the failure mode, the weight of the evaluation indexes and the importance ranking of the failure mode, the fuzzy set theory is used to improve the expert rating and a new scoring system is constructed. The subjective weights of the three evaluation indexes are calculated by the Analytic Hierarchy Process, and the objective weights are assigned according to entropy weight method. The failure modes based on Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution method are ranked. The improved FMECA method is used to determine the criticality ranking of the component failure modes in wind turbine gearbox, and the results are compared with the results obtained by traditional methods.

(3) Based on the Gamma stochastic process and Copula theory, the fatigue strength degradation failure process of high-speed gears of wind turbine gearbox is studied. The Gamma stochastic process is used to describe the failure process of gear strength degradation, and the unknown parameters in the Gamma stochastic process are estimated through the $P-S-N$ curve of the material, and a model of the gear strength degradation failure process is constructed. The Copula function model is used to characterize the dependence between the two gears and the failure modes of each gear in the high-speed transmission system, and the Monte Carlo method is used to verify the

feasibility of built model.

(4) According to the influence of external shocks on the product performance degradation failure process, the product failure process is described in detail, and the product's competitive failure process model under random shocks is established. Considering that the model function is difficult to obtain an analytical solution, the Monte Carlo method is used to verify the feasibility of built model, and the influence of different parameters on product reliability is studied at the same time.

Keywords: wind turbine gearbox, FMECA, strength degradation, Copula function, random shocks

目 录

第一章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 风电齿轮箱可靠性的研究现状	2
1.2.2 FMECA 方法的研究现状	3
1.2.3 性能退化建模的研究现状	4
1.3 本文主要研究内容	6
第二章 FMECA 方法及风电齿轮箱概述	7
2.1 故障模式、影响及危害性分析	7
2.2 风电齿轮箱概述	8
2.2.1 风电齿轮箱的结构及原理	8
2.2.2 风电齿轮箱常见故障模式	11
2.3 风电齿轮箱 FMECA	11
2.3.1 风电齿轮箱 FMEA	12
2.3.2 风电齿轮箱 CA	13
2.4 本章小结	14
第三章 基于改进 FMECA 方法的风电齿轮箱故障分析	16
3.1 评价信息的量化	17
3.1.1 模糊集理论	17
3.1.2 基于模糊集理论的评价信息量化	21
3.2 评价要素权重的确定	25
3.2.1 基于层次分析法的评价要素主观权重的确定	25
3.2.2 基于熵权法的评价要素客观权重的确定	27
3.2.3 基于乘法合成法的评价要素综合权重的确定	27
3.3 基于 TOPSIS 的故障风险排序	28
3.4 风电齿轮箱故障危害性分析	28
3.4.1 量化评价信息	29
3.4.2 确定评价要素的权重	29
3.4.3 故障风险排序	31
3.5 本章小结	33
第四章 考虑强度退化的齿轮可靠性分析	34

4.1 强度退化模型	34
4.1.1 Gamma 随机过程	34
4.1.2 材料的 $P-S-N$ 曲线	36
4.1.3 基于 Gamma 过程的强度退化模型	37
4.2 Copula 理论	40
4.2.1 Copula 函数的基本概念	40
4.2.2 Copula 函数的基本性质	41
4.2.3 相关性测度	41
4.2.4 常用 Copula 函数	42
4.2.5 Copula 函数的参数估计	43
4.2.6 模型评价和选择	44
4.3 风电齿轮箱高速级齿轮可靠性分析	45
4.3.1 风电齿轮箱高速级齿轮的疲劳强度退化模型	45
4.3.2 风电齿轮箱高速级齿轮的可靠性分析	49
4.3.3 考虑失效相关性的风电齿轮箱高速级齿轮传动可靠性分析	52
4.4 本章小结	55
第五章 考虑随机冲击的齿轮可靠性分析	56
5.1 系统描述	56
5.1.1 冲击模型概述	56
5.1.2 产品失效过程的假设	58
5.2 随机冲击下竞争失效过程建模	60
5.2.1 突发失效过程建模	60
5.2.2 退化失效过程建模	61
5.2.3 竞争失效过程建模	62
5.3 应用示例	63
5.4 本章小结	66
第六章 总结与展望	67
6.1 总结	67
6.2 展望	67
致 谢	69
参考文献	70
附 录	78
攻读硕士学位期间取得的成果	93

第一章 绪论

1.1 背景与意义

能源关系着国计民生和国家安全^[1]。2018 年英国石油公司预测，在接下来的 25 年里，全世界能源需求的增长值约为 33%，而埃克森美孚也预测全球能源需求增长值在 25% 左右^[2]。为了减轻化石能源使用对自然环境的负面影响，对水能、核能、风能以及太阳能等非化石能源的开发与利用，受到整个国际社会的空前重视。2018 年全球风电装机容量达到 56.6GW，整年的发电量大约 1265TWh，风力发电量占总发电量的 4.8%。而在《2040 世界能源预测》中，国际能源署根据截止 2019 年各国政府已发表的能源政策，预计 2040 年全球可再生能源合计占全球能源的 41%，其中风能占 13%^[3]。2021 年 3 月 18 日，全球风能委员会（Global Wind Energy Council, GWEC）发布的统计数据^[4]显示，2020 年全球风电新增装机容量达到 93GW，较于 2019 年增加了 53%，全球各国风电新增装机的占比如图 1-1 中所示。其中，中国的新增装机约 52GW，累计占比达到 55.91%，而美国新增风电装机占比也达到 18.19%。

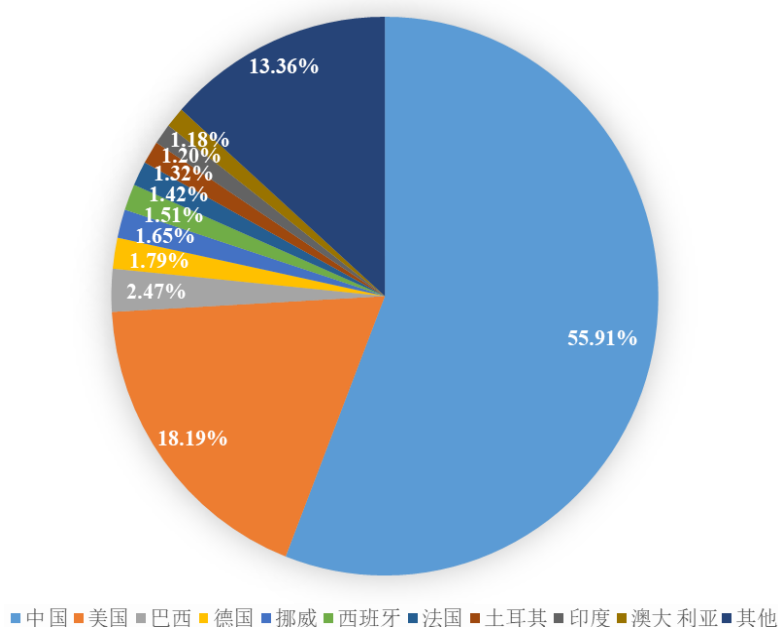


图 1-1 2020 年全球风电新增装机各国占比

新能源一直是社会研究的热点问题，而风力发电也一直是新能源研究的重点与难点课题，对比先进的制造国家，我国仍存在一定的差距^[5,6]。风力发电机组包含轮毂、传动轴、齿轮箱、发电机等部件^[7]。风机原理是风力推动叶轮旋转，经过

主轴和齿轮箱进行多级升速传递，将动力传递到发电机系统，进而产生电能，实现机械能向电能的转化，最后将电能传输到电站^[8]。然而，风力发电机组长期在振动、潮湿、沙尘、腐蚀、变速、变载、瞬时阵风、变桨操作、制动、机组启停等复杂工况环境下服役，恶劣的工况对大型风力发电机组的正常运转产生巨大不良影响。

在风电机组系统中，齿轮箱是核心组件之一，其设计、制造及可靠性能够较好地体现整个机组的制造水平^[9]。风电齿轮箱是一种复杂的集成装备，其能量传递形式也较为复杂，为了达到长期稳定发电的效果，需要确保风电齿轮箱具备较高可靠性。在整个风力发电机组的故障类型中，来自于齿轮箱的故障类型可以占到总故障的 12%^[9,10]，齿轮箱中发生的故障常会造成较长的停机维修时间，严重影响整个机组的运行。风电齿轮箱最为常见的失效是齿轮的失效和轴承的失效。其中，齿轮的失效主要是疲劳失效问题，包括点蚀、磨损、剥落、断齿、胶合、划伤、压痕等^[11]。风电齿轮箱的齿轮受到变速载荷、温度等其他外界因素影响，因此，提高风电齿轮箱齿轮的可靠性是至关重要的。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 风电齿轮箱可靠性的研究现状

目前，关于整个风电齿轮箱的研究，常使用动力学优化分析设计、有限元仿真等相关理论知识，在一定程度上提高了风电齿轮箱的可靠性。在国内已有诸多学者对风电齿轮箱进行了研究。石万凯^[12]等基于有限元分析方法，构建齿轮箱传动系统与结构系统之间的耦合动力学模型，研究在实际约束条件下齿轮箱的固有特性。刘波^[13]等考虑风电齿轮箱系统中零件寿命的相关关系，基于 Copula 函数理论建立风电齿轮箱系统的可靠性模型，讨论了零件相关失效对整个风电齿轮箱系统可靠性的影响。郑朝鹏^[14]基于仿真软件研究齿轮箱中齿轮的应力分布情况，并讨论了考虑相关性时齿轮存在的可靠性问题。宋斌斌^[15]通过研究风电齿轮箱中齿轮刚柔耦合体的动力学模型，探究了在随机载荷谱下啮合齿轮的疲劳寿命情况。杨腾飞^[9]以某型号风电齿轮箱的设计参数和工况参数为基础，引入失效之间的相关性问题，研究了风电齿轮箱及其零部件的可靠性。陈萌^[16]应用基于变分模态分解的故障诊断方法，对齿轮箱故障诊断中的振动信号特征提取问题进行了研究。刘栋^[17]深入研究了风电齿轮箱系统中各部件的失效模式，基于 FMECA 方法和故障树分析（Fault Tree Analysis, FTA）方法对风电齿轮箱进行了系统的分析。王柱^[18]通过粒子群算法优化支持向量机，进而对风电齿轮箱进行剩余寿命预测。何仁杰^[19]通过建立刚柔耦合模型，分析优化全寿命周期内风电齿轮箱的传动和响应特性。

朱永超^[20]采用机器学习和模糊综合评价法对风电齿轮箱运行健康状态评估。任建亭^[21]利用大数据技术的分布式存储和并行计算能力,开展基于大数据驱动的风电齿轮箱智能健康监测系统的研究。国外也有许多学者对风电齿轮箱进行了研究,Gallego-Calderon^[22]等研究了风电齿轮箱低速行星轮上轴承的可靠度与疲劳寿命,表明可靠性指标与轴承的动态性能有一定的关系。Antoniadou^[23]等利用经验模态分解方法分析了变工况下风电齿轮箱的状态监测问题。Dąbrowski^[24]等研究了风电齿轮箱的动态载荷问题,发现齿轮箱的极限荷载主要与阵风有关,而正常的开关机不会对其有影响。Shin^[25]等对比了内陆和海上风力发电机组的退化速率,发现海上风机的动力性能退化速率大于内陆的风机。Yan^[26]扩展了传统的应力强度干涉理论,分析了风力发电机齿轮传动系统的负载特性与疲劳可靠性。

齿轮是齿轮箱中重要的零件,齿轮箱的失效绝大部分是由齿轮的失效导致的,国内外也对齿轮进行了诸多的研究。He^[27]等基于连续损伤理论,建立了某大型风力发电机组齿轮接触疲劳裂纹萌生的弹塑性有限元模型,研究了风机齿轮的疲劳性能。Wang^[28]等考虑齿轮的硬度与强度的变化,对齿轮的接触疲劳失效风险进行了评估。Rajinikanth^[29]等采用目视裂纹、残余应力分析、微应变和机械性能测试等方法分析导致齿轮失效的原因。Wan^[30]等比较了不同的降维方法在处理齿轮裂纹退化等级评估时的统计数据。Chen^[31]等结合非线性疲劳损伤理论,建立改进的应力强度干涉模型,进行了齿轮的可靠性预测。Wang^[32]考虑到齿轮传动系统常出现的次谐波振动现象,研究了齿轮传动系统存在的稳定性问题。Beinstingel^[33]等基于几何分析和性能原因分析,提出评估齿轮啮合刚度状态的方法,考虑了载荷作用下出现的啮合干扰以及齿廓变化。He^[34]等研究了齿轮偏心对其啮合刚度的影响,比较有无这种缺陷时齿轮的传动性能。Ryail^[35]等研究了不同啮合相位下齿轮独特的动态响应。Liu^[36]等讨论了齿面粗糙度对风机齿轮接触疲劳性能的影响,结果显示粗糙度的增加会使齿面表层疲劳失效风险增大。安宗文^[37]等从相关性分析的角度切入,研究齿轮部件强度退化过程。孙秀全^[38]等通过数值模拟混合弹流润滑状态下斜齿轮的磨损过程,研究了齿面磨损对斜齿轮动态特性的影响。裴未迟^[39]选取材料为 42CrMo 的齿轮进行疲劳裂纹扩展试验,对齿轮疲劳裂纹演化行为相关的工程问题展开研究。王晓鹏^[40]研究了齿面疲劳点蚀下齿轮传动系统的动态响应特性,为较早识别齿轮齿面点蚀特征提供理论基础。

1.2.2 FMECA 方法的研究现状

FMECA 方法是一种系统可靠性分析方法,在各工程领域都有应用。惠廷云^[41]等利用 FMECA 方法分析自动扶梯驱动主机中主要零部件的故障影响。康迎宾^[42]

等将该方法用于水闸的安全评价中,分析水闸存在的故障模式。丁慧霞^[43]等将 FMECA 方法用于电力通信网运行风险评估。谢长城^[44]等将其用于分析辅助动力装置的高压涡轮导向叶片,为该部件的深度修理及设计提供依据。谢非^[45]运用 FMECA 分析航空发动机涡轮叶片。孔雷星^[46]等基于 FMECA 方法对复杂的空间电源分系统进行了可靠性分析,对 FMECA 作出了改进。杨斌^[47]将 FMECA 方法应用到工业机器人中,从整体分析工业机器人潜在的故障模式及原因。包民新^[48]结合层次分析法和 FMECA 方法,系统分析了工业机器人。除了将 FMECA 方法用于工业机器人整机系统的故障分析之外,也有学者将该方法用于分析工业机器人中的子系统。王弘毅^[49]将该方法用来分析工业机器人中的驱动器,确定驱动器存在的主要失效模式。李本^[50]对 RV 减速器进行 FMECA 分析,为后续研究工作提供了具体分析对象。

传统的 FMECA 方法存在一些不足,比如风险评判时专家的主观性和模糊性得不到表征以及评价要素相对权重的不确定性等。综合考虑这些问题后,学者们提出了很多改进的 FMECA 方法,其中大部分是基于模糊理论对 FMECA 方法进行改进。章浩然^[51]等针对该方法存在主观性较强的问题,构建了一种基于模糊评判的 FMECA 方法,改善风险优先数的分析结果。夏振宇^[52]基于故障参数监测建立故障发生概率的评定方法,解决了传统 FMECA 方法中故障风险评估输入不精确的问题。陈旭琪^[53]等运用区间二元语义变量及区间二元混合加权距离测度对 FMECA 模型进行改进。韦可佳^[54]结合模糊理论和 D-S 证据理论改进 FMECA 方法,实现更科学的评价要素权重分配。Gu^[55]等提出一种基于质量功能展开和 TOPSIS 的 FMECA 方法,并用于柴油机燃油系统故障模式及影响分析中。对于 FMECA 分析中风险优先数各评价要素的权重赋值问题,Bona^[56]等引入层次分析法对评价要素进行主观赋权,Liu^[57]等提出采用熵权法对其进行客观赋权的方法。Wang^[58]等建立了基于层次分析法的扩展物元模型,可用于计算各故障模式的接近系数,以此确定各故障模式的排序顺序。Ouyang^[59]等提出基于二元语言信息和区间概率的信息融合 FMECA 方法,并用于医疗废物管理系统的研究。

1.2.3 性能退化建模的研究现状

性能退化建模是研究产品性能退化失效的关键一步。当前,对于性能退化的产品,其退化失效是个持续的过程,常用的退化模型是基于随机过程的模型。随机过程可以用来表征产品的性能退化路径,常用的随机过程有:Wiener 过程、Gamma 过程、逆高斯(Inverse Gaussian, IG)过程^[60,61]。研究产品性能退化增量分布特征,构建基于随机过程的产品可靠性模型。

Wiener 随机过程可以描述退化测量时造成的误差,结构简单且随机。张云^[62]等基于小样本数据估计各参数,应用 Wiener 过程建立数控转台退化失效过程模型,对数控转台进行了可靠性评估。张晁^[63]等基于 Wiener 过程构建了两阶段非线性退化模型,用于表征退化过程呈非线性且时变的特点。李奎^[64]等结合非线性 Wiener 过程和统计回归理论,建立了三阶段函数退化轨迹模型,应用于交流接触器分析中,并对其进行寿命预测。潘广泽^[65]等基于产品退化数据构建 Wiener 过程模型,并评估产品性能退化特征量的参数超差时间,完成产品的可靠性评估。Zhou^[66]等应用 Wiener 过程描述卫星抗辐射能力,考虑到环境与制造工艺的不确定性,深入探究各单元器件的差异问题。Zhai^[67]等使用 Wiener 过程描述产品存在的退化过程,同时考虑退化观测中存在的测量误差,研究产品存在的老化问题。与 Wiener 过程相比较, Gamma 过程是严格的单调过程,弥补了 Wiener 过程可能出现“逆退化”的缺陷^[68]。Park 和 Padgett^[69]提出了一种基于 Gamma 过程的加速寿命试验模型。Song^[70]等考虑到航天器设备的失效特点,利用 Gamma 过程研究航天器中 MOSFET 器件抗辐射性能退化过程。杨志远^[71]等考虑复杂系统中存在的多退化过程,以 Gamma 过程和 Copula 函数构建系统失效可靠性模型。IG 过程也常用于描述产品性能退化过程,李明福^[72]等采用 IG 过程建立设备退化模型,进而预测设备的剩余寿命。Peng^[73]等考虑随机效应对退化过程的影响,通过贝叶斯方法融合各类信息,以 IG 退化过程构建产品退化过程模型。

复杂的机械系统存在多个失效模式,且失效模式间存在不同程度的相关性^[74]。在 1967 年, Cornell^[75]提出一般界限理论,表征出产品可靠度的大体范围。Ditlevsen^[76]针对失效模式的功能函数是线性函数时,提出可靠度界限的窄界限法。随着仿真软件及分析理论的发展,陆续产生多种理论来研究考虑失效相关时串并联系统的可靠性问题,如影响函数理论、降维法、生成函数法、极限分析法等^[77]。这些方法大多以线性相关系数为基础,而未考虑非线性相关特征。当考虑非线性相关性时,由于信息维度的增加,计算难度将变得巨大。故此,后续的学者将 Copula 理论用于可靠性研究中,用于描述结构的失效相关性。唐家银^[78]等引入 Copula 理论研究机械系统中退化失效模式间的相关性。Navarro^[79]等对冗余系统的维修分配问题展开讨论,应用 Copula 函数描述冗余系统中部件间存在的相关关系,结果反映冗余分配并不一定需要针对系统中的薄弱部件。陈文华^[80]等研究齿轮疲劳性能,基于 Copula 函数建立齿轮的两种疲劳可靠性模型,并进行齿轮的疲劳可靠性评估。鲍兆伟^[81]通过引入 Copula 函数,提出三步综合择优的方法解决多性能参数之间的相关性问题,对多元退化产品进行了可靠性评估。袁莉芬^[82]等应用 Copula 函数描述光纤陀螺存在的多性能退化量间相关性问题,指出考虑性能参数间相关性时结

果更合理。胡启国^[83]等以随机过程和 Copula 函数建立系统多元退化失效过程模型，应用到航空发动机性能可靠性研究中。戚晓艳^[84]应用 Copula 函数描述机床加工中心中子单元相关关系，研究了其子系统关联退化问题。整体而言，Copula 函数现今已被诸多学者广泛用来表征多个失效模式间的相关关系，并复杂化 Copula 函数模型，例如时变 Copula 函数和嵌套 Copula 函数模型的提出及应用等。

1.3 本文主要研究内容

风电齿轮箱是风机系统的重要组件，保证齿轮箱的正常工作是风机研究中的重点课题。本文以某型号 2MW 风电齿轮箱为研究对象，系统分析其潜在故障模式，深入探究齿轮的失效模式，研究齿轮的性能退化规律，对齿轮进行可靠性分析，其主要工作如下：

（1）第一章为绪论。阐述对风电齿轮箱进行可靠性分析的重要意义，介绍风电齿轮箱可靠性、FMECA 方法、性能退化建模以及失效相关性的研究现状。

（2）第二章为 FMECA 方法及风电齿轮箱概述。简述传统 FMECA 方法的原理及步骤，介绍风电齿轮箱的结构、原理以及工作特点，基于传统 FMECA 方法对某型号风电齿轮箱进行故障分析，找出系统中的薄弱环节。

（3）第三章为基于改进 FMECA 方法的风电齿轮箱故障分析。考虑到传统的 FMECA 方法存在三个方面的不足，即：故障模式的三个评价要素等级的描述、评价要素权重的确定以及故障模式重要程度排序。基于此，对故障危害性分析方法作出改进，应用到风电齿轮箱的故障分析中。

（4）第四章为考虑强度退化的齿轮可靠性分析。疲劳强度是齿轮重要的性能指标，拟引入随机过程描述零件强度退化规律，引入 Copula 函数表征失效模式及零件之间的相关关系，对齿轮箱中高速级齿轮进行可靠性分析。

（5）第五章为考虑随机冲击的齿轮可靠性分析。外部冲击对产品性能退化失效过程有严重影响，对产品失效过程进行描述，搭建随机冲击下产品突发失效过程和退化失效过程的可靠性模型。考虑到二者存在竞争关系，建立随机冲击下产品的竞争失效过程模型。通过算例对模型进行验证，同时研究不同参数对可靠度的影响程度。

（6）第六章为总结与展望。总结工作内容并进行展望。

第二章 FMECA 方法及风电齿轮箱概述

2.1 故障模式、影响及危害性分析

在国家军用标准手册列出的可靠性分析项目中，FMECA 方法是最重要的两项方法之一，另一项是 FTA 方法。FMECA 方法是自下而上的归纳分析方法，对产品潜在故障模式的影响及危害性进行分析，包含故障模式影响分析（Failure Mode and Effects Analysis, FMEA）和危害性分析（Criticality Analysis, CA）两部分^[85]。

FMECA 是根据产品结构层次，找出所有潜在故障模式，分析故障产生的原因和影响，同时分析故障检测方法，提出补偿措施，最后进行危害性分析。具体实施程序如图 2-1 所示。

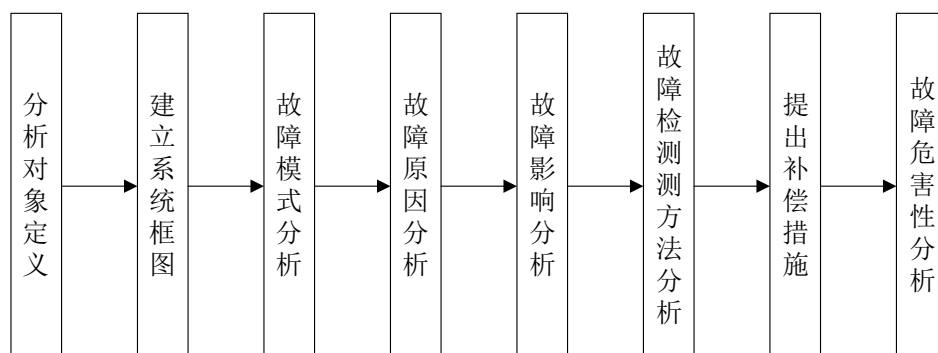


图 2-1 FMECA 实施流程

（1）分析对象定义

结合分析对象的结构和功能，约定产品的层次，包含初始约定层次、中间约定层次以及最低约定层次。

（2）制定系统框图

采用框图形式描述产品各组成部分的相互关系以及约定层次间的相互关系。

（3）故障模式分析

结合产品相关的统计数据以及试验分析等方式，获取产品存在的故障模式。

（4）故障原因分析

分析导致故障发生的直接或间接原因，从根源处分析故障的发生。

（5）故障影响分析

分析某个故障发生后对系统中其他层次的影响，通过严酷度类别区分各故障模式的影响。

（6）故障检测方法分析

对于当前故障模式的识别，需要通过故障检测手段获取。常规的检测手段包含报警提示装置、传感器监测以及目视检查等。

（7）提出补偿措施

针对系统中各故障模式，结合其故障原因以及影响，提出合理可行的改进补偿措施，以消除或减弱故障的影响效果。

（8）故障危害性分析

分析各故障模式的严重程度及发生概率产生的综合影响，对各故障模式进行排序，为后续产品改进提供依据，常用方法有风险优先数（Risk Priority Number, RPN）方法和危害性矩阵分析方法。同时，常会引入故障的可探测度，全面分析故障模式的危害性。

2.2 风电齿轮箱概述

2.2.1 风电齿轮箱的结构及原理

风电机组的工作原理是将风能转化成电能，最后输送至电网。齿轮箱是机组系统中的主要部件，其主要的作用是将叶片产生的转速变大，转矩变小^[17]。风电齿轮箱结构形式多为行星+平行轴结构^[86,87]，这样的齿轮箱增速比高、体积小、传递功率大。

某公司生产的某型号 2MW 风电齿轮箱三维模型如图 2-2 所示，采用的是两级行星传动+一级平行轴传动形式，原理图如图 2-3 所示。

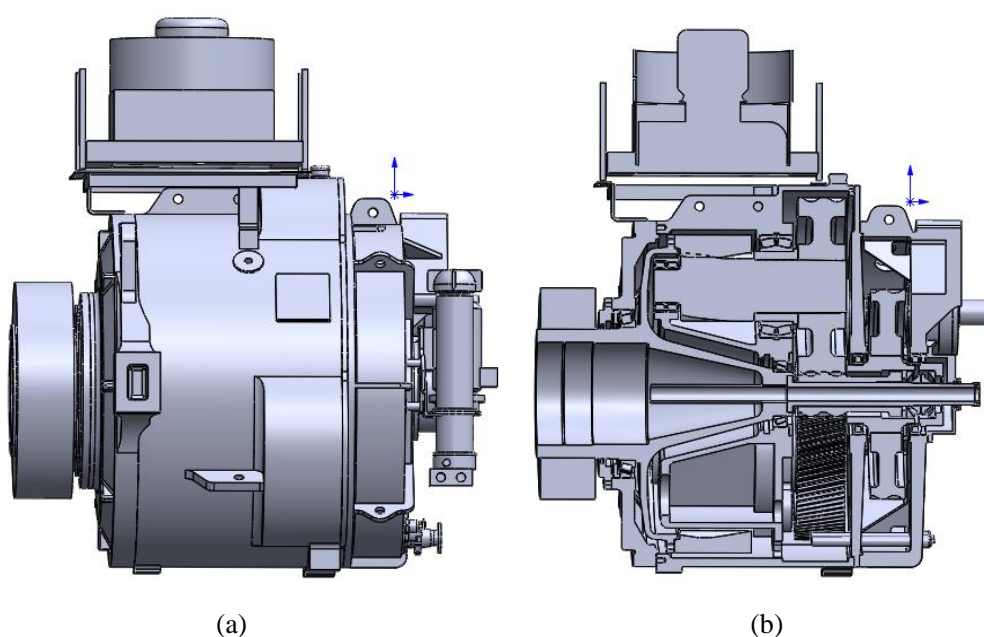
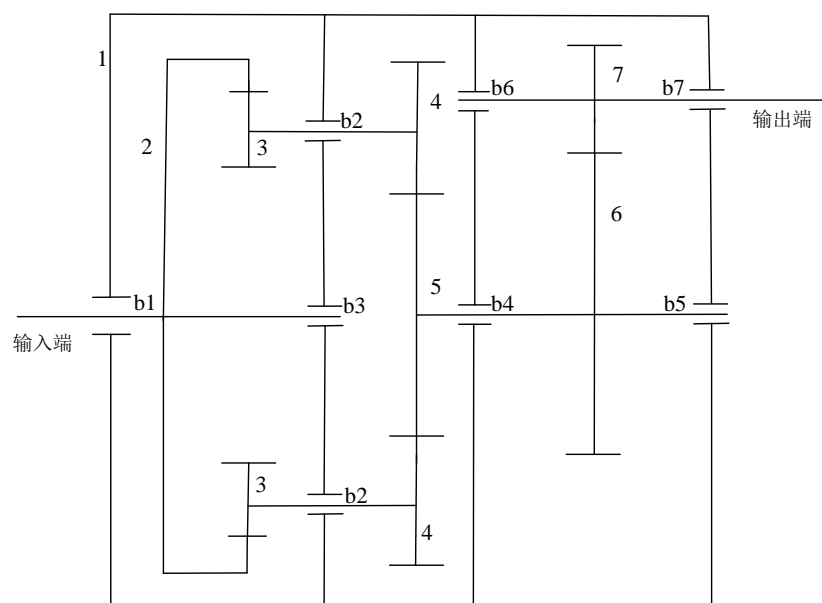


图 2-2 齿轮箱三维模型。(a)整体图；(b)截面图



1—外壳，2—一级齿圈，3—一级行星轮齿轮轴，4—二级行星轮，5—二级太阳轮齿轮轴，6—三级平行轴大齿轮，7—输出齿轮轴，b1—圆锥滚子轴承，b2—调心滚子轴承，b3—圆锥滚子轴承，b4—圆柱滚子轴承，b5—圆柱滚子轴承+圆锥滚子轴承，b6—圆柱滚子轴承，b7—圆柱滚子轴承+深沟球轴承

图 2-3 齿轮箱传动原理图

齿轮箱结构中行星架固定，两组行星轮传动可视为两组平行轴传动，整个齿轮箱系统传动结构为三级平行轴齿轮传动结构。风机的主轴通过花键将动力传递给一级齿圈，由一级行星轮经二级行星轮传递给平行轴大齿轮，最终通过输出齿轮轴传递给发电机。该齿轮箱内部的主要传动路线三维图及传动流程分别如图 2-4 和 2-5 所示。

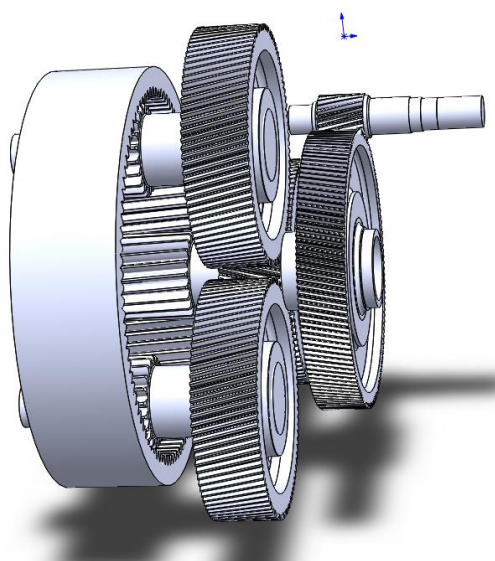


图 2-4 齿轮箱传动路线三维图

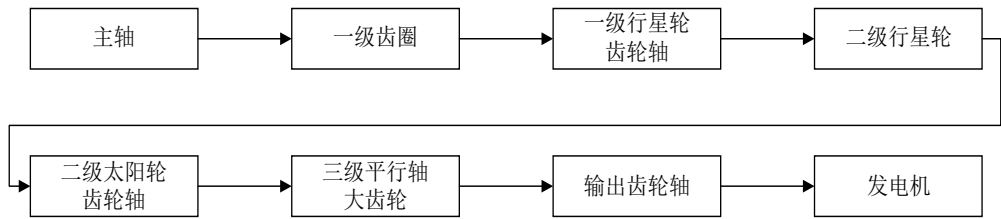


图 2-5 齿轮箱传动流程

风电齿轮箱的基本组成包含轴系、轴承系、齿轮系、壳体、润滑冷却系统、其他附件等，以上述 2MW 风电齿轮箱为例，齿轮箱子系统及所包含零部件的详细分类如表 2-1 所示。

表 2-1 某型号 2MW 风电齿轮箱子系统详细分类

子系统	零部件	子系统	零部件
轴系	一级行星轮齿轮轴	轴承系	圆锥滚子轴承
	二级太阳轮齿轮轴		圆柱滚子轴承
	输出齿轮轴		调心滚子轴承
齿轮系	一级齿圈	冷却润滑系统	深沟球轴承
	二级行星轮		电动机
	平行轴大齿轮		过滤器
壳体	箱体	其他附件	泵
	一级行星架		蓄油箱
其他附件	紧固件		密封件
	降噪装置		散热器
	传感器		软管

齿轮能改变转速和扭矩，滚动轴承的静摩擦力矩和动摩擦力矩很小，常用于齿轮箱系统中。在齿轮箱中轴的功能是传递扭矩以及承受弯矩，需要有一定的硬度以及较好的心部韧性，尤其是齿轮轴，需要配合齿轮完成转速的改变以及动力的传递。另外在上述分类中，齿轮箱的箱体和固定的行星架构成齿轮箱的大体轮廓，承受齿轮传动时产生的反力。齿轮箱的润滑属于强制润滑，润滑系统使传动件的相对运动部位保持一层油膜，以此保护传动件。齿轮箱中还安装有诸多传感器，主要用于检测油位、磨粒、压力以及温度等，提供可靠的监测数据用于齿轮箱故障分析，同时保障齿轮箱系统的正常运行。

2.2.2 风电齿轮箱常见故障模式

根据研究表明^[88]，在风力发电机组中，齿轮箱的故障率不是最高的，但是其发生的故障类型又是对整个机组系统尤为重要的。风电齿轮箱的故障主要集中在齿轮部件、轴承部件、轴部件以及润滑冷却系统，其中齿轮和轴承的故障率较高。恶劣的环境，随机的风速，造成齿轮箱的输入载荷也是随机的。随机交变的载荷对正常运行的齿轮箱零部件造成不同程度的损伤，长期的运行以及润滑冷却问题的出现，会加快零部件的退化失效。零部件的各类故障类型构成齿轮箱系统的故障，轻则造成齿轮箱的不正常运行，重则造成风机停运。

齿轮是风电齿轮箱中重要的零件，其故障模式包含齿面磨损、齿面点蚀、轮齿折断、齿面胶合、轮齿塑性变形等。在啮合处存在齿面磨损，同时由于润滑不良等原因也会加剧磨损情况的恶化。点蚀是由于齿轮长时间运行，在载荷的作用下，疲劳强度不足的齿面产生剥落，出现点状小坑。轮齿折断有两种原因：一种是由于过大负载造成的突然断裂，另一种是由于长时间载荷作用，出现疲劳裂纹，最终造成断齿。齿面胶合是在高速重载运行下，由于润滑不良，接触齿面会产生高温，齿面接触处的金属易粘结。过大的应力会使齿轮发生塑性变形，硬度较低的齿轮更易发生。

轴承的故障在齿轮箱中也较为多样，其故障模式有：保持架破坏、滚动体碎裂、磨损、点蚀等。恶劣的环境、润滑不良、油液污染以及安装不当等因素下，轴承出现磨损、点蚀等，在变载荷长时间作用下，轴承组件出现疲劳破坏，产生保持架破坏、滚动体碎裂等故障模式。

轴系的故障模式主要表现为磨损、弯曲变形以及断裂，其中齿轮轴的故障模式还包含齿轮的故障模式。异常振动、瞬时冲击以及长时间的偏载等工况条件，都会导致轴部件失效的发生，其中断裂是较难出现的故障模式，而磨损是最为常见的故障模式。

另外，冷却润滑系统的故障也是风电齿轮箱故障的重要构成，主要表现为电动机故障、泵故障、过滤器故障、散热器故障、软管堵塞、密封失效以及润滑油污染严重等。而齿轮箱中其它部件的故障还有紧固件松动以及传感器故障等。

2.3 风电齿轮箱 FMECA

通过 FMECA 方法可以对风电齿轮箱系统进行全面的故障分析，以获取齿轮箱系统中薄弱的环节。结合上述对风电齿轮箱组成结构以及常见故障模式的分析，依照 FMECA 实施步骤，分析风电齿轮箱中潜在的故障模式。

2.3.1 风电齿轮箱 FMEA

(1) 分析对象定义及制定系统框图

结合上述对某公司 2MW 风电齿轮箱组成结构的分析,对风电齿轮箱系统进行层次划分,具体如图 2-6 所示。

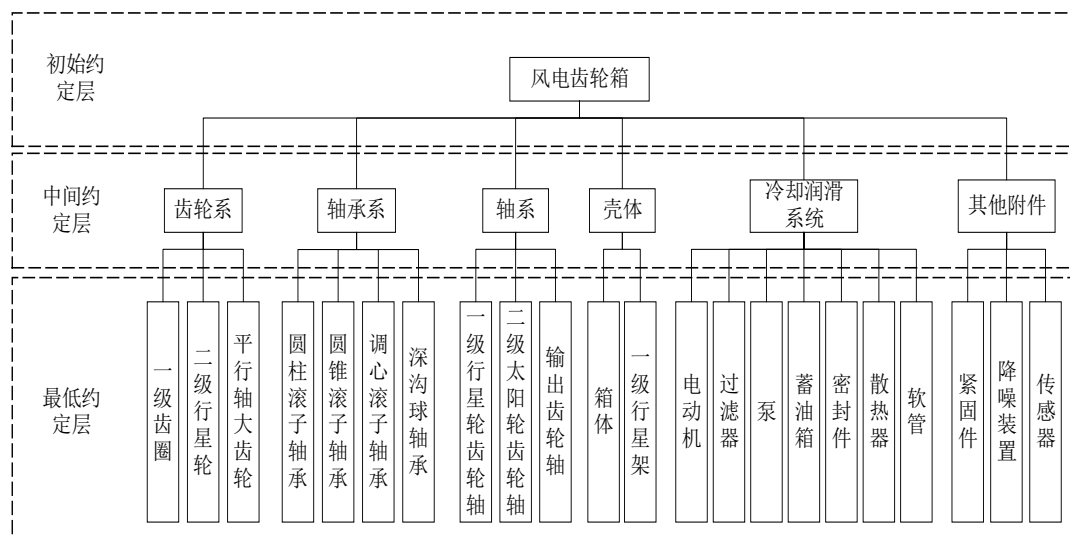


图 2-6 风电齿轮箱系统层次划分图

基于风电齿轮箱的组成结构,采用可靠性框图形式描述风电齿轮箱整机与其组成部分之间的故障影响逻辑关系。其可靠性框图如图 2-7 所示。

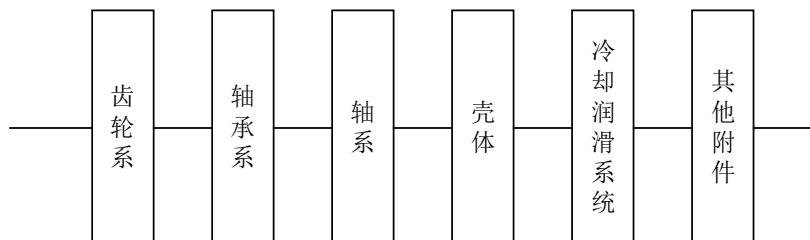


图 2-7 风电齿轮箱系统可靠性框图

(2) 故障模式、原因及影响分析

根据《GJB/Z 1391-2006》判断某子系统或某一部件是否为故障。对于风电齿轮箱中故障可能造成的影响效果,主要是考虑零部件对整个齿轮箱系统正常运行的影响,主要包含:齿轮箱振动异常、寿命降低、传动效率降低、停机等。

依据上述故障判据,结合 2.2.2 节中描述的风电齿轮箱常见故障模式,风电齿轮箱中主要零部件的故障模式、影响及原因如附录 1 所示。在多种故障模式产生的原因中,长时间运行导致零部件性能逐步退化,同时存在的润滑不充分以及发

热高温等问题，导致零部件存在各种故障模式，进而导致风电齿轮箱传动效率下降以及寿命降低。

（3）故障检测方法分析

对于风电齿轮箱存在的故障模式，主要是通过目视检查以及传感器监测。传感器需要安装在必要的监测点，监测数据能够反映当前齿轮箱运行状况，当发生故障问题时，在数据值上会有体现。另外，定期的检修工作也能检测出部分机械部件上存在的故障问题，以便及时做出维修。

（4）提出补偿措施

为了保证风电齿轮箱的正常运行，良好的零部件选择是首要，保证零部件的强度，以及合理的加工及装配工艺。其次需要保证各种传动零部件得到充分的润滑，同时要定期清洁或更换润滑液，以及做好运行监测工作。

2.3.2 风电齿轮箱 CA

运用 FMEA 方法得到风电齿轮箱存在的各种潜在故障模式后，采用风险优先数方法进行危害性分析。 RPN 值反映每个故障的危害性程度， RPN 越高说明该故障模式的危害性越高。

在某一故障 RPN 值的计算中，常涉及到三个值，包括：严酷度等级 S 、发生频度等级 O 、可探测度等级 D ， RPN 值由这三个值相乘得到，如式（2-1）所示。 S 反映某一故障模式最终影响的程度， O 是评定某一故障模式实际发生的可能性， D 表示故障模式发生后检测难易程度。

$$RPN = S \times O \times D \quad (2-1)$$

参考《GJB/Z 1391-2006》， S 、 O 、 D 的评分准则分别如表 2-2~表 2-4 所示。

表 2-2 严酷度等级 S 评分准则

严酷度类别	定义	评分等级
灾难的	重大损害	9, 10
严重的	严重损害	7, 8
中等的	中等程度损害	4, 5, 6
轻度的	轻度损害	1, 2, 3,

表 2-3 发生频度等级 O 评分准则

发生可能性	发生频度参考范围	评分等级
非常高	$P_m > 10^{-1}$	9, 10
高	$1 \times 10^{-2} < P_m \leq 1 \times 10^{-1}$	7, 8
中等	$1 \times 10^{-4} < P_m \leq 1 \times 10^{-2}$	4, 5, 6
较低	$1 \times 10^{-6} < P_m \leq 1 \times 10^{-4}$	2, 3
极低	$P_m \leq 1 \times 10^{-6}$	1

表 2-4 可探测度等级 D 评分准则

探测性	准则	评分等级
几乎不可能	绝对肯定不可能探测	10
小	有很少的机会能探测	7, 8, 9
中	可能探测出	4, 5, 6
高	有较多机会可探测	2, 3
极高	肯定能探测出	1

基于上述的评分准则，由具备风电齿轮箱研究经验的三位专家组成评价小组，对 2MW 风电齿轮箱中各故障模式的三个指标进行评分，最终的结果如附录 1 中所示。其中，一位专家来自企业单位，另两位来自高校，视三位专家的权重相同。从评分结果可以看出，在此风电齿轮箱诸多故障模式中， RPN 最高的几种故障模式集中在高速级传动部件上，主要是平行轴大齿轮和输出齿轮轴，尤其是输出齿轮轴，其故障模式的 RPN 高达 150。故而对于齿轮箱整机而言，危害性较高的零部件是输出齿轮轴和平行轴大齿轮，危害性最大的故障模式是两个零部件中齿轮结构存在的故障模式。出现这两个零部件故障模式 RPN 值较高的原因在于两部件是齿轮箱中第三级传动主要零部件，两部件的转速都较高，尤其是输出轴。在高速传动过程中，齿轮啮合处易出现高温情况，以及在长时间载荷的循环作用下部件存在疲劳损伤，零部件性能呈现退化趋势，同时受润滑油液中杂质的影响会较高，其发生频度上较其它零部件故障模式较高。因此，在两个零部件的设计制造环节中，要保证其具有高质量高可靠的特点，在服役期间应密切关注其运行状况，并进行定期检修。

2.4 本章小结

FMECA 是常用于对系统进行故障分析的方法，本章对某公司的 2MW 风电齿

轮箱进行了传统的 FMECA 分析。在对整个系统结构原理进行分析的基础上,获得了潜在的故障模式,继而分析故障的原因以及影响,并提出一些建议措施,最后通过专家对风电齿轮箱中每个故障模式的三个指标进行评分,计算风险优先数来对故障模式的危害性进行排序,最终确定了齿轮箱中的危害性较高的零部件主要是高速级的输出齿轮轴和平行轴大齿轮。

第三章 基于改进 FMECA 方法的风电齿轮箱故障分析

传统的 FMECA 以各故障模式的风险优先数对故障模式排序，而风险优先数由三个评价要素直接相乘得到，即 $RPN = S \times O \times D$ 。但是在实际的应用过程中，该方法存在许多不足和缺陷^[89-91]，主要表现为以下几点：

(1) 在传统的 FMECA 方法中，三个评价因素 S 、 O 、 D 都是精确的数值，没有考虑评价对象的复杂性，以及专家评分时存在的主观性和模糊性特征，在风险评价过程中专家很难对三个评价因素作出准确的评价。很多时候，专家对某一故障模式进行评分时，常会出现几个不确定的值，例如，某专家认为某故障模式的严重度该取值为 5，但也可能取值为 8。

(2) 传统 FMECA 方法认为三个评价要素的重要性是相同的，忽略了其相对重要性；同时三个评价要素的取值范围都是 1~10，其排列组合有 1000 种方式，但它们相乘的结果只有 120 个不同的值，不同的评价要素取值会组合成相同的 RPN 值。例如，某故障模式的 S 、 O 、 D 取值分别为 2、4、6；另一故障的三个取值分别为 3、8、2，虽是两组不同的取值，但两个故障模式的 RPN 值都是 48。

(3) 在传统的方法中， RPN 值计算的方法缺乏科学依据，每个评价要素很小的变动可能造成 RPN 值的大变动。例如，某故障模式的严重度 S 取值为 8，发生频度 O 取值为 5，当探测度 D 的取值分别为 4 和 5 时，对应的 RPN 值分别为 160 和 200，探测度微小的变化导致了 RPN 出现较大的差异。

当评分专家无法准确对某故障模式给出评分分数时，存在较难抉择的问题，此时需要用一种数学方法描述这样的不确定性，保障专家打分结果能表达其真实想法。而三个评价因素的简单相乘过于直接，考虑其相对权重显得更加合理。为实现综合决策的结果，需要考虑一个综合排序指标，利用该指标对各故障模式进行排序，以此为后续维修检查等工作打下基础。

综上，传统的 FMECA 方法存在的不足和缺点体现在三个方面：对三个评价要素等级的描述、对评价要素权重的确定以及故障模式重要程度排序的方法。为克服上述的不足和缺陷，本章提出一种改进的 FMECA 方法，该方法使用模糊集理论量化专家对各故障模式的评价信息，通过综合赋权法对评价要素进行综合赋权，利用逼近理想解排序法（Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS）计算各故障模式的相对贴近度，依据相对贴近度对故障模式进行风险排序，改进方法的实施流程如图 3-1 所示。

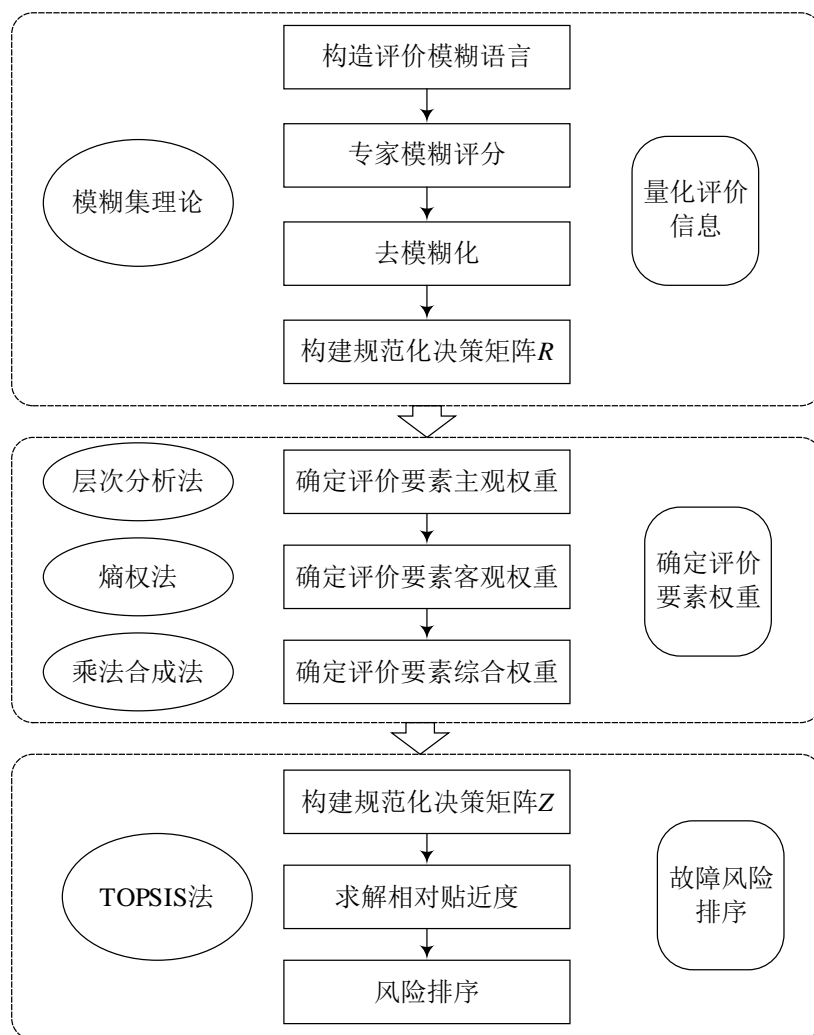


图 3-1 改进方法的实施流程

3.1 评价信息的量化

专家在对某一故障模式进行主观评价时，很难准确地提供一个精确数值来描述故障模式。对于事物的发展充满不确定性，模糊性是不确定性中的重要类别。模糊是指事物的上下边界不够明确，既在质上对事物没有确切的表述，又在量上没有限定确切的界限^[92]。模糊数学理论可以量化专家对事物特征的评价信息，模糊集正好能用来描述事物的模糊性。

3.1.1 模糊集理论

在生活中，常用二值逻辑来分辨和判断事物，表示具有明确概念的集合。模糊集理论中，元素对集合的隶属度取值为 0 到 1，而不是只有二值逻辑中的 0 或 1 两个值^[92]。

3.1.1.1 模糊集的定义及运算

设 \tilde{A} 是论域 X 上的一个模糊集，即：

$$\tilde{A}: X \rightarrow [0,1], x \mapsto \tilde{A}(x) \in [0,1]$$

其中， $\tilde{A}(\bullet)$ 是 \tilde{A} 的隶属函数， $\tilde{A}(x)$ 是 x 对 \tilde{A} 的隶属度，如图 3-2 所示，隶属度 $\tilde{A}(x)$ 表示 x 属于模糊集 \tilde{A} 的程度。若 $\tilde{A}(x)$ 只取 0 或 1，则模糊集 \tilde{A} 变成普通集合 A 。

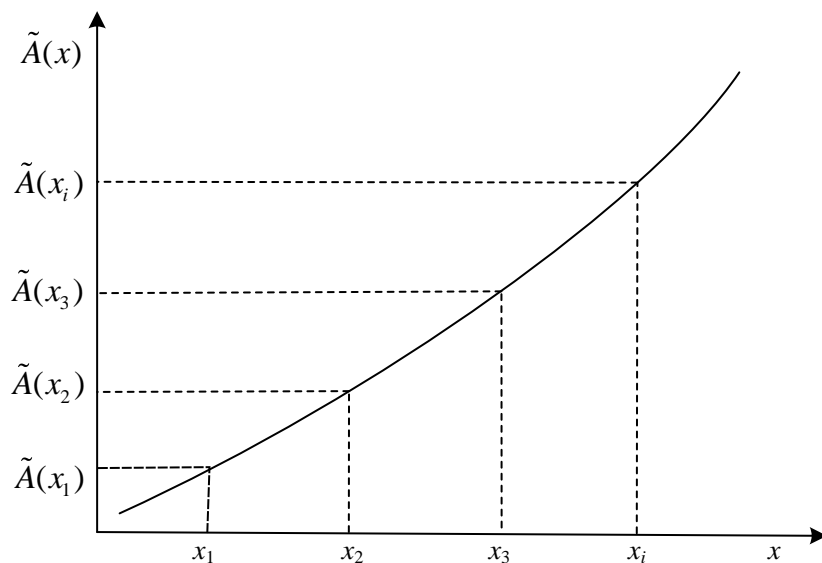


图 3-2 模糊集 \tilde{A} 的隶属函数

用向量法表示模糊集 \tilde{A} ，即：

$$\tilde{A} = (\tilde{A}(x_1), \tilde{A}(x_2), \dots, \tilde{A}(x_n)) \quad (3-1)$$

用 Zadeh 表示法表示模糊集 \tilde{A} ，即：

$$\tilde{A} = \frac{\tilde{A}(x_1)}{x_1} + \frac{\tilde{A}(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\tilde{A}(x_n)}{x_n} \quad (3-2)$$

其中， $\frac{\tilde{A}(x_i)}{x_i}$ 表示 $\tilde{A}(x_i)$ 与 x_i 的对应关系，“+”表示各项汇总。

假设 $x \in X$ ，有模糊集 $\tilde{A} = \{\tilde{A}(x_1), \tilde{A}(x_2), \dots, \tilde{A}(x_n)\}$ 和 $\tilde{B} = \{\tilde{B}(x_1), \tilde{B}(x_2), \dots, \tilde{B}(x_n)\}$ ， \tilde{A} 和 \tilde{B} 的并、交、补运算分别为：

$$\tilde{A} \cup \tilde{B} = \max \{ \tilde{A}(x), \tilde{B}(x) \} = \tilde{A}(x) \vee \tilde{B}(x) \quad (3-3)$$

$$\tilde{A} \cap \tilde{B} = \min \{ \tilde{A}(x), \tilde{B}(x) \} = \tilde{A}(x) \wedge \tilde{B}(x) \quad (3-4)$$

$$\tilde{A}^c(x) = 1 - \tilde{A}(x) \quad (3-5)$$

3.1.1.2 模糊集的隶属函数

隶属函数 $\tilde{A}(x)$ 表征元素 x 对模糊集 \tilde{A} 的隶属程度, $\tilde{A}(x)$ 的取值区间是 $[0,1]$ 。
 $\tilde{A}(x)$ 越大, x 对模糊集 \tilde{A} 隶属程度越高。常用隶属函数有:

(1) 三角分布隶属函数

设 \tilde{A} 是三角模糊数, 其隶属函数形式如图 3-3 所示。

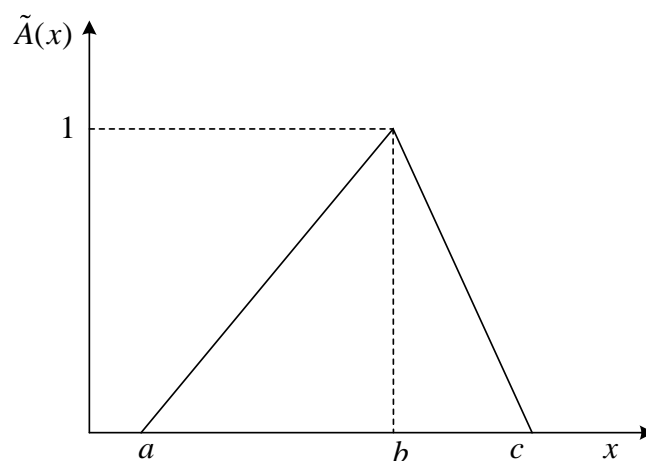


图 3-3 三角模糊数的隶属函数

其隶属函数可表示为:

$$\tilde{A}(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & x \in [a, b) \\ (c-x)/(c-b) & x \in [b, c] \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3-6)$$

(2) 梯形分布隶属函数

设 \tilde{A} 是梯形模糊数, 其隶属函数形式如图 3-4 所示。

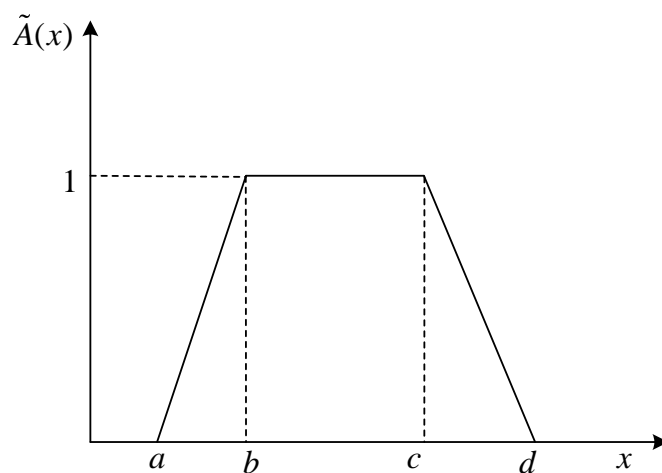


图 3-4 梯形模糊数的隶属函数

其隶属函数可表示为:

$$\tilde{A}(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & x \in [a, b) \\ 1 & x \in [b, c) \\ (d-x)/(d-c) & x \in [c, d] \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3-7)$$

(3) 正态分布隶属函数

设 \tilde{A} 是正态模糊数, 其隶属函数形式如图 3-5 所示。

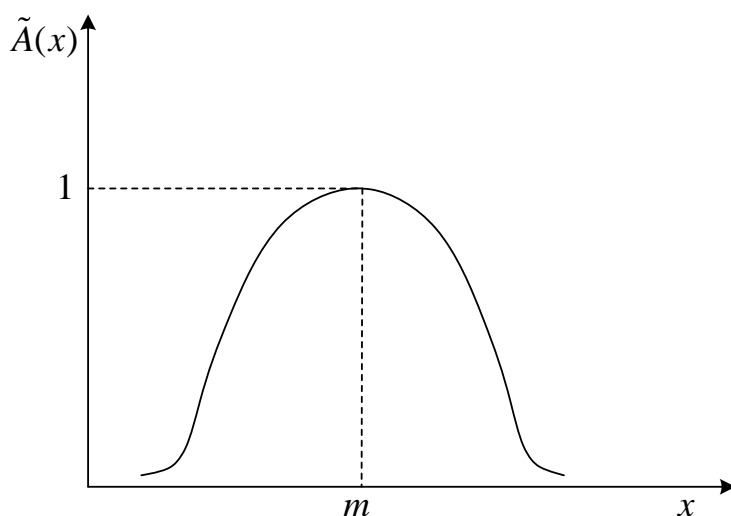


图 3-5 正态模糊数的隶属函数

其隶属函数可表示为:

$$\tilde{A}(x) = k \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \sigma > 0 \quad (3-8)$$

其中, m 和 σ 分别是 \tilde{A} 的均值和方差, k 是修正系数。

3.1.1.3 去模糊化方法

去模糊化是将一个模糊集映射为一个清晰数, 这个值称为非模糊值。去模糊化往往是模糊分析过程的最后一步, 有学者提出了如下的一些去模糊化准则^[92,93]:

- (1) 非模糊性准则。结果应该是一个非模糊值。
- (2) 似然性准则。非模糊值应该在输出模糊集的主区域附近, 并且具有较大的隶属度。
- (3) 简单性准则。要求计算简便。
- (4) 连续性准则。隶属度的小变化不应使得非模糊值产生大变化。

在诸多去模糊化方法中，应用较为广泛的方法是质心法，假设实数集合 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ， \tilde{A} 是 X 上的模糊集，其隶属函数是 $\tilde{A}(x)$ ，则其非模糊值 x^* 为：

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \tilde{A}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \tilde{A}(x_i)} \quad (3-9)$$

有学者^[94]提出一种简易的去模糊化方法，经过该方法的去模糊运算，可以得到模糊集对应的非模糊值 $K(x)$ ，即：

$$K(x) = \frac{\sum_{i=0}^n (b_i - c)}{\sum_{i=0}^n (b_i - c) - \sum_{i=0}^n (a_i - d)} \quad (3-10)$$

以梯形模糊数的隶属函数为例，如图 3-6 所示。其中 c 和 d 分别是有决策者制定的最小界限（minimizing barrier）和最大界限（maximizing barrier）。

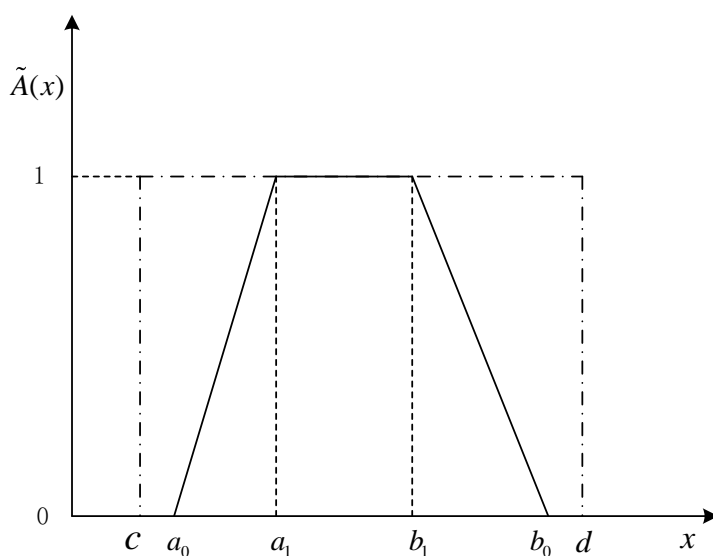


图 3-6 梯形模糊数的隶属函数

3.1.2 基于模糊集理论的评价信息量化

传统的 FMECA 方法一般将评价要素 S 、 O 、 D 直接打分，评分取值 1~10，但是在实际评估过程中，评估人员难以判定故障模式所属等级。本章基于模糊集理论，以模糊语言变量构造三个评价要素的模糊评价等级，将模糊语义定义为很低（VL）、低（L）、中等（M）、高（H）和很高（VL）五个评价等级，采用梯形模糊数对五个评价等级进行量化，其隶属函数如图 3-7 所示。

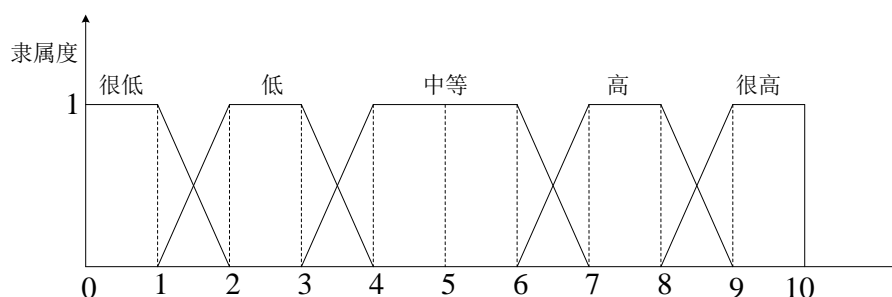


图 3-7 模糊语言变量的隶属函数

基于传统 FMECA 方法中对三个评价要素的等级评分以及评定准则，可建立各模糊语言变量对三个评价要素：严重度（ S ）、发生频度（ O ）、可探测度（ D ）的评定准则以及对应的模糊数。其中可探测度的描述与另外两个评价要素的评价等级有差异，当对可探测度的评价越低时，表示故障越难被检测，评分值应该越高；如上述语言术语“低”，对于故障严重度和发生频度都是处于低的状态，故其对应的模糊数如图 3-6 中描述的（1，2，3，4），而对于可探测度“低”这一评价等级，描述为有较低的概率探测出故障，其对应的模糊数应为（6，7，8，9），出现与上述语言变量的模糊数相反的情况。因此，借用一些学者^[89,91]的方法，以难检度代替可探测度作为评价要素。三个评价要素：严重度（ S ）、发生频度（ O ）、难检度（ D ）的具体评价准则分别如表 3-1~表 3-3 所示。

表 3-1 严重度 S 的评价准则

评价等级	等级描述	模糊数
很低（VL）	故障影响几乎没有	（0，0，1，2）
低（L）	故障产生轻微影响	（1，2，3，4）
中等（M）	故障产生中度影响	（3，4，6，7）
高（H）	故障产生严重影响	（6，7，8，9）
很高（VH）	故障产生非常严重的影响	（8，9，10，10）

表 3-2 发生频度 O 的评价准则

评价等级	等级描述	模糊数
很低（VL）	故障几乎不太可能发生	（0，0，1，2）
低（L）	故障较小概率发生	（1，2，3，4）
中等（M）	故障偶尔发生	（3，4，6，7）
高（H）	故障常会发生	（6，7，8，9）
很高（VH）	故障的发生几乎不能避免	（8，9，10，10）

表 3-3 难检度 D 的评价准则

评价等级	等级描述	模糊数
很低 (VL)	故障几乎不能检测到	(0, 0, 1, 2)
低 (L)	故障能检测到的概率较低	(1, 2, 3, 4)
中等 (M)	故障能检测到的概率中等	(3, 4, 6, 7)
高 (H)	故障能检测到的概率较大	(6, 7, 8, 9)
很高 (VH)	故障能检测到的概率极大	(8, 9, 10, 10)

与传统 FMECA 评价打分方法相比,评价人员基于上述评价等级对对象进行评价时,评价方式更具多样性。评价人员可以对各评价要素评为上述五个基础的评价等级,另外也可以扩大评价等级的模糊数范围,包含了更多评价人员的主观不确定性。例如,对某故障模式的严重度进行评价时,某评价人员认为其严重度处于“低”评价等级,而另一个人员认为该故障的严重度处于“低”和“中等”之间,同时也在评价中对每个等级可赋予权重,如处于“低”的可能性为 30%,而处于中等的可能性为 70%。

假设有 N 名人员对各故障模式的三个评价要素进行评价,第 k 名评价人员的权重为 γ_k ,即 $\sum_{k=1}^N \gamma_k = 1$, $\gamma_k > 0$ 。各评价人员对三个评价要素进行评价,评价结果表示为 $\{E_{ij}, \omega_{ij}\}$, E_{ij} 表示评价者对某要素的评级结果, ω_{ij} 表示评价者赋予该结果的可能性,其中 i 和 j 的取值集合为 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, $i \leq j$ 。以下对评价体系进行详细描述。

评价者对某故障模式的某要素评价为 $\{E_{11}, 1.0\}$,表示该评价者认为该故障模式的此评价要素为“很低”等级,其可能性为 100%。另外,其他某评价人员提出不同意见,作出如 $\{(E_{11}, 0.7), (E_{12}, 0.3)\}$ 的评价,表示该人员认为该故障模式的此评价要素为“很低”等级的可能性有 70%,而介于“很低”和“低”之间的可能性有 30%。在评价人员对要素进行评价时,采取的是完全评价方式,即某人员在对该故障模式的某要素进行评价时,多个评价等级的可能性之和为 100%。

基于式 (3-10) 所示去模糊化方法在梯形模糊数中的应用,其中, c 取值为评分最小值 0, d 取值为评分最大值 10,得到模糊语言评级 E_{ij} 对应的非模糊值 e_{ij} 如表 3-4 所示。

表 3-4 语言评级去模糊化后对应的非模糊值

语言评级	e_{ij}	语言评级	e_{ij}	语言评级	e_{ij}
E_{11}	0.1304	E_{22}	0.2917	E_{34}	0.5667
E_{12}	0.2593	E_{23}	0.4333	E_{35}	0.6061
E_{13}	0.3939	E_{24}	0.5000	E_{44}	0.7083
E_{14}	0.4595	E_{25}	0.5405	E_{45}	0.7407
E_{15}	0.5000	E_{33}	0.5000	E_{55}	0.8696

在表 3-4 中，如语言评级“ E_{22} ”，其对应的模糊数为（1，2，3，4），即 $a_0=1$ ， $a_1=2$ ， $b_0=3$ ， $b_1=4$ ，带入式（3-10）中，可得到对应的非模糊值为：

$$e_{22} = \frac{(b_0 - c) + (b_1 - c)}{[(b_0 - c) + (b_1 - c)] - [(a_0 - d) + (a_1 - d)]} = 0.2917$$

又如语言评级“ E_{13} ”，其对应的模糊数为（0，0，6，7），即 $a_0=0$ ， $a_1=0$ ， $b_0=6$ ， $b_1=7$ ，带入式（3-10）中，可得到对应的非模糊值为：

$$e_{13} = \frac{(b_0 - c) + (b_1 - c)}{[(b_0 - c) + (b_1 - c)] - [(a_0 - d) + (a_1 - d)]} = 0.3939$$

综上所述，可通过式（3-11）加权得到多个评价人员对某故障模式的某评价因素的明确数值。

$$x = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \gamma_k e_{ij}^k \omega_{ij}^k \quad (3-11)$$

其中， e_{ij}^k 表示第 k 位评价人员对某评价要素评级为 E_{ij} 等级时对应的非模糊值， ω_{ij}^k 表示第 k 位评价人员对某评价要素评级为 E_{ij} 等级时的可能性取值。

设研究对象存在 M 种故障模式。评价人员对各故障模式的三个评价要素进行模糊评价，最终经上述处理后得到评估结果为 x_{ml} ，表示第 m 个故障模式的 l 项评价要素的明确数值。其中， $l=1$ 表示严重度， $l=2$ 表示发生度， $l=3$ 表示难检度。这些结果构建成一个决策矩阵 X ：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & x_{M3} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

考虑不同物理量纲对结果的影响，采用向量规范化方法规范化决策矩阵。规范化决策矩阵 R 为：

$$R = (r_{ml})_{M \times 3}, \quad r_{ml} = \frac{x_{ml}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M x_{ml}^2}} \quad (3-13)$$

式中， $m \in M$ ； $l=1,2,3$ 。

3.2 评价要素权重的确定

传统 FMECA 方法在计算风险优先数 RPN 值时考虑三个风险因素 S 、 O 、 D 的重要性是相同的，这在实际应用中是不合理的。一些研究学者认为三者的重要度应遵循严重度 S 大于发生频度 O 大于难检度 D 的准则，也有学者认为只要严重度大于其余两个即可。为了更全面探讨三个评价要素的相对权重，本研究同时考虑评价要素的主客观权重，采用综合赋权方法集成主、客观权重，得到三个评价要素综合相对权重值。

3.2.1 基于层次分析法的评价要素主观权重的确定

层次分析法^[95]通过自上而下的逻辑将复杂的决策对象分解为不同的层次，从而得到层次之间具有单向关系的层次结构，它能够通过对同一层次中元素进行两两比较来获得目标元素的优先级，被广泛应用于各行业风险评价中。层次分析法的实施过程如图 3-8 所示。

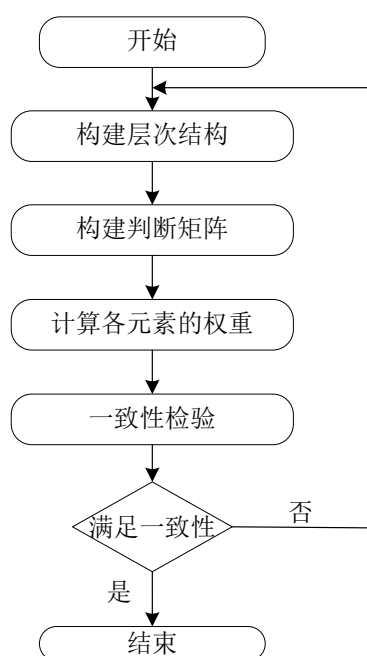


图 3-8 层次分析法的实施流程

(1) 构建层次结构模型

决策者将研究问题视为系统进行分层，用树状图描述其隶属关系。

(2) 构建判断矩阵

假设判断矩阵为 A ，则有 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ ，表示有 n 个元素进行两两比较，第 i 个元素与第 j 个元素比较后的相对重要度为 a_{ij} ， $i=1,2,\dots,n$ ， $j=1,2,\dots,n$ 。 a_{ij} 的取值为 0~9 之间的数值，依据不同的相对重要程度取不同的数值，判断准则如表 3-5 所示。

表 3-5 判断矩阵相对重要度等级

程度描述	a_{ij}	a_{ji}
极其重要	9	1/9
非常重要	7	1/7
明显重要	5	1/5
略微重要	3	1/3
同等重要	1	1
上述相邻等级之间	17/2, 8, 15/2, 13/2, 6, 11/2, 9/2, 4, 7/2, 5/2, 2, 3/2	2/17, 1/8, 2/15, 2/13, 1/6, 2/11, 2/9, 1/4, 2/7, 2/5, 1/2, 2/3

(3) 计算各元素的权重

求解判断矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 和对应的特征向量 ω ，如式 (3-14) 所示。

$$A\omega = \lambda_{\max} \omega \quad (3-14)$$

归一化处理，可得各元素的权重向量 ω_A 。

$$\omega_A = \frac{\omega}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad \omega = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \dots \quad \omega_n]^T \quad (3-15)$$

(4) 一致性检验

判断矩阵中各数值是通过风险因素的重要性两两比较得到，由于在比较时没有固定的参照，需要检验特征向量是否能够代表风险因素权重。因此，对其进行一致性检验，一致性指标 $C.I.$ 为：

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3-16)$$

当 $C.I.$ 越小，一致性越满意。

引入一致检验系数 $C.R.$ 作为最终检验标准, 其计算式为:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (3-17)$$

$C.R.$ 值越小越好。若 $C.R. < 0.1$, 认为判断矩阵通过一致性检验。其中, $R.I.$ 为随机一致性指标, 与矩阵的阶数有关, $R.I.$ 取值如表 3-6 所示。

表 3-6 随机一致性指标 $R.I.$

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R.I.$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

3.2.2 基于熵权法的评价要素客观权重的确定

熵权法是根据指标变异性的确定指标权重的方法, 指标的熵值越大, 赋予该指标的权重越小。以 3.1 节中的规范化决策矩阵 R 作为客观数据源, 利用熵权法对三个评价要素进行客观赋权。其计算过程如下:

首先, 基于规范化决策矩阵 R 计算第 l 个评价要素的熵 S_l :

$$S_l = -k \sum_{m=1}^M (f_{ml} \ln(f_{ml})) \quad (3-18)$$

式中, $f_{ml} = \frac{r_{ml}}{\sum_{m=1}^M r_{ml}}$, $k = \frac{1}{\ln M}$, $m = 1, 2, \dots, M$, $l = 1, 2, 3$ 。

然后, 计算信息熵冗余度 H_l :

$$H_l = 1 - S_l \quad (3-19)$$

最后, 归一化得到评价要素的客观权重 β_l :

$$\beta_l = \frac{H_l}{\sum_{l=1}^3 H_l} \quad (3-20)$$

3.2.3 基于乘法合成法的评价要素综合权重的确定

综合集成赋权法^[96]是依据不同的偏好系数将主观权重和客观权重相结合, 乘法合成法是一种常用的方法。采用乘法合成法集成主观权重 ($\omega_s^A, \omega_o^A, \omega_d^A$) 和客观权重 ($\omega_s^S, \omega_o^S, \omega_d^S$) 的计算式为:

$$\omega_l = \frac{\omega_l^A \omega_l^S}{\sum_{l=1}^3 \omega_l^A \omega_l^S} \quad (3-21)$$

3.3 基于 TOPSIS 的故障风险排序

TOPSIS 法^[97]是通过构造 n 维属性空间的正负理想解, 计算各评价对象与理想解的距离, 以相对贴近度对各评价对象进行排序。其中, 正理想解是指各属性特征都达到备选方案中最好效果的解; 负理想解是各属性特征都达到备选方案中的最差效果的解。该方法的步骤为:

(1) 构建规范化决策矩阵 Z

结合规范化决策矩阵 R 和三个评价要素的综合权重 ω_L , 通过加权构建考虑评价要素相对权重时的规范化决策矩阵 Z :

$$Z = (z_{ml})_{M \times 3}, \quad z_{ml} = r_{ml} \omega_l \quad (3-22)$$

(2) 确定正理想解 S^+ 和负理想解 S^- :

$$\begin{aligned} S^+ &= (z_1^+, z_2^+, z_3^+) \\ S^- &= (z_1^-, z_2^-, z_3^-) \end{aligned} \quad (3-23)$$

式中, $z_l^+ = \max\{z_{ml}\}$, $z_l^- = \min\{z_{ml}\}$, $l = 1, 2, 3$ 。

(3) 求解评价对象与理想解的欧氏距离 d_m^+ 和 d_m^- :

$$\begin{aligned} d_m^+ &= \|Z_{ml} - S^+\| = \sqrt{\sum_{l=1}^3 (z_{ml} - z_l^+)^2} \\ d_m^- &= \|Z_{ml} - S^-\| = \sqrt{\sum_{l=1}^3 (z_{ml} - z_l^-)^2} \end{aligned} \quad (3-24)$$

(4) 计算相对贴近度 C_m :

$$C_m = \frac{d_m^-}{d_m^+ + d_m^-} \quad (3-25)$$

采用相对贴近度作为新的排序指标, C_m 的值越大表示评价对象对系统造成的风险越大, 需要更多的关注。

3.4 风电齿轮箱故障危害性分析

在对风电齿轮箱各故障模式进行危害性分析时, 传统的 FMECA 方法存在一些不足, 改进后的 FMECA 方法大大弥补了这些不足。本节结合第二章对风电齿

轮箱故障模式的分析结果对所提方法进行验证。

3.4.1 量化评价信息

本研究依旧邀请 2.3.2 章节中三位专家 (P_1 、 P_2 、 P_3) 对风电齿轮箱中各故障模式的三个评价要素 S 、 O 及 D 进行模糊评分, 分配三位专家的权重为 γ_k ($k=1,2,3$), 取值分别为 0.5、0.3、0.2。三位专家对风电齿轮箱中 65 种故障模式的最终评价结果如附录 2 所示。

结合表 3-4 和式 (3-11), 构建的决策矩阵 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} 0.3167 & 0.4630 & 0.4760 \\ 0.4326 & 0.4068 & 0.4454 \\ 0.3962 & 0.2804 & 0.5067 \\ 0.6301 & 0.1562 & 0.3999 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ 0.2623 & 0.2753 & 0.2912 \\ 0.4609 & 0.3711 & 0.1562 \\ 0.2766 & 0.1691 & 0.2607 \\ 0.3133 & 0.2288 & 0.1304 \end{bmatrix}_{65 \times 3}$$

依据式 (3-13) 可得规范化决策矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.0848 & 0.1614 & 0.1492 \\ 0.1158 & 0.1418 & 0.1397 \\ 0.1061 & 0.0978 & 0.1589 \\ 0.1687 & 0.0545 & 0.1254 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ 0.0702 & 0.0960 & 0.0913 \\ 0.1234 & 0.1294 & 0.0490 \\ 0.0740 & 0.0590 & 0.0817 \\ 0.0839 & 0.0798 & 0.0409 \end{bmatrix}_{65 \times 3}$$

3.4.2 确定评价要素的权重

(1) 评价要素的主客观权重

直接视三个评价要素 S 、 O 、 D 的相对重要性相同是不合理的, 层次分析法可以用来对三者的主观权重进行分析。层次分析法需要决策者构造一个判断矩阵,

同样地，由上述三位评价专家各自给出关于三个评价要素的两两比较信息，如表 3-7~表 3-9 所示。

表 3-7 三个要素的判断矩阵（专家一）

	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>
<i>S</i>	1	3/2	2
<i>O</i>	2/3	1	3/2
<i>D</i>	1/2	2/3	1

表 3-8 三个要素的判断矩阵（专家二）

	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>
<i>S</i>	1	2	2
<i>O</i>	1/2	1	1
<i>D</i>	1/2	1	1

表 3-9 三个要素的判断矩阵（专家三）

	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>
<i>S</i>	1	2	3/2
<i>O</i>	1/2	1	2/3
<i>D</i>	2/3	3/2	1

构造各专家的判断矩阵 A_1 、 A_2 和 A_3 ，为：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3/2 & 2 \\ 2/3 & 1 & 3/2 \\ 1/2 & 2/3 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3/2 \\ 1/2 & 1 & 2/3 \\ 2/3 & 3/2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算三个判断矩阵的最大特征值分别为 $\lambda_1=3.0015$ 、 $\lambda_2=3$ 、 $\lambda_3=3.0015$ ，对应的特征向量为：

$$\omega_1 = (-0.7643 \quad -0.5299 \quad -0.3674)$$

$$\omega_2 = (0.8165 \quad 0.4082 \quad 0.4082)$$

$$\omega_3 = (-0.7643 \quad -0.3674 \quad -0.5299)$$

归一化处理后得到：

$$\omega_{A1} = [0.4600 \quad 0.3189 \quad 0.2211]$$

$$\omega_{A2}=[0.5 \quad 0.25 \quad 0.25]$$

$$\omega_{A3}=[0.4600 \quad 0.2211 \quad 0.3189]$$

依据式 (3-16) 和 (3-17) 进行一致性检验, $C.I._{A1}=0.0015$, $C.I._{A2}=0$, $C.I._{A3}=0.0015$, 均小于 0.1, 故 ω_{A1} 、 ω_{A2} 与 ω_{A3} 皆可作为三个评价要素的权重向量。因三位评价人员的权重比分别为 0.5、0.3、0.2, 可得到三个评价要素最终的主观权重向量 ω_A 为:

$$\omega_A=(0.4720 \quad 0.2787 \quad 0.2493)$$

(2) 评价要素的客观权重

以专家组对各故障模式的评价信息作为客观评价信息, 即规范化决策矩阵 R , 采用熵权法可得到三个评价要素的客观权重向量 ω_S 为:

$$\omega_S=(0.1975 \quad 0.4748 \quad 0.3277)$$

(3) 评价要素的综合权重

依据式 (3-21), 可得到三个评价要素的综合权重向量 ω_L 为:

$$\omega_L=(0.3035 \quad 0.4306 \quad 0.2659)$$

3.4.3 故障风险排序

考虑评价要素的权重 ω_L , 对规范化决策矩阵 R 更新后可得到矩阵 Z 为:

$$Z=\begin{bmatrix} 0.0257 & 0.0695 & 0.0397 \\ 0.0351 & 0.0611 & 0.0371 \\ 0.0322 & 0.0421 & 0.0422 \\ 0.0512 & 0.0235 & 0.0333 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0.0213 & 0.0413 & 0.0243 \\ 0.0374 & 0.0557 & 0.0130 \\ 0.0225 & 0.0254 & 0.0217 \\ 0.0254 & 0.0344 & 0.0109 \end{bmatrix}_{65 \times 3}$$

确定正理想解 S^+ 和负理想解 S^- , 即:

$$S^+=(0.0562 \quad 0.1000 \quad 0.0445)$$

$$S^-=(0.0193 \quad 0.0234 \quad 0.0109)$$

依据式 (3-24) 和式 (3-25), 可得到各故障模式的排序指标 C_m , 将其与传统

FMECA 方法相比较, 具体如表 3-10 所示。

表 3-10 各故障模式的 C_m 和最终排序

代号	C_m	排序	传统 排序	代号	C_m	排序	传统 排序	代号	C_m	排序	传统 排序
G1	0.6142	13	20	B8	0.2241	36	37	A14	0.1410	50	39
G2	0.5395	21	12	B9	0.5379	22	7	A15	0.1734	44	49
G3	0.2757	34	22	B10	0.6073	14	12	A16	0.0995	56	57
G4	0.2020	41	47	B11	0.1157	55	44	A17	0.9663	1	1
G5	0.1477	49	51	B12	0.2241	36	31	A18	0.9366	2	2
G6	0.6572	11	20	B13	0.5410	20	7	A19	0.9240	3	17
G7	0.4309	28	12	B14	0.5691	18	22	A20	0.9070	4	4
G8	0.4210	29	22	B15	0.1284	53	52	A21	0.7723	7	3
G9	0.3106	31	35	B16	0.2241	36	39	A22	0.5229	25	35
G10	0.1699	45	38	A1	0.6297	12	22	A23	0.4061	30	44
G11	0.7618	8	5	A2	0.5817	17	22	A24	0.2140	40	52
G12	0.8031	6	5	A3	0.2696	35	22	L1	0.1662	46	56
G13	0.7295	10	17	A4	0.1862	43	33	L2	0.0386	61	59
G14	0.8592	5	11	A5	0.1352	52	42	L3	0.0361	62	62
G15	0.7310	9	17	A6	0.1410	50	39	L4	0.0008	65	63
B1	0.5252	23	7	A7	0.1521	48	52	L5	0.0852	60	55
B2	0.5907	16	12	A8	0.0995	56	57	L6	0.0922	58	63
B3	0.1587	47	44	A9	0.5981	15	22	L7	0.0904	59	60
B4	0.2241	36	31	A10	0.4309	27	22	O1	0.2942	33	47
B5	0.5239	24	7	A11	0.5078	26	22	O2	0.0179	64	63
B6	0.5691	18	12	A12	0.3041	32	33	O3	0.0240	63	60
B7	0.1178	54	49	A13	0.1933	42	42				

从表 3-10 中可知, 与传统的 FMECA 方法相比较, 改进的方法对故障模式风险排序的划分更加具体, 由于专家评价环节更具多样性, 在 65 种故障模式中, 只有少部分故障模式的排序相同, 该方法大大提高了风险排序的准确度。相比之下, 由于传统方法的分析结果存在大量相同的 RPN 值, 导致对于相同排序的故障模式的风险优先等级没有更明确的划分。另外, 由于专家的模糊评价方法以及各种权重比的引入, 导致故障模式新的排序与传统方法的排序存在差异, 该方法也更能

有效的应用专家经验信息，同时更加贴合理想评分效果，最终的结果也较传统方法更为可信。

通过将改进 FMECA 方法应用到风电齿轮箱的故障分析中，可以得到风电齿轮箱最为薄弱零件是高速级输出齿轮轴，其次是平行轴大齿轮，这与传统方法得到的结果是一致的，确实也是符合实际的。两个高速运转的齿轮磨损和疲劳尤为严重，零件的失效模式发生概率也会比较高，且对于整个齿轮箱，齿轮是最为重要的零件之一，故其风险程度在诸多零件中是比较高的。

3.5 本章小结

在传统的 FMECA 方法中，对于分析对象的风险排序过于简单，存在很多缺点，因此本章对传统的 FMECA 方法作出改进。首先，引入模糊集理论，用模糊数量化专家评价信息，考虑了专家评分的不确定性，更贴合专家的评分效果。其次，考虑故障模式的三个评价要素 S 、 O 、 D 的相对权重，以层次分析法确定评价要素的主观权重，以熵权法确定其客观权重，应用乘法合成法结合主客观权重，确定评价要素的综合权重。最后，采用逼近理想解排序法对故障模式进行风险排序，保证排序结果更为准确。同时，本章将该方法应用到风电齿轮箱故障分析中，最终的排序结果显示，风电齿轮箱中的高速输出齿轮轴是风险程度较高的零件，长时间的高速运转会导致该零件磨损和疲劳，更容易发生失效，进而影响到整个风电齿轮箱的运行。

第四章 考虑强度退化的齿轮可靠性分析

长寿命产品的失效过程是连续的状态改变过程，从正常工作状态逐步退化，最终退化量到达失效阈值时产品失效。风电齿轮箱中的机械零部件需要具备高性能特征，才能保证齿轮箱的长期稳定运行。

齿轮是风电齿轮箱中最为重要的零件之一，它的破坏将导致整个齿轮传动系统受到严重影响。在前面的分析中可知，齿轮是整个风电齿轮箱中风险最高的零件，尤其是高速级的齿轮。齿轮传动过程中，磨损过程一直在发生，同时由于润滑不充分、齿面质量较差等原因，齿面常发生胶合和点蚀，以及会加快磨损的速度，轮齿产生塑性变形或者生成裂纹，严重时可能发生齿轮折断。在闭式齿轮失效模式的研究中，齿轮的接触疲劳特性和弯曲疲劳特性是研究的重点内容，齿面接触疲劳和齿根弯曲疲劳是齿轮两种极为重要的失效模式。同时，齿轮受到多种载荷的作用，而同一载荷的作用会导致多种失效模式的发生。故需要考虑两失效模式间和啮合传动齿轮间存在的相关性，保证研究结果更符合实际齿轮可靠性水平。

在齿轮箱系统的长期服役过程中，其疲劳强度是在不断退化的。表征当前退化状态的数据是很难获取的，存在数据缺失的情况。在已有研究中，有学者^[98,99]通过材料的 $P-S-N$ 曲线获取结构强度退化信息，为强度退化分析提出新思路。

本章以齿轮的两种疲劳失效为主要研究内容，考虑到机械零件强度退化过程中存在的随机性与不可逆性特征，应用 Gamma 随机过程来表征其强度退化过程，利用 $P-S-N$ 曲线拟合 Gamma 过程中的参数，构建齿轮的强度退化随机模型。同时，考虑齿轮各失效模式间的相关性和齿轮传动级中不同齿轮间的相关性，进行可靠性评估。

4.1 强度退化模型

4.1.1 Gamma 随机过程

Gamma 过程是一个独立非负的增量过程，可用于描述产品性能退化过程。其定义如下：

设 $\{X(t), t \geq 0\}$ 是 Gamma 过程，其形状参数为 $\alpha(t) > 0$ ，尺度参数为 $\beta > 0$ ，它满足以下性质：

- (1) $X(0) = 0$ 且概率等于 1；

(2) $X(t)$ 具有独立增量;

(3) 当 $t > s \geq 0$ 时, 增量 $X(t) - X(s)$ 服从 Gamma 分布, 即

$$X(t) - X(s) \sim Ga(\alpha(t) - \alpha(s), \beta)$$

其中, $Ga(x|\alpha(t), \beta)$ 的概率密度函数为:

$$f(x|\alpha(t), \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta^{\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} I_{(0, \infty)}(x) \quad \alpha(t) > 0, \beta > 0 \quad (4-1)$$

式中, $I_{(0, \infty)}(x) = \begin{cases} 1 & x \in (0, \infty) \\ 0 & x \notin (0, \infty) \end{cases}$, $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ 为 Gamma 函数。

Gamma 过程的数学期望和方差为:

$$E(X(t)) = \frac{\alpha(t)}{\beta} \quad (4-2)$$

$$D(X(t)) = \frac{\alpha(t)}{\beta} \quad (4-3)$$

根据研究表明^[100], 形状参数与时间有如下关系:

$$\alpha(t) = kt^b \quad (4-4)$$

其中, k 为常数。若 $b=1$ 时, Gamma 过程为平稳过程。

若产品的退化失效阈值为 D , 用 Gamma 随机过程描述退化过程, 则产品退化量首次达到失效阈值的寿命 T 为:

$$T = \inf \{t | X(t) \geq D\} \quad (4-5)$$

进而, 产品在时刻 t 时的可靠度 $R(t)$ 为:

$$R(t) = \Pr\{X(t) < D\} = \int_0^D f(x) dx = \frac{\int_0^{D\beta} u^{\alpha(t)-1} e^{-u} du}{\Gamma(\alpha(t))} \quad (4-6)$$

寿命 T 的概率密度函数为:

$$f(t) = \frac{\alpha'(t)}{\Gamma(\alpha(t))} \int_{D\beta}^{\infty} \left\{ \ln(u) - \frac{\Gamma'(\alpha(t))}{\Gamma(\alpha(t))} \right\} u^{\alpha(t)-1} e^{-u} du \quad (4-7)$$

其分布函数为:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \frac{\int_0^{D\beta} u^{\alpha(t)-1} e^{-u} du}{\Gamma(\alpha(t))} \quad (4-8)$$

式中, $\alpha'(t)$ 是 $\alpha(t)$ 对 t 的导数。

4.1.2 材料的 P - S - N 曲线

材料的 S - N 曲线^[101,102]用于描述材料疲劳性能,表征应力水平 S 与失效循环次数(即疲劳寿命) N 之间的关系。完整的 S - N 曲线分为:低周疲劳区(LCF)、高周疲劳区(HCF)和亚疲劳区(SF),典型的材料 S - N 曲线如图 4-1 所示。其中, σ_a 为试验样件的静强度, σ_b 为疲劳强度极限。

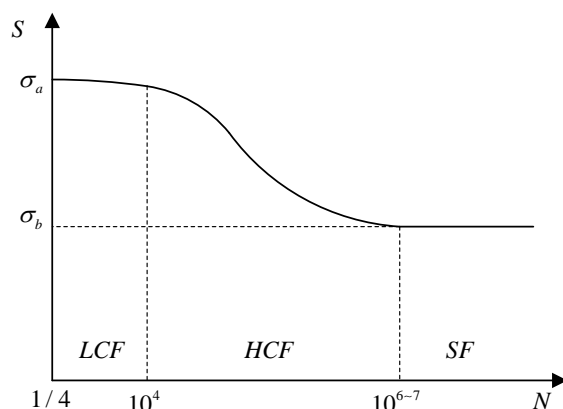


图 4-1 典型的材料 S - N 曲线

在描述材料 S - N 曲线特征时,常用的经验公式主要有:

(1) 指数函数公式

$$N \cdot e^{mS} = C \quad (4-9)$$

式中, m 和 C 为材料常数; S 是加载的应力幅值; N 为疲劳寿命。两边取自然对数得:

$$\ln N = \ln C - mS = a + bS \quad (4-10)$$

式中, a 和 b 为材料常数。

(2) 幂函数公式

$$N \cdot S^m = C \quad (4-11)$$

式中, m 和 C 为材料常数。对两边取对数得:

$$\log N = \log C - mS = a + bS \quad (4-12)$$

式中, a 和 b 为材料常数。

(3) 三参数公式

$$(N+b)(S-\sigma_b)^m = C \quad (4-13)$$

式中, b 、 m 和 C 为材料常数, σ_b 为材料的疲劳强度极限。

在试验中, $S-N$ 曲线的试验数据受作用载荷、试件特征、材料特征以及制造工艺等因素影响, 存在明显的分散性^[103]。试验试件的疲劳寿命呈现一定分布规律, 根据一定的存活率 P 可确定 N 的值, 多条独立的 $S-N$ 曲线构成 $P-S-N$ 曲线集。一般地, 常用的 $S-N$ 曲线是存活率为 0.5 时的曲线, 即中值曲线。图 4-2 为典型的 $P-S-N$ 曲线。

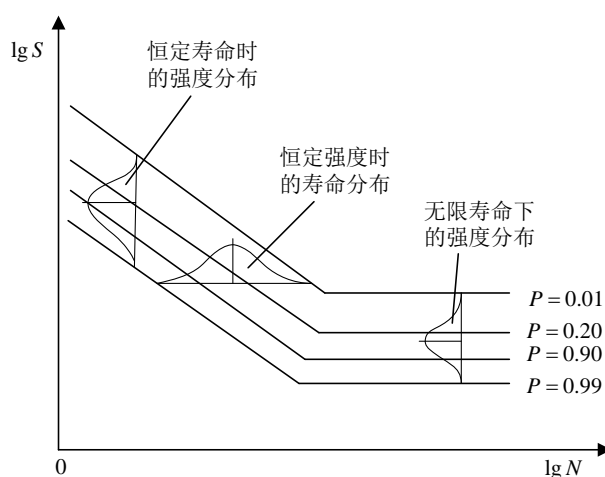


图 4-2 典型的 $P-S-N$ 曲线

4.1.3 基于 Gamma 过程的强度退化模型

材料或零件的强度退化过程可以用 Gamma 过程来表征, 其疲劳强度分布信息可以从 $P-S-N$ 曲线中获取。结合材料的 $P-S-N$ 曲线, 获取材料或零件的强度退化量, 估计 Gamma 随机退化过程的形状参数为 $\alpha(t)$ 和尺度参数为 β , 构建完整的强度退化模型。基于 Gamma 过程的零件强度退化建模过程具体如图 4-3 所示。

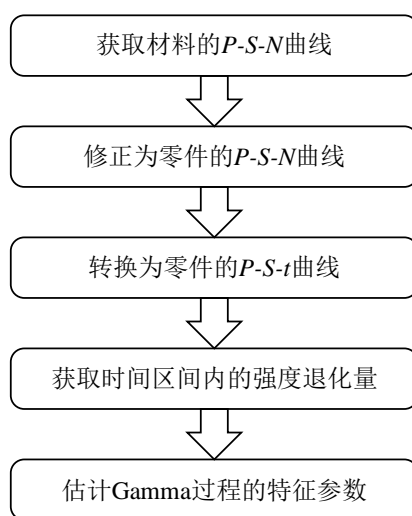


图 4-3 强度退化建模过程

以齿轮零件为例，基于 Gamma 过程的强度退化建模过程具体如下：

(1) 通过资料收集，获取齿轮所用材料的疲劳试验数据及其 $P-S-N$ 曲线。采用幂函数经验公式 (4-11) 来表征 $S-N$ 曲线，即：

$$S = \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \quad (4-14)$$

(2) 考虑零件所受制造工艺及工作环境的影响，修正材料的 $S-N$ 曲线为零件的 $S-N$ 曲线，即：

$$S_c = K \cdot S \quad (4-15)$$

式中， S_c ——零件 $S-N$ 曲线上的应力；

S ——材料 $S-N$ 曲线上的应力；

K ——综合修正系数。

对于齿轮这样的零件，可依据式 (4-16) 和 (4-17) 对其两种强度下的 $P-S-N$ 曲线进行修正。

齿面接触疲劳强度修正公式：

$$S_t = K_t \cdot \sqrt[m]{\frac{C}{N}} = Z_N Z_V Z_L Z_W Z_R Z_X \cdot \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \quad (4-16)$$

其中： Z_N ——接触强度的寿命系数；

Z_V ——速度系数；

Z_L ——润滑剂系数；

Z_W ——工作硬化系数；

Z_R ——粗糙度系数；

Z_X ——接触强度计算的尺寸系数。

齿根弯曲疲劳强度修正公式：

$$S_b = K_b \cdot \sqrt[m]{\frac{C}{N}} = Y_{ST} Y_{NT} Y_{\delta relT} Y_{RrelT} Y_X \cdot \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \quad (4-17)$$

其中： Y_{ST} ——应力修正系数；

Y_{NT} ——弯曲强度的寿命系数；

$Y_{\delta relT}$ ——相对齿根圆角敏感系数；

Y_{RrelT} ——相对齿根表面状况系数；

Y_X ——弯曲强度计算的尺寸系数。

(3) 根据齿轮的实际转速，将齿轮的 $P-S-N$ 曲线转换为 $P-S-t$ 曲线，转换公

式为:

$$S = \sqrt[m]{\frac{C}{N}} = \sqrt[m]{\frac{C}{f(t)}} \quad (4-18)$$

式中, N 为载荷循环次数; t 为时间。

(4) 假设齿轮的 P - S - t 曲线集含有 k 条独立的 S - t 曲线, 存活率为 P_i 时的 S - t 曲线 $[t_j, t_{j+1}]$ 内的强度退化量 D_{ij} 为:

$$D_{ij} = S_i(t_j) - S_i(t_{j+1}) \quad (i=1, \dots, k; j=1, 2, \dots) \quad (4-19)$$

综合不同存活率 P 时在时间区间 $[t_j, t_{j+1}]$ 内的强度退化量, 可得 D_j 的均值 μ_j 以及方差 σ_j^2 的估计值为:

$$\mu_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k D_{ij} \quad (4-20)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \left(D_{ij} - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k D_{ij} \right)^2 \quad (4-21)$$

(5) 当齿轮强度退化过程为 Gamma 过程时, 根据 Gamma 随机过程的性质可知, $[t_j, t_{j+1}]$ 内的强度退化量可理解为退化增量 $\Delta D_j = D(t_{j+1}) - D(t_j)$, 故 ΔD_j 服从形状参数为 $\alpha(t_{j+1}) - \alpha(t_j)$ 、尺度参数为 β 的 Gamma 分布。

若强度退化过程为平稳 Gamma 过程, 即 $\alpha(t) = at$, 则 D_j 的数学期望和方差为:

$$E(D_j) = \frac{\alpha(t_{j+1}) - \alpha(t_j)}{\beta_j} = \frac{a_j t_{j+1} - a_j t_j}{\beta_j} = \frac{a_j (t_{j+1} - t_j)}{\beta_j} \quad (4-22)$$

$$\text{Var}(D_j) = \frac{\alpha(t_{j+1}) - \alpha(t_j)}{\beta_j^2} = \frac{a_j t_{j+1} - a_j t_j}{\beta_j^2} = \frac{a_j (t_{j+1} - t_j)}{\beta_j^2} \quad (4-23)$$

由式 (4-22) 和式 (4-23) 相除可得:

$$\beta_j = \frac{E(D_j)}{\text{Var}(D_j)} \quad (4-24)$$

带入由式 (4-20) 和式 (4-21) 所求均值和方差的估计值, 得:

$$\beta_j = \frac{E(D_j)}{\text{Var}(D_j)} = \frac{\mu_j}{\sigma_j^2} \quad (4-25)$$

假设有 n 个时间区间, 即 $j=1, 2, \dots, n$, 对所有 β_j 进行算术平均, 可得到尺寸参数 β 的估计值 $\hat{\beta}$ 为:

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \beta_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\mu_j}{\sigma_j^2} \quad (4-26)$$

由式 (4-22) 和式 (4-23) 相加可得:

$$E(D_j) + \text{Var}(D_j) = \frac{a_j(t_{j+1} - t_j)}{\beta_j} + \frac{a_j(t_{j+1} - t_j)}{\beta_j^2} = \frac{a_j(t_{j+1} - t_j)(\beta_j + 1)}{\beta_j^2} \quad (4-27)$$

变换可得:

$$a_j = \frac{\beta_j^2 [E(D_j) + \text{Var}(D_j)]}{(t_{j+1} - t_j)(\beta_j + 1)} \quad (4-28)$$

带入由式 (4-20) 和式 (4-21) 所求均值和方差的估计值, 得:

$$a_j = \frac{\beta_j^2 (\mu_j + \sigma_j^2)}{(t_{j+1} - t_j)(\beta_j + 1)} \quad (4-29)$$

同理, 当假设有 n 个时间区间时, 对所有 a_j 进行算术平均, 可得到 a 的估计值 a 为:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\beta_j^2 (\mu_j + \sigma_j^2)}{(t_{j+1} - t_j)(\beta_j + 1)} \quad (4-30)$$

综上可得, 齿轮的强度退化过程可表征为形状参数为 at , 尺度参数为 β 的 Gamma 随机过程。

4.2 Copula 理论

4.2.1 Copula 函数的基本概念

Copula 函数是将多维联合分布与其各个边缘分布连接起来的函数。由 Sklar 定理^[104,105]可知, 有 n 维随机变量 $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$, 各变量的边缘分布分别为 $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$, 其联合分布函数 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 可表示为:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \quad (4-31)$$

式中, C 是联合分布函数 F 的 n 维 Copula 函数。

当边缘分布为连续函数时, C 是唯一存在的, 即:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = F(F_1^{-1}(x_1), F_2^{-1}(x_2), \dots, F_n^{-1}(x_n)) \quad (4-32)$$

式中, $u_1 = F_1(x_1)$, $u_2 = F_2(x_2)$, \dots , $u_n = F_n(x_n)$ 。

对式 (4-31) 两端求导, 则 X 的联合概率密度函数为:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \prod_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (4-33)$$

式中, $f_i(x_i)$ 为 $F_i(x_i)$ 对应的概率密度函数; c 为 C 的密度函数, 即:

$$c(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) = \frac{\partial^n C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n))}{\partial F_1(x_1) \partial F_2(x_2) \cdots \partial F_n(x_n)} \quad (4-34)$$

4.2.2 Copula 函数的基本性质

若 Copula 函数 $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 中任一变量均为标准均匀分布, 则具有如下的性质^[104]:

- (1) $u_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n$;
- (2) 对于任意 $u_i \in [0, 1], 0 \leq C(u_1, u_2, \dots, u_n) \leq 1$;
- (3) $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 在每个变量维度上都是单调不减的;
- (4) $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 满足 Fréchet-Hoeffding 边界, 即:

$$C^-(u_1, u_2, \dots, u_n) \leq C(u_1, u_2, \dots, u_n) \leq C^+(u_1, u_2, \dots, u_n)$$

其中, $C^-(u_1, u_2, \dots, u_n) = \max(\sum_{i=1}^n u_i - n + 1, 0)$, 为 Fréchet-Hoeffding 下界;

$C^+(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min(u_1, u_2, \dots, u_n)$, 为 Fréchet-Hoeffding 上界。

- (5) 当随机变量之间相互独立, 则有:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = u_1 u_2 \cdots u_n$$

4.2.3 相关性测度

变量间的相关关系用相关系数度量, 常用相关系数^[105,106]有:

- (1) Pearson 相关系数 ρ

随机变量 X 和 Y 的 Pearson 相关系数 ρ 定义为:

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E((X - \mu_X)(Y - \mu_Y))}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4-35)$$

式中, μ_X 和 σ_X 分别为 X 的均值与方差; μ_Y 和 σ_Y 分别为 Y 的均值与方差。

ρ 的取值范围为 $[-1, 1]$, 当 $\rho(X, Y) = 1$ 时, X 和 Y 完全正相关; $\rho(X, Y) = 0$, X 和 Y 相互独立; $\rho(X, Y) = -1$, X 和 Y 完全负相关。

- (2) Kendall 秩相关系数 τ

设 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) 是独立同分布的随机向量, 则 Kendall 秩相关系数 τ 定义为:

$$\begin{aligned}\tau(X,Y) &= P((X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) > 0) - P((X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) < 0) \\ &= 2P((X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) > 0) - 1\end{aligned}\quad (4-36)$$

式中, $X_1 - X_2$ 表征了 X 的变化, $Y_1 - Y_2$ 表征了 Y 的变化, $(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) > 0$ 表征二者变化的一致性, $(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) < 0$ 表征二者变化的不一致性。 τ 的取值范围 $[-1,1]$, 当 $\tau(X,Y)=1$, X 和 Y 正相关; $\tau(X,Y)=-1$, X 和 Y 负相关; $\tau(X,Y)=0$, 不能判断 X 和 Y 的相关性。

(3) Spearman 秩相关系数 ρ_s

若随机变量 X 和 Y 的边缘分布函数分别为 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$, 有 $X_0 \in X$, $Y_0 \in Y$, 若 (X_0, Y_0) 与 (X, Y) 是独立同分布的随机向量, 其 Spearman 秩相关系数 ρ_s 定义为:

$$\rho_s = 3\{P[(X - X_0)(Y - Y_0) > 0] - P[(X - X_0)(Y - Y_0) < 0]\} \quad (4-37)$$

(4) 尾部相关系数

设 C 是描述 X 和 Y 相关性的 Copula 函数, 则有:

$$\lambda_U = \lim_{t \rightarrow 1^-} P(Y > F_Y^{-1}(t) \mid X > F_X^{-1}(t)) = \lim_{t \rightarrow 1^-} \frac{1 - 2t + C(t, t)}{1 - t} \quad (4-38)$$

$$\lambda_L = \lim_{t \rightarrow 0^+} P(Y \leq F_Y^{-1}(t) \mid X \leq F_X^{-1}(t)) = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{C(t, t)}{t} \quad (4-39)$$

式中, λ_U 和 λ_L 分别是上尾相关系数和下尾相关系数。 λ_U 和 λ_L 的取值范围均为 $[0,1]$, 当 $\lambda_U > 0$ 时, 表示 C 是上尾相关的, $\lambda_U = 0$ 表示 C 是上尾独立的; 当 $\lambda_L > 0$ 时, 表示 C 是下尾相关的, $\lambda_L = 0$ 表示 C 是下尾独立的。

4.2.4 常用 Copula 函数

在工程应用中, 常用的 Copula 函数如表 4-1 所示。

表 4-1 常用的 Copula 函数

Copulas	$C(u, v)$ 表达式	θ	Kendall's τ	Spearman's ρ_s
Gaussian	$\Phi_2(\Phi^{-1}(u), \Phi^{-1}(v); \theta)$	$[-1, 1]$	$\frac{2}{\pi} \arcsin(\theta)$	$\frac{6}{\pi} \arcsin(\frac{\theta}{2})$
Gumbel	$\exp\left\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{\frac{1}{\theta}}\right\}$	$[1, +\infty)$	$1 - \frac{1}{\theta}$	N/A
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$(0, +\infty)$	$\frac{\theta}{2 + \theta}$	N/A
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$(-\infty, +\infty)$	$1 - \frac{4}{\theta} [1 - D_1(\theta)]$	$1 - \frac{12}{\theta} [D_1(\theta) - D_2(\theta)]$

注: $D(\bullet)$ 为 Debye 函数, $D_k(x) = \frac{k}{x^k} \int_0^x \frac{t^k}{e^t - 1} dt$, $k=1, 2$ 。

不同的 Copula 函数表征的相关关系存在明显的差异, 表 4-1 中的四种 Copula 函数具有各自的特点。其中, Gaussian Copula 和 Frank Copula 能够描述变量间对称的相关关系, 且能较好表征中部的相关性变化。Gumbel Copula 较好刻画上尾相关关系, 而 Clayton Copula 较好刻画下尾相关关系。

4.2.5 Copula 函数的参数估计

常用的估计方法有最大似然估计 (MLE)、半参数估计和非参数估计^[107]。

(1) 最大似然估计

有随机变量 X 和 Y 的联合分布函数为:

$$F(x, y; \alpha_1, \alpha_2, \theta) = C[F(x; \alpha_1), F(y; \alpha_2); \theta] \quad (4-40)$$

式中, α_1 、 α_2 和 θ 为 Copula 函数中的未知参数。

其联合概率密度函数为:

$$f(x, y; \alpha_1, \alpha_2, \theta) = c[F(x; \alpha_1), F(y; \alpha_2); \theta] \cdot f(x; \alpha_1) \cdot f(y; \alpha_2) \quad (4-41)$$

式 (4-41) 的对数似然函数为:

$$\ln L(\alpha_1, \alpha_2, \theta) = \sum_{i=1}^n \{ \ln c[F(x_i; \alpha_1), F(y_i; \alpha_2); \theta] + \ln f(x_i; \alpha_1) + \ln f(y_i; \alpha_2) \} \quad (4-42)$$

可知, 未知参数的最大似然估计值为:

$$\alpha_1, \alpha_2, \theta = \arg \max \ln L(\alpha_1, \alpha_2, \theta) \quad (4-43)$$

同时地, 利用最大似然估计法对未知参数 α_1 和 α_2 进行求解, 即:

$$\alpha_1 = \arg \max \sum_{i=1}^n \ln f(x_i; \alpha_1) \quad (4-44)$$

$$\alpha_2 = \arg \max \sum_{i=1}^n \ln f(y_i; \alpha_2) \quad (4-45)$$

将 α_1 和 α_2 带入式 (4-42), 可得未知函数 θ 的估计值, 即:

$$\theta = \arg \max \sum_{i=1}^n \ln c[F(x_i; \alpha_1), F(y_i; \alpha_2); \theta] \quad (4-46)$$

(2) 半参数估计

当样本数据的经验分布函数 $F_n(x)$ 和 $F_n(y)$ 已知时, 则只需估计 Copula 函数中的未知参数 θ , 即:

$$\theta = \arg \max \sum_{i=1}^n \ln c[F_n(x_i), F_n(y_i); \theta] \quad (4-47)$$

(3) 非参数估计

若有随机样本 X_i 和 Y_i , $i=1,2,\dots,n$, 其经验分布函数值为 $F(x_i)$ 和 $F(y_i)$, 经验 Copula 函数为:

$$C(u_1, u_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I[F(x_i) \leq u_1, F(y_i) \leq u_2] \quad (4-48)$$

式中, $u_1, u_2 \in [0,1]$; $I[\cdot]$ 是示性函数, 即 $F(x_i) \leq u_1, F(y_i) \leq u_2$ 同时成立时, 其值为 1, 反之为 0。可知, 经验 Copula 函数不可导, 无法获取任意一点处的数值, 因此更多用于模型评价。

若有样本值 (X_1, X_2, \dots, X_n) , 假设 $k(\cdot)$ 为实数 R 上的有界对称函数, 且 $\int k(x)dx=1$, 如果有 $h_n > 0$ 使 $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n = 0$, 则:

$$f(x) = \frac{1}{nh_n} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-X_i}{h_n}\right) \quad (4-49)$$

式中, $f(x)$ 是 $f(x)$ 的一个核估计, $k(\cdot)$ 是核函数, h_n 是窗宽。一般选择正态分布或均匀分布作为核函数。

4.2.6 模型评价和选择

在诸多 Copula 函数中, 最优的 Copula 函数能更准确描述数据之间的分布情况。模型的选择建立在模型评价的基础上, 对于 Copula 函数的选择, 常用的方法有 AIC 法、BIC 法、DIC 法和最小距离法。

AIC 和 BIC 是常用于衡量模型拟合优良性的工具, 两种方法可用来检验最大似然估计法求得的 Copula 模型。

$$AIC = -2 \ln L(\theta) + 2k = -2 \sum_{j=1}^m \ln c(u_1^{(j)}, u_2^{(j)}, \dots, u_n^{(j)}; \theta) + 2k \quad (4-50)$$

$$BIC = -2 \ln L(\theta) + k \ln n = -2 \sum_{j=1}^m \ln c(u_1^{(j)}, u_2^{(j)}, \dots, u_n^{(j)}; \theta) + k \ln m \quad (4-51)$$

式中, k 是 Copula 模型中未知参数的数量; n 是试验样本的容量。当 AIC 和 BIC 的值越小时, 其 Copula 函数的拟合程度越高。

DIC 法的具体形式为:

$$DIC = \bar{D} + N_D = E[-2 \ln L(\theta)] + E[-\ln L(\bar{\theta})] \quad (4-52)$$

式中, θ 为 θ 的后验均值。 DIC 值越小, 其 Copula 函数的拟合程度越高。

计算备选 Copula 与经验 Copula 间的平方欧式距离, 以此来作出优劣分析, 这就是最小距离法。设随机样本向量为 $X^{(j)} = (x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n^{(j)})$, $j = 1, 2, \dots, m$, 其经验分布为 $(F_1(x_1^{(j)}), F_2(x_2^{(j)}), \dots, F_n(x_n^{(j)}))$, 经验 Copula 函数为 $C(u_1^{(j)}, u_2^{(j)}, \dots, u_n^{(j)})$, 则样本的平方欧式距离为:

$$d^2 = \sum_{j=1}^m \left| C(u_1^{(j)}, u_2^{(j)}, \dots, u_n^{(j)}) - C(u_1^{(j)}, u_2^{(j)}, \dots, u_n^{(j)}) \right|^2 \quad (4-53)$$

式中, $C(\bullet)$ 为备选 Copula 函数; $u_i^{(j)} = F(x_i^{(j)})$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。当 d^2 的值越小时, 其对应的 Copula 函数越优。

4.3 风电齿轮箱高速级齿轮可靠性分析

考虑齿轮疲劳强度的退化规律, 可通过 Gamma 随机过程来描述其强度退化过程, 引入 Copula 函数刻画齿轮两种失效模式间存在的相关关系。

4.3.1 风电齿轮箱高速级齿轮的疲劳强度退化模型

以第二章中某 2MW 风电齿轮箱为例, 其高速级齿轮零件基本参数如表 4-2 中所示, 其所用材料为 20CrMnTi 钢。

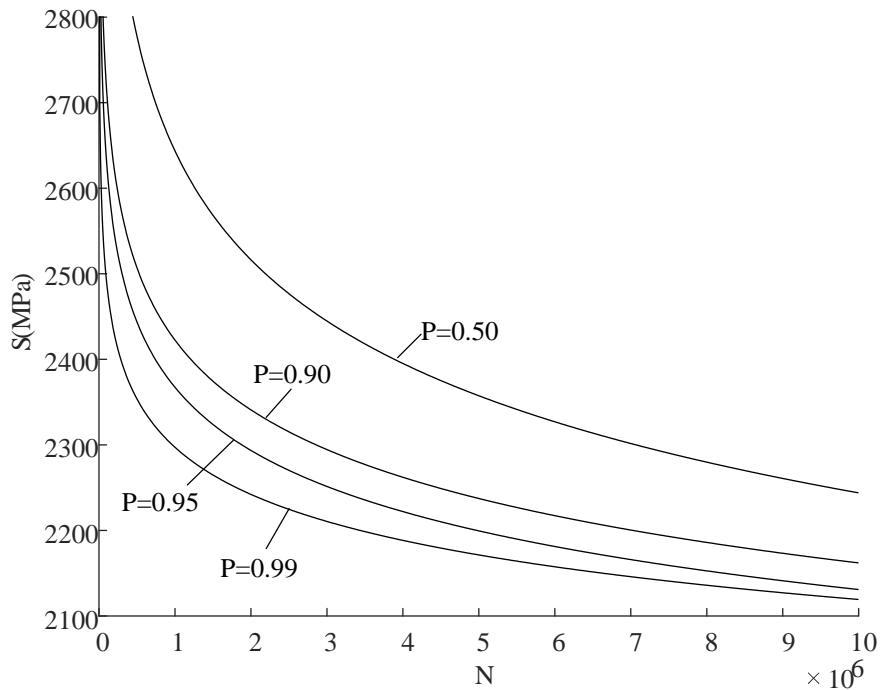
表 4-2 高速级齿轮基本参数

	齿数 Z	法向模数 m_n	压力角 α ($^\circ$)	螺旋角 β ($^\circ$)	齿宽(mm)
大齿轮	138	8	20	11.5	200
小齿轮	21	8	20	11.5	200

根据《机械工程材料性能数据手册》^[108], 在手册中对试件进行了疲劳性能试验, 试验件用 20CrMnTi 钢, P - S - N 曲线如图 4-4 所示, P - S - N 曲线的参数估计值如表 4-3 所示。

表 4-3 20CrMnTi 钢 P - S - N 曲线的参数估计值

存活率 P	0.50	0.90	0.95	0.99
C	1.1604×10^{54}	3.2070×10^{74}	7.0990×10^{79}	1.0822×10^{102}
m	14.0449	20.2425	21.8866	28.5714

图 4-4 20CrMnTi 钢 P - S - N 曲线

修正 20CrMnTi 钢的 P - S - N 曲线，分别得到齿轮接触疲劳和弯曲疲劳的 P - S - N 曲线。据 GB/T3480-1997，其中各修正系数如表 4-4~表 4-6 所示。

表 4-4 高速级齿轮副齿面接触强度修正系数

修正系数	Z_N	Z_V	Z_L	Z_W	Z_R	Z_X
均值	1.1	1.006	1.01	1	1.016	1
方差	0.044^2	0.02^2	0.025^2	0.02^2	0.02^2	0

表 4-5 高速级大齿轮齿根弯曲强度修正系数

修正系数	Y_{ST}	Y_{NT}	$Y_{\delta relT}$	Y_{RrelT}	Y_X
均值	2	1.08	1.08	1.1	1
方差	0.0662	0.0432	0.0362	0.0362	0.022

表 4-6 高速级小齿轮齿根弯曲疲劳强度修正系数

修正系数	Y_{ST}	Y_{NT}	$Y_{\delta relT}$	Y_{RrelT}	Y_X
均值	2	1.08	1.01	1.12	1
方差	0.0662	0.0432	0.0332	0.0372	0.022

由此可得到各齿轮的齿面接触疲劳强度与寿命的关系：

$$\begin{aligned}
S_i &= Z_N Z_V Z_L Z_W Z_R Z_X \cdot \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \\
&= 1.1 \times 1.006 \times 1.01 \times 1 \times 1.016 \times 1 \times \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \\
&= 1.1355 \sqrt[m]{\frac{C}{N}}
\end{aligned}$$

大齿轮的齿根弯曲疲劳强度与寿命的关系:

$$\begin{aligned}
S_{b1} &= Y_{ST} Y_{NT} Y_{\delta rel T} Y_{Rrel T} Y_X \cdot \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \\
&= 2 \times 1.08 \times 1.08 \times 1.1 \times 1 \times \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \\
&= 2.5661 \sqrt[m]{\frac{C}{N}}
\end{aligned}$$

小齿轮的齿根弯曲疲劳强度与寿命的关系:

$$\begin{aligned}
S_{b2} &= Y_{ST} Y_{NT} Y_{\delta rel T} Y_{Rrel T} Y_X \cdot \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \\
&= 2 \times 1.08 \times 1.01 \times 1.12 \times 1 \times \sqrt[m]{\frac{C}{N}} \\
&= 2.4434 \sqrt[m]{\frac{C}{N}}
\end{aligned}$$

已知风电齿轮箱输入转速为 14rpm, 前两级传动比分别为 21:93 和 21:92, 则高速级的输入转速为: $n = 14 \times 93 / 21 \times 92 / 21 \approx 271.6 \text{ rpm}$, 故大齿轮的转速为: 271.6rpm, 小齿轮的转速为: $271.6 \times 138 / 21 = 1784.8 \text{ rpm}$ 。载荷作用次数 N 与时间 t (单位: h) 的关系为:

$$N = f(t) = n \times 60 \times t$$

由此, 齿轮的 P - S - N 曲线可转换为 P - S - t 曲线, 大齿轮的两种疲劳强度的 P - S - t 曲线表达式分别为:

$$\begin{aligned}
S_{i1} &= 1.1355 \sqrt[m]{\frac{C}{271.6 \times 60 \times t}} = 1.1355 \sqrt[m]{\frac{C}{16296t}} \\
S_{b1} &= 2.5661 \sqrt[m]{\frac{C}{271.6 \times 60 \times t}} = 2.5661 \sqrt[m]{\frac{C}{16296t}}
\end{aligned}$$

小齿轮的两种疲劳强度的 P - S - t 曲线表达式分别为:

$$S_{t_2} = 1.1355 \sqrt[m]{\frac{C}{1748.8 \times 60 \times t}} = 1.1355 \sqrt[m]{\frac{C}{104928t}}$$

$$S_{b_2} = 2.4434 \sqrt[m]{\frac{C}{1748.8 \times 60 \times t}} = 2.4434 \sqrt[m]{\frac{C}{104928t}}$$

由 4.1.3 节可知, 假设齿轮的疲劳强度退化过程为 Gamma 随机过程时, 依据齿轮的疲劳 $P-S-t$ 曲线, 任取时间区间 $[t_j, t_{j+1}]$, 可得到该时间区间内齿轮疲劳强度的退化量 D_{ij} 。此处时间区间长度可取 10000h, 初始时间区间为 [10000, 20000]h, 考虑到风电齿轮箱的设计寿命 ≥ 20 年, 故可取时间区间数量为 20 个。以大齿轮的接触疲劳强度在时间区间 [10000, 20000]h 内退化量的计算过程为例, 计算结果如表 4-7 所示。

表 4-7 时间区间 [10000, 20000]h 内大齿轮接触疲劳强度退化量

P_i	$S_{i1}(10000) - S_{i1}(20000)$	D_{i1} (MPa)
0.50	$1.1355 \times 14.0449 \sqrt{\frac{1.1604 \times 10^{54}}{16296 \times 10000}} - 1.1355 \times 14.0449 \sqrt{\frac{1.1604 \times 10^{54}}{16296 \times 20000}}$	118.5036
0.90	$1.1355 \times 20.2425 \sqrt{\frac{3.2070 \times 10^{74}}{16296 \times 10000}} - 1.1355 \times 20.2425 \sqrt{\frac{3.2070 \times 10^{74}}{16296 \times 20000}}$	80.6727
0.95	$1.1355 \times 21.8866 \sqrt{\frac{7.0990 \times 10^{79}}{16296 \times 10000}} - 1.1355 \times 21.8866 \sqrt{\frac{7.0990 \times 10^{79}}{16296 \times 20000}}$	73.7668
0.99	$1.1355 \times 28.5714 \sqrt{\frac{1.0822 \times 10^{102}}{16296 \times 10000}} - 1.1355 \times 28.5714 \sqrt{\frac{1.0822 \times 10^{102}}{16296 \times 20000}}$	56.7029

根据式 (4-20) 和式 (4-21) 可得强度退化量 D_{ij} 的均值与方差, 即:

$$\mu_1 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 D_{i1} = 82.4115$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{4-1} \sum_{i=1}^4 \left(D_{i1} - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 D_{i1} \right)^2 = 680.4435$$

由式 (4-25) 和式 (4-29) 可得到此时间区间内 Gamma 过程的特征参数估计值, 即:

$$\beta_1 = \frac{\mu_1}{\sigma_1} = 0.1211$$

$$a_1 = \frac{\beta_1^2 (\mu_1 + \sigma_1^2)}{(t_2 - t_1)(\beta_1 + 1)} = 0.9981 \times 10^{-3}$$

可求得 20 个时间区间内强度退化过程为 Gamma 过程时各特征参数, 如表 4-8

所示。

表 4-8 各时间区间的特征参数

j	1	2	3	4	5
β_j	0.1211	0.2262	0.3373	0.4535	0.5740
a_j	0.9981×10^{-3}	1.0585×10^{-3}	1.0992×10^{-3}	1.1308×10^{-3}	1.1567×10^{-3}
j	6	7	8	9	10
β_j	0.6982	0.8256	0.9560	1.0891	1.2246
a_j	1.1789×10^{-3}	1.1984×10^{-3}	1.2158×10^{-3}	1.2315×10^{-3}	1.2459×10^{-3}
j	11	12	13	14	15
β_j	1.3623	1.5022	1.6440	1.7877	1.9332
a_j	1.2592×10^{-3}	1.2716×10^{-3}	1.2832×10^{-3}	1.2941×10^{-3}	1.3044×10^{-3}
j	16	17	18	19	20
β_j	2.0803	2.2290	2.3793	2.5310	2.6841
a_j	1.3141×10^{-3}	1.3234×10^{-3}	1.3322×10^{-3}	1.3407×10^{-3}	1.3488×10^{-3}

由式 (4-26) 和式 (4-30) 可得到 Gamma 过程的特征参数估计值, 即:

$$\beta = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} \beta_j = 1.3319$$
$$a = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} a_j = 1.2293 \times 10^{-3}$$

综上, 大齿轮的接触疲劳强度退化过程可表征为形状参数为 $\alpha(t) = 1.2293 \times 10^{-3}t$, 尺度参数为 $\beta = 1.3319$ 的 Gamma 随机过程。同理可得, 大齿轮和小齿轮疲劳强度退化过程各特征参数, 如表 4-9 所示。

表 4-9 大齿轮和小齿轮疲劳强度退化过程的特征参数

	齿面接触疲劳强度		齿根弯曲疲劳强度	
	$\alpha(t)$	β	$\alpha(t)$	β
大齿轮	$1.2293 \times 10^{-3}t$	1.3319	$1.2293 \times 10^{-3}t$	0.6190
小齿轮	$1.5426 \times 10^{-3}t$	1.8535	$1.5426 \times 10^{-3}t$	0.8614

4.3.2 风电齿轮箱高速级齿轮的可靠性分析

假设齿轮的初始疲劳强度 δ 服从正态分布, 即 $\delta \sim N(\mu_\delta, \sigma_\delta^2)$, 齿轮在额定功率下运行, 设定疲劳强度下限值 S , 当齿轮的疲劳强度达到下限值时, 判定其发生疲劳失效。令 S 服从正态分布, 即 $S \sim N(\mu_S, \sigma_S^2)$ 。参考《机械工程材料性能数据手册》

和相关研究文献^[37,109-112],若该齿轮箱系统中高速级的大小齿轮的初始疲劳强度和疲劳强度下限值如表 4-10 所示。

表 4-10 大小齿轮的初始疲劳强度和疲劳强度下限值

	大齿轮		小齿轮	
	齿面接触疲劳	齿根弯曲疲劳	齿面接触疲劳	齿根弯曲疲劳
μ_s	900	250	850	225
σ_s^2	50^2	40^2	70^2	40^2
μ_δ	1200	400	1180	400
σ_δ^2	15^2	15^2	15^2	20^2

单位: MPa

结合应力强度干涉理论, 齿轮关于疲劳强度退化失效的可靠度可表示为:

$$R(t) = P[D(t) < \delta - S] \quad (4-54)$$

式中, S 为疲劳强度退化下限; δ 为初始疲劳强度; $D(t)$ 为强度退化量; $R(t)$ 为可靠度。

由于 Gamma 过程的引入, 难以得到 $R(t)$ 的解析解, 可运用 Monte Carlo 模拟方法求解齿轮各失效模式对应的可靠度, 其模拟流程如图 4-5 所示。

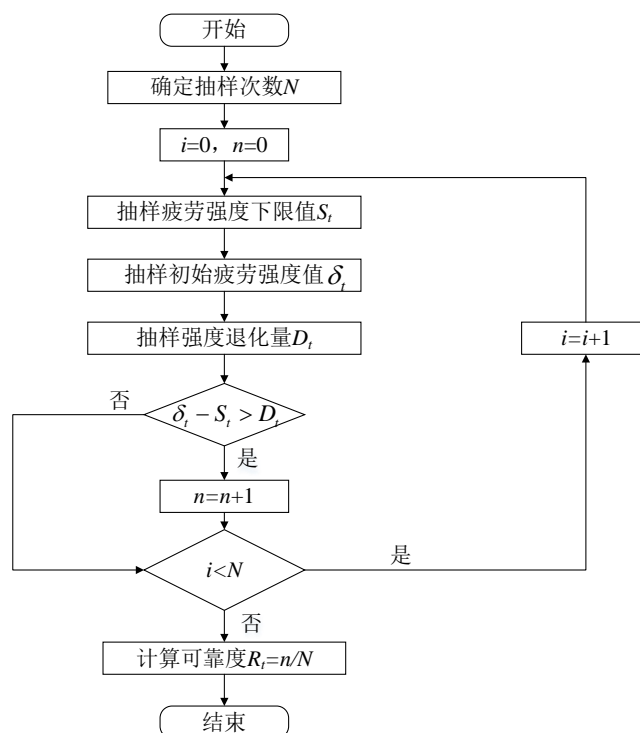


图 4-5 Monte Carlo 模拟流程

故可得到在上述条件下，不同失效模式下齿轮箱高速级大小齿轮的可靠度曲线，分别如图 4-6 和 4-7 所示。

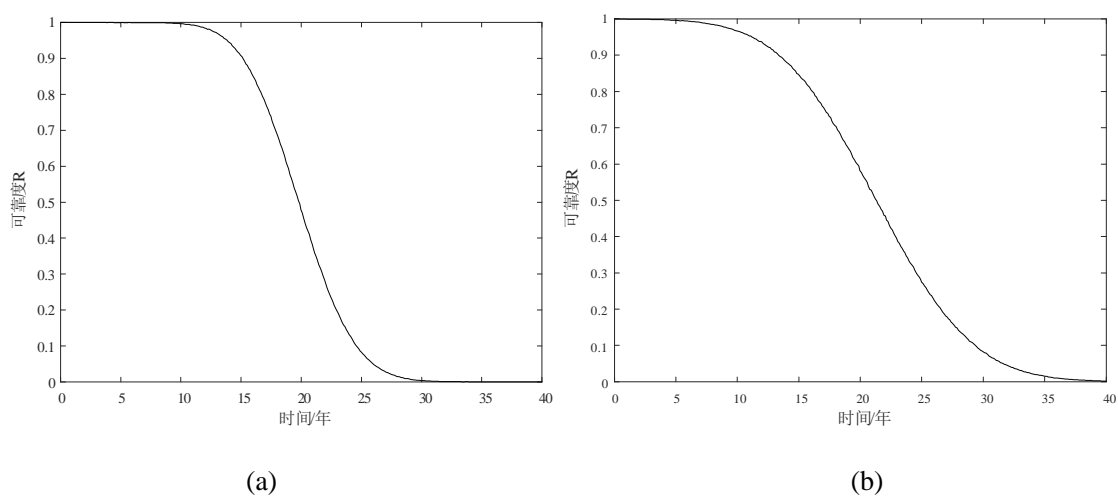


图 4-6 不同失效模式下大齿轮的可靠度曲线。(a)齿面接触疲劳失效；(b)齿根弯曲疲劳失效

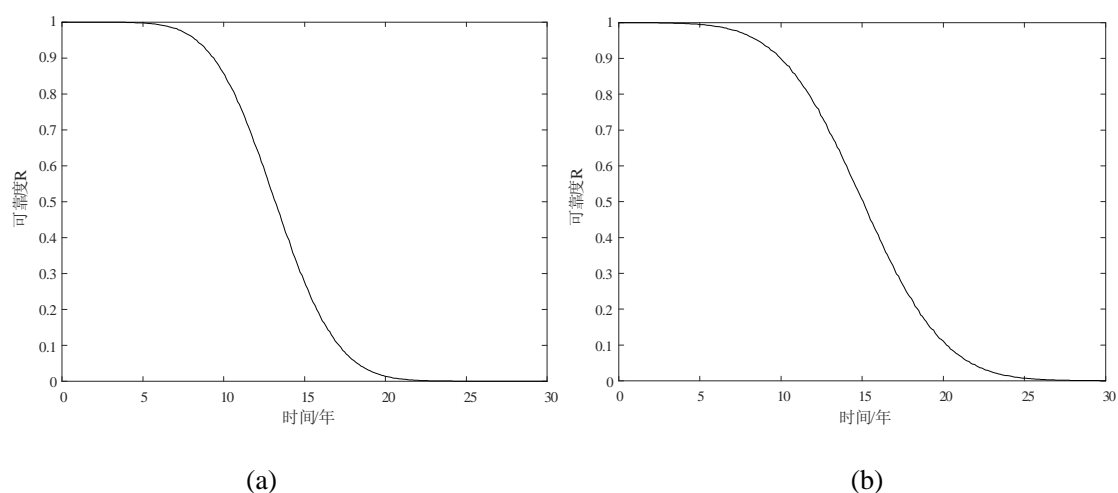


图 4-7 不同失效模式下小齿轮的可靠度曲线。(a)齿面接触疲劳失效；(b)齿根弯曲疲劳失效

若考虑两种失效模式相互独立，则两种失效模式下齿轮 t 时刻的可靠度 R 为：

$$R(t)=R_1(t)\times R_2(t) \quad (4-55)$$

式中， $R_1(t)$ 和 $R_2(t)$ 分别为两种失效模式下齿轮的可靠度函数。

可得到考虑两种失效模式相互独立时大小齿轮在两种失效模式共同作用下的可靠度曲线分别如图 4-8 和图 4-9 所示。

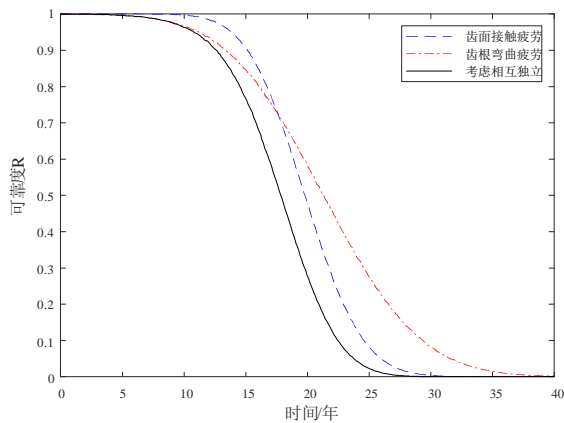


图 4-8 考虑失效独立时大齿轮的可靠度曲线

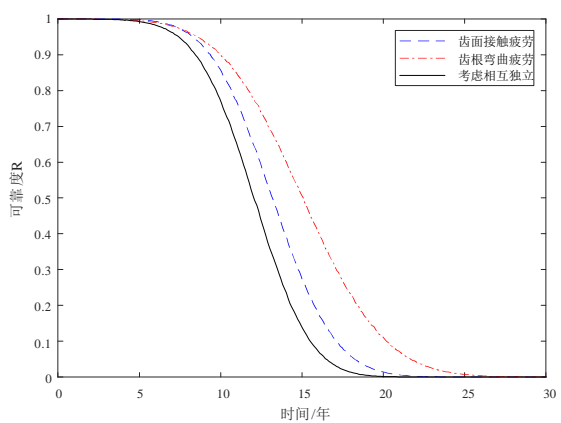


图 4-9 考虑失效独立时小齿轮的可靠度曲线

4.3.3 考虑失效相关性的风电齿轮箱高速级齿轮传动可靠性分析

当考虑齿轮各失效模式间的相关性时，可应用 Copula 函数模型分别描述大小齿轮中两种疲劳失效模式间存在的相关关系。本研究中，抽取 10000 个样本数据，分析各齿轮失效模式间的相关性。大小齿轮的失效模式之间的 Pearson 相关系数 ρ 、Kendall 秩相关系数 τ 和 Spearman 秩相关系数 ρ_s 如表 4-11 所示。

表 4-11 两齿轮各失效模式间的相关系数

相关系数	ρ	τ	ρ_s
大齿轮	0.9910	0.9951	0.9999
小齿轮	0.9925	0.9953	0.9999

从相关系数的值可以看出，无论大齿轮或小齿轮，其两个失效模式间近乎完全相关，但是仍存在一点差异，故相关性仍然需要考虑。选用 Gaussian、Gumbel、Clayton、Frank 四种 Copula 函数作为备选函数，通过 MLE 方法估计各函数中的未知参数 θ ，以 AIC 和 BIC 准则评价各备选函数，结果分别如表 4-12 和表 4-13 所示。

表 4-12 大齿轮的 Copula 函数

Copulas	Gaussian	Gumbel	Clayton	Frank
θ	0.9857	8.9887	16.9168	45.5863
AIC	-3.4707×10^3	-3.1251×10^3	-3.5641×10^3	-3.6956×10^3
BIC	-3.4658×10^3	-3.1202×10^3	-3.5592×10^3	-3.6907×10^3

表 4-13 小齿轮的 Copula 函数

Copulas	Gaussian	Gumbel	Clayton	Frank
θ	0.9881	9.8119	29.8090	52.9921
AIC	-3.6917×10^3	-3.1873×10^3	-4.6805×10^3	-3.9419×10^3
BIC	-3.6868×10^3	-3.2685×10^3	-4.6756×10^3	-3.9370×10^3

经过模型评价,在大齿轮所选的备选 Copula 函数中, Gumbel Copula 拟合程度最差, Frank Copula 拟合程度最优,故在考虑大齿轮两个失效模式间相关性时,选择 Frank Copula 为计算用 Copula 函数;而在小齿轮的备选 Copula 函数中,选用 Clayton Copula 函数模型描述其失效模式间的相关性。

根据相关研究^[113,114],考虑失效相关性时,齿轮 t 时刻的可靠度可通过式 (4-56) 计算得到,即:

$$R(t) = 1 - F_1(t) - F_2(t) + C(F_1(t), F_2(t)) \quad (4-56)$$

式中, $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 分别为齿轮两种失效模式对应的失效分布函数; $C(\bullet)$ 为 Copula 联合分布函数。

由此,可得到考虑失效相关时大小齿轮的可靠度曲线分别如图 4-10 和图 4-11 所示。

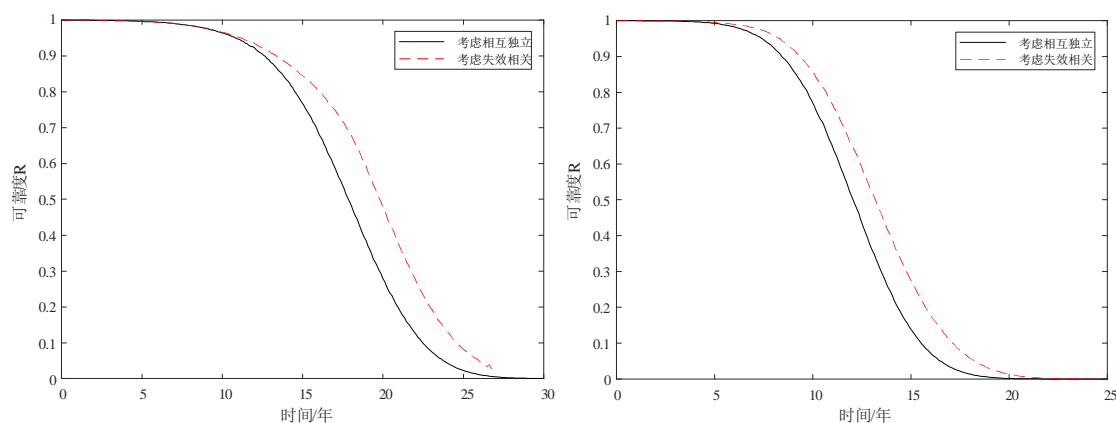


图 4-10 考虑失效相关时大齿轮的可靠度曲线 图 4-11 考虑失效相关时小齿轮的可靠度曲线

高速级传动系统中两个齿轮部件可视为串联关系,该系统 t 时刻的可靠度可通过式 (4-57) 计算,考虑两齿轮相互独立时高速级传动系统的可靠度曲线如图 4-12 所示。

$$R(t) = R_{\text{大}}(t) \times R_{\text{小}}(t) \quad (4-57)$$

式中, $R_{\text{大}}(t)$ 和 $R_{\text{小}}(t)$ 分别为大小齿轮的可靠度函数。

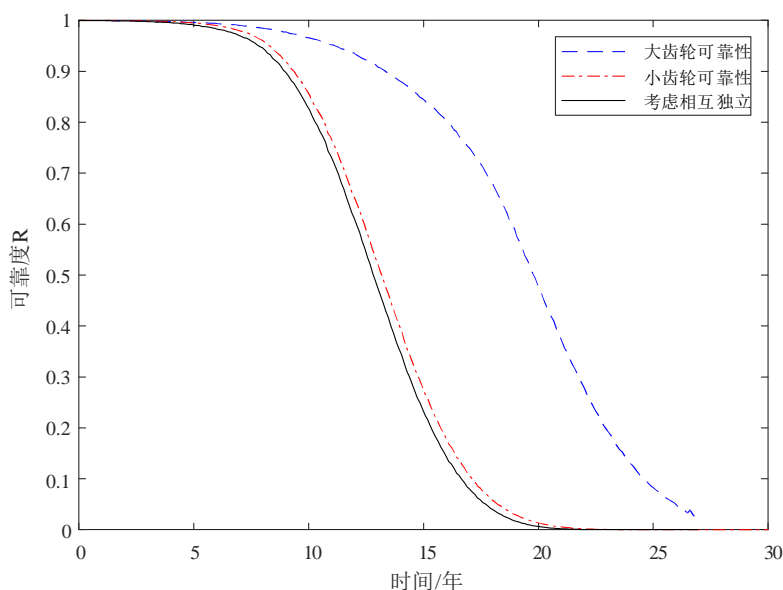


图 4-12 考虑相互独立时高速级传动系统的可靠度曲线

同样地，可在上述研究的基础上，考虑两齿轮间存在相关关系，仍然应用 Copula 函数来表征两齿轮之间存在的相关关系。两齿轮之间的 Pearson 相关系数 ρ 、Kendall 秩相关系数 τ 和 Spearman 秩相关系数 ρ_s 如表 4-14 所示。

表 4-14 两齿轮的相关系数

相关系数	ρ	τ	ρ_s
数值	0.9767	0.9947	0.9999

同样地，选用四种 Copula 函数作为备选函数，各函数中的参数 θ 的估计值及模型评价结果如表 4-15 所示。

表 4-15 两齿轮相关时的 Copula 函数

Copulas	Gaussian	Gumbel	Clayton	Frank
θ	0.9472	4.8448	8.6757	23.3110
AIC	-2.2220×10^3	-1.9354×10^3	-2.4750×10^3	-2.7991×10^3
BIC	-2.2171×10^3	-1.9305×10^3	-2.4701×10^3	-2.7742×10^3

经过模型评价可知，当选用 Copula 函数描述两齿轮的相关关系时，Frank Copula 拟合效果最优，Gumbel Copula 最差，故在后续分析中选择使用 Frank Copula 函数表征两齿轮失效之间的相关性。

故可得到同时考虑齿轮相关关系和各齿轮的失效模式相关时齿轮箱高速级齿轮传动系统的可靠度曲线如图 4-13 所示。

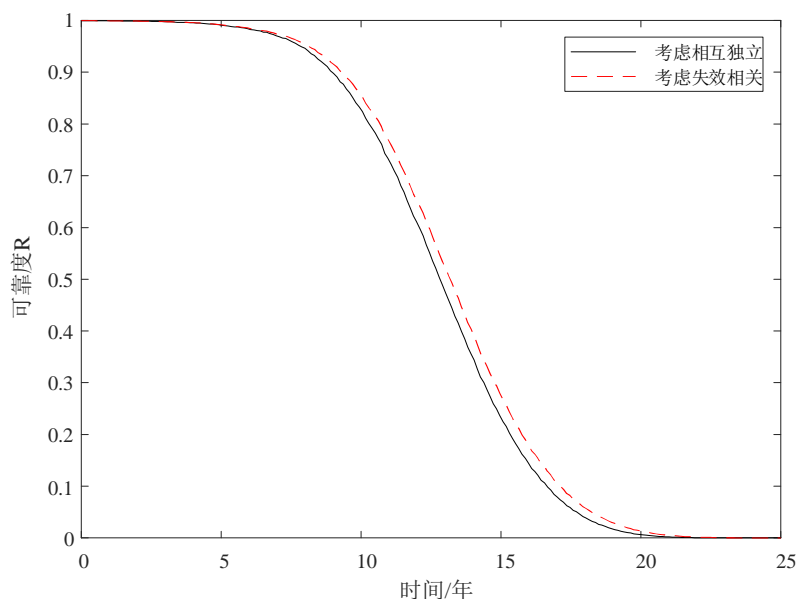


图 4-13 考虑失效相关时齿轮箱高速级传动系统的可靠度曲线

从上述分析可知，在风电齿轮箱高速级传动系统中，无论大齿轮或小齿轮，较于弯曲疲劳失效，风险更大的是接触疲劳失效，且二者的相关性呈现完全正相关趋势。本研究中，由于数据的缺乏，对齿轮初始强度与失效时的强度下限值进行假设，相当于假设了一个退化失效阈值，以此验证所提分析方法。然而，在实际服役过程中，齿轮受所处运行环境影响较大，包括润滑油中的磨粒、高温的影响等，都会加速齿轮整体性能退化，加剧齿轮失效情况的发生，使得零件的服役时间大大缩短。此时，需要进行及时的检修工作，以保证齿轮箱可靠运行。

4.4 本章小结

在长时间的载荷作用下，风电齿轮箱中的齿轮常会出现各种失效。疲劳强度是齿轮的重要力学性能指标，在循环应力的作用下，假设其强度呈退化趋势，当退化量达到一定阈值时，零件就会失效。本章针对风电齿轮箱中的薄弱环节，高速级的两个齿轮传动零件进行可靠性分析。考虑两个齿轮存在的两种疲劳失效模式，根据齿轮材料的 $P-S-N$ 曲线估计齿轮的强度退化规律，以 Gamma 随机过程描述其疲劳强度退化过程，以 Copula 函数表征齿轮各失效模式间的相关性和不同齿轮间的相关性，进行 Monte Carlo 仿真分析，得到齿轮零件及高速级系统对应的动态可靠度曲线。

第五章 考虑随机冲击的齿轮可靠性分析

机械产品在长时间的服役过程中,循环载荷的作用会导致产品性能出现退化,最终出现退化失效。然而,外界环境(诸如温度、湿度、压力等)的影响可能会加速退化进程,导致退化失效提前发生,同时外部环境的作用还可能会导致突发失效的出现。通常,外部环境中对产品产生作用的因素可以统称为冲击(Shocks),冲击对产品作用的效果达到一定的阈值时,产品将发生突发失效,也称为硬失效;相应地,由于产品内部逐步退化而导致的失效称为软失效。对于存在突发失效和退化失效的产品而言,任一失效类型发生,产品即可判定为失效,故两种失效模式存在竞争关系。在服役过程中,产品的性能指标会随着时间推移而呈现退化趋势,外部冲击的作用会导致产品出现额外的退化增量,继而加剧退化失效的发生。因此,在研究产品性能退化失效的同时,还应考虑外部冲击的作用。

对于风电齿轮箱中的齿轮,其主要失效模式是疲劳失效,但是受运行环境中各种载荷的影响,齿轮传动啮合处的应力大小是变化的。不乏出现由于过大载荷作用直接导致齿轮轮齿突然断裂等情况。因此,在考虑齿轮零件性能退化过程的同时,也应考虑所受冲击载荷导致的突发失效,两种失效模式共同构成了齿轮的竞争失效过程。

本研究考虑随机冲击对产品退化失效过程的影响,考虑随机冲击可能造成产品突发失效,分析产品性能退化失效过程,搭建考虑随机冲击的产品竞争失效过程模型。其中,以随机过程表征产品性能退化路径,应用 Monte Carlo 模拟方法,计算产品失效过程的动态可靠度,最后以算例进行验证。

5.1 系统描述

5.1.1 冲击模型概述

当产品受到随机冲击作用,其作用效果往往表现为产品的某项性能出现损伤。根据产品突发失效发生过程描述的不同,冲击模型可分为极端值冲击模型、累积冲击模型、运行冲击模型和 δ 冲击模型^[115-117]。

(1) 极端值冲击模型

若冲击幅值为 W ,第 i 次冲击幅值为 W_i ,产品的失效阈值为 H ,当某时刻某次冲击大于 H 时,产品发生失效,如图 5-1 所示。

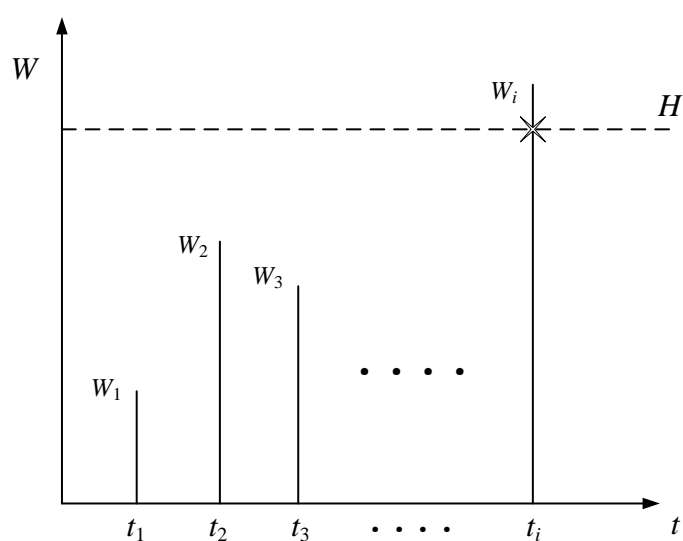


图 5-1 极端值冲击模型下产品的失效

(2) 累积冲击模型

若每次冲击导致的损伤量为 Y ，第 i 次冲击造成的损伤量为 Y_i ，且损伤量是可累积的，则当某时刻损伤累积到一定值 Y_U 时，产品发生失效，如图 5-2 所示。

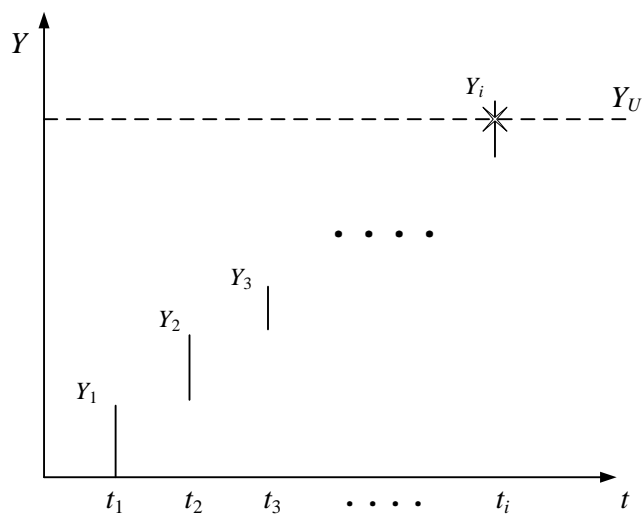


图 5-2 累积冲击模型下产品的失效

(3) 运行冲击模型

当产品受到冲击幅值高于一定危险阈值的冲击作用，这样的冲击连续作用且达到一定数量值时，产品发生失效。若冲击幅值大小为 W ，第 i 次冲击幅值的大小为 W_i ，设定危险阈值为 W_U ，判定产品失效时连续冲击的数量为 k ，则运行冲击模型下产品的失效如图 5-3 所示。

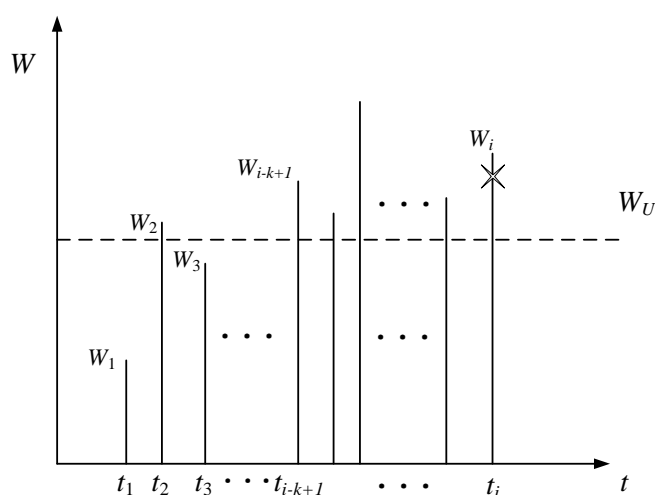


图 5-3 运行冲击模型下产品的失效

(4) δ 冲击模型

产品在时间 t 内会受到一系列的冲击作用，当相邻两次的时间间隔小于时间阈值 δ 时，产品发生失效。若冲击幅值大小为 W ，第 i 次冲击幅值的大小为 W_i ，第 i 次冲击与第 $i-1$ 次冲击的时间间隔为 T_i ，则 δ 冲击模型下产品的失效如图 5-4 所示。

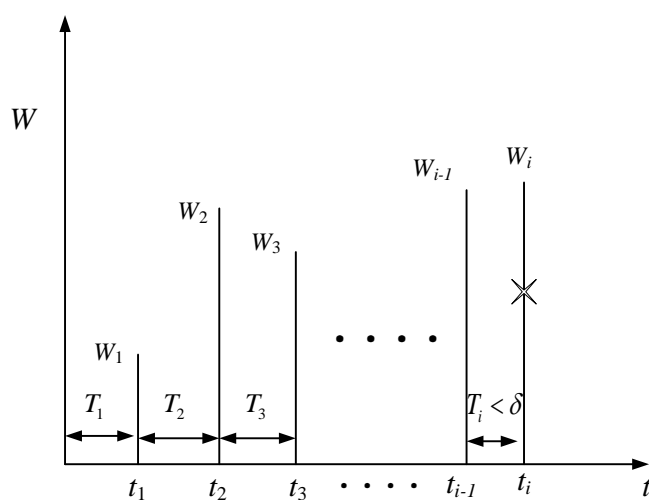


图 5-4 δ 冲击模型下产品的失效

5.1.2 产品失效过程的假设

产品的失效分为退化失效和突发失效，退化失效过程可以理解为产品自身性能逐步下降的过程，而突发失效的发生伴随着外部冲击的引入，且两种失效模式存在竞争关系。故对产品失效过程做出如下的假设：

(1) 产品的自然退化失效过程用随机过程模型描述，如式 (5-1) 所示，其退

化量 $X(t)$ 达到退化失效阈值 H 时, 发生退化失效, 如图 5-5 所示。

$$X(t) = X(t; \theta) \quad (5-1)$$

其中, θ 是模型中的相关参数。

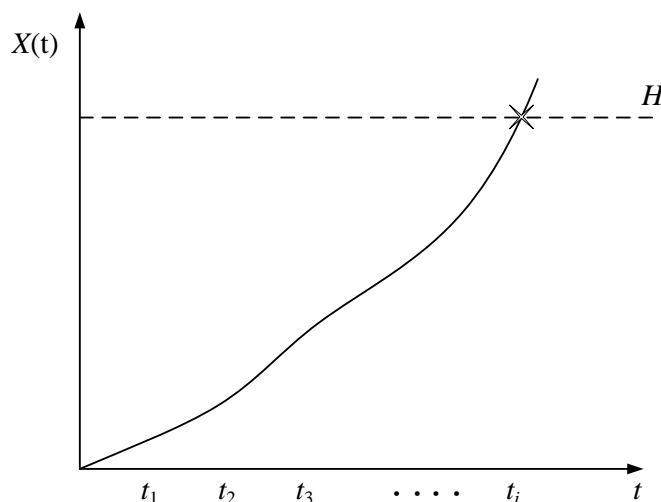


图 5-5 自然退化失效过程

(2) 产品在正常服役过程中受到外部冲击的影响, 若随机冲击在时间 t 内发生的次数为 $N(t)$, 假设 $N(t)$ 服从参数为 λ 的齐次泊松过程, 即:

$$P(N(t) = n) = \frac{e^{(-\lambda t)} (\lambda t)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5-2)$$

(3) 随机冲击的幅值大小为 W , 第 i 次冲击的幅值为 W_i , 假设各冲击相互独立, 且 W_i 服从正态分布, 即 $W_i \sim N(\mu_w, \sigma_w^2)$ 。

(4) 考虑极端值冲击模型, 引入冲击幅值阈值 W_u 。当 $W_i > W_u$ 时, 产品发生突发失效, 这类冲击可称为致命冲击。相应地, 冲击幅值小于阈值的冲击可称为非致命冲击。令时间 t 内产品受到的非致命冲击次数为 $N_1(t)$, 而致命冲击次数为 $N_2(t)$ 。其中, 非致命冲击会对产品造成额外的退化增量 Y , 第 i 次冲击造成的额外退化增量为 Y_i , 且 Y_i 与冲击幅值 W_i 存在线性关系, 即 $Y_i = \gamma W_i$, γ 为比例常数。

(5) 考虑冲击造成的损伤可以累积, 若在规定时间内非致命冲击次数为 n , 故有这段时间内冲击造成的总体额外退化增量为 $S(t)$, 即:

$$S(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n Y_i, & n \geq 1 \\ 0, & n = 0 \end{cases} \quad (5-3)$$

在产品的退化失效过程中, 其总体退化量包含两部分: 自退化量和非致命冲

击导致的退化量，即：

$$X_s(t) = X(t) + S(t) \quad (5-4)$$

当产品的总体退化量达到退化失效阈值 H 时，产品发生退化失效，即 $X_s(t) \geq H$ 。具体如图 5-6 所示。

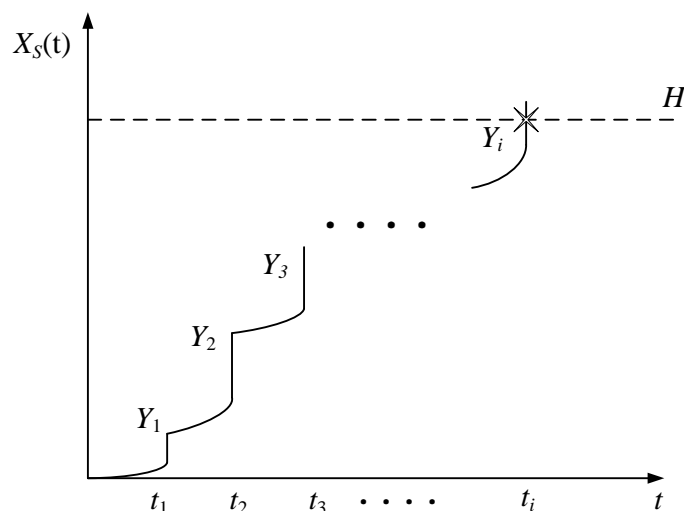


图 5-6 产品总体退化失效过程

5.2 随机冲击下竞争失效过程建模

5.2.1 突发失效过程建模

根据假设 (3)， W_i 服从正态分布，即 $W_i \sim N(\mu_w, \sigma_w^2)$ ，可知，当第 i 次冲击发生时，产品不发生突发失效，即该冲击为非致命冲击的概率可表示为：

$$P_1 = P(W_i < W_U) = \Phi\left(\frac{W_U - \mu_w}{\sigma_w}\right) \quad (5-5)$$

因此，冲击为致命冲击时的概率为：

$$P_2 = P(W_i > W_U) = 1 - P(W_i < W_U) = 1 - \Phi\left(\frac{W_U - \mu_w}{\sigma_w}\right) \quad (5-6)$$

根据泊松过程性质可知，非致命冲击发生的次数 $N_1(t)$ 服从参数为 $P_1\lambda$ 的齐次泊松过程，而致命冲击发生的次数 $N_2(t)$ 服从参数为 $P_2\lambda$ 的齐次泊松过程。即：

$$P(N_1(t) = n_1) = \frac{e^{(-\lambda P_1 t)} (\lambda P_1 t)^{n_1}}{n_1!}, \quad n_1 = 0, 1, 2, \dots \quad (5-7)$$

$$P(N_2(t) = n_2) = \frac{e^{(-\lambda P_2 t)} (\lambda P_2 t)^{n_2}}{n_2!}, \quad n_2 = 0, 1, 2, \dots \quad (5-8)$$

可得，在 t 时刻产品不发生突发失效的概率为：

$$R_w(t) = P(t|N_2(t) = 0) \cdot P(N_2(t) = 0) + P(t|N_2(t) \neq 0) P(N_2(t) \neq 0) \quad (5-9)$$

式中， $P(t|N_2(t) = 0) = 1$ ，表示致命冲击不发生的概率为 1； $P(t|N_2(t) \neq 0) = 0$ ，表示此时发生致命冲击的概率为 0。故可知：

$$\begin{aligned} R_w(t) &= P(N_2(t) = 0) = \frac{e^{(-\lambda P_2 t)} (\lambda P_2 t)^0}{0!} \\ &= e^{-\lambda P_2 t} = e^{-\lambda(1-P_1)t} \\ &= e^{-\lambda(1-\Phi\left(\frac{W_U - \mu_W}{\sigma_W}\right))t} \end{aligned} \quad (5-10)$$

5.2.2 退化失效过程建模

本研究中，假设产品的退化失效过程服从形状参数为 $\alpha(t)$ ，尺度参数为 β 的 Gamma 随机过程，其中 $\alpha(t) = kt$ ， k 为一个常数。根据假设（4）和假设（5）可知，冲击的幅值 W_i 服从正态分布，故额外退化增量 Y_i 也服从正态分布，即：

$$Y_i \sim N(\gamma\mu_w, \gamma^2\sigma_w^2) \quad (5-11)$$

当不考虑突发失效的发生时，产品 t 时刻不发生退化失效的概率可表示为：

$$\begin{aligned} R_X(t) &= P(X_S(t) < H) \\ &= P(X(t) + S(t) < H) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} P(X(t) + S(t) < H | N_1(t) = n) P(N_1(t) = n) \\ &= P(X(t) < H | N_1(t) = 0) P(N_1(t) = 0) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} P\left(X(t) + \sum_{i=1}^n Y_i < H | N_1(t) = n\right) P(N_1(t) = n) \\ &= P(X(t) < H) e^{-\lambda P_1 t} + \sum_{n=1}^{\infty} P\left(X(t) < H - \sum_{i=1}^n Y_i\right) \frac{(\lambda P_1 t)^n e^{-\lambda P_1 t}}{n!} \end{aligned} \quad (5-12)$$

结合式（4-6），则：

$$R_X(t) = \frac{\int_0^{H\beta} u^{\alpha(t)-1} e^{-\beta u} du}{\Gamma(\alpha(t))} e^{-\lambda P_1 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_0^{(H-\sum_{i=1}^n Y_i)\beta} u^{\alpha(t)-1} e^{-\beta u} du}{\Gamma(\alpha(t))} \frac{(\lambda P_1 t)^n e^{-\lambda P_1 t}}{n!} \quad (5-13)$$

5.2.3 竞争失效过程建模

产品的失效不仅要考虑退化失效的发生，同时也要考虑突发失效的发生，且二者存在竞争关系。故要保证产品在受到 n 次冲击时不发生失效，需要满足两个条件，即： $X_s(t) < H$ 和 $N_2(t) = 0$ 。

同时考虑突发失效和退化失效时，产品 t 时刻不发生竞争失效的概率可表示为：

$$\begin{aligned}
 R(t) &= P(X_s(t) < H, N_2(t) = 0, N_1(t) = n) \\
 &= P(X(t) + S(t) < H, N_2(t) = 0, N_1(t) = n) \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} P(X(t) + S(t) < H, N_2(t) = 0 | N_1(t) = n) P(N_1(t) = n) \\
 &= P(X(t) < H, N_2(t) = 0 | N_1(t) = 0) P(N_1(t) = 0) \\
 &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} P\left(X(t) + \sum_{i=1}^n Y_i < H, N_2(t) = 0 | N_1(t) = n\right) P(N_1(t) = n) \\
 &= P(X(t) < H) \cdot P(N_2(t) = 0) \cdot P(N_1(t) = 0) \\
 &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} P\left(X(t) < H - \sum_{i=1}^n Y_i\right) \cdot P(N_2(t) = 0) \cdot P(N_1(t) = n)
 \end{aligned} \tag{5-14}$$

结合式（4-6）和式（5-5），可得：

$$\begin{aligned}
 R(t) &= P(X(t) < H) e^{-\lambda(P_1+P_2)t} \\
 &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} P\left(X(t) < H - \sum_{i=1}^n Y_i\right) \frac{(\lambda P_1 t)^n e^{-\lambda(P_1+P_2)t}}{n!} \\
 &= \frac{\int_0^{H\beta} u^{\alpha(t)-1} e^{-\beta u} du}{\Gamma(\alpha(t))} e^{-\lambda t} \\
 &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_0^{(H-\sum_{i=1}^n Y_i)\beta} u^{\alpha(t)-1} e^{-\beta u} du}{\Gamma(\alpha(t))} \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \Phi^n\left(\frac{W_U - \mu_W}{\sigma_W}\right)
 \end{aligned} \tag{5-15}$$

由式（5-15）可知，由于 Gamma 随机过程的引入，导致难以获取该式的结果，故可采用 Monte Carlo 模拟方法对其进行分析。具体模拟流程如图 5-7 所示。其中， t 为时间， nt 为针对时间 t 设定的维度， M 为冲击发生的最高次数， N 为抽样次数，在模拟过程中，需要设置抽样次数 N 与冲击发生最高次数 M ，这两个值决定每个时刻产品可靠度评估的精度。抽样次数越多，结果的准确度会越高，但计算时间会较长。根据文献[118,119]的研究，可以依据置信带的要求适当设置这两个参数，Monte Carlo 模型方法的误差大约为 $1/\sqrt{N \times M}$ 。

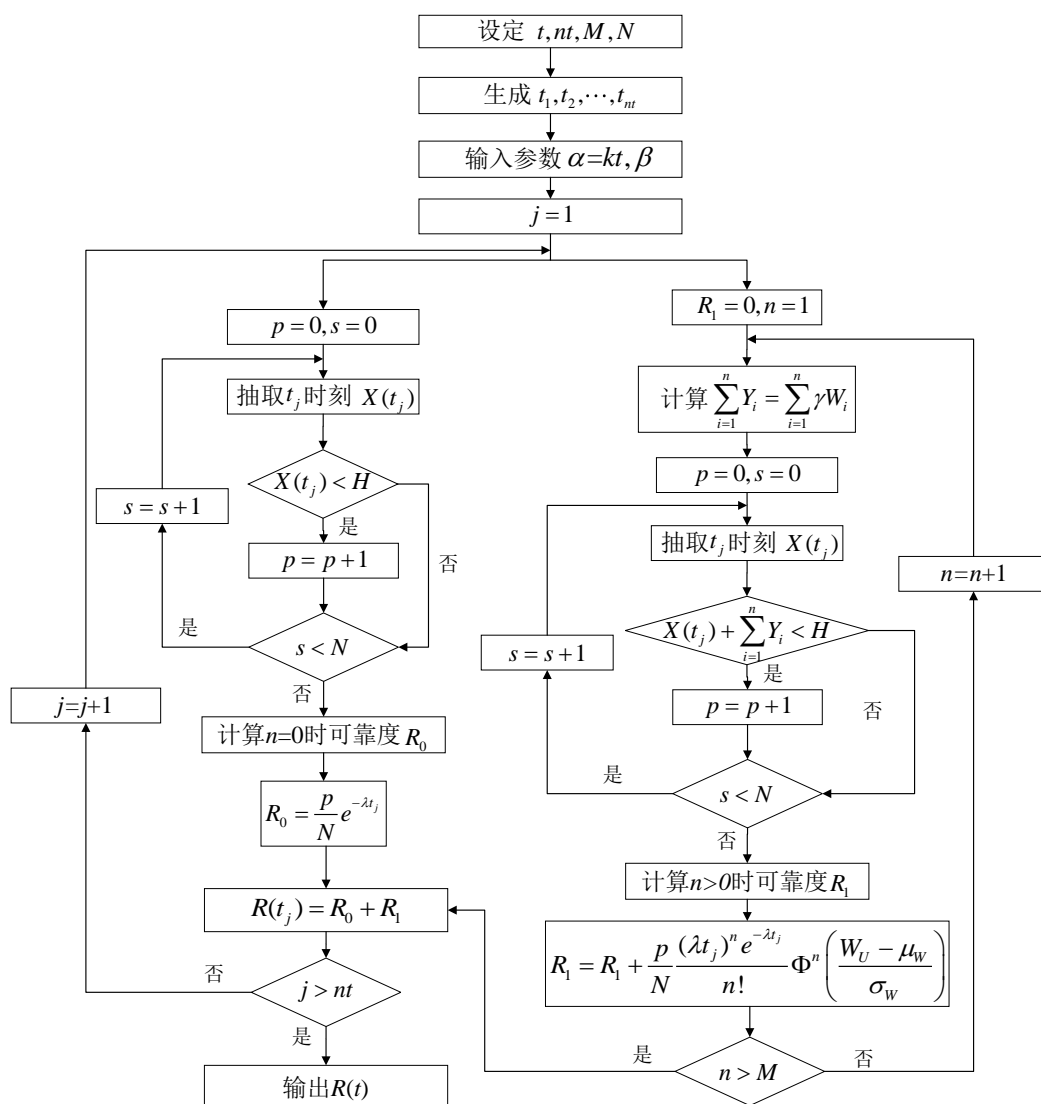


图 5-7 Monte Carlo 模拟流程

5.3 应用示例

在风电齿轮箱中，高速输出轴上的齿轮失效模式主要是齿面接触疲劳失效和齿根弯曲疲劳失效，体现为磨损、点蚀、轮齿断裂等。根据第四章内容，假设只考虑该齿轮的弯曲疲劳强度退化失效情况，以 Gamma 随机过程表征其失效过程；假设齿轮轮齿因遭受过大的应力作用而直接断裂为突发失效模式。齿轮在正常运行中，强度呈现持续退化过程，同时可能会受到风速的变化以及润滑油液中的金属磨粒等影响，导致出现应力的突变值。应力变化值的大小会对齿轮造成不同程度的损伤，即加剧退化失效的发生；当应力变化值大于一定阈值时，齿轮直接发生轮齿断裂。故而，齿轮的失效过程包含了两种不同的失效模式，且二者存在竞争关系。

若齿轮的退化失效过程服从形状参数为 $\alpha(t)$ 、尺度参数为 β 的Gamma随机过程，退化失效阈值为 H ，此处考虑齿轮可能存在的个体差异性，令 H 服从正态分布，即 $H \sim N(\mu_H, \sigma_H^2)$ ；冲击的到达次数服从参数 λ 的泊松过程，第 i 次冲击的大小服从正态分布，即 $W_i \sim N(\mu_w, \sigma_w^2)$ ；第 i 次冲击导致的额外退化增量为 Y_i ，且 $Y_i = \gamma W_i$ ， γ 为比例常数，突发失效阈值为 W_U 。参考文献[120]，设置参数具体如表 5-1 中所示，通过 Monte Carlo 模拟分析后，得到其竞争失效的可靠度曲线如图 5-8 所示。其中，抽样次数 N 设为 5000，冲击发生最高次数 M 设为 200。

表 5-1 齿轮竞争失效过程参数

参数	数值	参数	数值
$\alpha(t)$	$1.5426 \times 10^{-3} t$	μ_w	400MPa
β	0.8614	σ_w	40MPa
μ_H	175MPa	W_U	500MPa
σ_H	30MPa	γ	2×10^{-2}
λ	$5 \times 10^{-5} / \text{h}$		

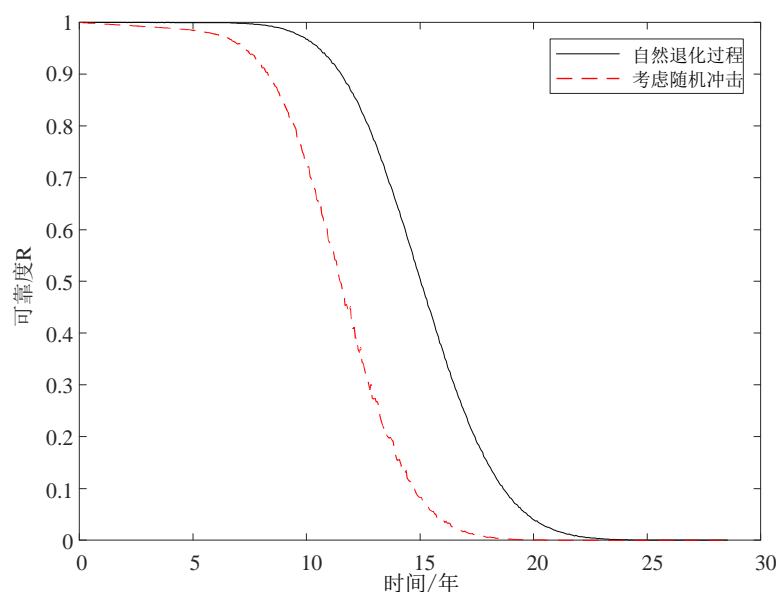
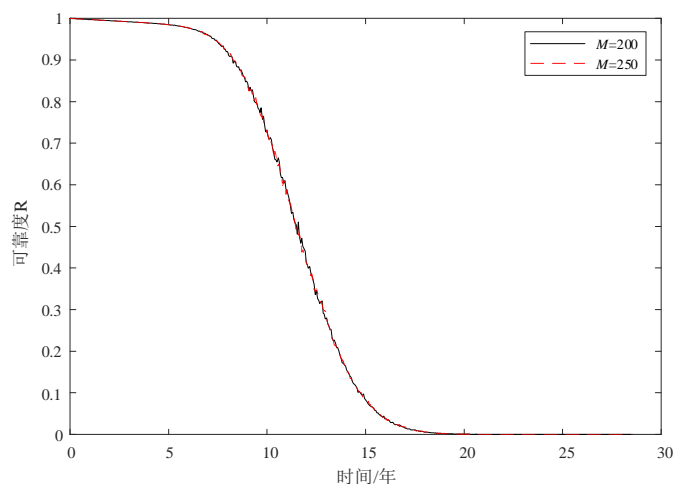
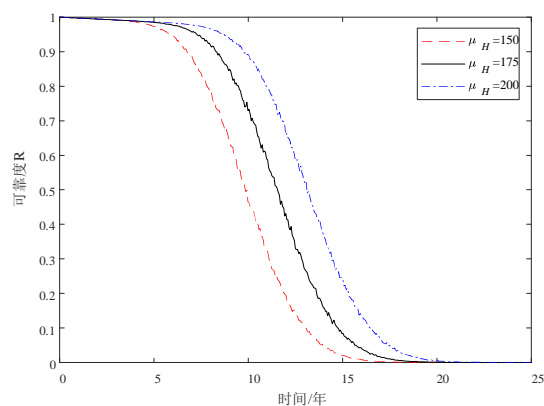
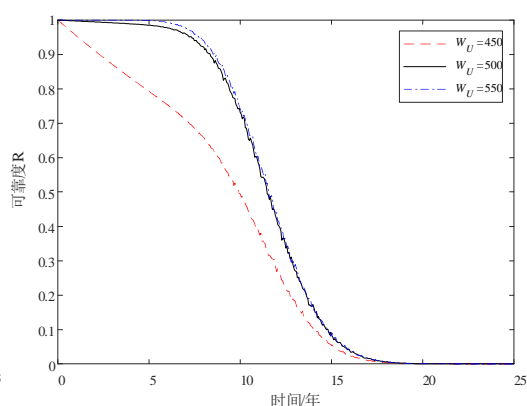
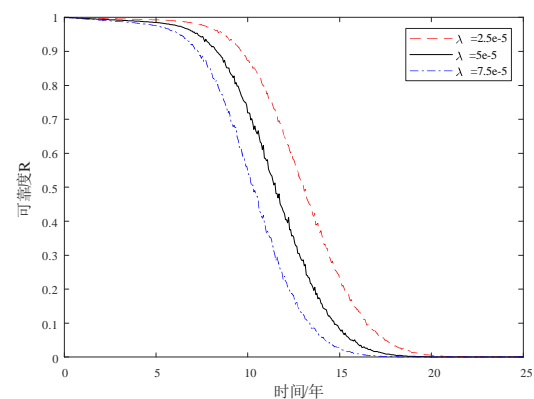
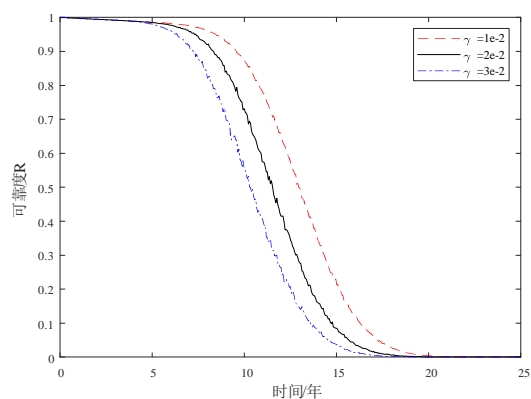


图 5-8 齿轮竞争失效可靠度曲线

从图 5-8 可以看出，考虑外部冲击时齿轮的可靠度与不考虑时的可靠度会存在较大差异，故而外部冲击对产品的影响不应被忽略。为验证冲击最高发生次数 M 取值为 200 时是否合理，取 M 为 250 时的结果作对比，如图 5-9 所示。结果显示，当 M 取值为 250 时产品的可靠度与取值为 200 时齿轮的可靠度无明显差异，故 M 取值为 200 时是合理的。

图 5-9 不同最高次数 M 时齿轮的可靠度曲线

由于不同齿轮具有不同的性能以及运行环境可能存在差异，通过改变模型中参数值大小，研究不同条件下齿轮的可靠度。改变退化失效阈值 H 的均值 μ_H 、突发失效阈值 W_U 、泊松过程的参数 λ 以及比例常数 γ 的大小，研究各参数的不同对齿轮可靠度的影响程度，结果如图 5-10 至图 5-13 所示。

图 5-10 不同 μ_H 时齿轮的可靠度曲线图 5-11 不同 W_U 时齿轮的可靠度曲线图 5-12 不同 λ 时齿轮的可靠度曲线图 5-13 不同 γ 时齿轮的可靠度曲线

结果显示,不同的参数取值对竞争失效过程的可靠度产生不同的差异。当产品具有越大的退化失效阈值均值和越大的突发失效阈值,产品的可靠度会越高,二者的区别在于突发失效阈值主要影响产品可靠度曲线前半部分,而退化失效阈值均值对曲线整体的影响效果相对均匀。与之相反,越大的冲击发生强度和越大的比例常数,产品各时间点对应的可靠度会明显减小。因此,若在保证齿轮具有较高的可靠度,不仅要保证齿轮具备足够的强度,还要保证齿轮处于一个良好的运行环境。

5.4 本章小结

本章考虑了随机冲击对产品性能退化过程的影响,以极端值冲击模型描述产品突发失效发生的过程,以 Gamma 随机过程描述产品的自然退化过程,考虑非致命冲击对产品的损伤,表征为额外的退化增量。结合概率论相关知识,搭建了产品存在的竞争失效过程模型,并通过齿轮存在的弯曲疲劳失效过程验证模型的有效性。最终结果显示,考虑了随机冲击的作用,齿轮的可靠度较自然退化过程时会有明显的下降,故可靠性分析时需要考虑外部冲击的影响。

第六章 总结与展望

6.1 总结

本文以风电齿轮箱为研究对象,对整个齿轮箱系统进行 FMECA 分析,针对齿轮箱中关键零件,即高速级传动齿轮进行性能退化分析。考虑失效相关性以及外部冲击对齿轮退化失效过程的影响,对齿轮失效过程进行可靠性建模。主要研究内容及取得的成果如下:

(1) 对传统的 FMECA 方法进行了简要的概述,介绍风电齿轮箱的组成结构以及原理,基于传统的 FMECA 方法对整个风电齿轮箱进行故障分析,得到危害性较高的零部件是齿轮箱中的高速级齿轮。

(2) 针对传统的 FMECA 方法在三个评价要素等级的描述、评价要素权重的确定以及故障模式重要程度的排序三个方面存在的不足,对传统 FMECA 方法进行改进。引入模糊集理论优化专家评分,构造新的评分等级;基于层次分析法和熵权法分别对评价要素的主客观权重赋值;基于 TOPSIS 方法进行故障风险排序。将改进的 FMECA 方法应用到风电齿轮箱的故障分析中,分析结果显示,高速级齿轮是齿轮箱系统中危害性较高的零部件。

(3) 考虑到闭式齿轮零件的失效主要是齿面接触疲劳失效和齿根弯曲疲劳失效两种,基于 Gamma 随机过程和 Copula 理论研究其接触疲劳强度和弯曲疲劳强度退化失效过程。以 Gamma 随机过程描述齿轮强度退化失效过程,通过材料的 $P-S-N$ 曲线估计 Gamma 随机过程中的未知参数,构建齿轮部件强度退化失效过程模型。考虑高速级传动系统中两齿轮的相关性和各齿轮中两失效模式的相关性,应用 Copula 函数模型来表征相关关系,并通过 Monte Carlo 方法对建立的模型进行了验证。

(4) 针对外部冲击对产品性能退化失效过程的影响,对产品失效过程进行了详细的描述,搭建了随机冲击下产品突发失效过程和退化失效过程的可靠性模型。考虑到二者存在竞争关系,建立随机冲击下产品的竞争失效过程模型。考虑到模型函数难以得到解析解,采用 Monte Carlo 方法验证了所构建模型的可行性,同时研究了不同参数对可靠度的影响程度。

6.2 展望

本文对风电齿轮箱系统和其中的关键零件进行了可靠性分析,遵循了由整体

到局部的顺序，在研究方法上作出一些改进。但是，由于本人水平和时间的限制，仍有许多工作尚待进一步研究，诸如：

（1）改进的 FMECA 方法对打分人员的相对权重没有深入的探索，以及在风险排序时，可以尝试构建物元模型（matter-element model）判定故障模式的风险优先顺序。

（2）风电齿轮箱中的零件不仅仅只有齿轮，还包含轴承和轴等，后续的研究可以同时分析其它零件的可靠性，以此系统的评估整个风电齿轮箱的可靠性。同时，像齿轮这样的零件，只考虑其强度退化失效有一定局限性，诸如磨损等失效模式需要深入研究。

（3）考虑外部冲击对产品的作用时，可考虑外部冲击对退化速率的影响，而不仅仅是考虑额外退化增量的累积；另外，由于产品性能的持续下降，可能受到更多冲击作用，可以考虑随时间推移而逐步变大的额外退化增量。

致 谢

今年已是在电子科技大学的第七个年头，也可能是人生中最后的校园时光，光阴荏苒啊。回想起刚来大学的时候，还是个懵懵懂懂的小朋友，现在已经变得有些许沧桑感。这七年里，经历了太多的事，也遇到很多人，人生本应丰富多彩，但有时也莫名感伤。一路上的磕磕绊绊，也让自己逐步成长，这段记忆也终将让我永生难忘！

当然，在这段旅程中，我身边也有许多必须感谢的人！

首先，感谢我的导师李彦锋副教授，您敬业的态度，优秀的品格，等等，无不感染着我。对我的科研之路提出指导性的意见，对我的毕业论文进行详细的修改，和您亦师亦友。在此，我深切表达对李老师的感谢！

其次，我要感谢我的另一位老师黄洪钟教授，黄老师是一位慈祥的老师，科研工作到凌晨是他的常态，教研室会议上的虚心教导，生活中慷慨的分享，让我在教研室里感受到家庭般的氛围。在此，我深切表达对黄老师的感谢！

另外，我要感谢我的研友们，他们是陈卓、刘承、刘金星、王学明、邓智铭、刘子昂、黄土地、袁海晟、钱雨晴、邓新蕴、周诗扬，感谢这三年来大家的陪伴，一起聚餐，一起组织会议，一起讨论问题，一起开玩笑。感谢我的舍友余明东同学，感谢你生活中的关照。感谢好友彭诚、本科同学李豪，感谢你们的分享。感谢大家带给我的启发，感谢大家对我的帮助！

再而，我要感谢师兄们的帮助，尤其是钱华明师兄，共处一个教研室，大家都是集体的一份子。

最后，我要感谢我的家人们，我的亲人们，感谢大家的陪伴，感谢大家对我的关怀与信任！

最后的最后，感谢学校相关的工作者，感谢评阅的老师，感谢帮助过我的陌生人，祝愿你们健健康康，幸福快乐！

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[N]. 人民日报, 2020 年 12 月 22 日.
- [2] 王佳丽. 世界能源未来何去何从?——2018 全球主要能源展望报告分析[J]. 能源, 2018, (9): 92-96.
- [3] 国际能源署. 2040 年世界能源预测[J]. 中外能源, 2020, 25(9): 100.
- [4] Global wind Energy Council. Global Wind Report 2021[R]. Brussels, Belgium: Global wind Energy Council, March 18th, 2021.
- [5] 林锋. 风电齿轮箱齿轮的疲劳寿命及点蚀下可靠度的计算[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
- [6] 刘忠明, 段守敏, 王长路. 风力发电齿轮箱设计制造技术的发展与展望[J]. 机械传动, 2006, (6): 1-6.
- [7] 窦春红. 风电齿轮箱运行状态监测与故障诊断[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [8] 赵明航. 基于深度残差学习的风电齿轮箱故障诊断[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [9] 杨腾飞. 基于失效物理相关性的风电齿轮箱可靠性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [10] 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.
- [11] 夏新球. 高可靠风电齿轮箱技术在后市场的应用[C]. 中国农业机械工业协会风力机械分会. 第六届中国风电后市场交流合作大会论文集. 中国农业机械工业协会风力机械分会: 中国农业机械工业协会风力机械分会, 2019: 253-258.
- [12] 石万凯, 郑站强, 宋丽鸽. 风电齿轮箱固有特性分析及工作模态测试[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(6): 888-891.
- [13] 刘波, 安宗文. 考虑零件寿命相关的风电齿轮箱可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 164-171.
- [14] 郑朝朋. 2.5MW 风电齿轮箱可靠性分析[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.
- [15] 宋斌斌. 风电齿轮箱动力学及疲劳分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [16] 陈萌. 基于变分模态分解的风电齿轮箱故障诊断方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [17] 刘栋. 风力发电机齿轮箱可靠性分析与优化设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [18] 王柱. 海上风力发电机组齿轮箱故障信号提取与剩余寿命预测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [19] 何仁杰. 全寿命周期内风电齿轮箱响应规律分析及齿轮优化研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [20] 朱永超. 基于机器学习的风电齿轮箱运行状态评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.

- [21] 任建亭. 大数据驱动的风电齿轮箱智能健康监测系统[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [22] J. Gallego-Calderon, A. Natarajan, N. K. Dimitrov. Effects of bearing configuration in wind turbine gearbox reliability[J]. *Energy Procedia*, 2015, 80: 392-400.
- [23] I. Antoniadou, G. Manson, W. J. Staszewski, et al. A time-frequency analysis approach for condition monitoring of a wind turbine gearbox under varying load conditions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 64-65: 188-216.
- [24] D. Dąbrowski, A. Natarajan. Assessment of gearbox operational loads and reliability under high mean wind speeds[J]. *Energy Procedia*, 2015, 80: 38-46.
- [25] D. Shin, K. Ko. Comparative analysis of degradation rates for inland and seaside wind turbines in compliance with the International Electrotechnical Commission standard[J]. *Energy*, 2017, 118: 1180-1186.
- [26] Y. Yan. Load characteristic analysis and fatigue reliability prediction of wind turbine gear transmission system[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 130: 105259.
- [27] H. F. He, H. J. Liu, C. C. Zhu, et al. Study of rolling contact fatigue behavior of a wind turbine gear based on damage-coupled elastic-plastic model[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 141: 512-519.
- [28] W. Wang, H. J. Liu, C. C. Zhu, et al. Evaluation of contact fatigue risk of a carburized gear considering gradients of mechanical properties[J]. *Friction*, 2020, 8: 1039-1050.
- [29] V. Rajinikanth, M. K. Soni, B. Mahato, et al. Study of microstructural degradation of a failed pinion gear at a cement plant[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 95: 117-126.
- [30] X. Wan, D. Wang, P. W. Tse, et al. A critical study of different dimensionality reduction methods for gear crack degradation assessment under different operating conditions[J]. *Measurement*, 2016, 78: 138-150.
- [31] J. J. Chen, W. Li, L. C. Sheng, et al. Study on reliability of shearer permanent magnet semi-direct drive gear transmission system[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 132: 105387.
- [32] X. Wang. Stability research of multistage gear transmission system with crack fault[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 434: 63-77.
- [33] A. Beinstingel, M. Keller, M. Heider, et al. A hybrid analytical-numerical method based on Isogeometric Analysis for determination of time varying gear mesh stiffness[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 160(11): 104291.

- [34] X. He, X. Zhou, Z. Xue, et al. Effects of gear eccentricity on time-varying mesh stiffness and dynamic behavior of a two-stage gear system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(3): 1019-1032.
- [35] L. Ryali, D. Talbot. A dynamic load distribution model of planetary gear sets[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 158: 104229.
- [36] H. L. Liu, H. J. Liu, C. C. Zhu, et al. Study on contact fatigue of a wind turbine gear pair considering surface roughness[J]. Friction, 2020, 8(3): 553-567.
- [37] 安宗文, 董雅芸. 基于马尔可夫过程的风电齿轮箱齿轮强度退化模型[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(3): 34-38.
- [38] 孙秀全, 王铁, 张瑞亮, 等. 斜齿轮渐进性磨损对齿轮振动特性的影响分析[J]. 机械传动, 2021, 45(1): 17-22.
- [39] 裴未迟. 重型装备传动齿轮疲劳裂纹演化试验与数值模拟研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [40] 王晓鹏. 齿面疲劳点蚀下齿轮传动系统动态特性研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2020.
- [41] 惠廷云, 史晓亮, 刘锡尧. 基于 FMECA 方法的自动扶梯驱动主机可靠性分析与研究[J]. 中国电梯, 2019, 30(4): 57-63.
- [42] 康迎宾, 李志强, 李斌. 基于 FMECA 的水闸安全评价适用性研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(5): 135-139.
- [43] 丁慧霞, 赵百捷, 杨储华, 等. 基于 FMECA 的电力通信网运行风险评估方法[J]. 光通信技术, 2017, 41(5): 5-8.
- [44] 谢长城, 谢旭东, 周群. APU 高压涡轮导向叶片的 FMECA 分析[J]. 航空维修与工程, 2016, (2): 78-80.
- [45] 谢非. 多失效模式下的涡轮叶片疲劳寿命预测与灵敏度分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [46] 孔雷星, 冷学敏, 马季军, 等. 改进 FMECA 在空间电源分系统中的应用[J]. 上海航天, 2021, 38(1): 142-149.
- [47] 杨斌. 工业机器人的可靠性分配方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [48] 包民新. 基于层次分析法的工业机器人可靠性建模技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [49] 王弘毅. 多失效模式下工业机器人驱动器可靠性分析与优化[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [50] 李本. 多失效模式下工业机器人 RV 减速器可靠性分析与优化[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

- [51] 章浩然, 洪荣晶, 陈复兴, 等. 基于 FMECA 和模糊评判的数控机床可靠性分析方法[J]. 制造技术与机床, 2020, (11): 125-129.
- [52] 夏震宇, 杨波. 基于改进 FMECA 的装备故障风险定量评估[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(9): 16-19.
- [53] 陈旭琪, 刘虎沉. 基于改进 FMEA 模型的众包风险评价研究[J]. 模糊系统与数学, 2019, 33(6): 73-84.
- [54] 韦可佳, 耿俊豹, 徐孙庆. 基于模糊理论与 D-S 证据理论的 FMEA 方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2662-2668.
- [55] Y. K. Gu, Z. X. Cheng, G. Q. Qiu. An improved FMEA analysis method based on QFD and TOPSIS theory[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2019, 13(2): 617-626.
- [56] G. Di Bona, A. Silvestri, A. Forcina, et al. AHP-IFM target: An innovative method to define reliability target in an aerospace prototype based on analytic hierarchy process[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2017, 33(8): 1731-1751.
- [57] H. C. Liu, J. X. You., X. Y. You, et al. A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method[J]. Applied Soft Computing, 2015, 28: 579-588.
- [58] Z. Wang, Y. Ran, Y. Chen, et al. Failure mode and effects analysis using extended matter-element model and AHP[J]. Computers and Industrial Engineering, 2019, 140: 106233.
- [59] L. H. Ouyang, Y. Zhu, W. Zheng, et al. An Information fusion FMEA method to assess the risk of healthcare waste[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2021, 6(1): 111-124.
- [60] 杨圆鉴. 基于退化模型的机械产品可靠性评估方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [61] 郭骏宇. 多源信息下数控机床关键子系统可靠性建模与评估研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [62] 张云, 姜楠, 王立平. 基于 Wiener 过程的数控转台极小子样可靠性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(2): 91-95.
- [63] 张鼻, 王治华, 赵振平, 等. 两阶段非线性 Wiener 过程退化建模与可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(4): 954-959.
- [64] 李奎, 高志成, 武一, 等. 基于统计回归和非线性 Wiener 过程的交流接触器剩余寿命预测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4058-4070.
- [65] 潘广泽, 张铮, 罗琴, 等. 基于维纳过程和蒙特卡洛法的多元性能退化产品可靠性评估[J]. 环境技术, 2019, (S2): 107-111.

- [66] Z. Zhou, T. Ren, F. Zhong, et al. Anti-radiation performance assessment of satellite units based on the Weiner process[J], IEEE Access, 2018, 6: 9785-9791.
- [67] Q. Zhai, Z. S. Ye, J. Yang, et al. Measurement errors in degradation based burn-in[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 150: 126-135.
- [68] 王雨薇. 基于性能退化信息的可靠性分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [69] C. Park, W. J. Padgett. Accelerated degradation models for failure based on geometric Brownian motion and gamma processes[J]. Lifetime Data Analysis, 2005, 11(4): 511-527.
- [70] B. H. Song, Z. B. Zhou, C. Q. Ma, et al. Performance evaluation of anti-radiation based on the gamma degradation process[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(4): 501-509.
- [71] 杨志远, 赵建民, 程中华, 等. 基于退化相关性分析的竞争失效系统可靠性模型[J]. 兵工学报, 2020, 41(7): 1423-1433.
- [72] 李明福, 胡昌华, 周志杰, 等. 基于逆高斯过程和证据推理的退化建模方法[J]. 电光与控制, 2015, 22(1): 92-96.
- [73] W. W. Peng, Y. F. Li, Y. J. Yang, et al. Inverse Gaussian process models for degradation analysis: A Bayesian perspective[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 130(1): 175-189.
- [74] 袁帅辉. 考虑性能退化和失效相关的汽车盘式制动器可靠性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [75] P. R. Adduri, R. C. Penmetsa. Bounds on structural system reliability in the presence of interval variables[J]. Computers and Structures, 2007, 85(5): 320-329.
- [76] O. Ditlevsen. System reliability bounding by conditioning[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1982, 108(5): 708-718.
- [77] 梁玲强. 考虑失效相关的柴油机曲柄连杆机构可靠性分析[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- [78] 唐家银, 赵永翔, 何平, 等. 机械系统相关性可靠度计算的 Copula 新理论[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(4): 532-535.
- [79] J. Navarro, P. Fernández-Martínez. Redundancy in systems with heterogeneous dependent components[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 290(2): 766-778.
- [80] 陈文华, 郑朝朋, 李奇志, 等. 基于 Copula 函数的 2.5MW 风电齿轮箱齿轮可靠性分析[J]. 工程设计学报, 2015, 22(5): 425-430.
- [81] 鲍兆伟. 基于 Copula 函数的多参数退化评估方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [82] 袁莉芬, 朋张胜, 何怡刚. 基于 Copula 函数的光纤陀螺贮存可靠性评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 58-65.
- [83] 胡启国, 高展. 多元参数退化的系统相关竞争失效可靠性评估方法[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(6): 1191-1199.

- [84] 戚晓艳. 基于关联性和参数退化模型的加工中心可靠性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [85] 刘建同. 系统可靠性保证工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014: 53.
- [86] 王亚荣. 风力发电与机组数据[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 89.
- [87] 翟晶, 王曰辉. 风电齿轮箱常见故障及原因分析[J]. 现代机械, 2017, (6): 70-73.
- [88] S. Faulstich, B. Hahn, P. J. Tavner. Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment[J]. Wind Energy, 2011, 14(3): 327-337.
- [89] 欧阳中辉, 胡道畅, 陈青华, 等. 基于模糊集理论和 TOPSIS 的 FMEA 分析方法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(11): 117-123.
- [90] 王立恩, 刘虎沉. 基于模糊集和 COPRAS 的改进 FMEA 方法[J]. 模糊系统与数学, 2017, 31(3): 69-78.
- [91] 张颜. 基于改进 FMEA 方法的南水北调中线工程运行安全关键风险源诊断[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- [92] 赵德孜. 机械系统设计初期的可靠性模型模糊预计与分配[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [93] T. J. Rose. 模糊逻辑及其工程应用[M]. 钱同惠, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [94] C. B. Chen, C. M. Klein. A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics, Part B (Cybernetics), 1997, 27(1): 26-35.
- [95] R. W. Saaty. The analytic hierarchy process - what it is and how it is used[J]. Mathematical Modelling, 1987, 9(3): 161-176.
- [96] 孙贵艳, 王胜, 肖磊. 基于熵权 TOPSIS 法的重庆能源安全研究[J]. 中国煤炭, 2019, 45(2): 19-24.
- [97] 刘忠国. 基于熵权 TOPSIS 和模糊贝叶斯网络的冷链物流配送系统风险评价研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2020.
- [98] 高建雄. 考虑强度退化及失效相关性的风电齿轮箱可靠性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [99] 钱正坤. 矿用挖掘机提升机构传动系统动力学及可靠性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [100] J. M. Van Noortwijk. A survey of the application of gamma processes in maintenance[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(1): 2-21.
- [101] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [102] 李莉. 机械零件疲劳强度若干问题的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [103] 翟银秀. 改进疲劳损伤模型与基于 $P-S-N$ 的疲劳可靠性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

- [104] 张乙. 多失效模式下的工业机器人谐波减速器时变可靠性分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [105] R. B. Nelsen. An introduction to Copulas[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- [106] 朱新玲. 相关系数与 Copula 函数相关性比较研究[J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32(6): 664-668.
- [107] 吴娟, 刘次华, 邱小霞. 基于 Copula 理论的相关性测度[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2008(3): 299-302.
- [108] 朱森第, 方向威, 吴民达, 等. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 163.
- [109] 陈涛. 小样本条件下风电齿轮传动系统动态可靠性预测方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [110] 程娅慧. 风电齿轮齿形优化及疲劳可靠性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [111] 姚森. 基于 SCADA 系统运行数据的风机齿轮箱齿轮疲劳寿命分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [112] 陈瑞涛. 多性能退化风电机组传动系统动态可靠性评估与寿命预测[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [113] 张永进. 复杂系统可靠性设计的若干关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [114] 刘征. 混合不确定性下的重型数控机床主轴系统可靠性建模与分析方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [115] 黄明. 考虑性能退化的动量轮可靠性建模研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [116] Z. L. Wang, H. Z. Huang, Y. F. Li, et al. An approach to reliability assessment under degradation and shock process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(4): 852-863.
- [117] 王嘉, 张云安, 韩旭. 基于互依关系的退化与随机冲击建模研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(2): 230-238.
- [118] M. Fan, Z. Zeng, E. Zio, et al. Modeling dependent competing failure processes with degradation-shock dependence[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 165(9): 422-430.
- [119] S. Hao, J. Yang. Reliability analysis for dependent competing failure processes with changing degradation rate and hard failure threshold levels[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 118(3): 340-351.

- [120] H. D. Gao, L. R. Cui, Q. G. Qiu. Reliability modeling for degradation-shock dependence systems with multiple species of shocks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 185: 133-143.

附录

附录 1 风电齿轮箱 FMECA 表

子系统	零部件	代码	故障模式	故障原因	故障影响			补偿措施	S	O	D	RPN
					局部影响	高一层次影响	最终影响					
齿轮系	一级齿圈	G1	齿面磨损	油液中有杂质、润滑不足、油温过高	齿面渐开线齿形失真、齿侧间隙增大、产生磨粒	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生冲击和噪音	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证轮齿强度，定期更换润滑油，加强散热	3	4	6	72
		G2	齿面点蚀	齿面接触疲劳强度不足、润滑油不符合要求	导致齿面粗糙、影响齿面受力、产生金属颗粒	降低齿轮传动平稳性、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证轮齿强度，采用粘度较高的润滑油	4	4	5	80
		G3	齿面胶合	油温过高、润滑不足	导致齿面粗糙、影响齿面受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	定期更换润滑油，加强散热	4	3	5	60
		G4	轮齿折断	重载冲击、应力集中、齿根弯曲强度不足	齿轮残缺、产生金属异物	轻则降低齿轮传动平稳性，重则齿轮无法传动	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低，甚至停机	提高轮齿强度，避免较大冲击载荷	8	1	3	24
		G5	轮齿塑性变形	重载冲击、应力集中、啮合区有异物	影响齿轮受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常，传动效率降低	保证充分润滑，清洁润滑油液	5	1	4	20
	二级行星轮	G6	齿面磨损	油液中有杂质、润滑不足、油温过高	齿面渐开线齿形失真、齿侧间隙增大、产生磨粒	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生冲击和噪音	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证轮齿强度，定期更换润滑油，加强散热	3	4	6	72
		G7	齿面	齿面接触疲劳	导致齿面粗糙、	降低齿轮传动平稳	齿轮箱振动异常，	定期更换润滑	4	4	5	80

			点蚀	强度不足、润滑油不符合要求	影响齿面受力、产生金属颗粒	性、产生振动和噪声	传动效率降低,寿命降低	油, 加强散热				
		G8	齿面胶合	油温过高、润滑不足	导致齿面粗糙、影响齿面受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿命降低	定期更换润滑油, 加强散热	4	3	5	60
		G9	轮齿折断	重载冲击、应力集中、齿根弯曲强度不足	齿轮残缺、产生金属异物	轻则降低齿轮传动平稳性, 重则齿轮无法传动	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿命降低, 甚至停机	提高轮齿强度, 避免较大冲击载荷	8	2	3	48
		G10	轮齿塑性变形	重载冲击、应力集中、啮合区有异物	影响齿轮受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿命降低	保证充分润滑, 清洁润滑油液	5	2	4	40
	平行轴大齿轮	G11	齿面磨损	油液中有杂质、润滑不足、油温过高	齿面渐开线齿形失真、齿侧间隙增大、产生磨粒	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生冲击和噪音	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿命降低	保证轮齿强度, 定期更换润滑油, 加强散热	4	5	5	100
		G12	齿面点蚀	齿面接触疲劳强度不足、润滑油不符合要求	导致齿面粗糙、影响齿面受力、产生金属颗粒	降低齿轮传动平稳性、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿命降低	保证轮齿强度, 采用粘度较高的润滑油	5	4	5	100
		G13	齿面胶合	油温过高、润滑不足	导致齿面粗糙、影响齿面受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿命降低	定期更换润滑油, 加强散热	5	3	5	75
		G14	轮齿折断	重载冲击、应力集中、齿根弯曲强度不足	齿轮残缺、产生金属异物	轻则降低齿轮传动平稳性, 重则齿轮无法传动	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿命降低, 甚至停机	提高轮齿强度, 避免较大冲击载荷	9	3	3	81
		G15	轮齿塑性变形	重载冲击、应力集中、啮合区有异物	影响齿轮受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿命降低	保证充分润滑, 清洁润滑油液	5	3	5	75
轴承系	圆柱滚子	B1	轴承磨损	润滑不足、油液中有杂质	轴承尺寸精度丧失、产生磨粒、	降低传动平稳性、降低传动效率、重则传	齿轮箱振动异常, 传动效率降低, 寿	定期清洁或更换润滑油, 提高	4	4	6	96

	轴承				重则轴承丧失旋转精度	动失效	命降低	轴承密封性				
		B2	轴承点蚀	轴承材料强度不足、润滑油不符合要求	轴承尺寸精度丧失、产生金属粒、加剧磨损	降低传动平稳性、降低传动效率	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证轴承材料强度，采用粘度较高的润滑油	4	4	5	80
		B3	滚动体碎裂	疲劳破坏、油膜破坏	轴承失效、产生金属异物	传动失效、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常，甚至停机	保证滚动体强度，充分润滑	7	1	4	28
		B4	保持架破坏	装配异常、轴承振动、润滑不足、油液中有异物	轴承失效、产生金属异物	传动失效、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常，甚至停机	改善装配工艺，充分润滑，定期清洁或更换润滑油	7	2	4	56
	圆锥滚子轴承	B5	轴承磨损	润滑不足、油液中有杂质	轴承尺寸精度丧失、产生磨粒、重则轴承丧失旋转精度	降低传动平稳性、降低传动效率、重则传动失效	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	定期清洁或更换润滑油，提高轴承密封性	4	4	6	96
		B6	轴承点蚀	轴承材料强度不足、润滑油不符合要求	轴承尺寸精度丧失、产生金属粒、加剧磨损	降低传动平稳性、降低传动效率	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证轴承材料强度，采用粘度较高的润滑油	4	4	5	80
		B7	滚动体碎裂	疲劳破坏、油膜破坏	轴承失效、产生金属异物	传动失效、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常，甚至停机	保证滚动体强度，充分润滑	7	1	3	21
		B8	保持架破坏	装配异常、轴承振动、润滑不足、油液中有异物	轴承失效、产生金属异物	传动失效、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常，甚至停机	改善装配工艺，充分润滑，定期清洁或更换润滑油	7	2	3	42
	调心滚子轴承	B9	轴承磨损	润滑不足、油液中有杂质	轴承尺寸精度丧失、产生磨粒、重则轴承丧失旋转精度	降低传动平稳性、降低传动效率、重则传动失效	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	定期清洁或更换润滑油，提高轴承密封性	4	4	6	96
		B10	轴承点蚀	轴承材料强度不足、润滑油	轴承尺寸精度丧失、产生金属粒、	降低传动平稳性、降低传动效率	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿	保证轴承材料强度，采用粘度	4	4	5	80

轴系				不符合要求	加剧磨损		命降低	较高的润滑油				
		B11	滚动体 碎裂	疲劳破坏、油 膜破坏	轴承失效、产生 金属异物	传动失效、产生振动 和噪声	齿轮箱振动异常， 甚至停机	保证滚动体强 度，充分润滑	7	1	4	28
		B12	保持架 破坏	装配异常、轴 承振动、润滑 不足、油液中 有异物	轴承失效、产生 金属异物	传动失效、产生振动 和噪声	齿轮箱振动异常， 甚至停机	改善装配工艺， 充分润滑，定期 清洁或更换润 滑油	7	2	4	56
	深沟 球轴 承	B13	轴承 磨损	润滑不足、油 液中有杂质	轴承尺寸精度丧 失、产生磨粒、 重则轴承丧失旋 转精度	降低传动平稳性、降 低传动效率、重则传 动失效	齿轮箱振动异常， 传动效率降低，寿 命降低	定期清洁或更 换润滑油，提高 轴承密封性	4	4	6	96
		B14	轴承 点蚀	轴承材料强度 不足、润滑油 不符合要求	轴承尺寸精度丧 失、产生金属粒、 加剧磨损	降低传动平稳性、降 低传动效率	齿轮箱振动异常， 传动效率降低，寿 命降低	保证轴承材料 强度，采用粘度 较高的润滑油	4	3	5	60
		B15	滚动体 碎裂	疲劳破坏、油 膜破坏	轴承失效、产生 金属异物	传动失效、产生振动 和噪声	齿轮箱振动异常， 甚至停机	保证滚动体强 度，充分润滑	6	1	3	18
		B16	保持架 破坏	装配异常、轴 承振动、润滑 不足、油液中 有异物	轴承失效、产生 金属异物	传动失效、产生振动 和噪声	齿轮箱振动异常， 甚至停机	改善装配工艺， 充分润滑，定期 清洁或更换润 滑油	6	2	3	36
	一级 行星 轮齿 轮轴	A1	齿面 磨损	油液中有杂 质、润滑不足、 油温过高	齿面渐开线齿形 失真、齿侧间隙 增大、产生磨粒	降低齿轮传动平稳 性、降低齿轮传动精 度、产生冲击和噪音	齿轮箱振动异常， 传动效率降低，寿 命降低	保证轮齿强度， 定期更换润滑 油，加强散热	3	4	5	60
		A2	齿面 点蚀	齿面接触疲劳 强度不足、润 滑油不符合要 求	导致齿面粗糙、 影响齿面受力、 产生金属颗粒	降低齿轮传动平稳 性、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常， 传动效率降低，寿 命降低	保证轮齿强度， 采用粘度较高 的润滑油	4	3	5	60
		A3	齿面 胶合	油温过高、润 滑不足	导致齿面粗糙、 影响齿面受力、 加剧磨损	降低齿轮传动平稳 性、降低齿轮传动精 度	齿轮箱振动异常， 传动效率降低，寿 命降低	定期更换润滑 油，加强散热	4	3	5	60

		A4	轮齿折断	重载冲击、应力集中、齿根弯曲强度不足	齿轮残缺、产生金属异物	轻则降低齿轮传动平稳性，重则齿轮无法传动	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低，甚至停机	提高轮齿强度，避免较大冲击载荷	9	2	3	54
		A5	轮齿塑性变形	重载冲击、应力集中、啮合区有异物	影响齿轮受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证充分润滑，清洁润滑油液	4	2	4	32
		A6	轴面磨损	润滑油中有杂质、润滑不足	轴不对中、导致齿轮啮合异常、产生磨粒	降低齿轮传动平稳性、振动异常	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证轴连接处润滑充分	2	3	6	36
		A7	轴弯曲变形	轴强度不足、装配异常、疲劳	轴不对中、导致齿轮啮合异常	降低齿轮传动平稳性、产生振动	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	选用高质量材料，优化装配工艺	6	1	3	18
		A8	轴断裂	应力集中、疲劳	轴断裂失效	传动失效	齿轮箱停机	选用高质量材料，避免重载冲击，避免应力集中	9	1	1	9
	二级太阳轮齿轴	A9	齿面磨损	油液中有杂质、润滑不足、油温过高	齿面渐开线齿形失真、齿侧间隙增大、产生磨粒	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生冲击和噪音	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证轮齿强度，定期更换润滑油，加强散热	3	4	5	60
		A10	齿面点蚀	齿面接触疲劳强度不足、润滑油不符合要求	导致齿面粗糙、影响齿面受力、产生金属颗粒	降低齿轮传动平稳性、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	保证轮齿强度，采用粘度较高的润滑油	4	3	5	60
		A11	齿面胶合	油温过高、润滑不足	导致齿面粗糙、影响齿面受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	定期更换润滑油，加强散热	4	3	5	60
		A12	轮齿折断	重载冲击、应力集中、齿根弯曲强度不足	齿轮残缺、产生金属异物	轻则降低齿轮传动平稳性，重则齿轮无法传动	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低，甚至停机	提高轮齿强度，避免较大冲击载荷	9	2	3	54
		A13	轮齿塑	重载冲击、应	影响齿轮受力、	降低齿轮传动平稳	齿轮箱振动异常，	保证充分润滑，	4	2	4	32

			性变形	力集中、啮合区有异物	加剧磨损	性、降低齿轮传动精度、产生振动和噪声	传动效率降低,寿命降低	清洁润滑油液				
		A14	轴面磨损	润滑油中有杂质、润滑不足	轴不对中、导致齿轮啮合异常、产生磨粒	降低齿轮传动平稳性、振动异常	齿轮箱振动异常,传动效率降低,寿命降低	保证轴连接处润滑充分	2	3	6	36
		A15	轴弯曲变形	轴强度不足、装配异常、疲劳	轴不对中、导致齿轮啮合异常	降低齿轮传动平稳性、产生振动	齿轮箱振动异常,传动效率降低,寿命降低	选用高质量材料,优化装配工艺	7	1	3	21
		A16	轴断裂	应力集中、疲劳	轴断裂失效	传动失效	齿轮箱停机	选用高质量材料,避免重载冲击,避免应力集中	9	1	1	9
	输出齿轮轴	A17	齿面磨损	油液中有杂质、润滑不足、油温过高	齿面渐开线齿形失真、齿侧间隙增大、产生磨粒	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生冲击和噪音	齿轮箱振动异常,传动效率降低,寿命降低	保证轮齿强度,定期更换润滑油,加强散热	5	6	5	150
		A18	齿面点蚀	齿面接触疲劳强度不足、润滑油不符合要求	导致齿面粗糙、影响齿面受力、产生金属颗粒	降低齿轮传动平稳性、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常,传动效率降低,寿命降低	保证轮齿强度,采用粘度较高的润滑油	5	5	5	125
		A19	齿面胶合	油温过高、润滑不足	导致齿面粗糙、影响齿面受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度	齿轮箱振动异常,传动效率降低,寿命降低	定期更换润滑油,加强散热	5	3	5	75
		A20	轮齿折断	重载冲击、应力集中、齿根弯曲强度不足	齿轮残缺、产生金属异物	轻则降低齿轮传动平稳性,重则齿轮无法传动	齿轮箱振动异常,传动效率降低,寿命降低,甚至停机	提高轮齿强度,避免较大冲击载荷	9	4	3	108
		A21	轮齿塑性变形	重载冲击、应力集中、啮合区有异物	影响齿轮受力、加剧磨损	降低齿轮传动平稳性、降低齿轮传动精度、产生振动和噪声	齿轮箱振动异常,传动效率降低,寿命降低	保证充分润滑,清洁润滑油液	6	4	5	120
		A22	轴面磨损	润滑油中有杂质、润滑不足	轴不对中、导致齿轮啮合异常、	降低齿轮传动平稳性、振动异常	齿轮箱振动异常,传动效率降低,寿	保证轴连接处润滑充分	2	4	6	48

					产生磨粒		命降低					
		A23	轴弯曲变形	轴强度不足、装配异常、疲劳	轴不对中、导致齿轮啮合异常	降低齿轮传动平稳性、产生振动	齿轮箱振动异常，传动效率降低，寿命降低	选用高质量材料，优化装配工艺	7	2	2	28
		A24	轴断裂	应力集中、疲劳	轴断裂失效	传动失效	齿轮箱停机	选用高质量材料，避免重载冲击和应力集中	9	2	1	18
润滑冷却系统	电动机	L1	电动机故障	高温损伤、电子器件损坏	电动机运行异常、油液输送异常	传动部件高温损伤	齿轮箱振动异常、寿命降低	采用优质电动机，检测其运行状况	4	3	1	12
	过滤器	L2	过滤器故障	异物堵塞、油液杂质颗粒较大	无法过滤异物、油液输送堵塞	传动部件高温损伤	齿轮箱寿命降低	及时疏通过滤网，定期检查	2	2	2	8
	泵	L3	泵故障	油液中有杂质导致叶轮磨损、部件松动	油液输送异常	传动部件高温损伤	齿轮箱寿命降低	定期检查泵的运行状况	2	1	2	4
	蓄油箱	L4	蓄油箱故障	化学腐蚀	油液输送异常、油液泄漏	传动部件高温损伤	齿轮箱寿命降低	定期检查油箱腐蚀情况	2	1	1	2
	密封件	L5	密封件故障	高温损伤、油膜破坏	油液泄漏	传动部件高温损伤	齿轮箱寿命降低	选用优质油液，充分润滑	4	2	2	16
	散热器	L6	散热器故障	工作疲劳、高温损坏	零件温度升高	传动部件高温损伤	齿轮箱寿命降低	检测散热器运行状况，定期维修	1	2	1	2
	软管	L7	软管故障	机械振动导致软管脱落、化学腐蚀、软管堵塞	油液输送异常、油液泄漏	传动部件高温损伤	齿轮箱寿命降低	及时更换及疏通软管	2	2	1	4
其他附件	紧固件	O1	紧固件故障	机械振动导致螺栓松动，垫片损坏等	零件间连接松动	零件传动异常	齿轮箱振动异常、甚至停机	定期检查时，加固或更换紧固件	4	3	2	24

	降噪装置	O2	降噪装置故障	机械振动	噪声污染	影响监测结果	加剧齿轮箱振动异常	定期检查维修	2	1	1	2
	传感器	O3	传感器故障	化学腐蚀、机械振动	输出参数失准	检测结果存在误差	监测结果异常或无法获取	监控异常数据，及时更换传感器	2	2	1	4

附录 2 风电齿轮箱各故障模式的评价信息

故障模式	评价要素	评价人员			故障模式	评价要素	评价人员			故障模式	评价要素	评价人员		
		P1	P2	P3			P1	P2	P3			P1	P2	P3
G1	S	$E_{12}, 0.7$ $E_{22}, 0.3$	$E_{13}, 1.0$	$E_{22}, 0.8$ $E_{23}, 0.2$	B8	S	$E_{24}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{44}, 0.5$	A14	S	$E_{12}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$
	O	$E_{33}, 1.0$	$E_{22}, 0.4$ $E_{23}, 0.6$	$E_{33}, 1.0$		O	$E_{12}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{11}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$		O	$E_{11}, 0.3$ $E_{22}, 0.7$	$E_{12}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$
	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$		D	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{14}, 0.5$	$E_{22}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$
G2	S	$E_{14}, 0.4$ $E_{23}, 0.6$	$E_{22}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{14}, 1.0$	B9	S	$E_{23}, 0.4$ $E_{14}, 0.6$	$E_{15}, 1.0$	$E_{34}, 1.0$	A15	S	$E_{22}, 0.4$ $E_{33}, 0.6$	$E_{33}, 1.0$	$E_{44}, 1.0$
	O	$E_{24}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$		O	$E_{12}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{35}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$
	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{12}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{23}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{13}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{44}, 0.5$	$E_{23}, 1.0$
G3	S	$E_{23}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	B10	S	$E_{22}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$	A16	S	$E_{25}, 1.0$	$E_{34}, 1.0$	$E_{44}, 1.0$
	O	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{12}, 1.0$		O	$E_{23}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$
	D	$E_{34}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{23}, 0.5$		D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 0.5$	$E_{23}, 0.5$		D	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$

				$E_{33}, 0.5$				$E_{24}, 0.5$	$E_{33}, 0.5$					
G4	S	$E_{44}, 0.5$ $E_{45}, 0.5$	$E_{34}, 0.5$ $E_{35}, 0.5$	$E_{14}, 1.0$	B11	S	$E_{33}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 0.3$ $E_{24}, 0.7$	A17	S	$E_{34}, 1.0$	$E_{33}, 0.5$ $E_{44}, 0.5$	$E_{35}, 1.0$
	O	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$		O	$E_{44}, 1.0$	$E_{34}, 1.0$	$E_{44}, 1.0$
	D	$E_{23}, 1.0$	$E_{22}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{13}, 1.0$		D	$E_{11}, 0.5$ $E_{12}, 0.5$	$E_{14}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$		D	$E_{22}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$
G5	S	$E_{34}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	B12	S	$E_{24}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{44}, 0.5$	A18	S	$E_{33}, 0.5$ $E_{34}, 0.5$	$E_{33}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$
	O	$E_{11}, 0.6$ $E_{12}, 0.4$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$		O	$E_{12}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{11}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$		O	$E_{44}, 1.0$	$E_{33}, 0.6$ $E_{35}, 0.4$	$E_{33}, 1.0$
	D	$E_{23}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$		D	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{23}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$
G6	S	$E_{22}, 0.4$ $E_{33}, 0.6$	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	B13	S	$E_{14}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{15}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	A19	S	$E_{34}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	$E_{14}, 0.5$ $E_{24}, 0.5$
	O	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 0.1$ $E_{33}, 0.9$	$E_{13}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$		O	$E_{12}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{35}, 1.0$		O	$E_{35}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	$E_{25}, 1.0$
	D	$E_{34}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{23}, 1.0$	$E_{13}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{33}, 0.5$ $E_{34}, 0.5$	$E_{23}, 1.0$	$E_{23}, 0.3$ $E_{34}, 0.7$
G7	S	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{13}, 1.0$	B14	S	$E_{22}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$	A20	S	$E_{34}, 0.5$ $E_{45}, 0.5$	$E_{44}, 0.9$ $E_{55}, 0.1$	$E_{45}, 1.0$

	O	$E_{23}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$		O	$E_{23}, 1.0$	$E_{13}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{15}, 1.0$		O	$E_{34}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$
	D	$E_{33}, 0.6$ $E_{34}, 0.4$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 0.5$ $E_{24}, 0.5$	$E_{23}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$		D	$E_{33}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$
G8	S	$E_{23}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{13}, 1.0$	B15	S	$E_{34}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	A21	S	$E_{34}, 1.0$	$E_{35}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$
	O	$E_{22}, 0.4$ $E_{23}, 0.6$	$E_{11}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{23}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$		O	$E_{23}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$
	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{11}, 0.5$ $E_{12}, 0.5$	$E_{14}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$		D	$E_{33}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$
G9	S	$E_{44}, 0.5$ $E_{55}, 0.5$	$E_{34}, 1.0$	$E_{15}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	B16	S	$E_{24}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{44}, 0.5$	A22	S	$E_{12}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$
	O	$E_{12}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{11}, 0.3$ $E_{13}, 0.7$		O	$E_{12}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{11}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$		O	$E_{23}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$
	D	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{23}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{14}, 0.5$	$E_{13}, 1.0$
G10	S	$E_{23}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{33}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	A1	S	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{22}, 0.8$ $E_{23}, 0.2$	A23	S	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$	$E_{44}, 1.0$
	O	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$		O	$E_{33}, 1.0$	$E_{22}, 0.4$ $E_{23}, 0.6$	$E_{33}, 1.0$		O	$E_{13}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$

	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{33}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{13}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$
G11	S	$E_{23}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$	$E_{35}, 1.0$	A2	S	$E_{14}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{15}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	A24	S	$E_{35}, 1.0$	$E_{34}, 0.6$ $E_{45}, 0.4$	$E_{44}, 1.0$
	O	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{23}, 1.0$		O	$E_{24}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{22}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		O	$E_{11}, 0.5$ $E_{12}, 0.5$	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$
	D	$E_{23}, 0.1$ $E_{33}, 0.9$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$		D	$E_{33}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$
G12	S	$E_{33}, 0.5$ $E_{34}, 0.5$	$E_{33}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	A3	S	$E_{23}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	L1	S	$E_{12}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	$E_{13}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$
	O	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$		O	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{12}, 1.0$		O	$E_{13}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$
	D	$E_{34}, 0.5$ $E_{35}, 0.5$	$E_{23}, 0.5$ $E_{24}, 0.5$	$E_{24}, 1.0$		D	$E_{34}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{23}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$		D	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$
G13	S	$E_{34}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 0.5$ $E_{24}, 0.5$	A4	S	$E_{44}, 0.5$ $E_{45}, 0.5$	$E_{34}, 0.5$ $E_{35}, 0.5$	$E_{14}, 1.0$	L2	S	$E_{11}, 0.8$ $E_{22}, 0.2$	$E_{12}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$
	O	$E_{23}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{13}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	$E_{15}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 0.2$ $E_{22}, 0.8$	$E_{12}, 0.6$ $E_{13}, 0.4$
	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{13}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$		D	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$
G14	S	$E_{34}, 0.5$ $E_{45}, 0.5$	$E_{35}, 1.0$	$E_{44}, 1.0$	A5	S	$E_{33}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	$E_{13}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	L3	S	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{11}, 0.4$ $E_{33}, 0.6$

	O	$E_{33}, 0.4$ $E_{34}, 0.6$	$E_{23}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		O	$E_{12}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{13}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{11}, 1.0$
	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{24}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{24}, 1.0$		D	$E_{22}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$		D	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{12}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$
G15	S	$E_{24}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$	$E_{15}, 0.3$ $E_{22}, 0.7$	A6	S	$E_{12}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	L4	S	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$
	O	$E_{23}, 0.4$ $E_{33}, 0.6$	$E_{24}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$		O	$E_{11}, 0.3$ $E_{22}, 0.7$	$E_{12}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$
	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{13}, 0.5$ $E_{24}, 0.5$	$E_{24}, 1.0$		D	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{14}, 0.5$ $E_{33}, 0.4$			D	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$
B1	S	$E_{14}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$	$E_{15}, 1.0$	$E_{24}, 0.9$ $E_{55}, 0.1$	A7	S	$E_{22}, 0.4$ $E_{33}, 0.6$	$E_{33}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	L5	S	$E_{23}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{13}, 0.5$ $E_{14}, 0.5$
	O	$E_{12}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{35}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.6$ $E_{22}, 0.4$
	D	$E_{12}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{13}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{13}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{44}, 0.5$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{12}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$
B2	S	$E_{22}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{22}, 0.7$ $E_{33}, 0.3$	$E_{14}, 1.0$	A8	S	$E_{25}, 1.0$	$E_{34}, 1.0$	$E_{44}, 1.0$	L6	S	$E_{12}, 0.4$ $E_{13}, 0.6$	$E_{14}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$
	O	$E_{23}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$		O	$E_{12}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{13}, 0.5$

	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 0.5$ $E_{24}, 0.5$	$E_{23}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$		D	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$		D	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 0.9$ $E_{22}, 0.1$	$E_{13}, 1.0$
B3	S	$E_{33}, 0.3$ $E_{44}, 0.7$	$E_{33}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	A9	S	$E_{22}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	L7	S	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 0.3$ $E_{23}, 0.7$	$E_{13}, 0.5$ $E_{23}, 0.5$
	O	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$		O	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 0.1$ $E_{33}, 0.9$	$E_{13}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$
	D	$E_{11}, 0.5$ $E_{12}, 0.5$	$E_{14}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$		D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{13}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$
B4	S	$E_{24}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{44}, 0.5$	A10	S	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{13}, 1.0$	O1	S	$E_{13}, 0.4$ $E_{44}, 0.6$	$E_{12}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$
	O	$E_{12}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{11}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$		O	$E_{23}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$		O	$E_{13}, 1.0$	$E_{22}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$
	D	$E_{22}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{33}, 0.6$ $E_{34}, 0.4$	$E_{23}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$		D	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$
B5	S	$E_{14}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{15}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$	A11	S	$E_{23}, 1.0$	$E_{22}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{13}, 1.0$	O2	S	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.4$ $E_{22}, 0.6$	$E_{13}, 1.0$
	O	$E_{12}, 1.0$	$E_{15}, 1.0$	$E_{35}, 1.0$		O	$E_{22}, 0.4$ $E_{23}, 0.6$	$E_{13}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$
	D	$E_{12}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{13}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$		D	$E_{11}, 0.2$ $E_{22}, 0.8$	$E_{11}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$

B6	S	$E_{22}, 0.6$ $E_{23}, 0.4$	$E_{23}, 1.0$	$E_{14}, 1.0$	A12	S	$E_{44}, 1.0$	$E_{34}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$	O3	S	$E_{12}, 1.0$	$E_{12}, 0.4$ $E_{22}, 0.6$	$E_{33}, 1.0$
	O	$E_{23}, 1.0$	$E_{13}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{15}, 1.0$		O	$E_{12}, 1.0$	$E_{12}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$	$E_{13}, 1.0$		O	$E_{11}, 1.0$	$E_{13}, 1.0$	$E_{11}, 0.4$ $E_{22}, 0.6$
	D	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 0.5$ $E_{24}, 0.5$	$E_{23}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$		D	$E_{22}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$		D	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$	$E_{11}, 1.0$
B7	S	$E_{24}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$	$E_{33}, 1.0$	A13	S	$E_{23}, 0.5$ $E_{33}, 0.5$	$E_{33}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$					
	O	$E_{11}, 1.0$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$		O	$E_{11}, 0.4$ $E_{22}, 0.6$	$E_{12}, 1.0$	$E_{11}, 0.5$ $E_{22}, 0.5$					
	D	$E_{11}, 0.5$ $E_{12}, 0.5$	$E_{14}, 1.0$	$E_{24}, 1.0$		D	$E_{13}, 0.6$ $E_{33}, 0.4$	$E_{33}, 1.0$	$E_{23}, 1.0$					

攻读硕士学位期间取得的成果

1. 参加的科研项目

- [1] 中央军委装备发展部装备技术基础项目：机电产品防差错设计体系构建研究，项目编号：JZX7J201802ZL002600.
- [2] 中央军委装备发展部装备技术基础项目：基于概率故障物理的可靠性建模与验证方法，项目编号：JZX7J201909ZL00400.
- [3] 太原重工股份有限公司：大型风力发电机主传动链可靠性分析与优化设计关键技术研究，项目编号：2019510007000101.

2. 发表的论文

- [1] **He-Xin Tian**, Jin-Hua Lian, Cheng Liu, Zhuo Chen, Jin-Xing Liu, Yan-Feng Li and Hong-Zhong Huang. Reliability modeling of dependent competing failure process under random shocks[C]. 2020 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Manintenance, and Safety Engineering, Xi'an, Shaanxi, October 8-11, 2020.
- [2] Cheng Liu, **He-Xin Tian**, Zhuo Chen, Yan-Feng Li and Hong-Zhong Huang. Optimal reliability allocation of power converters based on importance and cost optimization[C]. 2020 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Manintenance, and Safety Engineering, Xi'an, Shaanxi, October 8-11, 2020.
- [3] Zhuo Chen, Guang Li, **He-Xin Tian**, Cheng Liu, Yan-Feng Li and Hong-Zhong Huang. A degraded data-driven remaining life estimation method based on bayesian update[C]. 2020 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Manintenance, and Safety Engineering, Xi'an, Shaanxi, October 8-11, 2020.
- [4] Jin-Xing Liu, Le Yu, Huan-Wei Xu, Ao-Di Yu, Tu-Di Huang, **He-Xin Tian**, Yan-Feng Li, Hong-Zhong Huang. Fatigue reliability analysis of a turbine shaft based on local stress-strain method[C]. 2020 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Manintenance, and Safety Engineering, Xi'an, Shaanxi, October 8-11, 2020.