

共轴直升机封闭差动行星轮系薄弱部件综合风险评估方法研究

车晓宇 王旦 朱如鹏

(南京航空航天大学 直升机动力学全国重点实验室, 南京 210016)

摘要:【目的】针对共轴直升机封闭差动行星轮系由于部件众多且故障概率不一导致的可靠性评估难题, 识别系统薄弱部件及潜在故障模式, 为采取针对性改进措施、提高系统使用寿命提供依据。【方法】首先, 提出了一种融合模糊集理论与逼近理想解排序(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)法的综合风险评估模型; 其次, 采用梯形模糊数构建了模糊评估矩阵, 并结合层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)与熵权法(Entropy Weight Method, EWM)确定了各评价指标的综合权重; 最后, 通过制定专家评分表并应用评估模型计算了各部件的排序指标, 实现了对薄弱环节的定量化识别。【结果】结果表明, 应用所提模型确定的最易发生故障的齿轮部件为差动级太阳轮, 其主要故障模式表现为齿面磨损和齿根裂纹。评估结果为该轮系的结构优化与材料替换提供了明确的技术导向。

关键词: 模糊集理论; AHP; TOPSIS; 综合风险评估方法; 封闭差动行星轮系

中图分类号: V233.11 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

封闭差动行星轮系是一种典型的共轴反转传动系统, 封闭差动行星齿轮系具有结构紧凑、承载能力高、传动平稳等优点, 被广泛应用于航空^[1]、船舶^[2]等领域。由于共轴双旋翼直升机旋翼载荷复杂多变, 且封闭差动行星轮系功率运行情况复杂, 因此, 该轮系中的部分部件往往处于高速重载的运行状态, 容易失效, 从而影响飞行安全。对直升机传动系统的健康状态进行监测是一个重要课题, 对潜在薄弱部件进行评估, 预测可能发生故障的部件位置及故障形式, 从而进行针对性的监测, 对于降低运维成本、提高运维效率具有重要意义。因此, 有必要开展封闭差动行星轮系薄弱部件的风险评估研究。

故障模式、影响及危害性分析(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)可用于评估系统的故障模式及其原因, 适用范围很广, 包括城市排水网络^[3]、电力网络系统^[4]以及工业设备的可靠性评估^[5]。于涵等^[6]针对牵引传动系统的15种故障模式, 通过改进FMECA区分不同故障模式间的优先级。周昊等^[7]采用FMECA分析方法对半潜式海上浮式风力发电机组的故障特性进行系统分析, 评估了几种对

海上浮式风力机的性能影响最明显的因素。CIANI等^[8]提出一种简单有效的基于模糊FMECA的方法, 使用模糊语言术语评估参数, 然后将每个故障模式的风险优先数(RPN)评估为指标的模糊乘积。POVEDA-REYES等^[9]使用FMECA分析行进机构的不同故障模式及其对轨道基础设施的影响, 并根据其危害性进行了优先级分析。CHEN等^[10]将常规FMECA与模糊理论相结合, 扩展了FMECA方法, 以实现数控机床电主轴系统的故障分析, 旨在避免系统的意外故障, 确保设备的安全可靠运行。

由于技术封锁且国内尚没有成熟的含封闭差动行星轮系的共轴直升机型号, 国内缺少该类型传动系统的部件故障数据。因此, 本文依靠直升机传动领域内的专家经验判断, 结合模糊集理论和逼近理想解排序(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)法, 进行了封闭差动行星轮系部件综合风险评估。首先, 基于载荷分析进行薄弱部件初步筛选; 其次, 采用梯形模糊法创建模糊数, 并结合AHP和EWM计算指标权重; 最后, 利用风险评估方法对封闭差动行星齿轮系统的薄弱部件及其故障模式进行评估。

收稿日期: 2025-03-04 修回日期: 2025-06-27

基金项目: 国防技术基础科研项目(JSZL2022110A074)

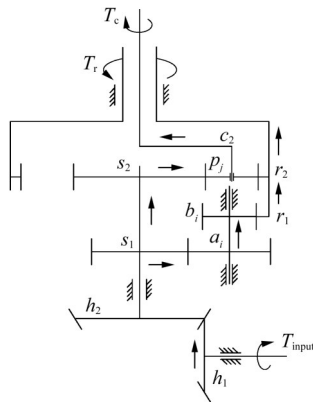
作者简介: 车晓宇, 男, 1995年生, 安徽芜湖人, 博士; 主要研究方向为机械传动系统结构与减振设计; chexiaoyu@nuaa.edu.cn。

引用格式: 车晓宇, 王旦, 朱如鹏. 共轴直升机封闭差动行星轮系薄弱部件综合风险评估方法研究[J]. 机械传动, XXXX, XX(XX): 1-8.

CHE Xiaoyu, WANG Dan, ZHU Rupeng. Comprehensive risk assessment method for weak components of encased differential planetary gear train in coaxial helicopter[J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX(XX): 1-8.

1 封闭差动行星轮系薄弱部件初步筛选

研究对象为共轴双旋翼直升机的封闭差动行星轮系,如图1所示。该系统主要由封闭系统和差动级系统两部分组成。由太阳轮 s_1 、双联星轮 a_i 、 b_i 和内齿圈 r_1 组成的星型轮系为封闭级系统;由太阳轮 s_2 、行星轮 p_j 、行星架 c_2 和内齿圈 r_2 组成的差动行星轮系为差动级系统。封闭级和差动级由双联太阳轮和双联齿圈连接。输入功率通过弧齿锥齿轮副 h_1h_2 进行减速和换向,然后通过封闭差动行星轮系分为两路:一路通过封闭级的太阳轮 s_1 传递给内齿圈 r_1 ,另一路通过差动级的太阳轮 s_2 传递给行星架 c_2 和内齿圈 r_2 。



(a) 传动简图



(b) 三维模型

图1 共轴双旋翼直升机传动系统

Fig. 1 Transmission system of coaxial twin-rotor helicopter

封闭差动行星轮系的结构复杂、部件众多,如果对每个部件都进行专家评估,存在问卷内容多、耗时长、效率低等问题,同时会增加薄弱部件和潜在故障模式评估不当的概率。因此,本节将通过封闭差动行星轮系封闭级和差动级部件的载荷分配分析,进行封闭差动行星轮系部件故障形式的初步筛选。

从文献[11]可知,封闭差动行星轮系的功率流向与内、外旋翼轴的输出转矩相关。定义内外旋翼轴负载转矩比为 α ,其计算式可表示为

$$\alpha = -\frac{T_{内}}{T_{外}} \quad (1)$$

式中, $T_{内}$ 为内旋翼轴的输出转矩; $T_{外}$ 为外旋翼轴的输出转矩;“-”表示输出转矩的方向相反。

则封闭级和差动级太阳轮和内齿圈的转矩可由式(2)、式(3)分别表示为

$$\begin{cases} T_{r1} = \frac{(\alpha - 1)i_{s_2r_2}^c + 1}{\alpha(i_{s_2r_2}^c - 1)} T_c \\ T_{r2} = \frac{i_{s_2r_2}^c}{1 - i_{s_2r_2}^c} T_c \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{s2} = \frac{1}{i_{s_2r_2}^c - 1} T_c \\ T_{s1} = T_{r1} \cdot \frac{z_{s1}z_b}{z_{r1}z_a} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $i_{s_2r_2}^c$ 为差动级系统的传动比; z_{s1} 、 z_{r1} 、 z_a 和 z_b 分别为太阳轮 s_1 、内齿圈 r_1 、星型轮 a 和 b 的齿数; T_{s1} 、 T_{s2} 、 T_{r1} 、 T_{r2} 和 T_c 分别为太阳轮 s_1 、太阳轮 s_2 、内齿圈 r_1 、内齿圈 r_2 和行星架 c 的转矩。

封闭级系统与差动级系统中心构件(太阳轮、内齿圈)的转矩比可分别由式(4)、式(5)表示为

$$\frac{T_{s1}}{T_{s2}} = \frac{(\alpha - 1)i_{s_2r_2}^c + 1}{\alpha} \cdot \frac{z_{s1}z_b}{z_{r1}z_a} \quad (4)$$

$$\frac{T_{r1}}{T_{r2}} = -\frac{(\alpha - 1)i_{s_2r_2}^c + 1}{\alpha \cdot i_{s_2r_2}^c} \quad (5)$$

图2所示为 α 对封闭级和差动级中心构件转矩之比的影响。可以发现, $\alpha=0.4171$ 时,封闭级与差动级太阳轮的输入转矩相等; $\alpha=0.7158$ 时,封闭级与差动级内齿圈的输入转矩相等; $\alpha=1$ 时, $T_{s1}/T_{s2}=0.1774$, $T_{r1}/T_{r2}=0.4314$,封闭级中心构件的输入转矩远小于差动级中心构件输入转矩; $\alpha=1.432$ 时, $T_{s1}/T_{s2}=0$ 且 $T_{r1}/T_{r2}=0$,说明输入功率全部集中在差动级系统中,封闭级系统不承担负载; $\alpha>1.432$ 时, $T_{s1}/T_{s2}<0$ 且 $T_{r1}/T_{r2}<0$,系统内部出现功率流循环,极大地降低了系统的传动效率。因此,在实际应用中需要避免这种情况发生。

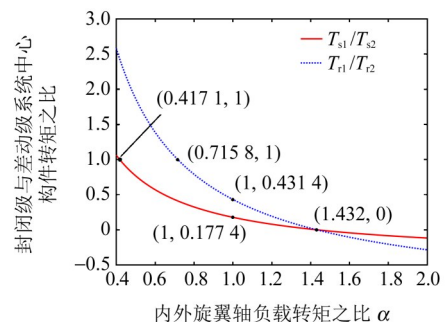


图2 α 对封闭级与差动级中心构件转矩之比的影响

Fig. 2 Effect of α on the torque ratio of the central components of the enclosed stage system to the differential stage system

在通常情况下, 内外旋翼轴的转矩相等, 而封闭级系统的载荷远小于差动级系统的载荷。因此, 差动级系统的部件失效概率更高。通过初步筛选, 后续将针对差动级系统的部件进行进一步的风险评估。由文献[12]~[16]可知, 航空齿轮的故障形式主要包括齿面磨损、齿面点蚀、齿面胶合以及齿根裂纹; 轴承的故障形式包括磨粒磨损和疲劳剥落两种。本文将上述故障类型作为齿轮和轴承风险评估的主要故障模式。

2 基于模糊集理论和TOPSIS法的综合风险评估模型

FMECA 通过计算风险优先数(Risk Priority Number, RPN)来评估系统的故障模式, RPN可由式(6)确定^[17], 即

$$RPN = S \times O \times D \quad (6)$$

式中, S 为严酷度, 用于表示故障发生后的严重程度; O 为发生度, 用于表示故障发生的可能性; D 为可检测度, 用于表示故障发生后检测的难易程度。 S 、 O 和 D 的评分标准见附录A。

传统的FMECA方法通过计算RPN来评估故障模式, 但可能存在一些缺点, 即: 1) 难以对评估因素做出精确判断; 2) 仅考虑RPN, 忽略了 S 、 O 和 D 的内在影响。为解决这些问题, 本文基于一种改进的FMECA方法评估封闭差动行星轮系部件的关键程度。该方法使用模糊集理论对专家评估的故障模式进行量化, 采用逼近理想解排序法计算故障模式的相对贴近度, 并使用综合加权法为评估因素分配权重。

2.1 基于模糊集理论的评估信息量化方法

当专家主观评估特定故障模式时, 很难用单个数值准确描述故障模式。在这种情况下, 需要引入模糊理论来量化专家对故障模式的评估信息。模糊函数采用梯形分布, 其隶属函数可表示为^[18]

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

隶属函数中参数的含义如图3所示。

本文使用模糊语言, 以严酷度 S 、发生度 O 和可检测度 D 构建模糊评估等级, 定义5个等级: 非常低(VL)、低(L)、中等(M)、高(H)和非常高(VH)。评估标准分别如表1~表3所示。

评估等级的隶属函数如图4所示。

在对评估元素进行模糊评估后, 需要对模糊集

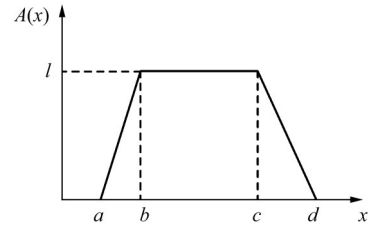


图3 梯形模糊数的隶属函数

Fig. 3 Membership function of a trapezoidal fuzzy number

表1 严酷度 S 的评估标准

Tab. 1 Evaluation criteria of severity S

评估等级	描述	模糊数
VL	故障的影响几乎不存在	(0,0,1,2)
L	故障的影响较弱	(1,2,3,4)
M	故障的影响中等	(3,4,5,6,7)
H	故障的影响严重	(6,7,8,9)
VH	故障的影响非常严重	(8,9,10,10)

表2 发生度 O 的评估标准

Tab. 2 Evaluation criteria of occurrence O

评估等级	描述	模糊数
VL	故障几乎不可能发生	(0,0,1,2)
L	故障不太可能发生	(1,2,3,4)
M	故障偶尔发生	(3,4,5,6,7)
H	故障经常发生	(6,7,8,9)
VH	故障几乎不可避免	(8,9,10,10)

表3 可检测度 D 的评估标准

Tab. 3 Evaluation criteria of detectability D

评估等级	描述	模糊数
VL	故障几乎无法检测	(0,0,1,2)
L	故障可检测的概率较低	(1,2,3,4)
M	故障可检测的概率中等	(3,4,5,6,7)
H	故障可检测的概率较高	(6,7,8,9)
VH	故障可检测的概率非常高	(8,9,10,10)

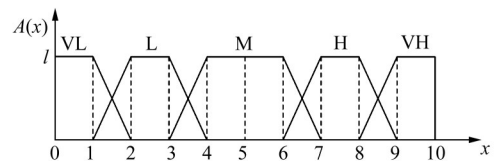


图4 评估等级的隶属函数

Fig. 4 Membership function of the evaluation level

进行去模糊化, 将模糊集映射为一个清晰的数字, 称为非模糊值, 计算方法为^[19]

$$K(x) = \frac{(b_0 - c) + (b_1 - c)}{[(b_0 - c) + (b_1 - c)] - [(a_0 - d) + (a_1 - d)]} \quad (8)$$

式中, c 、 d 分别表示模糊数所取的最小值和最大值, 分别为0和10。

每个评估者对3个评估因素进行评估,表示为 $\{E_{ij}, \omega_{ij}\}$ 。其中, E_{ij} 表示评估者*i*对因素*j*给出的评级结果; ω_{ij} 表示评估者*i*对该结果分配的可能性。*i*和*j*的值属于集合 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$,且 $i \leq j$ 。例如,如果评估者将故障模式的某个因素评级为 $\{E_{11}, 1.0\}$,则意味着评估者认为该故障模式的这个因素处于‘VL’级别,可能性为100%。如果该因素被评级为 $\{E_{11}, 0.7\}$ 、 $\{E_{12}, 0.3\}$,则表示评估者认为该故障模式的这个因素有70%的可能性,处于‘VL’级别,有30%的可能性介于‘VL’和‘L’之间。但是,多个评级级别的可能性之和应为100%。应用式(8)可获得去模糊化的非模糊值。以 E_{24} 为例进行说明, E_{24} 表明该故障模式处于‘L’和‘H’之间,此时对应的模糊数集为(1, 2, 8, 9),对应值为 $a_0=1$ 、 $a_1=2$ 、 $b_0=8$ 和 $b_1=9$,代入式(8)可得 $K=0.5$ 。

表4 非模糊值
Tab. 4 Non-fuzzy values

元素评估	e_{ij}	元素评估	e_{ij}	元素评估	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

式(9)所示为多个评估者对给定故障模式的某个评估因素的确定值,即

$$x = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \gamma_k e_{ij}^k \omega_{ij}^k \quad (9)$$

式中, γ_k 表示第*k*个评估者的权重,需要根据评估者在该领域的经验、知识和权威性给定; e_{ij}^k 表示第*k*个评估者给出的评估等级 E_{ij} 对应的非模糊值; ω_{ij}^k 表示第*k*个评估者给出评估等级 E_{ij} 的可能性。

假设主齿轮箱部件有*M*个故障模式。评估者对每个故障模式的3个评估因素进行模糊评估。经过上述处理,得到评估结果 x_{ml} ,表示故障模式的*l*个评估因素的明确值。其中, $l=1$ 表示*S*, $l=2$ 表示*O*, $l=3$ 表示*D*。这些结果组成决策矩阵*X*,表示为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & x_{M3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

考虑到不同评价因素对结果的影响,对式(10)进行归一化,得到归一化决策矩阵*R*,表示为

$$R = (r_{ml})_{M \times 3}, r_{ml} = x_{ml} / \sqrt{\sum_{m=1}^M x_{ml}^2} \quad (11)$$

式中, $m \in M, l=1, 2, 3$ 。

2.2 评估元素权重构建模型

传统的FMECA方法在计算RPN时,认为3个风险因素*S*、*O*和*D*的重要性相等。然而,在实际应用中,不同研究对象对应的风险因素的重要性不同,即*S*、*O*和*D*的重要程度可能不同。因此,在评估模型中需要考虑评估元素的权重。评估权重的方法有两种:主观评估和客观评估。主观评估的优点是不需要建立复杂的分析模型,决策者根据经验提供权重;缺点是受主观因素影响。客观评估的优点是可以通过数据分析或模型获得,能够更准确地反映决策因素的重要性的影响;缺点是受数据质量和模型假设等因素限制,导致评估结果不完整或不准确。本节将主观评估和客观评估相结合,计算评估元素的权重。

AHP是一种决策方法,可将决策问题分解为目标、准则和方案等层次^[20]。它使用一定的标度量化人们的主观判断,并在此基础上进行定性和定量分析,包括以下具体步骤:

1) 根据顶层、中层和底层构建层次模型。

2) 为每个层次构建判断矩阵,使用1~9的数字标度及其倒数来定义判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。表5所示为评估标准。

表5 评估标准
Tab. 5 Assessment criteria

标度	描述	注释
1	a_i 和 a_j 同等重要	a_{ij} 和 a_{ji} 互为倒数 $a_{ji} = 1/a_{ij}$
3	a_i 比 a_j 稍重要	
5	a_i 比 a_j 重要	
7	a_i 比 a_j 非常重要	
9	a_i 比 a_j 绝对重要	
2,4,6,8	表示相邻判断的中间值	

3) 计算元素权重。求解判断矩阵*A*的最大特征值 λ_{\max} 及其对应的特征向量 ω ,即

$$A\omega = \lambda_{\max} \omega \quad (12)$$

对 ω 进行归一化,得到每个元素的主观权重向量 ω_i ,即

$$\omega_A = \omega / \sum_{i=1}^n \omega_i, \omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_n]^T \quad (13)$$

4) 一致性检验。通过计算比较矩阵*A*的一致性比率(CR)来验证一致性。CR表示为

$$CR = CI/RI \quad (14)$$

式中,*CI*为判断矩阵的一致性指标, $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$; *RI*为相同阶数的平均随机一致性指标,可从表6所示一致性指标中推断。

一般来说,当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵*A*可以被接受。否则,应调整比较值,直到 $CR < 0.1$ 。

表6 一致性指标

Tab. 6 Consistency indicator

n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36

EWM是一种根据指标的变化确定指标权重的技术^[21]。指标的熵值越大,分配的权重越小。使用归一化决策矩阵 R 作为客观数据源,采用EWM客观地为3个评估标准分配权重。计算过程如下:

1) 根据归一化决策矩阵 R 计算第 l 个评估元素的熵 S_l ,即

$$S_l = -k \sum_{m=1}^M [f_{ml} \ln(f_{ml})] \quad (15)$$

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

2) 计算信息熵冗余 H_l ,可表示为

$$H_l = 1 - S_l \quad (16)$$

3) 归一化得到评估元素的客观权重 ω_s ,可表示为

$$\omega_s = H_l / (\sum_{l=1}^3 H_l) \quad (17)$$

结合主观和客观权重,可得到评估元素的权重 ω ,即

$$\omega = (\omega'_A \omega'_s) / (\sum_{l=1}^3 \omega'_A \omega'_s) \quad (18)$$

式中, $l=1$ 表示 S ; $l=2$ 表示 O ; $l=3$ 表示 D 。

2.3 基于TOPSIS法的风险评估

TOPSIS法是一种根据评价对象到正负理想值的距离来对评价对象的优劣进行排序的方法^[22-23]。构建正理想解和负理想解,通过比较评价对象与理想解之间的距离进行评价。通过TOPSIS法,可以对故障模式进行风险评估。该方法的分析过程如下:

1) 构建归一化决策矩阵 Z

结合归一化决策矩阵 R 和3个评价标准的综合权重 ω ,通过对评价标准的相对权重进行加权,构建归一化决策矩阵 Z ,表示为

$$Z = (z_{ml})_{M \times 3}, z_{ml} = r_{ml} \omega_l \quad (19)$$

2) 确定正理想解 S^+ 和负理想解 S^- ,可分别表示为

$$S^+ = (z_1^+, z_2^+, z_3^+) \quad (20)$$

$$S^- = (z_1^-, z_2^-, z_3^-) \quad (21)$$

式中, z_l^+ 表示决策矩阵第 l 列列向量中的最大值, $l=1, 2, 3$; z_l^- 表示决策矩阵第 l 列列向量中的最小值。

3) 求解评价对象与理想解之间的欧几里得距离

d_m^+ 和 d_m^- ,可分别表示为

$$d_m^+ = \|Z_{ml} - S^+\| = \sqrt{\sum_{l=1}^3 (z_{ml} - z_l^+)^2} \quad (22)$$

$$d_m^- = \|Z_{ml} - S^-\| = \sqrt{\sum_{l=1}^3 (z_{ml} - z_l^-)^2} \quad (23)$$

(4) 计算相对贴近度 C_m ,表示为

$$C_m = \frac{d_m^-}{d_m^+ + d_m^-} \quad (24)$$

使用相对贴近度作为新的排序标准, C_m 值越大,表示被评估对象对系统构成的风险越大,需要更加关注。

3 封闭差动行星轮系薄弱部件及其故障模式的风险评估

封闭差动行星轮系的基本部件由齿轮系统和轴承系统组成,具体子系统和部件的详细分类如表7所示。结合第2节中描述的主齿轮箱常见形式,确定封闭差动行星齿轮系统的潜在部件故障模式,并由专家根据 S 、 O 和 D 进行评级。专家评级表见附录B。

表7 封闭式差动行星齿轮系统子系统分类

Tab. 7 Classification of subsystems of encased differential planetary gear system

子系统	部件
齿轮系统	差动级太阳轮
	差动级行星轮
	差动级内齿圈
轴承系统	双列圆锥滚子轴承—支撑差动级行星轮
	圆柱滚子轴承b—支撑内旋翼轴
	圆柱滚子轴承c—支撑外旋翼轴
	深沟球轴承—支撑外旋翼轴

邀请3位专家对封闭差动行星齿轮系统潜在部件故障模式的3个评价因素 S 、 O 和 D 进行模糊评分,根据3位专家在直升机传动领域的权威性和研究经验,给定3位专家的权重分别为0.5、0.3和0.2。根据3位专家的评估结果、专家权重以及附录B中的主减速器故障模式及专家评分表,采用式(10)形成了 20×3 的决策矩阵,可表示为式(20)。其中,第1~4行为差动级太阳轮的4种故障模式;第13~14行为双列圆锥滚子轴承的2种故障模式,其余以此类推;第1~3列分别对应了故障模式的 S 、 O 、 D 。

$$X = \begin{bmatrix} 0.7083 & 0.8696 & 0.8696 \\ 0.7083 & 0.6667 & 0.5 \\ 0.7083 & 0.5 & 0.5 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0.6042 & 0.7083 & 0.5 \\ 0.7083 & 0.7083 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (20)$$

根据式(11), 获得归一化决策矩阵, 即

$$R = \begin{bmatrix} 0.2416 & 0.3194 & 0.4019 \\ 0.2416 & 0.2448 & 0.2311 \\ 0.2416 & 0.1836 & 0.2311 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0.2061 & 0.2601 & 0.2311 \\ 0.2416 & 0.2601 & 0.2311 \end{bmatrix} \quad (21)$$

3位专家根据表5构建判断矩阵, 为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3/2 & 2 \\ 2/3 & 1 & 3/2 \\ 1/2 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3/2 \\ 1/2 & 1 & 2/3 \\ 2/3 & 3/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

根据式(12), 可计算出判断矩阵的最大特征值分别为 $\lambda_1=3.0015$ 、 $\lambda_2=3$ 、 $\lambda_3=3.0015$ 。相应的特征向量可表示为

$$\begin{cases} \omega_1 = (-0.7643, -0.5299, -0.3674) \\ \omega_2 = (0.8165, 0.4082, 0.4082) \\ \omega_3 = (-0.7643, -0.3674, -0.5299) \end{cases} \quad (23)$$

通过对式(23)进行归一化, 可得

$$\begin{cases} \omega_{A1} = [0.4600, 0.3189, 0.2211] \\ \omega_{A2} = [0.5, 0.25, 0.25] \\ \omega_{A3} = [0.4600, 0.2211, 0.3189] \end{cases} \quad (24)$$

经一致性检验, 所有一致性指标均小于0.1。因此, ω_{A1} 、 ω_{A2} 和 ω_{A3} 可视为3个评价标准的权重向量。结合3位评估专家的权重比例, 根据式(13), 得到3个评价标准的最终权重向量为

$$\omega_A = (0.4720, 0.2787, 0.2493) \quad (25)$$

使用专家小组为每个故障模式提供的评估信息作为客观评估数据, 即归一化决策矩阵 R , 采用EWM可获得3个评价标准的客观权重向量 ω_s , 即

$$\omega_s = (0.2250, 0.4066, 0.3684) \quad (26)$$

根据式(18), 可获得3个评价标准的综合权重向量 ω , 即

$$\omega = (0.3410, 0.3639, 0.2950) \quad (27)$$

考虑到评价标准的权重 ω , 根据式(19), 获得更新后的归一化决策矩阵 Z , 即

$$Z = \begin{bmatrix} 0.0824 & 0.1162 & 0.1186 \\ 0.0824 & 0.0891 & 0.0682 \\ 0.0824 & 0.0668 & 0.0682 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0.0703 & 0.0947 & 0.0682 \\ 0.0824 & 0.0947 & 0.0682 \end{bmatrix} \quad (28)$$

确定正理想解 S^+ 和负理想解 S^- , 可得到式(29)~式(30)。

$$S^+ = [0.1012 \quad 0.1162 \quad 0.1186] \quad (29)$$

$$S^- = [0.0388 \quad 0.0390 \quad 0.0398] \quad (30)$$

代入式(22)~式(23), 可得

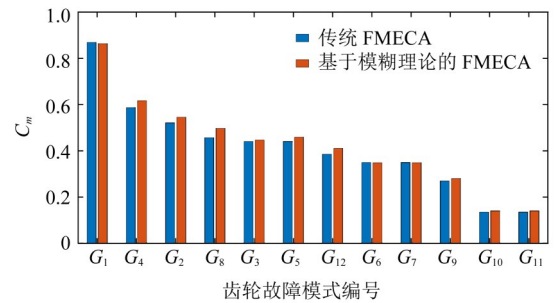
$$d_m^+ = [0.0188 \quad 0.0602 \quad 0.0730 \quad \dots \quad 0.0629 \quad 0.0579]^T \quad (31)$$

$$d_m^- = [0.1187 \quad 0.0723 \quad 0.0590 \quad \dots \quad 0.0700 \quad 0.0762]^T \quad (32)$$

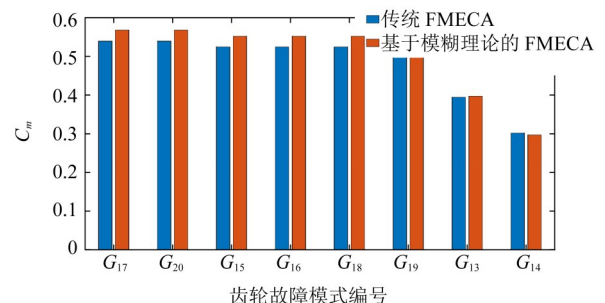
计算相对贴近度, 可得

$$C_m = [0.8635 \quad 0.5455 \quad 0.4471 \quad \dots \quad 0.5267 \quad 0.5682]^T \quad (33)$$

图5所示为传统FMECA和基于模糊理论的FMECA下的相对贴近度比较。基于模糊理论的FMECA与传统FMECA计算出的相对贴近度存在差异, 但在排序上整体相同。具体排序方法如下: 首先, 计算各故障模式的相对贴近度; 然后, 按照数值从大到小进行排序, 数值越大表示风险越高。差异是: 传统FMECA认为 S 、 O 、 D 具有相同权重, 而基于模糊理论的FMECA考虑了各因素间的相对重要性。两种方法得到的排序几乎无差异的原因在于: 在共轴直升机传动系统薄弱部件评价中, 虽然 S 、 O 、 D 的重要性权重存在差别(通过专家评估和模糊综合评价确定), 但由于三者对系统可靠性的影响都较为显著, 权重差距较小, 因此, 对最终排序结果影响有限。通过上述排序过程, 我们确定了封闭差动行星轮系的薄弱部件及最易发生的故障形式。其中, 差动级太阳轮的齿面磨损风险最高(相对贴近度0.863), 其



(a) 齿轮故障模式



(b) 轴承故障模式

图5 不同方法得到的风险排序

Fig. 5 Risk ranking obtained by different methods

次是齿根裂纹(相对贴度0.617); 轴承部件中风险最高的是深沟球轴承的疲劳剥落故障和圆柱滚子轴承的磨粒磨损故障(相对贴度均为0.568)。分析结果表明, 齿轮作为关键部件, 在众多部件中的风险水平相对较高。

4 结论

在本研究中, 采用FMECA方法评估封闭差动行星齿轮传动系统部件的故障模式。为解决传统FMECA评估方法的局限性, 引入了模糊理论、AHP、熵权法和TOPSIS法。这使得专家能够更有效地进行评估, 同时尽可能地减少主观干扰, 从而得出更接近实际的评估结果。主要结论如下:

1) 通过封闭差动行星轮系封闭级系统和差动级系统的载荷分析, 对薄弱部件进行初步筛选, 差动级系统部件发生故障的可能性更高。

2) 建立了一种基于模糊集理论和TOPSIS法的综合风险评估模型。通过模糊集理论对专家评估的故障模式进行量化, 采用TOPSIS法计算故障模式的相对贴度, 并使用综合加权法为评估因素分配权重。

3) 对封闭差动行星轮系的薄弱部件及其故障模式进行风险评估, 得到了最易发生故障的部件及其故障模式。

附录 A. 评价因素的评分标准

表 A-1 严酷度 S 的评分标准

Tab. A-1 Scoring criteria for severity S

类别	描述	得分
灾难性的	重大损害	9, 10
严重的	严重损害	7, 8
中等的	中度损伤	4, 5, 6
轻微的	较小损害	1, 2, 3

表 A-2 发生度 O 的评分标准

Tab. A-2 Scoring criteria for occurrence O

概率	频率参考范围	得分
很高	$P_m > 10^{-1}$	9, 10
高	$10^{-2} < P_m \leq 10^{-1}$	7, 8
中等	$10^{-4} < P_m \leq 10^{-2}$	4, 5, 6
低	$10^{-6} < P_m \leq 10^{-4}$	2, 3
很低	$P_m \leq 10^{-6}$	1

表 A-3 可检测度 D 的评分标准

Tab. A-3 Scoring criteria for detection D

可检测性	标准	得分
几乎不可能	绝对无法检测到	10
低	几乎不可能检测到	7, 8, 9
中	有可能被检测到	4, 5, 6
高	有较大可能检测到	2, 3
极高	肯定能被检测到	1

参 考 文 献

- [1] ZHANG D L, ZHU R P, FU B B, et al. Modal properties of contra-rotating encased differential gear train used in coaxial helicopter [J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2020, 8(6):799-814.
- [2] YANG J, YUE Y J, ZHU R P, et al. Dynamic characteristics of encased differential gear train with journal bearing [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1):2436191.
- [3] BENBACHIR M, CHENAF D, CHERRARED M. Fuzzy-FMECA decision-making tool for assessment and analysis of performance of urban sewerage networks [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(1):04021078.
- [4] ZÚÑIGA A A, FERNANDES J F P, BRANCO P J C. Fuzzy-based failure modes, effects, and criticality analysis applied to cyber-power grids [J]. Energies, 2023, 16(8):3346.
- [5] ROUABHIA-ESSALHI R, BOUKROUH E H, GHEMARI Y. Application of failure mode effect and criticality analysis to industrial handling equipment [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(7):5269-5280.
- [6] 于涵, 张和生. 基于模糊综合评价的动车组牵引传动系统改进 FMECA [J]. 铁道学报, 2022, 44(9):33-41.
YU Han, ZHANG Hesheng. Improved FMECA for traction transmission system of EMU based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(9):33-41.
- [7] 周昊, 陈帅, 侯承宇, 等. 基于 FMECA 方法的海上浮式风机失效模式分析 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(19):104-109.
ZHOU Hao, CHEN Shuai, HOU Chengyu, et al. Failure mode analysis of offshore floating wind turbine based on FMECA [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(19):104-109.
- [8] CIANI L, GUIDI G, PATRIZI G. Fuzzy-based approach to solve classical risk priority number drawbacks for railway signaling systems [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 15(1):36-47.
- [9] POVEDA-REYES S, RIZZETTO L, TRITI C, et al. Risk evaluation of failures of the running gear with effects on rail infrastructure [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 128:105613.
- [10] CHEN H X, GONG Y Q, BAOSIRIGULENG, et al. Fuzzy FMECA for CNC machine tool spindle system [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1043(2):022037.
- [11] 徐步算, 李英明, 单建平, 等. 卡-32 共轴式旋翼直升机传动系统的循环功率流分析 [J]. 机械传动, 2014, 38(10):39-42.
XU Busuan, LI Yingming, SHAN Jianping, et al. Analysis of cycle power flow of drive system of ka-32 for coaxial counter-rotating twin-rotor helicopter [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(10):39-42.
- [12] 王旭东, 夏国荣, 唐登发. 高性能发动机附件传动齿轮及齿轮材料浅析 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2001, 14(4):42-48.
WANG Xudong, XIA Guorong, TANG Dengfa. A preliminary analysis on high performance aero-engine accessory gear and gear material [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2001, 14(4):42-48.
- [13] 张建静. 煤矿机械传动齿轮失效问题及对策分析 [J]. 机械管理

- 开发, 2015, 30(10):85-86, 89.
- ZHANG Jianjing. Failure of the direct drive gear of coal mine machinery and its countermeasures[J]. Mechanical Management and Development, 2015, 30(10):85-86, 89.
- [14] 龚奇. 齿轮失效分析及其故障诊断方法研究[J]. 装备制造技术, 2016(8):138-140.
- GONG Ji. Failure analysis and fault diagnosis method of gear[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(8):138-140.
- [15] 柳国建. 齿轮的定期检查及故障判断[J]. 天津航海, 2007(2):30-31.
- LIU Guojian. Periodic inspection and fault judgment of gears[J]. Tianjin of Navigation, 2007(2):30-31.
- [16] 吴丽媛, 周振阳, 韩溪. 浅谈风电齿轮箱早期的故障形式[J]. 黑龙江科技信息, 2011(13):4.
- WU Liyuan, ZHOU Zhenyang, HAN Xi. Discussion on early fault forms of wind turbine gearbox[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(13):4.
- [17] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. 故障模式、影响及危害性分析指南:GJB/Z 1391-2006 [S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2006:20-21.
- General Armament Department of the People's Liberation Army, Electronic Information Infrastructure Division. Guide for failure mode, effects, and criticality analysis:GJB/Z 1391-2006 [S]. Beijing: Military Standards Press of the General Armament Department, 2006:20-21.
- [18] 李敏, 陈守煜. 考虑区间值的相对隶属函数与传统模糊分布函数的比较[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(10):201-205.
- LI Min, CHEN Shouyu. Comparative study of the relative membership function based on interval pattern value and traditional fuzzy distribution function[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(10):201-205.
- [19] CHEN C B, KLEIN C M. A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 1997, 27(1):26-35.
- [20] SAATY R W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used[J]. Mathematical Modelling, 1987, 9(3/4/5):161-176.
- [21] 徐川, 曾卫平. 基于熵权改进的TOPSIS方法的运输直升机体系贡献率评估[J]. 直升机技术, 2024(4):39-43.
- XU Chuan, ZENG Weiping. Evaluation of contribution rate of transport helicopter system based on TOPSIS method with improved entropy weight[J]. Helicopter Technique, 2024(4):39-43.
- [22] 张文军. 基于加权模糊TOPSIS方法的系统失效风险分析研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016:16-17.
- ZHANG Wenjun. Failure risk analysis of system based on weighted fuzzy TOPSIS method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016:16-17.
- [23] 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.
- OUYANG Zhonghui, HU Daochang, CHEN Qinghua, et al. Research on FMEA analysis method of diesel engine based on fuzzy set theory and TOPSIS[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(11):117-123.

Comprehensive risk assessment method for weak components of encased differential planetary gear train in coaxial helicopter

CHE Xiaoyu WANG Dan ZHU Rupeng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: [Objective] The encased differential planetary gear train of a coaxial helicopter consists of numerous components with varying failure probabilities. Identifying weak components and potential failure modes is critical for implementing targeted measures, such as structural optimization or material substitution, to enhance the system's service life and reliability. [Methods] Firstly, a comprehensive risk assessment model was developed by integrating fuzzy set theory with the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS). Secondly, trapezoidal fuzzy numbers were utilized to construct a robust fuzzy evaluation matrix, and a hybrid weighting scheme combining the analytic hierarchy process (AHP) and the entropy weight method (EWM) was implemented to determine objective and subjective index weights. Finally, an expert scoring framework was established, and a ranking index was calculated for each component to prioritize failure risks. [Results] The analysis results demonstrate that among the gear components, the sun gear of the differential stage exhibits the highest risk index, identifying it as the weakest part of the system. The primary failure modes are determined to be tooth surface wear and tooth root cracks. This study offers a quantitative theoretical reference for the reliability design and maintenance of complex aviation transmission systems.

Key words: Fuzzy set theory; AHP; TOPSIS; Comprehensive risk assessment method; Encased differential planetary gear train

(编辑: 李立)