

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-08

基于模糊集的时间与功能连续变化系统危害性分析

孙宽¹, 张曙光², 王祝³

(1. 西华大学 航空航天学院, 成都 610039)

(2. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

(3. 中国民航科学技术研究院, 北京 100028)

摘要: 对时间与功能连续变化的系统进行功能危害性评估(FHA)时, 经常存在对其功能(性能)变化的影响判断困难的问题。基于 SAE ARP 4761 的安全性评估方法尚未涉及对系统进行连续变化的安全性评估, 仅针对离散的失效模式进行安全性评估。为此, 探讨引入模糊集方法, 结合可获取的功能失效状况数据建立隶属函数, 将功能性能参数和作用时间的变化用二维正态分布函数来表述, 通过隶属度实现功能危害性的量化分类; 以电力无人机电机失效影响为例, 将所提出的基于模糊集 FHA 和传统 FHA 进行应用对比。结果表明: 通过标定电机系统的状况并进行模糊集 FHA 评估, 能够给出量化评估效果, 适用于所需评估任务。

关键词: 功能危害性评估; 模糊集; 隶属函数; 时间连续变化; 功能连续变化

中图分类号: V37

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Research on the function hazard assessment of continuously varying systems based on fuzzy sets

SUN Kuan¹, ZHANG Shuguang², WANG Zhu³

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Xihua University, Chengdu 610039, China)

(2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(3. China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, China)

Abstract: When assessing function hazard on time and function continuously varying systems, it is often difficult for the assessor to evaluate the effect of the function performance. The method based on SAE ARP 4761 has not provide an assessable way to evaluate continuous systems, but only addresses a limited number of failure modes. Therefore, we combine assessable function failure data with fuzzy set to establish membership functions. By introducing function performance and time into two-dimensional normal distribution function and its variants, we can divide function hazard into different levels. Taking the impact of UAS moto as an example, we apply the function hazard assessments based on fuzzy set and experience for a comparison. The results shows that the proposed models can be applied to the function hazard assessment.

Key words: function hazard assessment(FHA); fuzzy set; membership function; time continuously varying system; function continuously varying system

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-03-20

基金项目: 中国民航安全能力基金(民航局[2022]196)

通信作者: 张曙光(1969-), 女, 博士, 教授。E-mail: gnahz@buaa.edu.cn

引用格式: 孙宽, 张曙光, 王祝. 基于模糊集的时间与功能连续变化系统危害性分析[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-8.

SUN Kuan, ZHANG Shuguang, WANG Zhu. Research on the function hazard assessment of continuously varying systems based on fuzzy sets[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-8. (in Chinese)

0 引言

对于民用航空器,系统安全性已经成为适航审定的重要考虑要素,适用于航空器安全性评估的 SAE ARP 4761^[1]中对于系统安全性分析给出了推荐方法。对于随时间和参数连续变化的系统,对其进行安全性分析评估时,功能危害性评估(FHA)、故障树分析等传统的安全性评估方法并未将时间和参数等影响直接纳入方法中,而是取决于对影响进行的工程和其他判断,因此仅靠工程判断对于连续和时间相关系统显得较局限。

针对传统方法在应用中遇到的困难,国内外已有诸多研究,其中基于模型的系统安全性分析(MBSA)方法是一类快速发展并逐渐被应用的方法,旨在解决评估过程中基于文档的设计、分析和试验中,通过建立系统功能与可靠性综合模型,并故障注入进行分析,保障所分析系统源头的确定性和规范性,给出更加客观的评估结果^[2]。Nikta等^[3]将功能危害性评估方法融合进基于模型的系统工程中以适用于混合动力分布式推进飞行器系统的安全性评估过程;Mallory等^[4]发展了自动MBSA快速处理存在的安全风险。作为SAE ARP 4761框架下相对于文档化分析的一类发展,MBSA目前被最新的SAE ARP 4761A版^[5]纳入成为一种候选方法。

鉴于系统中的失效影响可能存在反馈和耦合、交互机制,传统FHA评估不能描述耦合交互,特别当缺乏历史数据支持时,难以进行有效的安全评估,因此基于系统理论的分析方法(Systems-Theoretic Process Analysis,简称STPA)^[6]得以发展。Alex等^[7]将STPA应用于缺乏历史数据的电动垂直起降飞行器的系统安全性评估,表明STPA是对传统FHA评估的补充和升级,评估结果更加积极;崔利杰等^[8]将STPA与SAE ARP4761方法进行对比并确认STPA方法在功能控制、不安全行为识别和致因分析方面更加适用于复杂航空产品。

在面对安全性评估过程中数据缺乏的状况,也有引入其他措施进行补充,例如Gabriel等^[9]使用飞行监测的方法实施基于数据和模型分析,通过对异常值的监测从而更可靠地定义安全性阈值。对于功能呈现衰退而不是离散失效的问题,Mayank等^[10]提出连续FHA评估,并与贝叶斯估计

方法结合,确定功能危害的严重程度。

随着无人机系统的不断发展,完整实施SAE ARP 4761对于低运行风险时要求过高,基于运行风险的评估方法备受关注。EUROCAE针对无人机系统的特点给出了适用于中低风险的安全性评估建议,其中ED-279和ED-280给出了无人机系统安全性分析的要点^[11],一旦识别需要关注的运行失效,需要进一步进行风险控制设计。对于无人机系统的运行失效,Ruth等^[12]使用隔离故障的方法确定所测量的马氏距离,并通过故障模糊逻辑控制算法对无人机进行控制。

模糊集和模糊数学在工程上已有广泛应用。例如,田雨等^[13]将模糊数学引入到电网设备的风险评估方案中,对于电网系统的故障特征进行了划分;张永杰等^[14]将模糊数学引入进边坡的稳定性,以求得给定边坡的在小样本状态下的稳定性状况;程学进等^[15]针对模糊可靠性分析,实现了对正态隶属函数的等效性替代。

综上所述,SAE ARP 4761及纳入了MBSA方法的SAE ARP 4761A是民机适航审定的重要候选方法。但在工程实施中依然存在实际问题,如存在反馈和耦合、交互机制的系统分析问题,以及如何在信息稀缺时进行分析,等等。特别是,无人机系统的发展,还需要考虑如何提高分析的效率、降低分析成本等。

针对目前应用中存在的困难之一,即功能输出连续偏离和具有时间依赖性的系统,如何能吸纳逐渐获得的信息进行更细致而快捷的FHA分析问题。不论建立MBSA还是STPA模型,往往都涉及更加复杂的分析准备。本文继承FHA分析的易用性特点,为了描述在时间和功能输出维度都变化的系统,引入模糊集合方法将可能发生的失效空间归纳为有限的失效种类,从而结合FHA评估出给定的失效状态下的危害性等级,进一步还可以建立安全性自动评估工具。

1 功能危害性评估

对复杂系统开发的全过程进行危害识别、分析和控制,把可接受的安全性水平设计入系统中,保证系统在以后的试验、制造、使用、保障和退役处置中都是安全的。其中,FHA是安全评估的第一个环节,通过对飞机和系统功能进行系统化检查,对功能在不利环境、紧急情况等各种条件下的

失效状态进行辨识,并按影响的严重程度进行分级和控制,避免可能危险后果的发生。

SAE ARP 4761(含 A 版)推荐的传统 FHA 方法为表格格式,根据预期的功能及其可能失效状态的识别,对失效给与飞行器、人员的影响进行评估。对于飞机和系统提供的功能以连续输出的方式,或者其功能的正确作用具有时间相关性(如图 1 所示),当系统提供的功能输出或者功能作用时间偏离理想状态越远,导致的不利影响将越大。由于连续性影响,对 FHA 评估判断带来了困难。

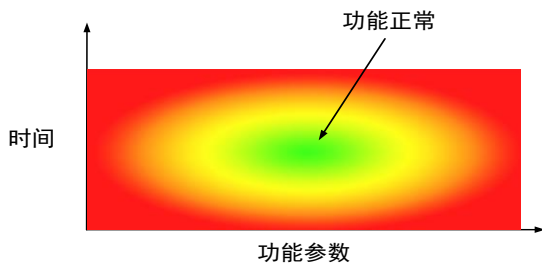


图 1 时间相关的连续输出功能失效示意图

Fig. 1 A Schematic diagram of the time-dependent continuous output function failures

需要注意,为了便于实际应用,不论离散还是连续系统的 FHA 结论都应应是有限类别的。按照目前适航审定方法,分为无安全影响、轻微的、重大的、危险的和灾难性等危害后果进行管控。

为了描述连续输出功能与时间特性,本文引入模糊集方法。

2 功能危害等级的隶属函数

2.1 模糊集

模糊集^[16]是通过取值为 $[0, 1]$ 的隶属函数,描

$$f(t, y) = \left\{ \exp\left(-\frac{\left[\sqrt{\left(\frac{t-t_{\text{normal}}}{t_{\text{normal}}}\right)^2 + \left(k \times \frac{y-y_{\text{normal}}}{y_{\text{normal}}}\right)^2} - \mu\right]^2}{\sigma^2}\right) \right\}^{\alpha} \quad (2)$$

其中 α 是为了描述模糊语言转化为可靠性隶属函数的影响指数^[17],为了反映所描述失效中时间偏差和功能偏差对失效的影响,将两个参数均进行了标准化和单位化处理。并使用参数 k 对时间和性能维度进行加权处理。其中所使用的参数 t_{normal} 和 y_{normal} 选取适用于评估量级的数值以对失效进行

述给定的数值属于某一属性的程度,解决主观认识不统一的“模糊”问题,并通过模糊集合的有关运算和变换,对模糊对象进行分析。给定数域 U ,其上的一个模糊集 A 满足:

$$u_A: U \longrightarrow [0, 1] \quad (1)$$

其中, U 可以是一维或者高维数域。在 U 上可以定义多个模糊集,如 A 、 B 和 u_A 、 u_B 。

引入模糊集进行 FHA 系统安全性评估,识别失效空间中的失效状态所隶属的危害性等级。如前所述,可以根据无安全影响、轻微的、重大的、危险的和灾难性的五个等级划分,建立相应模糊集合。由于本文是针对时间相关的功能连续变化系统的隶属描述,从而考虑引入二维分布函数对状态空间(数域)进行描述,以确定给定危害性影响等级的隶属程度。

2.2 同功能危害性等级的隶属函数

模糊集的隶属函数形状通常可以通过数据统计或经验预估等方法给出。在缺少更多数据和经验支持时,考虑采用常见模糊集形状。

时间相关和功能输出相关失效的影响,往往是有关联的。为了描述失效状态空间中存在的各个失效状态在失效空间的隶属关系,并且更加贴合时间或性能偏差影响的经验,这里使用正态分布函数描述其对于各个失效的隶属程度,函数的具体取值,则应该进一步根据获取的特征数据决定。

基于隶属函数描述,建立失效危害后果隶属函数基本形式为

单位化。此外,为了避免分母为 0 的数学状况,将时间的参数值设置为 1,将性能的参数值设置为 3000。用这两个变量的二次根式表明其综合失效程度。在式中, μ 用以表明描述危害程度的标定, μ 值根据失效状况的严重程度和所评估的功能的实际状况根据经验给出。 σ 依据拉偏仿真针对不同

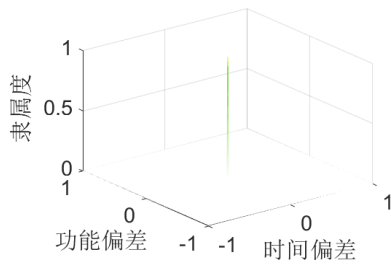
失效影响进行选定。

上述隶属函数的特征参数应该结合历史数据、已有经验、模拟仿真等各类数据源进行辨识确定,典型取值示例如表 1 所示,相应的隶属函数形状如图 2 所示。

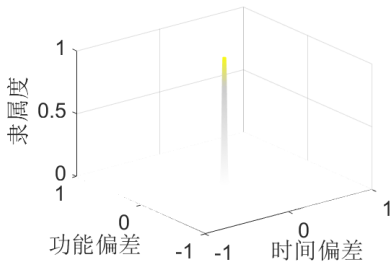
表 1 典型隶属函数特征参数

Table 1 Characteristic parameters of the typical membership function

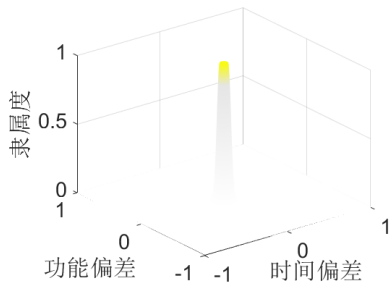
| 名称 | 无影响指数 | 轻微指数 | 重大指数 | 危险指数 | 灾难性指数 |
|-----|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 符号 | α_1 | α_2 | α_3 | α_4 | α_5 |
| 参考值 | 2 | 1 | 0.5 | 0.375 | $1-f_4(t,y)$ |



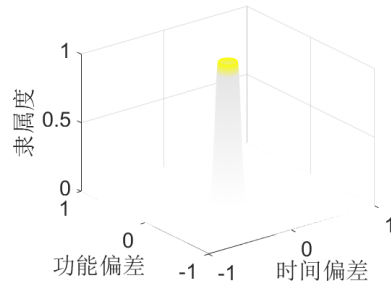
(a) 无安全影响



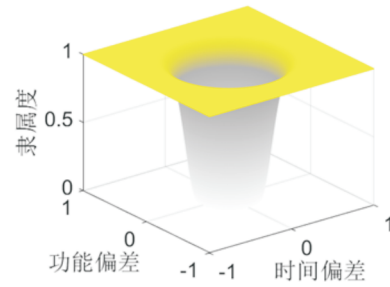
(b) 轻微的隶属函数



(c) 重大的隶属函数



(d) 危险的隶属函数



(e) 灾难性的隶属函数

图 2 5类隶属函数与总体分布

Fig. 4 5-class membership function and overall distribution

对于灾难性、危险性、重大、较轻以及无影响 5 种危害后果基于式(2)建立相应的隶属函数如下。

无安全影响的后果:

$$f_1(t,y) = \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{\left(\frac{t-t_{normal}}{t_{normal}}\right)^2 + \left(k \times \frac{y-y_{normal}}{y_{normal}}\right)^2} - \mu_1\right)^2}{\sigma_1^2}\right) \quad (3)$$

轻微的后果:

$$f_2(t, y) = \exp\left(-\frac{\left(\sqrt{\left(\frac{t-t_{normal}}{t_{normal}}\right)^2 + \left(k \times \frac{y-y_{normal}}{y_{normal}}\right)^2} - \mu_2\right)^2}{\sigma_2^2}\right) \quad (4)$$

重大的后果:

$$f_3(t, y) = \left[\exp\left(-\frac{\left(\sqrt{\left(\frac{t-t_{normal}}{t_{normal}}\right)^2 + \left(k \times \frac{y-y_{normal}}{y_{normal}}\right)^2} - \mu_3\right)^2}{\sigma_3^2}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

危险的后果:

$$f_4(t, y) = \left[\exp\left(-\frac{\left(\sqrt{\left(\frac{t-t_{normal}}{t_{normal}}\right)^2 + \left(k \times \frac{y-y_{normal}}{y_{normal}}\right)^2} - \mu_4\right)^2}{\sigma_4^2}\right) \right]^{\frac{3}{8}} \quad (6)$$

灾难性后果:

$$f_5(t, y) = \begin{cases} 1 - \left[\exp\left(-\frac{\left(\sqrt{\left(\frac{t-t_{normal}}{t_{normal}}\right)^2 + \left(k \times \frac{y-y_{normal}}{y_{normal}}\right)^2} - \mu_5\right)^2}{\sigma_5^2}\right) \right]^{\frac{3}{8}} & \sqrt{\left(\frac{t-t_{normal}}{t_{normal}}\right)^2 + \left(\frac{y-y_{normal}}{y_{normal}}\right)^2} > \mu_5 \\ 0 & \sqrt{\left(\frac{t-t_{normal}}{t_{normal}}\right)^2 + \left(\frac{y-y_{normal}}{y_{normal}}\right)^2} < \mu_5 \end{cases} \quad (7)$$

其中 X 轴为时间偏差, Y 轴为功能偏差, Z 轴为隶属度,三个坐标轴均进行了归一化处理。

对于多个失效隶属函数,某种功能失效运行条件的危害度判断,采用最大隶属度原则确定其危害度等级。

3 应用示例

分析示例为乡村上空无管控区域低空环境物流无人机。该无人机采用多旋翼电机系统,其特性正常参数如表 2 所示。为了实现对无人机运行风险的管控和约束,无人机还配备了降落伞、风险围栏和感知避让系统等风险缓解措施,在面对异常情况时,无人机能够悬停并降落或返回备降点。因此可以合理认为,无人机运行过程中不会飞出

限制空域或产生其它灾难性事故^[18]。

表 2 某型无人机电机的转速特性
Table 2 Speed characteristics of a certain type of UAV motor

| 特征转速参数 | 数值/rpm | 特征响应参数 | 数值/s |
|--------|---------|--------|-------|
| 最高转速 | 约 6 000 | 最大响应时长 | 约 2 |
| 巡航转速 | 约 3 000 | 平均响应时长 | 约 1 |
| 静止转速 | 0 | 最小响应时长 | 约 0.1 |

3.1 传统 FHA 评估

对于连续变化的电机系统输出特性,应用表格方式进行 FHA 评估,对于需要定义的失效模式,EUROCAE 建议将时间相关的失效划分为有在不需要时提供、比预期的早、正确提供、比预期的晚、

在需要时未提供等类型;与功能提供相关的失效分为完全失效、比预期的少、正常提供、比预期的多、功能错误等类型。根据这种划分建议,进行传统方式的FHA,结果如表3所示。需要注意,对于“比预期的早”“比预期的晚”“比预期的多”“比预期的少”等失效模式,其对无人机影响的判断,并不能唯一确定,取决于失效的程度。在模型的建立中,对于电机系统在时间维度的失效更加偏重于其失效的程度。

表3 电机危害影响(巡航阶段)

Table 3 Effects of motor function hazard (cruise condition)

| 电机功能失效模式 | 失效对无人机影响 | 说明 |
|----------|----------|--|
| 错误 | 危险的 | 无人机在飞行过程中执行应急响应程序,无人机降落于备降点 |
| 比预期的多 | 轻微的 | 当电机转速超出预期时,可能导致爬升飞行高于预期高度,飞行速度难以控制。具体危害等级,取决于超出预期的程度 |
| 正常 | 无安全影响的 | — |
| 比预期的少 | 轻微的 | 当电机转速低于预期时,可能导致爬升飞行缓慢。飞行速度难以控制。具体危害等级,取决于低于预期的程度 |
| 完全丧失 | 危险的 | 无人机在飞行过程中执行应急响应程序,无人机降落于备降点 |
| 不需要时提供 | 危险的 | 无人机在飞行过程中执行应急响应程序,无人机降落于备降点 |
| 比预期的早 | 轻微的 | 当电机作用早于预期时,可能导致飞行难以控制和驾驭。具体危害等级,取决于早于预期的程度 |
| 正常 | 无安全影响的 | — |
| 比预期的迟 | 轻微的 | 当电机作用晚于预期时,可能导致爬升滞后,飞行晚于飞行计划。具体危害等级,取决于超出预期的程度 |
| 需要时未提供 | 危险的 | 无人机在飞行过程中执行应急响应程序,无人机降落于备降点 |

3.2 基于模糊集的FHA评估结果

采用公式(3)~公式(7)定义的隶属函数模型,为了确定其中特征参数,建立无人机飞行特性的概念仿真模型,通过Simulink模型实现了无人机的姿态和动力学建模。通过将所参考的无人机特征参数输入进可供参考的模型后,将功能输出(转速及其对应的拉力特性)和功能提供时间(推力延迟或提前)输入概念仿真模式,得到影响数据,如表4

所示。建立巡航阶段无人机电机偏离危害等级,分别为无影响的0~5°、轻微的5~10°、重大的10~20°以及危险的20°以上。

表4 无人机电机功能偏离与无人机危害等级评估表

Table 4 UAV motor function deviation failure and its hazard level

| 作用时间偏移 | 0.1秒后无人机姿态变化 | 危害等级 |
|--------|--------------|------|
| 0% | 0° | 无影响的 |
| 1.4% | 5.7° | 轻微的 |
| 3.8% | 15.1° | 重大的 |
| 9% | 44.2° | 危险的 |
| 电机转速偏移 | 0.1秒后无人机姿态变化 | 危害等级 |
| 0% | 0°×15 | 无影响的 |
| 1.4% | 0.57°×15 | 轻微的 |
| 3.8% | 1.1°×15 | 重大的 |
| 9% | 2°×15 | 危险的 |

从表4可以看出:对于电机转速作用时间偏离达到1.4%、3.8%、9%,相应危害性等级为轻微的、重大的和危险的,而电机转速本身偏离达到相应危害,与时间等效的加权系数为15,其危害等级为轻微的、重大的和危险的。

对于无人机姿态影响的分散度(公式(3)~公式(7)中方差 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4),基于蒙特卡洛拉偏仿真得到,由此确定隶属度特征参数如表5所示。需要注意,本文示例无人机设置了电子围栏和降落伞,无人机失效不会导致灾难性危害后果。

表5 示例无人机功能危害影响隶属函数特征参数

Table 5 Characterization parameters of the membership function on example UAV function hazard effect

| 名称 | 符号 | 参考值 |
|----------|--------------|-------|
| 加权参数 | k | 15 |
| 无影响偏差标定值 | μ_1 | 0 |
| 轻微偏差标定值 | μ_2 | 0.014 |
| 重大偏差标定值 | μ_3 | 0.038 |
| 严重偏差标定值 | μ_4 | 0.09 |
| 时间标记参数 | t_{normal} | 1 |
| 无影响方差标定值 | σ_1 | 0.07 |
| 轻微方差标定值 | σ_2 | 0.012 |
| 重大方差标定值 | σ_3 | 0.026 |
| 严重方差标定值 | σ_4 | 0.026 |
| 功能标记参数 | y_{normal} | 3 000 |

在示例无人机巡航阶段,根据所给出的特征值,可以得出在电机偏离预期转速时,无人机的安全性能随着转速的偏差增加而降低,随着时间偏差的增加而降低。所给出的隶属度函数在偏离给定的参考值时随着偏差逐渐减小。隶属函数如图3~图4所示。

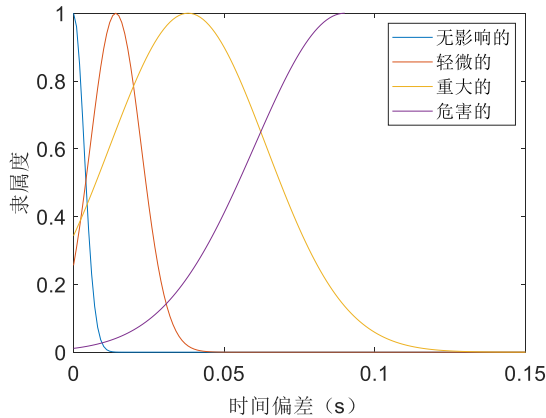


图3 隶属函数(转速为3000 (rad·min⁻¹))
Fig.3 Membership function(speed is 3000 (rad·min⁻¹))

当时间偏差超过0.15时,无影响的、轻微的、重大的隶属函数为0,危险的隶属函数为1。同样的,当时间偏差低于0时,隶属函数按照时间偏差0为轴对称图形。

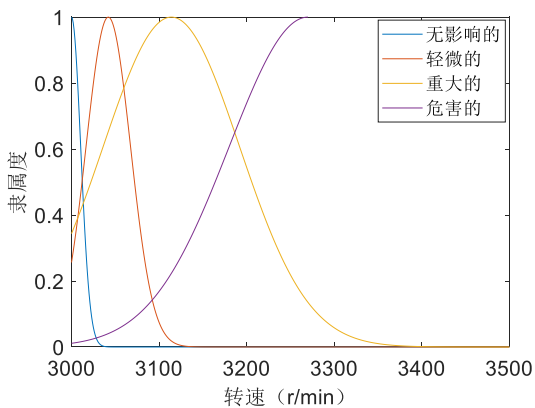


图4 隶属函数(t=0)
Fig.4 Membership function(t=0)

当转速超过3500时,无影响的、轻微的、重大的隶属函数为0,危险的隶属函数为1。同样的,当转速低于3000时,隶属函数按照转速3000为轴对称图形。

根据基于模糊集的FHA结果,对表3影响进行扩展,结果如表6所示,可以看出:电机转速在偏离正常范围时,安全性随着偏差的增加而降低。

时间偏差在偏离的正常范围时,安全性随着偏差的增加而降低。采用的隶属函数对电机转速范围和时间偏差进行了划分,并确定了在给定隶属范围的失效等级。由此可见,模糊分析既对连续变化和时间依赖的中间过程进行了细分,同时又不引入过于复杂的判断,有利于实际应用。

表6 电机失效与影响
Table 6 Failure and impact of motor

| 功能失效状态 | 信号值 | 失效影响 |
|--------|-----------------|------|
| 功能错误 | [3186, 6000] | 危险的 |
| 比预期的多 | [3060, 3186] | 重大的 |
| | [3012, 3060] | 轻微的 |
| 正常 | [2988, 3012] | 无影响的 |
| 比预期的少 | [2940, 2988] | 轻微的 |
| | [2814, 2940] | 重大的 |
| 完全失效 | [0, 2814] | 危险的 |
| 不需要时提供 | [0.062, 1] | 危险的 |
| 比预期的早 | [0.02, 0.062] | 重大的 |
| | [0.004, 0.02] | 轻微的 |
| 正常 | [-0.004, 0.004] | 无影响的 |
| 比预期的迟 | [-0.02, -0.004] | 轻微的 |
| | [-0.062, -0.02] | 重大的 |
| 需要时未提供 | [-1, -0.062] | 危险的 |

由此可见,基于模糊集的FHA能够完成对于连续功能的失效范围划分,并给出时间失效的范围。在此基础上,能够对给定范围内的功能失效进行失效等级评估。相对于传统FHA而言,减少了评价的主观性。

建立模糊集时所涉及的特征参数的选取(如表5所示),在FHA阶段往往没有所分析系统的详细数据,可以根据同类系统历史数据确定,也可以根据概念仿真的手段得到。

4 结论

本文新提出了一种基于模糊集的跟随时间变化的连续系统的功能安全性描述和分析方法。通过引入模糊集的概念对跟随时间变化的连续系统功能的失效范围的确定进行了定量描述。

通过传统功能危害性评估方法对无人机有限数量的失效进行了安全性分析得出可用于参考的无人机失效危害性。新提出的基于模糊集的时间相关连续变化系统的功能安全性评估方法对无人机电机连续失效状态影响进行评估,给出了失效

状态的分类标准和隶属函数,所使用的基于模糊集的方法在不引入复杂参数的情况下可以对传统分析方法中难以划分的变化过程进行分类,并给出其失效危害。

应用示例进一步表明,所提出的FHA评估方法不仅能够将失效状态进行连续表达,还可以帮助实现自动评估。需要注意,本文重点提出了表达失效影响的模型框架,但模型的确定依然需要数据支持。

参考文献

- [1] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment: ARP4761[S]. USA: SAE International, 1996.
- [2] 车程,刘轶斐. 基于模型的安全性分析技术研究[J]. 航空工程进展, 2016, 7(3): 369-373.
CHE Cheng, LIU Yifei. Model-based safety analysis technology study[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(3): 369-373. (in Chinese)
- [3] NIKTA T, ANDREW K J, ALVARO T, et al. Integration of the functional hazard assessment within a model-based system engineering framework [C] // AIAA SCITECH 2023 Forum. USA: AIAA, 2023:1-10.
- [4] MALLORY G, NATASHA A N, KIMBERLY W. Guidance for designing safety into urban air mobility: hazard analysis techniques [C] // AIAA SCITECH 2020 Forum. USA: AIAA, 2020: 1-15.
- [5] SAE. Guidelines for conducting the safety assessment process on civil aircraft, systems, and equipment: ARP4761A [S]. USA: SAE International, 2023.
- [6] LEVESON N G, THOMAS. STPA handbook [M]. USA: MIT Partnership for Systems Approaches to Safety and Security (PSASS), 2018: 11.
- [7] ALEX M, MAYANK V B, DIMITRI N M, et al. Improved hazard analysis for novel vehicle configurations using the systems-theoretic process analysis [C] // AIAA SCITECH 2022 Forum. USA: AIAA, 2022: 115-125.
- [8] 崔利杰, 田宇, 丛继平, 等. STPA与ARP4761中的安全性分析方法对比研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 508-516.
CUI Lijie, TIAN Yu, CONG Jiping, et al. Study of comparative safety analysis methods in STPA and ARP4761[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 508-516. (in Chinese)
- [9] GABRIEL A, RICARDO F S, ALEXIA P P, et al. Rotorcraft takeoff analysis and classification to detect outlier operations that could present a safety risk [C] // AIAA AVIATION 2023 Forum. USA: AIAA, 2023: 325-333.
- [10] MAYANK V B, AMEYA B, SIMON I B, et al. A Bayesian safety assessment methodology for novel aircraft architectures and technologies using continuous FHA [C] // AIAA Aviation 2019 Forum. USA: AIAA, 2019: 1142-1171.
- [11] EUROCAE. Generic Functional Hazard Assessment (FHA) for UAS/RPAS: ED-279 [S]. Europe: EUROCAE, 2023.
- [12] RUTH G Q, LINA C, HUAN Xu. Fuzzy logic and mahalanobis distance algorithms for fault detection in fixed wing UAVs [C] // AIAA AVIATION 2023 Forum. USA: AIAA, 2023: 128-136.
- [13] 田雨, 张晗. 基于故障特征隶属函数的电网主设备风险评估方案研究与应用[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 146-153.
TIAN Yu, ZHANG Han. Research and application of risk assessment scheme for power grid main equipment based on fault feature membership function[J]. High-voltage Electrical Appliances, 2017, 53(5): 146-153. (in Chinese)
- [14] 张永杰, 邓俊强, 李侑军, 等. 考虑隶属函数特性的边坡模糊可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1350-1358.
ZHANG Yongjie, DENG Junqiang, LI Youjun, et al. Slope fuzzy reliability analysis considering membership function characteristics[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1350-1358. (in Chinese)
- [15] 程学进, 董玉革, 高亮. 模糊可靠性分析的等效正态隶属函数法[J]. 农业机械学报, 2006(4): 111-114.
CHENG Xuejin, DONG Yuge, GAO Liang. Equivalent normal membership function method for fuzzy reliability analysis[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2006 (4): 111-114. (in Chinese)
- [16] 梁蓉蓉, 潘小东. 模糊集合隶属函数的确定方法及实验[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2021, 44(4): 479-486.
LIANG Rongrong, PAN Xiaodong. Determination method and experiment of the fuzzy set membership function [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science Edition), 2021, 44(4): 479-486. (in Chinese)
- [17] 崔玉玲, 李廷杰. 清晰事件模糊概率型(CF型)模糊可靠性研究[J]. 系统工程理论与实践, 1991(6): 36-41.
CUI Yuling, LI Tingjie. Study on the fuzzy probability of clear events (CF)[J]. System Engineering Theory and Practice, 1991(6): 36-41. (in Chinese)
- [18] 中国民用航空局. 民用无人驾驶航空器系统适航审定分级分类和系统安全性分析指南: AC-21-AA-2022-40[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
Civil Aviation Administration of China. System airworthiness certification classification and system safety analysis guide: AC-21-AA-2022-40 [S]. Beijing: CAAC, 2022. (in Chinese)

(编辑:马文静)