

# 基于粗糙集理论的飞机交流电能质量评估

史志波<sup>1</sup>, 孟杰<sup>2</sup>, 韩勇<sup>2</sup>, 李学平<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;

2. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 由于飞机上大量电力电子设备的应用, 导致飞机供电网络趋于复杂化, 迫切需要对供电网络电能质量进行有效评估。为实现对飞机交流电能质量进行合理评估的目标, 提出了一种基于粗糙集理论的交流电能质量综合评价方法, 实现了对典型客机上 115 V/400 Hz 交流电能质量的评估。由研究结果可知, 所提方法获得的对于各评价指标的权重排序与其他方法获得的指标权重排序较为吻合, 在此基础上进行的电能质量评估, 能够正确地反映飞机交流电力系统的运行状态。这表明, 基于粗糙集理论的评估方法仅凭客观实测数据就可以获得较为合理的飞机交流电能评价指标的权重, 从而实现对飞机交流电能质量的有效评估, 克服了其他方法中主观评价步骤带来的结果不确定性。

**关键词:** 多电飞机; 电能质量; 粗糙集; 知识约简; 权重

**中图分类号:** TM7      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22754

## Evaluation of Airplane AC Power Quality Based on Rough Set Theory

SHI Zhibo<sup>1</sup>, MENG Jie<sup>2</sup>, HAN Yong<sup>2</sup>, LI Xueping<sup>2</sup>

(1. School of Electronics Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

**Abstract:** Due to the application of a large number of power electronic equipments on the aircraft, the aircraft power supply network tends to be complicated, and thus there is an urgent need to effectively evaluate the power quality of the power supply network. In order to evaluate AC power quality of aircraft, a comprehensive evaluation method of AC power quality based on rough set theory was proposed, the evaluation of 115 V/400 Hz AC power quality on typical passenger aircraft was realized. It can be seen from the study results that the weight ranking of each evaluation index obtained in the proposed method can meet with the index weight ranking obtained by other methods, and the power quality evaluation results can accurately reflect the operating status of the aircraft AC power system. It shows that the evaluation method based on rough set theory can obtain reasonable weights of aircraft AC power evaluation indicators based on objective measurement data, thereby to realize the effective evaluation of aircraft AC power quality and overcome the uncertainty brought by subjective evaluation steps in other methods.

**Key words:** multi-electric aircraft; power quality; rough set; knowledge reduction; weight

近年来,随着民用飞机技术的快速发展,机载各项功能不断扩充,大量包含电力电子变换器的电气设备仪表被引入到飞机系统的供电网络中,同时,电网中的负载类型也呈现出多样化的特征。这使得飞机供电网络架构越来越复杂,导致飞机供电电源受到干扰的数量及种类大幅增加<sup>[1-2]</sup>,进而降低了飞机电力系统的电能质量,严

重影响飞行安全。因此,研究有效提高多电飞机电力系统电能质量的技术及方法意义重大。

提高飞机电力系统电能质量的必要前提,是能够实现对飞机电能质量全面准确的监测和评估。但是,目前针对飞机电能质量综合评估的研究较少,已有的研究也存在评估指标过少、无法全面反映飞机整体电能质量情况等问题。例如,

**基金项目:**民航局“安全能力”建设项目(2019185)

**作者简介:**史志波(1980—),男,博士研究生,讲师,Email:zhiboshi2012@163.com

Alves<sup>[3]</sup>等人只通过计算直流纹波一项指标对 28 V 直流电压的电能质量进行评价;而 Chen<sup>[4]</sup>等人则通过分析电压、电流的幅值及谐波畸变率来分析飞机电能质量。与各类航空行业标准中电气系统标准规定的参数数量相比,这类研究由于选取的指标数量偏少,并不能全面体现飞机电力系统的整体情况。要想准确全面的对飞机电能质量进行评估,需要将机载电源的直流特性指标和交流特性指标分别进行评估。以典型的 B787 型客机为例,其直流电压等级为  $\pm 270$  V,而交流电压等级为 115 V/400 Hz。由于反映电源直流母线电能质量的评价指标较少,对于电源直流电能质量的评估较为简单。而与电源交流电能质量相关的特性参数较多,因此对于电源交流电能质量的评估较为复杂,目前还鲜见相关的研究成果。

飞机电力系统具有其自身的独特性,如由于空间有限而使其结构更为复杂,以及飞行中由于环境的复杂性而引起的参数之间的关联性和不确定性等<sup>[5]</sup>。但是,飞机电力系统无论从总体架构还是供电基本特性,都与陆地电网系统类似,可以借鉴陆地电网对于交流电能质量评估的思路和方法。目前主要的评估方法有:层次分析法<sup>[6]</sup>,模糊数学法<sup>[7-8]</sup>,熵权法<sup>[9]</sup>等。层次分析法是一种专家赋权分析法,专家的主观判断对各项指标的权重影响较大,此外,该方法需要对判断矩阵进行一致性验证,导致计算量巨大<sup>[10-11]</sup>;模糊数学法的理论基础为最大隶属度原则,由于隶属度函数的确定带有主观性,并且,这一原则常导致无法区分两个隶属度之间的差别,极易引起较大的判断偏差<sup>[12]</sup>;而在熵权法中,当所有熵值都接近 1 时,会导致部分指标获得与其自身重要程度不匹配的权重值,从而影响最后的评价结果<sup>[13-14]</sup>。由此可知,上述方法都存在各自的问题,因此其应用也受到相应的限制。

粗糙集理论是一种处理含糊和不确定性问题的新型数学方法,其有效性已在许多科学与工程领域的成功应用中得到证实<sup>[15]</sup>。该理论的主要思想是利用已知的知识库,对数据进行分类,并且在保持系统分类能力不变的前提下通过知识约简,删除其中不相关或不重要的知识,从而导出问题的决策或分类规则。其最主要的优点是不需要任何先验知识,所以能够客观的对问题的不确定性进行描述和处理。受此启发,本文参考目前通用的飞机电气系统特性标准,确定了具体

的评价指标,利用粗糙集理论获得各评价指标的权重,进一步计算各个指标的综合评分,最终实现对多电飞机交流电能质量的综合评估。

## 1 基于粗糙集理论的飞机交流电能质量评价体系设计

### 1.1 选取多电飞机交流电能质量评价指标

随着 115 V/400 Hz 交流电压等级在军机和部分多电飞机上的应用,我国已经形成了自己的飞机标准,并在其中提出了飞机 115 V/400 Hz 交流供电特性的相关规定。其中中华人民共和国航空行业标准(民用标准)<sup>[16]</sup>中规定的交流供电稳态特性参数如表 1 所示,瞬态特性参见参考文献 [16]中的瞬态波形示意图。

表 1 中华人民共和国航空行业电气系统标准(民用标准)

Tab.1 Electrical system standard of the aviation industry of the people's republic of China (civil standard)

稳态特性	相电压				电压调制	
	三相电压平均/V	每相电压/V	最大不平衡/V	相移/(°)	最大波峰-波谷/V	
正常	104.0~120.5	100~122	6	116~124	4.0	
非正常	98.5~132.5	97~134	-	-	-	
应急	-	-	8	-	-	
稳态特性	电压波形				频率/Hz	
	波峰系数	畸变系数/%	单次畸变分量	直流分量/V	频率	频率调制幅度
正常	1.26~1.56	8	6%最大	-0.1~+0.1	390~410	可以协商
非正常	-	-	-	-	360~440	-
应急	-	10	-	-	-	-

由表 1 可知,每相电压、最大不平衡、相移、最大波峰-波谷差值、波峰系数、畸变系数、直流分量、频率、频率调制 9 个参数为稳态交流供电特性的主要参数。其中,每相电压是指向单相或三相用电设备供电的任意相的相电压值,本标准中所有交流电压值均指相电压的方均根值。最大不平衡是指稳态条件下三相电压中最大相电压与最小相电压之差。相移是指稳态条件下,三相交流系统中三相电压波形的任意两相波形过零点之间的最大相角差(标称值为 120°)。最大波峰-波谷差值是指系统稳态工作期间发生在 1 s 时间内最大的电压峰值与最小的电压峰值之差。波峰系数是指稳态条件下测得的交流电压波形峰值与方均根值之比的绝对值。畸变系数是指波形中畸变与基波分量的方均根值之比,通常用百

分值表示。直流分量是指电压波形的平均值。频率是指电压波形的变化频率。频率调制是指调制引起的频率变化量。本文选取上述9个参数作为评估指标。此外,由之前的研究结论可知<sup>[17-18]</sup>,电压的总谐波失真也是交流供电特性的重要参数,虽然该参数的变化对于不同的电能电网系统产生的影响差异较大,但是在电能质量的评估过程中对于该参数的评价不可忽略。因此本文将电压的总谐波失真纳入交流电能质量评价指标。

根据上述评价指标和对飞机交流电能质量评价的真实反映,利用粗糙集理论可以计算上述10个指标因素的权重。

## 1.2 基于粗糙集理论计算评价指标权重

采用粗糙集理论重点对飞机交流电能质量评价指标的权重进行计算,以克服传统赋权方法中主观因素对赋权合理性的影响,在此基础上实现对飞机交流电能质量的综合评价。多指标评价权重可利用粗糙集中知识约简原理和属性重要度原则加以确定<sup>[19]</sup>,具体步骤分三部分。

### 1.2.1 归一化处理

由于本文中选取的评价指标均为可以量化的指标数据,且不同指标数据的量纲存在差异,因此,可根据测度值大小进行评分,从而统一数量级及消除量纲,实现评价指标数据的归一化。评分方法如下:

当评价指标为成本型指标时,标准公式为

$$b_{ij}^* = \frac{\max b_j - b_{ij}}{\max b_j - \min b_j} \times 100\% \quad (1)$$

当评价指标为效益型指标时,标准公式为

$$b_{ij}^* = \frac{b_{ij} - \min b_j}{\max b_j - \min b_j} \times 100\% \quad (2)$$

当评价指标为适中型指标时,标准公式为

$$b_{ij}^* = \begin{cases} \frac{b_{ij} - \min b_j}{\bar{b}_j - \min b_j} \times 100\% & b_{ij} < \bar{b}_j \\ \frac{\max b_j - b_{ij}}{\max b_j - \bar{b}_j} \times 100\% & b_{ij} \geq \bar{b}_j \end{cases} \quad (3)$$

式中: $b_{ij}$ ,  $b_{ij}^*$ 分别为监测点*i*的第*j*个评估指标值和归一化处理结果; $\max b_j$ ,  $\min b_j$ 分别为第*j*个评价指标的上、下限; $\bar{b}_j$ 为第*j*个评价指标的理想值。

### 1.2.2 评分的属性离散化

由于粗糙集理论的基础是集合论,只能处理离散属性值,因此,需要进一步对数据归一化处

理获得的评分进行分级以获得离散的属性值。具体步骤如下:

1) 计算属性评分的区间长度:

$$\bar{z}_j = (\max z_j - \min z_j) / n_i \quad (4)$$

式中: $\max z_j$ 为第*j*个属性评分中的最大值; $\min z_j$ 为第*j*个属性评分中的最小值; $n_i$ 为区间个数; $\bar{z}_j$ 为第*j*个属性评分区间的长度。

2) 确定属性评分的区间范围。对于第*j*个属性评分的各区间的范围为

$$[\min z_j, \min z_j + \bar{z}_j], [\min z_j + \bar{z}_j, \min z_j + 2\bar{z}_j], \dots, [\min z_j + (n_i - 1)\bar{z}_j, \max z_j] \quad (5)$$

3) 计算属性评分的量化值。每个属性共有  $n_i$  个区间,对于一个属性评分中的值  $z_j$ , 如果它位于第  $i$  个区间, 则其值为  $i$ 。

### 1.2.3 确定属性权重

在确定属性权重之前,需要对决策表进行相对约简。知识约简是粗糙集理论的核心内容之一,在数据的处理中有着十分重要的地位。决策表中的知识约简称为相对约简。知识库中知识的重要程度并不完全相同,知识约简就是在保持知识库分类能力不变的条件下,删除冗余的知识。

在选择的各项指标中,不同的功能属性可能具有不同的重要性,这里的重要性用来反映各个评价指标的权重。

利用粗糙集理论对于属性重要度的计算方法能够确定多指标评价的权重。具体步骤如下,其中涉及的符号定义如下: $DT$ 为决策表; $U$ 为对象的非空有限集合; $C$ 为条件属性集, $C = \{c | c \in C\}$ ;  $D$ 为决策属性集, $D = \{d | d \in D\}$ ;  $f$ 为信息函数; $V$ 为信息函数的值域; $c_i$ 为条件属性指标; $IND$ 为等价类; $pos_c(D)$ 为 $D$ 的 $C$ -正域; $pos_{C-\{c_i\}}(D)$ 为 $D$ 的 $C - \{c_i\}$ -正域; $card$ 为集合的基数; $\gamma$ 为决策指标对条件指标的依赖程度; $\sigma$ 为条件属性对于决策属性的重要程度。

1) 建立决策表  $DT = (U, C \cup D, V, f)$

2) 确定等价类集合: $UIIND(C)$ ,  $UIIND(D)$ ,  $UIIND(C - \{c_i\})$ 。

3) 导出条件属性集合正域: $pos_c(D)$ ,  $pos_{C-\{c_i\}}(D)$ 。

4) 删除不必要条件,当  $pos_{C-\{c_i\}}(D) = pos_c(D) = U$  时,说明条件属性  $c_i$  在  $C$  中相对于决策  $D$  是不必要的。

5) 求条件属性集合的基数: $card(pos_c(D))$ ,

$card(pos_{C-\{c_i\}}(D))$ 。

6)计算  $D$  对评价指标集合  $C$  的依赖程度:

$$\gamma_C(D) = card(pos_C(D))/card(U) \quad (6)$$

7)计算  $D$  对评价指标  $C - \{c_i\}$  的依赖程度:

$$\gamma_{C-\{c_i\}}(D) = card(pos_{C-\{c_i\}}(D))/card(U) \quad (7)$$

8)计算条件属性对于决策属性的重要程度:

$$\sigma(c_i) = \gamma_C(D) - \gamma_{C-\{c_i\}}(D) \quad (8)$$

9)计算各评价指标的权重系数:

$$\lambda_i = \sigma(c_i) / \sum_{j=1}^n \sigma(c_j) \quad (9)$$

### 1.3 多电飞机交流电能质量综合评分的计算

计算各观测点综合评分:

$$E = \sum_{i=1}^n (\lambda_i a_i) \quad (10)$$

式中:  $E$  为电能质量综合评分;  $a_i$  为各评价指标的评分;  $\lambda_i$  为各评价指标权重系数,由各评价指标的权重系数通过粗糙集理论确定。

## 2 飞机交流电能质量综合评价

为了验证粗糙集理论应用于多电飞机交流电能质量评价的合理性,本文对飞机巡航阶段 115 V/400 Hz 的三相电源在不同负载下输出母线的交流电能质量进行评价。

### 2.1 评价指标原始数据的获取

为获得评价指标的原始数据,本文利用 Simulink 软件建立 115 V/400 Hz 多电飞机交流电气系统,模型中共有三类负载:恒压负载、恒流负载以及恒功率负载。模型中  $A$  相母线为恒压负载供电,  $B$  相母线为恒流负载供电,  $C$  相母线为恒功率负载供电。模型完成后,参照《中华人民共和国航空行业标准》中对于飞机电气系统特性的要求以及对本文所选 10 个评价指标参数的规定,进行仿真计算。计算完成后,从每相母线分别取 6 组初始数据,得到共 18 组仿真初始指标参数测量值,如表 2 所示。

表 2 Simulink 仿真初始数据  
Tab.2 Simulink simulation initial data

评估数据	每相电压/V	最大不平衡/V	最大波峰-波谷差值/V	相移/(°)	畸变系数	波峰系数	直流分量/V	频率/Hz	频率调制幅度/Hz	总谐波失真	
	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$	
A相母线	1	112.5	1.10	0.71	118.6	0.016	1.390	0.014	400.5	1.2	0.020
	2	112.9	2.52	0.96	119.6	0.021	1.385	0.015	399.9	1.1	0.009
	3	114.6	2.40	0.96	119.5	0.011	1.390	0.015	399.3	1.1	0.013
	4	112.9	0.70	0.64	121.8	0.024	1.400	0.013	400.3	0.6	0.023
	5	113.1	1.20	0.55	119.0	0.013	1.395	0.030	398.4	0.9	0.012
	6	114.3	1.20	0.53	116.4	0.032	1.385	0.030	402.0	1.1	0.010
B相母线	7	112.5	0.80	1.53	119.6	0.026	1.380	0.016	399.5	2.1	0.015
	8	113.5	3.00	0.96	120.4	0.018	1.350	0.014	399.6	1.1	0.013
	9	112.6	1.32	0.71	118.7	0.031	1.400	0.017	399.4	1.3	0.021
	10	114.0	1.20	0.53	119.0	0.035	1.430	0.035	398.4	0.8	0.009
	11	109.6	2.70	1.36	120.5	0.013	1.395	0.012	400.7	1.0	0.012
	12	114.3	0.60	0.44	121.1	0.044	1.395	0.011	402.2	0.9	0.010
C相母线	13	112.0	1.10	0.88	119.4	0.029	1.375	0.014	399.5	2.1	0.016
	14	112.2	1.53	1.77	120.2	0.016	1.370	0.018	401.4	2.0	0.014
	15	113.1	2.52	1.16	119.3	0.018	1.350	0.018	399.4	1.5	0.013
	16	111.4	1.00	1.28	119.3	0.029	1.370	0.018	400.7	1.8	0.016
	17	112.2	2.40	1.77	119.8	0.024	1.380	0.018	399.6	2.3	0.015
	18	112.0	1.70	1.84	119.3	0.026	1.368	0.018	400.7	2.3	0.017

### 2.2 评价指标权重的计算

通过式(1)、式(3)计算各指标的得分,如表 3 所示;将每个条件属性评分和决策属性评分均分

为 3 个等级,利用式(4)、式(5)确定离散各属性区间;根据各属性区间大小对数据进行离散,生成决策表,结果如表 4 所示。

表3 评价指标得分表  
Tab.3 Evaluation index scores

评估数据	得分										<i>D</i>
	<i>c</i> <sub>1</sub>	<i>c</i> <sub>2</sub>	<i>c</i> <sub>3</sub>	<i>c</i> <sub>4</sub>	<i>c</i> <sub>5</sub>	<i>c</i> <sub>6</sub>	<i>c</i> <sub>7</sub>	<i>c</i> <sub>8</sub>	<i>c</i> <sub>9</sub>	<i>c</i> <sub>10</sub>	
1	83.3	81.7	82.3	65.0	80.0	86.7	86.0	95.0	80.0	60.0	80.00
2	86.0	58.0	76.0	90.0	73.8	83.3	85.0	99.0	81.7	82.0	80.36
3	97.3	60.0	76.0	87.5	86.3	86.7	85.0	93.0	81.7	74.0	82.75
4	86.0	88.3	84.0	55.0	70.0	93.3	87.0	97.0	90.0	54.0	80.46
5	87.3	80.0	86.3	75.0	83.8	90.0	70.0	84.0	85.0	76.0	81.74
6	95.3	80.0	89.0	85.0	60.0	83.3	70.0	80.0	81.7	80.0	80.43
7	83.3	86.7	61.8	90.0	67.5	80.0	84.0	95.0	65.0	70.0	78.33
8	90.0	50.0	76.0	90.0	77.5	60.0	86.0	96.0	81.7	74.0	78.12
9	84.0	78.0	82.3	67.5	61.3	93.3	83.0	94.0	78.3	58.0	76.97
10	93.3	80.0	86.8	75.0	56.3	86.7	65.0	84.0	86.7	82.0	79.58
11	64.0	55.0	66.0	87.5	83.8	90.0	88.0	93.0	83.3	76.0	79.66
12	95.3	90.0	76.0	72.5	45.0	90.0	89.0	78.0	85.0	80.0	80.08
13	80.0	81.7	78.0	85.0	63.8	76.7	86.0	95.0	65.0	66.0	79.38
14	81.3	74.5	55.8	95.0	80.0	73.3	82.0	86.0	66.7	72.0	76.66
15	87.3	58.0	71.0	82.5	77.5	60.0	82.0	94.0	75.0	74.0	76.13
16	76.0	83.3	68.0	82.5	63.8	73.3	82.0	93.0	70.0	66.0	75.79
17	81.3	60.0	55.8	95.0	70.0	80.0	82.0	96.0	61.7	70.0	75.18
18	80.0	71.7	54.0	82.5	67.5	72.0	82.0	93.0	61.7	66.0	73.04

表4 决策表  
Tab.4 Decision table

论域	条件属性 <i>C</i>										决策属性 <i>D</i>
	<i>c</i> <sub>1</sub>	<i>c</i> <sub>2</sub>	<i>c</i> <sub>3</sub>	<i>c</i> <sub>4</sub>	<i>c</i> <sub>5</sub>	<i>c</i> <sub>6</sub>	<i>c</i> <sub>7</sub>	<i>c</i> <sub>8</sub>	<i>c</i> <sub>9</sub>	<i>c</i> <sub>10</sub>	
1	2	1	1	3	1	1	1	1	2	3	1
2	2	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1
4	2	1	1	3	2	1	1	1	1	3	1
5	1	1	1	2	1	1	3	3	1	1	1
6	1	1	1	1	3	1	3	3	1	1	1
7	2	1	3	1	2	2	1	1	3	2	2
8	1	3	2	1	1	3	1	1	1	1	2
9	2	1	1	3	2	1	1	1	2	3	2
10	1	1	1	2	3	1	3	3	1	1	2
11	11	3	3	2	1	1	1	1	1	1	2
12	12	1	1	1	2	3	1	1	3	1	1
13	2	1	1	1	2	2	1	1	3	2	2
14	2	2	3	1	1	2	1	2	3	2	2
15	1	3	2	1	1	3	1	1	2	1	3
16	2	1	2	1	2	2	1	1	3	2	3
17	2	3	3	1	2	2	1	1	3	2	3
18	1	2	3	1	2	2	1	1	3	2	3

由表4可确定等价类集合:

$$IND(C) = \{\{1\}, \{2\}, \dots, \{18\}\}$$

$$IND(D) = \left\{ \begin{aligned} &\{1,2,3,4,5,6,12\}, \{7,8,9,10,11,13,14\}, \\ &\{15,16,17,18\} \end{aligned} \right\}$$

对于条件属性*c*<sub>1</sub>, *c*<sub>2</sub>, *c*<sub>3</sub>, *c*<sub>4</sub>, *c*<sub>5</sub>, *c*<sub>6</sub>, *c*<sub>7</sub>, *c*<sub>8</sub>, *c*<sub>9</sub>, *c*<sub>10</sub>, 分别删除*c*<sub>1</sub>, *c*<sub>2</sub>, *c*<sub>3</sub>, *c*<sub>4</sub>, *c*<sub>5</sub>, *c*<sub>6</sub>, *c*<sub>7</sub>, *c*<sub>8</sub>, *c*<sub>9</sub>, *c*<sub>10</sub>可得:

$$IND(C - c_1) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2,11\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \\ &\{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_2) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7,9,18\}, \{8\}, \{10\}, \\ &\{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_3) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{7,8,16\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{9\}, \\ &\{10\}, \{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_4) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6,10\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \\ &\{11\}, \{12\}, \{13\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_5) = \left\{ \begin{aligned} &\{1,9\}, \{2\}, \{3,5,10\}, \{4\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{11\}, \\ &\{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_6) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3,8\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{9\}, \{10\}, \\ &\{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_7) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10,12\}, \\ &\{11\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_8) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \\ &\{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14,18\}, \{15\}, \{16\}, \{17\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_9) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4,9\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8,15\}, \{10\}, \\ &\{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{16\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

$$IND(C - c_{10}) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \\ &\{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

从而可得条件属性集合正域:

$$pos_C(D) = \left\{ \begin{aligned} &\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \\ &\{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{18\} \end{aligned} \right\}$$

$$pos_{C-\{c_1\}}(D) \neq pos_C(D) \quad pos_{C-\{c_2\}}(D) \neq pos_C(D)$$

$$pos_{C-\{c_3\}}(D) \neq pos_C(D) \quad pos_{C-\{c_4\}}(D) \neq pos_C(D)$$

$$pos_{C-\{c_5\}}(D) \neq pos_C(D) \quad pos_{C-\{c_6\}}(D) \neq pos_C(D)$$

$$pos_{C-\{c_7\}}(D) \neq pos_C(D) \quad pos_{C-\{c_8\}}(D) \neq pos_C(D)$$

$$pos_{C-\{c_9\}}(D) \neq pos_C(D) \quad pos_{C-\{c_{10}\}}(D) = pos_C(D)$$

由上述分析可知,在决策表的相对约简中*c*<sub>10</sub>在*C*中相对于*D*是不必要的,而*c*<sub>1</sub>, *c*<sub>2</sub>, *c*<sub>3</sub>, *c*<sub>4</sub>, *c*<sub>5</sub>, *c*<sub>6</sub>, *c*<sub>7</sub>, *c*<sub>8</sub>, *c*<sub>9</sub>在*C*中相对于*D*是必要的,所以可以删除条件属性中的*c*<sub>10</sub>。接下来求条件属性集合的基数,计算结果如下:*card*(*U*)=18, *card*(*pos*<sub>*C*</sub>(*D*))=18, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>1</sub>\}</sub>(*D*))=16, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>2</sub>\}</sub>(*D*))=15, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>3</sub>\}</sub>(*D*))=15, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>4</sub>\}</sub>(*D*))=16, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>5</sub>\}</sub>(*D*))=13, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>6</sub>\}</sub>(*D*))=16, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>7</sub>\}</sub>(*D*))=16, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>8</sub>\}</sub>(*D*))=16, *card*(*pos*<sub>*C*-\{*c*<sub>9</sub>\}</sub>(*D*))=14。

将上述结果代入式(6)、式(7),计算决策性指标*D*对评价指标集合*C*和评价指标*C* - {*c*<sub>*i*</sub>}的依赖程度:*γ*<sub>*C*</sub>(*D*)=18/18, *γ*<sub>*C*-\{*c*<sub>1</sub>\}</sub>(*D*)=16/18, *γ*<sub>*C*-\{*c*<sub>2</sub>\}</sub>(*D*)=15/18, *γ*<sub>*C*-\{*c*<sub>3</sub>\}</sub>(*D*)=15/18, *γ*<sub>*C*-\{*c*<sub>4</sub>\}</sub>(*D*)=16/18,

$\gamma_{c_{-}\{c_1\}}(D)=13/18, \gamma_{c_{-}\{c_2\}}(D)=16/18, \gamma_{c_{-}\{c_3\}}(D)=16/18,$   
 $\gamma_{c_{-}\{c_4\}}(D)=16/18, \gamma_{c_{-}\{c_5\}}(D)=14/18。$

将上述结果代入式(8),计算条件属性对于决策属性的重要程度: $\sigma(c_1)=2/18, \sigma(c_2)=3/18,$   
 $\sigma(c_3)=3/18, \sigma(c_4)=2/18, \sigma(c_5)=5/18, \sigma(c_6)=$   
 $2/18, \sigma(c_7)=2/18, \sigma(c_8)=2/18, \sigma(c_9)=4/18。$

将上述结果代入式(9),计算各评价指标的权重系数: $\lambda_1=0.08; \lambda_2=0.12; \lambda_3=0.12; \lambda_4=0.08;$   
 $\lambda_5=0.20; \lambda_6=0.08; \lambda_7=0.08; \lambda_8=0.08; \lambda_9=0.16。$

根据上述计算出的各评价指标的权重系数值,将权重按照由大到小的顺序将各个评价指标排列如下:畸变系数>频率调制幅度>电压调制幅度=相电压不平衡>稳态电压=电压相移=波峰系数=直流分量=稳态频率=总谐波失真。

由上述结果可知,在多电飞机9个交流电能质量评价指标中,对电能质量影响最为显著的依次为畸变系数、频率调制幅度、电压调制幅度以及相电压不平衡,这一结论与万勇<sup>[20]</sup>使用组合赋权理想法对风电供电网电能质量评估的结论以及赵宪<sup>[21]</sup>使用改进层次分析法对分布式电网电能质量评估的结论是一致的。虽然商用飞机的电能系统规模远远小于陆地供电网络,但是飞机电力系统作为一个独立的小型系统,其基本结构与陆地供电网络是十分类似的。因此,本文的粗糙集赋权法能够揭示各个评价指标的本质属性,同时也符合管理人员对各评价指标重要性的认同,从而证明了本文方法的合理性和有效性。

### 2.3 评价数据评分的计算

将各评价指标的权重系数代入到式(10)中,可得各个评估数据的交流电能质量综合评分。按照目前对陆地电网电能质量评价的等级分数划分标准:优(90+~100),良(80+~90),中(70+~80),差(60+~70)。

上述各数据点的电能质量评分和等级如表5所示。由表5计算结果可知,负责为恒压负载供电的母线A电能质量较高,负责为恒流负载供电的母线B次之,而负责为恒功率负载供电的母线C电能质量相对较差,说明母线C上的各供电评价指标参数在飞机处于巡航阶段时变化明显,这一结果与恒功率负载电力参数波动较大这一特性相吻合。此外,数据14、数据15、数据16、数据17和数据18的电能质量综合评分较差。从表2中的现场数据可以看出,这5个数据中的电压调

制幅度以及频率调制幅度均较大。这表明,飞机在巡航阶段时,大功率负载投入运行<sup>[5]</sup>,此时如果电网的交流电压调制幅度和频率调制幅度较高时,会导致交流电能质量下降。如果采取有效的措施对这两个参数进行调控,则能够对交流电能质量实现有效的改善。

表5 各个数据点的电能质量等级(按评分降序排列)

Tab.5 Power quality level of each data point(in descending order of rating)

评估数据	综合评分	评分等级	评估数据	综合评分	评分等级
5	82.82	良	8	77.45	中
3	82.61	良	12	76.50	中
4	82.54	良	7	76.30	中
1	81.76	良	13	76.14	中
2	79.18	中	14	75.72	中
6	78.44	中	15	75.44	中
11	78.41	中	16	74.66	中
9	77.77	中	17	72.51	中
10	77.47	中	18	71.22	中

### 3 结论

针对目前尚缺少合理有效的多电飞机交流电能质量评价方法的现状,本文基于粗糙集理论,运用粗糙集赋权法,对10个主要的飞机交流电能质量评价指标进行权重计算,并进一步对算例数据进行综合评分,最终实现对多电飞机交流电能质量的合理评价。

研究结果表明,10个指标中的总谐波失真,通过决策表的相对约简可将其删除;在剩下的9个电能质量评价指标中,畸变系数、频率调制幅度、电压调制幅度以及相电压不平衡这四个指标的权重较大,这一结果也与其他评价方法得到的陆地电网交流电能质量权重计算结果相吻合,从而证明了本文方法的合理性和有效性。粗糙集理论由于其不需要专家的先验知识确定评价指标的权重值,得出的结论避免了管理人员主观因素可能引起的最终结果偏差,更具真实性和可靠性,能够有效提高评价结果的客观性。由于飞机在巡航过程中对于飞行安全性的标准和要求较高,应尽量避免主观评价过程带来的偏差。因此,本文提出的基于粗糙集理论的评价指标赋权法更加适合对多电飞机交流电能质量进行综合评价。

## 参考文献

- [1] Chen Jianwei, Wang Chengjun, Chen Jie. Investigation on the selection of electric power system architecture for future more electric aircraft[J]. IEEE Trans on Transportation Electrification, 2018, 4(2): 563-576.
- [2] Roboam X, Sareni B, Andrade A. More electricity in the air: toward optimized electrical networks embedded in more-electrical aircraft[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2012, 6(4): 6-17.
- [3] Alves J V G, Figueiredo P A, Malizia I D F, *et al.* Analysis and tests of power quality in aviation environment[C]//17th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Belo Horizonte, Brazil, 2016:272-277.
- [4] Chen Jianwei, Zhang Xiuqin. Study on the power quality of more electric aircraft power grid[C]//18th European Conference on Power Electronics and Applications. Karlsruhe, Germany, 2016.
- [5] 董慧芬,金晨阳,史志波. IF-ANP 组合赋权的灰聚类飞机电能质量评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 49-55.  
Dong Huifen, Jin Chenyang, Shi Zhibo. Aircraft electrical power quality evaluation of grey cluster with IF-ANP combination weight[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(7): 49-55.
- [6] 赵书强,汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 143-148, 162.  
Zhao Shuqiang, Tang Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 143-148, 162.
- [7] 陶顺,肖湘宁. 电能质量单项指标和综合指标评估的研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(2): 25-41.  
Tao Shun, Xiao Xiangning. Research on individuation indices and global indicator of power quality[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(2): 25-41.
- [8] 康世威,彭建春,何禹清. 模糊层次分析与多目标决策相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 113-118.  
Kang Shiwei, Peng Jianchun, He Yuqing. Comprehensive evaluation of power quality based on the integration of fuzzy analytic hierarchy process with multi objective decision-making[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 113-118.
- [9] 贾正源,赵亮. 基于熵权未确知测度模型的电能质量综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 33-37.  
Jia Zhengyuan, Zhao Liang. Comprehensive evaluation of power quality based on the model of entropy weight and unascertained measure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 33-37.
- [10] 张蔓,林涛,曹健,等. 理想区间法在电能质量综合评估中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 33-38.  
Zhang Man, Lin Tao, Cao Jian, *et al.* Application of ideal interval method in power quality synthetic evaluation[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 33-38.
- [11] 沈阳武,彭晓涛,施通勤,等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73.  
Shen Yangwu, Peng Xiaotao, Shi Tongqin, *et al.* A grey comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 67-73.
- [12] 姜苏娜,方杰,林勇. 基于可信性理论的风电场电能质量模糊综合评估[J]. 质量技术监督研究, 2017, 4(52): 2-7.  
Jiang Suna, Fang Jie, Lin Yong. Fuzzy comprehensive evaluation on electric power quality of wind farm based on credibility theory[J]. Quality and Technical Supervision Research, 2017, 4(52): 2-7.
- [13] 周惠成,张改红,王国利. 基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 100-106.  
Zhou Huicheng, Zhang Gaihong, Wang Guoli. Multi-objective decision making approach based on entropy weights for reservoir flood control operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 100-106.
- [14] 李英海,周建中. 基于改进熵权和 Vague 集的多目标防洪调度决策方法[J]. 水电能源科学, 2010, 28(6): 32-35.  
Li Yinghai, Zhou Jianzhong. Modified entropy method and vague set based multi objective flood control decision making approach[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(6): 32-35.
- [15] 石杰. 粗糙集理论及其应用研究[J]. 科技信息, 2008, 33: 431.  
Shi Jie. Rough set theory and its applied research[J]. Science & Technology Information, 2008, 33: 431.
- [16] 国防科学技术工业委员会. HB7745—2004. 飞机电气系统特性[S/OL]. (2004-09-01) [2020-12-01] <https://www.doc88.com/p-5681087889992.html?r=1>.  
Commission of Science. HB7745—2004. Aircraft electrical system characteristics[S/OL]. (2004-09-01) [2020-12-01] <https://www.doc88.com/p-5681087889992.html?r=1>.
- [17] 汤钰鹏,徐建军. 高次谐波产生的原因、危害及其抑制措施[J]. 电气传动自动化, 2000, 22(1): 3-6.  
Tang Yupeng, Xu Jianjun. Origination, damage and suppression of high-frequency harmonic[J]. Electrical Drive Automation, 2000, 22(1): 3-6.
- [18] 林建钦,杜永宏. 电力系统谐波危害及防止对策[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(2): 28-31.  
Lin Jianqin, Du Yonghong. Harm and countermeasure of harmonics in power system[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(2): 28-31.
- [19] 凌征球. 基于粗糙集理论的企业产品销售状况评价方法[J].

带有尖峰和毛刺。分析原因:相比较于仿真中的理想电路,1) IMC实验平台的双向IGBT有压降及开关时间延迟;2) 采样调理电路精度有限,检测值存在误差;3) 实验中电流探头精度略低;4) 电磁干扰EMI。

## 5 结论

文章提出了一种新型输入电压观测的ZCC-MPC方法。并进行了仿真和实验验证其有效性。结果表明:

1) 输入电压观测器和新型网侧电流预测模型工作有效,简化了采样电路,缩短了时间延迟。

2) 利用该策略实现了两步零电流换流过程,优化换流的同时可进一步缩短换流时间。

3) 采用此控制策略,提高了硬件平台的采样频率,优化了输出侧电机的电压电流波形正弦特性,实现了电机良好的稳/动态性能,同时实现了网侧的单位功率因数及正弦性输入电流波形。

本研究软件设计及硬件平台已基本成熟,可实现模型预测控制在IMC-IM系统中的深度优化。

进一步的,可重点改进ZCC-MPC方法,以期实现不固定的占空比,可以同时实现性能优化。

### 参考文献

[1] Kobravi K, Iravani R, Kojori H A. A review and implementation of matrix-converter for aerospace application[C]// Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2012:698-705.  
 [2] Lei J. Aircraft starter/generator system based on indirect matrix converter[C]// Conference of the IEEE Industrial Electronics

Society. IEEE, 2014.  
 [3] 孙梅迪,王辉,李幸. 基于高频矩阵变换器的新型开关电源[J]. 电气传动, 2016, 46(5): 53-56.  
 Sun Meidi, Wang Hui, Li Xing. Novel switching power supply based on high frequency matrix converter [J]. Electric Drive, 2016, 46 (5): 53-56.  
 [4] Basri H M, Mekhilef S. Model predictive torque and flux control of induction motor fed by three level indirect matrix converter with unity power factor strategy[C]// IEEE, International Power Electronics and Motion Control Conference, 2016:2557-2563.  
 [5] Padhee V, Sahoo A K, Mohan N. SVPWM technique with varying DC-Link voltage for common mode voltage reduction in an indirect matrix converter[C]//Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2015:875-881.  
 [6] Basri H M, Mekhilef S. Model predictive torque and flux control of induction motor fed by three level indirect matrix converter with unity power factor strategy[C]//IEEE, International Power Electronics and Motion Control Conference, 2016:2557-2563.  
 [7] 朱维钧,朱伟江,周年光,等. 基于间接式矩阵变换器的优化模型预测控制[J]. 电气传动, 2018, 48(12): 22-27.  
 Zhu Weijun, Zhu Weijiang, Zhou Nianguang, et al. Optimal model predictive control based on indirect matrix converter [J]. Electric Drive, 2018, 48 (12): 22-27.  
 [8] 梅杨,王闪闪,宋成昊. 基于IMC-异步电机调速系统的谐波抑制MPC方法[J]. 电气传动, 2017, 47(3): 21-26.  
 Mei Yang, Wang Shanshan, Zhu Chenghao. MPC method for harmonic suppression based on IMC asynchronous motor speed control system [J]. Electric Drive, 2017, 47(3): 21-26.

收稿日期:2020-06-11

修改稿日期:2021-01-02

(上接第9页)

统计与决策, 2006, 16(2): 140-141.  
 Ling Zhengqiu. Enterprise production sales state evaluation method based on rough sets[J]. Statistics and Decision, 2006, 16(2): 140-141.  
 [20] 万勇,杨星磊,王宏兵,等. 基于概率分布的风电场电能质量综合评估[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(4): 171-176.  
 Wan Yong, Yang Xinglei, Wang Hongbing, et al. Comprehensive evaluation on power quality of wind farm based on probability distribution[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(4): 171-176.

[21] 赵宪,周力行,邓维. 改进的层次分析法在含分布式电源系统电能质量综合评估中的应用[J]. 中国电力, 2014, 47(12): 72-78.  
 Zhao Xian, Zhou Lixing, Deng Wei. Application of improved analytical hierarchy process in comprehensive assessment of the power quality with distributed generators[J]. Electric Power, 2014, 47(12): 72-78.

收稿日期:2020-12-01

修改稿日期:2020-12-18