

# 基于多层模糊评估模型的直升机供电系统综合评估方法

钟群芳 郭长欢 黄建

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

**摘要:** 为确保直升机在投入生产之前对其性能状态有全局性和整体性评价,根据直升机供电系统的研制特点,建立了设计阶段的供电系统评估指标体系,对该体系的递阶层次结构进行了分析及论述。结合现今系统评估的研究现状以及指标系统的特征,采用模糊综合评估方法对系统进行性能综合评估,着重对模糊评估模型的建立进行了详细分析,运用层次分析法确定各影响因素指标权重,尤其是针对不同专家确定的模糊判断矩阵运用最小二乘法得出更为客观科学的权重分配。利用此方法对某型直升机供电系统的综合性能进行了评估,评估结果表明了此模型的有效性和准确性。

**关键词:** 直升机供电系统;模糊评估;层次分析法

**中图分类号:** TP202 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120.40

## Comprehensive evaluation method of helicopter power supply system based on multi-hierarchy fuzzy evaluation model

Zhong Qunfang Guo Changhuan Huang Jian

(School of Automatic Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to ensure the helicopter for the performance status with overall and holistic evaluation before production, based on the characteristics of the helicopter power supply system, we established the evaluation index system of the power system in design phase, and the pass class hierarchy of that system are analyzed and discussed. Combined with current research situation of the assessment system and the characteristics of the index system, we use the fuzzy comprehensive evaluation method for system property to comprehensively evaluate, especially the establishment of fuzzy assessment model are analyzed in detail. Using analytic hierarchy process(AHP) to determine the index weight of each affecting factor, particularly for the fuzzy judgment matrix determined by different experts we use the least square method (LSM) for more objective and scientific weight distribution. With this method to evaluate the comprehensive property of a certain type of helicopter power supply system, the evaluation result reflects the validity and accuracy of this model.

**Keywords:** helicopter power supply system; fuzzy evaluation; analytic hierarchy process

### 1 引言

直升机供电系统的设计性能评估是指在系统投入生产之前,在设计阶段就对系统的供电质量、存在的不足和缺陷进行分析和评估,是系统设计维护的重要课题。供电系统结构复杂、性能多样化,其设计性能的优劣会通过各项性能参数体现出来,因此可以通过各项性能参数所包含的信息进行整合,进而判断供电系统的当前性能状态。

综合评估是近年来发展迅速的一个研究方向,一般是对量化后的评估因素分配权值,综合得出对评估对象全局性、整体性的评价,所用理论包括贝叶斯统计理论、主成分分析法、数据包络分析法、模糊评价法等。文献[1]系统介

绍了基于贝叶斯统计理论融合方法的机载电源系统性能评估,文献[2]分析了改进的云 Delphi 层次分析法对船载测控系统的可靠性评估。而基于模糊综合评估法是近年来发展迅速的一个评估方法,它对于评估对象的模糊性和不确定性有较为合理的评价,目前已广泛应用于各个领域多种对象的综合评价中,例如在桥梁、电力、建筑等各个领域都有相关应用<sup>[3-8]</sup>,但在航空航天领域特别是直升机供电系统方面,有关性能评估的文献相对较少,因此迫切需要此方面的进一步研究。

针对多参数强耦合的直升机供电系统,分析其递阶层次结构,并结合指标系统的特征,采用模糊层次分析法,可实现对直升机供电系统的综合评估。

收稿日期:2015-07

## 2 层次分析的模糊综合评价模型

层次分析法是美国著名运筹学家 Saaty 于 1977 年提出的,它是一种定性和定量相结合的决策方法,将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,具有系统、灵活、简洁的优点<sup>[9]</sup>,且能够根据较小的定量数据获得系统性的评估结果,具有较好的实践性。

### 2.1 建立评估因子集

假设评估因子集中包括  $m$  个评估因子,若进行分析的评估因子为  $u_i$ ,则评估因子集  $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ 。

### 2.2 建立评估目标集

通过分析直升机设计规定需要达到的功能和目标,可将以上层次结构中上级设计指标的目标等级分成  $n$  类,则评价集  $V$  为:  $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 。

### 2.3 确定指标权重

通过专家评分对各个层次影响因素指标两两相对重要性的比较构造判断矩阵。判断矩阵标度值及含义见表 1。

表 1 0.1~0.9 数量标度

标度	定义	说明
0.5	同等重要	$x_i$ 和 $x_j$ 同等重要
0.6	稍微重要	$x_i$ 与 $x_j$ 相比稍微重要
0.7	明显重要	$x_i$ 与 $x_j$ 相比明显重要
0.8	重要的多	$x_i$ 与 $x_j$ 相比重要的多
0.9	极端重要	$x_i$ 与 $x_j$ 相比极其重要
0.4, 0.3, 0.2, 0.1	反比较	当 $d_{ij}$ 代表 $x_i$ 与 $x_j$ 相比较得到的判断时, $d_{ji} = 1 - d_{ij}$ 是 $x_i$ 和 $x_j$ 相比较的判断

由于在进行不同元素重要性判断时,不同专家对于模糊判断矩阵的确定结果存在着细微差别,需对不同的矩阵进行模糊处理。假如对于相同的指标存在  $m$  个模糊判断矩阵,则可得到灰色判断矩阵  $C(\otimes)$ (如式(1)所示)。

$$C(\otimes) = \begin{bmatrix} 0.5 & \otimes_{12} & \otimes_{13} & \dots & \otimes_{1n} \\ & 0.5 & \otimes_{23} & \dots & \otimes_{2n} \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & 0.5 & \dots \\ & & & & 0.5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\otimes_{ij}([d_{ij}^1, d_{ij}^2])$ ( $\otimes_{ij}$  是  $d_{ij}^1$  和  $d_{ij}^2$  之间的某一数值),其中  $d_{ij}^1$  和  $d_{ij}^2$  分别是  $m$  个判断矩阵的元素  $d_{ij}^k$  前半部分和后半部分的均值,  $k = 1, 2, \dots, m$ 。当  $m$  为偶数时,前半部分元素和后半部分的元素的个数相等,当  $m$  为奇数时,令前半部分元素个数比后半部分元素个数少一个。

若在确定  $(\otimes_{ij})$  时,按照式(1)确定  $d_{ij}^1$  和  $d_{ij}^2$  之间的数值,则构成的矩阵为判断矩阵  $C$ ,判断矩阵  $C$  需要满足模糊一致性,当矩阵  $C$  不满足模糊一致性时,可以通过调整系数  $\alpha$  使其满足模糊一致性。

$$c_{ij} = \alpha d_{ij}^1 + (1 - \alpha) d_{ij}^2 \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  的变化范围是  $[0, 1]$ 。

令  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  表示指标  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  的权重。根据模糊矩阵的一致性,可以得到式(3)。

$$c_{ij} = 0.5 + c(w_i - w_j) \quad (3)$$

式中:  $i, j = 1, 2, \dots, n, c \in (0, 0.5]$ 。  $c$  衡量了不同人对元素重要性评价的差别,当差异程度大时,  $c$  值可取较大值。

由式(3)和权重的约束条件  $c(w) = \sum_{i=1}^n w_i - 1 = 0, w_i \geq 0$ ,可以得到权重  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  的计算公式,即:

$$w_i = \frac{nc_{in} - 0.5 + c - \sum_{j=1}^{n-1} c_{jn}}{cn} \quad (4)$$

当调整系数  $\alpha$  不能使模糊判断矩阵满足一致性要求时,运用最小二乘法计算权重向量  $w = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$ ,将问题转化为等式约束的最优化问题,如式(5)所示。

$$Q(1) \begin{cases} z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [0.5 + c(w_i - w_j) - c_{ij}]^2 \\ \text{s. t. } c(w) = \sum_{i=1}^n w_i - 1 = 0, w_i \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

运用 Lagrange 乘子法将约束规划问题  $Q(1)$  转化为无约束规划问题  $Q(2)$ ,即式(6):

$$Q(2) \min L(w, \lambda) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [0.5 + c(w_i - w_j) - c_{ij}]^2 + 2\lambda(\sum_{i=1}^n w_i - 1) \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为 Lagrange 乘子。

若  $w^*$  是问题  $Q(2)$  的局部极小点,根据式(6)局部极小点的一阶必要条件(KKT 条件),可以得到  $n+1$  个代数方程组成的方程组  $Q(3)$ ,即式(7):

$$KKT \begin{cases} \nabla_w L(w^*, \lambda^*) = 0 \\ c(w^*) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$Q(3) \begin{cases} c \sum_{j=1}^n [0.5 + c(w_i - w_j) - c_{ij}] - c \sum_{k=1}^n [0.5 + c(w_k - w_i) - c_{ki}] + \lambda = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \quad (w_i \geq 0) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)即可求得权重向量  $w = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$ ,其中  $w_k$  为:

$$w_k = \frac{2c + \sum_{j=1}^n (c_{kj} - c_{jk})}{2cn}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

### 2.4 多层次模糊综合评价模型

确定了隶属度矩阵  $R$  和权重集  $w$  后,可计算可得到模糊综合评价模型,如式(10)所示,其中  $B$  为模糊综合评价计算量化结果向量。

$$B = w^{\circ} R = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中：“ $\circ$ ”为广义模糊合成算子。

多层次模糊综合评估基于低一层指标的权重向量和模糊评判矩阵求得上一层指标的模糊评判矩阵。结合上一层指标的权重向量,可得到系统的最终评判矩阵,根据最大隶属度原则等判定方法,即可得到系统的最终评判结果。两层指标评估模型的计算过程如图1所示。根据图1两层指标的计算过程,可以得到多层指标的综合评判矩阵B计算方法如式(11)所示<sup>[10]</sup>。综合评判矩阵B不仅考虑了直升机供电系统所有的性能指标,而且保留了每一层指标的评估信息,为一行四列矩阵,从左到右每列代表优等、良好、中等、及格4个等级指标的隶属度,隶属度最大的列即为最终评判结果。

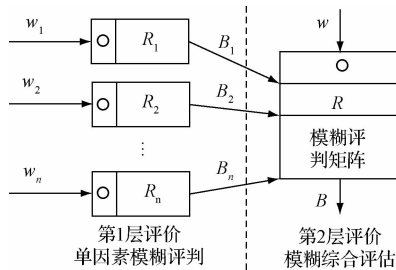


图1 两层指标评估模型

$$B = W \circ R = W \circ \begin{bmatrix} W_1 \circ \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{12} \\ \vdots \\ R_{1s} \end{bmatrix} \\ W_2 \circ \begin{bmatrix} R_{21} \\ R_{22} \\ \vdots \\ R_{2t} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ W_n \circ \begin{bmatrix} R_{n1} \\ R_{n2} \\ \vdots \\ R_{nm} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (11)$$

### 3 直升机模糊综合评估模型建立

直升机供电系统的供电质量和可靠性体现系统设计阶段模型基本能力,是设计的首要要求也是度量系统达到任务目标的标准之一。通过对供电系统供电质量和可靠性的分析,抽象出二者各自的评定指标。这些指标的选择直接影响着评估指标体系建立的合理性和评估结果的准确性。按照指标选择的全面性、可分解性、可计算性等原则以及国军标 GJB 181A—2003 的要求,设计的直升机供电系统评估指标体系如图2所示。

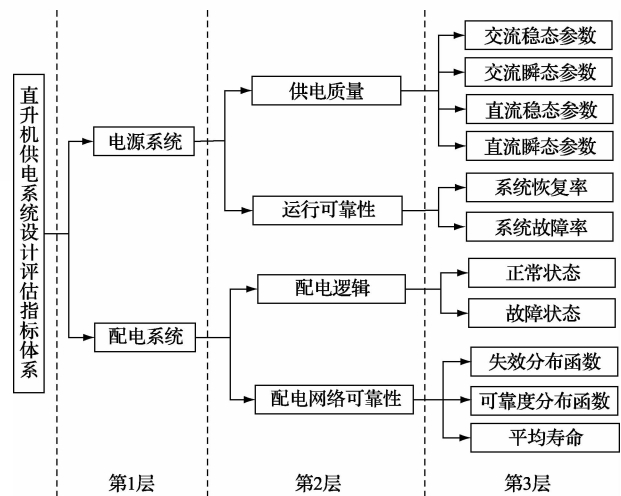


图2 供电系统评估指标体系

该体系为递阶层次结构,包含多级指标的影响因素。其中电源系统部分,需要对供电质量指标和运行可靠性指标进行评估。供电质量是考察供电系统基本能力的一项重要指标,运行可靠性是衡量电源系统正常工作故障概率的指标,包括系统恢复率和系统故障率两部分。配电系统部分承担着运输和分配电能的重要任务。首先需要考察在供电系统正常状态和故障状态的配电逻辑是否正确,这也是系统供电能力的评估指标。其次配电网可靠性指标是反映系统结构合理与否的重要量度,可从失效分布函数、可靠度分布函数和平均寿命3个方面进行评估。

考虑到直升机供电系统中各级状态指标对结果的影响具有模糊性和不确定性,本文采用四层模糊综合评估法建立供电系统综合评估模型。

#### 3.1 建立评估因子集

根据图2所示,直升机供电系统的评估指标集可分为A层目标层,B层准则层,C层指标层及D层具体表现层,如表2所示。

#### 3.2 建立评估目标集

根据国军标 GJB 181A—2003 中对直升机供电系统性能要求以及其功能和目标需求分析,传统的“五级评定法”将直升机电源的系统设计的性能质量分成优等、良好、中等、及格、不及格五等。本论文所涉及直升机的所有性能、精度、稳定性等参数指标均无不及格,故确定评估目标集为:V={优等、良好、中等、及格}。

#### 3.3 确定权重及模糊判断矩阵

以B层中指标元素权重的确定方法为例进行分析,B层共包含4个指标元素,对每个元素进行层次分析法的比较,即相对于与A中元素有关联的元素,B层中元素两两相比较得到重要程度的量度。由表2的数量标度方法,由3组专家根据经验分析给出不同的模糊判断矩阵 $D^{(1)}, D^{(2)}, D^{(3)}$ 。

表 2 各层指标权重及隶属度矩阵

A层/权重	B层/权重	C层/权重	D层/权重	评估等级及隶属度			
				优等	良好	中等	及格
电源系统 /0.600	供电质量 /0.785	交流稳态参数 /0.355	交流稳态电压/0.151	0.15	0.7	0.15	0
			电压不平衡/0.063	0.75	0.25	0	0
			电压调制幅度/0.051	0.15	0.45	0.3	0.1
			电压相位差/0.142	0.85	0.15	0	0
			交流畸变系数/0.087	0.15	0.65	0.15	0.05
			交流畸变频谱/0.090	0.85	0.1	0.05	0
			波峰系数/0.072	0.85	0.15	0	0
			直流分量/0.123	0.8	0.1	0.1	0
			稳态频率/0.128	0.75	0.25	0	0
			频率调制幅度/0.093	0.9	0.1	0	0
		交流瞬态参数 /0.285	瞬态峰值电压/0.246	0.7	0.2	0.1	0
			交流电压瞬变/0.403	0.65	0.25	0.1	0
			频率瞬变/0.351	0.8	0.15	0.05	0
		直流稳态参数 /0.205	直流稳态电压/0.327	0.9	0.1	0	0
直流畸变系数/0.195	0.2		0.65	0.15	0		
直流畸变频谱/0.170	0.1		0.75	0.15	0		
直流瞬态参数 /0.155	脉动幅度/0.308	0.15	0.15	0.7	0		
	直流电压瞬变/1.000	0.7	0.1	0.1	0.1		
运行可靠性/0.215	系统恢复率/0.500	0.8	0.1	0.1	0		
	系统故障率/0.500	0.75	0.15	0.1	0		
配电系统 /0.400	配电逻辑/0.45	正常状态/0.450	0.95	0.05	0	0	
		故障状态/0.550	0.9	0.1	0	0	
	配电网络 可靠性/0.55	失效分布函数/0.345	0.95	0.05	0	0	
		可靠度分布函数/0.333	0.95	0.05	0	0	
		平均寿命/0.322	0.95	0.05	0	0	

$$D^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.6 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.4 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$D^{(2)} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$D^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.5 \\ 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由上述3个模糊判断矩阵,按照灰色判断矩阵的计算方法,可以得到B层指标元素的灰色判断矩阵,进一步应用式(2)可以得到矩阵A如式(12)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.535 & 0.575 & 0.6 \\ & 0.5 & 0.54 & 0.565 \\ & & 0.5 & 0.525 \\ & & & 0.5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于矩阵A为一致矩阵,因此利用式(4)计算B层指标元素的权重,当c=0.5时,B层供电质量下C层权重分别为:0.355、0.285、0.205及0.155。根据上述方法可进一步计算其他层指标的权重,如表2所示。

### 3.4 评价结果

根据表2数据,根据式(10)计算得到B层供电质量的模糊关系矩阵为:

$$R_{11} = (B_{111} \ B_{112} \ B_{113} \ B_{114})^T = \begin{bmatrix} 0.627 & 0.296 & 0.068 & 0.009 \\ 0.715 & 0.203 & 0.082 & 0 \\ 0.397 & 0.333 & 0.270 & 0 \\ 0.700 & 0.100 & 0.100 & 0.100 \end{bmatrix}$$

同理,根据式(11)可得B层及A层指标的模糊判断矩阵如下:

$$R_1 = (B_{11} \ B_{12})^T = \begin{bmatrix} 0.616 & 0.246 & 0.118 & 0.019 \\ 0.775 & 0.125 & 0.100 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = (B_{21} \ B_{22})^T = \begin{bmatrix} 0.923 & 0.078 & 0 & 0 \\ 0.950 & 0.050 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R = (B_1 \ B_2)^T = \begin{bmatrix} 0.650 & 0.220 & 0.115 & 0.015 \\ 0.938 & 0.062 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R = (B_1 \ B_2)^T = \begin{bmatrix} 0.650 & 0.220 & 0.115 & 0.015 \\ 0.938 & 0.062 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

因此,计算可得最终的模糊综合评估模型的计算结果为:

$$B = W^{\circ}R =$$

$$(0.6 \ 0.4) \begin{bmatrix} 0.650 & 0.220 & 0.115 & 0.015 \\ 0.938 & 0.062 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$(0.765 \ 0.157 \ 0.069 \ 0.009)$$

根据本论文的评估等级为  $V = \{\text{优等、良好、中等、及格}\}$  及最大隶属度原则可知,该模型供电系统的设计性能综合评估结果为“优等”。该评结果符合实际的调查结果相一致,这表明该模糊综合评估模型能够给出其定性定量的评估结果,较为客观地反映出直升机供电系统设计性能,具有有效性和实用性。

#### 4 结 论

根据直升机供电系统的研制特点,建立了设计阶段的供电系统评估指标体系,并对该体系的递阶层次结构进行了分析及论述。

结合现今系统评估的研究现状以及指标系统的特征,基于层次分析法,采用模糊综合评估方法对系统进行性能综合评估,着重对模糊评估模型的建立进行了详细分析,评估结果表明了此模型的有效性和准确性。

专家经验具有较强主观性,对于因素指标权重的确定时综合多专家意见,可既考虑专家主观因素又在一定程度上避免主观盲目性。

该性能评估模型对于供电系统的供电质量和可靠性方面做出了详细的分析,以现今直升机多种类、高精度的发展趋势来看,如何建立具有通用性的机载供电系统模型是后续工作的重点,也是难点。

#### 参 考 文 献

[1] 梁旭,朴成日,全应栓. 基于贝叶斯融合的机载电源

系统拍评估方法[J]. 国外电子测量技术,2014,33(10):29-32.

- [2] 蔡瑾曜,刘杰,黄珂. 船载测控系统可靠性综合评估方法研究[J]. 电子测量技术,2014,37(7):111-114.
- [3] 代京,刘浩,于劲松. 飞行器健康管理系统的验证与评估技术研究[J]. 电子测量技术,2012,33(8):1-10.
- [4] 姚华飞,赵光磊. 基于灰色 AHP 的防空预警探测系统效能评估[J]. 国外电子测量技术,2013,32(5):44-48.
- [5] 王有元,周婧婧,陈伟根,等. 基于模糊决策的电力变压器风险评估方法[J]. 仪器仪表学报,2009,30(8):1662-1667.
- [6] 付永强. 在役公路桥梁的模糊综合评估与寿命预测[D]. 合肥:合肥工业大学,2009:13-57.
- [7] 叶笠,王厚军,田书林,等. 基于二级模糊综合评判的容差模拟电路故障诊断[J]. 电子测量技术,2010,33(2):132-136.
- [8] 李鸣慎,杨帆,杨秀,等. 基于层次分析与模糊评判的电动汽车充电站能效评估[J]. 电测与仪表,2013,50(573):69-73.
- [9] 邓雪,李家铭,曾号健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认知,2012,42(7):93-100.
- [10] 董必贵,刘收,梁旭. 先进无人机电源系统设计评估方法研究[J]. 计算机测量与控制,2015,23(4):1242-1245.

#### 作 者 简 介

钟群芳,1990年出生,工程硕士。主要研究方向为电机与电器。

E-mail:zhongqf\_buaa@163.com