

模糊综合评判在优化电机冷却系统中的应用

赵 辉¹, 吕 青¹, 丁树业²

(1. 哈尔滨理工大学 应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了在电机冷却系统中找出最适宜的自力性风扇长度, 以一台 Y2-250M-4 55kW 笼型异步电机为例, 权衡系统内各因素对电机实际功效的影响, 运用模糊数学的综合评判方法, 对其内在因素指标进行综合评价. 在专家打分评估的基础上, 应用定性与定量的综合决策方法, 结合变异系数法分配权重, 进行全面分析, 得出电机冷却系统中的模糊综合评价模型, 确定最佳方案以完成对内风扇的优化设计.

关键词: 异步电机; 自力性风扇; 模糊综合评判; 冷却系统; 优化设计

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.06.020

中图分类号: O29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2016)06-0106-05

The Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation in Optimization of Motor Cooling System

ZHAO Hui¹, LÜ Qing¹, DING Shu-ye²

(1. School of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to find out the most suitable length of independent fan for the motor cooling system, a Y2-250M-4 55KW asynchronous motor was taken as an example. This paper will measure the effect of various factors on the actual effect of the motor, and use fuzzy comprehensive evaluation method. Based on the evaluation of expert scoring, the comprehensive evaluation model of fuzzy comprehensive evaluation model is obtained by using qualitative and quantitative method and combined with the weight distribution coefficient of variation method to comprehensively analysis. The objective is to determine the best solution to complete the optimization design of the inner fan.

Keywords: asynchronous motor; independent fan; fuzzy comprehensive evaluation; cooling systems; optimal design

0 引 言

由于电机运行时, 内部存在多种损耗, 如电流在

导体内产生的绕组损耗、铁心中磁场交变引起的铁心损耗、通风和机械摩擦引起的机械损耗等, 这些损耗都转变为热量, 向周围介质传播, 为了防止绝缘系统的高温 and 电机毁坏, 电机冷却系统的风扇设计显

收稿日期: 2015-09-09

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(A201214).

作者简介: 赵 辉(1963—), 男, 教授, 硕士研究生导师;

吕 青(1990—), 女, 硕士研究生, E-mail: qq07077@126.com;

丁树业(1978—), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师.

得尤为重要^[1]。近年来电机效率已经提高,冷却风扇的功率已占电机的总损耗很大的百分比。在某些情况下,风扇可能消耗电机输入功率的百分之二,这相当于损耗的百分之二十^[2]。设计电机风扇时的目标是使冷却风扇的功率减到最小又使电机效率较高。在此,将改良了的风扇结构根据其原理命名为自力性风扇,即通过其本身的旋转扰动转子端部气腔内的空气,使其对定子端部绕组起到冷却效果。

根据现有研究表明,自力性风扇不仅影响着转子风摩损耗,同时对降低定子端部绕组温升也起到很大的作用,为得出自力性风扇的优化方案,需要同时考虑风扇的损耗与定子端部绕组温升两方面问题,以保证转子风摩损耗在较低水平的同时又使定子端部绕组温升不会过高。

考虑到传统的数值分析不能将不同量纲的物理量放在一起计算,相关因素对整体结构的影响也不相同,本文以一台笼型异步感应电动机为研究对象,将运用模糊数学的综合评判方法,对其内在因素指标进行综合评价,再进一步考虑到单一赋权对赋权结果的影响^[3],于是在专家打分评估的基础上,应用定性与定量的综合决策方法,结合变异系数法分配权重,进行全面分析,得出电机冷却系统中的模糊综合评价模型,确定最佳方案以完成对风扇的优化设计,使得自力性风扇的设计更具有客观性、可靠性、符合良好工艺性的要求^[4]。

1 模糊综合评判法

模糊综合评判的基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评价事物相关的各个因素,将各项指标统一量化,并根据不同指标对评判对象的影响程度来分配权重,从而对各评判对象作出合理的综合评价^[5]。

具体步骤如下:

综合评判有3要素:

1) 因素集: $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 设与被评判对象相关的因素有 m 个;

2) 评语集: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 设所有可能出现的评语有 n 个;

3) 单因素判断, 即对单个 $u_i (i = 1, \dots, m)$ 的评判, 得到 V 上的 F 集 $(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$, 所以它是从 U 到 V 的一个 F 映射

$$f: U \rightarrow F(V) \\ u_i \rightarrow (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$$

定理1 任给 $R \in F(U \times V)$, 都唯一确定了一个从 U 到 V 的 F 映射, 记作

$$f_R: U \rightarrow F(V)$$

对任意 $u \in U$, 都有

$$f_R(u) = R|_u$$

反之, 任给从 U 到 V 的 F 映射 $f: U \rightarrow F(V)$, 都唯一确定了一个 F 关系, 记作

$$R_f \in F(U \times V)$$

使对任意 $u \in U$, 都有

$$R_f|_u = f(u),$$

F 映射 f 可以确定一个 F 关系 $R \in \mu_{m \times n}$, 称为评判矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

它是由所有对单因素评判的 F 集组成的。

由于各因素地位未必相等, 所以需对各因素加权。用 U 上的 F 集 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 表示各因素的权数分配, 它与评判矩阵 R 的合成, 得出综合评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3\}$, 则

$$A \circ R = B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$

其中,

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$$

$$R = (r_{ij})_{m \times n}, r_{ij} \in [0, 1]$$

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij}), j = 1, \dots, n$$

它是对各因素的综合评判, 最后根据最大隶属度原则, 选择综合评价集 B 中最大的 b_j 所对应的等级(评语) v_j 作为综合评判的结果。于是, 得到综合评判模型 I (或记为模型 $M(\wedge, \vee)$)^[6]。

2 冷却系统模糊综合评判模型的建立

2.1 模糊评判集的选取

本文以一台 Y2-250M-4、55 kW 笼型异步电机为例, 在对电机结构进行假设及合理简化的基础上, 建立了比较完整的全封闭自扇冷结构电机的三维半域稳态温度场物理模型, 并基于该模型采用有限体积元方法对电机额定负载稳态运行时的温度场进行了仿真研究, 就3个物理量, 分别是自力性风扇长度、定子端部绕组温升、转子风摩损耗, 得出了相应10组数据, 以此作为评判对象即评判集(见表1), 由此则对冷却系统运行呈现的整体状态具有可比

性^[7-12].

表1 评判对象

评判对象	自力性风扇 长度/mm	定子端部绕组 温升/K	转子风摩损耗 /W
第1组	0	110.10	17.86
第2组	5	95.55	27.27
第3组	10	91.17	38.38
第4组	15	88.67	49.04
第5组	17	88.35	54.03
第6组	20	87.26	61.40
第7组	22	86.97	66.08
第8组	25	86.38	73.90
第9组	27	85.70	78.74
第10组	30	85.84	86.40

2.2 因素集和评语集的建立

因素集:

$$U = \{u_1, u_2, u_3\} = \{\text{长度, 温升, 损耗}\}$$

评语集:

$$V = \{v_1, v_2, v_3\} = \{\text{最优先, 次优先, 不优先}\}$$

2.3 确定因素集模糊综合评判矩阵

由于自力性风扇是作为一个全新的概念被提出的,因此在这个新结构领域下可以借用的现有研究成果和相关专家学者少之又少,但是从另一方面看,该领域的专家对所调查的问题研究的也最为透彻、最熟悉,因此我们选择专家经验法给出相应评判矩阵^[13-14].

专家经验法是根据专家的实际经验给出模糊信息的处理算式或相应权重系数值来确定隶属函数的一种方法.在许多情况下,经常是初步确定粗略的隶属函数,然后再通过“学习”和实践检验逐步修改和完善,而实际效果正是检验和调整隶属函数的依据.

本次试验对应的 F 集由 5 位专家对评判因素进行评价得出.

现给出专家对第一组数据的评价情况(见表2):

表2 专家对第一组数据的评价情况

评价因素	评价指标		
	最优先	次优先	不优先
风扇长度	0	0	5
端部温升	0	0	5
风摩损耗	0	0	5

由表2知,风扇长度为 0 mm 时属于最优先的隶

属度为 $\frac{0}{5} = 0$. 同理可算出风扇长度隶属其他评价

指标的隶属度.端部温升和风摩损耗中的各项指标的隶属度也由上述方法得到.

从而得到了 10 组风扇长度不同的状态下相应的模糊评判矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix} R_4 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{bmatrix} R_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0.6 & 0.4 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$R_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{bmatrix} R_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$$

$$R_9 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0 & 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} R_{10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 因素权重的选取

权重是综合评判中的一个重要的指标体系,合理地分配权重是量化评估的关键.因此,权重的构成是否合理,直接影响到评估的科学性.确定权重的方法有很多,如专家咨询法、德尔菲法^[15]、专家排序法、层次分析法^[16]、秩和比法、变异系数法、主成分分析法和因子分析法等,考虑到在进行单因素评判时候已经采取了主观的专家经验法,为提高模型准确性、减小误差,我们在此选择客观赋权法中的变异系数法^[17].

变异系数法是直接利用各项指标所包含的信息,通过计算得到指标的权重.由于评价指标体系中的各项指标的量纲不同,不宜直接比较其差别程度.为了消除各项评价指标的量纲不同的影响,需要用各项指标的变异系数来衡量各项指标取值的差异程度^[18].各项指标的变异系数公式如下:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中: V_i 是第 i 项指标的变异系数,也称为标准差系数; σ_i 是第 i 项指标的标准差; $\bar{x}_i$ 是第 i 项指标的平均数.

各项指标的权重为:

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

表3 各因素变异系数及权重

指标	自力性风扇 长度 x_1	定子端部绕 组温升 x_2	转子风摩 损耗 x_3
平均值 $\bar{x}_i$	17.1	90.599	55.31
标准差 σ_i	9.734 8	7.409 1	22.436 4
变异系数 V_i	0.569 3	0.081 8	0.405 7
权重 A	0.538 7	0.077 4	0.383 9

计算过程如下:

1) 先根据各个指标的数据,分别计算每个指标的平均值和标准差;

2) 根据均值和标准差计算变异系数^[9];

3) 将各项指标的变异系数相加,计算构成评价指标体系的这3个指标的权重^[9]。

在 Matlab 中计算得出数据(见表3),由以上得出,权重集

$$A = (a_1, a_2, a_3) = (0.538\ 7, 0.077\ 4, 0.383\ 9)$$

2.6 得出综合评判结果

对10组数据进行评判,分别得:

$$B_1 = A \circ R_1 = (0, 0, 1)$$

$$B_2 = A \circ R_2 = (0, 0.015\ 5, 0.984\ 5)$$

$$B_3 = A \circ R_3 = (0.615\ 5, 0.307\ 7, 0.076\ 8)$$

$$B_4 = A \circ R_4 = (0.523\ 2, 0.400\ 0, 0.076\ 8)$$

$$B_5 = A \circ R_5 = (0.231\ 0, 0.507\ 7, 0.261\ 3)$$

$$B_6 = A \circ R_6 = (0.123\ 2, 0.507\ 7, 0.369\ 1)$$

$$B_7 = A \circ R_7 = (0.123\ 2, 0.292\ 3, 0.584\ 5)$$

$$B_8 = A \circ R_8 = (0.031\ 0, 0.184\ 5, 0.784\ 5)$$

$$B_9 = A \circ R_9 = (0.015\ 5, 0.092\ 2, 0.892\ 3)$$

$$B_{10} = A \circ R_{10} = (0, 0, 1)$$

按照最大隶属度原则,对第1组数据得出的评价是“不优先”;第2组得出的评价是“不优先”;第3组得出的评价是“最优先”;第4组得出的评价是“最优先”;第5组得出的评价是“次优先”;第6组得出的评价是“次优先”;第7组得出的评价是“不优先”;第8组得出的评价是“不优先”;第9组得出的评价是“不优先”;第10组得出的评价是“不优先”。

综合以上得出两个最优先的方案,即第3组和第4组值所对应的长度数据。这两个值被视作自力性风扇优化方案中的两个可选值,即10 mm和15 mm,可见方案已极大地缩小了数据范围。进而可根据工程实际要求,按照赋权调和的方法得出区间中

的最优解,经过计算为12.297 5 mm。这一结论需要在工程中加以权衡考量,进而合理地将理论成果转化为实际生产的依据^[2]。现已在建立的模型中取自力性风扇长度为12 mm进行了仿真实验,结果理想,符合生产要求和技术标准。

3 结 论

本文将模糊综合评判法引入电机冷却系统的优化问题,解决了单一从数理计算的方面无法达到数值选取要求的弊端,系统中涉及的各个量标准不一、量纲不同,为得到更合理的评判结果引入了一些类似于组合赋权的方法来优化整个模型,同时为达到客观性和实用性的要求,也做了一些细节的改善。

1) 对评价集的选取进行了创新,将系统内3个数据指标看做单独的评价对象进行评判,一方面缩小了评价范围的宽度,另一方面提高了测评结果的精度。

2) 引入了模糊统计法,将模糊概念明确化,可以清晰、直观地表示出隶属程度的客观规律,进一步提高了各级指标权重的准确性和客观性。

3) 运用 Matlab 和 Excel2013 编制模糊综合评判计算表,不仅提高了数据的通用性,还减轻了评判计算的工作量。为各类模糊综合评判决策提供了一种较为高效快捷的计算方案,具有较好的普适性。

本研究中建立的评判模型不仅可以用于电机冷却系统的优化问题,同时还可以用于具有相似特性的其他工科科研模型的优化问题,可以从不同的角度给出最优化的数据。

参 考 文 献:

- [1] 江英. 自扇冷式电机冷却系统的数值模拟分析及风扇设计[J]. 机械设计与研究, 2014(1): 115-119.
- [2] 徐九芳. 工业电动机冷却风扇的优化设计[J]. 中小型电机, 1987(3): 59-60.
- [3] 李连结, 姚建刚, 龙立波, 院晓涛, 李会杰. 组合赋权法在电能质量模糊综合评价中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007(4): 56-60.
- [4] 何思源. 全封闭永磁同步牵引电动机冷却系统设计[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 48-53.
- [5] 陈水利, 李敬功, 王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 187-223.
- [6] 杨纶标, 高英仪, 凌卫新. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [7] GARCÍA J, PAZOS J, RÍOS J, et al. Methodology of Linguistics Evaluation in Risk Situations Using Fuzzy Techniques[J]. Fuzzy

- Sets & Systems, 1992, 48(2): 185 - 194.
- [8] 温嘉斌,唐跃,何金泽,等. 高压异步电机外风扇流场数值计算及优化 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(9): 79 - 86.
- [9] 丁树业,关天宇,崔广慧. 船舶驱动用异步电机三维温度场研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(5): 1 - 7.
- [10] 刘端增,丁树业. 发电机内部流体流动与定子热性能数值分析 [J]. 防爆电机, 2010(3): 12 - 16.
- [11] 温嘉斌,鄢鸿羽. 定子通风槽钢对通风沟内流体流动形态的影响 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(11): 58 - 62, 68.
- [12] 宋厚彬. 基于多场耦合计算的水轮发电机冷却通风特性分析与优化 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [13] 赵辉. 季度经济分析的模糊数学方法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009, 14(6): 88 - 91, 95.
- [14] 赵辉,李倩. 模糊数学方法在粮食产量评价中的应用 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(4): 79 - 83.
- [15] BUCKLEY J J, HAYASHI Y, CZOGA OOA E. On the Equivalence of Neural Nets and Fuzzy Expert Systems [J]. Fuzzy Sets & Systems, 1993, 53(93): 129 - 134.
- [16] ZHAO Zhenyu, ZHANG Wei. Research on the National Student Loan Credit Risk Assessment Based on Fuzzy Delphi Method. Proceedings of 2011 International Conference on Management Science and Intelligent Control (ICMSIC 2011) [C] // 2012 (2): 5.
- [17] TIAN Jinsong, TIAN Jinjie, GUO Jiachun. Evaluation of Comprehensive Benefits of Land Consolidation Based on AHP and FUZZY [J]. Asian Agricultural Research, 2013(1): 17 - 20 + 26.
- [18] XIONG J J, JING G X. A New Approach to Determining the Severity Fuzzy Comprehensive Assessment Weight Based on the Rough Set Hierarchical Analysis Process [J]. Journal of Safety & Environment, 2011, 11(6): 241 - 244.
- [19] 范存祥,刘新阳. 区域水资源开发状况综合评价权重系数确定方法研究 [J]. 大科技, 2011: 360 - 362.
- [20] ONDOOEJ Pavlaooka. On Various Approaches to Normalization of Interval and Fuzzy Weights [J]. Fuzzy Sets & systems, 2014, 243: 110 - 130.
- [21] HOU Jingwei. Spatial Assessment for Groundwater Quality Based on GIS and Improved Fuzzy Comprehensive Assessment with Entropy Weights [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2013(2): 135 - 141.

(编辑: 温泽宇)

(上接第 105 页)

- [6] 谭峻,孙建恩. 半钢子午线轮胎胎面挤出联动生产线 [J]. 轮胎工业, 2008(4): 236 - 240.
- [7] 杨浩明,苏念英,孙保燕. 国际橡胶轮胎行业技术发展趋势分析 [J]. 装备制造技术, 2013(6): 243 - 245.
- [8] 张还,李浩. 基于 CC - Link 现场总线的胎面挤出联动生产线控制系统 [J]. 橡胶工业, 2010(6): 359 - 363.
- [9] 杜欣闯,王志杰,王玉东. 胎面复合挤出联动生产线的改进 [J]. 中国橡胶, 2009(17): 39 - 41.
- [10] 江永富,廖晓梅. 轮胎胎面拾取的实现 [J]. 现代橡胶技术, 2008, 34: 38.
- [11] 潘继生,李扬,黎勉,等. 一种新型真空吸附装置的研究 [J]. 机电工程技术, 2012(7): 57 - 59.
- [12] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 2 - 3.
- [13] 刘银虎,缪炳祺. 多体动力学仿真软件 ADAMS 理论基础及其功能分析 [J]. 电子与封装, 2005(4): 25 - 28, 34.
- [14] 郭卫东. 虚拟样机技术与 ADAMS 应用实例教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [15] 赵玉成,贾树恒,顿文涛,等. 基于 ADAMS 的虚拟样机技术的发展与应用 [J]. 农业网络信息, 2013(8): 40 - 42, 72.
- [16] 杨萍. 如何分析物体的受力 [J]. 中国教育技术装备, 2011(19): 105.
- [17] 芮执元,魏兴春,冯瑞成. 基于 ADAMS 的虚拟样机技术及其在机构设计中的应用 [J]. 科学技术与工程, 2006(19): 3111 - 3114.
- [18] 郝云堂,金烨,季辉. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 中的实践 [J]. 机械设计与制造, 2003(3): 16 - 18.
- [19] 原永亮,杨臻,王圣辉. 基于 Adams 翻转机构的优化设计 [J]. 包装工程, 2014(11): 71 - 75.
- [20] 郭卫东,黄斌,沙佳杰,等. 翻转机构驱动力的优化及 Adams 仿真验证 [J]. 计算机辅助工程, 2013(S1): 298 - 302.
- [21] 李振伟. 20 kg 铝锭翻转机构虚拟仿真及动力学分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013: 25 - 27.

(编辑: 王 萍)