

基于可靠性模型及数据融合的 冷却风扇健康管理算法

文小琴, 刘琴琴, 游林儒, 毕淑娥

(华南理工大学 电信学院, 广州 510641)

摘要: 针对目前工业领域对冷却风扇的故障预测与健康管理的需要, 提出了基于可靠性模型及信息融合的冷却风扇健康管理算法; 文中对风扇的主要性能参数进行辨识, 包括转速、电流、上升时间、下降时间、温度以及湿度, 结合风扇故障模型, 将冷却风扇健康管理算法分为环境、机械及电子 3 个模块; 利用可靠性模型及信息融合, 对风扇状态进行评估以及预测, 进而对风扇的剩余寿命及故障进行预测。

关键词: 故障预测; 可靠性模型; 数据融合; 剩余寿命

Health Monitoring Algorithm of Cooling Fans Based on Reliability Model and Data Fusion

Wen Xiaojin, Liu Qinqin, You Linru, Bi Shue

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the requirements of cooling fans' Failure prediction and health monitoring in the field of industry currently, a new health monitoring algorithm based on reliability model and data fusion is proposed. First of all, article identifies the main performance parameters of fans, including speed, current, rising time, falling time, temperature and humidity. Then combining with cooling fans' fault model, cooling fans' health management algorithms are divided into three parts, including environment module, mechanical module and electronic module. Finally evaluation and prediction of fan status are made through utilizing the combining of reliability model and data fusion, and then we make a prediction to the residual life and failure of cooling fans.

Keywords: failure prediction; reliability model; data fusion; residual life

0 引言

风扇是通信设备冷却系统的重要部件之一, 在工业领域中, 冷却风扇的故障预测与健康管理的需要是非常迫切的。目前的研究热点主要是建立故障预测模型、设计故障预测算法、实现故障预测与健康管理系统等^[1]。

目前风扇健康管理系统建模方法主要有 3 大类: 基于数据的方法、基于模型的方法和基于知识的方法^[2]。苗强和 Michael Azarian 提出了通过小波变换和 Hilbert 变换实现的基于振动的风扇轴承故障检测^[3]; 唐超和苗强在此基础上做了进一步改进^[4]; 谢磊提出了一种利用连续小波变换和 ACFIS 进行基于振动的风扇轴承寿命预测以及健康状态估计^[5]; 马氏距离也被广泛应用于风扇寿命预测^[6]。

本文对风扇的主要性能参数进行辨识, 结合风扇故障模型, 对风扇状态进行评估以及预测, 进而对风扇的剩余寿命及故障进行预测。并且文中提出了一种基于可靠性模型及数据融合相结合的故障预测方法。通常, 基于统计可靠性的故障预测方法适用于从过去故障历史数据的统计特性角度进行故障预测。典型的基于统计可靠性的故障概率曲线就是著名的“浴盆曲线”。另外, Weibull 模型被大量用于系统或设备的剩余寿命

预测, 而数据融合的最终目的是通过数据融合最大限度地从不同数据中提取有用信息, 从而得到关于电子设备健康状态的全面诊断和预测, 最终做出最优决策。

1 冷却风扇健康管理算法

1.1 故障模式及失效机理分析

根据现有大量参考文献分析, 故障可以大致分为渐变故障类(轴承磨损、转子偏心等), 突变故障类(控制板部分元件失效、位置传感器失效等), 假性故障(电机温度升高电阻变化或工作环境对应的负载变化)^[7]。除了部分电子元件的完全失效不具备先验性和外部特征外, 绝大部分风扇工作寿命减少是伴随有早期故障预兆的。因此风扇停转前报警及剩余寿命预测主要针对于有外部表现的故障。

针对上述原因, 只能针对风扇外部的可测量因子进行分析, 采用基于时间应力分析的方法进行风扇寿命预测分析。几种典型的时间应力包括温度应力、湿度应力、电应力、腐蚀等。

1.2 风扇健康管理系统模块

根据对风扇工作原理、风扇故障模式和失效机理的分析, 实际系统设计中可检测到的测量因子为: 母线电流、给定转速、回馈转速、温度、湿度、上升时间和下降时间。

风扇寿命预测系统如图 1 所示, 参数测量部分由一片数字信号处理器组成。参数测量后分成 3 个分析模块, 即: 环境因素分析模块、机械因素分析模块及电子因素分析模块, 这 3 个

收稿日期: 2013-12-19; 修回日期: 2014-03-02。

作者简介: 文小琴(1977-), 女, 山西闻喜人, 讲师, 主要从事信号处理、电力电子技术应用方向的研究。

模块分别对 3 部分内容进行分析, 输出结果送给数据融合决策中心进行分析决策, 最终输出运行风扇的寿命预测。

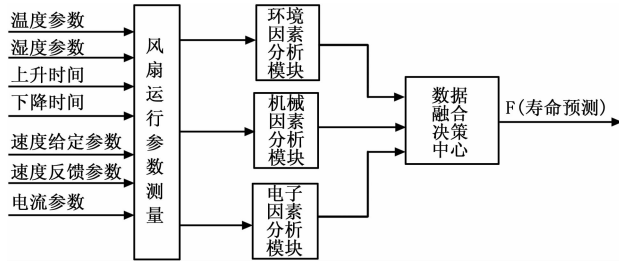


图 1 风扇寿命预测系统框图

1.2.1 环境因素分析模块

风扇长期工作在高温或低温, 潮湿或极其干燥的环境下, 都会影响其使用寿命^[8]。本模块根据风扇当前的温度和湿度, 对风扇的剩余寿命进行预测。

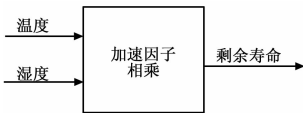


图 2 基于环境因素对剩余寿命的预估

实际计算中, 分段建立温度、湿度对寿命影响的应力比函数, 根据前面温度、湿度、电应力对系统的影响, 在不同的温度、湿度范围, 建立温度、湿度与应力比的对应关系。由温度、湿度分别得到系统工作时的应力比, 各系数相乘综合基于环境的工作应力比, 进而结合风扇寿命可预测到风扇的剩余寿命, 作为基于环境估计得到的风扇剩余寿命。

1.2.2 电子因素分析模块

风扇速度控制方式有开环控制和闭环控制两种, 开环控制方式下, 对于某一给定 pwm , 当风扇所受阻力变大时, 其转速变小, 同时电流增大; 闭环控制方式下, 对于某一给定的 pwm , 当风扇运行过程中受阻力时, 风扇控制器调节电机绕组的电压 pwm , 使转速保持不变。

1) 速度开环控制风扇:

参照时间老化函数, 定义速度跟随特性下的风扇寿命函数:

$$F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{(n_0 - n)}{n_0}\right)^{\frac{\beta}{\alpha_n}}\right] \quad (1)$$

α_n 描述了风扇的失效率随速度偏差分布的尺度, n_0 为外部给定 pwm 对应下的新风扇出厂转速, n 为风扇在实际运行过程中检测得到的转速。 α_n 越大, 同型号新/旧风扇在相同给定 pwm 下的转速差对风扇寿命衰减的影响越小。

而风扇的寿命与运行时间之间的关系为: $F(t) = 1 - \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta]$, 按 IPC-9591^[9] 标准, β 取为 3, 在 L_{10} ^[10] (风扇的寿命标准一般采用 L_{10} 标准, 即: 在常温下常速下, 风扇连续工作, 直至不超过 10% 的风扇失效时的工作时间, 即为风扇寿命) 标准下的风扇寿命可由下式得出:

$$1 - \exp\left(-\frac{L_{10}}{\alpha}\right)^3 = 0.1 \quad (2)$$

其中: L_{10} 为风扇规格说明书中对应的 L_{10} 标准下的风扇寿

命 (h)。

转速落差率 $\left(\frac{(n_0 - n)}{n_0}\right)$ 对寿命的影响假定符合 Weibull

失效分布, 即测量中的微小转速波动对寿命影响不大。而在所定义的失效条件下, 转速落差率对应的剩余寿命的计算值为零。

则有剩余寿命:

$$L_{10} - \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{(n_0 - n)}{n_0}\right)^{\frac{\beta}{\alpha_p}}\right]\right]^3 \times \left(\frac{\alpha}{\alpha_n}\right) \quad (3)$$

2) 速度闭环控制的风扇:

闭环控制的风扇, 无论负载增大或减小, 其给定的外部 pwm 与风扇转速之间为严格的线性关系 $n = k \cdot pwm$ (k 为常数)。由于厂家的参考手册中一般未给出风扇母线电流与转速之间的对应关系, 因此, 对新风扇需建立 $n \leftrightarrow I_{RMS}$ 之间的函数关系 (I_{RMS} 表示一个电流周期下的电流均方值), 如图 3 所示。风扇在稳定运行时, 在不同的 pwm 给定 (或速度给定) 下, 转速与电流之间的函数关系为:

$$I_{RMS} = g(n) = c \cdot n^2 + f \cdot n \quad (4)$$

采用外部 $pwm=50\%$ 时, 人为增/减风扇的外部负载, 得到一组 (I_{RMS}, n) 数据, 采用最小二乘法可辨识得到 c 和 f 。

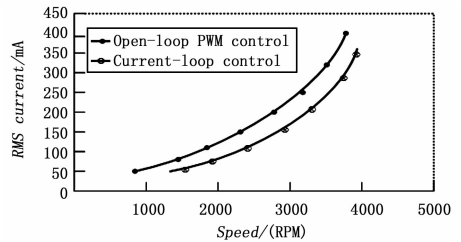


图 3 单相无刷直流风扇转速-电流关系

在运行过程中, 通过检测风扇实际运行速度 n' , 由式

(4) 计算 $I_{RMS}' = g(n')$, 由 IPC-9591 标准, 判断 $\frac{I_{RMS}'}{I_{RMS}} < 1.15$ 是否成立来决定风扇是否失效。

参照时间老化函数, 定义速度跟随特性下的闭环风扇寿命函数:

$$F(I) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{I_{RMS} - I_{RMS0}}{I_{RMS0}}\right)^{\frac{\beta}{\alpha_I}}\right] \quad (5)$$

其中: β 取为 3, α_I 描述了风扇的失效率随电流偏差分布的尺度; I_{RMS0} 为新风扇出厂时外部给定转速对应下的的电流有效值; I_{RMS} 为风扇在实际运行过程中检测到的电流。 α_I 越大, 同型号新旧风扇在相同给定 pwm 下的电流之差对风扇寿命衰减的影响越小。当风扇的实际电流为只有出厂时转速对应电流的 1.15 倍时, 认定风扇属于 L_{10} 标准下的失效, 则由式 (5) 可计算得出 α_I 。

电流超调率 $\left(\frac{I_{RMS} - I_{RMS0}}{I_{RMS0}}\right)$ 对寿命的影响假定也符合 Weibull 失效分布, 即测量中的微小电流波动对寿命影响不大。而在所定义的失效条件下, 电流超调率对应的剩余寿命的计算值为零。同样按照式 (2) 则可计算出 α 。则剩余寿命计算

公式：

$$t_{residualLife} = L_{10} - \left[1 - \exp \left(\left(\frac{I_{RMS} - I_{RMS0}}{I_{RMS0}} \right)^{\alpha_P} \right) \right] \times \left(\frac{\alpha}{\alpha_1} \right) \quad (6)$$

1.2.3 机械因素分析模块

风扇在外部给定 $pwm=30\%$ ，稳定运行时，在 t_0 时刻施加阶跃电压信号，调节使 $pwm=100\%$ ，到 t_1 时刻风扇转速稳定， $(t_1 - t_0)$ 即描述了风扇的上升调速时间，记为 t_{on} ；风扇在外部给定 $pwm=100\%$ ，稳定运行时，在 t_0 时刻施加阶跃电压信号，调节使 $pwm=30\%$ ，到 t_1 时刻风扇转速稳定， $(t_1 - t_0)$ 即描述了风扇的下降调速时间，记为 t_{off} 。通过在特定时间检测风扇的上升调速时间和下降调速时间，来判断风扇是否失效及其可能的剩余寿命。

调速响应时间主要反映的是轴承的磨损程度，由于风扇叶片旋转的风阻负载属于轻载，影响轴承最大的因素是其润滑油。通常，润滑油失效标准是取其初始态的 50%，利用单相直流无刷风扇数学模型分析上升时间、下降时间与剩余寿命关系。

1) 根据上升调速时间计算剩余寿命，对于新风扇，当外部给定 $pwm=30\%$ 从稳定时调节到 $pwm=100\%$ ，风扇转速从 ω_1 过渡到 ω_2 ，过渡时间为 Δt ，则 Δt 为新风扇对应的 $pwm=30\% \geq 100\%$ 的调速响应时间。在测得响应时间后 t ，便可得到剩余寿命：

$$t_{residualLife} = \frac{2\Delta t - t}{\Delta t} \cdot L_{10} \quad (7)$$

2) 根据下降调速时间计算剩余寿命。对于新风扇，当外部给定 $pwm=100\%$ 从稳定时调节到 $pwm=30\%$ ，风扇转速从 ω_1 过渡到 ω_2 ，过渡时间为 Δt ，则 Δt 为新风扇对应的 $pwm=100\% \geq 30\%$ 的调速响应时间。在测得响应时间后 t ，通过式 (8) 得到剩余寿命：

$$t_{residualLife} = \frac{t - 0.5 \cdot \Delta t}{0.5 \cdot \Delta t} \cdot L_{10} \quad (8)$$

上升摩擦特性/下降摩擦特性主要是检测机械部件对风扇寿命的影响。采用平均值系数来融合。

1.3 风扇剩余寿命融合

对于极限，分成两级：一为已经坏掉；二为风扇运行在极限状态，这时的融合结果应该是立即更换风扇。对于正常运行的风扇，设环境因素的寿命影响为 H ，电子部分因素为 E ，机械部分因素为 M ，决策融合结果为 F 。

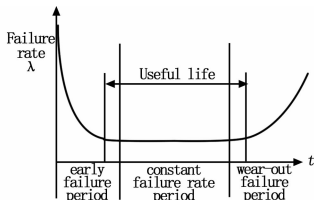


图 4 失效率“浴盆”曲线

图 4 是电子设备在运行期间的失效率的“浴盆”曲线，根据浴盆曲线，将运行时间分为早期失效期、使用寿命期和耗损失效期 3 段。结合浴盆曲线，并参考风扇的故障模式，对早中末期，机械、电子、环境影响因素进行概率赋值。

对上述 3 个模块各自得到的寿命预测值，再结合早、中、末期概率，采用 D-S 证据理论^[11]的方法进行融合预测风扇剩余寿命。数据融合步骤如图 5 所示。

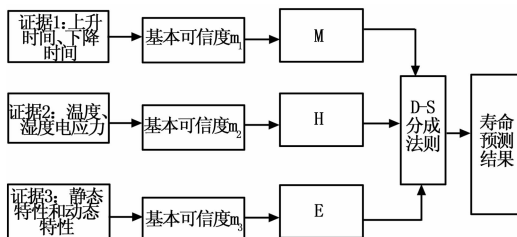


图 5 数据融合框图

2 结论

冷却风扇的故障预测与健康管理系统是通讯设备及电脑等系统的迫切需求，是新的研究热点。本文提出了一种基于可靠性模型及数据融合相结合的冷却风扇健康管理算法。这个方法充分利用了可靠性模型和数据融合两者长处，能最大程度地降低预测结果的不确定性，从而提高预测精度。

参考文献：

[1] 景博, 杨洲, 张劼, 等. 故障预测与健康管理系统验证与确认方法综述 [A]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (21): 23-27.

[2] 吕刚得, 杨占才. 故障预测与健康管理系统建模技术研究 [A]. 测控技术, 2011, 30 (1): 59-63.

[3] Miao Q, Azarian M, Pecht M. Cooling fan bearing fault identification using vibration measurement [A]. Prognostics and Health Management (PHM), 2011 IEEE Conference [C]. 2011.

[4] Tang C, Miao Q, Pecht M. Rolling element bearing fault detection: combining energy operator demodulation and wavelet packet transform [A]. Prognostics & System Health Management Conference [C]. 2011.

[5] Xie L, Miao Q, Chen Y, et al. Fan bearing fault diagnosis based on continuous wavelet transform and autocorrelation [A]. Prognostics & System Health Management Conference [C]. 2012.

[6] Azarian M H, Pecht M. Estimation of fan bearing degradation using acoustic emission analysis and mahalalanobis distance [J]. Center for Advanced Life Cycle Engineering (CALCE).

[7] Hyunseok O, Azarian M H, et al. Physics of failure approach for fan PHM in electronics applications [A]. 2010 Prognostics & System Health Management Conference [C]. 2010.

[8] Tian X J. Cooling fan reliability—failure criteria, accelerated life testing, modeling and qualification [A]. Reliability and Maintainability Symposium [C]. 2006: 380-384.

[9] IPC-9591: Performance Parameters (Mechanical, Electrical, Environmental and Quality/Reliability) for Air Moving Devices [S]. 2006.

[10] Jin X H, Ma E W M, Chow T W S, et al. An investigation into fan reliability [A]. 2012 Prognostics & System Health Management Conference [C]. IEEE PHM, 2012.

[11] 稽斗, 王向军. 基于 D-S 证据理论的直流电机故障诊断研究 [J]. 电机与控制应用, 2008, 35 (2): 49-51.