异步电动机的故障模式与可靠性分析

通过分析异步电动机故障状态和失效模式，依据电动机的故障分析进行分类，找出电动机失效原因中最为显著部分。如发现绝缘出现故障，将其更换或维修，分析并统计电动机失效影响生产的根本原因，将设备故障详细分类，分为预防性维护、状态监测维护、预知性维护和事故后维护四种维护策略。最终通过减少电动机失效事件的发生，预计电动机零部件寿命，提高电动机的可靠性。

刘　强／中沙（天津）石化有限公司

刘　强／工程师

关键词／Keywords
电动机·
可靠性·
失效模式·

0　引言

总结国内外诸多电动机失效案例，据统计，电动机内部最容易发生故障的部位为绕组绝缘和轴承。下面阐述这两方面的研究情况。

（1）绕组绝缘的可靠性和寿命

很多科学家采集了运行在高温高湿环境下电动机大量的现场数据，并对这些数据进行统计和研究，结果表明这些电动机的使用寿命比正常环境下的要短很多。从现场数据中得出的失效模式分析，在施加电压的情况下，湿度大是导致电动机失效的根本原因，温度高是加速电动机失效的直接原因[1]。所以，电动机绕组绝缘下降或老化都是由于绕组发生开路或短路造成的。在环境和机械力的作用下，导致绝缘材料产生物理变化和化学变化，这就是绝缘系统故障的主要原因。

（2）轴承的可靠性和寿命

19世纪末，很多生产企业开始将电动机故障的焦点集中在轴承上，包括不同应用的设备（如电动机的滚动轴承、滑动轴承、尺寸的制定和制造工艺）都作了深入的可靠性研究。

轴承寿命的分析是需要精密的仪器和大量的采集数据反复试验获得的，这就要使用国际上一些先进的诊断设备才能预估出轴承的寿命。

1　电动机的失效模式分析

对某化工厂区现场2 000多台电动机的故障数据进行分析发现，电动机的各种故障率λ与时间的关系可以用“浴盆曲线”来表示。

电动机寿命周期大致分为三个阶段。

1）早期失效阶段。设计、制造、安装、调试和试验期间都可能发生早期故障，早期发现，可以更改设计、制造、安装和调试。

2）偶然失效阶段。电动机经过一段时间的磨合运行后，故障率逐渐稳定，如果发生大的事故和危害，就要考虑设计制造水平，这一阶段也是重点分析阶段。

3）耗损失效阶段。这一阶段电动机接近寿命晚期，电动机的各个零部件开始老化，故障率增大。尤其电动机的绝缘可以通过试验手段预计电动机的寿命[2]。

在某化工企业中，电动机的故障率接近于恒定，主要集中在电动机绝缘和轴承上，据统计在71%左右，所以这也是分析电动机故障的主要方向。

电动机指数函数的分布性质如下。

1）电动机寿命的密度函数

$$f(t)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda t} & t>0\\ 0 & t<0\end{cases} \tag{1}$$

2）电动机寿命的累积分布函数

$$F(t)=\int_0^t \lambda e^{-\lambda t}dt=\begin{cases}1-e^{-\lambda t} & t<0<\infty\\ 0 & -\infty<t<0\end{cases} \tag{2}$$

其可靠度函数计算公式为

$$R(t)=1-F(t)=\begin{cases}e^{-\lambda t} & t>0\\ 1 & t<0\end{cases} \tag{3}$$

由于电动机没有设计冗余元件，所以任何一部分出现问题都有可能导致电动机失效。根据前面的电动机故障树对系统的影响可分为三类。

1）失效故障（致命故障）。由于电气绝缘及最重要的零部件发生故障，导致电动机失效或是有可能引起人身伤害的严重事故。

2）非失效故障（一般故障）。不影响电动机停机或失效，维修时间短。

3）非关联故障。跟电动机本体没有关系的故障，但是也可能导致电动机出现隐患和失效的风险。

假定电动机各个故障相互独立，可以设个系统的可靠度为$R_I(t)$，故障率分别为$\lambda_i(i=1，2，\cdots，N)$，可靠度为

$$R_I(t)=R_1(t)R_2(t)\cdots R_N(t)=\prod_{i=1}^{N}R_i(t) \tag{4}$$

如果假设均为常数，则有

$$R(t)=\begin{cases}e^{-\lambda_1 t}e^{-\lambda_2 t}\cdots e^{-\lambda_N t} & t>0\\ 1 & t<0\end{cases}=\begin{cases}\prod_{i=1}^{N}e^{-\lambda_i t} & t>0\\ 1 & t<0\end{cases} \tag{5}$$

3　电动机绕组的可靠性预估

电动机元器件的失效率影响因素有很多，比如包括元器件本身的基本失效率、温度、电磁力、元器件制造质量、使用环境和老化等。所以电动机绕组失效率和电动机的轴承失效率由下面的公式表达出来。通过参考手册可以查询到这些调整系数和计算方法。国产元器件的相关参数可以参考GJB 299C—2006《电子电动机可靠性预计手册》[3]，国外元器件的相关参数可以参考MIL－HDBK－217F《电子设备可靠性预计》[4]，详细计算内容和参考系数参见手册内容。本论文所研究的异步电动机工作环境、类别应该选择一般地面固定，代号G_{F1}。

电动机绕组失效率预计模型为

$$\lambda_P=\lambda_b\pi_E\pi_Q\pi_K\pi_C \tag{6}$$

式中，λ_b为基本失效率，10^{-6}/h；π_E为环境系数；π_Q为质量系数；π_K为种类系数；π_C为结构系数。

查阅GJB 299C—2006《电子电动机可靠性预计手册》可知：$\pi_E=2$，$\pi_Q=1$，$\pi_K=1$，$\pi_C=1$。

绕组基本失效率模型符合指数函数为

$$\lambda_b=Ae^{\left(\frac{T_{HS}+273}{N_T}\right)^G} \tag{7}$$

式中，A为失效率水平调整参数；N_T为温度常数；G为加速常数；T_{HS}为热点温度，所涉及温度单位不作特殊说明均为摄氏度。

热点温度估算式为

$$T_{HS}=T_A+1.1\Delta T \tag{8}$$

式中，T_A为工作环境温度，预计电动机工作环境温度$T_A=20$ ℃；ΔT为平均温升，按小功率射频线圈取近似值，$\Delta T\approx5$ ℃。

则可求得$T_{HS}=25.5$ ℃。

绕组基本失效率模型参数如表1所示。

表1　绕组基本失效率模型参数

绝缘等级	额定工作温度/℃	A	N_T	G
Y	90	0.006 4	282	5
A	105	0.007 3	302	4.5
E，B	120，130	0.006 0	312	2.8
F	155	0.006 6	351	3.2

从表1中得：$A=0.006\ 6$，$N_T=351$，$G=3.2$。则可求得$\lambda_b=0.012\times10^{-6}$/h，$\lambda_P=0.024\times10^{-6}$/h。

长时间运行的电动机要定期做一些绝缘的检测试验，监控电动机的剩余寿命。

4　电动机轴承的可靠性预估

异步电动机有滚动轴承和滑动轴承两种，故障模式分析原因有很多，接触疲劳失效是很早时期由外国学者提出来的，至今也是难以解决的故障。塑性变形一般是由于高温或者安装导致，大

于70 mm直径的轴承需要80～100 ℃的热处理后安装。磨损和断裂失效原因很多，一般是由于应力变化导致。电蚀失效一般是由于漏电导致绝缘降低或裂纹。游隙变化失效是要依据电动机检修的标准，尺寸不同，游隙大小也不同。轴承寿命到期大多是由于接触器疲劳所引发的。电动机轴承失效的原因很多，一般都是机械故障，需要采集大量的数据证明轴承寿命符合威布尔分布。目前，很多企业对电动机轴承的可靠性要求很高，需要建立威布尔分布的轴承可靠性模型来进行预估寿命。

失效率密度函数为

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{9}$$

失效分布函数为

$$F(t)=\int_{\gamma}^{t}\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中，β为寿命离散指数，决定威布尔曲线的形状参数，数值越大，寿命离散型越小；η为尺度参数；γ为位置参数，表示轴承从时刻γ之后失效，γ时刻以前可靠度为100%。

轴承的老化需要长时间的累积，失效分布曲线要从γ时刻开始，相当于将曲线沿时间轴整体向左移动γ，此时，失效分布函数为

$$F(t)=\int_{\gamma}^{\frac{t-\gamma}{\eta}}\frac{1}{\beta t^{\beta-1}}\mathrm{e}^{-t^{\beta}}\mathrm{d}t=1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{11}$$

可靠度为

$$R(t)=1-F(t)=\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{12}$$

轴承寿命计算式为

$$R(L_{\mathrm{F}})=\mathrm{e}^{-\left(\frac{L_{\mathrm{F}}-L_0}{L_{10}-L_0}\right)^{\beta}} \tag{13}$$

式中，L_{F}为轴承寿命；L_0为对应时刻的最小安全寿命；L_{10}为轴承额定载荷寿命。

轴承额定载荷寿命指大部分的轴承在老化失效时达到的使用寿命，不同功能的轴承对应的轴承与其寿命不同，如表2所示。

表2 电动机轴承预期额定载荷计算寿命

电动机轴承预期额定载荷计算寿命	
电动机类型	预期额定载荷计算寿命L_{10}/h
不经常转动的电动机	200～500
短期运转，故障后不会引起大的影响	4 000～8 000
短期运转，故障后引起了比较大的影响	8 000～10 000
每日8 h连续使用机械，如间歇起动电动机、污水泵	10 000～40 000
连续不间歇运行，如生产装置中的电动机	40 000～80 000
连续不间歇运行，停用后会产生严重的后果，如发电机、生产重要的电动机	120 000～200 000

考虑异步电动机的工作特点，L_{10}应在8 000～12 000 h之间，取L_{10}=8 000 h。根据大量现场实际数据证明，一般取$L_0=0.05L_{10}$。对于轴承钢轴承，β在1.1～1.5之间，取L_{10}=1.2。L_{F}=500 h时，可计算一个轴承的可靠度为：R(500)=0.994 48。

一般电动机有非轴伸端和轴伸端两个轴承，在互不影响的情况下是乘积关系，故电动机轴承的可靠度为R_2=0.988 99。

目前，国内外对轴承失效模式分析都服从威布尔分布，计算式为

$$F_{\mathrm{B}}(t)=1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{\eta_{\mathrm{B}}}\right)^{m_{\mathrm{B}}}} \tag{14}$$

式中，$F_{\mathrm{B}}(t)$为轴承失效分布函数；η_{B}为轴承的特征寿命；m_{B}为轴承失效分布的形状参数。

对于球轴承m_{B}=10/9，η_{B}与电动机运行转速、负载和轴承质量等级有关。

近年来对滚动轴承寿命影响的研究成果，总结起来可用下式来计算滚动轴承的寿命，即

$$L_R=\left(\frac{10^6}{60n}\right)\cdot\left(\frac{C}{f_{\mathrm{P}}P}\right)^{\varepsilon}f_{\mathrm{R}}f_{\mathrm{L}}f_{\mathrm{G}}f_{\mathrm{S}}f_{\mathrm{Y}}f_{\mathrm{H}}f_{\mathrm{T}}f_{\mathrm{E}} \tag{15}$$

式中，L_R为可靠度为R时的轴承寿命，h；n为轴承的转速，r/min；C为滚动轴承额定动负荷，N；P为滚动轴承承受的当量动负荷，N；ε为寿命指数，球轴承为3，滚子轴承为10/3；f_{P}为载荷因素；f_{R}为可靠度的寿命修正系数；f_{L}为润滑的寿命修正

系数；f_G为润滑油过滤准确度的寿命修正系数；f_S为润滑油中含水的寿命修正系数；f_Y为材料熔炼寿命修正系数；f_H为表面硬度的寿命修正系数；f_T为温度的寿命修正系数；f_E为轴向偏斜的修正系数。

5 提升电动机可靠性

通过上面的预先性检查来减少电动机的失效，利用预防性的维护来提高电动机的可靠性，延长生命的周期。电动机经过长期运行之后，性能逐渐变差，为保证其正常工作，制定相关维护工作。

定期预防维修指电动机按固定的周期进行维修，如定期地对电动机进行清洁、润滑，有计划地更换轴承和配件，定期做检测试验等。这种维修方式，对保证电动机安全稳定运行，减少维修成本能起到一定作用，但是如果缺乏对电动机故障规律的认识，没有有效的监测手段，检修周期基本上是凭人的经验加上某些统计资料制定来的，它很难预防那些由于随机因素引起的事故，而且会造成过剩维护，甚至维护不当，反而增加了故障率。

根据电动机预防性维护的理论，新制造出厂的电动机和刚刚维修过的电动机，其故障率是较低的。随着时间的推移，故障率会逐渐增大，当出现故障的电动机数量达到2%时，就应对全部设备进行修理，这会使98%的电动机有剩余寿命，但是如果不按期维修，则在更短时间内又将会有2%的电动机发生故障。

但是事实并非如此，对某化工企业200台高压电动机进行调查发现，只有3%的设备故障率随时间推移按照一定的规律增加，而其余97%的设备故障率接近一个常数。多数电动机故障率并不随时间增加而变大，全部电动机都定期进行检修是不科学的，无形中浪费了大量的人力和物力，减少了电动机可以运行的时间，这就是所谓的过剩维修。所以想要达到精准的维修，还需要准确地制定出检修周期。

6 结束语

为了提升电动机的可靠性，状态监测维修是作为维护策略最为可靠的方法，通过越来越先进的监测仪器对电动机进行实时监测或者定期检测，根据实际测出的故障数据加以分析，最后制定维护方案。是否维修需要根据数据来判定，但是一旦出现假数据或者数据出现误差，就会影响决策方向。所以检测仪器的硬件设备和通信设备必须可靠耐用。将定期维修变成定期监测电动机的运行状态，跟踪故障的发展过程及推算电动机状态超标发生的时间，就可以根据电动机状态劣化程度，在故障发生前的某个时间内做好维修准备，有针对性、有计划地安排停工修理。如果生产条件不允许，也有可能让故障电动机坚持运行到出现故障时再停下维修。实行这种方式维修，无论对减少备件库存量，缩短维修时间，提高检修质量，减少故障造成的人身伤害事故还是提高电动机的有效利用率都是有好处的。

参考文献

[1] 黄洪剑．航天电机可靠性及加速寿命试验研究[D]．杭州：浙江大学，2000.

[2] 薛建辉．异步电动机振动故障诊断技术研究[D]．西安：西安理工大学，2010.

[3] GJB 299C—2006 电子电动机可靠性预计手册[S].

[4] MIL－HDBK－217F 电子设备可靠性预计[S].

（收稿日期：2018－06－12）EA