

试验与测试

无刷直流电机加速寿命试验

浙江大学(杭州, 310027) 黄洪剑 林瑞光

摘要 介绍了加速寿命试验的理论基础及类型。针对无刷直流电机可靠性的三个薄弱环节——绕组、轴承和驱动控制线路的失效机理进行分析。对无刷直流电机的加速寿命试验进行了研究。

叙词 无刷直流电动机 寿命试验 加速试验



黄洪剑 1973年9月生, 1997年9月至今在浙江大学航天电器及微特电机研究所攻读博士, 专业为电机与电器, 研究方向为微特电机及其控制。

Accelerated Life Tests of BLDCM

Zhejiang University Huang Hongjian Lin Ruiguang

Abstract Theoretical basis and type of accelerated life tests are introduced. Winding, bearing and control circuit, which are the vulnerable spot of BLDCM, are analyzed. Accelerated life tests of BLDCM are researched.

Key words BLDCM Life test Acceleration test

1 概述

可靠性试验的目的是测定产品在规定的条件下, 在规定的使用期内完成规定的任务所能达到的可靠性指标。寿命试验是评价产品的寿命特征的可靠性试验, 它是可靠性试验中最重要、最基本的试验。它是将产品的样品置于规定的试验条件下进行的, 在试验期间要记录每一失效时间, 以便研究失效时间的分布规律, 作为可靠性设计和制定可靠性工艺、筛选规范和进一步改进产品可靠性的依据。

寿命试验可分为正常应力水平下的寿命试验和加速寿命试验。加速寿命试验是在既不改变产品的失效机理, 又不增加新失效因素的前提下, 通过提高试验应力, 加速产品的失效进程, 再根据试验结果, 推算出额定应力条件下产品的寿命。目的是缩短试验时间, 节省人力物力, 快速评价出产品的可靠性水平。

对于无刷直流电机, 由于工作寿命长, 正常应力下的寿命试验往往需要几年时间, 这样不但需要投入大量的人力物力, 而且也影响了产品投放市场

的时间。因此, 通常要利用加速寿命试验方法。

2 加速寿命试验的类型

加速寿命试验的理论基础是建立在一定的失效物理基础上的, 构成产品的材料、工艺的物理化学反应而使其性能发生变化, 并直接或间接的导致产品失效。根据经典的反应动力学理论可能引起产品内部结构发生变化的各种因素, 一般可借助于热、电、机械等外界或内部应力使之加速。一般产品的寿命随应力的增加而递减。

对产品所加的应力, 可以是电压、电流、功率、温度、湿度和机械应力等。在进行加速寿命试验时, 对产品施加什么应力, 取决于对产品主要失效机理的了解。

加速寿命试验, 按照施加应力的方法的不同, 可分为恒定应力加速寿命试验、步进应力加速寿命试验、序进应力加速寿命试验。

2.1 恒定应力加速寿命试验

恒定应力加速寿命试验, 是把一种应力施加在受试产品样品上, 这个应力水平在整个试验中保持

不变。为了达到加速失效缩短试验时间的目的,要求各组寿命试验的应力都高于正常工作条件下的应力。

2.2 步进应力加速寿命试验

步进应力加速寿命试验是一种随时间分阶段逐步增加应力到受试产品样品上,直到样品开始出现大量失效为止的试验方法。这种试验的优点是试验周期较短,通常用于工艺对比、筛选摸底等定性分析场合。

2.3 序进应力加速寿命试验

序进应力加速寿命试验是一种随时间等速增加应力到受试产品样品上,直到样品开始出现大量失效为止的试验方法。

3 影响无刷直流电机可靠性的因素

如文献 1 中所述,在中小型交流电机中,轴承故障与绝缘故障占总故障数的 97%;在直流电机中,轴承故障与绝缘故障占总故障数的 56%,电刷故障占总故障数的 42%。对于无刷直流电机而言,由于多了驱动控制线路,因此它的可靠性薄弱环节为:轴承、绕组绝缘、驱动控制线路。

下面就对这三种薄弱环节进行考查。

3.1 轴承的寿命

近年来对滚动轴承寿命影响因素的研究成果,可用下式来计算轴承的寿命^[2,3,6]

$$L_R = \left[\frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{f_P P} \right)^\epsilon f_R f_L f_G f_S f_V f_H f_T f_V f_E \right]$$

式中 L_R ——可靠度为 R 时的轴承寿命, h

n ——轴承的转速, r/min

C ——滚动轴承额定动负荷, N

P ——滚动轴承承受的当量动负荷, N

ϵ ——寿命指数, 球轴承为 3, 滚子轴承为 10/3

3.1.1 载荷系数 f_P

为了反映不平衡和振动、冲击引起负荷对轴承疲劳寿命的影响而引进载荷系数 f_P , 在没有冲击力或轻微冲击力时 $f_P = 1.0 \sim 1.2$, 中等冲击或中等惯性力时 $f_P = 1.2 \sim 1.8$, 强大冲击时 $f_P = 1.8 \sim 3.0$ 。

3.1.2 可靠度的寿命修正系数 f_R

常规滚动轴承寿命计算公式是建立在可靠度为 90% 的载荷-寿命曲线基础上, 其结果的可靠度为 90%。当可靠度为 R 时, 寿命修正系数 f_R 由下

式计算

$$f_R = \left[\ln \left(\frac{1}{R} \right) / \ln \left(\frac{1}{0.9} \right) \right]^{1/e}$$

式中 e ——威布尔分布形状参数, 对球轴承为 10/9, 对圆柱滚子轴承为 3/2, 对圆锥滚子轴承为 4/3

3.1.3 温度的寿命修正系数 f_T

滚动轴承工作温度和轴承寿命的关系, 主要体现在轴承额定负荷 C 的降低, 由于在高温条件下, 不仅使轴承材料的硬度降低, 而且将丧失原有的精度。因此, 在相同负荷条件下, 轴承的寿命将随温度的升高而下降, 温度的寿命修正系数可用下式计算。

$$f_T = \begin{cases} 1 & (T \leq 120) \\ (1.36 - 0.003T)^\epsilon & (120 < T < 300) \end{cases}$$

3.1.4 其他寿命修正系数

润滑是保证轴承正常运转的必要条件, 它对于提高轴承的承载能力和使用寿命起着重要的作用。因此引入润滑的寿命修正系数 f_L 、润滑过滤精度的寿命修正系数 f_G 、润滑油中含水的寿命修正系数 f_S 反映润滑状况对轴承寿命的影响。轴承钢中的非金属夹杂物对轴承的疲劳寿命会产生不利影响, 不同的轴承钢熔炼法所含的非金属夹杂物含量不同, 因此引入修正系数 f_V 。轴承材料表面硬度的降低会使轴承的额定动负荷减小, 因此引入修正系数 f_H 。

滚动轴承安装精度的降低, 将会严重影响轴承内部负荷的正常分配, 造成有害的应力集中, 导致轴承寿命明显下降。在电机加工过程中, 二个轴承孔不同心是不可避免的。因此, 就需要引入轴向偏斜的修正系数 f_E 。

这几个影响寿命的因素在制造轴承, 装配电机后已经确定, 在寿命试验中不可调控, 因此在本文中就不再详细说明。

3.2 绕组绝缘的寿命

温度对电机绝缘寿命有显著影响, 高温将加快绝缘材料的物理变化和化学反应速度, 促进绝缘老化。

通过大量研究, 曾经得出了 A 级绝缘的 8 规律, B 级绝缘的 10 规律, H 级绝缘的 18 规律, 即对于 A、B、H 级绝缘, 温度每升高 8、10、18, 绝缘寿命将降低一半。后来, Vant Goff 和 Arrhenius 总结了绝缘寿命与温度关系的经验公式^[1]

$$\ln L = \frac{E_a}{RT} - G = \frac{B}{T} - G$$

式中 L ——平均绝缘寿命, h

T ——绝缘材料温度, K

R ——气体常数

$R=8.317 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

E_a, G ——与绝缘材料有关的系数

表 1 给出了不同绝缘等级的 G, B, E_a 值。

表 1 不同绝缘等级的 G, B, E_a 值

| 绝缘等级 | G | $B(\times 10^4)$ | $E_a(\times 10^4)$ |
|------|------|------------------|--------------------|
| A | 15.3 | 0.95 | 7.90 |
| B | 15.5 | 1.02 | 8.48 |
| F | 19.7 | 1.27 | 10.55 |
| H | 24.2 | 1.55 | 12.83 |

在已知温度 T_1 时的绝缘寿命 L_1 , 则温度 T_2 时的绝缘寿命 L_2 可由下式导出

$$L_2 = L_1 e^{B(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})}$$

3.3 驱动控制线路的寿命

大多数电子设备和电子元件的寿命都服从指数分布, 文献[5]中给出了各种元器件的工作失效率 λ_P 的计算模型。例如:

小规模数字电路 $\lambda_P = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$

晶体管、二极管、光电子器件 $\lambda_P = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_A \pi_{S2} \pi_R \pi_C$

金属膜与碳膜电阻 $\lambda_P = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_R$

电容 $\lambda_P = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_{CV} \pi_{SR} \pi_K$

式中 λ_b ——基本失效率

π_E ——环境系数

π_Q ——质量系数

π_A ——应用系数

π_C ——结构系数

π_T ——温度应力系数

π_V ——电压应力系数

π_L ——成熟系数

π_{S2} ——电压应力系数

π_R ——额定功率、电流或阻值系数

π_{CV} ——电容量系数

π_{SR} ——串联系数

π_K ——种类系数

$C_1 C_2$ ——电路复杂度失效率

C_3 ——封装复杂度失效率

基本失效率的计算模型如下:

晶体管、二极管、光电子器件

$$\lambda_b = A \cdot e^{\frac{N_T}{T+273+\Delta T \cdot S}} \cdot e^{\left(\frac{T+273+\Delta T \cdot S}{T_M}\right)^P}$$

金属膜与碳膜电阻

$$\lambda_b = A \cdot e^{B\left(\frac{T+273}{N_T}\right)^G} \cdot e^{\left[\frac{S}{N_S}\left(\frac{T+273}{273}\right)^J\right]^H}$$

电容 $\lambda_b = A \left[\left(\frac{S}{N_S} \right)^H + 1 \right] e^{B\left(\frac{T+273}{N_T}\right)^G}$

式中 A ——失效率水平调整系数

S ——电应力比

N_T ——温度常数

T ——工作环境温度

T_M ——最高允许结温

$\Delta T - T_M$ ——与满额时最高允许温度的差值

P, B ——形状参数

N_S ——应力常数

G, J, H ——加速常数

其平均寿命与失效率的关系为

$$\text{平均寿命 } L = \frac{1}{\lambda_P}$$

4 无刷直流电机的加速寿命试验

设计无刷直流电机加速寿命试验方案时, 正确的选择加速应力是十分重要的问题, 因为产品出现失效是由于产品失效机理发展的结果, 而失效机理的发展与施加什么类型的应力有密切关系。

由前面的分析可以看出, 温度应力对无刷直流电机的各个部件的寿命均有显著影响。而增加电机的负载对轴承的寿命以及驱动控制线路中的功率器件寿命有较大直接影响, 并且通过电机的温升对绕组绝缘寿命发生间接影响。所以, 在无刷直流电机的加速寿命试验中, 可以采用提高环境温度或增加电机负载或它们的组合方法增加试验应力。

例:

一无刷直流电机, 绕组绝缘为 F 级, 轴承为深沟球轴承, 正常工作(额定负载)时运行在 30℃ 的环境下, 其绕组温升为 70℃, 轴承温升为 80℃。现进行加速寿命试验。

4.1 提高环境温度

将无刷直流电机放入恒温箱中, 调节恒温箱温度到 70℃, 并使电机工作在额定负载下, 进行寿命试验。由前面的分析可得现行条件对电机各部分寿命的影响。

4.1.1 轴承

轴承温度的寿命修正系数

$$f_T = \begin{cases} 1 & (T \leq 120^\circ\text{C}) \\ (1.36 - 0.003T)^6 & (120^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C}) \end{cases}$$

正常工作时 $T_1 = 30 + 80 = 110^\circ\text{C}$, 此时 $f_T = 1$;

试验时 $T_2 = 70 + 80 = 150^\circ\text{C}$, 此时 $f_T = (1.36 - 0.003 \times 150)^3 = 0.754$ 。试验时条件对轴承寿命的加速因子为 $1/0.754 = 1.327$ 。

4.1.2 绕组绝缘

正常工作时 $T_1 = 30 + 70 = 100^\circ\text{C}$, 试验时 $T_2 = 70 + 70 = 140^\circ\text{C}$; 试验时条件对绕组绝缘寿命的加速因子为 $e^{B(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})} = e^{1.27 \times 10^4 \times (\frac{1}{373} - \frac{1}{413})} = 27$

4.1.3 驱动控制线路

驱动控制线路中元器件比较多, 可以选择温度对其寿命影响较大, 而且又比较关键的几个器件, 以驱动管为例:

其基本失效率为

$$\lambda_b = A \cdot e^{\frac{N_T}{T+273+\Delta T \cdot S}} \cdot e^{\left(\frac{T+273+\Delta T \cdot S}{T_M}\right)^P}$$

正常工作时 $T_1 = 30^\circ\text{C}$, 电应力比 $S = 0.3$, 此时 $\lambda_b = 0.344 \times 10^{-6}/\text{h}$; 试验时 $T_2 = 70^\circ\text{C}$, 电应力比 $S = 0.3$, 此时 $\lambda_b = 0.540 \times 10^{-6}/\text{h}^{[5]}$; 试验时条件对驱动管寿命的加速因子为 $0.540/0.344 = 1.570$

4.2 不提高环境温度, 而增大电机负载

将无刷直流电机放入恒温箱中, 调节恒温箱温度到 30°C , 并使电机工作在 1.2 倍额定负载下, 进行寿命试验。由前面的分析可得现行条件对电机各部分寿命的影响。

4.2.1 轴承

工作在 1.2 倍额定负载下, 此时电机转速降为额定转速的 95%, 轴承温升变为 100°C 。此时轴承温度 $T_2 = 130^\circ\text{C}$, $f_{T_2} = (1.36 - 0.003 \times 130)^3 = 0.913$

设额定状态转速为 n_1 , 试验时转速为 n_2 , 额定状态当量动负荷为 P_1 , 试验时当量动负荷为 P_2 。则由轴承寿命公式可得

试验时条件对轴承寿命的加速因子为 $\frac{n_2}{n_1}$ 。

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^6 \cdot \frac{1}{f_{T_2}} = 95\% \times 1.2^3 \times \frac{1}{0.913} = 1.798。$$

4.2.2 绕组绝缘

正常工作时 $T_1 = 30 + 70 = 100^\circ\text{C}$; 试验时, 负载增加, 绕组温升变为 97°C , $T_2 = 30 + 97 = 127^\circ\text{C}$; 试验时条件对绕组绝缘寿命的加速因子为 $e^{B(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})} = e^{1.27 \times 10^4 \times (\frac{1}{373} - \frac{1}{400})} = 9.96$

4.2.3 驱动控制线路

驱动控制线路中元器件比较多, 可以选择温度及电应力对其寿命影响较大, 而且又比较关键的几个器件, 仍以驱动管为例:

其基本失效率为

$$\lambda_b = A \cdot e^{\frac{N_T}{T+273+\Delta T \cdot S}} \cdot e^{\left(\frac{T+273+\Delta T \cdot S}{T_M}\right)^P}$$

正常工作时 $T_1 = 30^\circ\text{C}$, 电应力比 $S = 0.3$, 此时 $\lambda_b = 0.344 \times 10^{-6}/\text{h}$; 试验时 $T_2 = 30^\circ\text{C}$, 负载增加 1.2 倍, 电应力比 $S = 0.3 \times 1.2^2 = 0.432$, 此时 $\lambda_b = 0.425 \times 10^{-6}/\text{h}^{[5]}$; 试验时条件对驱动管寿命的加速因子为 $0.425/0.344 = 1.235$ 。

由试验结果, 针对电机哪一部分损坏, 乘以相应的加速因子, 就可得到电机正常工作状态下的寿命。

5 讨论

5.1 试验结果的判断

从上面的例子可以看出, 不论是提高温度, 还是增加电机负载, 对无刷直流电机各个部件的寿命的影响是不同的, 而且相差比较大。为了由加速寿命试验结果得到电机的寿命, 必须准确的了解电机损坏的部分。这不是简单把损坏的电机拆开就可以知道的, 因为电机一个组成部分的损坏完全有可能造成另一部分跟着损坏, 而这另一部分损坏的失效机理就不是疲劳失效, 不能反映电机的寿命; 这样如果不能分析出是哪一部分疲劳失效就无法得到电机的寿命。比如试验中, 由于轴承疲劳而失效, 造成定子绕组绝缘损坏, 进而使驱动线路过载烧毁。这种情况下, 仅仅靠拆开电机观察是哪一部分疲劳失效是不够的, 还必须结合试验中记录的数据进行综合分析。

5.2 加速因子

从理论上讲, 可以选择一种加速寿命试验方法, 使得试验时对电机各部分的加速因子比较接近, 这样就不需要具体了解电机失效到底是在哪一部分。但是, 像前面的例子中要找到一种加速方法使电机各部分的加速因子都比较接近是比较困难的。

参考文献

- 1 Emanuel Brancato. Life Expectancy of Motors. IEEE Electrical Insulation Magazine, Nov. 1991.
- 2 刘冲. 滚动轴承系统的可靠性与寿命设计. 矿山机械, 1998.