

# 无人水下航行器推进电机可靠性 加速试验方法研究

苑利维, 赵曾武, 田冠枝, 宋显成, 郑林

(北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 用加速试验方法替代常规试验方法, 达到缩短研制周期、节约研制成本、提高试验效率的目标。

**方法** 通过对推进电机的故障模式及影响分析, 确定电机的绕组和控制驱动器的功率器件为薄弱部位, 考虑到产品的水下应用环境, 采用温度应力加速试验方法。结合绕组和功率器件与温度的数学模型及试验数据, 计算出加速因子。**结果** 设计了用 173 h 的满功率工作试验来考核产品平均无故障时间 5500 h 的可靠性加速试验方法。**结论** 该试验方法对同类产品可靠性加速试验具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 推进电机; 加速因子; 可靠性加速试验

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.01.011

**中图分类号:** TJ01      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)01-0050-03

## Reliable Acceleration Test Method for Propulsion Motor of Unmanned Underwater Vehicle

YUAN Li-wei, ZHAO Zeng-wu, TIAN Guan-zhi, SONG Xian-cheng, ZHENG Lin  
(Beijing Research Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT: Objective** To shorten the development cycle, save the development costs and improve the test efficiency by replacing the conventional test method with the acceleration test method. **Methods** By analyzing the failure mode and effects of the propulsion motor, the motor winding and the power devices of the drive module were determined as the weakest parts. Considering the underwater application environment of the product, temperature stress acceleration was adopted. The acceleration factor was calculated by the mathematical models and experimental data on winding, power devices and temperature. **Results** The reliability acceleration test method was designed based on 173 hours of full power work to assess the MTBF 5000 hours of the propulsion motor. **Conclusion** The test method can provide a reference for the similar products' reliability acceleration test to some extent.

**KEY WORDS:** propulsion motor; accelerated factor; reliability accelerated testing

近年来,随着环境问题、科学研究和军事应用等方面问题的突现以及能源开发利用的需求,使得世界各国把目光投向了海洋。海洋深层次的开发和利用已经成为世界各国未来发展的战略目标。UUV 的研究是在这种广阔的商业、科研和军事应用前景下,不断地发展和完善。

UUV 推进电机作为 UUV 的主要动力装置,其可靠性不仅影响着水下航行任务的成败,同时也关系着

UUV 是否能够顺利返航回收。续航能力已成为考核 UUV 水下作业能力的重要指标之一,因此对推进电机的 MTBF (Mean Time Between Failure 平均无故障时间)可靠性指标要求越来越高,通常达到 5000~8000 h。在产品研发阶段,按照常规试验方法对这一指标的考核需要浪费大量的人力、物力和财力,可靠性加速试验方法的提出,可以在满足产品可靠性验证的前提下,缩短研制周期、节约研制成本、提高试验效率。

收稿日期: 2017-09-09; 修订日期: 2017-10-01

作者简介: 苑利维 (1975—), 女, 河北保定人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为控制驱动技术及嵌入式软件开发。

# 1 推进电机故障分析

## 1.1 功能划分

UUV 推进电机由控制驱动器和交流永磁同步电机构成,电机输出轴与螺旋桨直接连接,如图 1 所示。控制驱动器内部逆变器将外部输入的直流电逆变为交流给电机提供交流电能,并根据转子不同位置,对三相定子绕组按一定顺序提供电压。当电机定子绕组通过三相对称正弦电流时,在气隙中产生磁场。定子磁场与转子磁场相互作用产生转矩,带动转子旋转,转子拖动螺旋桨进而实现 UUV 的推动力。

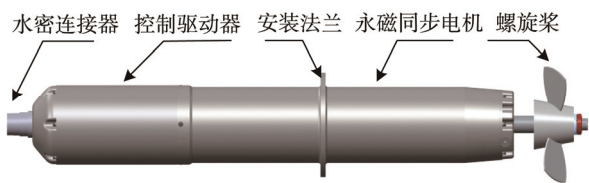


图 1 UUV 推进电机模型

为了能够科学准确地对推进电机的故障进行分析,首先进行 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis 故障模式及影响分析),识别产品设计中或者生产工艺中可能存在的薄弱环节,对可能出现的故障模式进行分析,以便从设计、生产等方面采取针对性措施加以改进或采取适当的质量控制措施进行弥补,最终从根本上进行故障的消除。推进电机功能模块的划分如图 2 所示。

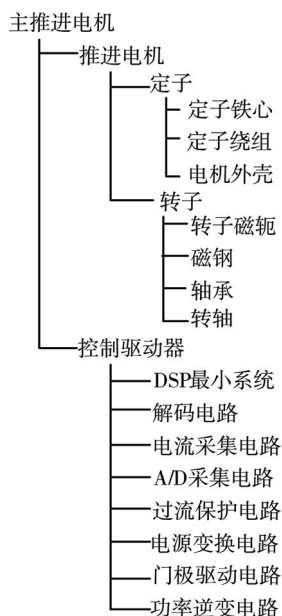


图 2 推进电机功能模块划分

## 1.2 可靠性预计

在设计过程中,遵循从源头上提高可靠性的指导思想,为满足 UUV 的高可靠要求,通过优化各组成

单元的结构、制造工艺等方面提高可靠性。同时,通过裕度设计、冗余设计、热设计等方式进一步提高可靠性。根据标准件和电子元器件选型及经验参考值,分析计算出各模块的失效率,见表 1。

表 1 主推进电机功能模块失效率

功能模块	失效率 $\lambda/10^{-6}$	MTBF/ $10^6$ h
定子绕组	0.8	1.25
轴承	0.64	1.56
磁钢	0.6	1.67
转轴	0.48	2.06
DSP 最小系统	1.24	0.81
解码电路	1.55	0.65
电流采集电路	0.23	4.35
A/D 采集电路	0.34	2.94
过流保护电路	1.05	0.95
电源变换电路	2	0.5
门极驱动电路	0.29	3.45
IPM	22.14	0.045

根据各模块的失效率,可以明显看出电机侧的定子绕组和控制驱动器侧的功率器件 IPM 为相对薄弱部件。

## 2 可靠性加速试验方法

产品研制的短周期和低成本目标对可靠性保障技术提出了高效性、经济性的要求,与高可靠长寿命目标构成矛盾,导致现有可靠性工程中的许多可靠性保障技术难以实施。同时,基于长时间效应的可靠性增长试验、可靠性验证试验应用难度进一步加大,因此,从试验的角度出发,加速试验技术成为在时间和成本约束下保障产品高可靠长寿命的必然要求。

可靠性加速试验是基于产品的 FMEA 分析结果,确定产品加速试验的应力和加速因子,在较短的试验时间内暴露产品设计或工艺方面的缺陷,实现产品高可靠长寿命的快速评估<sup>[1]</sup>。

可靠性加速试验通常采用加速应力的可靠性试验,通过施加步进应力,找出产品耐应力极限,包括工作应力极限和破坏应力极限,不断地加速激发产品的潜在缺陷,并进行改进和验证,使产品的可靠性不断提高,并使产品耐环境能力达到最高。

目前常用的加速试验方法可以从以下几个环境应力方面考虑。

1) 电应力:包括产品的通断电循环、规定的工作模式及工作周期、规定的输入标称电压及其最大允许偏差。

2) 湿度应力:模拟产品实际使用环境,必要时可喷入水蒸气。

3) 温度应力:模拟产品在使用中经历的实际环境,制定温度变化情况和温循次数。

4) 振动应力:振动应力的量值和剖面应按产品

的现场使用类别、产品的安装位置和预期的使用情况确定,同时要考虑振动类型、频率范围、振动量值和施加振动的方向方式。

5) 综合应力:根据产品使用环境可将电应力、湿度应力、温度应力、振动应力进行组合。

UUV 推进电机在水下正常工作时,其电应力和湿度应力为恒定应力,振动应力很难在水下模拟实现。同时,对推进电机来说,其输出转矩与转速之间是一种平方转矩负载关系,电机在不同转速下工作时,输出转矩不同,电机的绕组和控制驱动器的功率器件的温度发生变化,因此采用了温度应力加速试验方法。

### 3 加速因子计算

#### 3.1 IPM 加速因子计算

IPM 的可靠性主要与温度相关,因此对 IPM 的加速试验主要考虑温度应力加速。在以温度应力为试验应力的情况下,元器件的加速因子  $T_{AF}$  满足式(1)<sup>[3]</sup>:

$$T_{AF} = \frac{L_{normal}}{L_{stress}} = \exp \left[ \frac{E_a}{k} \times \left( \frac{1}{T_{normal}} - \frac{1}{T_{stress}} \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $L_{normal}$  为正常应力下的寿命;  $L_{stress}$  为高温应力下的寿命;  $T_{normal}$  为长时工况下绝对温度;  $T_{stress}$  为满功率工况下绝对温度;  $E_a$  为失效反应的活化能,不同类型元器件数值不同,查文献[2]中表 1 可得;  $k$  为 Boltzmann 常数,  $k=8.62 \times 10^{-5}$  eV/K。

IPM 功率模块主要由二极管和三极管组成,其中 PN 结破坏导致的短路是该类元器件的主要失效类型,其活化能为 1.5 eV。

实际试验中,外部水温 15 °C 时,在长时工作状态下 IPM 工作温度为 21 °C (约合 294 K); 满功率状态下,IPM 平衡温度为 42 °C (约合 315 K)。

将上述参数代入式(1),得加速因子  $T_{AF}$  约为 51.7,即在长时工作状态下工作 1 h 相当于在满功率状态下工作 51.7 h。

#### 3.2 绕组绝缘加速因子计算

通过对电机绕组绝缘寿命的研究表明,电机绕组绝缘寿命符合绝缘材料热老化定律,满足式(2)<sup>[4]</sup>:

$$\lg T_k = A + \frac{B}{273 + \theta} \quad (2)$$

式中:  $T_k$  为平均寿命, h;  $A$  为分子相互作用系数;  $B$  为物质活化能与通用气体常数;  $\theta$  为温度, °C。

常用交流永磁同步电机,通常  $A$  取 -6.95,  $B$  取 4500。实际试验中,外部水温 15 °C 时,在长时工作状态下绕组平衡温度为 21 °C; 满功率状态下绕组平衡温度为 53 °C。将参数代入式(2)可得:

$T_k$  (长时工作) = 227 050 493 h,  $T_k$  (满功率) = 7 139 717 h, 得加速因子为 31.8。

## 4 加速试验方法设计

UUV 主推进电机的 MTBF ≥ 5000 h, 参照相关标准,按照 1.1 倍的 MTBF 也就是 5500 h 考核,根据加速因子,各部位加速试验时间见表 2。

表 2 加速试验时间

项目	加速因子	试验时间/h
定子绕组	0.8	≥1.25
轴承	0.64	≥1.56

因此,要满足 MTBF 指标,可将 UUV 主推进电机在满功率工况下至少考核 173.0 h。

## 5 结语

应用该试验方法完成了 UUV 推进电机的可靠性试验。UUV 推进电机在实际工作中往往会根据需要进行调速,速度的变化给产品带来温度应力的变化,但是,不容忽视的是振动应力也是存在的。因此,在后续改进的加速试验中同时增加振动应力将会进一步增大加速因子,进而缩短试验时间。

#### 参考文献:

- [1] 刘柳,周林,邵将. 电子产品故障物理模型研究与应用进展[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 54-58.
- [2] GJB 899A—2009, 可靠性鉴定和验收试验[S].
- [3] 颜景莲. 浅谈电工电子产品加速寿命试验[EB/OL]. [2015-01-31]. www.do88.com.
- [4] Б. Н. 瓦涅耶夫. 异步电动机可靠性加速试验方法[J]. 爆炸性环境电气防爆技术, 1992(3): 30-37.
- [5] 刘瑞元, 蒯诗松. 步进应力加速寿命试验的最优设计[J]. 应用概率统计, 2000(1): 24-27.
- [6] 陈文华. Weibull 寿命型产品可靠性加速验证试验方法[J]. 浙江大学学报, 2001, 35(1): 5-8.
- [7] 宣卫芳. 装备与自然环境试验[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [8] 陈兵, 李星. 加速寿命试验技术在国内外工程应用研究[J]. 强度与环境, 2010, 37(6): 31-38.
- [9] 魏高乐, 陈志军. 基于多应力综合加速模型的产品可靠性评估方法[J]. 科学技术与工程, 2016(2): 24-29.
- [10] 范志峰, 齐杏林, 雷彬. 加速可靠性试验综述[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 37-39.
- [11] 李海波, 张正平, 胡彦平. 加速寿命试验方法及其在航天产品中的应用[J]. 强度与环境, 2007, 34(1): 2-10.
- [12] 张秋菊, 刘承禹. 电子设备可靠性的加速试验[J]. 光电技术应用, 2011(4): 81-85.
- [13] 陈循, 张春华. 加速试验技术的研究、应用与发展[J]. 机械工程学报, 2009(8): 130-136.
- [14] 姜同敏, 王晓红, 袁宏杰, 等. 可靠性试验技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 185.
- [15] 郭春生, 万宁, 马卫东, 等. 恒定温度应力加速实验失效机理一致性快速判别方法[J]. 物理学报, 2013(17): 17-22.