

角加速度计综合应力筛选方法研究

张宏峰¹, 王孝利², 李洪¹

(1. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074; 2. 上海航天局军事代表室, 上海 201109)

摘要: 介绍了某型装备液环角加速度计特点, 对研制过程中出现的空化现象进行了机理研究、模型分析和试验验证。结合装备实际工作环境, 突破传统的温度、振动组合筛选方法, 提出了温度-振动、冲击响应谱综合应力筛选方法, 剔除或修复故障产品, 从而提高产品的环境适应性, 保障装备的工作可靠性。

关键词: 角加速度计; 空化; 筛选

中图分类号: V416.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)05-0083-04

Research of Synthetical Stress Screening Method of Angular Accelerometer

ZHANG Hong-feng¹, WANG Xiao-li², LI Hong¹

(1. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;

2. Military Representative Office in Shanghai Space Administration, Shanghai 201109, China)

Abstract: A certain type liquid-ring angular accelerometer was introduced. Mechanism study, model analysis and test validation were carried out for its cavitations phenomenon during the development process. Combining with applying conditions and breaking through the conventional screening method of temperature and vibration, an integral screening method of temperature-vibration-shock response was presented. By this way, the fault products were eliminated or repaired, and the environmental worthiness and operating reliability was improved.

Key words: angular accelerometer; cavitations; screening

液环式角加速度计(以下简称角加)是通过分子-电子的液体转换实现角加速度信号到电信号的转换, 在运动体转动瞬间测量不敏感线加速度, 具有结构简单、高灵敏度、抗干扰、低能耗、使用方便等优点。但由于其内部敏感组件是特殊液体, 在特定的使用环境情况下可能会发生空化现象, 角加速度计会对线加速度敏感, 其输出信号会发生严重畸变, 给

装备正常工作带来致命影响。根据以往产品故障统计结果, 由于空化因素导致的产品异常比例占到20%以上, 因此进行相关技术研究, 采取防范措施抑制敏感组件空化和通过筛选方法剔除易于空化故障的产品, 对于提高装备的环境适应性和工作可靠性具有重要意义。

收稿日期: 2012-03-27

作者简介: 张宏峰(1977—), 男, 北京人, 工程师, 主要从事惯性产品环境与可靠性试验技术研究。

1 空化机理分析

1.1 空化性质

空化是由于压强的降低使液体汽化的过程,实际液体中存在很多含有气体或蒸汽的小泡以及固体颗粒等异相介质,从而大大地降低了液体的抗拉强度,当流体中压强降到某负临界值后,该处的核子不断长大使其容易被“拉断”而发生空化现象。从力学的角度而言,空化是液体在足够大的应力作用下发生的一种断裂现象,是液体的一种力学破坏形式。

1.2 角加空化过程

角加的敏感组件腔内有一个多孔介质,其内部是微小的不规则的网状孔隙结构(如图1所示),使得气核或杂质很容易藏于其中。即使在制造和工艺过程中进行低压或真空除气处理,中间的不规则孔隙也仍然会存在一小部分不被工作液体浸润的空腔,从而形成“空化核”;另外,敏感组件中的液体处于封闭腔体这样一个体系,其固体边界对其影响是不容忽视的,但是固体表面光滑度在工艺处理时存在一定的局限,微观表面的凹凸不平是采用任何技术手段都无法消除的因素,固-液界面的微观结构一定存在“微观”的凹型缝隙,这些缝隙中必然会形成气核,如图2所示。角加在制造完成后,其内部工作液体是定量的,气体全部溶解于液体,环境条件满足时,如流体振荡冲击和低温环境,液体的压强不断降低,以至达到该溶解气体的饱和压强,溶解在液体内部的气核最终因浮力而释放出来,释放出来的气核很难消失,一旦条件允许,就将产生明显的空化现象。由于气核是液体中的杂质及微气泡,而且液环式角加结构特性和现有的工业技术手段决定了这些核子无法彻底去除,即无法从源头上完全避免空化现象出现或发生。

1.3 诱发空化因素

诱发液体空化产生与发展的内部主要变量有内部空化核数量、边界形状、绝对压强和流速等;此外,液体黏性、表面张力、汽化特性、杂质、边壁表面条件和所受到压力梯度等也有一定影响。其中最

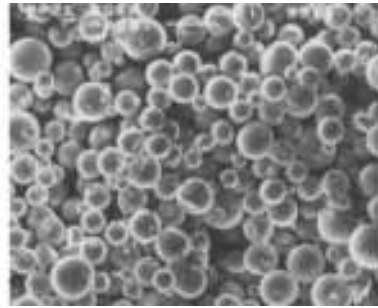


图1 内部微观结构

Fig. 1 Inner micro structure

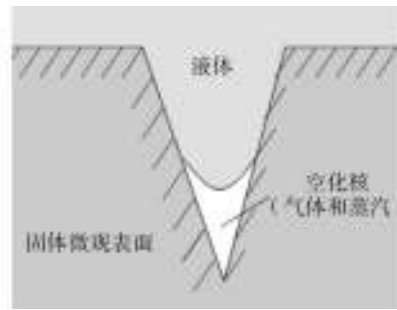


图2 空化核模型

Fig. 2 Diagram of cavitated nucleon model

基本和显著的因素为压强与流速,降低封闭腔体内部压强或者增加流速都易导致空化现象发生,角加生产过程中可以提高封闭隔离压强来最大限度减少压强变化带来的空化影响。从产品特点和实际使用经验分析诱发空化的外部因素,主要有环境温度、振动和冲击等,振动冲击量级越大、频率成分越高会导致液体局部振荡速度越高。根据空化有关理论推导和角加的数学模型进行综合计算,封闭腔内液体流速与外界环境应力频率范围存在下列函数关系,见式(1):

$$q = \exp\left[\frac{RA_{ck}D \sqrt{1 + (f/f_b)^2}}{4A_k\rho}t\right] \quad (1)$$

式中: q 为角加内部工作液体流速; R 为液体阻力; A_{ck} 为液体通道横截面积; D 为结构件直径; A_k 为结构件封闭面积; ρ 为液体密度; t 为环境条件作用时间; s ; f_b 为上限频率; f 为外部应力环境频率范围, Hz。上述各参数除 q 和 f 外其余均为常量。从式(1)可以看出流速 q 与外界环境激励频率有密切关系,在特定的应力和频率范围内,作用时间足够的情况

下, q 值满足一定条件时, 工作液体的不可压缩特性会被打破, 其直接后果就是角加容易诱发空化。因此在低温情况下, 施加带有高频成分的振动、冲击力能有效检测出容易空化的角加。

2 抑制空化技术研究

2.1 提高封离压强

针对角加速度计敏感组件的研究经验表明, 影响其空化产生的主要因素之一是流场中的局部压强, 当液体某处的压强低于其临界压强时, 空化即产生。针对这一影响因素, 工艺实现上可以采取增大内部压强的措施。国内研究领域公认增大内部压强能够有效抑制空化发生, 但其工艺可实施性有相当大的难度, 需要结合充压装置、产品材料耐压能力、生产过程真空接口等技术能力综合考虑。从该型产品实际制造生产和工艺水平来看, 目前能做到的可实现可操作的最大封离压强对抑制空化有一定作用, 但效果达不到理想要求。

2.2 减少“空化核”数量

空化核的存在是产生空化的要素之一, 减少空化核的数量有助于抑制空化的出现。具体可以采取提高敏感液体纯度, 采用真空静置除气, 通过先进制造工艺提高液固分界面的平滑度和光洁度等措施, 但在实践工作中存在外协供应品质量管理、液体纯度定量验证技术、高真空环境全程无缝对接工艺等难于实现和无法操作的困境, 而液环角加速度计内部工作环腔的特殊性决定了无法实现高精度的内部表面处理。

2.3 综合应力筛选方法

鉴于角加的结构特点, 从工艺改进和制造环节进行优化取得成效比较有限, 为保证产品交付后的正常使用, 及早发现和剔除易于发生空化的产品, 必须从综合应力筛选方法上找出办法。分析该型角加实际工作环境的外场力学信号测试数据, 发现频带范围较宽, 随机振动存在高达 3.5 kHz 高频信号, 瞬态冲击存在 4.5 kHz 的成分, 而且有一定的幅值。由于流体空化易于在超高频振荡下发生, 且跟液体

的黏度、流速和压强密切相关, 实际使用环境中存在的外部激励如低温、振动和冲击等可能是导致空化的重要因素。按照模拟实际使用环境进行筛选的思路, 参照产品验收技术要求、空化激励特性、产品以往筛选数据, 在确保产品使用寿命的数据分析下, 依照最大值包络和能量平均分配的原则, 制定出了高频综合筛选方法, 并成功实施, 取得了良好效果。

3 综合应力筛选方法应用

3.1 筛选应力

该型角加速度计全寿命使用环境条件涉及使用、运输和存储 3 个环节, 通过对研制过程中出现空化现象的角加进行机理研究、试验激励和验证, 对空化有主要影响的环境因子主要有低温、振动、冲击 3 个应力。低温环境下流体的特性有一定的变化(如黏度和流速), 而高频振动和冲击则会使核子能量聚集, 持续到一定程度时会释放, 空化产生。因此筛选涵盖这 3 种应力, 而非常规的振动—温度循环—振动组合应力筛选, 量级和应力施加顺序应尽量包络和模拟实际环境。

3.2 筛选技术条件

该型产品在研制任务书中已明确规定了常规的环境应力筛选方法, 但在筛选过程中很少发现和剔除过空化导致故障的产品。说明常规的振动—温度循环—振动顺序施加的筛选方法对液环角加的效果比较有限, 需要针对角加特性进行思考, 应着重从其更易于暴露故障和敏感应力方面入手, 结合空化理论计算结果和产品实际故障信息统计数据, 温度、振动和冲击这 3 种应力在激励产品故障方面效果更为显著和高效。为充分模拟和适应实际使用环境, 采用综合应力进行组合筛选, 即温度振动+温度冲击的方式。鉴于以往经验和试验摸底情况, 低温下产品更易于出现空化, 因此筛选时温度条件选取产品工作的典型低温工作环境, 振动激励采用随机振动方式, 频率上限依照外场各使用环境下测试数据上限, 量值采用实测功率谱的最大值包络, 瞬态冲击结合角加结构特点和在整机上响应测试数据, 采用比较符合实际的冲击响应谱激励方式。筛选应力施加

依照该产品特性、工作任务剖面经受相应应力顺序执行,温度试验时在低温保存至少 2 h,确保产品达到温度稳定,然后施加振动和冲击应力,先进行随机振动,振动结束之后进行冲击响应谱试验。具体筛选条件见表 1 和表 2。

3.3 筛选测试和验证

由于每只角加发生空化时的现象并没有唯一和确定的量值特征,筛选中需要同时装配多只进行,过程中产品通电时监测输出电压波形、幅值、相位等参

表 1 随机振动筛选条件

Table 1 Random vibration screening test

方向	频率/Hz	功率谱密度值	均方根值	温度	振动时间
产品 敏感 方向	10~100	0.06g ² /Hz	21.97g	低温-30℃,产品在保 温至少 2 h 后再进行振 动。要求降温速率不 得高于 3℃/min。	按实际任务时 间执行
	100~200	3 dB/oct			
	200~1000	0.12g ² /Hz			
	1000~1500	4 dB/oct			
	1500~2000	0.2g ² /Hz			
	2000~2600	-6 dB/oct			
	2600~3000	0.118g ² /Hz			
	3000~3500	-6 dB/oct			

表 2 冲击响应谱筛选条件

Table 2 SRS screening test

方向	频率/Hz	加速度值	温度	冲击次数
产品 敏感 方向	10~1000	10 dB/oct	低温-30℃,产品 在保温至少 2 h 后 再进行冲击。	3次
	1000~2300	300g		
	2300~3000	6 dB/oct		
	3000~4500	390g		

数,进行同步对比。根据以往的工作经验和研究总结,角加发生空化后,其在低频正弦信号下的表征明显且易于被捕捉。在筛选结束后,通过短时的低频正弦扫描验证产品工作性能,验证正弦振动试验条件见表 3。

表 3 正弦振动试验条件

Table 3 Sine vibration test

方向	频率	加速度值	方式	速率	次数
敏感方向	10~160 Hz	2g	线性	3 Hz/s	1次

3.4 筛选时注意事项

综合应力筛选不同于 GJB 1032—90 规定的常用随机振动—温度循环—随机振动模式,而是基于角加实际使用环境和空化特殊现象采取的一种方法,

仍处于探索和经验总结阶段,实际应用需要注意以下几个方面。

1) 不能超过产品的设计极限。筛选的振动和冲击量级参照的是外场实际数据,在实现筛选目的的同时也验证了产品的综合环境适应性,但由于使用了最大值包络进行选取数据点,可能存在一定超出实际使用环境的数据,需要进行综合应力激励仿真分析,确保筛选量级不能超出产品上限。

2) 振动冲击试验系统的校准和检定。振动试验系统按国家相关计量检定规程要求,一般不超过 2000 Hz,本次角加筛选随机振动频率上限达到 3.5 kHz,而冲击响应谱冲击频率则达到 4.5 kHz,对于超过检定参数上限以上的频率点数据控制精度、动态范围等指标应加以考虑,可以使用动态分析仪进行数据监测,不同振动设备进行试验对比等方式确保筛选效果的一致性和可信性。

3) 筛选的严酷度和对寿命的影响。作为研究摸索的一套新筛选方法,应力施加种类和方式、量级确定等环节不同于常规的环境应力筛选,筛选的严酷程度和对产品的寿命影响分析目前缺乏一定的数据信息,如果产品子样充裕或资源允许的话,可以后续开展加速寿命相关试验工作,对综合应力的筛选寿命影响进行定量分析。

(下转第 129 页)

多层次防雷系统,通过可靠接地、规范布线、过电压及过电流保护、良好的屏蔽和软件设计等措施,组织好职能部门进行防雷安全定期检测,才能确保电子设备、人员、建筑物等的安全,最大限度地预防和减轻雷电对电子设备造成的损坏,为全面提高新形势下我军信息化作战保障能力做出更大的贡献。

参考文献:

[1] 丁志尧,宋文武,方重华,等.对电子设备的雷电浪涌防

护[J].装备环境工程,2009,6(6):84—87.

- [2] 李景禄,王林.现代防雷技术[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [3] GB 50343—2009,建筑物电子信息系统防雷技术规范[S].
- [4] 林水龙,任永强.空军军械通用物资储存管理[M].徐州:徐州空军学院,2007.
- [5] 黄国全.对现代电子信息系统综合防雷技术的分析[J].安防科技,2006(12):17—19.

(上接第86页)

4 结语

通过对液环式角加的结构特性和使用环境进行分析,对其最易于导致故障的空化现象进行了机理研究,讨论了从角加生产工艺上改善的方法,制定出一种对角加非常有效的综合应力筛选方法。根据该筛选方法对某型角加进行了筛选,结果统计产品空化故障率达到20%,有效发现和剔除了相当一部分故障产品,较好地避免了产品装备后整机出现故障。在充分分析装备工作环境和部件故障的机理特性基础上研究特定的筛选方法,对于其它同类产品提高筛选效果、提高装备工作可靠性和环境适应性具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 王献孚.空化泡和超空化泡流动理论及应用[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 王涌泉,雷平森,冯睿.力学环境试验技术[M].西安:西北工业大学出版社,2003.
- [3] 施建荣,王晓侠,党弦.装备全寿命环境剖面与任务剖面[J].装备环境工程,2010,7(2):19—20.
- [4] GJB 1032—90,电子产品环境应力筛选方法[S].
- [5] JJG 948—1999,数字式电动振动台试验系统[S].
- [6] GB/T 5170.14—2009,电工电子产品环境试验基本参数检验方法振动(正弦)试验用电动振动台[S].