

环境试验与评价

星用镉镍蓄电池组的充退磁效果研究

李娜, 耿晓磊, 张文彬, 肖琦, 张艳景, 王琪

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 目的 研究国内低轨道卫星常用的储能电源镉镍蓄电池组的充退磁效应。方法 在零磁场环境下, 研究不同的充退磁参数(强度、频率、波形等)与充退磁效果的关系, 考察其抗磁污染的能力以及不同的退磁场对其磁效应的影响。结果 镉镍蓄电池组比较容易充磁, 退磁强度为 4.5 mT, 频率为 1.5 Hz, 三方向退磁效果比较好。结论 提出了适合镉镍蓄电池组的充退磁参数, 提高了航天器部件磁试验的可靠性。

关键词: 镉镍蓄电池组; 充磁; 退磁; 磁试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.008

中图分类号: TJ861; V416 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0039-05

Magnetizing and Demagnetizing of Ni-Cd Battery for Satellites

LI Na, GENG Xiao-lei, ZHANG Wen-bin, XIAO Qi, ZHANG Yan-jing, WANG Qi

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the effect of magnetizing and demagnetizing of Ni-Cd battery pack power storage commonly used in low-orbit satellite. **Methods** The relationship between different magnetizing/demagnetizing parameters (frequency, waveforms, intensity, etc.) and the magnetizing/demagnetizing results were analyzed in the zero-magnetic field environment. Furthermore, we studied the capacity of anti-magnetic pollution of battery pack and the effect of different demagnetization field on its magnetic performance. **Results** The results showed that Ni-Cd battery pack was prone to magnetization, and the three-direction demagnetization effect was better when the demagnetization field was 4.5 mT and the frequency was 1.5 Hz. **Conclusion** This paper proposed the suitable magnetization/demagnetization parameters for Ni-Cd battery pack, which improved the reliability of spacecraft magnetism control.

KEY WORDS: Ni-Cd battery pack; magnetizing; demagnetizing; magnetic test

卫星在地面会经历运输、存储、试验及发射等不同的磁场环境^[1-2]。由于其结构和性能的需要, 总要不可避免地使用一些永磁材料和感磁材料, 其使用的

永磁材料产生的电流回路会使航天器具有一定的磁矩, 软磁材料受到环境磁场的磁化也会产生一定的磁矩^[3-5], 航天器的磁矩与空间磁场相互作用产生的干

收稿日期: 2015-10-12; 修订日期: 2015-11-10

Received: 2015-10-12; Revised: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21277014)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(21277014)

作者简介: 李娜(1984—), 女, 山东人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器磁性测量与控制。

Biography: LI Na(1984—), Female, from Shandong, Master, Engineer, Research focus: magnetic measure and control of spacecraft.

扰力矩,会干扰航天器的姿态和轨道。卫星在长期的轨道存留时间中,由于空间磁场与其自身磁矩相互作用的累计,会对卫星的姿态造成较大的影响。例如对于自旋稳定卫星,这种作用会使其轴发生转动,增加卫星姿态控制系统的负担,使卫星的可靠性降低,从而影响卫星的性能和寿命。另外,航天器的剩磁还会对其自身携带的磁性探测仪器产生影响,磁强计的测试精度会被卫星自身的磁性干扰,影响探测任务。因此需要在发射前对卫星及其部件进行退磁试验,对卫星的磁性加以控制。

随着我国空间事业的发展,对卫星磁性提出了更高的要求,比如正在研制的ZH-1卫星,将运行于高度为507 km,倾角为97°的近地轨道上,主要用于探索地震前兆信息、空间环境监测预报和地球系统科学研究。该卫星的磁性指标就要比普通卫星严格得多,整星的每一个部组件都要进行磁测试,包括充退磁试验、磁补偿等。由于部件充退磁试验所需的磁场强度及频率直接影响充退磁的效果^[6-7],因此对卫星中的磁性敏感部件进行充退磁试验参数研究,对低轨卫星的磁性控制水平具有重要意义。

镉镍蓄电池组是卫星磁性的主要来源之一,也是卫星容易受到磁污染的部件^[8]。其在卫星发射前、发射过程中以及卫星在轨运行期间进行能量供给,是航天器重要的贮能装置^[9]。因此文中研究了镉镍蓄电池组在不同充、退磁环境下的磁性状态及所产生的效应,找到其合适的充退磁参数,这对整星及其部件的磁性控制、提高磁试验的可靠性具有重要作用。

1 研究过程

文中的研究对象为镉镍蓄电池组,是空间飞行器电源系统主要的储能装置,是我国长寿命卫星以及神舟飞船采用的贮能电源。

试验在零磁场的环境下进行,通过调节充退磁系统的参数,包括充磁强度、退磁方向、退磁频率、退磁波形、退磁强度等,利用磁通门磁强计测试镉镍蓄电池组的磁矩变化。试验所用仪器均为自研。

2 镉镍蓄电池组充磁效果及机理分析研究

2.1 充磁效果

充磁就是对航天器加一个直流稳恒磁场,磁场强度的选择主要是考虑航天器在加工、运输、环境试验以

及发射过程中可能经受的最大环境场,了解恶劣磁场环境对航天器的影响,考察其抗磁污染的能力。在充磁试验中,一般采用直流充磁,稳恒磁场,磁感应强度在0.5~2 mT之间,地磁场的值仅为0.05 mT,对充磁效果的影响很小。为了使试验更精确,在零磁场下对镉镍蓄电池组进行了不同强度的充磁试验,主要目的是考察其抗磁污染的能力,具体结果见表1。

表1 不同充磁强度下磁矩测试结果

Table 1 Measurement results of magnetic moment under different magnetization intensity

序号	状态	$M_x/(\text{mA}\cdot\text{m}^{-2})$	$M_y/(\text{mA}\cdot\text{m}^{-2})$	$M_z/(\text{mA}\cdot\text{m}^{-2})$	$M/(\text{mA}\cdot\text{m}^{-2})$
1	1 mT 充磁	12	15	243	244
2	1.5 mT 充磁	51	536	127	553
3	2 mT 充磁	126	1209	-80	1218

从以上对蓄电池组磁矩的测试来看,镉镍蓄电池组的磁性非常容易受到磁场的干扰,在1~2 mT的环境磁场中磁性改变量达到5~6倍以上。镉镍蓄电池组之所以有这么大的变化主要是由蓄电池中的镍金属造成的,下面就探讨一下镉镍蓄电池组的磁性机理。

2.2 磁性机理分析

镉镍蓄电池组的磁性主要来源于其中的镍金属,镉是抗磁性物质,磁性较弱,而镍则是典型的铁磁性材料,在外加磁场作用下可以产生与外加磁场相同的强烈的附加磁场,也就是自磁化^[10]。磁化有两种机制:磁畴壁的位移;磁畴磁矩的一致转动^[11-12]。铁磁性材料的磁化曲线如图1所示。铁磁性物质的磁化强度随着外加磁场 H 的增加而增大,直到饱和 B_s 。整个磁化过程分为4个阶段:“1”为可逆磁化阶段,对于铁磁性材料来说,此阶段的机制主要是畴壁位移;“2”为不可逆磁化阶段,也就是说如果外加磁场 H 回到0,磁化强度 B 不会按原路返回,而是沿着另一条曲线衰退,如图1曲线 ab 所示;“3”为趋近饱和阶段,这时磁畴磁矩的

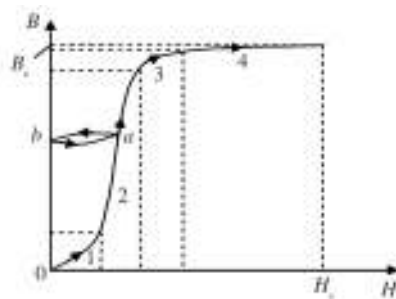


图1 磁化曲线

Fig.1 Magnetization curve

转动起主要作用;“4”为饱和磁化阶段。

铁、钴、镍都属于铁磁性材料,相比之下镍的铁磁性较弱,其自发磁化强度为 $521 \times 10^{-4} \text{T}$ 。在磁化阶段,其可逆过程很短,因此镍的磁性在比较小的磁场范围内就会有很大的变化。

3 退磁效果及机理分析研究

在退磁以前,材料内部磁畴存在一定的取向,对外显示出磁场。退磁就是通过外加交流磁场,将磁畴的固定取向打散。研究蓄电池组的退磁效果主要从退磁形式、退磁方向、退磁频率、退磁强度四个方面进行。

3.1 退磁方向对退磁效果的影响

对蓄电池组三个方向加频率 $f=0.5 \text{ Hz}$,时间 $t=100 \text{ s}$,强度 $H=4.5 \text{ mT}$ 的退磁场,结果见表2。

表2 不同退磁方向磁矩测试结果

Table 2 Measurement results of magnetic moment in different demagnetization directions

序号	状态	$M_x/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_y/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_z/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$
1	z方向退磁	71	546	-35	552
2	x,z方向退磁	19	110	-29	115
3	x,y,z方向退磁	9	-15	-10	20

从表2数据中可以看出,单方向退磁或者双方向退磁都不能完全起到退磁的效果。实验证明,虽然退磁试验是将材料中磁畴的固有取向打散,但是发生改变的只是退磁方向磁矩的变化,因此在退磁试验中,对产品进行三个方向退磁是十分有必要的。

3.2 退磁频率对退磁效果的影响

交流退磁是将航天器放置在按一定规律(直线或指数)衰减的交变电场中,试件不动,交流磁场的频率会影响退磁效果。设置退磁时间和强度不变,改变退磁频率,对蓄电池组的磁矩进行了测试,具体数据见表3。

表3 不同退磁频率的磁矩测试结果

Table 3 Measurement results of magnetic moment under different demagnetization frequency

序号	退磁频率 f/Hz	$M_x/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_y/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_z/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$
1	0.1	-45	55	-129	148
2	0.5	-9	15	-35	39
3	1.0	-6	17	-20	27
4	1.5	-5	15	-9	18
5	2.0	-14	18	-42	48

从图2中可以看出,随着退磁频率的增加,退磁效果是逐渐变好的,但是当频率达到 2.0 Hz 后,退磁效果反而下降。从试验结果来看,对于蓄电池组来说,退磁频率在 $0.5 \sim 1.5 \text{ Hz}$ 并没有明显的区别,效果都比较好。这表明并不是退磁频率越大,退磁效果越好。

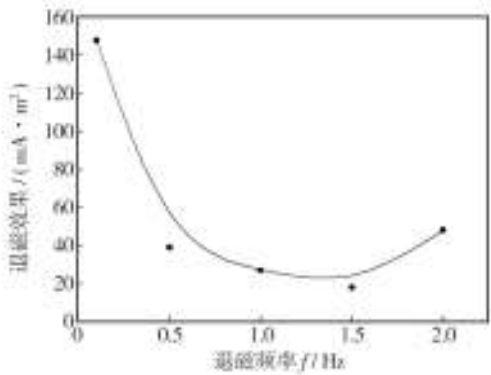


图2 蓄电池组退磁频率与退磁效果的关系

Fig.2 The relationship between demagnetization frequency and re-sults of Ni-Cd battery pack

3.3 退磁波形对退磁效果的影响

任何一个函数 $f(x)$,如果对任意的 $x \in (-\infty, +\infty)$ 收敛,则它的傅立叶变换为:

$$f(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \tag{1}$$

按照式(1),矩齿波、三角波都可以分解成不同大小频率的正弦波的叠加。矩齿波、三角波分解出的高频谐波部分会连带产生比较大的涡流,在退磁过程中,频率越高,所产生的涡流损耗就越大,相应的退磁效果就越不明显。因此都选择频率单一的低频正弦波形^[13],减小交流磁场中高频谐波的影响。正弦波中线性衰减和指数衰减的测试结果见表4。

表4 不同退磁形式磁矩测试结果

Table 4 Measurement results of magnetic moment in different demagnetization manner

序号	状态	$M_x/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_y/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_z/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$	$M/(\text{mA} \cdot \text{m}^{-2})$
1	线性退磁	7	8	-5	12
2	指数退磁	13	1	-9	15

从试验结果可以看出,线性退磁与指数退磁的退磁效果区别不是很明显,二者相差不大。试验过程中一般选用指数衰减形式。

3.4 退磁强度对退磁效果的影响

退磁试验是通过周期性地减少磁滞环,逐步地、

持续地减少磁滞曲线的面积到0,使材料的磁畴不规则排列。退磁过程中退磁场的强度会随着时间的延长不断减小,直到为0。这里的退磁强度指退磁场的最大值,对蓄电池组加 $f=0.5\text{ Hz}$, $t=100\text{ s}$,强度 H 逐渐变化的退磁场,试验结果见表5。

表5 不同退磁强度下磁矩测试结果

Table 5 Measurement results of magnetic moment under different demagnetization intensity

序号	退磁强度/mT	$M_1/(\text{mA}\cdot\text{m}^{-2})$	$M_2/(\text{mA}\cdot\text{m}^{-2})$	$M_3/(\text{mA}\cdot\text{m}^{-2})$	$M/(\text{mA}\cdot\text{m}^{-2})$
1	3	-6	17	-40	44
2	4.5	-9	15	-35	39
3	5	16	7	8	20

如图3所示,退磁最大磁场的选择将直接影响退磁的效果。初始磁场强度的最大幅值等于或超过材料的最大矫顽力,可以较好地退掉饱和剩磁,初始磁场值选择低了,起不到良好的退磁效果,但是磁场值太大,可能会对含有磁性的元器件造成影响,使其工作性能减退。从数据上看,3~5 mT退磁都起到了较好的效果,说明镍镉蓄电池组比较容易退磁。这是由于镍的存在,镍的起始磁导率较高,畴壁较厚,矫顽力、自发磁化强度较低,极容易达到饱和磁化,同时又比较容易退磁。

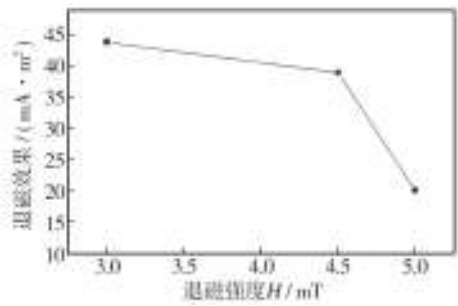


图3 蓄电池组退磁强度与退磁效果的关系

Fig.3 The relationship between demagnetization intensity and results of Ni-Cd battery pack

3.5 镍镉蓄电池组退磁机理分析

航天器的退磁一般选用交流退磁,介质的磁化状态沿着一次比一次小的磁滞回线,最后回复到未磁化的状态,退掉饱和剩磁,如图4所示。

通过上述蓄电池组的退磁效果分析,影响退磁效果的主要参数是退磁方向、退磁频率和退磁强度。

从图2中可以看出,频率越大并不一定退磁效果就好,这可以认为是材料的趋肤效应和涡流损耗导致

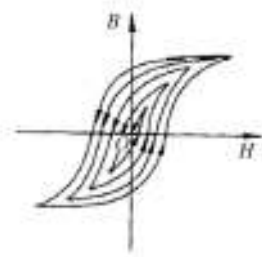


图4 退磁的磁滞回线

Fig.4 Hysteresis loop of demagnetization

的。涡流就是材料在退磁过程中产生的感应电流^[14],该电流流线呈闭合漩涡状,强大的涡流在金属内流动时,会释放出大量的焦耳热,从而造成能量的损耗。根据能量守恒定律,改变材料内部磁畴取向所需的能量自然就会减少,因此退磁效果有所下降。

在交变磁场中,会存在趋肤效应的现象^[15-16],随着频率的增大,磁感应强度的振幅逐渐向材料表面集中,可能使导体材料内部完全没有磁场,磁场只集中在导体材料表面的一薄层中,这就是趋肤效应。趋肤效应的大小通常用趋肤深度 d_s 来表示:

$$d_s = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\mu_0\sigma}} = \frac{503}{\sqrt{f\mu\sigma}} \quad (2)$$

式中: f 为频率; μ 为磁导率; σ 为电导率。

从式(2)中可以看出,频率越高,感生电动势就越大,电导率越高,产生的涡流也越大,此时趋肤效应也会越明显。因此,在进行退磁试验中,需要选择合适的退磁频率,既能达到良好的退磁效果,又能减少涡流损耗。

从图3中可以看出,3~5 mT都已经达到了将材料磁畴打散所需的能量,退磁强度的选择主要是看退磁场的能量是否大于退磁材料磁场的能量^[17],也就是说只有退磁场在材料处的磁感应强度大于材料表面处的磁感应强度,退磁才有效果,但是材料表面处的磁感应强度很难测到。可以将材料的磁场看成偶极子磁场^[18],偶极子所产生的磁场为:

$$B = \frac{\mu}{4\pi} \frac{3\vec{m} \cdot \vec{e}_r \vec{e}_r - \vec{m}}{r^3} \quad (3)$$

从式(3)中可以看出,磁感应强度按照半径 r 的3次方衰减。将材料中心设为坐标原点,材料边界距坐标原点的距离为 r_0 ,磁场测量点距坐标原点的距离为 r_1 ,测量到的磁感应强度为 B_1 ,那么材料表面的磁感应强度 B_0 为:

$$B_0 = B_1 \frac{r_1^3}{r_0^3} \quad (4)$$

在计算出材料表面磁感应强度以后,就可以根据这个值选择合适的退磁场。只要选择的幅值大于材料表面的磁场,退磁效果就不会有明显的差别。从表5的数据中可以看出,3~5 mT退磁差别并不大,一般在试验中会选择5 mT。

4 结论

通过对镉镍蓄电池组充退磁试验的研究,可以得出以下结论。

1) 由于镍金属的存在,镉镍蓄电池组的磁性容易受到环境磁场的干扰,比较容易充磁。

2) 三个方向退磁的效果明显优于单方向或者双向方向。

3) 退磁频率越大,退磁效果不一定越好,频率在1.5 Hz比较好,既达到了良好的效果,又减少了涡流损耗。

4) 对于蓄电池组来说,线性退磁与指数退磁效果差别不大。

5) 蓄电池组是比较好退磁的,3~5 mT退磁都起到了较好的退磁效果,一般选用5 mT。只要选择的幅值大于材料表面的磁场,退磁效果就不会有明显的差别。

后续将对卫星常用的磁性材料进行充退磁效应研究,考察材料的磁性变化,为整星磁试验参数优化提供依据。

参考文献:

- [1] 陈斯文. 卫星磁洁净的控制和测量[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 797—800.
CHEN Si-wen. Control and Measure of Satellite Magnetic Cleanliness[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 797—800.
- [2] STEM T G, DELAPP S. Techniques for Magnetic Cleanliness on Spacecraft Solar Arrays[C]// 2nd International Energy Conversion Engineering Conference. Rhode Island: AIAA, 2004.
- [3] FAN Y, HERMANN L, JAN R, et al. Characterization of CHAMP Magnetic Data Anomalies: Magnetic Contamination and Measurement Timing[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7): 1—11.
- [4] 陈斯文, 黄源高, 李文曾. 双星星上部件磁测及磁测设备[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 893—897.
CHEN Si-wen, HUANG Yuan-gao, LI Wen-zeng. Magnetic Measurement of Double Star Instrument and Magnetic Measuring Equipment[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(4): 893—897.
- [5] 肖琦, 史尧宜, 易忠, 等. 某型号卫星磁性分析与控制[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(6): 731—734.
XIAO Qi, SHI Yao-yi, YI Zhong, et al. Magnetism Analysis and Control for A Satellite[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(6): 731—734.
- [6] 易忠. “TC-1/2”卫星镍氢电池磁性控制方法研究[J]. 航天器环境工程, 2003, 20(2): 28—31.
YI Zhong. Research on Magnetic Control Method of Nickel Hydrogen Battery of “TC-1/2” Satellite[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2003, 20(2): 28—31.
- [7] 李荣福. 地磁场中卫星磁测试环境与设备[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 72—79.
LI Rong-fu. Satellite Magnetism Tests for Environment and Equipments in Geomagnetism[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(1): 72—79.
- [8] PRIMDAHL F, RISBO T, MERAYO G, et al. In-Flight Spacecraft Magnetic Field Monitoring Using Scalar/Vector Gradiometry[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(6): 1563—1569.
- [9] 李垚, 谢守韞, 巧学荣, 等. “天绘一号”卫星镉镍蓄电池组及其在轨性能介绍[J]. 遥感学报, 2012(S1): 69—73.
LI Yao, XIE Shou-yun, QIAO Xue-rong, et al. The Introduction of Ni-Cd Battery of Mapping Satellite1 and Its on Orbit Performance[J]. Journal of Remote Sensing, 2012(S1): 69—73.
- [10] 杨超. 金属磁弹、磁记忆检测信号采集处理系统的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
YANG Chao. The Research of Metallic Magneto-elasticity and Magnetic Memory Testing Signal Acquisition and Processing System[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009.
- [11] SAHASHI M, KOBAYASHI T, DOMON T, et al. A New Contact Amorphous Torque Sensor with Wide Dynamic Range and Quick Response[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1988, 23(5): 2194—2196.
- [12] MEHLEM K. Magnetic Properties of the Cluster I and II Spacecraft[R]. 11 ESA/ESTEC Working Papers, 2000.
- [13] 邹俭英, 李洪宇. 可逆磁化区对退磁过程的影响研究[J]. 大学物理, 2011, 30(12): 45—47.
ZOU Jian-ying, LI Hong-yu. Study on Effects of Reversible Magnetic Area on Demagnetization Process[J]. College Physics, 2011, 30(12): 45—47.
- [14] 易忠. 卫星整星充退磁机理研究[J]. 航天器环境工程, 2003, 20(4): 1—12.
YI Zhong. Research on Magnetizing and Demagnetizing Mechanism of Satellites[J]. Spacecraft Environment Engineer

(下转第143页)

- [5] 张立波,王宏力,陈聪,等. 基于相似电子产品信息的可靠性评估方法[J]. 航天控制,2012,30(10):84—87.
ZHANG Li-bo, WANG Hong-li, CHEN Cong, et al. The Method of Reliability Assessment for Electronic Products Based on Multiple Similar Samples[J]. Aerospace Control, 2012,30(10):84—87.
- [6] ZHANG Z, YANG Z. Fuzzy Mathematics Assessment in the Evaluation of Air Quality[C]// 2011 International Conference on Multimedia Technology. ICMT, 2011:6378—6381.
- [7] GUO Z, TIAN J. Discussion about Similarity Measures in Pattern Recognition of Fuzzy Information[C]// 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops. CISW, 2007:299—303.
- [8] 方明,李学京,柳京爱. 有相似产品信息情形下的可靠性评定方法[J]. 数学的实践与认识,2008,38(6):107—112.
FANG Ming, LI Xue-jing, LIU Jing-ai. An Assessment Method of the Reliability for the Similar Equipment Which has Similar Product Information[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008,38(6):107—112.
- [9] 张会奇,陈春良,曹玉坤,等. 基于相似系统理论的装甲车辆发动机使用状态评价研究[J]. 装备环境工程,2013,10(6):37—40.
ZHANG Hui-qi, CHEN Chun-liang, CAO Yu-kun, et al. Evaluation Study on Service Status of Armored Vehicle Engine Based on the Similarity System Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013,10(6):37—40.
- [10] 杜丽,张晗亮,黄洪钟,等. 模糊相似产品法与综合评判法结合的柴油机可靠性预计[J]. 电子科技大学学报,2010,39(4):629—633.
DU Li, ZHANG Han-liang, HUANG Hong-zhong, et al. Combining Fuzzy Similar Product and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Reliability Prediction of Diesel Engine[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010,39(4):629—633.
- [11] 郭海宽,赵新文,段孟强,等. 基于最小割集的系统可靠性预计[J]. 四川兵工学报,2014,35(3):148—152.
GUO Hai-kuan, ZHAO Xin-wen, DUAN Meng-qiang, et al. Reliability Prediction Model Based on Minimal Cut Sets[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014,35(3):148—152.
- [12] XU Ying, SHAO Wen-hua. Groundwater Quality Evaluation in Yang Village by Fuzzy Mathematics Method[C]// 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation. ICDMA, 2010:790—794.
- [13] 骆明珠,康锐,刘法旺. 电子产品可靠性预计方法综述[J]. 电子科技技术,2014,1(2):246—256.
LUO Ming-zhu, KANG Rui, LIU Fa-wang. A Review of Reliability Prediction Methods for Electronic Products[J]. Electronic Science & Technology, 2014,1(2):246—256.
- [14] 李瑞莹,康锐,党炜. 机械产品可靠性预计方法的比较与选择[J]. 工程机械,2009,40(5):53—57.
LI Rui-ying, KANG Rui, DANG Wei. Comparison and Selection of Reliability Prediction Method for Mechanical Products[J]. Construction Machinery and Equipment, 2009,40(5):53—57.
- [15] ORONEL C, AMARIS C, VALLES M, et al. Experiments on the Characteristics of Saturated Boiling Heat Transfer in a Plate Heat Exchanger for Ammoniac/Lithiumnitrate and Ammonia/(Lithium Nitrate + Water) [C]// 2010 3rd International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies Theory and Applications. THETA, 2010:217—225.
- [16] YU Liang-jian, ZHANG Yan-feng, ZHOU Jian-xin. Application of Domestic super Large Scale Plate Shell Heat Exchanger in Petrochemical Units[J]. Petro Chemical Equipment, 2010,39(5):69—72.
- [17] LI B, LIU J, LIU D. Reliability Analysis on Zero-failure Data of Missile Power System[C]// 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science & Electronic Commerce. AIMSEC, 2011:5722—5725.

(上接第43页)

- ing, 2003,20(4):1—12.
- [15] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,1985.
ZHAO Kai-hua, CHEN Xi-mou. Electromagnetics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1985.
- [16] ANGLE E E, BASTOW J G, CHARAK M T, et al. Assessment and Control of Spacecraft Magnetic Fields[R]. NASA SP-8037, 1970.
- [17] EICHHOM W L. A New Method for Determining the Magnetic Dipole Moment of a Spacecraft from Near-field Data[R]. NASA Technical Memorandum X—63765, 1969.
- [18] FRANKLIN H C, SETH W. Magnetic Shielding of Interplanetary Spacecraft Against Solar Flare Radiation[R]. NASA-CR-195539, 1993.