基于灰色预测的加速试验机理一致性判定方法

潘晓茜 康 锐

(中国电子科技集团电子科学研究院, 北京 100041) (北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 确定失效机理一致性条件是保证加速试验正确性的前提之一. 由于现有的一致性判定方法只能利用加速试验数据,不能指导加速试验设计,因此需要一种基于强化试验数据的一致性判定方法. 针对工程中强化试验数据少的特点,选取可以处理少数据的灰色预测,给出了一致性判定的新方法及流程. 该方法通过将灰色预测中的 GM(1,1)和等维新息模型相结合,找出强化试验数据的趋势改变点,在加速试验之前得到机理一致性变化的条件. 通过在加速度计中的应用案例,验证了该方法的可行性.

关 键 词: 加速试验; 机理一致性; 强化试验; 灰色预测; GM(1,1); 等维新息模型

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)06-0787-05

Identification method of failure mechanism consistency for accelerated testing based on grey forecasting

Pan Xiaoxi

(China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Kang Rui

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Consistency of failure mechanism identification is one of the preconditions of correctness of accelerated testing design. The existing identification methods of failure mechanism consistency are based on data from accelerated testing which can not guide the design of accelerated testing. Therefore, the method based on data from enhancement testing is needed. The method proposed was based on grey prediction for lack of data from enhancement testing in engineering. The new identification method and flow of failure mechanism was also given. According to the combination of GM(1,1) and equal dimension model, the change point of trend of data from enhancement testing was found, as well as the level of consistency of failure mechanism before the accelerated testing. Finally, the feasibility of the method was validated by a practical example on accelerometer.

Key words: accelerated testing; failure mechanism consistency; enhancement testing; grey forecasting; GM(1,1); new information and equal dimensional model

随着科学技术的发展,高可靠长寿命产品越来越多,这使得加速试验技术越来越受到重视. 加速试验中有一条基本假定,即:失效机理的一致性. 它是指在不同的应力水平下产品的物理或化学变化过程有相同的本质[1]. 满足该假定是保证加速试验结果正确性的前提,因此需要对一致性的判定方法进行研究. 目前,国内外判定一致性的方法有 3 种:基于加速模型参数不变的方法[2-5],基于统计的方法[6-9],基于试验观察的方法[10-12]. 现有的 3 种一致性判定方法都有各自的优点和局限性,但他们有一些共同的缺点,即:产品或应力水平复杂时缺乏说服力[1];均为加速试验做完之

收稿日期: 2012-07-13; **网络出版时间**: 2012-12-10 17:09

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121210.1709.004.html

作者简介: 潘晓茜(1987-),女,北京人,助理工程师,panxiaoxi1987@yeah.net.

后的验证,无法在加速试验之前进行判定从而指导加速试验.这就需要一种基于强化试验数据的一致性判定方法.在工程中强化试验数据往往很少,而灰色理论正是处理少数据不确定性问题的理论[13-15].因此,本文引入灰色理论中的灰色预测方法对产品的强化试验数据进行处理,得到一种新的一致性判定方法.该方法能克服现有方法只能事后验证的缺陷,只需要很少的数据就可以进行判定,并且可以广泛应用于各种产品.本文给出了该方法在某加速度计中的应用实例.

1 灰色预测

少数据的不确定性被称为灰性,灰色理论处理的正是灰性问题.灰色预测是基于灰色动态模型(GM,Grey Dynamic Model)的预测."预测未来"本质上是个灰色问题,因为一个未出现的、没有诞生的未来系统,必然是既有已知信息、又有未知信息的系统,且处于连续变化的动态之中.灰色预测具有需要的原始数据少,计算简单,不需要多因素数据,既可以用于近期、短期预测,也可用于中长期预测,以及精度较高的优点.本文尝试用灰色预测对强化试验数据进行处理,因为灰色预测可以通过较少的数据发现和掌握系统发展规律,从而也可以判断系统的规律何时发生变化.

1.1 基于GM(1,1)的灰色预测方法

GM(1,1)是包含单变量的一阶微分方程构成的模型,是最常用的一种定量灰色预测.GM(1,1)模型是对原始数据序列作一次累加生成(AGO,Accumulated Generating Operation),使生成序列呈一定规律.设序列 $x^{(0)}$ 为

$x^{(0)}=(x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n))$,其中 n 为样本数.对 $x^{(0)}$ 进行一阶累加生成,即1-AGO,得

$$x^{(1)}(k)=\sum_{i=1}^{k}x^{(0)}(i)\quad k=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

$$x^{(1)}=(x^{(1)}(1),x^{(1)}(2),\cdots,x^{(1)}(n)) \tag{2}$$

设 $Z^{(1)}$ 为 $x^{(1)}$ 的紧邻均值序列,即

$$Z^{(1)}(k)=0.5x^{(1)}(k)+0.5x^{(1)}(k-1)\quad k=2,3,\cdots,n \tag{3}$$

$$Z^{(1)}=(Z^{(1)}(2),Z^{(1)}(3),\cdots,Z^{(1)}(n)) \tag{4}$$

则GM(1,1)的灰微分方程模型为

$$x^{(0)}(k)+aZ^{(1)}(k)=b \tag{5}$$

其中,a 为发展系数;b 为灰色作用量.a 反映了数据的发展态势.b 是从输出序列中挖掘出来的数据,反映论数据变化的关系,去确切内涵是灰的.灰色作用量是内涵到外延的具体体现,它的存在是区别灰色模型和一般输入输出模型(黑箱模型)的分水岭,也是灰色系统观的重要标志[15].

记参数列:$\hat{\boldsymbol{\theta}}=[a,b]^{\mathrm{T}}$,用最小二乘法估计 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$.令

$$\boldsymbol{B}=[-Z^{(1)},E]=\begin{bmatrix}-0.5(x^{(1)}(2)+x^{(1)}(1)) & 1\\ -0.5(x^{(1)}(3)+x^{(1)}(2)) & 1\\ \vdots & \vdots\\ -0.5(x^{(1)}(k)+x^{(1)}(k-1)) & 1\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}x^{(0)}(2)\\ x^{(0)}(3)\\ \vdots\\ x^{(0)}(n)\end{bmatrix} \tag{7}$$

则 $\hat{\boldsymbol{\theta}}=[a,b]^{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}$

$\frac{\mathrm{d}x^{(1)}}{\mathrm{d}t}+ax^{(1)}=b$ 为GM(1,1)模型的白化方程,通过 a,b 可以求出白化方程的时间响应函数(白化方程的解)为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=\left(x^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)\mathrm{e}^{-ak}+\frac{b}{a} \tag{8}$$

通过累减还原可得 $x^{(0)}$ 的预测序列:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1)=\hat{x}^{(1)}(k+1)-\hat{x}^{(1)}(k)=(1-\mathrm{e}^{a})\left(x^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)\mathrm{e}^{-ak} \tag{9}$$

上式即为GM(1,1)模型的预测公式.

GM(1,1)模型有一定的适用范围,适用范围跟发展系数 a 有关,计算出 a 值后需考虑 a 的取值[16]:

1)当 $-a\leqslant 0.3$ 时,GM(1,1)可用于中长期预测;

2)当 $0.3<-a\leqslant 0.5$ 时,GM(1,1)可用于短期预测;

3)当 $0.5<-a\leqslant 0.8$ 时,GM(1,1)做短期预测应十分谨慎;

4)当 $0.8<-a\leqslant 1$ 时,应采用残差修正GM(1,1)模型;

5)当 $-a>1$ 时,不宜采用GM(1,1)模型.

1.2 基于等维新息模型的预测方法[16]

在任何一个灰色系统的发展过程中,随着时间的推移,将会不断地有一些随机扰动或驱动因素进入系统,使系统的发展相继受其影响.虽然,GM(1,1)模型可以作为长期预测模型,但真正具有实际意义、精度较高的仅仅是 $x^{(0)}(n)$ 以后的一两个数据,其他更远的数据不是预测数据而是规划性的数据.可以认为越往未来发展,GM(1,1)模型计算的预测数据,其预测意义就越小.随着系

统的发展,老数据的信息意义将逐步降低,在不断补充新信息的同时,及时地去掉老信息,建模序列更能反映系统在目前的特征. 尤其是系统随着量变的积累,发生质的飞跃或突变时,与过去的系统相比,已是面目全非. 去掉已根本不可能反映系统目前特征的老数据,显然是合理的. 此外,不断地进行新陈代谢,还可以避免随着信息的增加,建模运算量不断增大的困难.

GM 模型的建模数据允许做不同的取舍,但必须等距、相邻、不得有跳跃. 在选择建模数据时以最新的实际数据作为参考点,去掉最老的数据,保持数列等维,依次建模,这样建立的模型称为等维新息模型. 等维新息模型的预测效果较好,因为它递补的是系统的实际数据,用信息来调整模型.

2　基于灰色预测的一致性判定方法

基于灰色预测的加速退化机理一致性判定方法的基本思想是:对产品的强化试验数据进行等维新息模型预测,将预测值和实际值进行比较,观察残差是否发生显著变化,若残差发生显著变化,说明产品的发展趋势发生了改变,产品已经发生了质的变化,也就可以认为此时产品的机理发生了变化.

基于灰色预测的加速退化机理一致性判定流程如图 1 所示.

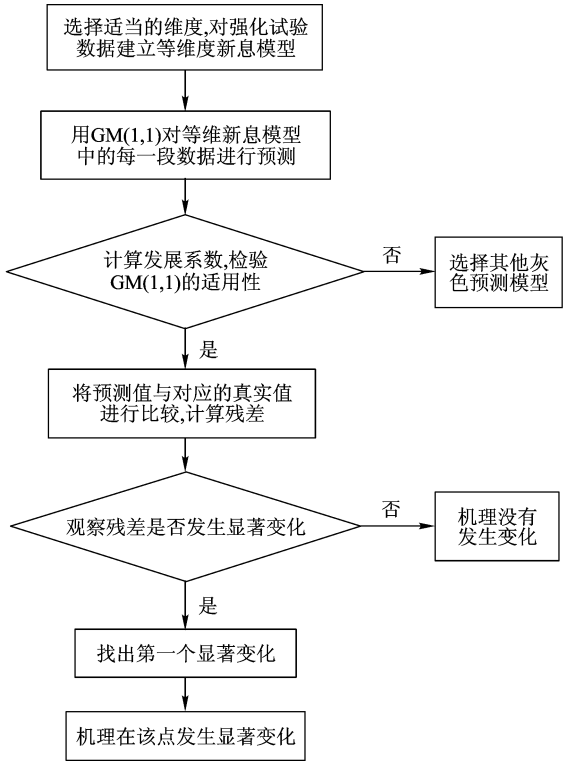


图 1　基于灰色预测的加速退化机理一致性判定流程

3　理想试验验证

设理想序列 1,2 如表 1、表 2 所示.

表 1　理想序列 1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
数据	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

表 2　理想序列 2

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
数据	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20

选择等维新息模型的维度为 4,按上述方法用 MATLAB 对理想序列 1,2 进行 GM(1,1)模型灰色预测. 两个序列各数据段的发展系数如表 3、表 4 所示.

表 3　理想序列 1 各数据段灰色预测的发展系数

原始数据序号	1 ~ 4	2 ~ 5	3 ~ 6	4 ~ 7	5 ~ 8
a	−0.330	−0.249	−0.199	−0.166	−0.143
原始数据序号	6 ~ 9	7 ~ 10	8 ~ 11	9 ~ 12	10 ~ 13
a	−0.125	−0.111	−0.100	−0.091	−0.083

表 4　理想序列 2 各数据段灰色预测的发展系数

原始数据序号	1 ~ 4	2 ~ 5	3 ~ 6	4 ~ 7	5 ~ 8
a	−0.330	−0.249	−0.199	−0.242	−0.249
原始数据序号	6 ~ 9	7 ~ 10	8 ~ 11	9 ~ 12	10 ~ 13
a	−0.199	−0.166	−0.143	−0.125	−0.111

可以看出,两个理想序列的发展系数$-a$均小于 0.5,因此可以用 GM(1,1)模型进行短期预测.

两组理想序列的预测值及残差如表 5、表 6 所示.

表 5　理想序列 1 的预测值、真实值以及残差

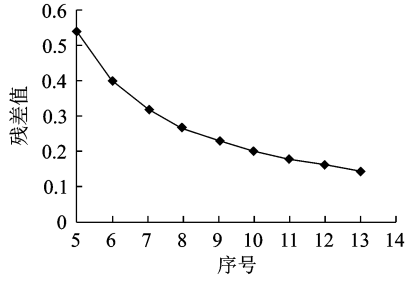
原始数据序号	预测值 $\hat{x}^{(0)}$	真实值 $x^{(0)}$	残差值 $\hat{x}^{(0)}-x^{(0)}$
1 ~ 4	5.534	5	0.534
2 ~ 5	6.401	6	0.401
3 ~ 6	7.321	7	0.321
4 ~ 7	8.267	8	0.267
5 ~ 8	9.229	9	0.229
6 ~ 9	10.200	10	0.200
7 ~ 10	11.178	11	0.178
8 ~ 11	12.160	12	0.160
9 ~ 12	13.145	13	0.145
10 ~ 13	14.13308		

理想序列 1,2 的残差值曲线如图 2 所示. 从图 2 中可以看出,理想序列 1 的残差值没有显著变化,因此可以认为理想序列 1 没有突变;理想序列 2 的残差值在第 7 个点发生显著变化,因此可以认为理想序列 1 在第 7 个点发生突变. 这与实际情况相符,理想序列 1 符合方程 $y=x$,没有发生

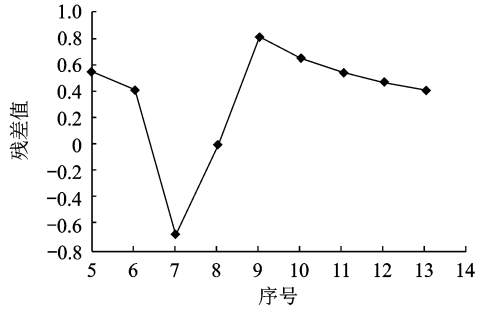
突变;理想序列 2 的前 6 个点符合方程 $y=x$,而从第 6 个点往后符合方程 $y=x/2$,也就是在第 7 个点发生突变. 由此可见,灰色预测可以准确地发现数据的突变点.

表 6 理想序列 2 的预测值、真实值以及残差

原始数据序号	预测值 $\hat{x}^{(0)}$	真实值 $x^{(0)}$	残差值 $\hat{x}^{(0)}-x^{(0)}$
1 ~ 4	5.534	5	0.534
2 ~ 5	6.401	6	0.401
3 ~ 6	7.321	8	−0.679
4 ~ 7	10.000	10	0.000
5 ~ 8	12.802	12	0.802
6 ~ 9	14.642	14	0.642
7 ~ 10	16.535	16	0.535
8 ~ 11	18.458	18	0.458
9 ~ 12	20.400	20	0.400
10 ~ 13	22.356		



a 理想序列 1



b 理想序列 2

图 2 理想序列 1,2 的残差值变化

4 应用实例

本文以某加速度计为例,用灰色预测的方法对其强化试验数据进行处理给出其机理一致性条件.

4.1 加速度计强化试验方案

对加速度计进行高温步进应力试验. 起始温度为 60 ℃,步长为 10 ℃,温度变化速率不超过 5 ℃/min,每一步长停留时间为 1 h,确保加速度计的温度达到热平衡后对加速度计进行在线功能测试以及离线性能参数精度测试. 加速度计强化试验步骤:

1) 高温步进应力试验前,按照四点法测试计算加速度计的零偏(K_0)、标度因数(K_1)和非线性系数(K_2),记录数据.

2) 加速度计处于非工作状态,设定剖面进行试验. 在每一级温度达到保持时间使温度达到热平衡后,将加速度计通电进行功能测试,并记录在 $+1g$ 和 $-1g$ 下的信号输出;将加速度计恢复到常温,并从温箱中取出进行离线精度测试,测试计算得到加速度计的 K_0,K_1 和 K_2. 如果功能测试信号输出正常,则放到温箱中继续下一步进应力试验;若测试信号输出异常,则停止试验.

3) 如果试验达到温箱设备极限,则试验结束.

4.2 一致性判定结果

加速度计的强化试验数据如表 7 所示.

表 7 加速度计强化试验数据

温度/℃	保持时间/h	加速度计状态
60	1	非工作状态
70	1	非工作状态
⋮	⋮	⋮
170	1	非工作状态

选择等维新息模型的维度为 4,按上述方法用 MATLAB 对 K_0,K_1 进行 GM(1,1)模型灰色预测. 两个序列各数据段的发展系数如表 8、表 9 所示.

表 8 K_0 各数据段灰色预测的发展系数

原始数据序号	1 ~ 4	2 ~ 5	3 ~ 6	4 ~ 7	5 ~ 8
a	−0.015	0.000	0.007	0.002	0.032
原始数据序号	6 ~ 9	7 ~ 10	8 ~ 11	9 ~ 12	10 ~ 13
a	0.017	−0.007	0.029	0.034	0.030

表 9 K_1 各数据段灰色预测的发展系数

原始数据序号	1 ~ 4	2 ~ 5	3 ~ 6	4 ~ 7
a	0.000 053	0.000 026	0.000 053	0.000 042
原始数据序号	5 ~ 8	6 ~ 9	7 ~ 10	8 ~ 11
a	−0.000 595	−0.001 352	−0.002 716	−0.004 541
原始数据序号	9 ~ 12	10 ~ 13		
a	−0.004 304	−0.005 167		

可以看出,K_0,K_1 序列的发展系数 $-a$ 均小于 0.3,因此可以用 GM(1,1)模型进行短期和中长期预测.

K_0,K_1 序列的预测值及残差如表 10、表 11 所示.

K_0,K_1 的残差值曲线如图 3 所示.

从图 3 中可以看出,K_0 的残差值在第 6 个点发生显著变化,因此可以认为 K_0 的发展趋势在第 6 个点发生了突变,第 6 个点对应的温度是 100 ℃,即机理在 100 ℃的时候发生了变化;K_1 的残差值在第 8 个点发生显著变化,可以认为 K_1 的

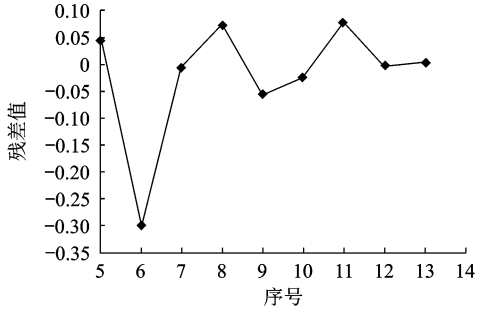
发展趋势在第 8 个点发生了突变,第 8 个点对应的温度是 120 ℃,即机理在 120 ℃的时候发生了变化. 在工程中,为了保证产品的机理不变,在制定加速试验条件时可以更加保守,因此要选择 100 ℃作为机理变化的温度点,加速试验的最高温度不应超过 100 ℃.

表 10　K_0 的预测值、真实值以及残差

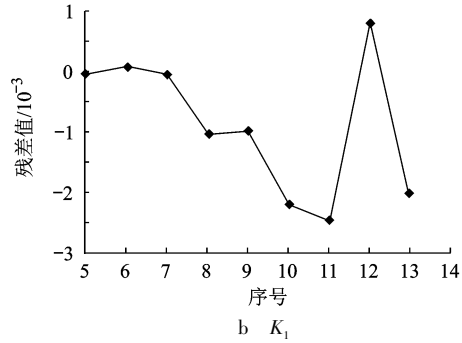
原始数据序号	预测值 $\hat{x}^{(0)}$	真实值 $x^{(0)}$	残差值 $\hat{x}^{(0)}-x^{(0)}$
1 ~ 4	1.336	1.294	0.042
2 ~ 5	1.000	1.298	−0.298
3 ~ 6	1.284	1.29	−0.006
4 ~ 7	1.290	1.217	0.073
5 ~ 8	1.190	1.248	−0.058
6 ~ 9	1.210	1.234	−0.024
7 ~ 10	1.250	1.176	0.074
8 ~ 11	1.149	1.154	−0.005
9 ~ 12	1.110	1.106	0.004

表 11　K_1 的预测值、真实值以及残差

原始数据序号	预测值 $\hat{x}^{(0)}$	真实值 $x^{(0)}$	残差值 $\hat{x}^{(0)}-x^{(0)}$
1 ~ 4	0.850 475	0.850 529	−0.000 054
2 ~ 5	0.850 496	0.850 426	0.000 070
3 ~ 6	0.850 400	0.850 457	−0.000 057
4 ~ 7	0.850 399	0.851 439	−0.001 040
5 ~ 8	0.851 788	0.852 76	−0.000 972
6 ~ 9	0.853 858	0.856 073	−0.002 215
7 ~ 10	0.858 070	0.860 536	−0.002 466
8 ~ 11	0.864 262	0.863 478	0.000 784
9 ~ 12	0.867 457	0.869 464	−0.002 007



a　K_0



b　K_1

图 3　K_0,K_1 残差值变化

5　结 束 语

综上所述,灰色预测可以有效地检验强化试验数据的突变点,进而找出加速退化机理一致性的边界条件. 在检验过程中发现,灰色预测需要的数据量非常少,因此可以有效地解决工程实际中强化试验数据量少的问题,使得加速试验条件可以在加速试验之前进行检验,为正确的设计加速试验奠定了基础.

参考文献（References）

[1] Pan Xiaoxi, Huang Xiaokai, Chen Yunxia, et al. Connotation of failure mechanism consistency and identification method for accelerated testing[C]//PHM-2011 Shenzhen Conference. Shenzhen: IEEE Computer Society, 2011: 1-7

[2] Hu J M, Barker D, Dasgupta A, et al. Role of failure-mechanism identification in accelerated testing[J]. Institute of Environmental Sciences & Technology, 1993, 36(4): 39-45

[3] 郭春生,谢雪松,马卫东,等. 加速试验中失效机理一致性的判别方法[J]. 半导体学报,2006,27(3):560-563
Guo Chunsheng, Xie Xuesong, Ma Weidong, et al. A failure-mechanism identification method in accelerated testing[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(3): 560-563 (in Chinese)

[4] Cui Helen. Accelerated temperature cycle test and coffin-manson model for electronic packaging[C]//Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings Annual. Alexandria, VA, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005: 556-560

[5] 张春华. 步降应力加速寿命试验的理论和方法[D]. 长沙:国防科学技术大学研究生院,2002
Zhang Chunhua. Theory and method of step-down-stress accelerated life testing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002 (in Chinese)

[6] 周源泉,翁朝曦,叶喜涛. 论加速系数与失效机理的不变的条件(I)——寿命型随机变的情况[J]. 系统工程与电子技术,1996(1):55-67
Zhou Yuanquan, Weng Zhaoxi, Ye Xitao. Study on accelerated factor and condition for constant failure mechanism(I)—the case for lifetime is a random variable[J]. Systems Engineering and Electronics, 1996(1): 55-67 (in Chinese)

[7] 周源泉,翁朝曦,叶喜涛. 论加速系数与失效机理的不变的条件(II)——失效为计数过程的情况[J]. 系统工程与电子技术,1996(3):68-75
Zhou Yuanquan, Weng Zhaoxi, Ye Xitao. Study on accelerated factor and condition for constant failure mechanism (II)—the case for failure follows counting process [J]. Systems Engineering and Electronics, 1996(3): 68-75 (in Chinese)

[8] 孙祝岭. 失效机理不变的一个条件[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2008,26(4):6-8
Sun Zhuling. A condition for constant failure mechanism[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2008, 26(4): 6-8 (in Chinese)

(下转第 797 页)

5 结　论

本文以方形房间为环境,进行了 3D 路径规划仿真,结果表明:基于 MILP 的路径规划新算法能使 City-Climber 有效避开所有障碍,在 3D 房间环境内完成从一个表面到另一表面的路径规划.

参考文献(References)

[1] Xiao J, Sadegh A, Elliot M, et al. Design of mobile robots with wall climbing capability[C]//Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, USA: IEEE, 2005: 438-443

[2] Xiao J, Sadegh A. City-Climber: a new generation of wall-climbing robots, chapter 18, climbing and walking robots: towards new applications[M]. Vienna, Austria: I-Tech Education and Publishing, 2007: 383-402

[3] 禹建丽,张晓梅,程思雅,等. 爬壁机器人路径规划研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(15):4748-4751
Yu Jianli, Zhang Xiaomei, Cheng Siya, el al. Approach on path planning for climbing robot [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4748-4751(in Chinese)

[4] UĞUR A. Path planning on a cuboid using genetic algorithms [J]. Information Sciences, 2008, 178(16): 3275-3287

[5] Fu Zhuang, Zhao Yanzheng, Qian Zhiyuan, et al. Wall-climbing robot path planning for testing cylindrical oilcan weld based on voronoi diagram[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006: 2749-2753

[6] 岳荣刚,王少萍. 一种爬壁机器人的动力学建模[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(5):640-644
Yue Ronggang, Wang Shaoping. Dynamic modeling for a climbing robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 640-644(in Chinese)

[7] Kalmár-Nagy T, D' Andrea R, Ganguly P. Near-optimal dynamic trajectory generation and control of an omnidirectional robot[J]. Robot & Autonomous Systems, 2004, 46(1): 47-64

[8] Ogata K. Discrete-time control systems[M]. Second Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1995: 312-321

[9] Richards A, How J P. Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming[C]//Proceeding of the 2002 American Control Conference. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2002: 1936-1941

(编　辑:赵海容)

(上接第 791 页)

[9] 孙祝岭. 失效机理不变的假设检验[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009,27(2):1-5
Sun Zhuling. Hypothesis testing for constant failure mechanism [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 27(2): 1-5(in Chinese)

[10] 吴鸿兵,林震. 某电容器加速贮存寿命试验设计研究[J]. 环境适应性和可靠性,2007(5):17-21
Wu Hongbing, Lin Zhen. Design research of certain capacitor accelerated storage life testing[J]. Environmental Apartability& Reliability, 2007(5): 17-21(in Chinese)

[11] 朱立群,李敏伟,刘慧丛,等. 高强度钢表面镀锌、镉层加速腐蚀试验研究[J]. 航空学报,2006,27(2):341-346
Zhu Liqun, Li Minwei, Liu Huicong, et al. Research of accelerated corrosion test of zinc, cadmium coating on high strength steel [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 341-346(in Chinese)

[12] Kim Jungwoo, Yoon Dongcheol, Jeon Minseok, et al. Degradation behaviors and failure analysis of Ni-BaTiO3 base-metal electrode multilayer ceramic capacitors under highly accelerated life test [J]. Current Applied Physics, 2010, 10(5): 1297-1301

[13] Deng Julong. Control problems of grey systems [J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294

[14] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 2 版. 武汉:华中科技大学出版社,2005:2-4
Deng Julong. The primary methods of grey system theory[M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005: 2-4(in Chinese)

[15] 刘思峰,党耀国,方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004
Liu Sifeng, Dang Yaoguo, Fang Zhigeng. Theory and application of grey system theory[M]. Beijing: Science Press, 2004(in Chinese)

[16] 李小燕. 基于灰色理论的电力负荷预测[D]. 武汉:华中科技大学,2007
Li Xiaoyan. Electric power load forecasting based on grey theory [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007(in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)