

[文章编号] 1007-7405(2016)03-0208-06

真空辅助艇体成型工艺系统的可靠性分析

赵云宝^{1,2}, 陈景锋^{1,2}, 陈清林^{1,2}, 林少芬^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了提高艇体成型质量的可靠性, 以真空辅助树脂艇体成型工艺系统为研究对象。通过分析系统故障形式, 得到工艺环节与系统之间的逻辑关系, 再利用蒙特卡洛法对系统进行可靠性仿真分析, 获得系统可靠性指标及可靠性曲线。该方法得到的结论为游艇生产过程的质量控制提供参考依据。

[关键词] 游艇; 真空辅助工艺; 故障树分析; 可靠性分析

[中图分类号] TB 332; U 671.99 **[文献标志码]** A

Reliability Analysis of the Vacuum Assisted Resin Infusion Process System for the Yacht Hull

ZHAO Yun-bao, CHEN Jing-feng, CHEN Qing-lin, LIN Shao-fen

(1. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Province, Key Laboratory of Ship and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In observation of improving the reliability of hull shape quality, the vacuum assisted resin infusion process system was taken as a reference for empirical studies. A logic relationship between the process and the system was firstly determined via the analysis of the system failure form. The reliability index of the system and the reliability curve were then obtained by employing Monte Carlo method. It shows that the result from the presented method can be used as a reference for the quality control of yacht production process.

Keywords: yacht; vacuum assisted process; fault tree analysis; reliability analysis

0 引言

真空辅助树脂注射 (Vacuum Assisted Resin Infusion, 简称 VARI) 是一种新型复合材料制件成型技术^[1-3], 因其具有成本低、制品性能好、环保以及适合于大型结构件整体成型等优点, 已成功应用于游艇制造领域。但 VARI 工艺过程受到诸多因素的影响, 如人工、材料、模具、设备等, 这些因素容易导致成型艇体壳体出现局部变形、局部富脂等现象。因此, 需要对工艺系统进行可靠性分析, 找出工艺系统的失效原因与薄弱环节, 提高艇体成型质量的可靠性。

在处理复杂系统故障状态与故障原因的不确定性时, Marseguerra M^[4] 等利用遗传算法和 Monte Carlo 仿真来进行优化计算; 王广彦^[5] 等采用贝叶斯网络技术对故障树进行分析; 陈涛^[6] 等将灰色关联度理论用于预测各单元可靠度之间的联系。本文根据系统工作原理, 采用故障树分析和蒙特卡罗相

[收稿日期] 2015-08-01 [修回日期] 2015-12-13

[基金项目] 高校产学研合作资助项目 (2014H6020); 福建省科技厅重点项目 (2015H0006); 福建省自然科学基金资助项目 (2016J01248); 交通部应用基础研究项目 (2014329815100)

[作者简介] 赵云宝 (1992—), 男, 硕士生, 主要从事游艇建造工艺设计研究。通信作者: 陈景锋 (1963—), 男, 教授, 从事动力装置节能与性能优化。

结合的方法, 获得系统可靠性指标及影响可靠度的系统薄弱环节, 并提出可行性改善方法, 以便提高系统可靠性。

1 真空辅助艇体成型工艺原理

真空辅助艇体成型工艺原理分别用工艺流程图及艇体成型设备图说明, 见图1和图2所示。

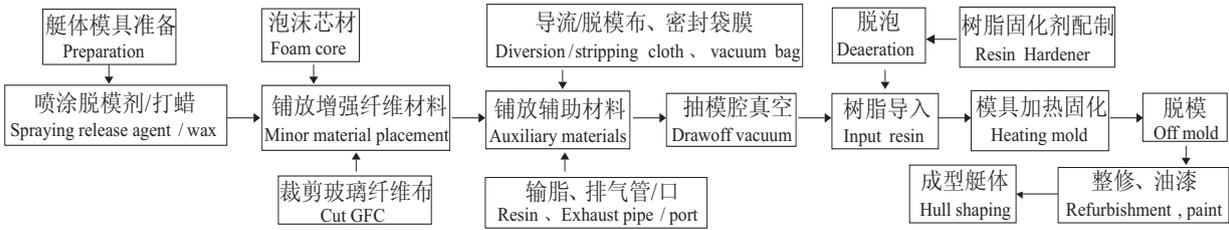


图1 真空辅助艇体成型工艺流程图

Fig.1 The flow diagram of vacuum assisted resin infusion for the yacht hull

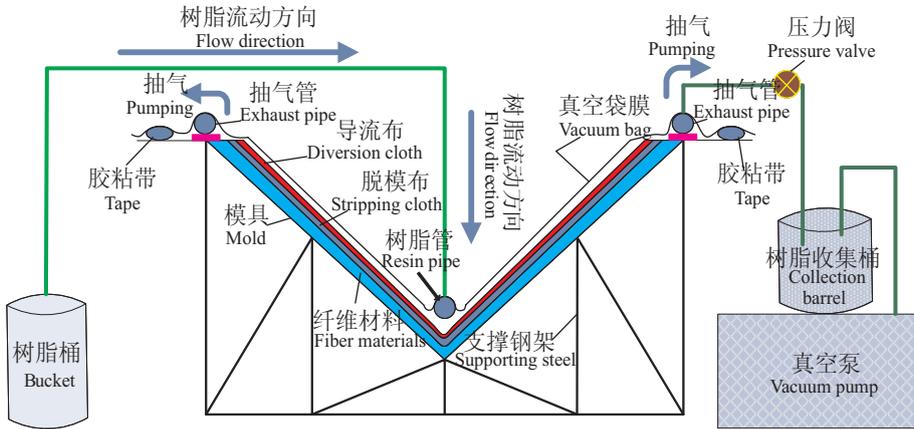


图2 真空辅助艇体成型设备图

Fig.2 The equipment chart of vacuum assisted resin infusion for the yacht hull

2 工艺系统故障树的建立

根据故障树建立确定原则^[7], 选择“艇体成型后存在缺陷”作为该系统故障分析的顶事件。本文艇体成型工艺系统由真空抽气系统故障、真空树脂灌注系统故障、模具支撑架失效等六个中间事件组成。分析工艺环节与系统之间的逻辑关系, 将各底事件用逻辑门联系起来, 得到故障树基本事件列, 如表1所示, 艇体成型工艺系统的故障树如图3所示。本故障树共有13个逻辑门, 34个基本事件。

表1 故障树基本事件

Tab.1 The elementary event of fault tree

| 代码 Code | 事件 Accident | 代码 Code | 事件 Accident | 代码 Code | 事件 Accident |
|----------------|---------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|--|
| T | 艇体成型后存在缺陷 The hull defect | E ₁ | 艇体表面不光泽 Don't shine | E ₂ | 模具质量不合格 Poor-quality |
| E ₃ | 模具支撑架失效 The mould-support failure | E ₄ | 增强材料性能失效 Failure of performance | E ₅ | 树脂未浸渍纤维材料 Resin non-impregnated FRP |
| E ₆ | 纤维渗透率下降 Fiber permeability decline | E ₇ | 真空抽气系统故障 Vacuum-system fault | E ₈ | 真空泵损坏 Vacuum pump doesn't work |
| E ₉ | 抽气管路漏气 Exhaust pipe leakage | E ₁₀ | 真空树脂灌注系统故障 Perfusion system fault | E ₁₁ | 树脂流动速率减慢 Resin flow rate slows |

续表

| 代码 Code | 事件 Accident | 代码 Code | 事件 Accident | 代码 Code | 事件 Accident |
|------------|--|------------|--|------------|---|
| E_{12} | 外部条件控制不当 Improper control | X_1 | 艇体模具底部存在缺陷 Defective bottom of the mold | X_2 | 艇体模具首部存在缺陷 Defective bow of the mold |
| X_3 | 模具支架网格布置不合理 Layout is unreasonable | X_4 | 支架管焊接不牢固 Stent welding unstable | X_5 | 艇体模具侧部存在缺陷 Defective broadside of the mold |
| X_6 | 模具底座钢架焊接不牢固 Steel welding unstable | X_7 | 胶衣喷涂厚度不均匀 Thickness unevenness | X_8 | 阴模表面存在杂质 Presence of impurities |
| X_9 | 上蜡程度未达到要求 Waxing doesn't requirements | X_{10} | 树脂流动速率下降 Resin flow rate slows | X_{11} | 纤维铺层角度不规范 Fiber ply angle irregularities |
| X_{12} | 纤维铺层厚度不合理 Thickness unreasonable | X_{13} | 纤维材料质量不合格 Quality substandard | X_{14} | 真空泵油不干净 Vacuum pump oil isn't clean |
| X_{15} | 真空泵排气阀片磨损 Exhaust valve wear | X_{16} | 电机损坏 Motor doesn't work | X_{17} | 密封件老化 Seal worn |
| X_{18} | 真空袋破裂 Vacuum bag rupture | X_{19} | 抽气口未完全密封 Venting port isn't seal | X_{20} | 人为误操作 Human misoperation |
| X_{21} | 未及时进行维修保养 Not timely maintenance | X_{22} | 管路裂纹 Pipe craze | X_{23} | 阀门磨损 Valve wear |
| X_{24} | 树脂脱泡不完全 Resin air bladder | X_{25} | 树脂粘度较高 Higher resin viscosity | X_{26} | 模腔压力不足 Insufficient pressure |
| X_{27} | 艇体局部出现富脂现象 Excess resin | X_{28} | 注脂口损坏 Injection gate damage | X_{29} | 输脂管堵塞 Resin pipe block |
| X_{30} | 导流网质量不合格 Distribution media substandard | X_{31} | 艇体局部出现干斑现象 Hull local dry patches | X_{32} | 烤箱机损坏 Oven machine damage |
| X_{33} | 厂房工艺温度控制不规范 Temperature substandard | X_{34} | 艇体脱模操作失误 Strip mold operation errors | | |

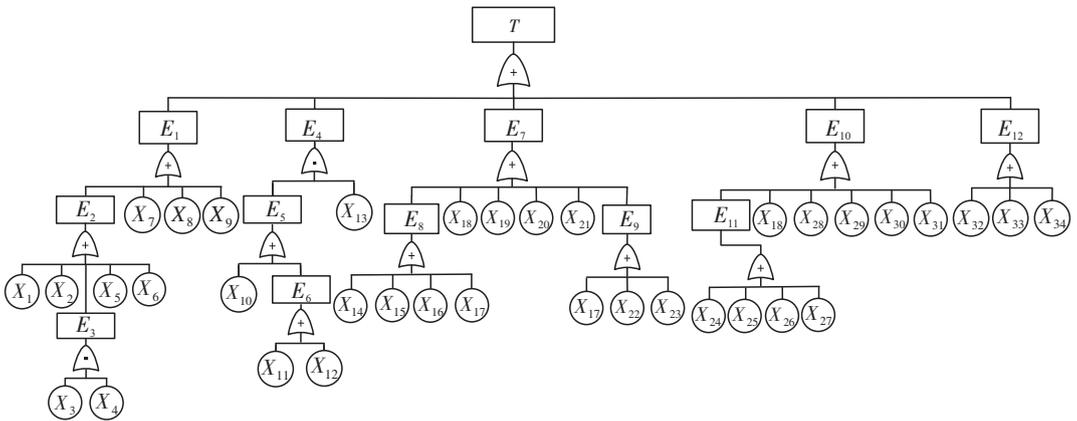


图 3 真空辅助艇体成型工艺系统故障树

Fig. 1 The fault tree of vacuum assisted resin infusion for the yacht hull

3 工艺系统故障树的定性分析与定量计算

3.1 定性分析

导致顶事件发生的所有基本事件的最小限度集合称为最小割集^[7]。采用 Semanderes 算法对图 3 所示的工艺系统故障树模型由下而上对逻辑门置换, 可得到底事件积的和的最简式 $T = E_1 + E_3 + E_4 + E_7 + E_{10} + E_{12}$ 。通过简化吸收, 可得到事件的布尔表达式, 即故障树最小割集,

$$T = \sum_{i=1}^2 X_i + X_3 \times X_4 + \sum_{i=5}^9 X_i + \sum_{i=14}^{34} X_i + \sum_{i=17}^{18} X_i + \sum_{i=10}^{12} X_i \times X_{13} \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 该故障树由 31 个一阶最小割集和 4 个二阶最小割集组成。因此, 各底事件对艇体成型后质量缺陷的结构重要度排序为:

$$X_{17} = X_{18} > X_1 = X_2 = X_5 \cdots = X_9 = X_{14} = \cdots X_{34} > X_3 = X_4 = X_{10} = \cdots = X_{13}。$$

通常情况下, 包含基本事件越少的最小割集越容易发生。例如, $\{X_4\}$ 的发生意味着模具支撑管焊接质量不高, 当艇体模腔在抽真空时, 由于负压作用, 容易导致模具表面出现变形, 直接影响艇体成型质量, 且真空袋面积大小应根据艇体尺度大小而定, 艇体尺度越大, 真空袋无损性就越难控制。

3.2 顶事件的失效率计算

本文采用工程加权分析法^[8]计算顶事件故障率, 此方法由事件加权评判、事件加权值及顶事件的失效率组成。

1) 事件加权。分别由现场工程师及工艺设计师凭生产经验做出五组数据, 并标出每个事件的重要性数值(0 ~ 1.0), 评判时权重原则是: $S_{E1} + S_{E4} + S_{E7} + S_{E10} + S_{E12} = 1$; $S_{14} + S_{15} + S_{16} + S_{17} = 1$; $S_{E8} + S_{E9} + S_{18} + S_{19} + S_{20} + S_{21} = 1$, 对数据进行重组后, 得到表2 加权评定表。

2) 底事件平均值与修正加权值。由于加权的性质, 平均加权值与修正加权值对比, 计算得到的可靠度较为保守。以事件 X_{17} 为例, 平均加权值 $\bar{S}_{17} = (0.4 + 0.4 + 0.2 + 0.2 + 0.35)/5 = 0.34$; 底事件 X_{17} 修正加权值可按公式 $\bar{S}_{im} = \bar{S}_i / (1 - \sum \bar{S}_i \bar{S}_j)$ 计算得到^[8], 即: $\bar{S}_{17m} = \bar{S}_{17} / (1.0 - (S_{14} \cdot S_{15} + \dots + S_{16} \cdot S_{17})) = 0.521$ 。

通过上述步骤, 求出其他底事件相关权值, 填入表2中。

3) 顶事件的失效率。采用平均加权值计算艇体成型后存在缺陷的失效率, 计算得到平均加权值 $F_A = F_i / \prod S_i$, 其中 F_i 表示底事件 X_i 失效率。同样以底事件 X_{17} 为例, 查阅相关资料^[9], 可以得到事件 X_{17} (密封件老化) 的失效率为 $16.84 \times 10^{-5} / \text{h}$, 那么: $F_A = F_{17} / (\bar{S}_{E7} \cdot \bar{S}_{E8} \cdot \bar{S}_{17}) = 0.01862$ 。

采用修正加权值计算, 则: $F'_A = F_{17} / (\bar{S}_{E7m} \cdot \bar{S}_{E8m} \cdot \bar{S}_{17m}) = 0.004311$ 。

F_A 表示平均加权值顶事件 T 失效率; F'_A 表示修正加权值顶事件 T 失效率。

平均无故障时间 t_{MTBF} 为: $t_{\text{MTBF}} = 1/F'_A = 1/0.004311 = 231.965 \text{ h}$ 。

表2 真空艇体成型工艺系统故障树工程加权表

Tab.2 The engineering weight table of the fault tree of vacuum assisted resin infusion for the yacht hull

| 序号 Item | 编号1 No.1 | 编号2 No.2 | 编号3 No.3 | 编号4 No.4 | 编号5 No.5 | 平均加权(\bar{S}_i) Mean weighted(\bar{S}_i) | 修正加权(\bar{S}_{im}) Revised weighted(\bar{S}_{im}) |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|--|
| E_1 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.35 | 0.24 | 0.398 |
| E_4 | 0.01 | 0.10 | 0.10 | 0.30 | 0.05 | 0.15 | 0.249 |
| E_7 | 0.60 | 0.20 | 0.15 | 0.20 | 0.15 | 0.19 | 0.315 |
| E_8 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.20 | 0.10 | 0.14 | 0.238 |
| E_9 | 0.05 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.13 | 0.221 |
| E_{10} | 0.10 | 0.30 | 0.35 | 0.10 | 0.15 | 0.22 | 0.365 |
| E_{12} | 0.09 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.30 | 0.20 | 0.332 |
| X_{14} | 0.10 | 0.10 | 0.50 | 0.10 | 0.15 | 0.13 | 0.199 |
| X_{15} | 0.40 | 0.40 | 0.20 | 0.40 | 0.40 | 0.39 | 0.598 |
| X_{16} | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.30 | 0.10 | 0.14 | 0.215 |
| X_{17} | 0.40 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 0.35 | 0.34 | 0.521 |
| X_{18} | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.10 | 0.21 | 0.358 |
| X_{19} | 0.50 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.15 | 0.22 | 0.375 |
| X_{20} | 0.10 | 0.20 | 0.25 | 0.05 | 0.20 | 0.17 | 0.289 |
| X_{21} | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.35 | 0.13 | 0.221 |

4 可靠性仿真

根据工艺系统故障树建立可靠性仿真模型,对仿真系统变量进行定义^[1],运用蒙特卡罗随机抽样法^[10]对每个底事件进行抽样,取得基本事件失效时间的简单样本,并从小到大排序,利用区间统计法进行系统失效数的分布统计及计算,得到系统的累积失效率与底事件概率重要度,分析仿真运行结果,确定系统薄弱环节,并采取相应的改进措施。

4.1 变量定义

1) 系统可靠度 $R_m = 1 - F'_m = 1 - m_r/M$ 。式中: m_r 表示在给定时刻 t_m 内系统发生失效总数; F'_m 表示系统失效数; M 表示系统仿真次数。

2) 基本部件概率重要度 $W_N(X_i) = N_f/N_m$ 。式中: N_f 表示基本部件失效引起系统失效的次数; N_m 表示系统失效的总次数。

4.2 仿真流程设计与运算结果

针对游艇制造工艺特点,前期对厦门翰盛游艇有限公司的员工及设计人员进行调研,获取 20 份问卷结果,经过数据整合得到表 3 底事件的失效概率和概率重要度。通过 MATLAB 平台进行仿真计算,假定底事件服从指数分布,其中选取抽样次数 $M = 1000$ 次,系统无故障时间 $T_{max} = 1500$ h,时间间隔为 30 h,其仿真流程图如图 4 所示。真空辅助艇体成型工艺系统可靠度曲线如图 5 所示,其实线走势表示系统可靠度 $R(t)$ 曲线,虚线走势表示系统不可靠度 $F(t)$ 曲线。

表 3 底事件失效概率及概率重要度

Tab.3 Failure probability and importance of elementary events

| 底事件 Elementar events | 失效概率 Failure probability ($/10^{-5} \cdot h^{-1}$) | 概率重要度 Importance degree | 底事件 Elementar events | 失效概率 Failure probability ($/10^{-5} \cdot h^{-1}$) | 概率重要度 Importance degree |
|----------------------------|---|-------------------------------|----------------------------|---|-------------------------------|
| X_1 | 16.08 | 0.036 | X_{18} | 20.39 | 0.038 |
| X_2 | 21.34 | 0.046 | X_{19} | 5.68 | 0.015 |
| X_3 | 15.52 | 0.032 | X_{20} | 10.52 | 0.023 |
| X_4 | 14.83 | 0.035 | X_{21} | 3.35 | 0.006 |
| X_5 | 18.61 | 0.041 | X_{22} | 3.29 | 0.007 |
| X_6 | 53.06 | 0.136 | X_{23} | 4.95 | 0.015 |
| X_7 | 38.92 | 0.082 | X_{24} | 8.27 | 0.021 |
| X_8 | 21.13 | 0.040 | X_{25} | 13.72 | 0.031 |
| X_9 | 25.53 | 0.048 | X_{26} | 2.14 | 0.002 |
| X_{10} | 18.25 | 0.038 | X_{27} | 19.05 | 0.045 |
| X_{11} | 4.16 | 0.008 | X_{28} | 5.29 | 0.014 |
| X_{12} | 16.38 | 0.039 | X_{29} | 1.75 | 0.002 |
| X_{13} | 7.18 | 0.019 | X_{30} | 0.92 | 0.006 |
| X_{14} | 8.34 | 0.023 | X_{31} | 17.24 | 0.036 |
| X_{15} | 3.26 | 0.006 | X_{32} | 8.92 | 0.013 |
| X_{16} | 1.86 | 0.005 | X_{33} | 15.76 | 0.038 |
| X_{17} | 6.84 | 0.037 | X_{34} | 11.05 | 0.017 |

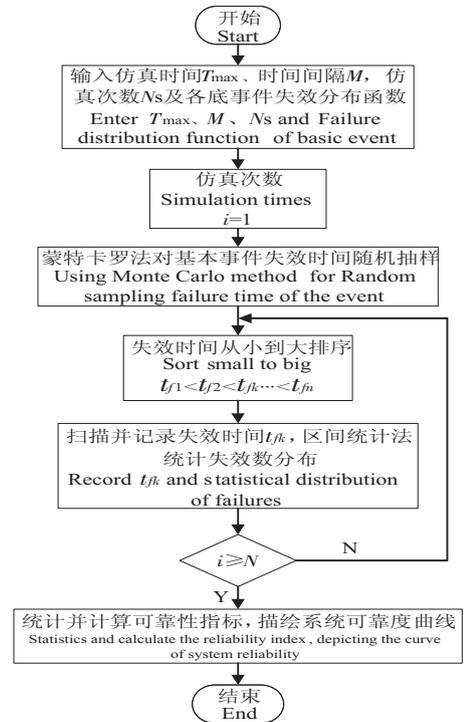


图 4 仿真流程图

Fig.4 The flow chart of simulation

从表 3 可看出,模具底座钢架焊接不牢固和胶衣喷涂厚度不均匀的概率重要度相对较大,对工艺系统可靠性影响较大,需做相应的改进。根据仿真结果得到工艺系统的平均无故障时间 $t_{MTBF} = 237.540$ h,与理论计算值相吻合,表明蒙特卡罗仿真计算工艺系统具有相对可信度和有效性。

针对仿真结果,分析造成艇体质量缺陷的主要因素有:

- 1) 模具质量不合格,存在模具支撑架焊接不合格及模具表面不光整两个方面。

2) 胶衣喷涂厚度不均匀,其现象为模具表面出现波纹。

5 结论

本文在分析游艇生产工艺的基础上,对生产过程的质量控制进行系统的可靠性计算,应用工程加强分析法,计算得到系统无故障时间理论值约 232 h,采用蒙特卡罗法进行可靠性仿真,计算得到工艺系统平均无故障时间约 237.5 h,与理论计算结果相吻合。结果表明,通过蒙特卡罗法对艇体成型过程进行质量控制分析是可行的,且能快速判断出工艺薄弱环节,提高了工艺过程改进措施的效率。

[参 考 文 献]

- [1] 赵渠森,赵攀峰. 真空辅助成型工艺(VARI)研究. 纤维复合材料, 2002(1): 42-46.
- [2] BROUWER W D, VAN HERPT E C F C, LABOR-DUS M. Vacuum injection moulding for large structural applications. Composites; Part A, 2003, 34(6): 551-558.
- [3] 潘利剑,刘卫平,陈萍,等. 缝合泡沫夹层复合材料的滚筒剥离性能. 玻璃钢/复合材料, 2013(3): 39-42.
- [4] MARSEGUERRA M, ZIO E. Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. Reliability engineering & system safety, 2000, 68(1): 69-83.
- [5] 王广彦,马志军,胡起伟. 基于贝叶斯网络的故障树分析. 系统工程理论与实践, 2004(6): 78-83.
- [6] 陈涛,孙伟,张旭. 基于灰色关联度的风电齿轮箱传动系统故障树分析. 太阳能学报, 2012, 33(10): 1655-1660.
- [7] 宋保维. 系统可靠性设计与分析. 西安:西北工业大学出版社, 2008.
- [8] 焦子琳. 精密真空树脂灌注机的可靠性研究. 西安:西安理工大学, 2005.
- [9] 丁军平,刘学博,王怀玲,等. 爱德华真空泵的维修与改进. 质谱报, 2004, 25(3): 190-191.
- [10] 肖刚,李天舵. 系统可靠性分析中的蒙特卡罗方法. 北京:科学出版社, 2003.

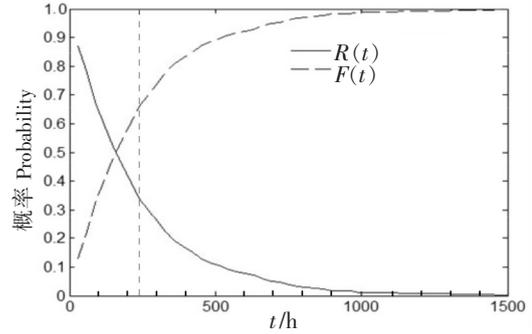


图5 真空辅助艇体成型工艺系统可靠度曲线
Fig.5 Reliability curve of vacuum assisted resin infusion for the yacht hull

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)