

PHM 项目研制的进度风险与技术成熟度要求

陈士涛¹, 杨建军¹, 段南南²

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原, 713800; 2. 93942 部队, 陕西咸阳, 712000)

摘要 统计分析各国目前已完成的预测与健康管理(Prognostic and health management, PHM)项目相关资料, 得到技术成熟度等级与相对进度拖延的原始数据。通过转化为线性回归的方法, 建立技术成熟度等级与平均相对进度拖延和最大相对进度拖延的回归函数, 并检验回归函数线性假设的显著性。假设相对进度拖延服从正态分布, 确定进度风险与技术成熟度的概率关系。绘制进度风险、进度余量与技术成熟度等级的关系图。结果表明: PHM 的技术成熟度达到 7 级时, 项目研制的进度风险控制在 20% 以内, 处于可以接受的范围。

关键词 预测与健康管理技术; 技术成熟度; 进度风险; 进度余量; 线性回归

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.01.011

中图分类号 V57 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)01-0047-05

预测与健康管理技术(PHM)通过减少备件、保障设备、维修人员等保障资源需求, 降低维修保障费用^[1]; 通过减少维修, 特别是计划外维修次数, 缩短维修时间, 提高装备战备完好率^[2]; 通过健康感知, 减少任务过程中故障引起的风险, 提高任务成功率^[3]。目前, PHM 应用还处于理论探索阶段, 研究 PHM 项目研制的技术成熟度要求, 可以有效降低项目研制的进度风险, 避免项目因技术成熟度过低而造成延误或失败。

1 技术成熟度及等级划分

技术成熟度是指技术相对于某个具体系统或项目所处的发展状态, 它反映了技术对于项目预期目标的满足程度。技术成熟度等级是指对技术成熟度进行量化和评测的一种标准, 可用于评估特定技术的成熟度, 以及判断不同技术对同一项目目标的满足程度^[4]。目前, 技术成熟度普遍采用了 9 级标准, 其中 1 级最低, 9 级最高, 逐级递进。具体的等级划分如下^[5]:

- 1 级: 技术成熟过程中的最低等级, 技术理论开始转向应用研究。
- 2 级: 技术基本原理开始被用于发明。
- 3 级: 开始技术研究。在这一等级, 开始开展实验室研究, 验证各独立技术元素的分析预测。
- 4 级: 基础部件或原理样机在实验室进行试验, 但与最终系统相比, 试验逼真度较低。
- 5 级: 部件或部件级原理样机在相关环境下进行试验, 试验逼真度有明显提高。
- 6 级: 系统或子系统在相关环境下进行试验, 技术成熟度显著提高。
- 7 级: 系统样机验证。在这一等级, 系统样机在近似真实环境下进行验证。
- 8 级: 系统试验验证。在这一等级, 系统在真实环境下完成试验验证。
- 9 级: 系统使用验证。在这一等级, 技术以最终形式在任务环境中得到应用。

* 收稿日期: 2011-06-24

基金项目: 国家部委基金资助项目(XX09119)

作者简介: 陈士涛(1984-), 男, 黑龙江桦南人, 博士生, 主要从事装备发展论证与体系规划研究。

E-mail: chenshitao311@163.com

2 进度拖延与技术成熟度回归分析

设项目开始前预测的计划进度(时间)为 S_p , 研制项目完成时的实际进度为 S_A , 则相对进度拖延为:

$$S_{CD} = \frac{S_A - S_p}{S_p} \times 100\% \quad (1)$$

为建立进度拖延与技术成熟度的关系, 需要利用研制项目的历史数据进行回归分析。

统计分析目前世界各国已完成的 21 个 PHM 研制项目的相关数据^[6-8], 结合各项目的计划进度 S_p , 实际进度 S_A , 按式(1) 计算相对进度拖延 S_{CD} 。考查每个项目的技术成熟度 TRL (Technology Readiness Level, TRL), 将项目按技术成熟度等级按(4,5,6,7,8)分为 5 组, 具体数据见表 1。

表 1 PHM 项目的技术成熟度等级与进度数据

Tab. 1 The technology readiness level and schedule data of PHM projects

编号	项目	技术成熟度等级	计划进度/a	实际进度/a	相对进度拖延(%)
1	英国 Smiths 航空航天工业的直升机使用和状态管理系统“HUMS”	4	4	5	25
2	美国新一代联合先进的预测与状态管理“HUMS”	4	5	5.5	10
3	美国新一代 HUMS - JAHUMS	5	4	7	75
4	美国 F - 35(JSF)的预测与健康管理系统“PHM”系统	5	5	6	20
5	美国海军的综合状态评估系统“ICAS”	4	5	7	40
6	美国海军的预测增强诊断系统“PEDS”	5	8	9.5	18.8
7	美国陆军的诊断改进计划“ADIP”	4	4	7	75
8	美国陆军嵌入式诊断与预测同步计划“EDAPS”	5	8	11.5	43.8
9	美国 NASA 第二代可重复使用运载器的航天器综合监控管理系统“WHM”	5	7	16	128.6
10	中国国防科技大学液体火箭发动机的健康管理系统“SSME”	4	4	8	100
11	美国 NASA 的 Lewis 研究中心的火箭发动机状态管理系统“HMS”	4	3	9.5	216.7
12	美国 SMI 公司开发的波音飞机状态管理系统“AHM”	6	8	10.5	31.3
13	美国 SMI 公司为空军开发的 F100 飞机发动机 EHM	6	7	9	28.6
14	美国 SMI 公司为空军开发的 F110 飞机发动机 EHM	6	4	5	25
15	美国普惠公司与 NASA 合作研发的空间推进器 EHMS	7	6	9	50
16	美国智能自动化公司开发的超级 HUMS 应用于陆军的 RQ - 7A/B“阴影”200 战术无人机系统	7	6	6.5	8.3
17	欧洲 EADS 公司开发 PHM 硬件数据采集系统	7	5	5.5	10
18	美国航天飞行器综合管理系统“IVHM”	6	8	9	12.5
19	美国空军实验室的系统综合健康管理系统“ISHM”	6	10	10.5	5
20	美国的感应监测系统“IMS”	7	11	11.25	2.3
21	美国基于 IMS 的异常监测感应软件系统“AMISS”	8	10	10.8	8

2.1 平均相对进度拖延与最大相对进度拖延

设 $TRL = k(k = 4, 5, 6, 7, 8)$ 的项目共有 m 个, 选出其中最大的相对进度拖延 S_{MCD} , 并利用式(2) 计算 m 个项目的平均相对进度拖延 $\overline{S_{CD}}$:

$$\overline{S_{CD}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{CDj} \quad (2)$$

经计算, 对于不同等级的技术成熟度, 平均相对进度拖延和最大相对进度拖延的值见表 2。

2.2 平均相对进度拖延回归函数

构建技术成熟度与相对进度拖延两者的函数关系前, 首先分析相对进度拖延应具有以下 2 个特点:

1) 相对进度拖延随技术成熟度等级的提高而降低。由于技术成熟度等级的提高, 技术水平更能满足项目研制的需求, 试验失败或延误的次数减少, 相对进度拖延随之降低。

表 2 不同等级技术成熟度的进度拖延

Tab. 2 The schedule delay of different grade TRL

TRL	$\overline{(S_{CD})_j}(\%)$	$(S_{MCD})_j(\%)$
4	77.8	216.7
5	57.2	128.6
6	20.5	31.2
7	17.7	50
8	8	8

2) 相对进度拖延的变化幅度随技术成熟度的提高递减,即 $\overline{S_{CD}}$ 和 S_{MCD} 对 TRL 的二阶导数为正值。技术成熟度达到一定等级后,技术水平提高对项目研制进度的影响有所减弱,由于技术原因造成的进度拖延次数减少,相对进度拖延变化幅度随技术成熟度提高而减小。

根据以上分析并参考相关文献^[9],函数表达式可选用以 TRL 为自变量的负指数函数。

设 $\overline{S_{CD}}$ 的回归函数为:

$$\overline{S_{CD}} = ae^{-bTRL} \tag{3}$$

两边取对数,化为线性形式为:

$$\ln(\overline{S_{CD}}) = \ln a - bTRL \tag{4}$$

利用数理统计方法建立一元线性回归模型:

$$y = a' + bx \tag{5}$$

式中: $y = \ln(\overline{S_{CD}})$; $a' = \ln a$; $x = -TRL$ 。

通过求解正规方程组,得到 a' 、 b 的最大似然估计值为:

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^5 (x_i - \bar{x})^2} \tag{6}$$

$$\hat{a}' = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 y_i - \hat{b} \sum_{i=1}^5 x_i = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \tag{7}$$

求得 a' 、 b 的值分别为 $a' = 2.0757$; $b = 0.565$, 线性回归函数为:

$$y = 2.0757 + 0.565x \tag{8}$$

平均相对进度拖延与技术成熟度的回归函数为:

$$\overline{S_{CD}} = 7.929e^{-0.565TRL} \tag{9}$$

平均相对进度拖延原始数据 $(\overline{S_{CD}})'_j$ 与函数值 $(\overline{S_{CD}})_j$ 具体数值见表 3。

表 3 平均相对进度拖延回归函数的误差

Tab. 3 The error of average comparative schedule delay regress function

TRL	$(\overline{S_{CD}})_j(\%)$	$(\overline{S_{CD}})'_j(\%)$	误差(%)
4	77.8	82.7	4.9
5	57.2	47.0	10.2
6	20.5	26.7	6.2
7	17.7	15.2	2.5
8	8	8.6	0.6

2.3 最大相对进度拖延回归函数

令 S_{MCD} 的回归函数为:

$$S_{MCD} = a_1 e^{-b_1TRL} \tag{10}$$

用线性回归方法求得 a_1 、 b_1 的值分别为 $a_1 = 20.739$; $b_1 = 0.573$, 并通过线性回归假设的显著性检验。

最大相对进度拖延的回归函数为:

$$S_{MCD} = 20.739e^{-0.573TRL} \tag{11}$$

最大相对进度拖延原始数据 $(S_{MCD})'_j$ 与函数值 $(S_{MCD})_j$ 具体数值见表 4。

表 4 最大相对进度拖延回归函数的误差

Tab. 4 The error of maximal comparative schedule delay regress function

TRL	$(S_{MCD})_j(\%)$	$(S_{MCD})'_j(\%)$	误差(%)
4	216.7	209.6	7.1
5	128.6	118.2	10.4
6	31.2	66.6	35.4
7	50	37.6	12.4
8	8	21.2	13.2

比较式(14)和式(16)可知, $a \approx 2.5a$, $b \approx b$ 。这表明最大相对进度拖延是平均相对进度拖延的线性放大,即:

$$S_{MCD} \approx 2.5 \overline{S_{CD}} \tag{12}$$

回归分析曲线见图 1。

3 进度风险与技术成熟度

3.1 进度余量与进度风险

在项目开始前,一般为计划进度留有一定的余量 S_R , 称为进度余量,以保证实际进度小于可接受的时间。

进度风险是指实际进度超过计划进度和进度余量之和的概率^[10],即:

$$R_s = P(S_A > S_p + S_R) \quad (13)$$

用相对进度表示为:

$$R_s = P\left(\frac{S_A - S_p}{S_p} > \frac{S_R}{S_p}\right) = P\left(S_{CD} > \frac{S_R}{S_p}\right) = 1 - P(S_{CD} \leq S_{CR}) \quad (14)$$

式中 $S_{CR} = S_R/S_p$, 为相对进度余量。

3.2 进度风险与技术成熟度关系

不失一般性,假定相对进度拖延 S_{CDj} 是服从正态分布的随机变量。对应不同的 $TRL = j$, 其概率密度函数为:

$$f(S_{CDj}) = \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(S_{CDj} - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}} \quad (15)$$

式中: μ_j 是随机变量 S_{CDj} 的平均值, 近似等于利用式(14)计算得到的 S_{CDj} ; σ_j 是 S_{CDj} 的标准差。在正态分布中, 标准差可以用散布度 S_r ^[9] 表示, 即:

$$\sigma_j = \frac{S_{rj}}{4} \quad (16)$$

则有:

$$\mu_j \approx S_{CDj} \quad (17)$$

$$\sigma_j \approx \frac{S_{MCDj}}{4} \quad (18)$$

式中 $j = 4, 5, 6, 7, 8$ 。

经计算, 不同等级技术成熟度对应的 μ_j 和 σ_j 见表5。

将式(21)改写成用标准差 σ 表示为:

$$R_{sj} = 1 - P(Z \leq z) = 1 - \Phi(z) \quad (19)$$

式中: $Z = \frac{S_{CDj} - \mu_j}{\sigma_j}$, 是随机变量 S_{CDj} 的标准形式, $z =$

$$\frac{S_{CRj} - \mu_j}{\sigma_j}。$$

3.3 PHM 项目研制的技术成熟度要求

利用标准正态分布表可查得 z 对应的 $\Phi(z)$, 进而计算进度风险 R_s 。不同等级技术成熟度的进度风险见图2。

由图2可知: ①在技术成熟度不变时, 增加相对进度余量可以降低进度风险。当技术成熟度为6级, 相对进度余量为22%时, PHM项目的进度风险达到50%; 如果将相对进度余量增加到41%, 则进度风险可以降低为20%; ②在相对进度余量不变的情况下, 提高技术成熟度可降低进度风险。当相对进度余量为40%, 在技术成熟度较低为4级时, PHM项目的进度风险高达80%; 如果将技术成熟度提高到6级, 则进度风险可以降低到20%左右。

通过对图2分析可知, 通过选择技术成熟度和进度余量的合适组合可以降低进度风险。PHM项目的技术成熟度应不低于6-7级, 以达到7级为好, 因为技术成熟度为7级表明PHM技术已达到工程样机水平, 且在近似真实环境中得到验证。

4 结束语

本文讨论了影响研制风险主要因素之一的技术成熟度及其与进度风险的关系。利用实际项目数据进行回归分析的数学方法, 给出技术成熟度与进度风险的经验曲线。由技术成熟度与进度风险的关系曲线可知, 项目采用的技术成熟度越低, 使用过多不成熟的新技术, 进度风险就越大。因此, 不能片面追求技术创新。

表5 随机变量 S_{CDj} 的平均值和标准差

Tab. 5 The mean and standard deviation of random variable S_{CDj}

TRL	平均值 (%)	标准差 (%)
4	82.7	52.4
5	47.0	29.5
6	26.7	16.7
7	15.2	9.4
8	8.6	5.3

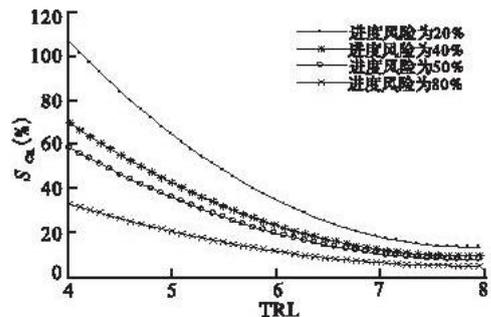


图2 不同等级技术成熟度的进度风险

Fig. 2 The schedule risk of different grade TRL

参考文献(References):

- [1] Engel S, Gilmartin B, Bongort K. Prognostics, the real issues involved with predicting life remaining[C]//Proceedings of the IEEE aerospace conference. Big Sky:IEEE press,2000: 457 - 469.
- [2] 徐萍,康锐. 预测与状态管理系统(PHM)技术研究[J]. 测控技术,2004,23(12):58 - 60.
XU Ping, KANG Rui. Research on prognostic and health management(PHM) technology[J]. Observation and control technology, 2004, 23(12): 58 - 60. (in Chinese)
- [3] 张亮,张凤鸣,李俊涛. 机载预测与健康管理系统(PHM)的体系结构[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2008,9(2): 6 - 9.
ZHANG Liang, ZHANG Fengming, LI Juntao. Research on on-board prognostics and health management system architecture for operational aircraft[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition, 2008, 9(2): 6 - 9. (in Chinese)
- [4] John C M. Technology readiness assessments: a retrospective[J]. Acta astronautica, 2009, 65:1216 - 1223.
- [5] Upadhy K S, Srinivasan N K. Availability of weapon systems with multiple failures and logistic delays[J]. International journal of quality & reliability management, 2003, 20(7): 836 - 846.
- [6] Sandborn P, Wilkinson C. A maintenance planning and business case development model for the application of prognostics and health management (PHM) to electronic systems[J]. torpedo technolog microelectronics reliability, 2007, 47(4): 1889 - 1901.
- [7] Dubos G F. Technology readiness level, schedule risk, and slippage in spacecraft design[J]. Journal of spacecraft and rockets, 2008, 45(4): 836 - 842.
- [8] 钱东,崔立,肖昌美. 技术成熟度评估方法及其在水下战装备上的应用[J]. 鱼雷技术,2006,14(1):1 - 7.
QIAN Dong, CUI Li, XIAO Changmei. Technology readiness level evaluation method and application to underwater weapon [J]. Torpedo technology, 2006, 14(1): 1 - 7. (in Chinese)
- [9] 朱毅麟. 技术成熟度对航天器研制进度的影响[J]. 航天器工程,2009,18(2):8 - 13.
ZHU Yilin. A Study of influence of technology readiness level on spacecraft development schedule[J]. Spacecraft engineering, 2009, 18(2): 8 - 13. (in Chinese)
- [10] 易善勇,邱志明. 基于集对分析的大型研发项目进度风险评价研究[J]. 统计与决策,2009(1):44 - 47.
YI Shanyong, QIU Zhiming. The schedule risk evaluation of large research and development project based on set pair analysis [J]. Statistic and decision-making, 2009(1): 44 - 47. (in Chinese)

(编辑:田新华)

The Technology Readiness Level Requirement on Prognostics and Health Management Development of Equipment

CHEN Shi-tao¹, YANG Jian-jun¹, DUAN Nan-nan²

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Unit 93942, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: By statistically analyzing the information of PHM items which have been already accomplished in various countries, the original data of the technology readiness level and comparative schedule delay are gained. By the method of translation into linear regression, the regress functions of technology readiness level with average comparative schedule delay, and technology readiness level with maximal comparative schedule delay are established. On the assumption that the comparative schedule delay is obedient to normal distribution, the probability relationship of schedule risk with technology readiness level is established. Then, the relational graph of schedule risk and schedule allowance with technology readiness level is drawn. The research shows that when PHM technology readiness level achieves seventh grade, the schedule risk is within twenty percent, which is of an acceptable range.

Key words: Prognostics and Health Management (PHM); technology readiness level; schedule risk; schedule allowance; linear regression