

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.08.001

## 基于 PERT 仿真的导弹技术准备流程优化分析

吴文军<sup>1</sup>, 瞿军<sup>2</sup>, 胡习平<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军 91515 部队, 海南 三亚 572016; 2. 海军航空工程学院 飞行器工程系, 山东 烟台 264001;  
3. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为满足导弹快速保障需求, 利用 PERT 仿真对某导弹技术准备流程进行优化分析, 同时引入工作关键度和重要度 2 个指标来定量评价各项工作对技术准备流程进度计划按时完工的影响。通过仿真准确预测了优化的效果, 得到了项目完工概率及各项工作的定量评价指标值。结果表明, 优化后技术准备时间明显缩短, 并能准确预测优化效果, 为流程进度控制提供合理的方法和参考依据。

**关键词:** 导弹; 技术准备; PERT 仿真; 流程优化

**中图分类号:** TJ760.6; TP391.9 **文献标识码:** A

## Optimization Analysis of Technical Preparation Procedure for Missile Based on PERT Simulation

Wu Wenjun<sup>1</sup>, Qu Jun<sup>2</sup>, Hu Xiping<sup>3</sup>

(1. No. 91515 Unit of PLA, Sanya 572016, China;

2. Dept. of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

3. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** To meet the demand of rapid support, optimization of technical preparation procedure for a certain missile was analyzed through program evaluation and review technique (PERT) simulation. Meanwhile, Activity criticality index (ACI) and crucial index (CRI) of each activity were led into for quantitative evaluation of effect on completion. Effects of optimization were forecasted accurately and project completion probability and index value of quantitative evaluation for activities were obtained by simulating. The result indicates that technical preparation time was shortened greatly by optimizing, and effect of optimization can be forecasted accurately. Reasonable method and references for control of schedule plan are provided.

**Keywords:** missile; technical preparation; PERT simulation; procedure optimization

### 0 引言

导弹技术准备效率直接影响导弹的作战使用效能。调研发现某导弹现有的技术准备流程耗时长、效率低, 难以适应应急作战条件下的快速保障要求。故结合部队实际, 利用 PERT 仿真对现有流程进行优化分析, 为流程进度控制提供合理的方法和参考依据。

### 1 经典 PERT 基本原理

#### 1.1 经典 PERT 的基本假设

根据经典 PERT 的基本假设<sup>[1-2]</sup>可得到:

$$\begin{cases} \mu_i = (a_i + 4m_i + b_i)/6 \\ \sigma_i^2 = (b_i - a_i)^2 / 36 \\ \mu_T = \sum_{i=1}^n \mu_i \\ \sigma_T^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mu_i$  和  $\sigma_i$  第  $i$  项工作持续时间的期望值和方差;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $m_i$  分别为第  $i$  项工作的乐观时间、悲观时间和最可能时间,  $\mu_T$  和  $\sigma_T^2$  为项目工期的期望和方差;  $n$  为关键路线上的工作项数。

由中心极限定理<sup>[3]</sup>可知, 项目工期服从  $N(\mu_T, \sigma_T)$  的正态分布, 则完工概率为:

$$F(T_s) = P(t \leq T_s) = \int_{-\infty}^{T_s} \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T_s - \mu_T}{\sigma_T} \right)^2} dt \quad (2)$$

式中,  $T_s$  为项目所要求的完工工期。

#### 1.2 工作时间的概率分布及其确定

不同类型工作的持续时间实际上具有不同的概率分布。常见的有正态分布、 $\beta$  分布和三角分布, PERT 中选择单峰型  $\beta$  分布作为工作时间的代表性分布<sup>[2]</sup>。

在  $(a, b)$  区间的  $\beta$  分布的概率密度函数为:

收稿日期: 2010-02-12; 修回日期: 2010-05-24

作者简介: 吴文军 (1982-), 男, 湖南人, 从事兵器发射理论与技术研究。

$$f(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{(b-a)^{r+s-2} \Gamma(r) \Gamma(s)} (x-a)^{r-1} (b-x)^{s-1} \quad (3)$$

其中,  $a \leq x \leq b, r > 0, s > 0$ ,  $a, b$  决定分布的区间,  $r, s$  决定分布的形状, 一般讨论  $r > 2, s > 2$  的情况, 此时曲线为单峰型且与  $x$  轴相切, 比较符合工作时间分布, 点  $(a, 0)$ 、 $(b, 0)$ 、 $(M, f(M))$  为  $\beta$  分布曲线的控制点, 确定了这三点即可确定  $\beta$  分布曲线。 $\beta$  分布的确定方法, 对仿真计算结果可靠度有直接影响。依据经典 PERT 的基本假设<sup>[2]</sup>可得:

$$\mu = E(x) = \frac{a+4m+b}{6} = a + (b-a) \frac{r}{r+s} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = D(x) = \frac{(b-a)^2}{36} = (b-a)^2 \frac{rs}{(r+s)^2(r+s+1)} \quad (5)$$

$$m = M = \frac{b(r-1)+a(s-1)}{r+s-2} \quad (6)$$

联立式 (4)、(5)、(6) 中的任意两式, 即可以求出  $r, s$ , 从而确定  $\beta$  分布曲线, 由于是非线性方程, 确定出的  $\beta$  分布不唯一, 且存在误差。文献[4-5]采用限定概率三时估计, 建立  $\beta$  分布拟合模型, 但是在仿真中可能产生明显不符合要求的随机工作时间, 需要修正。

## 2 PERT 仿真

### 2.1 基本原理

PERT 仿真是建立在蒙特卡罗仿真基础上的, 其主要思想是在计算机上模拟实际概率过程, 由计算机产生服从给定分布的随机工作时间, 每产生一次各项工作的随机持续时间, 就相当于项目运行一次, 即仿真一次。每次仿真, 工期和关键路线都可能不同。经多次仿真并加以统计处理, 可得到各项工作的关键度和重要度及工期概率分布。PERT 仿真较好地反映了工作时间的统计规律性, 能有效克服经典 PERT 关键路线唯一性假设和传统三时估计的不足, 所确定的关键路线可靠度高, 从而提高了计划实施的可靠性。

### 2.2 PERT 仿真流程

根据仿真原理分析, 假设工作时间服从  $\beta$  分布, 利用 Matlab 进行仿真, 流程如图 1。

### 2.3 基于风险估计的关键指标 ACI 和 CRI 的计算

由于组织管理、设备故障等不确定因素可能影响技术准备项目的按期完工, 参照风险管理原理, 引入工作关键度和重要度 2 个指标对流程中各项工

作的地位进行定量评价。

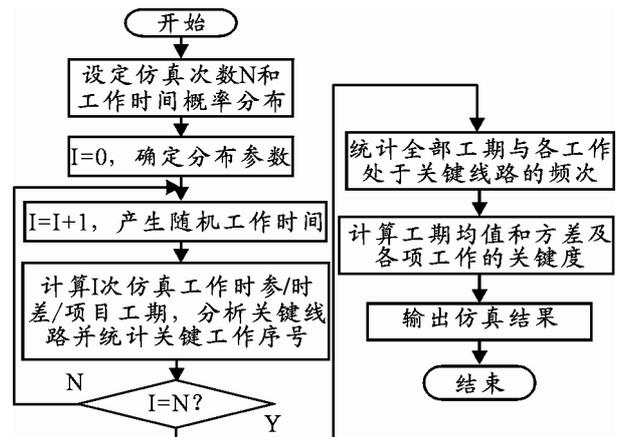


图 1 PERT 仿真流程图

从保证项目按时完工的角度上说, 关键路线上的关键工作对工期风险的影响最大, 可用工作关键度指标 (Activity Criticality Index, ACI)<sup>[6-7]</sup>来描述各工作成为关键工作的程度。根据 ACI 的定义, 可由式 (7) 求取:

$$ACI = p(i, j) = m_{ij} / N \quad (7)$$

式中,  $p(i, j) \in [0, 1]$ ,  $m_{ij}$  为代号  $(i, j)$  的工作在  $N$  次仿真中成为关键工作的次数,  $i, j$  为项目网络计划图中的节点号, 可用来表示相应工作, 下文同理。

在进度计划中, 某项工作的关键度大并不意味着该工作对整个项目不能完工的风险影响就大。因此, 除了需要考虑工作关键度外, 还需要考虑某项工作一旦发生意外时, 对整个项目进度的影响, 可通过估计工作持续时间对项目工期的敏感度影响来评价, 采用 Williams<sup>[6]</sup>提出的“重要度指标 (Cruciality Index, CRI)”来表示, 即:

$$CRI = q(i, j) = |Corr(D_{ij}, T)| \quad (8)$$

$$\begin{cases} Corr(D_{ij}, T) = \frac{Cov(D_{ij}, T)}{\sigma(D_{ij})\sigma(T)} \\ Cov(D_{ij}, T) = E[(D_{ij} - E(D_{ij}))(T - E(T))] \end{cases} \quad (9)$$

式 (8)、式 (9) 通常是难以求解的, 利用仿真, 近似求解公式如下:

$$\begin{cases} Cov(D_{ij}, T) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (D_{ij}^{(k)} - E(D_{ij})) \cdot (T^{(k)} - E(T)) \\ E(D_{ij}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D_{ij}^{(k)} \\ E(T) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T^{(k)} \\ \sigma(D_{ij}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (D_{ij}^{(k)} - E(D_{ij}))^2} \\ \sigma(T) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (T^{(k)} - E(T))^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $q(i, j) \in [0, 1]$ ;  $D_{ij}$  和  $D_{ij}^{(k)}$  分别为工作  $(i, j)$  的持续时间和第  $k$  次仿真时的持续时间;  $T$  和  $T^{(k)}$  分别为总工期和第  $k$  次仿真的总工期;  $E(D_{ij})$  和  $\sigma(D_{ij})$  分别为工作  $(i, j)$  持续时间经  $N$  次仿真后的期望值和标准差;  $E(T)$  和  $\sigma(T)$  分别未经  $N$  次仿真的总工期期望值和标准差;  $Cov(D_{ij}, T)$  和  $Corr(D_{ij}, T)$  分别为工作  $(i, j)$  持续时间与总工期的协方差和线性相关系数。

### 3 某导弹技术准备流程优化分析

#### 3.1 某分系统技术准备时间优化仿真

某导弹分系统由 R 和 L 两个子系统组成, 现有的流程为一条作业线, 所有工作都是关键工作, 经分析发现, 在资源和场地许可的条件下, 有些工作可以并行进行。优化后的流程网络计划图如图 2。图 2 中,  $t_o$  为乐观时间、 $t_m$  为最可能时间、 $t_p$  为悲观时间,  $R$  为资源量。

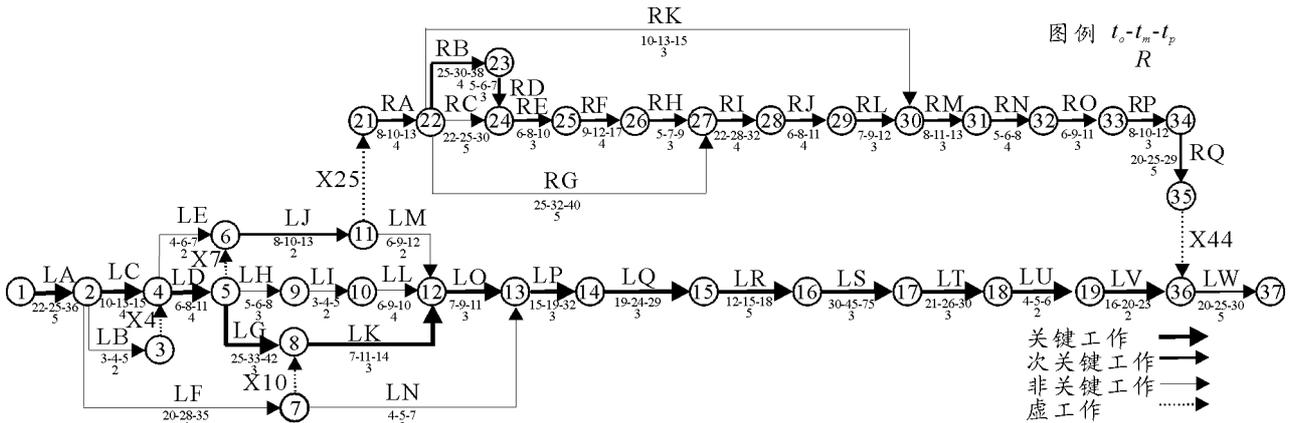


图 2 优化后的技术准备流程网络计划图

利用经典 PERT 计算优化后的网络计划图, 得到的工期均值为 283 min, 方差为 91.222 2, 而 PERT 仿真 1 000 次得到的工期均值为 284 min, 方差为 86.321 0, 显然经典 PERT 计算工期偏小, 方差偏大, 仿真结果更优, 如表 1 (其中, 开工时间指资源均

衡优化得到的开工时间, 以项目开工为 0 时刻开始计, 单位为 min)。仿真结果表明关键路线可能发生转移, 出现 2 条关键路线, 如图 2, 路线关键度分别为 0.987 和 0.013; LS 工作对总工期的重要度最大, 实际操作时应注意控制。

表 1 PERT 仿真结果表

代号	ACI	CRI	开工时间												
LA	1	0.168 8	0	LK	0.987	0.083 5	80	LU	0.987	0.058 2	233	RJ	0.013	0.001 9	180
LB	0	0.029 8	35	LL	0	0.019 5	67	RA	0.013	0.006 6	78	RK	0	0.016 4	184
LC	1	0.046 3	26	LM	0	0.001 1	80	RB	0.013	0.044 1	89	RL	0.013	0.046 8	188
LD	1	0.073 5	39	LN	0	0.053 6	54	RC	0	0.047 6	92	RM	0.013	0.019 4	197
LE	0	0.015 8	39	LO	0.987	0.078 4	91	RD	0.013	0.076 9	119	RN	0.013	0.011 6	208
LF	0	0.028 7	53	LP	0.987	0.340 1	100	RE	0.013	0.078 2	125	RO	0.013	0.041 4	214
LG	0.987	0.254 7	47	LQ	0.987	0.170 8	121	RF	0.013	0.028 7	133	RP	0.013	0.035 3	223
LH	0	0.008 4	47	LR	0.987	0.083 4	145	RG	0	0.025 6	120	RQ	0.013	0.008 5	233
LI	0	0.010 6	58	LS	0.987	0.788 7	160	RH	0.013	0.033 5	145	LV	0.987	0.089 8	238
LJ	0.013	0.025 4	68	LT	0.987	0.151 2	207	RI	0.013	0.049 4	152	LW	1	0.180 1	258

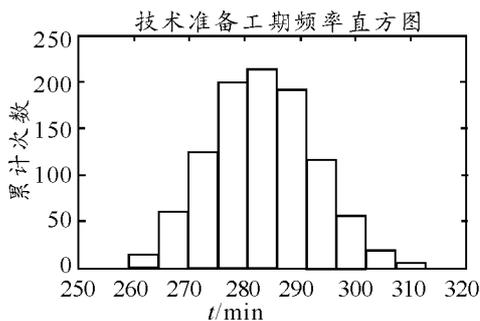


图 3 技术准备工期频率直方图

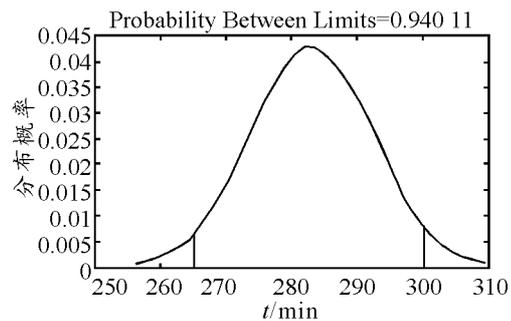


图 4 技术准备工期分布概率图

(下转第 6 页)

会工程爆破专业委员会编著的《爆破工程》提供的  
数据次之；前苏联的数据偏高一些，尤以美国的数  
据最高。通过理论分析、经验公式计算、有限元分  
析软件模拟计算、以及最终实际超压值测量验证，  
爆炸产生的空气冲击波能量大部分消耗于钢质门板  
的变形，并且经过防盗门门板的阻挡，超压值急剧  
衰减，门后的超压值一般小于  $0.1 \times 10^5$  Pa，因此，  
不会对房间内的人员造成严重致命伤害，满足反恐  
任务安全性需求。

### 5 结束语

经实际使用表明，该破门方法能够快速破除防  
盗门，符合反恐行动中有效、快速、安全地破除防

\*\*\*\*\*

(上接第 3 页)

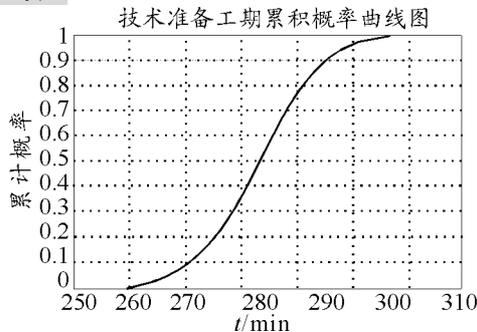


图 5 技术准备工期累积概率率图

工期统计如图 3，可知工期主要集中在 265~  
300 min 之间，累计概率达到 94.011%，如图 4。完  
工概率累积曲线如图 5。根据累计曲线就可以计算  
任意工期下的完工概率，如给定工期为 295 min，

表 2 优化方案数据分析

方式	现有方案		R/L 单独优化方案		时间优化		资源均衡优化	
	t/min	人员/人	t/min	人员/人	t/min	人员/人	t/min	人员/人
RL 串行	608	5	463	9	284	20/16	284	13
RL 并行	359	10	284	18				

注：表中时间为最可能时间或仿真工期均值，人员为最早开工和最迟开工或资源均衡优化后的最大资源需求量

取置信度为 0.99，利用中心极限定理<sup>[3]</sup>对仿真  
精度进行分析，得到工期期望值为 284 min 的绝对  
误差小于 0.7565 的概率为 0.99，同理可对每项工  
作的关键度和重要度指标的仿真精度进行估计。

### 4 结论

通过对仿真结果进行统计，得到了项目完工概  
率及各项工作的定量评价指标值，为流程进度控制  
提供了合理的方法和依据。仿真结果表明，该优化  
方法效果明显，结合资源均衡优化，将能提供操作  
性更强的优化实施方案。

### 参考文献：

盗门的战术要求。

### 参考文献：

[1] 李翼祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.  
[2] 王新建, 反恐活动中的若干爆炸问题研究[J]. 中国人民  
公安大学学报(自然科学版), 2006, 50(4).  
[3] 中华人民共和国国家标准《爆破安全规程》GB  
6722-2003.  
[4] 中国力学学会工程爆破专业委员会. 《爆破工程》下册  
[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.  
[5] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京: 国防工业出  
版社, 2006.  
[6] 饶中阳, 雷彬, 王成. 某型反恐破门弹作用效果数值分  
析[J]. 四川兵工学报, 2009(10): 25-27.

可得到完工累积概率为 90%，306 min 以上完工的  
累积概率达 100%。

### 3.2 综合分析

时间优化是一个复杂的过程，还要充分考虑工  
期压缩造成的影响及资源和成本因素。对于部队作  
战来讲，时间是优先考虑的，所以在资源和场地许  
可的条件下，并行开工是合理的，但多项工作同时  
开工，人力、设备等资源的需求可能出现尖锐的峰  
值。通过对资源进行均衡优化，在合理范围内调整  
开工时间，避免资源需求大起大落，使资源需求更  
平衡合理，另文已对此进行研究，此处仅列出优化  
结果。将本文的优化方案与现有方案、子系统单独  
优化后的组合方案进行对比分析，如表 2。

[1] 《运筹学》教材编写组. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出  
版社, 2005: 286-294.  
[2] 冯允成. 活动网络分析[M]. 北京: 北京航空航天大学  
出版社, 1991: 101.  
[3] 王岩, 隋思涟, 王爱青. 数理统计与 MATLAB 工程数据  
分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 13-14.  
[4] 刘武, 杜志达, 刘祥瞻. PERT 网络活动时间参数估计的  
改进[J]. 统计与决策, 2008(4): 150-153.  
[5] 程超. 基于微粒群算法的 PERT 反馈调整机制的研究  
[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2008: 15-17.  
[6] Salah E. Elmaghraby. On criticality and sensitivity in  
activity networks[J]. European Journal of Operational  
Research, 2000, 127: 220-238.  
[7] 刘煜明, 王卓甫, 张益民. 资源约束下 PERT 施工进度  
计划的优化[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(1): 27-30.