

doi: 10.7690/bgzd.2016.10.008

# 机载导弹全弹系统寿命预测的仿真方法

文 莹, 闫雅慧

(空军空降兵学院高射炮兵系, 广西 桂林 541002)

**摘要:** 针对机载导弹系统级寿命数据缺乏的问题, 提出一种全弹系统寿命预测的仿真方法。首先, 分析导弹关键寿命部件的主要寿命分布, 对指数分布、威布尔分布、正态分布、对数正态分布 4 种常见寿命分布, 给出寿命随机抽样公式; 其次, 分析机载导弹的组成结构, 将关键寿命部件分为 4 种类型并与贮存可靠性结构中串联模型、并联模型、旁联模型相对应; 然后, 根据系统贮存可靠性结构建立全弹系统寿命预测模型, 并将该方法应用于某型空空导弹的寿命预测。预测结果表明: 该方法预测的可靠贮存寿命与实际统计数据一致, 可信度较高, 具有一定的实用性。

**关键词:** 机载导弹; 寿命预测; 寿命分布; 仿真

**中图分类号:** TJ760.6 **文献标志码:** A

## Simulation Method for Lifetime Prediction of Airborne Missile System

Wen Ying, Yan Yahui

*(Department of Anti-aircraft Artillery, Air Force Airborne Academy, Guilin 541002, China)*

**Abstract:** A simulation method for airborne missile's lifetime prediction was proposed, in order to deal with the problem of lack of lifetime data in missile system level. Lifetime distribution of key components was analyzed, which includes exponential distribution, Weibull distribution, normal distribution and log-normal distribution. Lifetime sampling equations of those distributions were listed. According to missile's structure, key components were categorized into 4 types corresponding with storage reliability serial model, parallel model and by-pass model. Lifetime data in system level was generated by key components' sampled lifetime according to the system storage reliability structure. Then the generated system lifetime data was used to optimize lifetime distribution and calculate lifetime indicates. The predict result show that the method and the predicted storage lifetime well fitted the real statistic data, the predicated results is highly reliable, and the method is useful.

**Keywords:** airborne missile; lifetime prediction; lifetime distribution; simulation

### 0 引言

机载导弹的寿命是指: 在规定的贮存、挂飞和维护条件下的战术性能仍能满足规定要求的最长时期, 通常指从交付到退役的时间周期, 是一项重要的战技指标<sup>[1]</sup>。机载导弹属于“长期贮存, 一次使用”类装备, 在寿命周期内, 绝大部分时间处于贮存、检测、维修等非工作状态, 受环境应力及人为因素影响, 会造成弹上设备功能失效, 降低导弹的战备完好率。而现代战争的突发性和高强度要求机载导弹必须保持良好的战备状态; 因此, 有必要通过有效的寿命预测方法对机载导弹的贮存寿命进行研究, 评估其当前及未来的状态, 为部队的战备和保障部署提供科学依据。

国外对导弹系统的寿命研究开始得比较早。美国于 20 世纪 60 年代就开始对导弹系统进行加速老化试验<sup>[2]</sup>。20 世纪 90 年代, 美国空军曾对导弹 10 年间累积的寿命试验数据进行统计研究, 显著改善

了导弹的贮存可靠性。在多年的研究过程中, 美军逐渐形成了一整套的理论体系与标准规范, 如由美国伊利诺斯理工学院研究所按合同要求提出的技术报告《不工作周期对装备可靠性的影响》, 详细论述了贮存失效数据的收集和处理, 提出系统的数据统计分析方法, 建立一种预测贮存周期对装备可靠性定量影响的方法。俄罗斯导弹加速寿命试验可以做到全弹级。俄罗斯火炬设计局的自然环境试验室以整弹为研究对象, 通过 6 个月的模拟试验, 确定 C-300 导弹的贮存寿命为 10 年<sup>[3-5]</sup>。国内导弹系统的寿命研究始于可靠性在该领域的应用, 近年来开展了一些关键寿命部件的贮存寿命试验, 如推进系统、探测器、战斗部、无线电引信等<sup>[6-11]</sup>, 积累了寿命数据, 研究了寿命规律。目前国内对全弹系统开展寿命试验尚未见报道, 一些学者提出了导弹系统的贮存寿命预测模型, 如回归预测、灰色理论预测、人工神经网络预测、组合预测等<sup>[12-14]</sup>, 在理论

收稿日期: 2016-06-21; 修回日期: 2016-08-11

作者简介: 文 莹(1987—), 男, 湖南人, 博士, 讲师, 从事装备综合保障、故障诊断与预测、指挥自动化与智能化研究。

上做出了有益探索；但这些预测模型需要充分的导弹寿命数据进行拟合、训练或验证，适用范围有限。

机载导弹是一类高可靠、长寿命的复杂系统，且具有一定的技术更新周期，其寿命预测是一项非常复杂的工作，难以按大样本、长时间试验模式开展研究，全弹系统寿命数据获取比较困难。而以关键寿命部件为基本单元，对全弹系统的寿命进行综合是一条有效途径。基于此，笔者在机载导弹各关键部件的寿命规律以及系统组成已知的前提下，通过建立全弹系统寿命预测仿真模型，获取寿命仿真数据，进而预测导弹贮存寿命。

## 1 全弹系统寿命预测的局限性

机载导弹是庞大复杂的系统，其组成可按金字塔形式分为几个等级，即系统、分系统、部件、组件、元器件和材料等，如图 1 所示。任意两级之间存在相应的可靠性逻辑结构，如串联、并联、旁联、表决等。系统各级中具体产品的寿命分布也可能是多种多样的，如指数分布、威布尔分布、正态分布、对数正态分布等；因此，按照传统可靠性分析方法，根据系统可靠性结构和单元分布直接建立系统寿命分布的解析表达式非常困难。

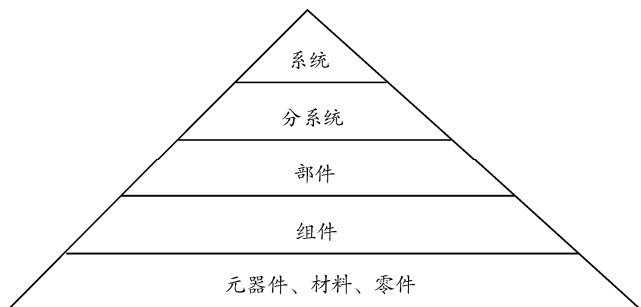


图 1 复杂系统金字塔结构

为确定全弹系统的寿命分布，进而进行全弹系统的寿命预测，关键是获取系统寿命数据。在缺乏相应试验或现场数据支持的情况下，采用仿真方法来获取全弹系统的寿命数据不失为一种有效的策略。其基本思想是：根据关键寿命部件的贮存寿命分布随机抽样得到各组成单元的失效时间，然后根据系统与组成单元的寿命关系求得系统失效时间，进行多轮抽样即可获得一组系统寿命数据。在此基础上可以优选系统寿命分布并估计分布参数，进而预测全弹系统的贮存寿命。

## 2 关键寿命部件的随机寿命抽样

机载导弹包含多种类型的部件和材料，不同类型的部件和材料服从不同的寿命分布。经过长期的

实践积累及理论研究，已明确规定了一些部件、材料的寿命分布类型，如 GB2689.1—81 规定电子元件的寿命分布为威布尔分布；GJB736.13—91 规定火工品的寿命服从对数正态分布；QJ2329—92 规定固体推进剂的寿命服从正态分布等。总的来说，关键寿命部件主要有 4 种寿命分布类型，即指数分布、威布尔分布、正态分布、对数正态分布。用仿真方法对关键寿命部件进行随机寿命抽样，就是产生上述分布的随机数。

**定理 1** 如果随机变量  $X$  的分布函数  $F(x)$  连续，则  $r=F(x)$  是  $(0,1)$  区间上均匀分布的随机变量<sup>[15]</sup>。

由于产生  $(0,1)$  区间上均匀分布的随机数  $r$  比较简单；因此，当连续分布  $F$  的逆函数  $F^{-1}$  可计算时，可以通过生成一个随机数  $r$ ，然后通过逆变换  $X = F^{-1}(r)$  来模拟随机变量  $X$ 。

1) 指数分布的随机数。

指数分布函数为  $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ ，由于在  $(0,1)$  区间上  $r$  与  $1-r$  同分布，所以指数分布的抽样公式为

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln r. \quad (1)$$

2) 威布尔分布的随机数。

威布尔分布函数为  $F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m\right\}$ ，解方程  $r = 1 - \exp\left\{-\left(x/\eta\right)^m\right\}$ ，并且在  $(0,1)$  区间上  $r$  与  $1-r$  同分布，所以威布尔分布的抽样公式为

$$x = \eta(-\ln r)^{1/m}. \quad (2)$$

3) 正态和对数正态分布的随机数。

在用逆变换法对正态分布进行随机抽样时，需要求正态分布的分位数，计算比较复杂；因此，笔者给出一种较简单的近似抽样方法。

设  $r_1, r_2, \dots, r_n$  是相互独立且在  $(0,1)$  区间均匀分布的随机变量，因为  $E(r_i) = 1/2, D(r_i) = 1/12$ ，所以有

$$x_n = \frac{\sum_{i=1}^n r_i - \frac{n}{2}}{\sqrt{n/12}}.$$

渐近服从标准正态分布。特别地，当  $n=12$  时，有  $x = \sum_{i=1}^{12} r_i - 6$  近似服从标准正态分布。

这种近似抽样方法计算简单且精度较高，当均匀分布随机数有一定偏离时，仍然能够得到较好的正态分布随机数。

服从  $N(\mu, \sigma^2)$  正态分布随机变量的抽样公式为

$$x = \mu + \sigma \sum_{i=1}^n r_i - 6. \quad (3)$$

服从对数正态分布的随机变量满足  $\ln X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，所以对数正态分布的抽样公式为

$$x = \exp(w)。 \tag{4}$$

式中  $w$  为正态分布  $W \sim N(\mu, \sigma^2)$  的随机数。对于其他类型的寿命分布，仍可用逆变换方法产生相应的随机数。

由以上可知，在已知导弹系统关键部件寿命分布的条件下，可以通过一系列的随机抽样来获取组成单元的失效时间。若知道系统与组成单元的寿命关系，就可以获得全弹系统的失效时间。

### 3 全弹系统寿命预测仿真模型

从贮存可靠性角度来看，机载导弹主要有 4 类组成单元：第 1 类是固有贮存期长、贮存可靠性高、在整个贮存期变化极小的部件，如弹体结构壳段、弹翼、舵面等，这类单元对全弹系统贮存寿命几乎没有影响，可以不予考虑；第 2 类是大型组合体或拆换困难且对导弹贮存寿命有决定性影响的关键部件，如固体发动机、探测器、燃气发生器等，所有这类单元在系统贮存可靠性结构中的关系可以简化为串联模型，如图 2(a)所示；第 3 类是固有贮存期相对较短且有一定数量备件的可更换部件，如密封圈、紧固件、灌封电子设备等，这类单元失效时可以用全新件替换，因此其在系统贮存可靠性结构中可以简化为旁联模型，如图 2(b)所示；第 4 类是贮存时不装在弹上、使用时再装配的部件，这类部件一般有一定数量的平行贮备件，如战斗部、火工品等，由于在装配时通常在所有平行贮备件中选取正常的部件，因此这类单元在系统贮存可靠性结构中可以简化为并联模型，如图 2(c)所示。需要指出的是，各种型号的机载导弹可能包含所有 4 类单元，也可能只是其中几类单元的组合，确定其贮存可靠性结构需要具体情况具体分析。

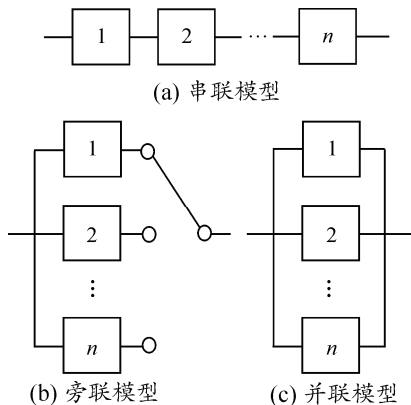


图 2 基本可靠性模型

若已知某型机载导弹的组成，其贮存可靠性结构可以简化为串联、旁联、并联等基本模型的组合，各模型相应的寿命关系如下：

$$t_s = \min(t_1, t_2, \dots, t_n)； \tag{5}$$

$$t_b = \sum_i^n t_i； \tag{6}$$

$$t_p = \max(t_1, t_2, \dots, t_n)。 \tag{7}$$

式中： $t_s$ 、 $t_b$ 、 $t_p$  分别为串联、旁联、并联子系统的贮存寿命； $t_k (k=1, 2, \dots, n)$  为相应组成单元的贮存寿命。根据系统贮存可靠性结构组合各模型的寿命关系，可以建立全弹系统寿命预测模型

$$T = g(t_k), k=1, 2, \dots, n。 \tag{8}$$

式中  $T$  表示全弹系统的贮存寿命。

综上所述，在已知各关键部件寿命规律和系统组成的条件下，运用随机抽样方法产生服从不同分布的关键部件失效时间，根据式 (8) 求得系统失效时间，完成一次仿真。进行  $M$  次仿真，相应得到  $M$  个系统失效时间，以此为样本可以进行全弹系统寿命分布拟合与参数估计。仿真流程如图 3 所示。

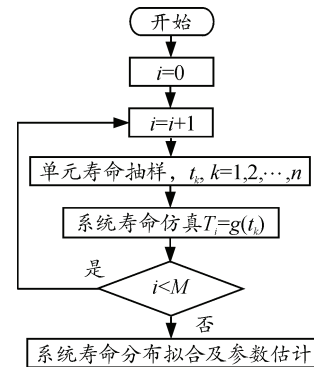


图 3 全弹系统寿命仿真流程

### 4 实例分析

某型主战空空导弹大量装备作战部队，有效预测其贮存寿命，对于降低维修保障费用、提高战备完好性具有重要意义。结合设计措施及维护使用信息，经过失效分析明确了影响该型空空导弹贮存寿命的关键部件，各关键部件及其寿命分布如表 1。

以上各关键部件当中，位标器、伺服机构、变流机、无线电引信、安保机构、陀螺舵等属于第 2 类单元；热电池、电子部件属于第 3 类单元，其备件数量为 2 个；战斗部、固体火箭发动机属于第 4 类单元，其平行贮备件为 2 个。因此，全弹系统的贮存可靠性结构可以描述成图 4。由系统贮存可靠性结构可知，全弹系统与其关键部件的寿命关系可

以表示为式 (9)。设置仿真次数为 1 000 次，根据各关键部件的寿命分布随机抽样其失效时间，由式 (9) 可以得到全弹系统的寿命仿真数据。

表 1 某型空空导弹关键部件及其寿命分布

系统关键部件	分布类型	分布参数
位标器	指数	85 500
伺服机构	威布尔	7 700, 1.5
热电池	指数	16 800
变流机	指数	22 500
电子部件	威布尔	6 400, 1.8
无线电引信	指数	72 000
安全与解除保险机构	指数	75 000
战斗部	对数正态	10.8, 2
陀螺舵	威布尔	2 800, 4.2
固体火箭发动机	正态	3 800, 400

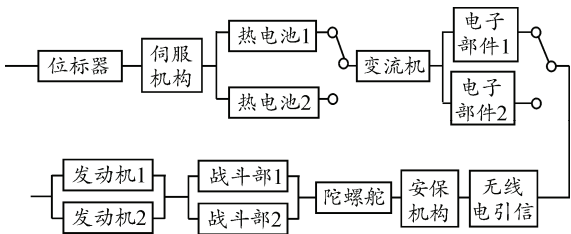


图 4 某型空空导弹贮存可靠性结构

$$T = \min \{t_1, t_2, t_{31} + t_{32}, t_4, t_{51} + t_{52}, t_6, t_7, t_8, \max[t_{91}, t_{92}], \max[t_{101}, t_{102}]\} \quad (9)$$

以平均累积误差评价威布尔分布、正态分布、对数正态分布对系统寿命数据的拟合效果，结果如表 2 所示。可见正态分布拟合效果最好，进行参数估计得到该型空空导弹寿命分布为  $X \sim N(3\ 113.5, 1\ 113.8^2)$ ，如图 5 所示。

表 2 寿命分布拟合平均累积误差

分布类型	威布尔	正态	对数正态
平均累积误差	0.032	0.013	0.028

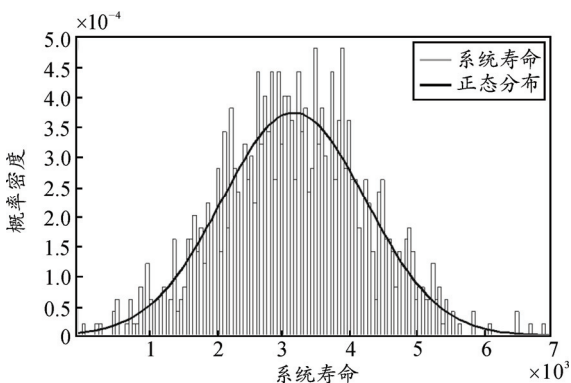


图 5 某型空空导弹寿命分布拟合

对全弹系统的寿命指标进行计算，得到结果如下：贮存时间为 4 a(1 460 d)时该型空空导弹的贮存可靠度的概率密度如图 6 所示，当置信水平  $\gamma=0.9$

h，贮存可靠度的下限值为  $R_L(1\ 460)=0.904\ 7$ 。

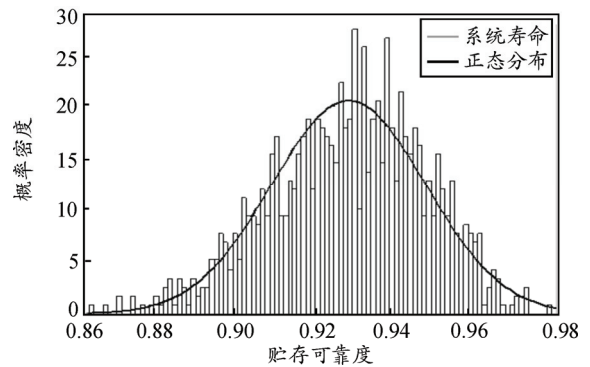


图 6 贮存可靠度概率密度曲线

给定贮存可靠度为 0.9 h 该型空空导弹的可靠贮存寿命概率密度如图 7 所示，当置信水平  $\gamma=0.9$  h 时，可靠贮存寿命的下限值为  $t_{pL}(0.9)=1\ 491$  d，即约为 4.1 a。

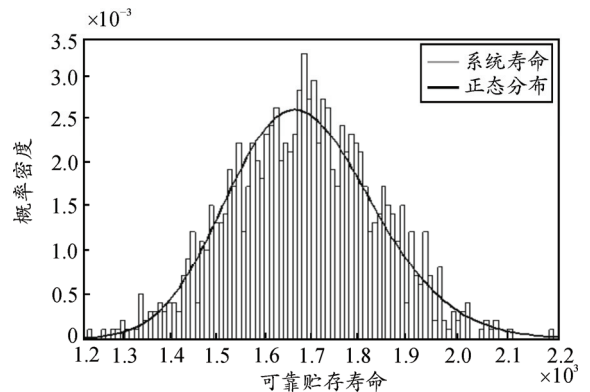


图 7 可靠贮存寿命概率密度曲线

该型空空导弹 2008 年 1 月批量装备 4 个航空兵师，跟踪该型空空导弹的实际贮存情况，统计在装备部队后 2011 年 10 月至 2012 年 3 月这段时间内，各航空兵师同一批次导弹的失效返厂的比例，以此近似贮存时间为 4 a 时的贮存可靠度，用以验证上述预测结果。统计结果如表 3 所示，根据实际统计数据求得的贮存可靠度均大于预测的贮存可靠度置信下限，说明预测结果可信程度较高，表明该方法是有用的。

表 3 某型空空导弹失效数据统计结果

航空兵师	A	B	C	D
失效数	2	2	3	3
导弹总数	36	32	36	36
贮存可靠度	0.944 4	0.937 5	0.917 6	0.917 6

### 5 结论

在关键部件寿命规律及系统组成已知的前提下，研究机载导弹全弹系统的寿命预测。在系统级

寿命数据缺乏的条件下,借助关键部件寿命抽样和系统贮存可靠性结构获取系统寿命数据,进而预测系统贮存寿命。将该方法应用于具体型号机载导弹的寿命预测,取得了较好效果,具有一定实用性。

参考文献:

[1] 肖军, 余保民, 吴洪涛. 空空导弹的寿命研究[J]. 航空兵器, 2009(2): 61-64.

[2] 冯志刚, 方昌华, 李静. 国外导弹加速老化试验现状分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2007, 37(4): 30-34.

[3] Russakov L. Accelerated aging testing of energetic components-a current assessment of methodology[R]. AIAA2000: 36-46.

[4] Fred G. Environmental mission profile facility for reliability testing of multiple cruise missiles electronic boxes[R]. AIAA92: 38-93.

[5] Gates T. On the use of accelerated rated aging methods for screening high temperature polymeric composite material[R]. AIAA99: 24-68.

[6] 朱觅, 王卫国, 吴昌. 某型空空导弹贮存寿命研究[J]. 国防技术基础, 2007, 5(5): 40-44.

[7] 王卫国. 空空导弹固体火箭发动机贮存寿命探讨[J]. 固体火箭技术, 2007(6): 17-19.

[8] 杨继坤, 徐廷学, 顾钧元. 导弹推进系统贮存寿命预测技术与仿真系统开发[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(3): 137-140.

[9] 张亚, 安晓红. 火工品贮存寿命评估方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 74-76.

[10] 张亚, 赵河明, 董少峰. 无线电引信贮存寿命预测方法研究[J]. 探测与控制学报, 2001, 23(4): 26-29.

[11] 王浩伟, 徐廷学, 王波. 基于 Wiener 模型的某型导弹电连接器寿命预测[J]. 战术导弹技术, 2014(1): 42-45.

[12] 徐廷学, 陈海建, 滕克难, 等. 导弹贮存寿命预估的组合模型[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(10): 124-127.

[13] 吴进煌, 戴邵武, 徐胜红. 基于可靠度预估模型的导弹贮存寿命分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(4): 477-479.

[14] 张永进, 赵明. 基于定期检测的贮存可靠性模型及其参数估计[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 38(10): 82-88.

[15] 肖刚, 李天柁. 系统可靠性分析中的蒙特卡罗方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 25-38.

\*\*\*\*\*

(上接第 18 页)

传递对准过程所用时间为平均约为 2 min, 则对准度的计算如下:

$$\eta_{CEP} = \eta_{\sigma_{CEP}} \times 100\% / 2 = \frac{CEP0 / 1.1774}{CEP1 / 1.1774} \times 100\% / 2 = \frac{1.2}{1.8} \times 100\% / 2 = 66.67\% / 2。$$

3 结论

由理论分析和计算表明:对准度的概念合理、使用方便,该指标既能反映对准时间和对准精度,又能反映不同机动对准方案的差异等,建议该指标在传递对准方案验证及鉴定相关标准规范的制定中参考使用。具体说明如下:

1) 对准度指标可完全实现对传递对准性能的评定要求。它既能体现对准时间、对准精度,又能体现出不同对准方案的差异,是 1 个对传递对准进行精度评定的通用的综合性指标。

2) 对准度的计算完全可利用惯性导航已有非常成熟的统计推断的评定方法来进行,不用对试验鉴定设备进行更新,试验场利用原有设备即能实现。

3) 利用实际的惯导系统试验统计数据,可以检验“直接法和间接法在评定传递对准精度时具有一致性”这一重要结论。

4) 本研究成果可作为制定传递对准精度评定及惯导系统精度评定相关国军标的重要参考。关于不同参数传递对准度之间的关系问题,还需要进一步展开研究。

参考文献:

[1] 罗林丹, 包健. PLCopen 运动模块参数传递方法的研究[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 945-950.

[2] GJB 729—1989. 惯性导航系统精度评定方法[S].

[3] 张宗麟. 惯性导航与组合导航[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

[4] 张馨, 程向红, 周本川. 基于固定区间最优平滑的传递对准精度评估[J]. 导航与控制, 2010, 9(2): 13-17.

[5] 艾弗里尔. 高精度惯性导航基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[6] 周智, 张之敬, 张晓峰, 等. 基于视觉对准的非硅 MEMS 微小型结构件微装配系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(5): 79-81.