

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.07.010

基于 ADAMS 的某榴弹发射器动力学仿真分析

郑秋, 吴永军

(中国兵器工业第 208 研究所 枪械系统研究室, 北京 102202)

摘要: 利用 Solidworks 和 ADAMS 软件联合建立了某榴弹发射器的虚拟样机模型, 针对武器自动方式提出连发控制方法, 并对模型进行了验证, 结果表明仿真与试验数据基本吻合, 符合工程分析的要求。在此基础上对供弹机构、枪机以及枪机和节套的撞击力等进行了仿真, 获得试验无法测量的参数, 分析结果表明采用虚拟样机技术对该榴弹发射器动态特性分析是可行的。

关键词: ADAMS; 榴弹发射器; 虚拟样机; 连发射击

中图分类号: TJ29; TP391.9 **文献标识码:** A

Analyzing Dynamics Simulation of Certain Grenade Launcher Based on ADAMS

Zheng Qiu, Wu Yongjun

(Research Department of Gun Systems, No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: The virtual prototype model of certain grenade launcher system is established by taking using of software Solidworks and ADAMS. Control method of continuous firing is put forward according to the weapon automatic action, and the model is confirmed. The results indicate that simulation is consistent with the experiment data. Then, the feeding system, bolt head and the impact force between bolt head and barrel extension are simulated. The parameters that couldn't be get from experiments are obtained. Analyzing results indicate that analyzing dynamic characteristics of the grenade launcher system by virtual prototype model is feasible.

Keywords: ADAMS; grenade launcher; virtual prototype; continuous firing

0 引言

自动武器是以高温高压的火药燃气为动力来发射弹丸的特殊机械系统。传统的自动武器动力学分析是以牛顿定律为代表的经典力学为基础, 运用质量替换理论、传速比和传动效率等概念对简化模型进行的单刚体动力学分析。这种手段无法定量分析系统的动态特性, 尤其是系统内多个构件之间的相互作用。将多体动力学引入自动武器领域, 可以全面定量描述系统的动态特性和各构件的运动规律。多体动力学分析软件 ADAMS 是专门用于机械产品虚拟样机开发方面的工具, 通过虚拟样机试验和测试, 在产品开发阶段就可以帮助设计者发现设计缺陷, 并提出改进方法^[1]。将 ADAMS 软件应用于自动武器领域, 可以随时对系统进行性能测试, 检验机构动作可靠性, 从而减少重复试验量, 节省开发费用, 缩短研制周期, 提高开发效率, 故采用 ADAMS, 对某榴弹发射器进行动力学仿真分析。

1 建立榴弹发射器虚拟样机模型

1.1 模型简化与假设

1) 不考虑发射时大地对机匣的作用力, 认为大地与机匣固连为一体;

2) 不考虑发射时弹丸作用在枪管上的力, 并且将火药燃气压力以外力形式加载于枪机和活塞上;

3) 由于作用在自动机上的抽壳阻力和拨弹阻力远小于膛底载荷和导气室载荷, 故忽略抽壳阻力和拨弹阻力。

1.2 生成刚体

运用 Solidworks 软件建立了榴弹发射器的三维模型。该发射器主要由机匣组件、枪管组件、自动机组件、供弹机组件和枪管缓冲器组件组成。目前实体造型的核心有 2 种, 一种是 ACIS, 另一种为 Parasolid。Solidworks 软件是以 Parasolid 为核心的, 并且可以生成以“X_T”为扩展名的文件。将三维模型另存为以“X_T”为扩展名的文件, 导入 ADAMS/View 模块中, 实现从 CAD 到 CAE 的传递。在 ADAMS 中, 输入部件材料密度, 生成刚体。

1.3 添加运动副和柔性连接

该榴弹发射器为导气式和枪管短后坐的混合自动方式, 并采用前冲击发方式。自动循环动作如下: 扣动扣机压倒阻铁, 自动机复进, 推弹入膛, 机心到位时撞击枪管, 枪管复进, 机匣继续复进, 带动枪机闭锁, 走完自由行程后, 打燃枪弹的底火, 弹

收稿日期: 2010-01-03; 修回日期: 2010-03-10

作者简介: 郑秋 (1985-), 男, 江苏人, 在读研究生, 从事自动武器的设计和仿真研究。

头在火药燃气压力的作用下向前运动。弹头运动至导气孔之前, 枪管、枪机、机框三者结合在一起呈闭锁状态后坐; 弹头通过导气孔后, 一部分火药燃气被导入导气室, 随着气室火药燃气压力的增大, 机框加速后坐, 当相对位移大于自由行程时, 枪机在机框的带动下开锁, 然后与机框一同后坐, 完成抽壳、供弹、抛壳等一系列的动作。同时, 枪管在膛内火药气体的作用下继续后坐到位, 撞击机匣, 然后在枪管缓冲器的作用下复进到前方位置。由于大部分组件都是以机匣为依托实现各自机构动作, 故将机匣和大地固连, 以机匣而非大地为参照系。

主要部件与机匣的连接关系如图 1。

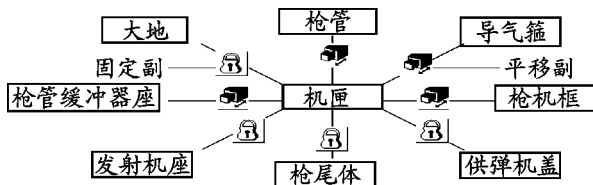


图 1 部件与机匣连接关系图

柔性连接主要指各种弹簧。在 ADAMS 里创建弹簧并输入弹簧刚度和预压力参数, 连接 2 个相互作用的构件。最终建立虚拟样机模型如图 2。



图 2 虚拟样机模型

2 添加载荷

2.1 膛底载荷和导气室载荷^[2]

2.1.1 膛底载荷

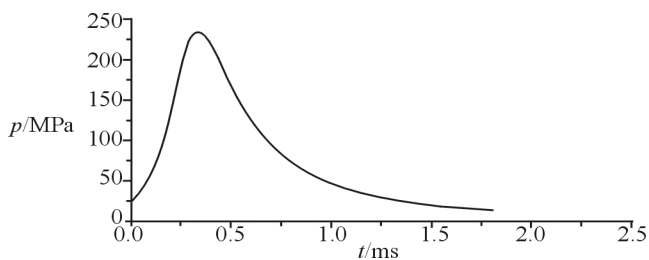


图 3 内弹道 P-t 曲线

膛内火药燃气压力作用时期主要分为内弹道和后效期。对于内弹道时期, 代入枪管、弹结构参数, 用内弹道计算公式可以计算出膛压曲线。离散膛压曲线, 导入 ADAMS 中生成 Spline 曲线。利用 ADAMS 中 AKISPL 函数, 形如: AKISPL (time,0,Spline_m,0) (m 为 Spline 序号) 插值求得内弹道时期膛压, 然后再乘以枪膛横截面积得到膛

底载荷。内弹道 P-t 曲线如图 3。

后效期采用布拉文经验公式如式 (1)。

$$F = p_k e^{-At} S \quad (1)$$

式中: p_k 为弹头飞出膛口时膛内平均压力; t 为从弹头飞出膛口时算起的时间; A 为常系数; S 为枪膛横截面积。

膛底载荷曲线如图 4。

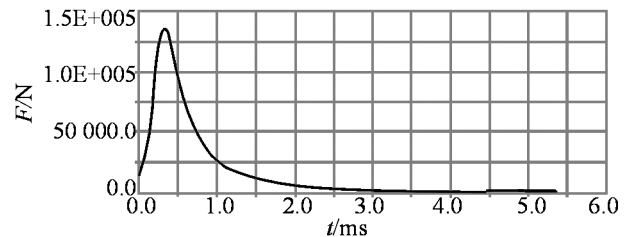


图 4 膛底载荷曲线

2.1.2 导气室载荷

气室火药燃气压力的变化规律与膛内火药燃气压力的变化规律有关, 也与导气装置的结构参数有关。目前采用较多的是布拉文经验公式, 如式 (2)。

$$\begin{cases} F_s = p_d e^{-\frac{t}{b}} (1 - e^{-\alpha \frac{t}{b}}) S_s \\ \alpha = \frac{1}{\frac{1}{\eta_s} - 1} \\ b = \frac{i_0}{p_d} \end{cases} \quad (2)$$

式中: p_d 为弹头经过导气孔瞬间的膛内平均压力; t 为从弹头经过导气孔瞬间开始算起的时间; b 为与膛内压力冲量有关的时间系数; α 为与导气装置结构参数有关的结构系数; S_s 为活塞横截面积; η_s 为气室冲量效率; i_0 为膛内火药燃气压力总冲量。

导气室载荷曲线如图 5。

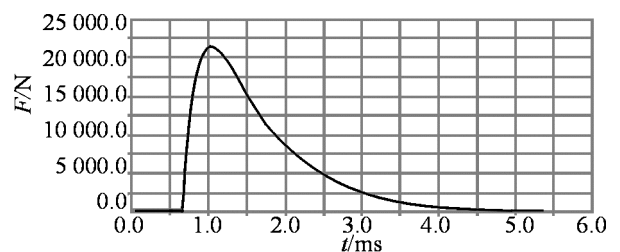


图 5 导气室载荷曲线

2.2 接触副

接触副设立于直接接触的两刚体之间, 选择 Impact 函数作为接触力计算函数、接触类型为“实体-实体”(Solid to Solid), 分别输入接触刚度

(Stiffness)、指数 (Force Exponent)、阻尼 (Damping) 和切入深度 (Penetration Depth) 等参数。须注意: 该榴弹发射器是采用枪机回转闭锁方式, 主动件为机框, 且螺旋槽位于枪机上。文献[3]指出: “枪机在运动过程中, 有一段是螺旋线运动, 如果直接定义枪机和机框约束为‘实体-实体’接触, 那么仿真精度将较差”。以枪机和机框完全闭锁时为坐标原点, 可以对螺旋线离散化, 通过编程计算出各离散点坐标, 再生成 B-Spline 曲线, 然后将此曲线“镶嵌”到枪机上。定义枪机和机框约束为“点-线”(Point to Curve) 接触。另外, 在将三维模型导入 ADAMS 之前还应该参考装配体的公差配合关系, 及时修改构件的几何尺寸, 这样一方面可以使仿真更加接近实际, 另一方面可以避免因两构件大量的相互渗入而增加接触力计算的难度。

3 连发控制与模型验证

3.1 连发控制

由于该榴弹发射器自动方式属于全自动, 可以实现连续射击, 因此在对单发射击分析的基础上还要对连发射击进行必要的探讨。多发射击过程中, 后一发射击的初始条件为它前一发射击后的最终状态, 这就给每次射击的初始条件带来不确定性, 即每次射击的自动循环时间不一定等同。如前文所述, 所添加的载荷是与时间相关的。如果按照传统方法先进行单发的仿真, 结束后记录下首发循环结束时枪机回转到位完全闭锁的时间 t_1 , 然后再加上第二发射击的载荷, 但是要改变时间: 内弹道时期膛底载荷时间变为 $\text{time}-t_1$, 后效期膛底载荷时间变为 $\text{time}-t_n-t_1$, 其中, t_n 为弹头从发射到飞出膛口的时间; 导气室载荷时间变为 $\text{time}-t_w-t_1$, 其中, t_w 为弹头从发射到经过导气孔的时间。即要模拟 $n(n \geq 2)$ 发射击, 就必须分别对单发一直到 $n-1$ 发射击进行仿真, 记录每次结束时间。这种方法需要反复修改载荷函数, 效率很低。

ADAMS 软件提供了 Sensor (传感器)。传感器能感知事件的发生并返回其自身值。定义了 2 个传感器: Sensor_1 和 Sensor_2。

Sensor_1: Event Definition: DM(m, n), 其中 m、n 分别为节套和机框上指定 Marker 点序号, 定义 2 个特定点之间的距离为不大于 4.3, 即枪机闭锁完毕时触发传感器; Event Evaluation: time, 返回传感器触发时的时间, 即 SENVAL (Sensor_1) =time;

Sensor_2: Event Definition: DM(p, q), 其中 p、q 分别为机框和枪尾体上指定 Marker 点序号, 定义 2 个特定点之间的距离为不大于 0.01, 即机框后坐到位时触发传感器; Event Evaluation: time, 返回传感器触发时的时间, 即 SENVAL (Sensor_2) =time;

设置好传感器后, 在如前所述的载荷函数中要把时间项再减去 SENVAL (Sensor_1), 以保证连续射击时及时添加载荷。

在 ADMAS 中编写脚本程序, 用脚本式仿真控制。程序如下:

DEACTIVATE/SFORCE, ID=1 初始化使膛底载荷失效;

DEACTIVATE/SFORCE, ID=2 初始化使导气室载荷失效;

DEACTIVATE/SENSOR, ID=2 初始化使传感器 2 失效;

SIMULATE/DYNAMIC, END=200, STEPS=3 000 触发传感器 1, 行将开锁, 开始进行动力学仿真, 终止时间为 200 ms, 步数为 3 000 步 (下同);

ACTIVATE/SFORCE, ID=1 激发膛底载荷, 加载;

ACTIVATE/SFORCE, ID=2 激发导气室载荷, 加载;

DEACTIVATE/SENSOR, ID=1 使传感器 1 失效;

ACTIVATE/SENSOR, ID=2 打开传感器 2;

SIMULATE/DYNAMIC, END=200, STEPS=3 000 自动机后坐到位触发传感器 2, 并进行动力学仿真;

DEACTIVATE/SFORCE, ID=1 使膛底载荷失效;

DEACTIVATE/SFORCE, ID=2 使导气室载荷失效;

DEACTIVATE/SENSOR, ID=2 使传感器 2 失效;

ACTIVATE/SENSOR, ID=1 打开传感器 1;

SIMULATE/DYNAMIC, END=200, STEPS=3 000 自动机完全闭锁触发传感器 1, 并进行动力学仿真。

以上程序为单发射击程序, 若要实现多发射击, 只需要在原程序后添加初始化 (前四句) 以后的程序, 并改变仿真结束时间和步数, 每多一发射击就添加一次程序。

3.2 模型验证

为验证所建立的虚拟样机模型是否可行, 进行了三连发的仿真, 得到自动机位移和速度曲线 (如

图6)、枪管位移和速度曲线(如图7)以及枪尾后坐力曲线(如图8), 并将试验结果与仿真结果进行比较如表1。误差均在10%以内, 在工程允许范围内, 因此建立的虚拟样机模型是可以信任的。

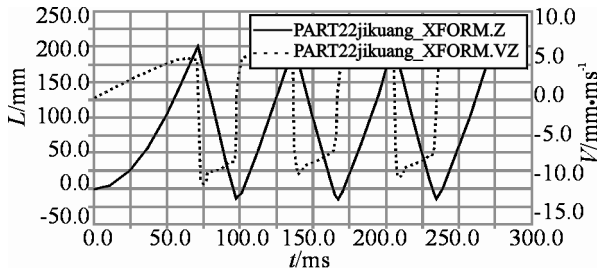


图6 自动机位移、速度曲线

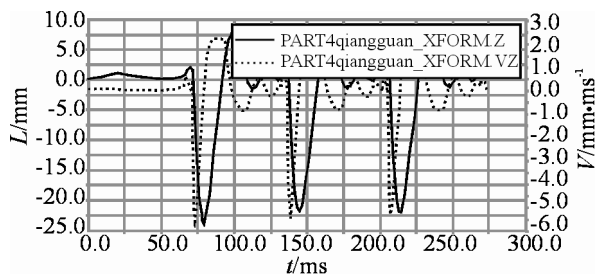


图7 枪管位移、速度曲线

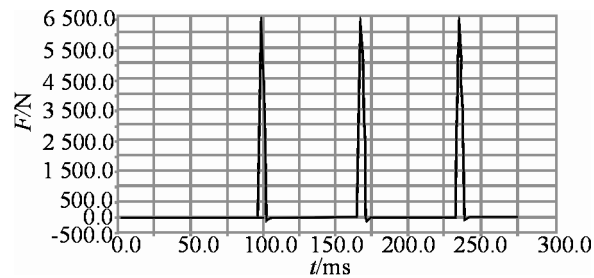


图8 枪尾后坐力曲线

1) 通过图6可以看出: 自动机前冲击发位移为204 mm, 后坐到位移为214 mm; 自动机后坐平均最大速度9.690 m/s; 复进平均最大速度为4.657 m/s; 2) 通过图7可以看出: 枪管最大后坐位移为24 mm, 最大前冲位移为7.5 mm; 后坐平均最大速度为5.547 m/s; 3) 通过图8可以看出, 机框与枪尾体撞击比较平稳, 后坐力平均为6.396 KN。

表1 仿真、试验结果对比

| | 仿真值 | 试验值 | 相对误差 |
|-------------------|-------|-------|------|
| 自动机后坐平均最大速度 (m/s) | 9.690 | 9.651 | 0.4% |
| 自动机复进平均最大速度 (m/s) | 4.657 | 4.532 | 2.8% |
| 枪管后坐平均最大速度 (m/s) | 5.547 | 5.683 | 2.4% |
| 枪尾后坐力 (KN) | 6.396 | 6.699 | 4.5% |

3.3 仿真分析

在虚拟样机模型可行的基础上, 可以仿真分析一些不太方便测量的参数, 同时可以很清晰地看到原来无法看见的机构动作, 充分显示出虚拟样机在产品中的优势。分别分析了供弹机构运动学特性、枪机的运动学特性以及枪机和节套撞击力, 如图9~图11。

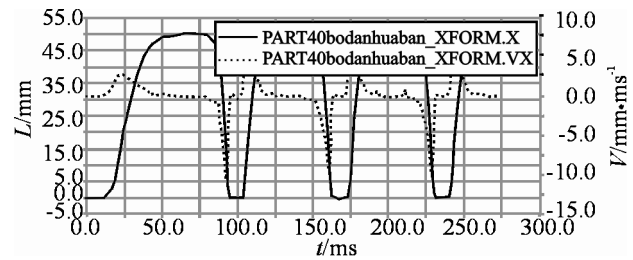


图9 拨弹滑板位移、速度曲线

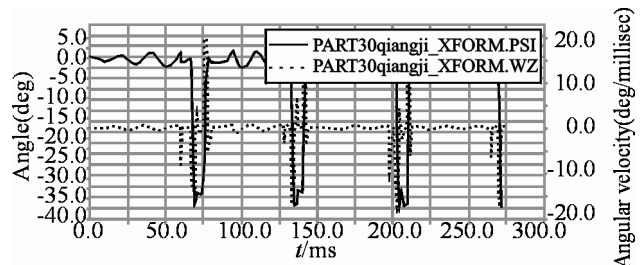


图10 枪机回转角度和角速度曲线

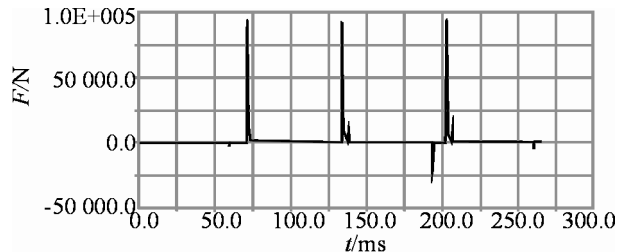


图11 枪机与节套撞击力曲线

1) 由图9可以看出, 拨弹滑板行程平均为50 mm, 节距为37.5 mm, 满足滑板行程大于节距3~5 mm的要求。拨弹滑板的最大速度平均为10.506 m/s, 发生在后坐时期拨弹齿拨弹到位即将回位的时刻; 2) 由图10可以看出, 枪机最大回转角度平均为36.7°, 此时枪机回转完成闭锁, 而在此之前枪机有不同程度的小角度旋转, 这是由于枪机与制转卡锁存在间隙, 使枪机于闭锁前和开锁后在惯性力作用下小幅度旋转。在枪机开锁完成时刻, 角速度达到最大, 平均为329.035 rad/s, 数值较大, 这也充分表明自动循环时间的短暂性; 3) 由图11可以看出三连发射过程中枪机与节套撞击力的变化趋势。前冲击发时枪机复进与节套接触开始闭锁, 此时最大撞击力平均为8.674 KN。

(下转第39页)

在取药时, 采取药勺每取一次, 供药盘转动一次的方式, 以消除每次取药产生的沟槽, 同时也避免振动时药剂产生分层现象。在取药及放药时, 为了使药勺装实及充分倒药, 均采用同期振动的方式。

2) 药剂敏感度高

由于针刺药剂感度较高, 采用传统的计量板装药或螺杆螺旋装药方式均无法满足其安全要求。本系统采用的勺形装药方式, 机械零部件与药剂摩擦极小, 动力采用较安全的气动元器件, 传感器采用本安型, 刮药橡胶采用防静电型, 保证了生产的本质安全性。

同时, 勺形装药机还设有防护罩及模具进出的防爆门, 实现高危工位的人机隔离自动化操作。在防护罩上开有 4 个由隔爆玻璃组成的观察窗, 便于生产时进行工况监控。

3) 装填药剂量少、精度较高

由于药剂量少(10~20 mg), 精度较高($\pm x$ mg),

(上接第 31 页)

发射后, 膛底载荷作用于枪机弹底窝上, 使枪机闭锁支撑面和节套强烈撞击, 产生巨大冲击力, 平均为 97.316 kN。因存在闭锁间隙, 闭锁支撑面与节套接触反弹后继续撞击, 冲击力平均为 17.018 kN, 为进一步校核节套和枪机的强度提供了科学依据。

4 结论

榴弹发射器口径、膛底载荷和导气室载荷峰值较大, 给设置构件约束和接触增加了不小困难。对添加刚体之间的约束进行了讨论, 也同样适用于其他多刚体动力学的仿真。采用传感器和脚本控制有效实现连发控制, 仿真结果与试验结果相吻合, 验证了所建立的虚拟样机模型的可行性。在此基础上

(上接第 34 页)

得到评判向量 $B = w \otimes R = (0.134, 0.275, 0.341, 0.148)$, 归一化处理后, $B = (0.149, 0.306, 0.381, 0.164)$ 。由最大隶属度原则, 选取最大的评判集指标 0.381 作为最终评判结果, 表 2 中与之对应的评价结果为一般。因此, 该装备维修保障系统效能为一般。

4 结束语

该评估方法思路清晰、计算方便, 为装备维修保障系统评估体系标准化提供了一种思路。

参考文献:

为了满足精度要求, 装药勺内腔尺寸经过精密计算, 同时其内表面加工时抛光, 达到镜面, 可有效防止药剂粘连, 确保精度。药勺取药后采用防静电橡胶条弹性压紧刮平, 确保定容精度。

3 结束语

该技术解决了针刺雷管药剂流散性差、感度高、装药精度要求高等系列问题, 实现了高敏感火工品的自动化无人装配生产, 大幅度地减少了操作人员, 实现了压点减员, 提高了生产安全性, 也提高了生产质量及生产效率。

参考文献:

- [1] 刘伟钦, 等. 火工品制造[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 孙安昌. 针刺雷管自动装配机自动装压药技术研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(增刊): 23-25.
- [3] 高丰, 彭旭, 王雪晶, 等. 基于高速转子式结构的小口径枪弹装药装配设备研究[J]. 2009, 28(增刊): 26-29.

仿真得出的运动学和动力学数据为进一步研究提供了科学数据, 为多刚体动力学仿真提供了较为普遍的研究方法。

参考文献:

- [1] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 甘高才. 自动武器动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
- [3] 贾智宏, 葛藤, 周克栋. 基于 ADAMS 的自动武器虚拟样机研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 648-650.
- [4] 李二华, 郭朝勇, 黄海英, 等. 基于 ADAMS 的弹药运输车辆钢板弹簧建模与刚度测试[J]. 四川兵工学报, 2009(7): 70-72.

- [1] 黄建新, 娄寿春, 张志峰. 基于指数法的装备维修保障系统效能评估模型[J]. 空军工程大学学报, 2006, 7(1): 39-42.
- [2] 穆跃东. 基于模糊综合评判的学员能力评估[J]. 海军大连舰艇学院学报, 2008, 31(2): 69-71.
- [3] 肖丁, 王平. 舰船装备维修保障系统能力评估研究[J]. 海军装备, 2008(4): 25-26.
- [4] 汪应洛. 系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 141-144.
- [5] 宋宁哲, 郭庆养. 基于模糊综合评判的雷达系统效能评估研究[J]. 地面防空武器, 2008, 39(1): 31-34.
- [6] 李东东, 张柳, 刘文武, 等. 维修保障系统平均保障延误时间建模[J]. 四川兵工学报, 2009(10): 22-24.