

doi: 10.7690/bgzd.2013.05.004

某型高炮自动机质量性能评估

李杰仁, 李伟, 吴涛

(武汉军代局驻南阳地区军代室, 河南 南阳 473000)

摘要: 为了提高高技术条件下武器装备的作战效能, 对某型高炮虚拟样机进行研究。在对自动机结构和动作分析的基础上, 结合 Pro/E 和 ADAMS 软件建立了某型高炮自动机虚拟样机, 通过数据校核证明了所建模型的可信性。运用 TOPSIS 法进行系统评估的步骤, 制定了基于虚拟样机的自动机综合性能评估方案, 分析了影响自动机性能的主要故障模式, 对不同初始条件下的自动机进行了仿真, 得到了反映自动机动态性能的参数和评估结果。该结果可为装备质量的控制和预测提供依据。

关键词: 虚拟样机; 自动机; TOPSIS; 性能评估

中图分类号: TJ818 **文献标志码:** A

Performance Evaluation of Certain Type Antiaircraft Automat Quality

Li Jieren, Li Wei, Wu Tao

(PLA Presentation Office in Nanyang District, PLA Military Representation Bureau of
General Equipment Headquarters in Wuhan, Nanyang 473000, China)

Abstract: In order to improve the operational effectiveness of weaponry in the condition of high technology, virtual prototype of an automat was studied. Based on the analysis of structure and movement, automat virtual prototype was set up by the means of Pro/E and ADAMS software package. It is validated that the virtual prototype is creditable through the data checking. A comprehensive performance assessment program of automat based on virtual prototype was developed with the method of TOPSIS. The main failure mode affecting the automat performance was analyzed. Parameters reflecting the dynamic performance of the automat were obtained by simulation in the different initial conditions. The assessment results were obtained, which can provide the basis for equipment quality control and forecast.

Key words: virtual prototype; automat; TOPSIS; performance evaluation

0 引言

虚拟样机技术是近年来在设计 and 制造领域发展较快的一门新技术, 它在机械系统三维实体模型和力学模型建立的基础上, 分析和评价系统性能, 为物理样机的设计、优化和制造提供了依据。运用仿真技术建立机械系统虚拟样机, 可在虚拟环境下模拟系统的运动, 得到系统的三维动态效果, 摆脱物理样机的束缚进行多次仿真试验, 从而简化机械产品的设计开发过程, 缩短开发周期, 减少开发成本, 提高产品质量, 获得最优化和创新的设计成果^[1-2]; 因此, 开展虚拟样机技术研究, 是高技术条件下提高武器装备作战效能, 实现武器装备保障现代化的必然趋势。

ADAMS 作为目前应用最为广泛的多体系统动力学分析软件, 不仅具有强大的实体建模能力, 先进的数值分析技术和方便快捷的图形界面, 而且采用开放式结构, 具有与 CAD、FEA 和控制系统建模软件间的专用接口, 同时允许用户通过 FORTRAN

和 C++ 语言编制子程序与用户接口进行数据交换, 故笔者用 ADAMS 作为机械系统动力学仿真分析的首选平台, 对高炮自动机质量性能进行评估。

1 自动机虚拟样机

1.1 虚拟样机的建立

自动机是高炮的心脏部分, 是武器装备中复杂的多体机械系统, 笔者研究的是身管短后坐、炮闩横动式自动机, 主要组件有炮身、炮闩、驻退机、复进机、输弹机、压弹机和摇架等。高炮射击时, 在炮膛合力作用下, 自动机完成后坐、开闩、抽筒、复进、输弹和关闩等系列复杂动作^[3]。

笔者在 Pro/E 环境下建立自动机的三维实体模型, 通过 Pro/E 与 ADAMS 之间的无缝接口模块 Mechanism/Pro 导入 ADAMS, 在 Pro/E 中赋予的密度等材料特性, 可以继承到 ADAMS 中并自动获得各构件的质心位置、质量和转动惯量。在对自动机的拓扑结构分析基础上通过添加约束、弹簧和碰撞等, 并结合 FORTRAN 语言编程, 编制了后坐阻

收稿日期: 2012-11-16; 修回日期: 2012-12-12

作者简介: 李杰仁(1986—), 男, 河南人, 硕士, 助理工程师, 从事武器监造和武器系统性能评估研究。

力的自定义程序模块，将其链接至 ADAMS 平台，从而得到虚拟样机。自动机虚拟样机模型见图 1。

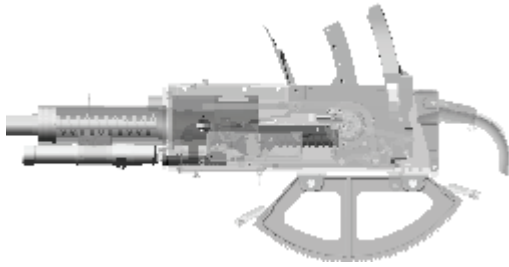


图 1 自动机实体模型

1.2 虚拟样机的校核

虚拟样机完成后，对某高炮在典型工况 0° 高低射角， 0° 水平射角条件下自动机的机构动作进行动力学仿真，结合试验数据对其部分重要特征比较分析见表 1， t_1 为后坐运动时间， t_2 为复进运动时间， t_3 为自动机循环时间，单位为 ms； v_1 为最大后坐速度， v_2 为复进到位速度，单位为 m/s； X 为后坐长度，单位为 mm。从表 1 可看出，自动机运动的主要参数仿真数据与实验数据的误差不超过 10%，满足工程分析的要求，证明了所建模型具有较高的可信性。

表 1 仿真数据与试验数据对比

测试项目	理论数据	试验数据	相对误差/%
t_1 /ms	42	42.6	1.5
t_2 /ms	104.6	105.9	1.3
t_3 /ms	6.276	6.122	-2.5
v_1 /(m/s)	2.070	1.985 0	-5.8
v_2 /(m/s)	137.90	135.98	-1.4
X /mm	253.8	258.9	2.0

2 TOPSIS 法

自动机作为大型复杂的武器装备，涉及性能指标较多。笔者采用目前在系统工程中应用较广的 TOPSIS 法 (technique for order preference by similarity to ideal solution) 对自动机的性能进行评价，TOPSIS 法是对理想解接近度的排序方法。在综合评价中，TOPSIS 法既可以消除各指标不同量纲的影响，又消除了人为主观因素带来的误差，得到更客观全面的综合评价值，比较适合笔者所研究的自动机质量评价^[4]。下面介绍 TOPSIS 价值函数模型的建立方法和计算步骤。

1) 构造样本阵。

记 n 为评价对象 (样本, 方案等) 个数, p 为属性个数, 构造样本阵如式 (1):

$$X_{n \times p} = \begin{bmatrix} x_1^T \\ x_2^T \\ \vdots \\ x_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 对样本阵原始数据进行处理。

对样本阵 X 中的指标原始值进行同趋化处理, 使处理后所有指标的数据为正指标值。各项指标可以归为 2 种类型: 第 1 类是指标值越大越好的指标, 称为正向指标; 第 2 类是指标值越小越好的指标, 称为逆向指标^[5]。从而得到矩阵 $Y_{n \times p}$, 其中:

$$y_{ij} = \begin{cases} x_{ij} & \text{对正指标} \\ -x_{ij} & \text{对负指标} \end{cases}$$

对 $Y_{n \times p}$ 中各元做如下标准化变换:

$$z_{ij} = \frac{(y_{ij} - \bar{y}_j)}{s_j} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p) \quad (2)$$

其中: $\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ij}}{n}$; $s_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{n-1}$, 得到标准化阵:

$$Z_{n \times p} = \begin{bmatrix} z_1^T \\ z_2^T \\ \vdots \\ z_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1p} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{np} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3) 对标准化阵求相关系数阵, 如式 (4):

$$R = \frac{Z^T Z}{n-1} = (r_{ij})_{p \times p} \quad (4)$$

4) 解样本相关系数阵 R 的特征方程 $|R - \lambda I_p| = 0$ 得到 p 个特征值如式 (5):

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p \geq 0 \quad (5)$$

5) 对每个 $\lambda_j (j=1,2,\dots,p)$, 解方程组 $Rb = \lambda_j b$ 得到单位特征向量 $b_j^0 = b_j / \|b_j\|$ 。 $b_j^0 (j=1,2,\dots,p)$ 全体构成 p 维空间的单位正交基。

6) 求出 $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ip})^T, i=1,2,\dots,n$ 的 p 个规范化分量:

$$u_{ij} = z_i^T b_j^0 \quad (j=1,2,\dots,p)$$

得到规范化决策阵:

$$U_{n \times p} = \begin{bmatrix} u_1^T \\ u_2^T \\ \vdots \\ u_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1p} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{np} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 u_i 为第 i 个样本的规范化向量。

7) 构造单项规范化决策阵。

对规范化决策阵中元做以下平移: $v_{ij} = u_{ij} - \min_i \{u_{ij}\} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p)$ 构造非负元阵。

8) 选择 TOPSIS 价值函数模型。

确定正理想点和负理想点分别为:

$$v^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_p^+)^T, \quad v_j^+ = \max_i \{v_{ij}\} (j=1, 2, \dots, p)$$

$$v^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_p^-)^T, \quad v_j^- = \min_i \{v_{ij}\} = 0 (j=1, 2, \dots, p)$$

计算每个点 v_i 到正理想点 v^+ 和负理想点 v^- 的距离:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

通过计算每个点到正理想点的相对接近度得评价价值:

$$S_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

3 系统性能评估方案

为了对自动机综合性能进行评估, 在所建虚拟样机基础上, 选取复进簧失效、节制环磨损和输弹簧失效 3 个故障因素作为虚拟样机输入参数进行分析。将复进簧刚度失效量 (Δk_1)、节制环磨损量 (Δd_p) 和输弹簧刚度失效量 (Δk_2) 等作为初始条件输入虚拟样机, 通过虚拟样机仿真得到自动机性能评估所需的指标参数值, 运用 TOPSIS 法对自动机的综合性能进行分析和评估, 得到自动机动态性能综合评

表 2 自动机性能仿真和评估算例

序号	$\Delta k_1/(N/mm)$	$\Delta d_p/mm$	$\Delta k_2/(N/mm)$	X_1/mm	X_2/kN	X_3/s	X_4/s	$X_5/(m/s)$	X_6/s	X_7/s	S 值	综合排名
1	2	0.1	0.2	143.7	28.23	43.3	106.1	1.958	91.9	248.6	0.661 8	1
2	4	0.2	0.4	149.2	28.17	45.2	109.5	1.965	94.2	258.7	0.612 8	2
3	6	0.3	0.6	154.8	28.68	47.6	104.3	1.973	95.0	268.3	0.189 4	7
4	4	0.1	0.6	145.9	28.69	43.6	109.7	1.920	99.0	258.2	0.592 8	3
5	6	0.2	0.4	151.1	29.09	45.4	107.6	1.919	96.4	262.5	0.360 9	6
6	2	0.3	0.2	153.2	28.36	46.7	106.3	2.057	99.4	253.5	0.517 8	5
7	4	0.1	0.4	144.3	28.92	43.9	108.4	1.916	93.5	253.9	0.577 2	4

根据评估结果既可以用于高炮的验收, 又可以对于使用中的高炮自动机采取针对性的维护措施, 对于排名靠前、工作性能状态良好的装备, 在平时训练和战时维修保养过程中只需进行小范围的检查; 对于排名较后的装备需要重点进行详细检查和相应的维修操作, 必要时进行换件修理或报废, 以防盲目使用装备导致意外事故的发生。

5 结束语

笔者基于 ADAMS 仿真平台建立某型高炮自动机虚拟样机, 针对不同初始条件进行了仿真得到仿真结果, 提出了基于 TOPSIS 法的自动机质量评估方案, 并得到自动机综合性能评估结果, 为大型机械系统多目标决策提供了一种新方法^[6]。根据评估结果可进行装备质量的控制和预测等; 此外, 利用该评价结果也可对武器装备设计方案评价和优化,

估值 S, 同时得到其综合性能排名, 利用评价结果可以为自动机的设计和维修保障提供依据^[5]。自动机综合性能评估流程如图 2 所示。

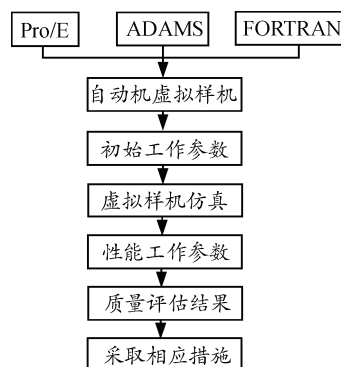


图 2 自动机综合性能评估流程

4 仿真和评估算例

根据火炮初始条件进行仿真, 选取最大后坐长度、最大后坐阻力、后坐时间、复进时间、最大复进速度、输弹时间和自动机循环周期作为自动机动态参数指标, 分别用符号 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 表示, 其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_6 和 X_7 为逆向指标, X_5 为正向指标, 表 2 给出了仿真和评估结果。

为改进武器装备的设计质量提供参考, 对于加速武器装备现代化研制和保障现代化具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 林建冬, 原思聪, 王发展. 虚拟样机技术在 ADAMS 中的实践[J]. 机械研究与应用, 2006, 19(6): 66-68.
- [2] 郑建荣. ADAMS 虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京机械工业出版社, 2002: 30-180.
- [3] 韩魁英, 王梦林, 朱素君. 火炮自动机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 20-230.
- [4] 秦寿康. TOPSIS 价值函数模型[J]. 系统工程学报, 2003, 18(1): 37-42.
- [5] 贾长治, 陈永才, 秦俊奇, 等. 基于 ADAMS 的火炮性能评估方案及仿真研究[J]. 中国制造业信息化, 2003, 32(2): 91-93.
- [6] 陈尚志, 魏国君, 谭跃进. 大型复杂武器装备质量综合评价及其支持系统设计[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(6): 67-71.