

doi: 10.7690/bgzdh.2015.01.007

步兵战车刚柔耦合建模及可信度验证

刘全胜, 霍明亮, 高玉水, 赵波

(装甲兵工程学院兵器工程系, 北京 100072)

摘要: 针对步兵战车的多刚体动力学模型忽略了构件在外力下弹性变形的问题, 利用 ADAMS 和 ANSYS 软件构建了步兵战车的刚柔耦合模型。通过建立步兵战车有限元模型以及对车体进行模态分析, 然后利用静平衡试验和炮塔振动试验验证了该刚柔耦合模型的可信度。该分析结果为下一步研究步兵战车行进间射击精度问题打下了良好的基础。

关键词: 刚柔耦合模型; 有限元模型; 模态分析; 静平衡试验; 炮塔振动试验

中图分类号: TJ811.91 **文献标志码:** A

Infantry Combat Vehicle's Rigid-Flexible Coupled Modeling and Credibility Verification

Liu Quansheng, Huo Mingliang, Gao Yushui, Zhao Bo

(Department of Weaponry Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the problem that the infantry combat vehicle's multi-rigid-body dynamics model which has ignored the elastic deformation of the component under the external force, this paper has established the infantry combat vehicle's rigid-flexible coupled model with ADAMS and ANSYS. Through the establishment of the infantry combat vehicle's finite element model and modal analysis of the vehicle's body, it verifies the credibility of the rigid-flexible coupled model by static balance test and turret vibration test, which laid a good foundation on the next step research on the infantry combat vehicle's firing accuracy when it is on the move.

Keywords: rigid-flexible coupled model; finite element model; modal analysis; static balance test; turret vibration test

0 引言

步兵战车的多刚体动力学模型, 各个构件均被看作刚体, 忽略了构件在外力下的弹性变形, 基本上可以满足停止间的静平衡分析或者微小激励下的精度要求, 但对于步兵战车行进间射击, 尤其在路面起伏比较大的环境中行进时, 车体难免会发生一定的扭曲, 在如此情况下分析步兵战车的振动情况, 显然不能将车体看成刚体进行分析。在步兵战车行进过程中, 路面激励通过悬挂、车体、座圈传至炮塔, 分析其振动情况, 就需要将车体当成柔性体来进行分析。因此, 对步兵战车进行刚柔耦合建模是十分必要的。

1 步兵战车刚柔耦合建模

1.1 车体有限元模型

机械系统动力学自动分析(ADAMS)软件介绍了3种建立柔性体的方法^[1], 第1种是利用柔性梁连接建立伪柔性体, 将一个构件离散成许多小刚性构件, 这些小刚性构件间采用柔性梁连接, 离散连

接的实质仍为刚体, 而不是柔性体; 第2种是采用ADAMS/AutoFlex模块建立柔性体, 通过在ADAMS/View中建立柔性体的模态中性文件MNF, 用柔性体替换原先的刚体; 第3种是通过其他有限元分析软件建立柔性体, 有限元分析软件首先将构件划分为一个个小网格, 然后通过模态计算将计算的模态保存为MNF文件, 再将MNF文件导入到ADAMS中创建柔性体。比较之下, 方法3网格划分的能力比较强, 更加适合几何外形比较复杂、精度要求较高的柔性体建立。因此, 笔者选用有限元软件ANSYS/Workbench建立步兵战车车体的柔性体模型, 将生成的MNF文件导入到ADAMS中, 替换原来车体的刚性体, 就可建立步兵战车的刚柔耦合模型。

首先利用Solidworks软件建立步兵战车车体的三维实体模型, 将其简化后导入到ANASY工作环境下, 然后定义材料特性和单元类型, 再进行网格划分, 就可得到车体的有限元模型。对一个结构来说, 由于固有频率和振型主要由刚度分布和结构质量分布决定, 因此采用均匀网格可使结构刚度矩阵

收稿日期: 2014-07-22; 修回日期: 2014-09-16

作者简介: 刘全胜(1968—), 男, 北京人, 硕士, 副教授, 从事武器系统综合运用研究。

和质量矩阵的元数不会相差太大，可减小数值的计算误差^[2]。笔者通过 size 控制将车体模型划分为四面体单元后的效果图，其网格形状相对比较规则，分布也较均匀，如图 1 所示，该有限元模型具有 31 028 个单元，61 412 个节点。

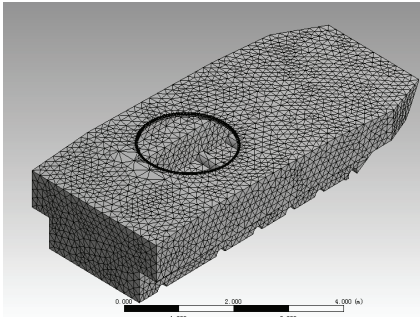


图 1 车体网格划分效果

1.2 车体模态分析

车体网格划分完成后，通过分析类型定义为模态分析，选择合适的求解方法。模态分析主要的计

算方法有：1) 兰索斯法(block lanczos method)，适用于大型对称求解问题。2) 子空间法(subspace method)，适用于大型对称模型的求解问题，可用几种求解控制选项来控制子空间的迭代过程。3) Power Dynamic Method，适用于非常大的模型(100 000 个自由度以上)，尤其适合求解结构前几阶模态，以了解结构将如何响应的情形，选取适合的提取方法求得最终的解。4) 降阶法(reduced householder method)，使用简缩的系统矩阵求解，速度快，但因为简缩质量矩阵为近似矩阵，故相应的精度比较低。

根据各个方法的特点，笔者选择 Block Lanczos Method，具有更快的收敛速度，并且精度符合计算要求^[3]。由于高阶模态对系统振动的影响较小，选取过多的高频模态不仅不会提高精度，还会大大地增加计算的时间，所以只选取前 6 阶模态。图 2 为车体前 6 阶振型。

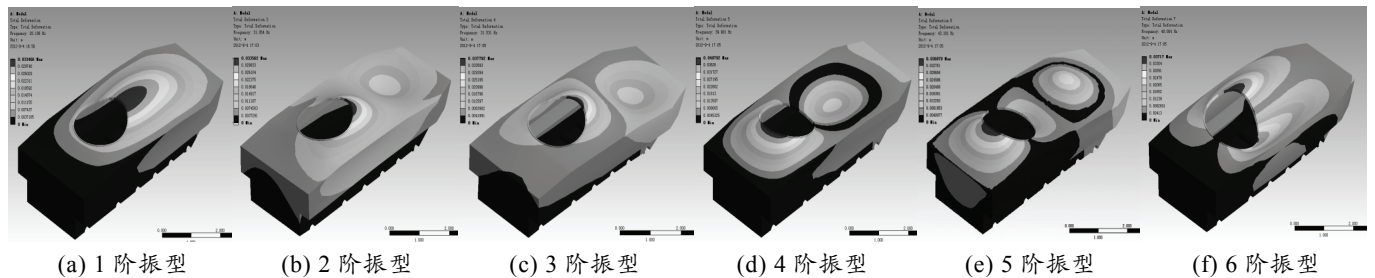


图 2 车体前 6 阶振型

1.3 步兵战车刚柔耦合模型

模态分析结束后，运行 ANSYS 软件生成车体的模态中性文件，然后将 MNF 导入 ADAMS 中。为了确保 MNF 的正确性，需要验证模型的物理特性和模态信息。模型的物理特性可通过 Info 选项查看，包括质量、质心、转动惯量等信息，而模态信息则可通过与 ADAMS 计算的线性模态结果比较来验证，如表 1 所示。

表 1 ADAMS 与 ANASY 模态计算结果比较

ANASY	ADAMS	ANASY	ADAMS
20.106	20.108 2	43.181	43.185 7
31.054	31.057 3	48.004	48.005 1
31.531	31.535 6	61.777	61.778 9
39.901	39.911 4	65.541	65.542 5

通过验证比较，该模型的物理特性与有限元建模结果相同，线性模态计算结果与 ANASY 的计算结果基本吻合，可认为该模态的中性文件是正确的。

验证完成后，在 ADAMS 中打开步兵战车多刚体动力学模型，将其替换为柔性体模型并作相应的

修改。修改完成后，可得到步兵战车的刚柔耦合模型，如图 3 所示。

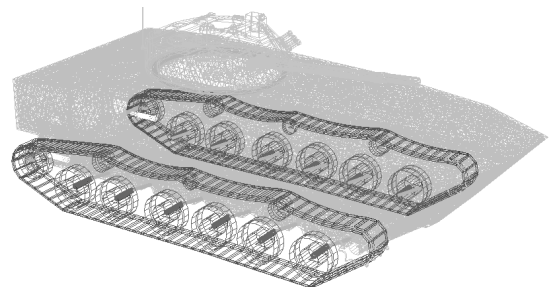


图 3 步兵战车刚柔耦合模型

2 步兵战车刚柔耦合模型可信度验证

步兵战车模型是在假设的理想条件下建立的，与实际存在一定的误差，因此对其进行仿真前，要验证该模型的可信度。笔者首先通过分析步兵战车模型在静平衡时平衡轴的静倾角和扭力轴的扭矩值来进行定性验证，其次通过设计试验方案来测量步兵战车在行进过程中炮塔的振动情况，通过对比测量与仿真的结果来对模型进行定量验证。

2.1 步兵战车模型的静平衡验证

步兵战车在静止时，在车体重力的作用下，平衡轴和扭力轴转至静平衡位置，此刻平衡轴的静倾角和扭力轴的扭矩值是否与设计值一致，在一定程度上决定了模型是否正确^[4-5]。笔者通过静力学仿真分析，对步兵战车模型达到静平衡位置时各平衡轴倾角和扭力轴扭矩进行仿真，仿真结果如表 2 所示。理论上要求平衡轴倾角约为 30°、各扭力轴扭矩与扭矩均值之间相差不大于 10%，经分析验证，仿真结果中各平衡轴倾角均在 30°，6 根扭力轴扭矩均值为 6 458 N·m，其中第 1 根扭力轴扭矩与均值相差最大，约为 8.2%。因此，可近似认为该步兵战车模型的静力学分析基本符合设计要求。

表 2 静平衡时平衡轴倾角和扭力轴扭矩的仿真值

平衡轴倾角仿真值/(°)	扭力轴扭矩仿真值/(N·m)
30.3	5 929
26.8	6 272
26.6	6 403
26.6	6 654
26.0	6 671
24.3	6 819

2.2 步兵战车行进间炮塔振动的仿真与验证

炮塔振动的参数很多，其中位移是反应其振动的主要参数之一，且容易测量，因此笔者选择测量炮塔垂直方向上的位移来对步兵战车模型的正确性进行验证。

2.2.1 炮塔振动测量方案

文中的测量方案是利用 CCD 摄像机对被测对象进行图像序列的采集，然后运用图像处理的相关技术对采集到的图像序列中的振动信息进行提取，再通过相应的计算，最终得到被测对象的振动参数。

试验器材：某型步兵战车 1 台、CCD 摄像机 1 台、支架 1 个、电光源 1 个、卷尺、秒表等。

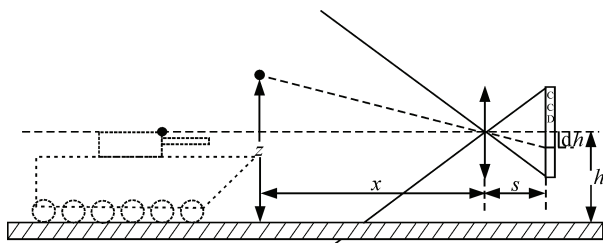


图 4 炮塔垂直向位移的试验原理

试验原理：为方便对目标位置进行提取，本试验选择利用点光源进行目标位置标定。如图 4 所示，将点光源放置在炮塔的测试位置并固定好，防止在振动的过程中掉落，将 CCD 与点光源正对，从而使得点光源能够在 CCD 上形成图像^[6]。通过 CCD

记录下步兵战车在一定路面上的行进的过程，这样，图像中点光源的运动轨迹即反映了步兵战车的炮塔的运动轨迹，从炮塔的运动轨迹中，提取相关的振动信息，然后进行处理分析，得到相应的结论。

在典型的试验路面上，选取一段合适的距离，使得步兵战车匀速通过这段距离，同时用秒表记录步兵战车通过这段距离 d 所用的时间 t ，这样就可计算出步兵战车行驶的速度 v 。CCD 摄像机拍摄出来的图像由很多帧组成，对于其中的每一帧，利用相关的图像处理软件就可以很容易地获取点光源在整个图像中的位置坐标，即图 4 中所示的 dh 值就可求得。由图 4 可知：

$$\frac{dh}{s} = \frac{z-h}{x} \quad x = l - vt$$

求得步兵战车的炮塔测定位置的垂直方向上的位移为：

$$z - h = \frac{x \cdot dh}{s} = \frac{(l - vt) \cdot dh}{s}$$

式中： dh 为点光源在 CCD 上的成像与靶板中心之间的垂直距离，向下取正值，向上取负值； s 为 CCD 摄像机镜头与靶板之间的距离； h 为 CCD 靶板中心与地面之间的距离； x 为被测点与 CCD 摄像机镜头之间的水平距离； l 为初始时刻的被测点与 CCD 摄像机镜头之间的水平距离。

2.2.2 炮塔振动仿真结果验证及分析

实车试验选择在平坦的水泥路上，以 2 档速度（约为 5.525 m/s）匀速直线行驶。平坦的水泥路相当于 B 级随机路面，因此在仿真中，设置路面为 B 级路面，速度设为 5.525 m/s，用试验测量计算的结果与仿真结果进行比较来验证模型的可信度。

将试验计算的结果存储在文本文档中，并将其导入到 ADAMS 中创建测量曲线，然后在后处理模块中与仿真结果进行比对，如图 5 所示。

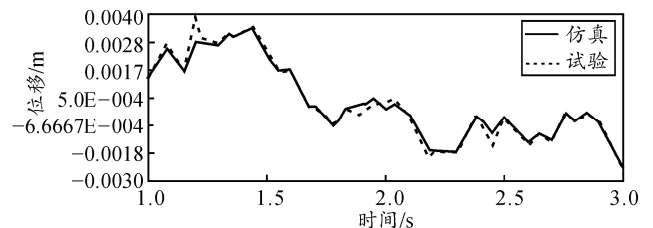


图 5 炮塔垂直方向上位移-时间

图 5 显示：试验计算的结果与仿真结果中炮塔垂直向上的位移响应在一定误差范围内基本吻合，表明笔者建立的步兵战车刚柔耦合模型是可信的。