

内燃机曲柄连杆机构的建模与仿真分析

高爽¹, 冯国胜¹, 张兆松², 刘怀银¹

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 中国重汽集团, 山东 济南 250003)

摘要:对内燃机曲柄连杆机构的工作性能进行仿真分析是该产品设计过程中的重要组成部分。运用机械系统仿真软件 ADAMS, 建立了曲轴、飞轮、连杆、活塞在内的虚拟样机模型, 之后将曲轴视为柔性体, 利用 PRO/E 建立曲轴的三维实体模型, 导入 ANSYS 进行模态分析, 生成中性文件, 再导入 ADAMS 中生成曲轴的柔性体模型来替换刚体模型, 构造刚柔混合体模型, 通过对模型的多体动力学仿真, 得到曲轴连杆和活塞的运动特性曲线, 为以后内燃机的优化设计及疲劳分析提供参考。

关键词: 曲柄连杆机构; ADAMS; 动力学仿真

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2014)02-0087-05

0 引言

曲柄连杆机构是往复式内燃机中的动力传递系统, 也是发动机实现工作循环, 完成能量转换的主要运动部分。曲柄连杆机构的主要零部件可以分为 3 组: 机体组、活塞连杆组以及曲轴飞轮组。该机构是在高压下做变速运动, 其工作过程中的受力非常复杂包括气体作用力、惯性力、离心力、摩擦力等, 在发动机做功时, 气缸内的温度可高达 2 500 K 以上, 最高压力可达 5 ~ 9 MPa, 发动机最高转速可达 3 000 ~ 6 000 r/min, 则活塞每秒钟要行径 100 ~ 200 个行程, 使得机构容易产生振动、磨损及断裂。所以对该机构建立虚拟样机模型, 进行动态仿真尤为重要。机械系统分析软件 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) 是目前应用最为广泛的机械系统动力学仿真分析软件。利用 ADAMS 软件, 用户可以快速、直观、方便的建立参数化的机械系统模型, 并对其进行静力学、动力学、和运动学仿真分析, 输出位移、速度、加速度和反作用力曲线。同时 ADAMS 还可以预测机械系统的性能、运动范围、碰撞检测、峰值载荷以及计算有限元的输入载荷。

以某型号直列 6 缸内燃机为例, 由于其在工作过程中产生的噪声大, 振动强度高, 所以在 ADAMS 中建立虚拟样机模型, 对该曲轴系进行动力学分析, 得到各部件的运动规律及受力, 为以后曲柄连杆机构进行优化设计、疲劳寿命分析、降低噪声及减少磨损奠定基础。

1 动力学模型的建立

多体动力学模型的建立主要包括: 生成构件、施加约束及主动载荷、生成动力学方程及求解。

1.1 生成构件

在 ADAMS/ENGINE 模块中建立某直列 6 缸发动机的几何模型, 所建发动机为 4 冲程, 发火顺序为 1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4, 压缩比为 14.5: 1, 排量为 14 L, 缸径 140 mm, 冲程为 152 mm, 有效连杆长度为 304.8 mm, 连杆轴颈直径 79 mm, 长度为 53 mm, 主轴颈直径 100 mm, 长度为 56 mm, 活塞销直径 30 mm, 长度为 90 mm。曲轴材料为 48MnV, 弹性模量 $E = 2.1 \text{ N/mm}^2$, 密度为 7.8 kg/mm^3 。活塞密度为 2.6 kg/mm^3 , 连

杆密度为 7.8 kg/mm^3 。利用 ADAMS/ENGINE 自带的测试平台可以对发动机进行各种工况仿真分析。各构件间的连接关系为:曲轴第五主轴颈与缸体为转动铰链,其余主轴颈与缸体为圆柱铰链,曲轴与飞轮为固接;曲轴与各个连杆大头为转动铰链,连杆小头和活塞销为转动铰链,活塞销和活塞为固接,活塞与缸体为圆柱铰链,缸体和大地为固接^[1-2]。曲轴连杆机构的装配模型如图 1 所示。

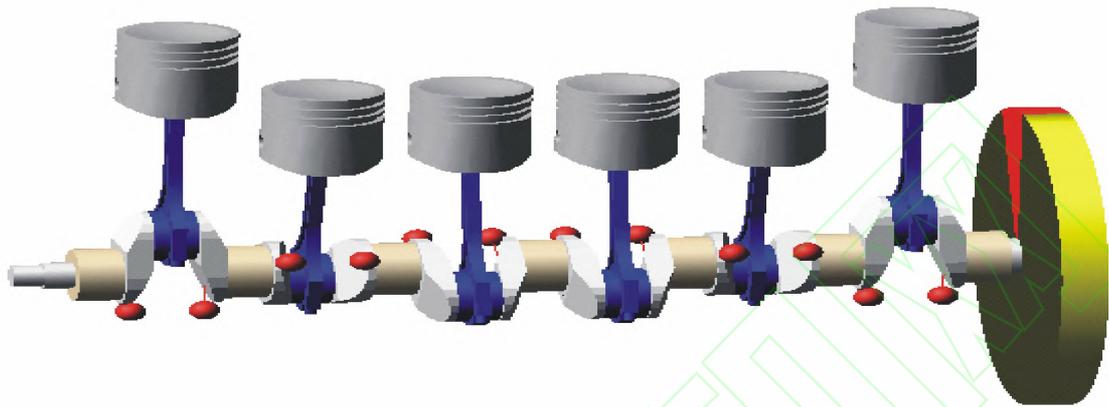


图 1 曲柄连杆机构装配图

由于实际的金属零部件都是弹性体,而曲轴扭转振动常常会引起曲轴主轴颈与发动机缸体之间的敲击噪声,故曲轴的刚体模型已经满足不了分析的要求,因此需要对曲轴进行柔性化处理。根据厂家提供的曲轴图纸,在 PRO/E 中建立曲轴的三维实体模型,并将模型输入到有限元分析软件 ANSYS 中。由于本文主要是对曲轴做模态分析,对网格要求不像做应力分析那么精确,所以采用的是 solid45 单元,采取自由网格划分,所得 166 725 个节点,846 059 个单元,提取曲轴的前 20 阶模态,生成 MNF 文件,在 ADAMS 中通过 RIGID to FLEX 命令替换刚性曲轴。在柔性体与刚性体之间建立约束副时采用无质量刚性小球(哑物体)来过渡连接。建立的刚柔混合体模型能更好的模拟机构的实际运动特性。曲轴的柔性化模型如图 2 所示。



图 2 曲轴的柔性化模型

1.2 气体压力

作用在整个曲柄连杆结构上的主动力为气体作用在活塞顶部的爆发压力,大小为气体压力和活塞投影面积的乘积。由于 6 缸的点火顺序不同,所以作用在 6 缸上的气体力出现峰值时刻不同,但大小基本相同。各机构产生的往复惯性力和旋转惯性力不用单独施加,ADAMS 软件会以体积力的形式自动施加给模型。通过试验测得在额定转速 $2\ 100 \text{ r/min}$ 下气体压力,输入到 matlab 中,采用最小二乘法拟合成曲线,并每隔 1° 取值。

1.3 建立动力学方程

当曲轴被分为单个曲柄后,整个曲柄连杆机构就简化为 6 个如图 3 所示的曲柄滑块机构^[3]。

图 3 中, oa 为曲柄, ab 为连杆, b 为活塞; m_1 、 m_2 为连杆等效质量; m 为曲柄的质量。以曲柄为例建立动力学方程。在 o 点建立全局坐标系 xoy , 在质心处建立局部坐标系 x_1cy_1 , ox 与 ox_1 夹角为 θ , 曲柄长为 $2r$ 。由于曲柄的铰点 o 在空间中保持位置不变和长度固定,可得两个约束方程

$$\begin{cases} x_c - r\cos\beta = 0 \\ y_c - r\sin\beta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

求解式(1)可得铰点 O 约束方程的雅可比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & r\sin\beta \\ 0 & 1 & -r\sin\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

独立方程的个数为 2, 拉格朗日乘子有 2 个, 即 $\rho = (\rho_1 \ \rho_2)^T$, 则曲柄的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}mr^2 + m_2r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1'' \\ y_1'' \\ \beta'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ r\sin\beta & -r\sin\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其它构件的动力学方程建立方法类似在此不再陈述。

2 动力学仿真分析

选择 Steady-State Analysis 设置仿真步数为 2 000, 一个工作循环即曲轴旋转两周, 曲轴转速为额定转速 2 100 r/min。如图 4 ~ 图 6 为活塞的位移、速度、加速度特性曲线。从图中可以看出, 活塞的位移、速度和加速度均按一定的周期发生变化, 在活塞位于上止点时的加速度最大, 且与速度方向相反。速度在为零处方向发生改变。从而可以推断出活塞运动不稳定易产生振动和冲击。

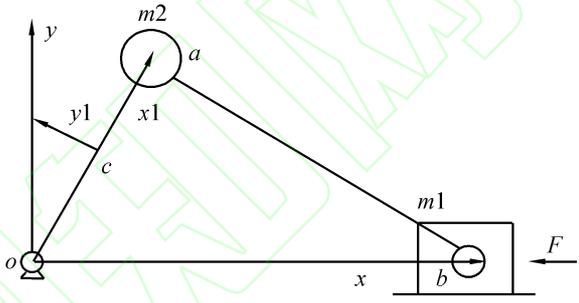


图 3 曲柄滑块机构

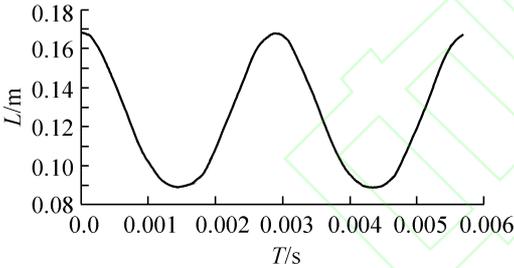


图 4 活塞中心位移曲线

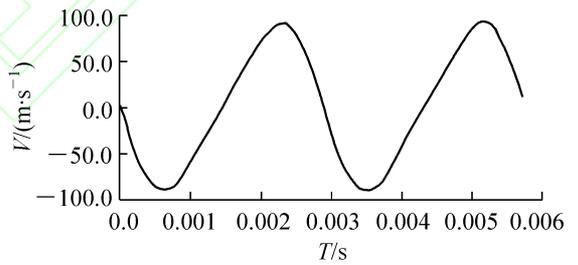


图 5 活塞往复运动速度曲线

图 7 ~ 图 9 为曲轴 1 ~ 3 主轴颈(图 2 中从左至右)在一个工作循环的的承载情况。发动机曲轴主轴颈的载荷影响到轴颈的磨损以及润滑油槽和进油口的布置。从图可以看出, 各主轴颈得载荷变化不尽相同, 在波峰和波谷曲轴转角处对应的载荷最大, 此处不易开油口。轴颈所受载荷为交变载荷, 易引发轴系的振动, 从而产生噪声^[4]。

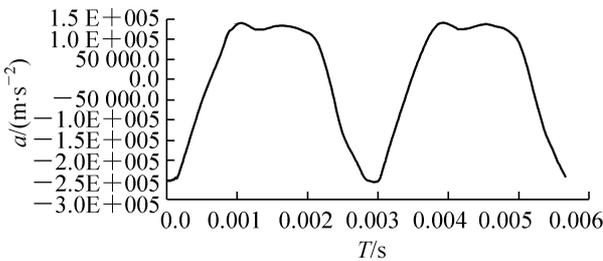


图 6 活塞往复加速度曲线

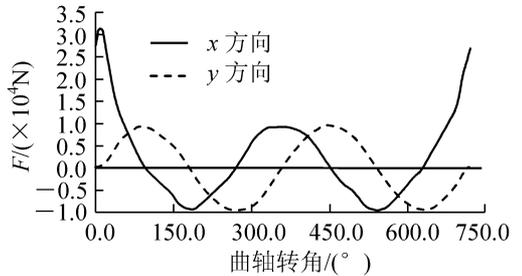


图 7 主轴颈 1 上载荷曲线

图 10 ~ 图 13 为连杆轴颈(图 2 中从左至右)所受的载荷情况。从图中可以看出, 各连杆轴颈之间受力大小类似, 各个轴颈按照内燃机点火顺序峰值间相差 1 200 相位角。当连杆轴颈位于做功上止点处, 此时连杆轴颈所承受的载荷最大。由于载荷的突变连杆轴颈处也产生振动和噪声。

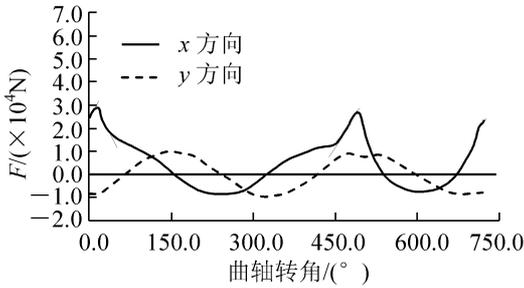


图 8 主轴颈 2 上载荷曲线

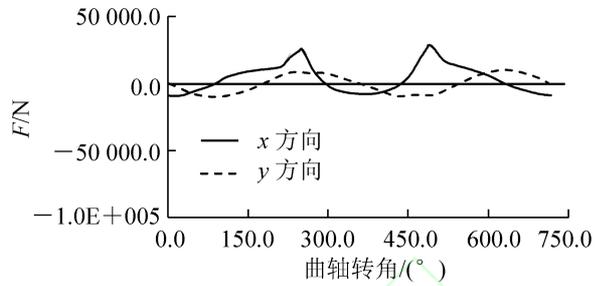


图 9 主轴颈 3 上载荷曲线

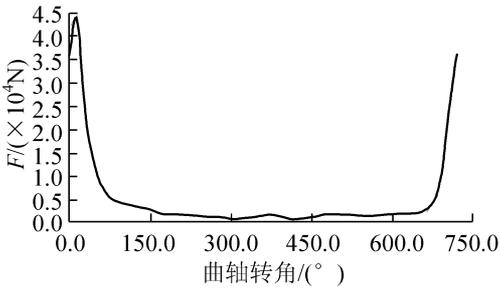


图 10 连杆轴颈 1 上的载荷曲线

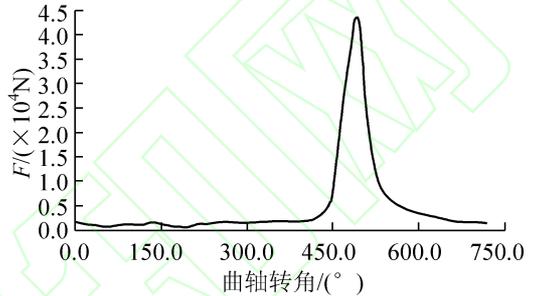


图 11 连杆轴颈 2 的载荷曲线

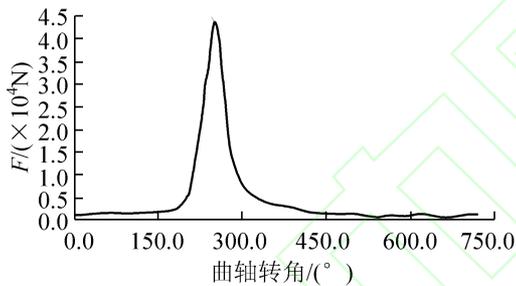


图 12 连杆轴颈 3 上的载荷曲线

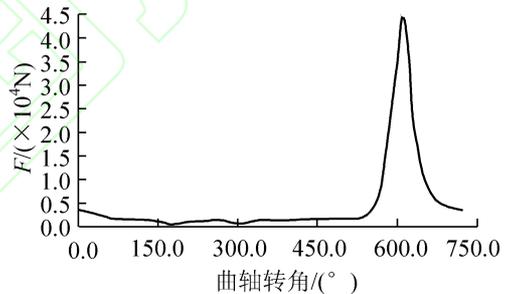


图 13 连杆轴颈 4 上的载荷曲线

3 结论

介绍了利用 ADAMS 软件建立曲柄连杆机构虚拟样机模型的方法,同时还介绍了利用 PRO/E 与 AN-SYS 软件对曲轴进行柔性化处理的方法。通过对刚柔混合体模型的动力学仿真,得到了活塞、曲轴、连杆在一个周期内运动规律及受力曲线。利用本文分析方法所得到的曲轴连杆机构的动力学仿真分析结果,可直接用于后续发动机整机振动、噪声分析、疲劳寿命分析等研究工作中。

参 考 文 献

- [1] 陈立辉, 杜彦蕊, 张艳华, 等. 基于 ADAMS 的曲轴连杆活塞建模与仿真[J]. 机械传动, 2010, 34(7): 60-63.
- [2] 袁兆成. 内燃机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 张国庆. 零件剩余疲劳寿命预测方法与产品可再制造性评估研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2007.
- [4] 赵艳杰, 陈翀. 发动机曲轴连杆机构振动源仿真分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2009, 36(5): 77-78.
- [5] 陈立平, 张云清, 任为群, 等. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(下转第 95 页)

Signal Processing, 2001, 49(3): 613-624.

[6] 胡士强, 敬忠良. 粒子滤波原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 22-24.

[7] 韩磊, 郭晓金, 齐威, 等. 改进的粒子滤波算法[J]. 电视技术, 2012, 36(7): 16-23.

[8] Chen Zhe. Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond[R]. Hamilton: McMaster University, 2003.

Target Tracking Method Based on Particle Filter

Ma Zengqiang, Zheng Yacong, Zou Xingxing

(School of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The Extended Kalman Filter (EKF) is the most popular approach to recursive nonlinear estimation. Because it is a linearization technique based on a first order Taylor series expansion of the nonlinear system and measurement functions about the current estimate of the state, it often provides an insufficiently accurate representation in many cases. The particle filtering method (PF) has become an important alternative to the EKF. It represents the desired distributions by discrete random measures, which are composed of weighted particles. It has a high accuracy and a rapid convergence. In this paper, the comparison experiment between the PF and EKF has been carried out, and a study about the influence of the particle filter by the noise covariance and the particle number are presented. The comparison experiment shows that the target tracking accuracy of PF is higher than that of EKF under the condition of strong non-linear system.

Key words: particle filter; kalman filter; target tracking; resampling

(责任编辑 刘宪福)

(上接第 90 页)

Modeling and Simulation of Crank-Connecting Rod Mechanism in Internal Combustion Engine

Gao Shuang¹, Feng Guosheng¹, Zhang Zhaosong², Liu Huaiyin¹

(1. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. China Heavy Truck Company, Ji'nan 250003, China)

Abstract: It's crucial to have a simulation study on the working characteristic of crank-connecting rod mechanism in the design of internal combustion engine. In this paper, an engine model including crankshaft, flywheel, connecting rod and piston is built by using the mechanical system simulation software ADAMS. Then, the crankshaft is regarded as flexible body. By using PRO/E software, three-dimensional solid model of the crankshaft is established and the neutral document is obtained by importing it into ANSYS for modal analysis. At last, the above-mentioned neutral document is ducted into ADAMS software and the system of rigid-flexible mixed dynamics model is constituted. By multi-body dynamics simulation, this paper obtains dynamic characteristic curve and parameters of engine crankshaft and connecting rod and piston, providing a reference for the optimization of the design of an internal combustion engine and fatigue analysis.

Key words: crank-connecting rod mechanism; ADAMS; dynamics simulation

(责任编辑 刘宪福)