

•测试、试验与仿真•

基于接触动力学的座圈动态响应仿真分析

刘春光, 苏铁明, 华顺刚

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 座圈是履带车辆上的一个关键件, 根据接触动力学理论, 对座圈子系统的动态响应进行了分析研究。首先结合有限元和多体动力学分析技术, 创建面向柔性下座圈的整车刚柔混合模型。考虑座圈子系统中座圈与滚珠的动态接触关系, 采用边界盒法搜索上座圈—滚珠—下座圈之间的接触状态, 由Hertz接触理论建立非线性弹簧阻尼模型计算接触力。然后以典型工况下座圈动态响应分析为例, 对整车样机进行接触动力学仿真分析, 获得了柔性下座圈的应力分布及变化情况。

关键词: 接触动力学; 仿真分析; 座圈动态响应

中图分类号: TJ811; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-03-0076-05

Dynamic Response Simulation Analysis of Turret Race Based on Contact Dynamics

LIU Chun-guang, SU Tie-ming, HUA Shun-gang

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Turret race is a key component of a tracked vehicle. The dynamic response problem of turret race sub-system is analyzed and researched based on contact dynamics theory. Firstly, with finite element and multi-bodies dynamics analysis technology, a rigid-flexible mixture model of surface flexible down turret race in the vehicle is constructed. Considering the dynamic contact relationship between turret race and balls in turret race sub-system, bounding box method is adopted to detect the contact state among upper turret race, balls and down turret race. According to Hertz contact theory, a nonlinear spring-damper model is established to calculate contact force. And then, taking the turret race dynamic response analysis under typical operation state as an example, the dynamic simulation analysis of the vehicle prototype is accomplished to obtain stress distribution and variation of the flexible down turret race.

Key words: contact dynamics; simulation analysis; turret race dynamic response

接触广泛存在于各种工程领域中, 机械系统中零件之间力的传递是通过两零件的接触来实现的。在接触过程中, 由于接触区域不断变化、几何及材料本构关系的非线性等因素, 使得接触成为一种高度的非线性行为。要准确地建立面向接触分析的力学模型, 获得零部件的力学性能是具有挑战性的课题。

目前, 国内外许多学者通过多种方法对接触问

题进行了分析研究, 主要包括有限元法和接触动力学方法。有限元法计算接触问题是先将几何形体离散成几种基本类型的单元的组合物; 然后针对这几种基本的单元进行分析, 建立单元刚度矩阵和质量矩阵, 考虑单元的边界条件, 引进弹性理论的基本方程并对方程进行求解; 最后将所有的结构单元组装在一起, 完成接触问题的分析计算^[1]。然而此种方法计算接触问题时大多数是静态或准静态求

解,没有考虑机构运动和材料变形间存在的耦合现实,很难获得接近实际的解^[1]。接触动力学方法考虑了零部件之间的动态接触关系,通过建立合理的接触力学模型和不同的求解算法,可以更加真实模拟零部件实际的接触状态,得到零部件合理的力学性能。

对于履带或轮式装甲车辆,炮塔和车体之间有座圈系统连接,火炮射击时,会对座圈产生瞬态、强冲击力,此过程是一种典型的接触问题。文中对座圈的动态响应分析进行了研究,建立座圈和滚珠的动态接触关系模型,进行座圈系统的接触动力学分析研究。

1 动态接触力学模型

从多体系统动力学角度,接触过程的力学模型有两种:接触力元和接触约束^[3]。相应的,目前处理接触过程的方法有接触力元法和接触约束法。接触力元法将接触作用视为弹簧阻尼器力元,力元根据接触违约量直接由相应的模型给出接触力,又称罚函数模型方法。其优点在于不需求解约束方程,且动力学方程的维数是固定的,不随接触状态发生改变;缺点在于只有弹簧刚度(罚因子)取得足够大时,结果才可靠。接触约束法将接触作用视为接触约束,接触约束方程与带 Lagrange 乘子的动力学方程形成封闭的方程组,该方法又称 Lagrange 乘子法。但约束的存在给数值仿真带来困难,且求解的方程维数是随接触状态改变的,给计算机编程带来困难。

基于动力学仿真分析软件,建立接触分析模型,采用相对坐标系的多体动力学接触检测算法,对接触状态进行检测。在接触搜索阶段前,先将一个接触对的两个体分为防御体和相对防御体运动的撞击体,然后将防御体表面划分成碎片,撞击体的边界则划分成若干节点,碎片和节点的数量由计算精度决定。在预搜索阶段,采用边界盒技术寻找近似的接触状态,若检测到接触,则在后搜索阶段进一步检测详细接触状态。如图1所示为撞击体和防御体的动态接触关系。

$X-Y-Z$ 坐标系是惯性参考系, $x_c-y_c-z_c$ 、 $x_h-y_h-z_h$ 分别为防御体和撞击体参考系, $x_b-y_b-z_b$ 、 $x_n-y_n-z_n$ 分别为边界盒参考系和节点参考系,

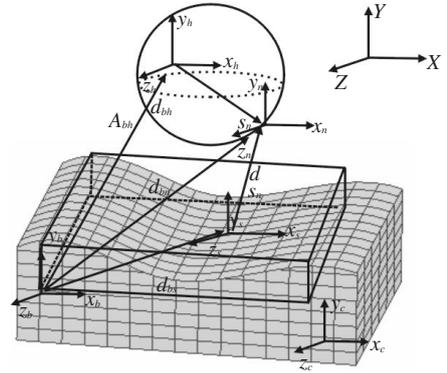


图1 撞击体和防御体的动态接触关系

$x_s-y_s-z_s$ 为防御体碎片参考系。由于边界盒坐标系相对于防御体坐标系的位置保持不变,因此可以将撞击体与防御体接触的预搜索计算分析转换到边界盒坐标系下进行^[4]。撞击体节点在边界盒坐标系下的位置为

$$d_{bn} = d_{bh} + A_{bh} s_n \quad (1)$$

式中, d_{bn} 、 A_{bh} 为撞击体在边界盒参考系下的位置和方向; s_n 为节点在撞击体坐标系下的位置。接触状态通过比较 d_{bn} 与防御体碎片在边界盒坐标系的位置得到。如果一个节点与一个碎片处于接触状态,则进行后搜索。

在后搜索阶段,对于候选的碎片,需要计算穿透深度,进而计算接触力。撞击体节点与碎片的相对位置 d_{sn} 为

$$d_{sn} = d_{bn} - d_{bs} \quad (2)$$

式中, d_{bs} 为碎片在边界盒参考系下的位置。将 d_{sn} 投影至碎片参考系中得到 d'_{sn} 为

$$d'_{sn} = n_s C_s^T d_{sn} \quad (3)$$

式中, n_s 为碎片的法向矢量; C_s 为碎片参考系相对于边界盒参考系的方向矩阵。

后搜索阶段通过检测 d'_{sn} 来判断节点与碎片是否接触,若接触,则计算穿透深度 δ 为

$$\delta = R_h - d'_{sn} \quad (4)$$

式中, R_h 为撞击体表面以节点为球心的球半径。

基于 Hertz 接触理论建立非线性弹簧阻尼模型,撞击体与防御体的非线性法向接触力为

$$f_n = k\delta^{m_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} \left| \dot{\delta} \right|^{m_2} \delta^{m_3} \quad (5)$$

式中, k 和 c 分别是由实验决定的刚度系数和阻尼

系数; $\dot{\delta}$ 是穿深量 δ 对时间的一阶导数; m_1 和 m_2 是非线性接触力指数,用于产生非线性接触力; m_3 是缺口指数,用于产生凹痕阻尼效应。

所建立的接触分析模型考虑了防御体和撞击体的动态接触关系,采用边界盒法对接触状态进行搜索,并建立非线性弹簧阻尼模型对接触力进行计算。其中接触搜索算法流程图如图2所示。

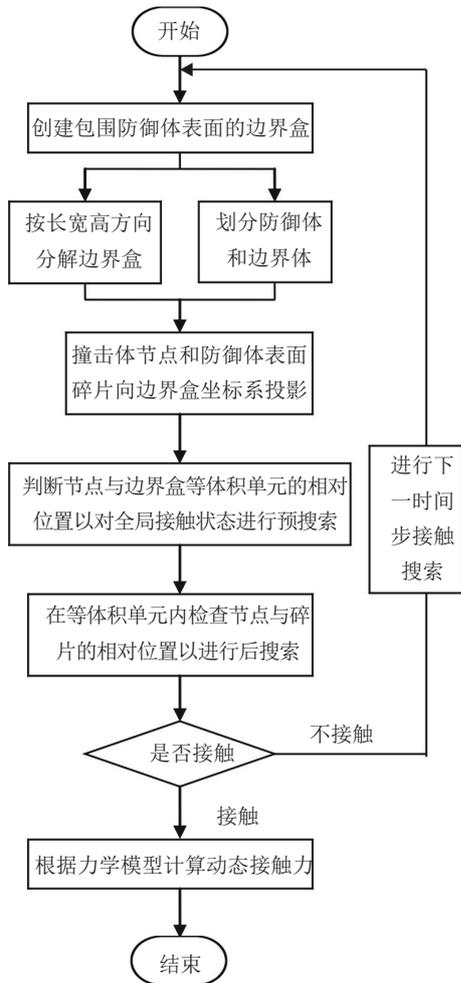


图2 接触搜索算法流程图

2 面向柔性下座圈的接触仿真模型建立

履带车辆炮塔座圈是车体和炮塔间的连接件,内部装有滚珠,使炮塔能360°旋转。座圈承受车体传递的路面动态载荷、自身质量及火炮射击时产生的强烈冲击力^[5]。基于多柔体动力学(multi flexible body dynamics, MFBD)技术^[6],考虑座圈与滚珠间的动态接触关系,构建包括柔性下座圈在内的整车刚柔混合模型,对座圈在火炮发射工况下的动态响应

进行接触动力学分析。

首先,应用三维建模软件构建履带车辆零部件模型,利用有限元软件创建柔性下座圈;然后添加约束创建座圈子系统、履带行走系统及火炮系统;最后对各子系统进行组装,创建整车刚柔混合接触仿真模型。采用前述接触搜索与分析的算法,对下座圈的动态响应进行仿真分析。这里做如下假设:(1)车辆在水平地面上处于停车状态,主动轮制动。(2)将整车简化成由履带子系统、车体部分、炮塔座圈子系统等物体组成的多体系统。发动机、减速器等零部件以配重形式添加^[7]。

2.1 座圈子系统建模

文中研究的座圈子系统由上座圈、滚珠以及下座圈组成,结构简图如图3所示。

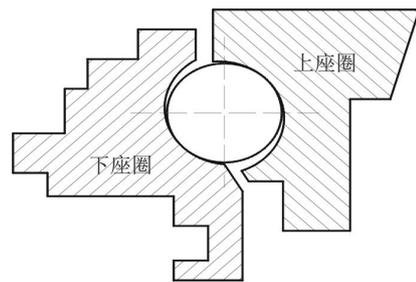


图3 座圈结构简图

建立座圈子系统接触仿真模型时,可以选择将上座圈、滚珠、下座圈全部建成柔性体,也可以将部分零件建成柔性体,但柔性体网格数量越多,仿真时间越长。主要针对下座圈进行力学性能分析,考虑计算精度与耗时的平衡性,选择将下座圈建成柔性体,滚珠和上座圈建成刚体。

首先,在三维建模软件中建立上座圈、下座圈及滚珠,按一定关系装配好,导入多体系统动力学仿真软件^[8]中。其次,将下座圈三维模型导入有限元软件中,设置材料属性及单元大小,对下座圈进行网格划分,将生成的柔性下座圈导入动力学软件中,替换之前导入的刚性下座圈。最后,在滚珠与上座圈、滚珠与下座圈之间添加接触,并设置合理接触参数(如刚度系数、阻尼系数、摩擦系数等)。实际工作中滚珠之间有保持架,以保持距离均匀,通过设置距离约束来模拟保持架。建好的座圈子系统模型如图4所示。



图4 座圈子系统模型

2.2 整车虚拟样机模型建立

整车模型的其他几部分建模如下:

(1)履带行走系统包括悬挂装置和履带行走装置。

车辆悬挂装置包括扭杆、平衡肘、负重轮轴、主动轮轴和诱导轮轴等部件。根据车辆参数创建三维模型,根据部件之间的相互关系添加约束。履带行走装置模型包括:负重轮、托带轮、主动轮、诱导轮及履带等部件。根据部件之间的相互关系添加约束连接起来。

(2)火炮系统模型是先创建炮塔、摇架、炮管等零件模

型,然后根据部件之间的相互关系添加约束。(3)参照车体实际尺寸,建立三维实体模型。

进入履带子系统编辑模式,导入车体、座圈子系统、炮塔。参照实际位置关系,将火炮系统、座圈系统、车体及履带行走系统进行组装并添加相应约束,构建整车虚拟样机模型。

2.3 火炮发射后坐力加载

火炮发射时,作用在后座部分的作用力包括炮膛合力、驻退机与复进机阻力、后坐装置中的各种摩擦力以及自身重力等。炮膛合力转化为两部分,一部分是后坐运动惯性力;另一部分是通过缓冲装置(反后坐装置)作用于摇架的后坐力。作用于摇架的后坐力经过耳轴传到炮塔,通过炮塔传递到车体上。根据火炮发射过程中的后坐力曲线^[9],基于Visual Studio 6.0环境创建C语言用户自定义子程序,生成动态链接库,仿真时对已创建的动态链接库进行调用。创建面向接触分析的整车仿真模型流程图如图5所示。

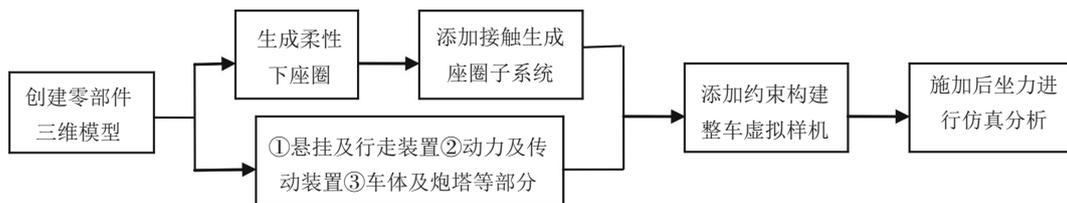


图5 基于柔性下座圈的仿真模型生成流程

3 座圈动态响应仿真分析

通过建立接触仿真模型,分析了不同方向射角、高低射角时,车辆驻车及行进间下座圈的受力情况。

以方向射角0°、高低射角20°车辆驻车工况下座圈动态响应分析为例。观察仿真结果,得到座圈最大应力发生在火炮发射时,此时座圈应力云图如图6所示。其中座圈子系统中的滚珠及上座圈以线框方式显示,颜色较深的区域表示应力值较大。从图6中可以看到,座圈后坐力承受部是应力较大的区域,最大应力发生在下座圈与滚珠接触的轨道表面上,且应力分布向两端逐渐减小。

可以选取座圈关键节点和兴趣区域,输出其动态响应曲线进行观察和分析,包括应力值、应变及变形值随时间的变化历程。图7所示为仿真过程中应力最大节点的应力—时间变化曲线。曲线最高

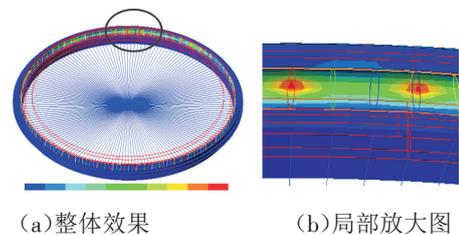


图6 座圈应力分布云图

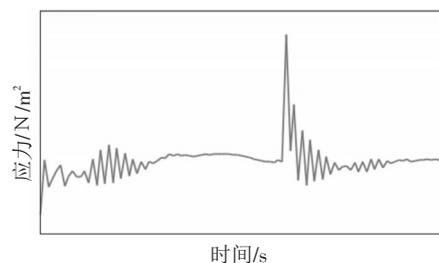


图7 节点应力随时间变化曲线

峰为火炮后坐力施加时刻的应力情况,具有瞬态、

强冲击的特性。前部分曲线为车辆落地至平稳过程的应力变化情况,后部分为火炮发射后车辆逐渐平稳的情况。

这种动态响应分析方法一方面可以获得关键部位随时间变化的应力应变分布;另一方面基于整车虚拟样机模型,可以获得更符合实际的动态分析结果。与文献[10]采用耦合自由度法模拟滚珠的接触特性,进行有限元静力求解,以及采用多刚体动力学理论,研究炮塔座圈的动态响应^[11]相比,文中基于接触动力学理论,考虑了座圈与滚珠的动态接触关系,进行基于柔性下座圈的刚柔混合模型的接触动力学求解,得到更为合理可信的结果。

4 结 论

采用有限元分析和多体动力学理论的方法,以柔性下座圈的刚柔混合模型分析为例,对典型工况下座圈动态响应进行分析,获得了柔性下座圈的应力分布及变化情况。

由于本研究考虑了座圈和滚珠的动态接触关系,采用边界盒算法对接触状态进行检测,得到的分析结果更为真实可靠,为设计、分析座圈系统提供参考。利用文中的建模和分析方法可以对车辆系统或其他机械系统的相关兴趣部件进行接触动力学求解,以获得关键区域的动态响应,为优化设计及创新设计提供理论支持。

参考文献

- [1] 彼得·艾伯哈特等.现代接触动力学[M].南京:东南大学出版社,2003:15-56.
- [2] Ahemed A Shabana. Flexible multibody dynamics: review of past and recent developments [J]. Multibody System Dynamics, 1997(1): 189-222.
- [3] 韩石磊,洪嘉振.柔性多体系统接触/碰撞动力学的若干关键问题[J].力学与实践,2011,33(2):3-5.
- [4] 姚廷强.球轴承多体接触动力学研究[D].昆明:昆明理工大学,2009:110.
- [5] 闫清东,张连第,赵毓芹.坦克构造与设计[M].北京:北京理工大学出版社,2007:212.
- [6] Albert Türtcher, Frank Faßbender, Thomas Kelichhaus. Simulation of dynamic stresses including flexible contacts using MFDB technology [J]. SAE, 2006(1).
- [7] 华顺刚,赵海波,朱志豪,等.基于整车虚拟样机的车体结构拓扑优化[J].大连理工大学学报,2012,52(3):357-361.
- [8] 焦晓娟,张潜渭,彭斌彬. RecurDyn 多体系统优化仿真技术[M].北京:清华大学出版社,2010:260-297.
- [9] 毛保全,张金忠,杨志良,等.车载武器发射动力学[M].北京:国防工业出版社,2010:59.
- [10] 邵朋礼,夏彬.某特种车辆主体结构有限元接触问题的一种分析方法[J].兵工学报,2007,28(1):107-110.
- [11] 刘朋科,史婉荣,郭新喜.大口径火炮座圈整体结构动态响应研究[J].火炮发射与控制学报,2012(3):68-71.

版 权 声 明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊,并加入中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本期刊酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。