

用Pro/E对过约束运动平台动态仿真分析研究

黄大贵¹, 邹学军¹, 廖细明²

(1. 电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054; 2. 西南石油大学 成都 610500)

【摘要】针对过约束多体运动机构的动态受力分析难点, 以一个具体的多曲轴运动平台为例, 提出一种基于Pro/E中Mechanism仿真模块进行动态仿真的解决方法。在Pro/E中进行了3维建模; 针对分析的重点, 对系统模型进行了适当简化; 并结合虚拟样机技术在Pro/E中的具体运用, 对简化模型进行动态仿真; 并运用仿真结果分析了各类因素对该机构运动及受力的影响, 提出了优化设计方案。

关键词 动态仿真; 运动平台; 多体系统; 过约束

中图分类号 TH122

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.06.032

Dynamic Simulation and Analysis Based on Pro/E of the Translational Platform with Redundant Constraints

HUANG Da-gui¹, ZOU Xue-jun¹, and LIAO Xi-ming²

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Southwest Petroleum University Chengdu 610500)

Abstract Aiming at the problems of dynamic analysis on multi-body systems with redundant constraints, a solution based on the dynamic simulation in Mechanism module of Pro/E is proposed and illustrated with an example of a translational platform with multicrank. A three-dimensional model of the system is built simplified to fit the pivot in the research. Comprehensive dynamic simulation is performed based on the application of virtual prototyping technology in Pro/E. The factors which impact the motion and reacting forces of the platform are analyzed with simulation results. The optimized design is then considered.

Key words dynamic simulation; motion platform; multi-body systems; redundant constraints

自20世纪60年代开始, 作为虚拟样机技术基础的机械系统动力学分析与仿真技术得到迅猛的发展, 经历了对多刚体系统、柔体系统以及对刚柔混合多体系统的研究。

机械系统动力学分析中, 刚体运动问题通常采用经典力学方法求解, 而弹性变形问题可由结构力学和有限元分析方法求解。然而, 在工程实践中, 绝对的刚体运动是不存在的, 绝对的弹性体也很少见, 实际工程系统往往把弹性变形物体作为柔性体处理, 而将弹性变形小的物体假定为刚体, 这样的系统称为刚柔混合多体系统, 简称多体系统。目前, 对多体系统的动态仿真分析是机械系统动力学分析与仿真的一个重要发展方向^[1-2]。

过约束运动机构是多体系统中比较特殊的一

种, 用经典力学的方法往往无法求得其运动受力的精确解; 而结构力学和有限元分析又无法对整个运动过程进行动力学分析。多体系统动力学分析软件作为专用于解决复杂机械系统动态仿真的计算机辅助设计工具, 成为解决该类问题的有效方法^[3]。

ADAMS和DADS是应用最广泛的多体系统动力学分析软件, 但其建模功能相对较弱; Pro/E作为一款应用广泛的优秀3维设计软件, 其内嵌的Mechanism模块同样可实现对各类机构运动受力的动态仿真, 并且由于不需转换模型, 系统兼容性更好, 尤其适用于设计过程中对模型的不断优化改进。

本文针对过约束多体运动机构的动态受力分析难点, 运用Pro/E对一个具有多曲轴运动平台进行了建模和动态仿真, 分析了各类因素对其运动及受力

的影响, 并提出了优化设计方案。

1 过约束运动平台总体分析

1.1 运动平台的系统构成

针对航空电子设备及干酪根自动制备仪设计的需要, 本文设计了一座基于偏心曲轴的重负载运动平台, 其总体结构如图1所示。

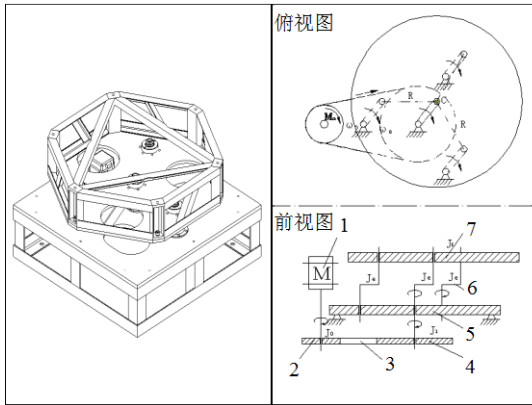


图1 运动平台结构示意图

图中, 1为驱动电机, 2为小带轮, 3为普通A型带, 4为大带轮, 5为底座平台, 6为偏心曲轴, 7为运动平台, 整个系统由3部分构成: (1) 电机及控制器部分。(2) 带传动机构部分。(3) 由运动平台、曲轴及底座平台构成的多刚体系统。偏心曲轴一端以转动副联接于底座, 另一端以转动副联接支撑于运动平台, 位于平台中心的偏心曲轴为主动轴, 其通过平键与带轮联接为一体。

在该系统中, 运动的主体是偏心曲轴和运动平台, 为了便于分析, 将系统简化, 把运动平台、底座和偏心曲轴独立出来作为一个系统, 根据运动关系, 可以将其看作平面运动机构。对于一般平面运动机构, 其自由度按以下公式计算: 自由度 $DOF=3(\text{活动构件数})-\text{约束}+\text{冗余}$ 。

系统中活动构件数为5(运动平台+4根偏心轴)。每根轴上有2个转动副, 由于转动副为低副, 限制了2个自由度, 总的约束为 $(2 \times 4) \times 2 = 16$; 3根从动曲轴联接中, 有两根曲轴与平台的联接为虚约束(即过约束), 属于轨迹重合约束, 故机构冗余度为2, 虚约束主要起辅助支撑和帮助越过死点的作用^[4-5]。系统 $DOF=3 \times 5 - 16 + 2 = 1$, 由此可知, 运动平台作平动的理论轨迹为圆, 轨迹半径为偏心距 r , 平台上各点在任意时刻的速度和加速度都相等。

1.2 系统研究的主要对象

所有机构的运动均遵循最小阻力定律。整个运动平台系统中, 电机及带传动机构只受较小的摩擦阻力, 只有含运动平台的多刚体系统受力比较复杂,

故运动平台的运动稳定性是影响系统稳定性的主要因素^[5]。

该系统的主要目的是研究影响运动平台的运动平稳性因素, 并在此基础上做出优化设计。

平台的运动虽较为单一, 但各偏心曲轴受力却比较复杂, 因此, 平台的运动平稳性主要取决于运动平台和各曲轴之间的受力变化情况。系统研究所要解决的问题是逆向动力学问题, 即已知机械系统的运动求反力问题。系统的研究对象为: 由于惯性力产生的各曲轴所受作用力的变化规律。由于过约束的存在, 严格意义上讲, 该系统应为多体系统: 运动平台的尺寸远大于轴的尺寸, 受力变形量极小, 因而可认为是刚体。而曲轴的受力分析需要考虑其微小弹性变形, 故要将曲轴看作柔体, 只有这样, 才能准确地求出每根轴上所受到的力。

1.3 研究方法

多体系统动力学分析仿真是虚拟样机技术的具体应用^[6], 相对传统CAE软件只能针对单个零部件的优化设计, 可实现对整个系统的多功能优化, 取得全面性能要求的良好平衡^[7-8]。Pro/E中的Mechanism作为专用于机构运动仿真的模块, 其本质也是虚拟样机技术在机构设计中的具体应用, 虽然它的功能比ADAMS和DADS等大型专用软件弱, 但由于是Pro/E内嵌的专用模块, 仿真计算时具有更优的兼容性。可对建立的模型直接进行仿真分析, 并即时做出修改, 故对于简单机构的仿真分析更具有优越性。

运用Mechanism进行仿真时, 首先对建立好的模型设定约束和质量属性, 再定义系统运动的初始条件和驱动, 以及阻尼和负载等要素后, 就可以对一般机构进行运动学、正逆向动力学和静平衡仿真, 并且可以一次性得到任意指定对象的位置、速度、加速度、力(力矩)、动(冲)量等一系列物理数据。此外, 还可以自定义观测量, 极大地方便了机构的运动分析^[9]。

在Mechanism中, 零部件之间约束的定义是关键。通常, 如果机构装配定义中存在冗余约束, 往往会导致反作用力的分析结果不正确, 但通过适当地改变约束类型, 可以在存在冗余约束下仍能得到正确的反作用力分析结果。

2 过约束机构的动态仿真

2.1 约束及初始条件的定义

为求解方便, 忽略电机及传动系统, 直接以底座、运动平台及偏心曲轴作为研究对象。

首先简化模型,定义底座与空间坐标系刚性联接,4根偏心曲轴与底座连接方式为“销钉”(转动副)。通过分析比较,定义中心驱动轴与运动平台为“圆柱”(比转动副多一个平动自由度)连接,其他从动轴与运动平台为“球”(球铰副)连接,这种约束定义存在的冗余为同一连接的约束重复,不会影响反作用力的分析结果。

定义初始条件为:对主动轴设定伺服电机,匀速1 800 ($^{\circ}$)/s(300 r/m);指定初始位置,使主动轴和任一从动轴曲柄在一条线上;指定各部件质量(材料),设定运动平台质量为200 kg(包括负载);设定各曲轴的轴承摩擦系数。

2.2 设定观测数据类型并进行动态仿真

本文设定待观测数据类型:各曲轴所受反作用力、系统观测量(自由度和冗余数目),并自定义了一个“运动周期”数据量,以便对比观察作用力的变化规律。运行动态分析后,利用后处理工具得出运动平台各轴受力变化曲线如图2所示。

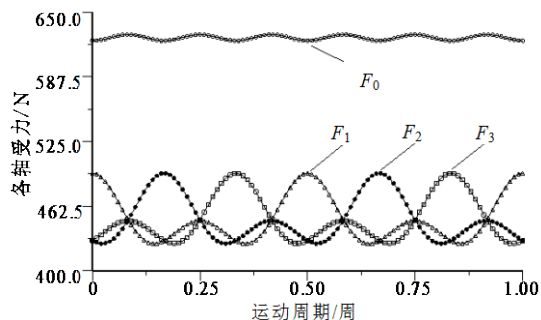


图2 运动平台匀速运动时各轴受力情况

在图2中,水平轴为运动周期(以驱动轴转动一周为一个周期),垂直轴为力, F_0 为主动轴所受的作用力,其余为各从动轴所受作用力。从仿真分析结果中还可得到系统自由度为零(即在伺服电机控制下,机构具有唯一确定的运动),冗余度为4。

2.3 根据仿真结果分析各曲轴受力变化规律

从图2中的结果可以得出匀速运动时,各轴受力的变化规律:

(1) 主动轴上所受合力变化接近正弦函数,变化周期为 $\pi/3$;且分别在图3所示位置有极值。

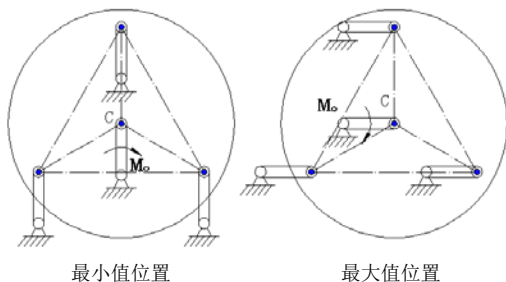


图3 运动平台匀速运动时主动轴受力极值位置示意图

(2) 各从动轴的受力大小亦呈周期变化,周期为 π ;且相互之间相差 $\pi/3$ 的相位角。

(3) 当主动轴所受合力最大时,各从动轴所受力的的大小相等。

2.4 从静止状态加速起动时各曲轴受力变化规律

改变初始定义,将伺服电机定义为初始静止,加速度为180 ($^{\circ}$)/s,使其在10 s内加速到300 r/m。再次对机构运行动态分析,其结果如图4所示。

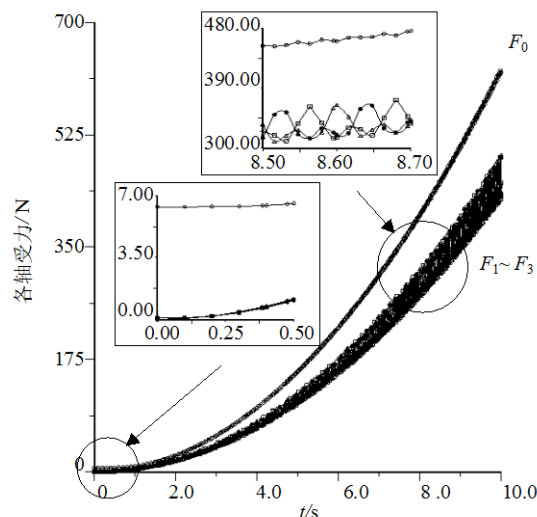


图4 运动平台加速起动时各轴受力情况

由图4可知,在起动瞬间各从动轴受力为零,主动轴受力不为零;随着速度的增加,主从动轴受力的差距增大;并且加速时各曲轴受力是变化的,变化的幅度和频率随着速度的增加而增加,主动轴受力变化幅度总小于从动轴。

3 与类似机构的分析比较

3.1 类似机构的动态仿真分析

原机构有4根曲轴,存在的过约束较多,如果去掉中间的曲轴,并将原来的一根从动曲轴作为主动轴,则可以得到一种类似的过约束三轴运动平台。

参照上述分析步骤,重新定义约束和初始条件,运行动态仿真分析如图5所示。

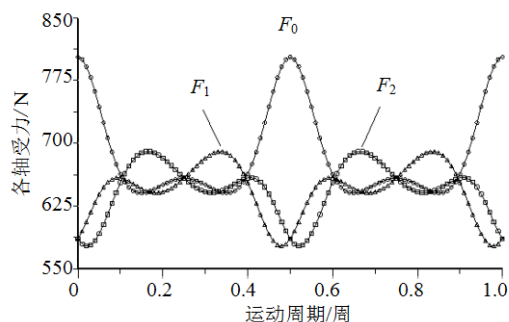


图5 三轴平台匀速运动时各曲轴受力情况

由此可得到三轴平台匀速运动时各曲轴受力的变化规律: 主动轴上受力不再呈正弦变化, 且变化剧烈, 变化周期为 π ; 在图6所示位置分别为主动轴受力最大位置和各曲轴受力相等位置, 从动轴受力变化周期为 π 。

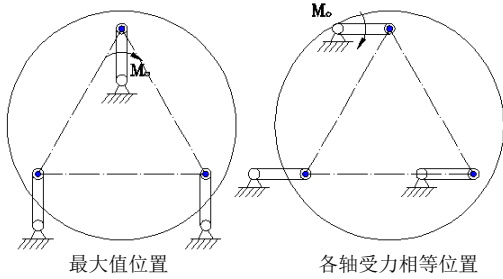


图6 三轴平台匀速运动时主动轴受力特殊点位置

3.2 两种机构的受力分析比较

对照图2和图7可知, 同等条件下三轴平台与四轴平台各曲轴受力的比较:

(1) 四轴平台的各曲轴受力大小及变化幅度均小于三轴平台, 尤其是主动轴上所受作用力, 差别更大: 三轴平台主动轴受力变化幅度可达最大值的20.2%; 而对应的四轴平台只有0.93%。

(2) 匀速运动时, 运动平台所受合力等于惯性力 $F = -M\omega^2 r$, 为定值; 但实际情况中, 由于运动平稳性不同会有微小变化。图7所示为两种机构同等条件下匀速运动时, 运动平台所受的合力变化情况。虽然三轴平台所受合力变化幅度很小(0.07 N), 但比四轴平台所受合力稳定性差。

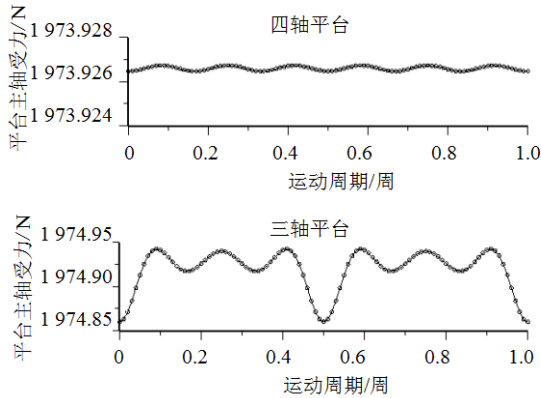


图7 两种机构的运动平台所受合力随时间变化情况

根据以上比较可得, 四轴平台轴承所受支反力更小, 寿命更长; 且各曲轴所受反作用力变化幅度小, 冲击振动更小; 运动平台所受合力情况也表明, 四轴平台运转更稳定。综合而言, 四轴平台的运动平稳可靠性能优于三轴平台。

4 其他因素对于各曲轴受力的影响

根据运动仿真可得: 机构中各曲轴所受的力的

大小与质量 M 、系统角速度的平方 ω^2 , 以及曲轴的偏心距 r 成正比(图略), 但受力变化曲线的基本形状不变。随着惯性力的增加, 各曲轴受力的变化幅度会变大, 且主、从动轴两者受力的差值亦会增大,

除此之外, 从动曲轴的布置位置也会对各曲轴的受力带来影响。若四轴平台的从动轴均布在直径为 L 的圆周上, 则通过动态仿真结果可得出 L 值的变化对各曲轴受力的影响, 如图8所示。图中, F 为主动轴上受力的平均值, L 为从动轴分布范围直径。

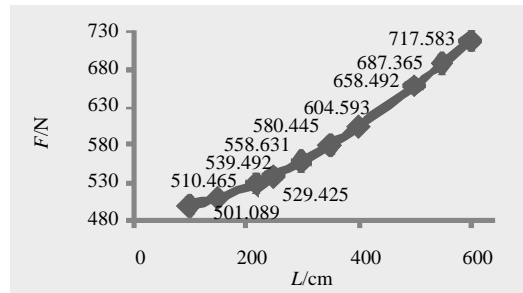


图8 从动轴的分布位置对于主动轴受力的影响

由图7可得, 在 M 、 ω 和 r 不变的情况下, 各曲轴受力之和为定值。结合图2和图8中结果可得, L 值增加时, 主动轴受力会增加, 从动轴受力会减小, 呈两极化趋势。

由此, 根据上述动态仿真结果可以考虑从以下几方面对设计进行优化:

(1) 由于主动轴受力始终比从动轴大, 因此设计中需要注意增强主动轴的刚度和强度。

(2) 从动轴的布置位置并不是离主动轴越远越好, 太远了主动轴的受力情况变差, 太近了不利于平台承受倾覆力矩, 应综合加以考虑, 对各设计方案做仿真分析并加以比较。

所有零部件的细节设计完成后, 可对整个系统进行仿真分析并加以评估。

5 结束语

针对过约束运动机构的动态受力分析问题, 本文运用Pro/E中的Mechanism模块, 提出了一种动态分析方法, 分析了多曲轴运动平台的动力学特性, 为该机构的优化设计提供了精确的分析比较数据。该设计的运动机构已在干酪根自动制备仪设备中投入使用, 运行效果良好。

参考文献

[1] MILLER E. Effective use of virtual prototyping in device design[J]. Med Device Technol, 2006, 17(5): 25-26.
 [2] OTTEN E. Inverse and forward dynamics: models of multi-body systems[J]. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci,

- 2003, 358(1437): 1493-1500.
- [3] 陈立平, 张云清, 任卫群, 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.
CHEN Li-ping, ZHANG Yun-qing, REN Wei-qun, et al. The tutorial of analysis in mechanical system dynamics and application of ADAMS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [4] 安培文, 邵金龙. 具有重复结构的平面连杆机构的过约束分析[J]. 机械设计与研究, 2006, (3): 34-35.
An Pei-wen, SHAO Jin-long. Analysis of the overconstraints for planar linkage mechanisms with repeat configuration[J]. Machine Design & Research, 2006, (3): 34-35.
- [5] ADAMS J D, WHITNEY D E. Application of screw theory to constraint analysis of assemblies of rigid parts[C]//Assembly and Task Planning, Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium. [S.l.]: IEEE, 1999.
- [6] BELANOVIC P, HOLZER M. Automatic generation of virtual prototypes[C]//Rapid System Prototyping, Proceedings. 15th IEEE International Workshop. [S.l.]: IEEE, 2004.
- [7] 宁 芊, 殷国富, 徐 雷. 机电系统虚拟样机协同建模与仿真技术研究[J]. 中国机械工程, 2006, (13): 1404-1407.
NING Qian, YIN Guo-fu, XU Lei. Research on virtual prototype collaborative modeling & simulation technology for mechatronic system[J]. China Mechanical Engineering, 2006, (13): 1404-1407.
- [8] REN Wei-qun, HUANG Miao-hua, JIN Guo-dong, et al. Virtual prototype technology in automotive concurrent design[C]//Vehicle Electronics Conference, Proceedings of the IEEE International. [S.l.]: IEEE, 1999: 421-424.
- [9] 二代龙震工作室. Pro/Mechanism/Mechanica Wildfire 2.0 机构/运动/结构/热力分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
The Secondary Long-zhen Studio. The analysis of mechanism/motion/constructure of pro/mechanism/mechanica wildfire 2.0[M]. Beijing: China Publishing House of Electronics Industry, 2006.

编辑 黄 莘

(上接第1000页)

- ZHU Jun-dong, LIU Li. Network security evaluation in college based on fuzzy comprehensive judgment[J]. Computer Applications and Software, 2007, 24(9): 197-199.
- [11] LIU Gao-chang. Assessment of urban sustainable development using fuzzy comprehensive evaluation[J]. Ecological Economy, 2006, 2(4): 373-384.
- [12] 梁立涛, 纪 阳, 张 平. 基于模糊层次分析法的异构系统网络选择算法[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(2): 71-75.
- LIANG Li-tao, JI Yang, ZHANG Ping. A network selection algorithm based on fuzzy analytic hierarchy process in heterogeneous systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(2): 71-75.
- [13] QIN Xiao-hui, ZHANG Jun, YANG Cheng-hu, et al. "Three-dimensional" fuzzy comprehensive evaluation and selection of the currency channel members [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Transportation Engineering. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007: 3541-3547.

编辑 张 俊

(上接第1005页)

- [17] RITCHEY R W, AMMANN P. Using model checking to analyze network vulnerabilities[C]//Proceedings of the 2000 IEEE Symposium on Security and Privacy. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000: 156-165.
- [18] LILJENSTAM M, YUAN Y, PREMORRE B, et al. A mixed abstraction level simulation model of large-scale internet worm infestations[C]//Proceedings of the Tenth IEEE/ACM Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS). Fort Worth, Texas: IEEE Computer Society Press, 2002: 109-116.
- [19] DAVID M N, WILLIAM H S. Model-based evaluation: from dependability to security[J]. IEEE Transactions on Dependability and Security, 2004, 1(1): 48-65.

编辑 蒋 晓