

8-14-2020

## Fast Implementation of Virtual Prototyping Modeling Based on Assembly Model

Wang Yu

*School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

Shouwen Yao

*School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

Jilin Liu

*School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

Dezhi Huang

*School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Fast Implementation of Virtual Prototyping Modeling Based on Assembly Model

## Abstract

**Abstract:** *A new method of virtual prototyping modeling was proposed based on assembly model, concerning the relation between assembly forms and dynamic constrains. With the transformation of assembly forms and dynamic constrains, a virtual prototyping model was built by the use of constrain models. Analysis of principle of modeling virtual prototype based on assembly was carried out, and the corresponding relationship between the assembly constraints in Pro/E and constraint block was studied and the method of modeling gear transmission was researched. With the utility of SimMechanics, a model library facing mechanism analysis under Simulink, a concept verification of a simple self-built machine was executed. The result shows that the method of virtual prototyping modeling based on assembly model is feasible, and this method provides technological base for researching the prototype performance influenced by assembly.*

## Keywords

assembly, virtual prototype, concept verification, dynamic simulation

## Authors

Wang Yu, Shouwen Yao, Jilin Liu, Dezhi Huang, Qinghua Zhang, and Yi Ran

## Recommended Citation

Wang Yu, Yao Shouwen, Liu Jilin, Huang Dezhi, Zhang Qinghua, Yi Ran. Fast Implementation of Virtual Prototyping Modeling Based on Assembly Model[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 1937-1944.

# 基于产品装配模型的虚拟样机快速建模方法

王瑀, 姚寿文, 刘吉林, 黄德智, 张清华, 伊然

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 研究了装配形式与动力学约束的关系, 提出了一种基于装配模型的虚拟样机建模方法。通过装配形式与动力学约束的一一映射, 将各个约束模型搭建整体虚拟样机模型。分析了基于装配的虚拟样机建模原理, 研究了 Pro/E 中几种装配约束与动力学约束模块的对应关系, 以及齿轮传动模型的建模方法。利用 Simulink 下面向机构分析的 SimMechanics 对一个自建的简单机构进行了概念验证。验证结果表明基于装配模型的虚拟样机建模的方法可行, 此方法为研究装配对样机性能的影响奠定了技术基础。

**关键词:** 装配; 虚拟样机; 概念验证; 动力学仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 09-1937-08

## Fast Implementation of Virtual Prototyping Modeling Based on Assembly Model

Wang Yu, Yao Shouwen, Liu Jilin, Huang Dezhi, Zhang Qinghua, Yi Ran

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A new method of virtual prototyping modeling was proposed based on assembly model, concerning the relation between assembly forms and dynamic constrains. With the transformation of assembly forms and dynamic constrains, a virtual prototyping model was built by the use of constrain models. Analysis of principle of modeling virtual prototype based on assembly was carried out, and the corresponding relationship between the assembly constraints in Pro/E and constraint block was studied and the method of modeling gear transmission was researched. With the utility of SimMechanics, a model library facing mechanism analysis under Simulink, a concept verification of a simple self-built machine was executed. The result shows that the method of virtual prototyping modeling based on assembly model is feasible, and this method provides technological base for researching the prototype performance influenced by assembly.

**Keywords:** assembly; virtual prototype; concept verification; dynamic simulation

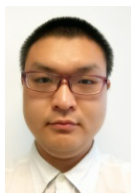
## 引言

进入 21 世纪以来, 随着全球经济一体化的发展, 工业生产模式正在发生改变, 生产过程中零部件生产与产品装配两个阶段逐渐分化, 企业有更多

的渠道和更低的成本去获得高质量的零部件。零部件的质量对产品性能的影响已不那么重要, 装配阶段对产品性能影响的比重逐渐增大, 因此研究装配对产品性能的影响变成提高产品质量的重中之重。

工业产品设计需要经过设计、样机试制、性能试验、定型和批量生产几个步骤。样机试制环节是对产品设计概念的验证, 只有样机试制通过, 产品才可以进入正式生产流程。

虚拟样机是样机试制环节中常用的方法。虚拟



收稿日期: 2015-06-14 修回日期: 2015-07-30;  
基金项目: 国家自然科学基金(51375043);  
作者简介: 王瑀(1992-), 男, 吉林通化, 硕士生, 研究方向为虚拟现实中的虚拟样机建模; 姚寿文(1971-), 男, 安徽, 博士, 副教授, 研究方向为虚拟装配, 有限元分析, 结构轻量化等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1937 •

样机是在虚拟环境中, 根据真实世界的规律, 对设计概念进行验证、分析和展示的计算机数字模型<sup>[1]</sup>。利用虚拟样机, 设计者可以方便的验证自己的设计概念, 针对问题进行多次修改, 减少了设计初期阶段的时间和成本, 提高了设计效率。

目前虚拟样机建模一般使用 matlab、adams 等通用建模软件, 以及像 kisssoft 等专用软件。它们的核心思想是依据基于牛顿-欧拉方程、拉格朗日方程等建立的运动学、动力学仿真模型, 再配合上 3D 显示模型建立起来的。这些软件中的动力学仿真模块大多以理想的约束副和力元来建立零件间的动力学关系, 无法考虑装配关系和动力学性能之间的耦合关系, 仿真精度较差。装配模型中零件的特征、零件间的装配关系、零件的空间位置并未在动力学模型中得到完整的反映, 没有将结构设计、装配和动力学仿真形成一个有机的整体, 未能实现装配模型与动力学模型的有效集成分析。

在研究装配对产品性能的影响方面, 悉尼科技大学的 Mehri Sadat Makki Alamdari<sup>[2]</sup>基于有限元分析了铰接面在强激励条件下的特性表现, 提出了一个描述铰接面在静止和微滑移状态下切向方向的特性的应力-应变本构方程。上海交通大学的 Bing Shi<sup>[3]</sup>基于流体动力学和多体动力学, 研究了回热主汽阀热载荷导致的变形对阀芯与阀座的同轴度的影响, 提出了一种考虑了工作环境的装配性状动态模型, 以此分析了装配与阀性能的关系, 并对装配序列进行了优化。他们的工作都是对某一种特定的装配形式进行的研究, 通用性不强, 并且仍有需要改进的地方。

目前可根据装配信息构建虚拟样机模型的软件比较少。Simulink 下的 SimMechanics Link plug-in 可以将 Pro/E 中的装配信息转换成自带的约束模块, 再将各模块根据装配关系连成 Simulink 框图进行仿真。哈尔滨工业大学的张镭<sup>[4]</sup>、王英波等<sup>[5]</sup>利用 SimMechanics 进行了虚拟样机的建模, 但没有给出 Pro/E 中的装配信息与 SimMechanics 中的约束模块的映射关系。马里兰大学的 Cong Yue

博士<sup>[6-7]</sup>提出了一种利用 Python 实现虚拟现实、Simulink 之间数据交互的方法, 在虚拟现实中操作者做出的操作可以实时的反应到 Simulink, Simulink 进行计算后将结果传递回虚拟现实进行展示。但 Cong Yue 博士的方法只能对五种和连杆有关的约束进行快速的转换与搭建, 没有涉及齿轮约束, 所以无法满足搭建复杂机械结构的虚拟样机的要求。

根据装配模型进行虚拟样机建模, 可以突出装配对整体性能的影响, 分析装配过程中装配工艺、装配顺序、装配精度等因素以及装配完成后因装配件变形导致的装配约束变化等对产品寿命、传动精度、载荷极限、振动特性等性能的影响。通过试验不同的装配方案, 对装配设计进行指导和优化。

本文对装配形式对应的动力学关系进行了研究, 得到了不同装配所对应的约束形式, 并利用商业软件 Pro/E 和 matlab 下的 SimMechanics 对装配模型到虚拟样机模型的转换进行了试验, 研究了根据装配进行虚拟样机建模的可行性。完善了装配与约束的对应关系库, 研究了建立齿轮传动模型的方法, 使虚拟样机的功能更加全面。在此基础上, 提出了一种基于装配进行虚拟样机建模的思想, 为研究装配对样机性能的影响奠定了技术条件。

## 1 基于装配的虚拟样机搭建

概括的说, 一个虚拟样机应该至少包括以下 3 种类型的模型: 一个仿真模型、一个人-产品的交互模型、与产品的测试相关的可视化模型<sup>[8]</sup>。基于 CAD 模型包含的几何信息、拓扑信息和装配信息, 利用 SimMechanics 建立动力学仿真模型。虚拟现实的沉浸性、交互性和实时性则可以满足物理样机对用户交互和可视化的要求。其结构以及各模型之间的关系如图 1 所示。

本文主要对基于装配的仿真模型构建进行论述, 虚拟现实部分不在本文论述范围内。

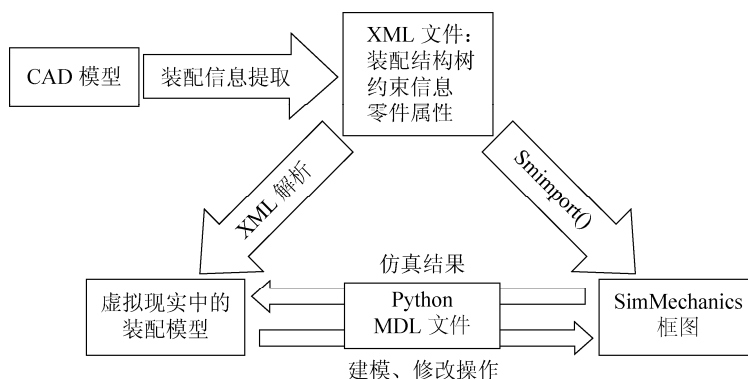


图 1 基于装配的虚拟样机

### 1.1 装配与动力学约束的关系

虚拟装配中基本的装配关系有点对齐、线对齐、面对齐。选取装配组件中的点、线、面进行约束,便完成了在虚拟环境中对组件的装配。装配形式是多种装配关系的组合,可以分为轴孔装配、贴合装配、轴肩凸台、键槽装配、卡环装配、齿轮装配、止口装配、球铰等。对于不同的装配形式,其对应的运动形式是不同的。

含有中心轴线的回转体,如传动轴、曲柄轴、齿轮等,可以做回转运动。在装配时,将回转体的轴线与其对应的轴孔或者轴承的轴线对齐,完成轴孔装配。这种装配可以抽象成一个圆柱铰,外附件相对于内附件做绕轴线的回转运动以及沿轴线的平移运动。

对于通过平面定位的组件,例如贴合装配、轴肩凸台装配、使用轴套的轴向定位、止口装配等,将装配表面看成理想平面,令平面对齐完成装配。面对齐装配可以抽象成一个接触铰,两个零件无法穿透装配表面,只能沿装配表面进行平移和旋转运动或者背离表面运动。

一种装配在添加或去除一些装配关系后,其约束的自由度会发生改变,装配形式也会转化成其他的类型。例如在轴孔装配的基础上添加一个约束内外附件之间相对转动的面对齐装配,其装配形式就转化为键槽装配,外附件相对于内附件只能做沿轴线的平移运动,此时的键槽装配可以抽象为一个棱柱铰。一个组件也可能与多个组件存在装配关系,

多装配也会影响最终的约束结果。例如传动轴与轴承之间为轴孔装配,传动轴又通过套筒约束了与轴承的轴向距离,轴孔装配的自由度退化为 1,此时的轴孔装配则可以抽象成一个旋转铰,外附件相对于内附件只能绕轴线作旋转运动。

装配关系转化过程如图 2 所示。

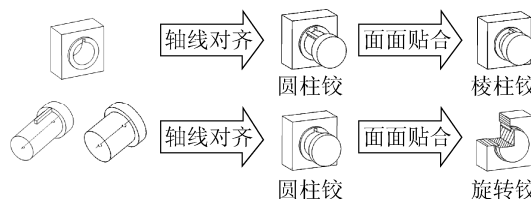


图 2 装配形式的转化

### 1.2 虚拟样机中的约束关系

约束关系是通过规定两个具有约束关系的组件的关联坐标系的关系,限制两组件之间的自由度,约束两组件之间的运动关系。

在 SimMechanics 中面向动力学仿真的约束关系有很多种,较为常用的有棱柱约束(prismatic)、铰接约束(revolute)、圆柱约束(cylindrical)、平面约束(planar)。其中棱柱约束与铰接约束的自由度为 1,为基础约束,其余约束都是由这两种约束的组合。

图 3 为棱柱约束与铰接约束对关联坐标系的约束关系。其中 B 代表被约束组件的关联坐标系, F 代表被约束组件的关联坐标系。从图 3(a)中可以看到,棱柱约束允许两坐标系沿某一轴方向进行平移,限制了其他方向的平移和旋转,自由度为 1。

从图 3(b)中可以看到, 旋转约束允许两坐标系绕某一轴进行旋转, 限制了其他方向的平移和旋转, 自由度也为 1。将这两种约束关系进行组合, 就构成了圆柱约束、平面约束、球约束对坐标系的约束。表 1 为各类约束的约束关系与自由度。

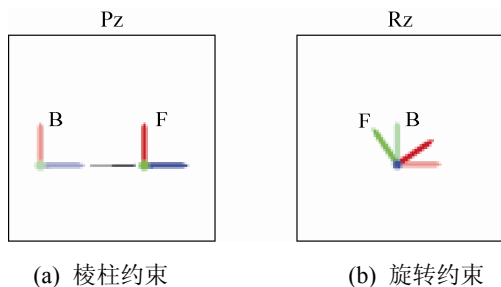


图 3 棱柱约束与铰接约束对坐标系的约束

表 1 各类约束关系及其自由度

约束	约束关系	自由度
棱柱约束		1T
旋转约束		1R
圆柱约束		1T1R
平面约束		2T1R

T 代表平移自由度, R 代表旋转自由度

## 2 CAD 与 SimMechanics 约束关系的映射

CAD 软件与 SimMechanics 中都有对装配约束关系的定义, 但侧重点不同。CAD 软件注重对组件位置的定位, 基本关系有点对齐、线对齐、面对齐, 通过这些关系的组合对组件进行装配。SimMechanics 注重对动力学的求解和自由度的约束, 约束关系与 CAD 中的约束有对应关系。本节介绍 CAD 中不同的装配方法与 SimMechanics 中约束的对应关系。

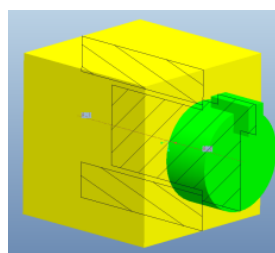
本文主要是基于 PTC 公司的 Pro/E 软件进行的研究, 本文所指的 CAD 软件均指 Pro/E 软件。其他 CAD 软件如达索公司的 CATIA、SolidWorks 都有相似的功能, 这里不再赘述。

### 2.1 预定义装配约束

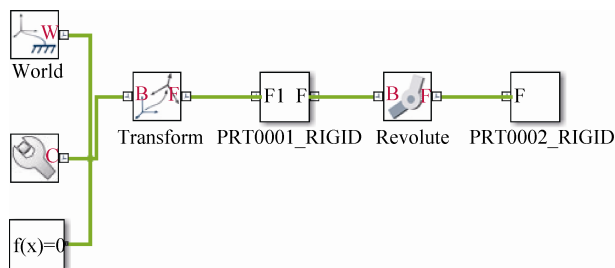
Pro/E 中预定义了几种装配约束集, 这些约束集包含了旋转轴、平移轴等信息, 可以为建立动力学仿真模型服务。这些约束集中比较常用的有销钉约束、圆柱约束、滑动杆约束、平面约束。

#### 2.1.1 销钉约束

在 Pro/E 中, 销钉约束经常用来定义轴孔装配关系。销钉约束包含了一对轴线对齐约束和一对平面对齐约束。轴线轴向与平面法向共线。销钉约束允许被约束件相对于约束件绕轴线旋转, 自由度为 1。在 SimMechanics 模块中, 销钉约束对应的运动副为铰接副。含有销钉约束的 Pro/E 模型及其对应的 SimMechanics 框图如图 4 所示。



(a) Pro/E 建模

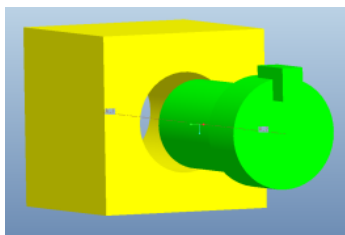


(b) SimMechanics 框图

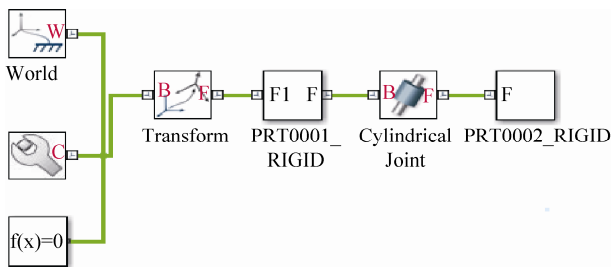
图 4 销钉约束的对应关系

#### 2.1.2 圆柱约束

圆柱约束也是一种用来定义轴孔装配的约束, 与销钉约束不同的是它没有定义轴向位置的平面对齐约束。圆柱约束包含了一对轴线对齐约束, 允许被约束件相对于约束件绕轴线旋转和沿轴线平移, 自由度为 2, 此时对应 SimMechanics 模块的圆柱副, 含有圆柱约束的 Pro/E 模型及其对应的 SimMechanics 框图如图 5 所示。



(a) Pro/E 建模

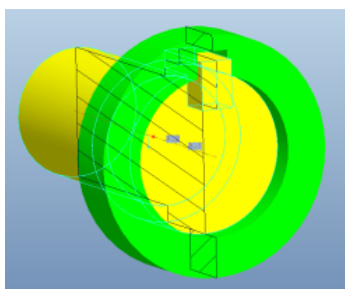


(b) SimMechanics 框图

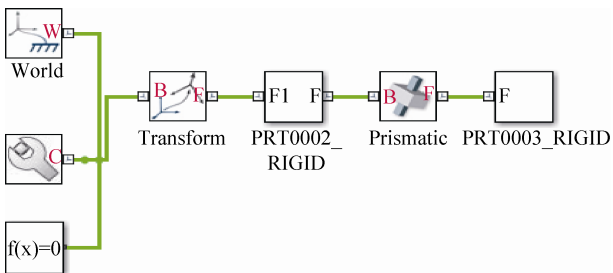
图 5 圆柱约束的对应关系

### 2.1.3 滑动杆约束

滑动杆约束用来定义键槽装配, 它包含一对轴线对齐约束和面对齐约束, 轴线轴向与平面法向垂直。滑块约束允许被约束件相对于约束件沿轴线平移, 自由度为 1, 简化为 SimMechanics 模块的棱柱副, 包含滑块约束的 Pro/E 模型与 SimMechanics 对应的框图如图 6 所示。



(a) Pro/E 建模

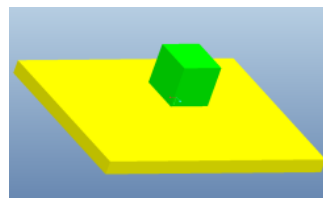


(b) SimMechanics 框图

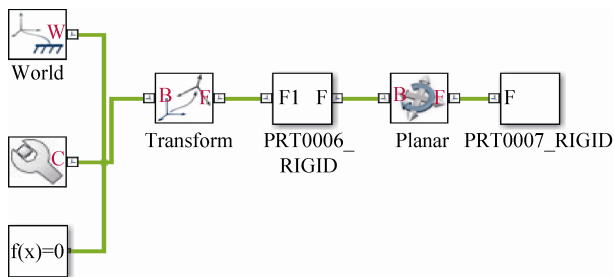
图 6 滑动杆约束的对应关系

### 2.1.4 平面约束

平面约束用来定义贴合装配, 包含一对平面对齐约束, 允许被约束件在约束件某一平面上做 2 自由度平移, 抽象为 SimMechanics 模块的平面副, 包含平面约束与对应的 SimMechanics 框图见图 7。



(a) Pro/E 建模



(b) SimMechanics 框图

图 7 平面约束的对应关系

## 2.2 齿轮机构

Cong Yue 博士在他的文章里提出的基于 CAD 装配快速搭建高精度动力学仿真模型的方法已经十分完善, 但只能满足对连杆机构的动力学仿真, 无法快速搭建齿轮的仿真模型。SimMechanics 中的 gear 模块库可以对圆柱齿轮、圆锥齿轮和齿轮齿条进行运动学仿真, 但其建模方式不同于 2.1 中的约束副模型, 本节内容阐述了利用 SimMechanics 的 gear 模块建立齿轮机构动力学仿真模型的方法。

Gear 模块不是一个独立的约束模块, 它不改变齿轮模型的自由度, 而是限制主从动齿轮模型之间的转速比。Gear 模块库中包含圆柱齿轮约束、圆锥齿轮约束和齿轮齿条约束, 分别可以对圆柱齿轮、圆锥齿轮、齿轮齿条传动进行仿真。齿轮模型的空间位置和自由度约束需要用 2.1 节中的约束模块定义。

构建齿轮传动模型时, 需要定义齿轮的转动

轴, 可以用销钉约束、圆柱约束直接定义齿轮的转动轴, 也可以通过滑动杆约束约束齿轮与轴件的角度关系, 再用销钉约束、圆柱约束定义轴件的转动轴。

完成对 CAD 模型的约束后, 将其导入 SimMechanics 生成框图。图 8 为某直齿齿轮传动

框图。齿轮实体模块 Gear\_External\_100 与 Gear\_External\_50 通过铰接约束副模块(Revolute 和 Revolute1)与基体模块 Base\_External 相连, 铰接约束定义了齿轮的旋转轴位置。在两个齿轮实体模块间加入圆柱齿轮约束模块 Common\_Gear\_Constraint, 约束了两齿轮的传动比。

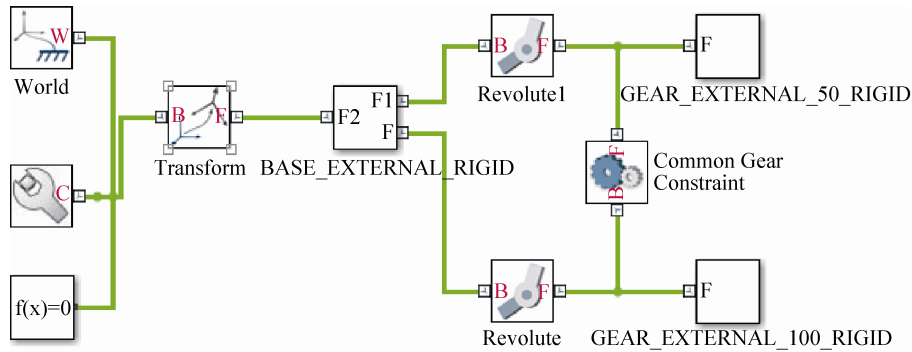


图 8 直齿齿轮传动框图

圆柱齿轮约束模块有两种方式设置齿轮传动比, 一种是通过设置中心距以及角速度比, 另一种是通过设置主从动齿轮的半径。圆锥齿轮约束模块只能通过设置主从动齿轮半径来设置传动比, 除此之外还需设置主从动齿轮之间的轴线夹角。齿轮齿条约束只需设置齿轮的半径。

### 3 实例验证

本文利用一个简单的机械结构来验证基于装配的虚拟样机快速搭建的可行性, 机构的 CAD 模型图如图 9 所示。

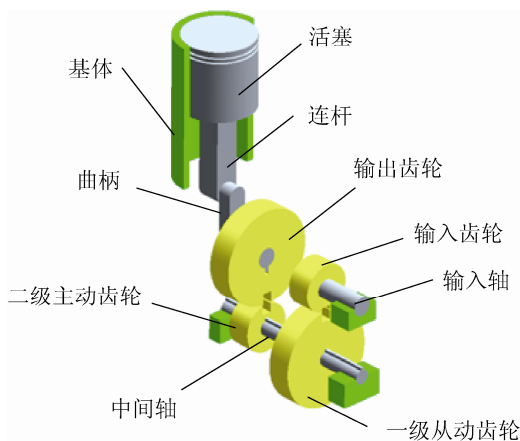


图 9 CAD 实例模型

图中基体固连在世界坐标系上。齿轮为简化件, 其上的开槽是为了显示转动效果, 齿轮轴孔均开有键槽。装配 CAD 模型时, 用销钉约束将输入轴、中间轴和曲柄装配到基体上, 再用滑动杆约束将简化齿轮件装配到各轴上, 连杆一端以销钉约束的方式与曲柄装配, 另一端用轴对齐的方式与活塞内的销装配, 最后用轴对齐约束约束活塞轴线与基体轴线。

按照这种装配方式, 产生的 SimMechanics 框图如图 10, 输入齿轮(input\_gear)与输出齿轮(output\_gear)都是以棱柱副约束(prismatic)与输入轴和曲柄相连, 输入轴和曲柄又通过旋转约束(revolute)与基体(base\_body)相连。中间轴(transmission\_shaft)上的两个齿轮先以棱柱副约束与中间轴相连, 使两个齿轮的相对角位置固定, 再以旋转约束将中间轴与基体固定。活塞通过圆柱约束约束了活塞轴线与基体轴线, 再通过圆柱约束约束了活塞销轴线与连杆头孔的轴线, 将活塞的运动与基体和连杆联系起来。

在输入轴的旋转约束上施加运动驱动, 输入轴的角度  $\theta$  与时间  $t$  的关系见式(1)。

$$\theta = 10\pi t \quad (1)$$



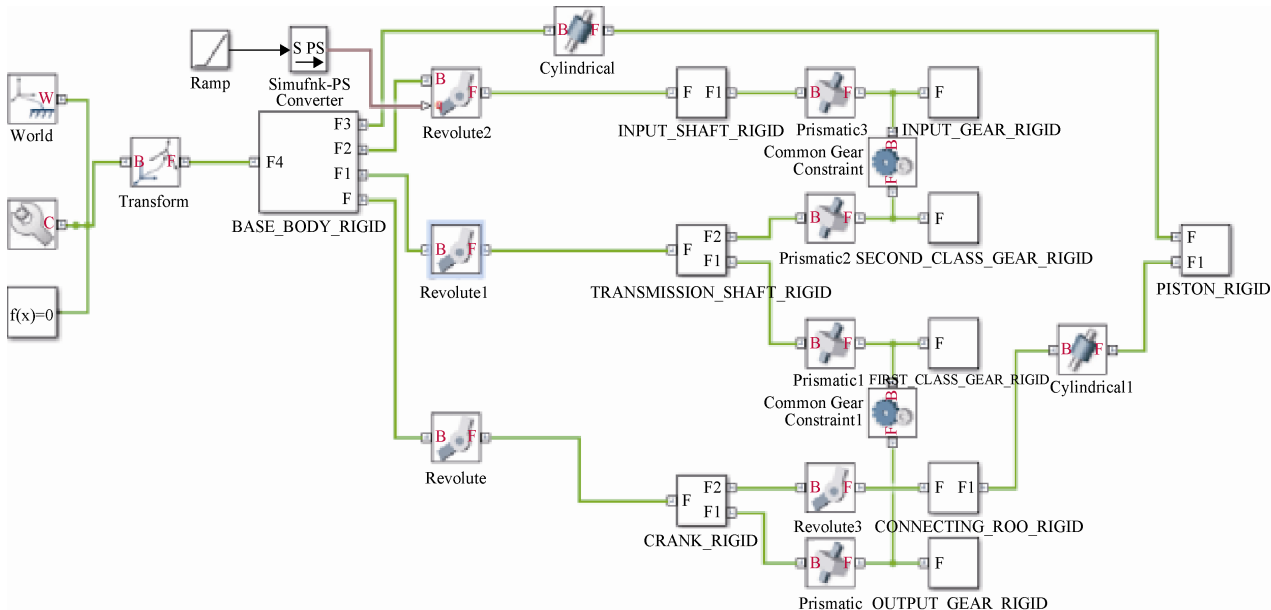


图 10 实例模型的 SimMechanics 框图

对活塞与基体之间的圆柱副约束进行分析, 采集 z 轴方向上的运动位置、速度、加速度数据, 以及分析圆柱副约束对活塞的约束力与约束转矩, 仿真时间为 10 s。

在 matlab 自带的可视化窗口中展示的虚拟样机模型如图 11 所示, 动力学仿真结果如图 12 所示。仿真结果较好地表现了虚拟样机模型中活塞的位置、速度和加速度变化情况, 以及基体对活塞在三个轴向的约束力与约束力矩。结果表明, 基于装配模型的虚拟样机建模方法可以对样机的动力学特性进行仿真, 并且可以分析装配本身的动力学特性以及对样机性能的影响。

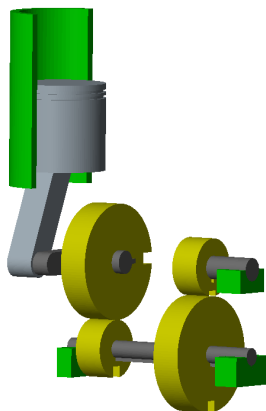
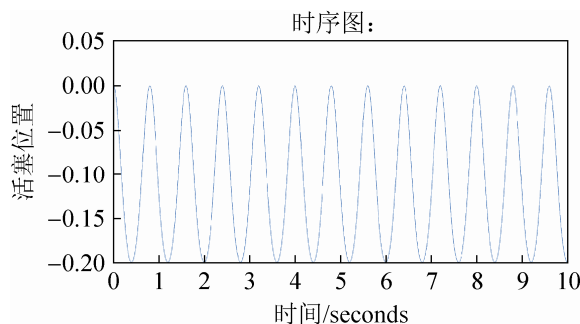
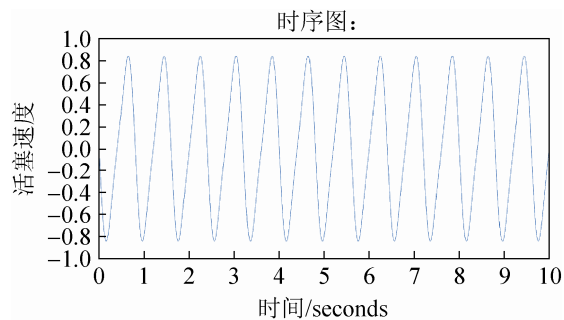


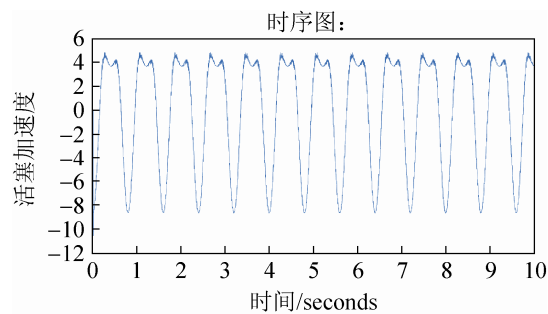
图 11 matlab 中建立的虚拟样机模型



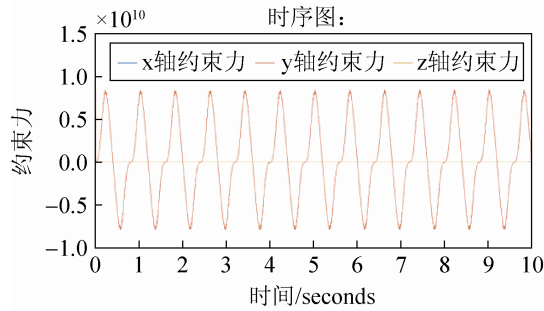
(a) 活塞位置



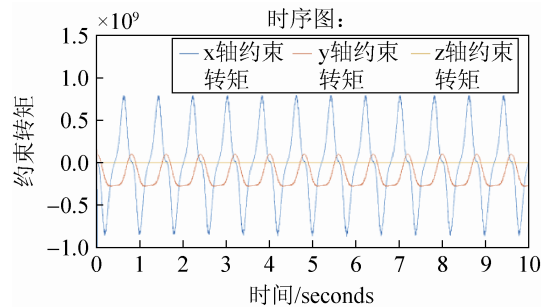
(b) 活塞速度



(c) 活塞加速度



(d) 圆柱副约束力



(e) 圆柱副约束转矩

图 12 动力学仿真结果

## 4 结论

本文提出了一种基于装配的虚拟样机快速搭建的思想,总结了装配形式与虚拟样机中的动力学约束的对应关系,提出了在 CAD 模型构建阶段面向动力学仿真的装配操作规范,并利用 Simulink 下 SimMechanics 模块库,对基于装配的虚拟样机搭建的思想进行了验证,搭建了一个简单机构的虚拟样机模型。其仿真结果与用数学模型建立的虚拟样机模型仿真结果相符,证明了此思想的可行性与正确性。

目前的分析仍是建立在理想的约束副上进行的,在未来的工作中,将会进一步研究各类装配形式的特点,考虑装配件的柔体变形、热载荷变形、

装配间隙、形状位置公差等因素对样机性能的影响,利用接触动力学、碰撞动力学建立更加贴合实际动力学约束模块,完善装配约束库与动力学约束库。利用这两个约束库,针对不同的装配形式对虚拟样机的性能进行分析,提出产品的装配设计优化方案。

## 参考文献:

- [1] 祖旭, 黄洪钟, 张旭. 虚拟样机技术及其发展 [J]. 农业机械学报, 2004 (2): 168-171.
- [2] Mehriasadat Makki Alamdari. Nonlinear Joint Model Updating in Assembled Structures [J]. Journal of Engineering Mechanics(S0733-9399), 2014, 140(7): 1-11.
- [3] Shi Bing, Jin Ye. Analysis and evaluation for assembly behaviour of reheat stop valve based on virtual prototyping [J]. Engineering Computations (S0264-4401), 2008, 25(7): 637-656.
- [4] 张镭, 丛大成, 姜洪洲, 等. 一种基于 SimMechanics CAD 转换器生成虚拟样机的方法 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(20): 4699-4703.
- [5] 王英波, 黄其涛, 郑书涛, 等. Simulink 和 SimMechanics 环境下并联机器人动力学建模与分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(1): 100-105.
- [6] Cong Yue, Hai-Jun Su, Juan Camilo Alvarez, et al. Enabling a high fidelity dynamics simulation of cad assemblies in a virtual environment for machine design [C]//ASME World Conference on Innovative Virtual Reality. New York USA: ASME, 2010: 77-85.
- [7] Juan Camilo Alvarez, Hai-Jun Su. VRMDS: an intuitive virtual environment for supporting the conceptual design of mechanisms [J]. Virtual reality (S1359-4338), 2012, 16(1): 57-68.
- [8] 王侃, 杨秀梅. 虚拟样机技术综述 [J]. 新技术新工艺, 2008(3): 29-33.