

基于 ADAMS 的多级齿轮传动系统动力学仿真

洪清泉, 程颖

(北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘 要: 为了建立多级齿轮传动系统的虚拟样机, 在对传统的齿轮副扭转振动模型进行动力学等价变换的基础上, 提出一种基于 ADAMS 的动力学仿真方法. 利用该方法建立的模型能综合考虑时变啮合刚度、啮合阻尼、轮齿啮合综合误差、原动机和负载的动态输入、齿对啮合相位以及传动轴扭转柔性, 仿真多级齿轮传动系统的动态特性. 通过实例仿真研究了各因素对系统动态响应的影响规律, 结果表明该方法是可行的.

关键词: 齿轮; 动力学仿真; 虚拟样机; 机械系统自动动力分析

中图分类号: TB 21 **文献标识码:** A

Dynamic Simulation of Multistage Gear Train System in ADAMS

HONG Qing-quan, CHENG Ying

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

Abstract: In order to set up the virtual prototype of a multistage gear train system, a dynamic simulation method in ADAMS is given, based on an equivalent kinetic model of gear pair which has been transformed from the torsional vibration model. Models set up by this method can integrate the influence of time-varying mesh stiffness, mesh damp, composite gear error, dynamic input of the power and loading, mesh phase and torsional flexibility of shaft. A simulation example that studies the influence of each factor to the dynamic response is provided and the results show that the method is feasible.

Key words: gear; dynamic simulation; virtual prototype; ADAMS

在对齿轮系统的动态特性进行计算机仿真时, 由于考虑因素的不同, 建立的模型有所差异, 仿真的难易程度和结果也不尽相同. 作者基于多体动力学仿真软件 ADAMS, 给出了一种综合考虑多种影响因素的齿轮系统扭振模型及多级齿轮传动的虚拟样机仿真方法.

1 齿轮副动力学模型

1.1 等价齿轮副动力学模型

传统的齿轮副扭转振动模型如图 1 所示^[1]. θ_p , θ_g 为主、被动齿轮的扭转振动角位移; I_p, I_g 为主、被动齿轮的转动惯量; R_p, R_g 为主、被动齿轮的基圆半

径; $e(t)$ 为轮齿啮合综合误差; k_m 为啮合综合刚度; c_m 为啮合阻尼; T_p, T_g 为作用在主、被动齿轮上的外载荷力矩.

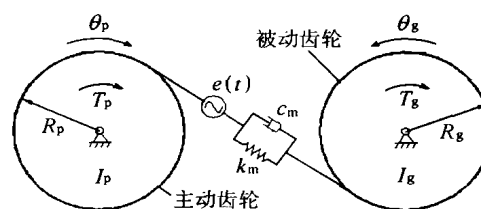


图 1 齿轮副扭转振动动力学模型

Fig. 1 Torsional vibration model of gear pair

在 ADAMS 中难以采用传统的齿轮副扭转振

收稿日期: 2002-11-27

作者简介: 洪清泉(1977—), 男, 硕士生; 程颖(1964—), 女, 副教授, E-mail: chengy@bit.edu.cn.

动模型描述轮齿啮合传动过程,为此对该模型进行如下变换:添加一无质量刚性辅助齿轮,辅助齿轮与主动齿轮组成一虚拟齿轮运动副;被动齿轮不再与主动齿轮啮合,而是通过扭簧与辅助齿轮连接.工作时,动力由主动齿轮通过虚拟齿轮副传递给辅助齿轮,再通过扭簧传递给被动齿轮.

变换后的齿轮副动力学模型如图 2 所示, θ 为辅助齿轮的角位移; R_p, R_g 为主、被动齿轮啮合节圆半径; k'_m 为等价扭簧刚度; c'_m 为等价扭簧阻尼; $e'(t)$ 为轮齿啮合综合误差的等价扭簧初始角位移变动量; T_1 为虚拟齿轮运动副对主动齿轮的反作用力矩, T_2 为虚拟齿轮运动副传递给辅助齿轮的力矩,即等价扭簧传递的力矩.

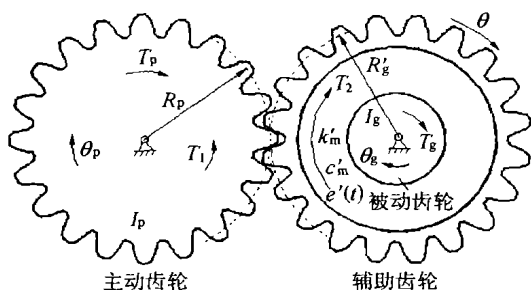


图 2 等价齿轮副动力学模型

Fig. 2 An equivalent kinetic model of gear pair

1.2 在 ADAMS 中的实现方法

等价齿轮副动力学模型可以在 ADAMS 中实现. 辅助齿轮通过定义一密度足够小的齿轮代替; 虚拟齿轮运动副直接采用 ADAMS 中的齿轮运动副; 扭簧通过定义力矩实现, 该力矩作用于被动齿轮, 反作用于辅助齿轮, 其大小由辅助齿轮和被动齿轮之间转角、转速、等价扭簧刚度、等价扭簧阻尼、等价扭簧初始角位移变动量和初始角速度变动量决定.

1.3 参数变换与计算

根据两种齿轮副变换前后轮齿动态啮合力对主、被动齿轮的作用力矩等价的原则, 即可确定出两种齿轮副模型之间的动力学参数变换关系.

① 等价扭簧刚度 $k'_m = k_m R_g^2$,

式中 k_m 为轮齿啮合综合刚度.

② 等价扭簧阻尼 $c'_m = c_m R_g^2$,

式中 c_m 为轮齿啮合阻尼.

③ 等价扭簧初始角位移变动量 $e'_i = e_i / R_g$,

式中 e_i 为轮齿啮合综合误差, 一般只考虑齿轮误差. 常见的处理方法是根据齿轮设计的精度等级确定齿轮偏差, 采用以时间为变量的简谐函数表示法

进行误差模拟^[2]. 若改用以齿轮转角为变量的简谐函数表示, 则可使齿对处于相同啮合位置时具有相同的轮齿啮合综合误差.

$$e_i(\varphi_i) = e_{j0} + e_{jr} \sin \left[\frac{\text{mod}(\varphi_i/z_i) + \delta_{ji}}{360/z_i} 2\pi \right],$$

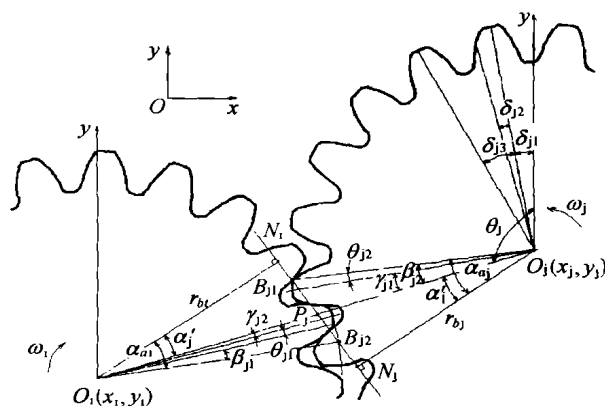
式中 e_{j0} 为齿轮误差的常值; e_{jr} 为齿轮误差的幅值, 根据齿轮的公差值确定; φ_i 为齿轮转角; z_i 为齿数; δ_{ji} 为啮合初始位置.

2 多级齿轮传动系统动力学模型

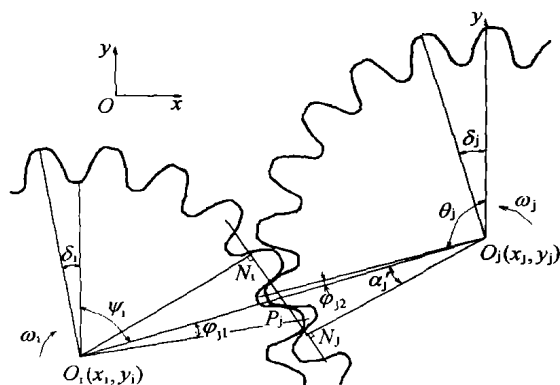
对于多级齿轮传动系统, 除了齿轮副啮合问题, 还必须考虑不同啮合齿对动力学参数的相位差、传动轴柔性、原动机和负载的动态特性.

2.1 齿对啮合相位的确定

目前齿轮系统仿真的啮合相位计算仅限于较简单的情况: 如行星轮系和中心在同一条直线上的齿轮传动^[3,4]. 为此, 作者对通用的多级齿轮传动相位计算方法进行了推导, 参见图 3.



(a) 啮合齿数发生变化的角度位置



(b) 齿对初始啮合角度位置

图 3 啮合相位计算

Fig. 3 Calculation of mesh phase

在计算出任一啮合齿对的啮合齿数发生变化(单齿啮合与双齿啮合的过渡)时的齿轮角度位置 δ_{j1} 和 δ_{j2} ,齿对正确啮合的初始角度位置 δ_i 后^[5],通过 δ_i 与 δ_{j1} , δ_{j2} 的关系确定该齿对的啮合相位.

2.2 传动轴柔性效应

采用有限段的方法考虑传动轴的柔性效应^[6],其基本思想是把柔性体描述为多个由弹簧和阻尼器为结点连接的刚体组成的多刚体系统.在本模型中,传动轴的柔性效应是通过两端点的扭转总体效应加以考虑的.

2.3 原动机和负载

原动机和负载的具体模型比较复杂,将其简化为作用在输入齿轮和输出齿轮上的转矩或转速,采用 ADAMS 实时函数直接模拟^[7,8].

3 实例仿真

基于 ADAMS 的多级齿轮传动仿真模型如图 4,采用 GSTIFF 积分器求解,时间步长 0.1 ms.

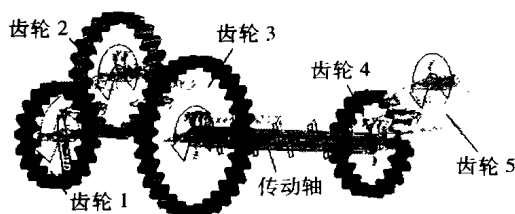


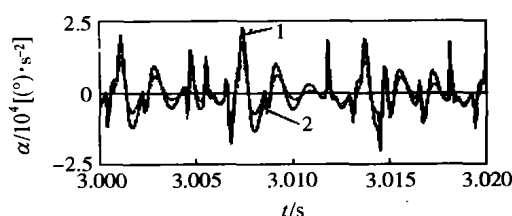
图 4 多级齿轮传动虚拟样机模型

Fig. 4 Virtual prototype of multistage gear train

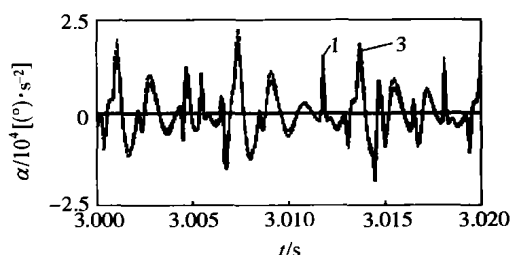
3.1 内部激励对动态响应的影响

系统的外部激励为常值(齿轮 1 的输入转速为 500 r/min,齿轮 5 输出转矩 1 000 N/m),在不同内部激励作用下,齿轮 3 的扭振角加速度如图 5 所示.

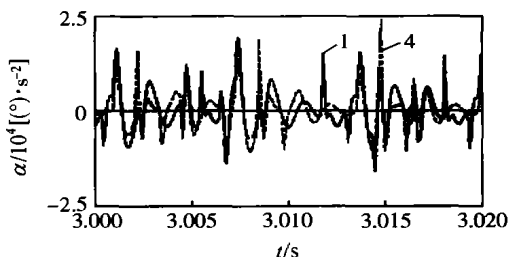
图 5 中,曲线 1 是刚性传动轴,不考虑啮合相位,时变啮合综合刚度单独激励下齿轮 3 的扭转振动角加速度,曲线 2,3,4,5 分别为考虑齿轮 3 轮齿啮合阻尼、轮齿啮合综合误差、不同啮合相位、传动轴扭转柔性后齿轮 3 的扭转振动角加速度.可见,啮合阻尼可有效减小系统的振动,轮齿啮合综合误差显著增大系统的振动,但都不改变动态响应的相位和频率;不同啮合相位影响了齿对的刚度突变时刻,使系统的时变啮合刚度激励总体效应发生变化,对系统动态响应的影响视具体情况而定;传动轴柔性对系统动态响应的相位、幅值、频率都有影响.



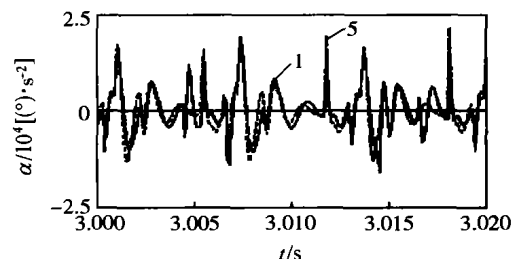
(a) 啮合阻尼对动态响应的影响



(b) 轮齿啮合综合误差对动态响应的影响



(c) 啮合相位对动态响应的影响



(d) 传动轴扭转柔性对动态响应的影响

图 5 不同内部激励对系统动态响应的影响

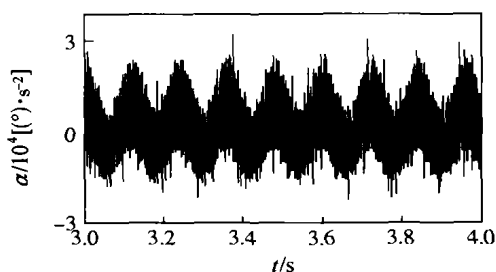
Fig. 5 Influence of different inner excitation on the dynamic response

3.2 外部激励对动态响应的影响

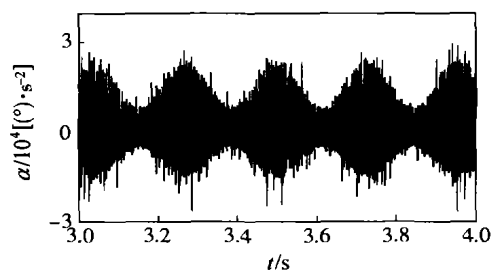
系统内部激励只考虑时变啮合综合刚度,在外部激励动态作用下,齿轮 3 的扭振角加速度如图 6 所示.

图 6a 为齿轮 1 输入转速为 470~530 r/min,按正弦规律每转过 1 周波动一次时齿轮 3 的扭转振动角加速度变化.可见,动态响应明显受输入转速波动的影响.

图 6b 为作用在齿轮 5 上的负载转矩,按正弦规律在 500~1 500 N/m 之间每转过 1 周波动一次时齿轮 3 的扭转振动角加速度变化.可见,负载转矩对动态响应的影响类似于调制作用.



(a) 输入转速波动下的动态响应



(b) 负载转矩波动下的动态响应

图 6 外部激励对系统动态响应的影响

Fig. 6 Influence of different outer excitation on the dynamic response

4 结 论

实例仿真结果与文献[1]中的理论分析是一致的.验证了给出的基于 ADAMS 的多级齿轮传动系统的动力学仿真方法是正确的.同时,用该方法可考虑多种激励的影响,直接建立系统虚拟样机模型.

参考文献:

- [1] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学[M]. 北京:科学出版社,1997.
Li Runfang, Wang Jianjun. Dynamics of gear system

[J]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)

- [2] 李润方,陶泽光,林腾蛟等. 齿轮啮合内部动态激励数值模拟[J]. 机械传动,2001,25(2):1-3.
Li Runfang, Tao Zeguang, Lin Tengjiao, et al. Numerical simulation for inner dynamic excitation of gearing [J]. Mechanical Transmission, 2001, 25(2): 1-3. (in Chinese)
- [3] 孙智民,沈允文,李素有. 封闭行星齿轮传动系统的扭振特性研究[J]. 航空动力学报,2001,16(2):163-166.
Sun Zhimin, Shen Yunwen, Li Suyou. A study on torsional vibrations in an encased differential gear train [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 163-166. (in Chinese)
- [4] 张锁怀,石守红,丘大谋. 齿轮耦合的转子-轴承系统的非线性模型[J]. 机械科学与技术,2001,20(2):191-193.
Zhang Suohuai, Shi Shouhong, Qiu Damou. A nonlinear model for dynamic analysis of a geared rotor-bearing system [J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(2): 191-193. (in Chinese)
- [5] 朱景梓,张展,秦立高. 渐开线外啮合圆柱齿轮传动[M]. 北京:国防工业出版社,1990.
Zhu Jingzi, Zhang Zhan, Qin Ligao. The involute cylindrical gear transmission by outer mesh [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [6] 康新中,吴三灵,马春茂. 火炮系统动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
Kang Xinzong, Wu Sanling, Ma Chunmao. Gun system dynamics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [7] Mechanical Dynamics Inc. ADAMS/solver user's guide[M]. [s.l.]: Mechanical Dynamics Inc., 2002.
- [8] Mechanical Dynamics Inc. ADAMS/view user's guide [M]. [s.l.]: Mechanical Dynamics Inc., 2002.