

文章编号:1000-8055(2013)02-0432-07

直升机尾传动系统扭转振动建模与特性

朱自冰, 朱如鹏, 鲍和云

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘 要: 将直升机传动系统简化为轴段和当量圆盘的串联系统,建立了直升机尾传动系统扭转振动的等效多自由度动力学模型.模型中考虑了啮合齿轮对的综合啮合误差激励和尾减速齿轮的啮合刚度.针对系统的扭转动力学方程,求得了系统的扭转振动响应,分析了直升机尾传动系统在轴的不同扭转刚度和齿轮的不同啮合刚度下的扭转振动的特性.结果表明:与尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移始终比与水平轴相联的当量圆盘的扭转角位移的数值大,即与尾斜轴相联的尾减输出齿轮振动大于输入齿轮;当轴的扭转刚度变化时,水平轴相联的当量圆盘与尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移变化的趋势相反;啮合刚度对系统扭转角位移的影响比较大,在建模时应当给予重视.

关 键 词: 直升机; 尾传动系统; 扭转振动; 轴段和圆盘; 多支点传动轴; 数值积分法

中图分类号: V233.1

文献标志码: A

Torsional vibration characteristics analyzing and modeling for helicopter tail drive system

ZHU Zi-bing, ZHU Ru-peng, BAO He-yun

(College of Mechanical and Electrical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The helicopter tail drive system was simplified to a series system with shaft section and equivalent disk. A equivalent dynamic analysis model with multiple degrees of freedom, in which the transmission error of meshing gear pair and meshing stiffness of tail-decelerated gear were included, was established for this simplified helicopter tail drive system. According to the torsional dynamics equation of helicopter tail drive system, the torsional vibration response of system was obtained, and the torsional vibration characteristics of the system with different torsional stiffness of the shaft and meshing stiffness of the gear were discussed. The following conclusions may be drawn from the analysis result. The torsional displacement of tail rotor is larger than the torsional displacement of driven gear of tail gearbox, namely the vibration response of output gear of tail gear box is larger than the input gear. The variation tendency is opposite of the torsional angle displacement between the equivalent disk connected to the horizontal shaft and oblique shaft respectively. The meshing stiffness has more influence on the system than the shaft torsional stiffness, it should be taken account into the modeling of helicopter tail drive system.

收稿日期: 2012-03-09

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130131.0829.201302.432_026.html

基金项目: 江苏省高校优势学科建设工程; 中央高校基本科研业务费专项基金(NS2012050)

作者简介: 朱自冰(1966—),男,湖南双峰人,研究员,博士生,主要从事机械传动方面的研究.

Key words: helicopter; tail drive system; torsional vibration; shaft segment and disk; multi-supporting drive shaft; numerical integration method

单独研究直升机尾传动系统的振动特性,有利于更好地获得尾传动系统扭转振动的特性及尾传动系统对整个直升机传动系统扭转振动影响的特性^[1-2]. 国内外学者对直升机尾传动系统模型的简化、直升机旋翼传动系统的固有振动特性试验、系统的机械扭振计算或试验、从整机角度涉及直升机传动系统扭转振动特性、盘轴系统的固有频率计算问题及共振问题进行了一系列研究^[1-12],但没有涉及减速器的啮合刚度及综合啮合误差,没有进行不同轴系间转速的当量化,没有计及尾桨轴的影响. 基于此,本文对直升机尾传动系统进行了简化,建立了其等效扭转振动动力学模型,用数值法对系统进行了求解,分析了系统的振动特性.

1 传动系统的物理模型和数学方程

将直升机主减速器(helicopter main gearbox, HMGB)等水平传动轴输入端的回转件当量成圆盘 1,中间减速器当量成圆盘 $n-4$ 和 $n-3$,尾减速器当量成圆盘 $n-2$ 和 $n-1$,尾桨当量成圆盘 n ,减速器中间以啮合刚度相联;水平传动轴中间支点的轴承上随轴转动的联轴器或部分当量成圆盘 2,3 等,中间以轴的扭转刚度相联,则直升机的尾传动系统成为轴段和圆盘的串联系统;再将各个圆盘视为支点的回转圆盘,并通过轴段传递转动和扭矩,则直升机的尾传动系统是多支点传动轴系统,如图 1 所示. 圆盘有 $j = 1, 2, \dots, n$ 个.

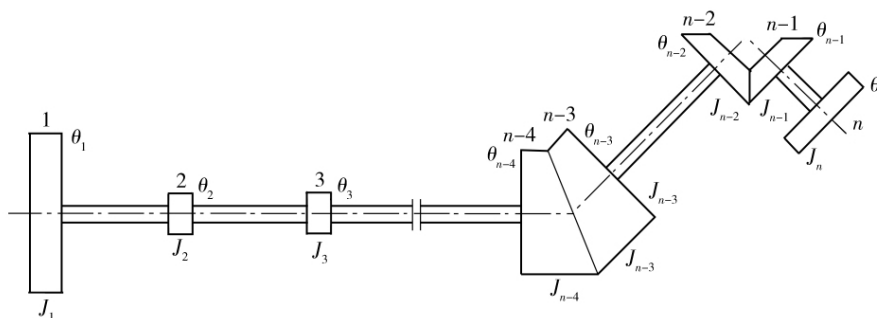


图 1 直升机尾传动系统的力学模型

Fig. 1 Helicopter tail drive system dynamic model

由于有中间减速器,系统的水平传动轴和尾斜轴各部分的转速不一样^[13-14]. 为了分析方便,把系统各部分向发动机输出轴处当量化,以水平传动轴为等效构件,将尾斜轴的惯性、弹性、力矩

和角位移都用等效构件上的等效量来代替. 当量化的原则是使当量化后的动能及弹性变形能与当量化前相同. 如图 2 为直升机尾传动系统等效动力学模型.

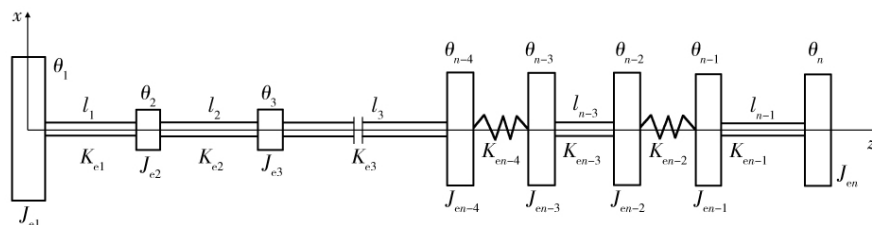


图 2 直升机尾传动系统等效动力学模型

Fig. 2 Helicopter tail drive system equivalent dynamic model

此系统共有 n 个自由度,其广义坐标如下:

$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{n-4}, \theta_{n-3}, \theta_{n-2}, \theta_{n-1}, \theta_n\}$, θ 为各当量圆盘的扭转角位移.

系统的运动微分方程为

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = P \quad (1)$$

式中 I 为转动惯量矩阵,即

$$\mathbf{I} = \text{diag}[J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad \cdots \quad J_{n-4} \quad J_{n-3} \quad J_{n-2} \quad J_{n-1} \quad J_n]^T \quad (2)$$

这里 J 为各当量圆盘的转动惯量; C 为扭转阻尼矩阵, K 为扭转刚度矩阵, P 为作用扭矩矩阵, 其表达式分别如下:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} d_1 & -d_1 & & & & & & & \\ -d_1 & d_1 + d_2 & -d_2 & & & & & & \\ & -d_2 & d_2 + d_3 & \ddots & & & & & \\ & & & \ddots & & & & & \\ & & & & c_1 r_1^2 + d_{n-5} & -c_1 r_1 r_2 & & & \\ & & & & -c_1 r_1 r_2 & c_1 r_2^2 + d_{n-3} & -d_{n-3} & & \\ & & & & & -d_{n-3} & c_2 r_3^2 + d_{n-3} & -c_2 r_3 r_4 & \\ & & & & & & -c_2 r_3 r_4 & c_2 r_4^2 + d_{n-1} & -d_{n-1} \\ & & & & & & & -d_{n-1} & d_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & & & & & & & \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & & & & & & \\ & -k_2 & k_2 + k_3 & \ddots & & & & & \\ & & & \ddots & & & & & \\ & & & & K_1 r_1^2 + k_{n-5} & -K_1 r_1 r_2 & & & \\ & & & & -K_1 r_1 r_2 & K_1 r_2^2 + k_{n-3} & -k_{n-3} & & \\ & & & & & -k_{n-3} & K_2 r_3^2 + k_{n-3} & -K_2 r_3 r_4 & \\ & & & & & & -K_2 r_3 r_4 & K_2 r_4^2 + k_{n-1} & -k_{n-1} \\ & & & & & & & -k_{n-1} & k_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{P} = [T_{\text{in}} \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad F_1(t)r_1 \quad -F_1(t)r_2 \quad F_2(t)r_3 \quad -F_2(t)r_4 \quad -T_{\text{out}}]^T \quad (5)$$

其中 d 为轴的扭转阻尼, c 为齿轮间的啮合阻尼, r 为齿轮分度圆半径, k 为轴的扭转刚度, K 为齿轮间的啮合刚度; T_{in} 和 T_{out} 分别为系统的输入和输出扭矩, $F(t)$ 为齿轮间的误差激励。

2 传动系统的求解及特性分析

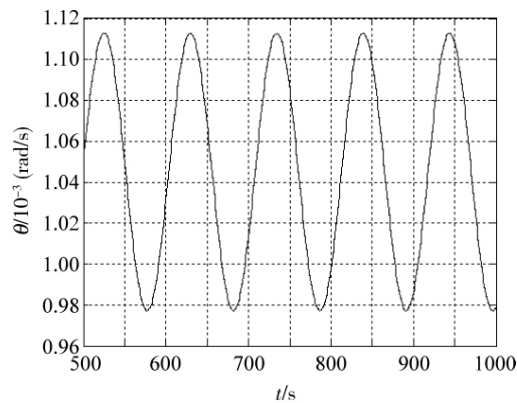
多支点传动轴系统扭转振动的角位移的计算是传动轴系统扭转振动研究的基本内容, 也是传动轴系统的扭转强度计算及角速度选择的基础。本文用 Wilson- θ 数值方法求解运动微分方程组(1), 它不必区分系统是否具有比例阻尼, 具有很好的稳定性, 一般取 $\theta > 1.37$ 即可保证算法的无条件稳定, 并且可以推广到非线性系统。本文计算取 $\theta = 1.4$ 。

针对某直升机尾传动系统本文用 Wilson- θ 数值积分方法进行了计算。系统的基本参数如下: 主减速器、联轴器、尾桨的当量转动惯量分别为 $J_{e1} = 3.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $J_{e2} = 0.0023 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $J_{e7} = 0.2$

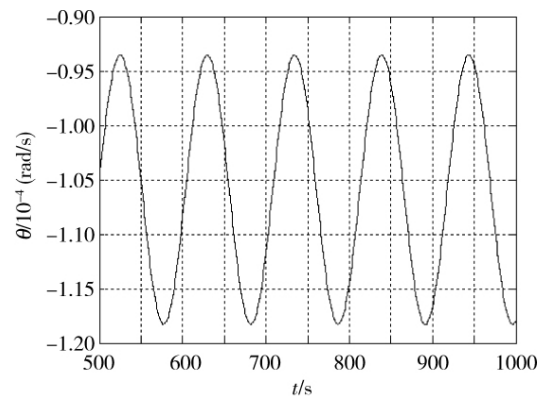
$\text{kg} \cdot \text{m}^2$; 中间减速器的齿数、模数、齿宽分别为 $Z_1 = 39$, $Z_2 = 35$, $m_1 = 4.5$, $B_1 = 33 \text{ mm}$; 尾减速器的齿数、模数、齿宽分别为 $Z_4 = 23$, $Z_3 = 72$, $m_2 = 4.75$, $B_2 = 43 \text{ mm}$; 水平轴、尾斜轴及尾桨轴的外径、内径、轴段的长度分别为 $D = 90 \text{ mm}$, $d = 80 \text{ mm}$, $L = 800 \text{ mm}$; 输入扭矩为 $T_{\text{in}} = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$; 输出扭矩为 $T_{\text{out}} = 4.8 \text{ N} \cdot \text{m}$; 轴的扭转刚度 $k = 5 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$; 轮齿间的啮合刚度 $K_1 = 6 \times 10^5 \text{ N/m}$, $K_2 = 1 \times 10^6 \text{ N/m}$; 误差激励幅值 $F_1 = F_2 = 10 \mu\text{m}$ 。由以上参数计算出的各自由度的扭转角位移如图3所示。

由图3可以看出, 尾桨轴相联的尾桨和尾减从动轮的扭转角位移数值比较大, 而尾斜轴相联的中减从动轮和尾减主动轮的扭转角位移数值比较小。水平轴相联的主减、联轴器及中减主动轮的扭转角位移数值居中。

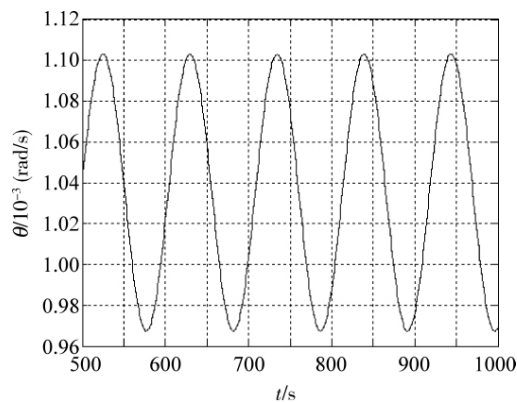
图4为轴的扭转刚度变小时(取 $k = 1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$)系统各自由度的扭转角位移。



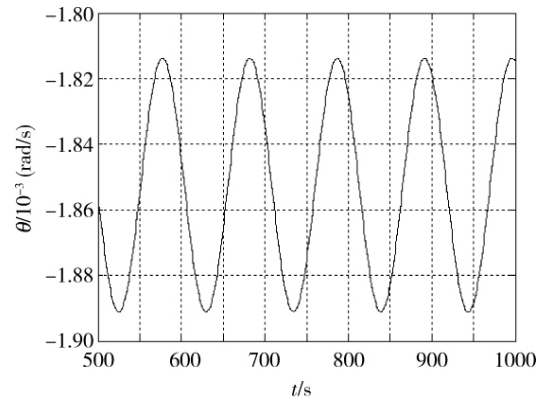
(a) 主减速器扭转角位移



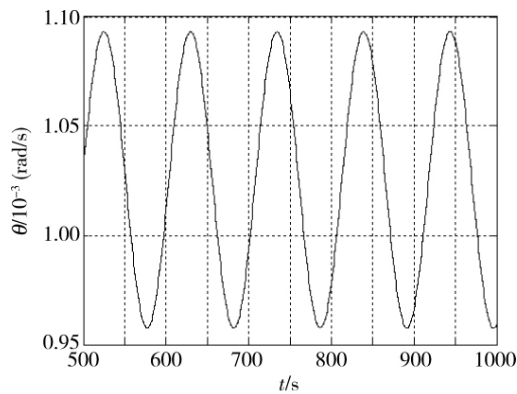
(e) 尾减速器主动轮扭转角位移



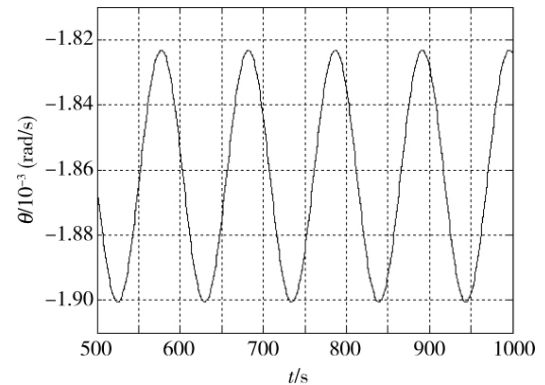
(b) 联轴器扭转角位移



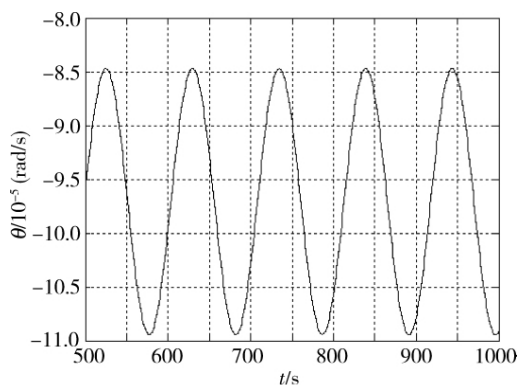
(f) 尾减速器从动轮扭转角位移



(c) 中间减速器主动轮扭转角位移



(g) 尾桨扭转角位移



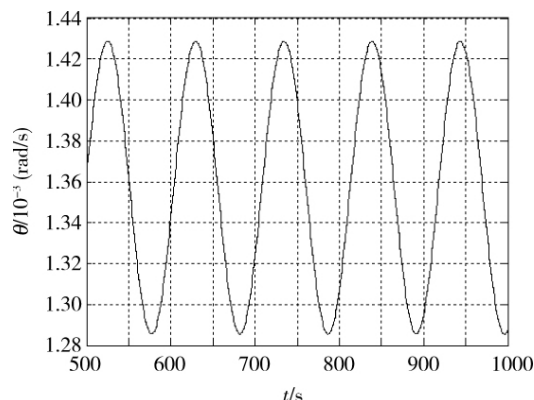
(d) 中间减速器从动轮扭转角位移

图 3 基本参数下各自由度的扭转角位移

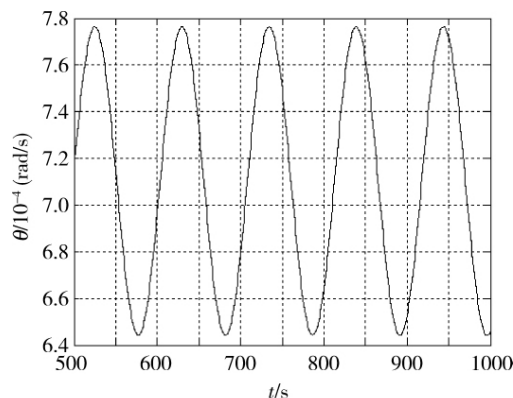
Fig. 3 Torsional vibration with basic parameters

图 5 为轴的扭转刚度变大时 ($k = 8 \times 10^5$ N·m/rad) 系统各自由度的扭转角位移。

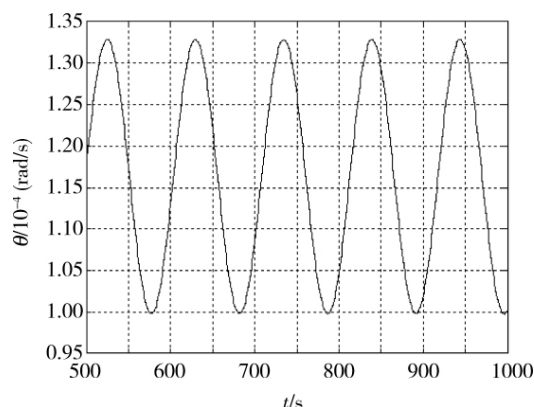
由图 4、图 5 可以看出,随着轴的扭转刚度变大,由水平轴相联的当量圆盘与尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移变化不一样。但由尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移始终比水平轴相联的当量圆盘的扭转角位的数值大。随着轴的扭转刚度变小,由水平轴相联的当量圆盘的扭转角位移变大,而由尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移变小。随着轴的扭转刚度变大,由水平轴相联的当



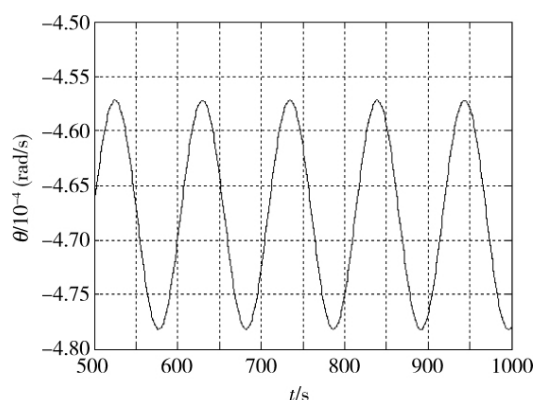
(a) 主减速器扭转角位移



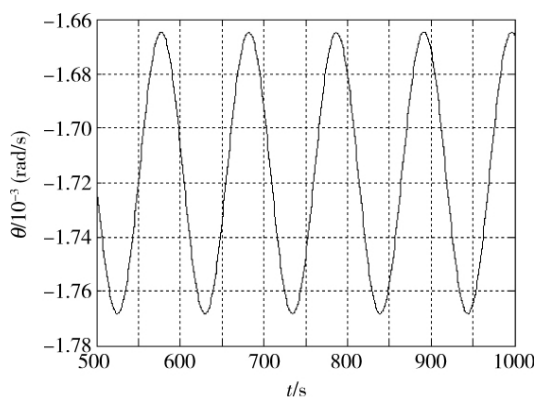
(a) 主减速器扭转角位移



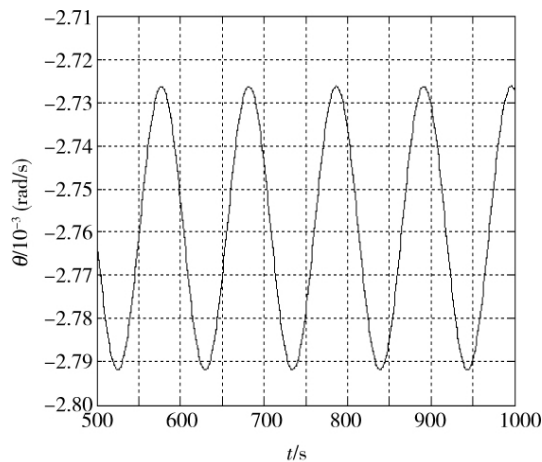
(b) 尾减速器主动轮扭转角位移



(b) 尾减速器主动轮扭转角位移



(c) 尾桨扭转角位移



(c) 尾桨扭转角位移

图 4 轴的扭转刚度变小时各自由度的扭转角位移

($k=1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$)

Fig. 4 Torsional vibration with lessening the shaft torsional stiffness

($k=1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$)

量圆盘的扭转角位移变小, 而由尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移变大. 这是因为尾斜轴相联的当量圆盘之间有轮齿间的啮合刚度的影响.

图 6 为轮齿间的啮合刚度变小时 (取 $K_1 = 1 \times 10^5 \text{ N/m}$, $K_2 = 9 \times 10^5 \text{ N/m}$) 系统各自由度的扭转角位移.

图 5 轴的扭转刚度变大时各自由度的扭转角位移

($k=8 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$)

Fig. 5 Torsional vibration with largening the shaft torsional stiffness

($k=8 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$)

图 7 为轮齿间的啮合刚度变大时 (取 $K_1 = 9 \times 10^5 \text{ N/m}$, $K_2 = 8 \times 10^6 \text{ N/m}$) 系统各自由度的扭转角位移.

由图 6、图 7 可以看出: 随着啮合刚度变大,

各当量圆盘的扭转角位的数值变小;随着啮合刚度变小,各当量圆盘的扭转角位移变大.轴的扭转刚度与轮齿间的啮合刚度改变的值相同,啮合刚度变化时当量圆盘的扭转角位移变化大小比扭转刚度变化时要剧烈,这说明啮合刚度对系统各当量圆盘的扭转角位的影响要敏感.

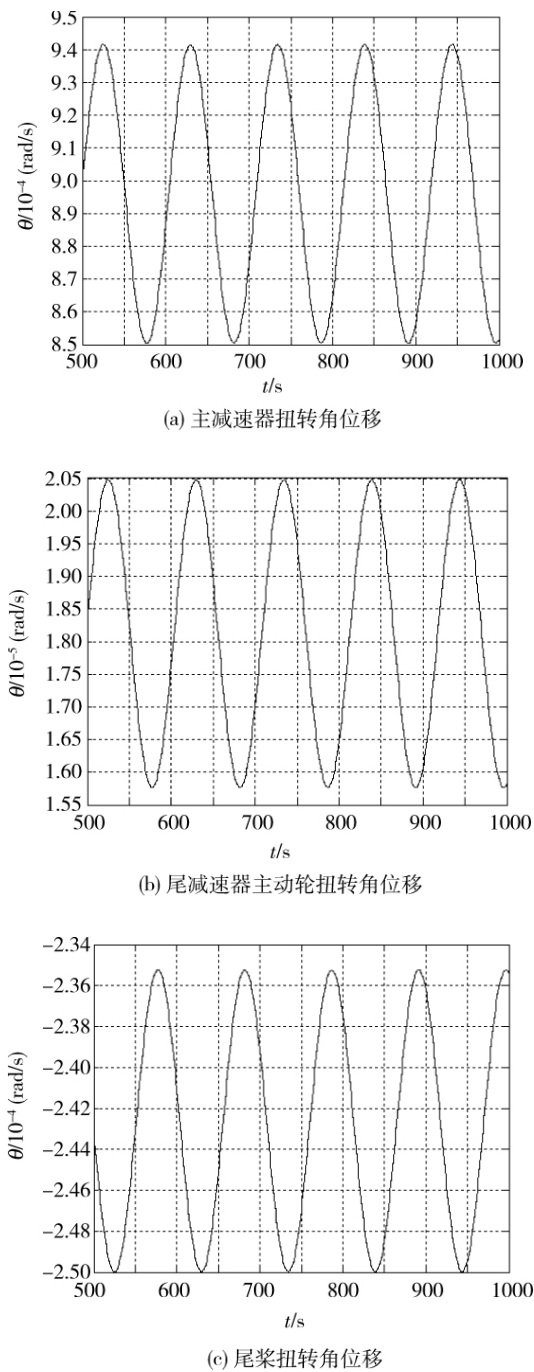


图6 啮合刚度变小时各自由度的扭转角位移

Fig. 6 Torsional vibration with lessening the meshing stiffness

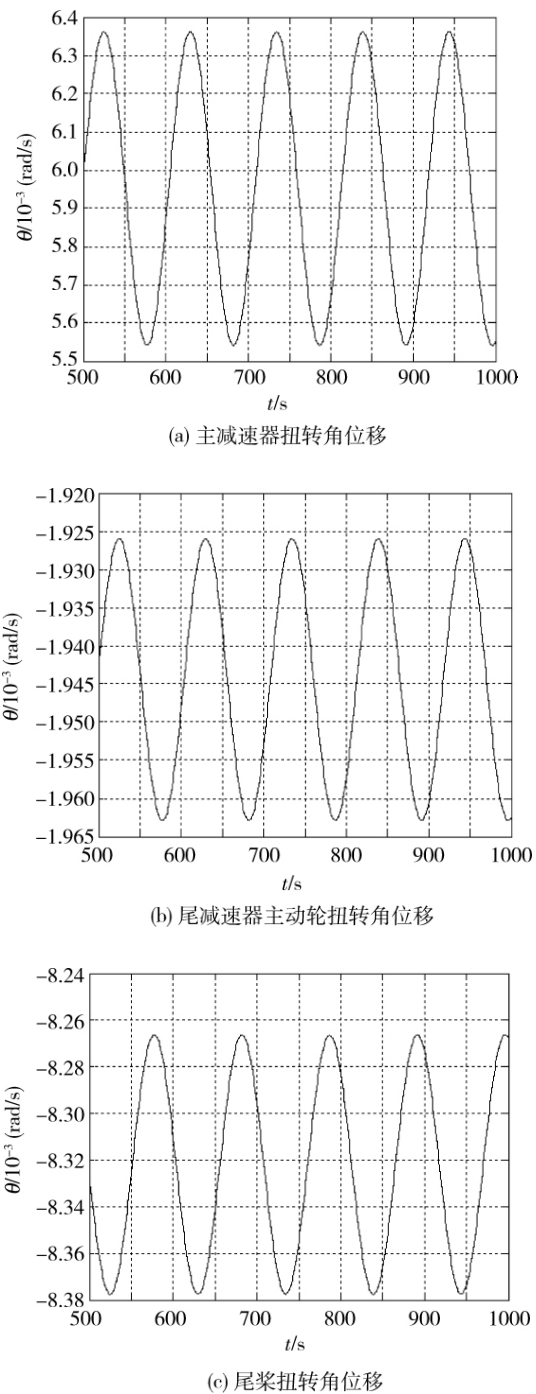


图7 啮合刚度变小时各自由度的扭转角位移

Fig. 7 Torsional vibration with largening the meshing stiffness

3 结 论

由本文的理论方法针对某直升机尾传动系统的求解,可以得出以下结论:

1) 尾桨轴相联的尾桨和尾减从动轮的扭转角位移数值比较大,而尾斜轴相联的中减从动轮和尾减主动轮的扭转角位移数值比较小;水平轴

相联的主减、联轴器及中减主动轮的扭转角位移数值居中。

2) 轴的扭转刚度变化. 由水平轴相联的当量圆盘与尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移变化不一样; 与尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移始终比水平轴相联的当量圆盘的扭转角位的数值大。

3) 随着轴的扭转刚度变小, 由水平轴相联的当量圆盘的扭转角位移变大, 而由尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移变小. 随着轴的扭转刚度变大, 由水平轴相联的当量圆盘的扭转角位移变小, 而由尾斜轴相联的当量圆盘的扭转角位移变大. 这是因为尾斜轴相联的当量圆盘之间有轮齿间的啮合刚度的影响. 啮合刚度对系统扭转角位移的影响比较大. 在直升机尾传动系统的分析模型中应予以考虑。

参考文献:

- [1] 许兆棠, 朱如鹏. 直升机尾传动系扭转振动的分析[J]. 航空学报, 2007, 28(2): 425-431.
XU Zhaotang, ZHU Rupeng. Torsional vibration analysis for a helicopter tail drive system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(2): 425-431.
- [2] Yue L, Fei Q G, Zhang L M. Improvement accuracy of system identification based on morlet wavelet[J]. Transaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 22(3): 206-211.
- [3] 邵忍平, 沈允文, 刘更, 等. 直升机旋翼传动系统固有振动特性的研究[J]. 机械科学与技术, 1997, 16(3): 523-526.
SHAO Renping, SHEN Yunwen, LIU Geng, et al. Study on dynamic characteristic of transmission system for helicopter rotary wings[J]. Mechanical Science and Technology, 1997, 16(3): 523-526. (in Chinese)
- [4] 徐敏. 直升机传动系统机械扭振计算与试验联合建模[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(1): 41-45.
XU Min. Calculation testing joint modeling of helicopter drive system for analysis of torsional vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2004, 24(1): 41-45. (in Chinese)
- [5] 薛海峰, 向锦武, 张晓谷. 直升机旋翼/动力/传动系统模型及耦合影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(5): 438-443.
XUE Haifeng, XIANG Jinwu, ZHANG Xiaogu. Coupled helicopter rotor/propulsion/ transmission system torsional vibration analytical model and coupled influence investigation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(5): 438-443. (in Chinese)
- [6] 顾仲权, 杨景新. 直升机传动系统扭转振动特性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 1997, 29(6): 674-678.
GU Zhongquan, YANG Jingxin. Analyses of torsional vibration characteristics for transmission system of helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1997, 29(6): 674-678. (in Chinese)
- [7] Lee C W, Jia H S, Kim C S, et al. Turning of simulated natural frequencies for a flexible shaft-multiple flexible disk system[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 207(4): 435-451.
- [8] 艾剑波, 邓景辉, 方永红. 某直升机扭振系统共振问题研究[J]. 直升机技术, 2006, 146(2): 14-18.
AI Jianbo, DENG Jinghui, FANG Yonghong. Solutions study of XX Helicopter rotor, engine, train couples system resonance problem[J]. Helicopter Technique, 2006, 146(2): 14-18. (in Chinese)
- [9] 鲁金华, 何九龄, 邱志平, 等. 某型直升机涵道尾桨的固有频率区间估计[J]. 直升机技术, 2006, 146(2): 10-13.
LU Jinhua, HE Jiuling, QU Zhipeng, et al. Interval estimation of natural frequency for culvert tail rotor of some kind of helicopter[J]. Helicopter Technique, 2006, 146(2): 10-13.
- [10] 苏文斗. 封闭盘轴系统扭转振动固有频率的计算[J]. 热能动力工程, 1990, 5(5): 36-38.
SU Wendou. Calculation of natural frequency of torsional vibrations for an enclosed disc shaft system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1990, 5(5): 36-38.
- [11] 任传波, 蒲琪, 谭德荣. 轴盘系统扭振固有频率的精确计算[J]. 机械科学与技术, 1999, 18(4): 578-579.
REN Chuanbo, PU Qi, TAN Derong. Exact computation for torsional vibration natural frequency of shaft and disks system[J]. Mechanical Science and Technology, 1999, 18(4): 578-579.
- [12] LI Q S. Torsional vibration of multi-step non-uniform rods with various concentrated elements[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 260(4): 637-651.
- [13] 华东耘, 张和豪, 徐东. 转子齿轮传动系统动力学研究[J]. 上海工业大学学报, 1990, 11(2): 124-134.
HUA Dongyun, ZHANG Hehao, XU Dong. A research on dynamics of rotator-gearing system[J]. Journal of Shanghai University of Technology, 1990, 11(2): 124-134.
- [14] Alugongo A A, Munda J L. A wavelet-time frequency analysis on torsional vibration response of a rotor with a switching crack and a dominant twisting torque[R]. IEEE Report, AFRICON-2007-4401643, 2007.