

驱动方式与轮径差对悬挂式单轨车轮磨耗的影响分析

高润稼,曾京,戴鑫亮

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘 要:悬挂式单轨大都采用橡胶轮胎,在运行过程中磨耗较为严重。探究了走行轮的驱动方式和初始轮径差这两种因素对车辆走行轮磨耗程度的影响。利用动力学仿真软件 UM 建立悬挂式单轨动力学模型,以走行轮的磨耗功来评价走行轮的磨耗程度。研究表明:驱动方式主要影响走行轮纵向磨耗功,在直线和曲线两种工况下,同步驱动时走行轮磨耗功均小于独立驱动的走行轮磨耗功;走行轮的磨耗功随初始轮径差的增大而增大,大轮的磨耗程度明显大于小轮,表明走行轮的轮径差不会随着车辆的运行进一步加大。

关键词:轨道车辆;悬挂式单轨;轮胎磨耗;驱动方式;轮径差

中图分类号:U266.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0032-05

Influence Analysis of Driving Mode and Wheel Diameter Difference over Suspended Monorail Wheel Wear

GAO Runjia, ZENG Jing, DAI Xinliang

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: As most of suspended monorails employ rubber tires more severely worn during operation, the influence of the driving mode of the running wheel and the initial wheel diameter difference on the degree of wear of the running wheel of the vehicle is studied. The dynamic simulation software UM is used to establish a suspended monorail dynamic model, and the wear power of the running wheel is used to evaluate the degree of wear of the running wheel. The research shows that the driving mode mainly affects the longitudinal wear power of the running wheel. In both linear and curved working conditions, the running wheel wearing power during synchronous driving is less than that of the running wheel independently driven. The wearing power of the running wheel varies with the initial wheel diameter. The abrasion of the big wheel is obviously greater than that of the small wheel, indicating that the wheel diameter difference of the running wheel will not increase further with the operation of the vehicle.

Keywords: rail vehicle; suspended monorail; tire wear; drive mode; wheel diameter difference

0 引言

悬挂式单轨作为一种新型的轨道交通系统具有较强的地形适应能力,其建设周期短,工程造价低,景观效果好^[1],近年来在全国多地得到了应用。与传统采用钢轮的轨道交通车辆不同,悬挂式单轨一般采用实心或充气橡胶轮胎。在列车运行时,橡胶轮胎可充分发挥其缓冲减振效果及较高黏着力的优势,可使车辆具有较高的加速、减速性能,但同时也不可避免地增大了车辆的运行阻力^[2]。悬挂式单轨在运行过程中,走行轮的磨损往往是比较严重的,走行轮的过度磨损将影响车辆的启动、制动过程中的加减速性能,危及行车安全。

国内外许多学者都对单轨车辆轮胎磨损进行了研究,王国林等人提出采用虚拟外倾方法有效降低了走行轮胎磨损,并改善了其磨损均匀分布程度^[3];黄继刚等人提出了通过改变 0°带束层弹性模量来控制走行轮轮胎偏磨的方法^[4];文孝霞等人探究了车辆中央悬挂参数刚度、走行轮定距对轮胎磨损的影响趋势^[5]。

现阶段悬挂式单轨车辆走行轮的驱动方式主要有两种——独立驱动和同步驱动。为了选取合理的驱动方式以降低走行轮磨耗,本文将探究这两种驱动方式对走行轮磨耗的影响。

悬挂式单轨车辆走行轮在刚出现磨耗时,在不影响车辆正常运行时一般不会立即更换轮胎,此时走行轮之间会出现一定的轮径差。这种情况下车辆在后续运行过程中轮径差是会进一步加大还是减小,也是值得研究的问题。因此本文还将以磨耗功为依据,探究初始轮径差对走行轮后续磨耗的影响。

1 研究方法与计算模型

1.1 悬挂式单轨动力学模型

本文所研究的悬挂式单轨列车主要由车体、构架、悬挂装置、摇枕、走行轮、导向轮、稳定轮、一系橡胶堆、二系悬挂装置等组成。利用多体动力学计算软件 UM 建立单节编组的悬挂式单轨车辆系统多刚体动力学模型,如图 1

所示。

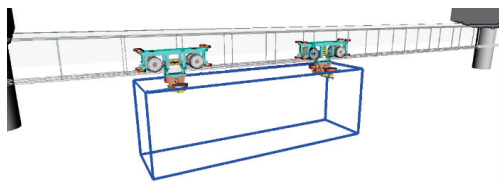


图1 悬挂式单轨动力学模型

车辆主要参数如表1所示。

表1 车辆主要参数

参数	数值
车体质量/kg	8 140
转向架质量/kg	806
整备质量/t	13
行走轮滚动圆跨距/m	0.52
转向架轴距/m	1.5
车辆定距/m	7.1
车体长度/m	11.9
行走轮质量/kg	20
行走轮径向刚度/(MN/m)	16.5
行走轮径向阻尼/(kN·s/m)	2

考虑行走轮和导向轮在轨道梁内运行过程中侧倾角度较小,故采用基于弹性地基梁理论的 Fiala 轮胎模型来描述悬挂式单轨轮胎与轨道梁的相互作用关系。车辆模型中的减振器阻尼特性考虑为非线性,采用 Maxwell 模型来模拟抗横摆减振器、横向和垂向减振器的阻尼力。垂向止挡、横向止挡和部分悬挂元件亦为非线性。

由于不同的驱动方式可能对行走轮的磨耗程度有不同影响,因此建立独立驱动和同步驱动的车辆模型,其原理如图2所示。

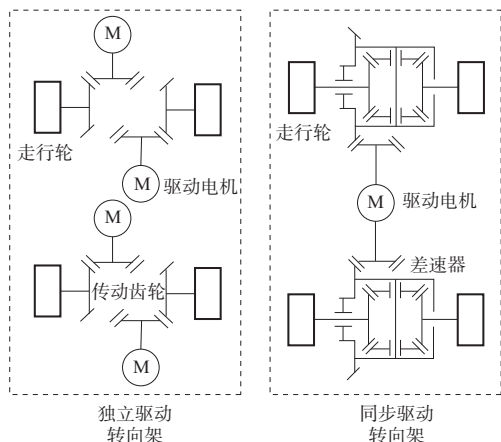


图2 驱动方式原理图

独立驱动转向架采用4个驱动电机分别驱动每个行走轮,通过齿轮箱里的锥齿轮,可实现传动的换向。

同步驱动转向架的驱动电机位于构架的中部,差速器位于前后轮之间,驱动电机将动力传至前后差速器,差速

器中的齿轮传动装置能够合理分配两侧车轮的转矩和转速,因此左、右两个行走轮可实现独立旋转。

1.2 行走轮磨耗模型

悬挂式单轨采用实心橡胶轮胎,车辆正常运行时,由于轨道梁的行走面存在不平顺的激励,行走轮会出现纵向和横向滑移,行走轮受到轨面的摩擦力所做的功,从而加速轮胎的磨耗。实际上橡胶轮胎的磨耗是一个十分复杂的过程,包含了疲劳磨耗、磨粒磨耗、机械-化学腐蚀磨耗等过程^[6]。

由于直接计算橡胶轮胎的磨损量较为复杂,现在大都采用磨耗功理论定性地评价轮胎磨损的程度,磨耗功模型基本假设是单位体积的磨损量与磨耗功成正比^[7]。磨耗功是轮胎与地面发生摩擦剪切、滑移的能量表现,与磨耗有很大的相关性^[8]。磨损体积速率 v 与磨耗功率 W_f 的关系为

$$v = b_0 W_f^{b_1} \quad (1)$$

式中 b_0 、 b_1 为与花纹块磨损相关的材料参数。

本文以单位面积的磨耗功来衡量轮胎的磨耗性能,单位面积的磨耗功 W_A 可表示为

$$W_A = \iint \mu P dL \quad (2)$$

式中: μ 为胎面与地面的摩擦因数; P 为接触面上单位面积正压力; L 为相对于接触面的滑移。

分别考虑每个轮胎的纵向磨耗功 W_x 和横向磨耗功 W_y ,则总磨耗功为

$$W = W_x + W_y \quad (3)$$

1) 纵向磨耗功

行走轮的纵向磨耗功为轮胎的纵向滑移量×纵向摩擦力。产生纵向滑移时行走轮的滚动速度与行走轮的前进速度不相等,两者的差值即为相对滑移速度。因此纵向磨耗功可表示为

$$W_x = \int_0^T |\omega r - v| \mu F_z dt \quad (4)$$

式中: ω 为轮胎转动的角速度; r 为轮胎滚动圆半径; v 为轮胎前进速度; F_z 为轮轨垂向力; μ 为胎面与地面的摩擦因数; dt 为测点时间间隔。

2) 横向磨耗功

行走轮的横向磨耗功为轮胎的横向滑移量×横向摩擦力。由于轮胎的横向滑移量可以直接测得,因此横向磨耗功可表示为

$$W_y = \int_0^{L_y} \mu F_z dy \quad (5)$$

式中 dy 为轮胎横向位移。

1.3 磨耗功的仿真计算

仿真中直线工况车速设为 60 km/h,曲线工况曲线半径为 200 m,车速设为 40 km/h;轨道梁的行走面施加实测不平顺激励,仿真时长为 20 s,采样时间间隔 Δt 为 0.01 s。分别输出行走轮的垂向力 F_z 、行走轮角速度 ω 、行走轮前进速度 v 和行走轮横向滑移量 dy 。其中行走轮的垂向力 F_z 和行走轮横向滑移量 dy 时域上的结果如图3、图4所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

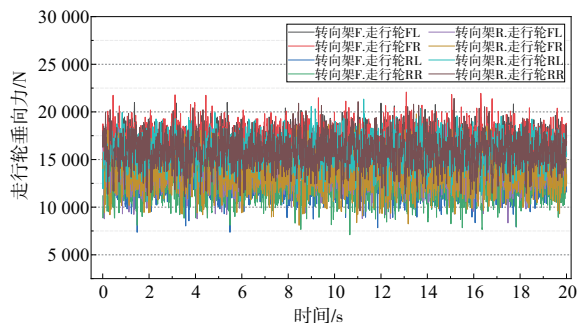


图3 走行轮垂向力

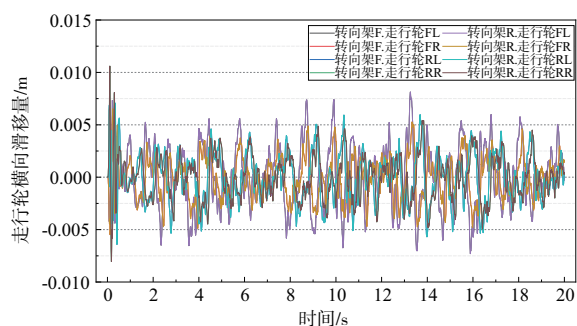


图4 走行轮横向滑移量

根据式(4)-式(5)补充基于数值仿真离散形式的磨耗计算公式:

$$W_x = \sum_{n=1}^{n=N} |\omega_n r - v_n| \mu(F_z)_n \Delta t \quad (6)$$

$$W_y = \sum_{n=1}^{n=N} \mu(F_z)_n \Delta y_n \quad (7)$$

式中: n 为采样点序号; N 为采样点总数; Δt 为采样时间间隔; Δy 为相邻采样点的轮胎横向位移。

将仿真得到的以上参数的数据结果,带入式(6)-式(7)可分别计算出每个走行轮在时域过程中的纵向磨耗功与横向磨耗功,再由式(3)即可算出单个走行轮总的磨耗功,取磨耗功的平均值作为对比分析的依据。

2 驱动方式对走行轮磨耗的影响分析

在直线轨道运行的情况下,对比分析独立驱动和同步驱动两种方式对走行轮磨耗的影响,分别计算得到走行轮的纵向、横向和总磨耗功,结果如图5所示。

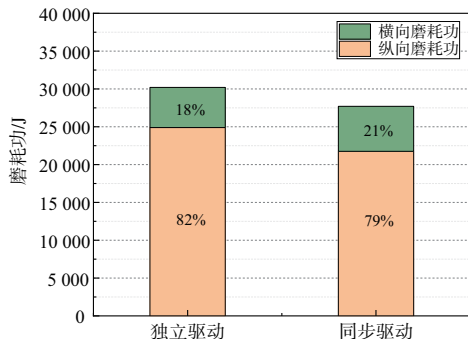


图5 走行轮磨耗功(直线工况)

由图5可知,在直线轨道运行的情况下,独立驱动下走行轮所产生的总磨耗功为30206J,同步驱动下走行轮产生总磨耗功为27698J,同步驱动下走行轮磨耗功要明显小于独立驱动下走行轮磨耗功。分析总磨耗功的构成可知,无论是独立驱动还是同步驱动,走行轮的总磨耗功主要由纵向磨耗功构成,其约占总磨耗功的80%,横向磨耗功约占20%。两种驱动方式下横向磨耗功差别不大,总磨耗功的差异主要体现在纵向磨耗功上。这说明走行轮的磨损主要是因为纵向滑移下的摩擦做功所导致,驱动方式对纵向磨耗功产生一定影响,而对横向磨耗功影响不大。

在半径为200m的曲线工况下,对比分析独立驱动和同步驱动两种方式对走行轮磨耗的影响,计算得到走行轮磨耗功结果如图6所示。

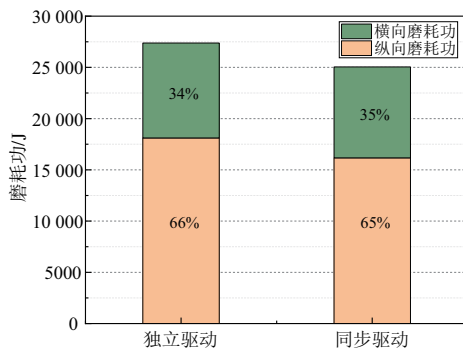


图6 走行轮磨耗功(曲线工况)

在半径为200m的曲线工况下,总磨耗功主要还是由纵向磨耗功构成,纵向磨耗功约占总磨耗功65%,但横向磨耗功约占总磨耗功的比例比直线工况增加,约占35%。独立驱动下走行轮所产生的总磨耗功为27337J,同步驱动下走行轮产生总磨耗功为25041J,同步驱动下走行轮磨耗功小于独立驱动下走行轮磨耗功。这说明在直线和曲线工况下,同步驱动走行轮产生的磨耗功均小于独立驱动走行轮产生的磨耗功,驱动方式主要影响纵向磨耗功,对横向磨耗功影响较小。

3 轮径差对走行轮磨耗的影响分析

悬挂式单轨在运行过程中,走行轮会出现不可避免的磨损。为了探究当走行轮已经出现磨损、走行轮的轮之间出现了轮径差、磨耗轮(小轮)与非磨耗轮(大轮)在后续的运行过程中磨损程度的大小,以走行轮同步驱动转向架为例,拟定如图7所示的4种工况。

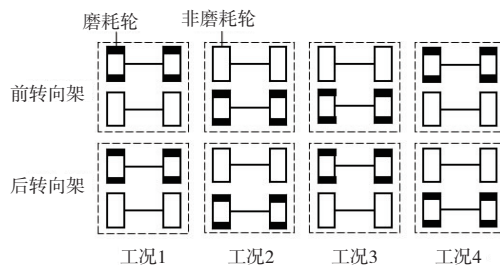


图7 轮径差对走行轮磨耗的工况分析

计算不同轮径差下工况 1-工况 4 各个走行轮的磨耗功,并绘柱状图如图 8-图 11 所示。图中走行轮 FFL 为前转向架前轮对左轮。符号中第一位 F 表示前转向架、R 表示后转向架;第二位 F 表示前轮对、R 表示后轮对;第三位 L 表示左轮、R 表示右轮。小表示初始存在磨耗的磨耗轮,大表示不存在初始磨耗的非磨耗轮。

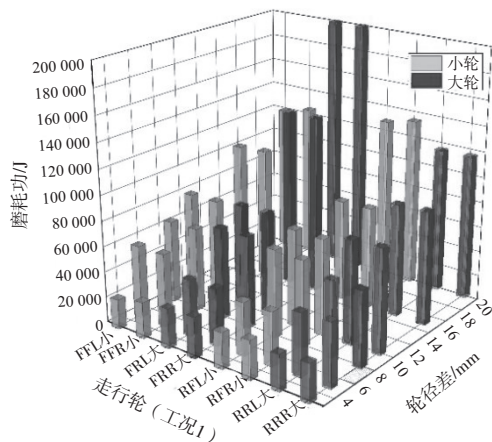


图 8 工况 1 走行轮磨耗功

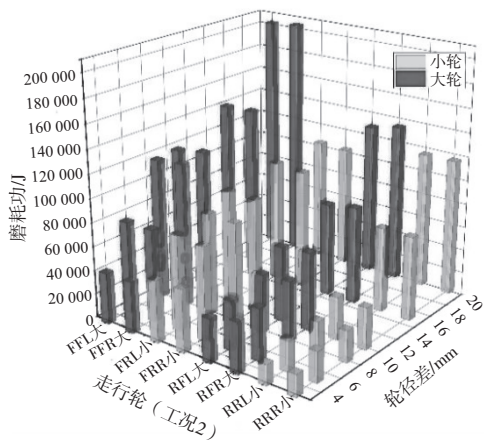


图 9 工况 2 走行轮磨耗功

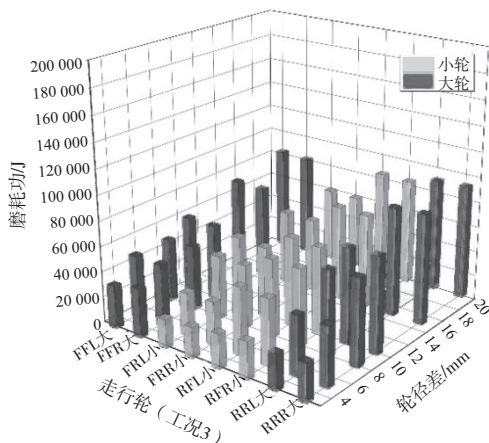


图 10 工况 3 走行轮磨耗功

对比图 8-图 11 中大轮磨耗功和小轮磨耗功的柱状

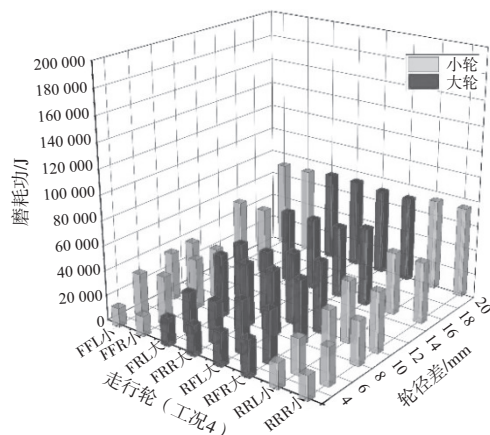


图 11 工况 4 走行轮磨耗功

图可知,当走行轮存在轮径差时,在后续的运行过程中,大轮的磨耗功基本都高于小轮。观察走行轮的磨耗功随轮径差的变化可知,轮径差越大,走行轮的磨耗功就越大。对比工况 1、工况 2 和工况 3、工况 4 可知,两个转向架的两个前轮对或两个后轮对出现初始磨耗(工况 1、工况 2)的工况要比两个转向架的一前一后轮对出现初始磨耗(工况 3、工况 4)工况的磨耗功要大。这说明轮径差出现在不同的位置也会对走行轮的磨耗功产生不同的影响。

将工况 1-工况 4 的大轮和小轮的磨耗功分别取平均值,得到它们的平均磨耗功随轮径差变化的曲线如图 12 所示。

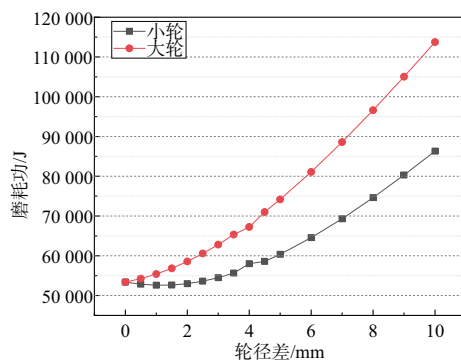


图 12 磨耗功均值

由图 12 可以看出,大轮和小轮的磨耗功随着轮径差的增大而增大。大轮的磨耗功大于小轮的磨耗功,且两者之差随轮径差的增大而增大。这个趋势说明当走行轮出现轮径差后,大轮的磨耗比小轮大,大轮的轮径由于磨耗而减小的程度比小轮快,二者之间的轮径差有减小的趋势,走行轮的轮径差不会随着车辆的运行进一步加大。

4 结语

1) 走行轮的磨损主要是因为纵向滑移下的摩擦做功所导致,驱动方式主要影响纵向磨耗功。无论是在直线还是曲线工况下,同步驱动下走行轮磨耗功均明显小于独立驱动下走行轮磨耗功。

2) 走行轮轮径差的存在会使大轮和小轮磨耗程度不同。

当走行轮存在初始轮径差时,在运行过程中大轮的磨耗功基本都高于小轮,且二者的差值随初始轮径差的增大而增大。

3) 走行轮出现轮径差后,大轮的磨耗比小轮大,大轮轮径减小的程度比小轮快,二者之间的轮径差有减小的趋势,说明走行轮的轮径差不会随着车辆的运行进一步加大。

参考文献:

- [1] 朱鹏飞. 悬挂式单轨交通的发展现状与应用展望[J]. 现代城市轨道交通,2020(4):96-100.
- [2] 王伟杰,任光胜,张经华. 跨座式单轨列车轮胎寿命的影响因素分析[J]. 都市快轨交通,2009,22(4):89-91.
- [3] 王国林,郑州,张松,等. 跨座式单轨列车走行轮胎磨耗控制方法研究[J]. 机械工程学报,2018,54(6):78-85.

- [4] 黄继刚,于丽波,杨正林. 跨座式单轨走行轮轮胎工作模态与偏磨关系研究[J]. 机械科学与技术,2019,38(8):1282-1288.
- [5] 文孝霞,杜子学,申震,等. 单轨车辆参数对轮胎磨损的影响及优化研究[J]. 机械设计与制造,2014(9):214-217.
- [6] 黄海波,靳晓雄,丁玉兰. 轮胎偏磨损机理及数值解析方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(2):234-238.
- [7] 马广宇,曾京,汪群生. 基于城际动车组的踏面磨耗预测及参数优化[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):32-36.
- [8] 吴健,王泽君,王友善,等. 基于摩擦功的全钢载重子午线轮胎的磨耗性能研究[J]. 橡胶工业,2013,60(2):80-84.

收稿日期:2020-11-11

(上接第9页)

1) 差速齿轮传动系统从定轴状态到差动状态时,动态啮合力的幅值先快速衰减,之后保持不变,动态啮合力随时间周期变化。

2) 传动系统从定轴状态到差动状态下,动态啮合力振幅在快速衰减阶段的最大值会随着差动输入转速大小和方向的变化而变化;正向时,最大动态啮合力随着转速增大而减小;反向时,随着转速增大而增大。

3) 不同差动输入下,进入周期变化阶段的动态啮合力相较于定轴状态会发生变化,差动输入正向时,最大动态啮合力增大,反之减小,且正向时,随着转速增大,最大动态啮合力增大,反向时,随着转速增大而减小。

参考文献:

- [1] 薛亮. 基于 CATIA 和 ADAMS 的轿车差速器参数化设计及仿真[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- [2] 肖泽艳. 轿车差速器参数化设计与有限元分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.

- [3] 何耀华,肖泽艳. 基于 CATIA 的轿车差速器直齿圆锥齿轮的参数化设计[J]. 兰州理工大学学报,2011,37(4):43-46.
- [4] VELEX P, MAATAR M. A mathematical model for analyzing the influence of shape deviations and mounting errors on gear dynamic behaviour[J]. Journal of Sound and Vibration,1996,191(5):629-660.
- [5] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学:振动、冲击、噪声[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [6] JAMMI S. Gear tooth stresses from finite element analysis compared with AGMA standards[C]//Proceedings of ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Portland, Oregon, USA:2014.
- [7] CHAARI F, HBAEIB R, FAKHFAKH T, et al. Dynamic response simulation of planetary gears by the iterative spectral method[J]. International Journal of Simulation Modelling,2005,4(1):35-45.

收稿日期:2020-11-12

(上接第13页)

2) 由于两个面齿轮的空间位置以及面齿轮副间的承载力差异,相对于两个面齿轮来说,圆柱齿轮的承载变形分为正值和负值,因此对两面齿轮齿面接触椭圆位置的影响正好相反;圆柱齿轮与面齿轮副齿面接触椭圆对两齿轮轴线夹角的变化最敏感;

3) 为降低承载变形对接触斑点位置造成的影响,使机构中的各个面齿轮副都具有良好的接触效果,应采取调整措施使两支路载荷尽量均等,使接触斑点位于面齿轮齿面中部,以延长机构的使用寿命。

参考文献:

- [1] LITVIN F L, ZHANG Y, WANG J C, et al. Design and geometry of face-gear drives[J]. Journal of Mechanical Design,1992,114(4):642-647.
- [2] LITVIN F L, GONZALEZ - PEREZ I, FUENTES A, et al. Design, generation and stress analysis of face-gear drive with helical pinion[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2005,194(36/37/38):3870-3901.

- [3] 谭武中,王祁波. 面齿轮在直升机传动系统中的应用前景分析[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):52-55.
- [4] 汪中厚,牛波,张扬扬,等. 正交直齿面齿轮接触斑点及传动误差的研究[J]. 机械传动,2013,37(10):7-13,18.
- [5] BOSSLER R B. Increased capacity face gear arrangement for transmitting torque through an angle and to a plurality of power extraction paths:US,5233886[P]. 1993-08-10.
- [6] 赵宁,李旺,郭辉,等. 某型直升机同轴面齿轮分扭传动均载研究[J]. 机械传动,2020,44(5):10-17.
- [7] 王延忠,侯良威,兰州,等. 渐开线碟形砂轮磨削面齿轮数控加工研究[J]. 航空动力学报,2015,30(8):2033-2041.
- [8] 钱露露,杨晓宇,唐进元. 直齿面齿轮数控刨削工艺路径优化研究[J]. 机械传动,2016,40(6):18-22,56.
- [9] 彭先龙,张乐. 面齿轮功率分支传动系统的转矩分配研究[J]. 机械传动,2016,40(11):117-122.
- [10] 宋乐民. 齿形与齿轮强度[M]. 北京:国防工业出版社,1987:172-173.

收稿日期:2020-12-02