差速器壳体疲劳寿命仿真分析方法

汤天宝,罗义建,秦玉林,彭国民,余春祥,胡军峰

(浙江吉利动力总成研究院 动力总成试验中心,浙江 宁波 315000)

摘要:目的 研究差速器壳体疲劳寿命分析方法,调查差速器壳体断裂的根本原因。方法 以具体试验工况 为输入,以减速器壳体支撑刚度为边界条件,以齿轮啮合力为输入载荷,建立弹性支撑条件下的差速器壳 体有限元模型,并进行强度计算。以强度分析结果为输入,在疲劳寿命计算软件 FEMFAT 中进行疲劳寿命 校核。考虑到差速器壳体分析工况较多、载荷复杂,采用 Neuber 公式,结合材料的循环应力-应变曲线方程 和应力-应变迟滞回线方程,进行线弹性应力修正的方法进行校核。同时,为了更好地模拟差速器的运行极 限工况,分析载荷采用了三正一负交替变化的载荷。最后,基于线性疲劳累积损伤理论的 Miner 法则对结果 进行判断。结果 基于线性疲劳累积损伤理论的 Miner 法则,初始设计方案的计算结果表明,疲劳破坏发生 在壳体过渡圆角处,其可承受的载荷循环次数为 270 次,不满足大于 350 次的设计目标,结果与疲劳台架 试验相符,且失效区域对应性较好。通过增大差速器壳体过渡圆角半径及增加壳体厚度的方法对差速器壳 体进行优化,优化后的疲劳分析结果显示,疲劳寿命增加至 417 次,满足 350 次设计目标,并顺利通过耐 久台架试验。结论 通过优化前后台架试验结果与仿真结果的对比证实,该仿真分析方法能准确预测差速器 壳体的疲劳水平,且该分析方法在计算精度方面是完全可信的,可以在实际项目开发中应用,可提前识别 并规避风险,减少后期台架验证成本。

关键词:差速器;弹性支撑;有限元模型;疲劳寿命 中图分类号:TB47 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2021)11-0137-06 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.11.019

Simulation Analysis Method of Fatigue Life for Differential Housing

TANG Tian-bao, LUO Yi-jian, QIN Yu-lin, PENG Guo-min, YU Chun-xiang, HU Jun-feng (Zhejiang Geely Powertrain Research Institute, Powertrain Test Center, Ningbo 315000, China)

ABSTRACT: This paper is to study the fatigue life analysis method of differential housing and investigate the root cause of differential housing failure. Taking the specific testing load case as the input, support stiffness of decelerator housing as boundary condition, gear meshing force as the input load, the finite element model of the differential housing under the condition of elastic support is established, and the strength is calculated. The strength result is then input to fatigue SW FEMFAT to verify fatigue life. Considering that the analyzed conditions and loads of differential housing are complicated, Neuber formula is used to check the linear elastic stress correction method in combination with the material cyclic stress-strain curve and stress-strain hysteresis equation. At the same time, in order to better simulate the operating limit load of the differential, the load analysis

· 137 ·

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-05-26

Received: 2021-04-01; Revised: 2021-05-26

作者简介:汤天宝(1984—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为机械设计及理论。

Biography: TANG Tian-bao (1984-), Male, Master, Research focus: mechanical design and theory.

引文格式:汤天宝,罗义建,秦玉林,等.差速器壳体疲劳寿命仿真分析方法[J].装备环境工程,2021,18(11):137-142.

TANG Tian-bao, LUO Yi-jian, QIN Yu-lin, et al. Analysis of fatigue life for differential casing[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(11): 137-142.

adopts the alternating load of three positive and one negative. Finally, the result is judged based on the linear fatigue damage accumulated theory, Miner principle. According to the linear fatigue damage accumulated theory, Miner principle, the calculation results of the initial design scheme show that the fatigue failure occurs at the transition fillet of the housing, and the number of load cycles it can sustain is 270, which does not meet the design criterion of more than 350 times. The results are coincident with fatigue bench test and the correspondence of the failure area is good.. The differential housing is optimized by increasing the transition fillet radius of the differential housing and increasing the thickness of the housing. The optimized fatigue analysis results show that the fatigue life is increased to 417 times, which meets the design criterion of 350 times, and successfully passes the durability bench test. With comparison of simulation results and bench testing result before and after optimization, it is confirmed that this simulation analysis method can accurately predict the fatigue level of the differential housing and the analysis method is completely reliable in terms of calculation accuracy. It can be applied in the actual project development, identify and avoid risks in advance, and reduce the bench verification cost in the later stage.

KEY WORDS: differential; plastic bracing; FEA; fatigue life

差速器是减速器的重要子系统之一,其主要作 用是在直行时,均等地向两侧半轴传递动力;转弯 时,实现差速运行,保证车辆在不同工况下均能正 常行驶。

差速器壳体在工作过程中主要承受各档位下齿 轮的载荷以及载荷引起的弯矩和扭矩的联合作用。在 这些载荷的作用下,差速器壳体的薄弱部分易发生疲 劳破坏。据统计,疲劳断裂占整个构件断裂的 80%以 上^[1]。因此,为了降低差速器壳体的失效概率,减少 产品试制频次,缩短产品开发周期,防止结构发生疲 劳破坏,在差速器设计初期对其进行有效可靠的结构 疲劳寿命仿真至关重要。本文对一种差速器壳体的疲 劳寿命仿真分析方法进行了研究,并与试验现象进行 了对比。

1 差速器结构介绍

差速器总成的组成部分及结构如图1所示。为了 简化计算,提高有限元模型的收敛性,在装配结构中 省略了行星齿轮及半轴齿轮。



图 1 差速器总成结构爆炸图 Fig.1 Differential assembly structure explosion diagram

- 2 有限元分析模型介绍
- 2.1 网格划分

为了获得较准确的分析结果,差速器系统采用二

阶四面体(C3D10I)及一阶六面体(C3D8I)混合建 模。为了保证计算的精度及效率,对差速器壳体窗口 边缘、过渡圆角等应力集中程度较大的区域采用较为 细密的网格划分,而对其他位置采用较稀疏的网格划 分,并对某些小倒角进行简化处理,避免产生过小尺 寸单元^[2]。差速器总成仿真分析模型如图 2 所示。



图 2 差速器系统有限元模型 Fig.2 Finite element model of differential system

2.2 轴承模拟介绍

差速器壳体通过轴承支承与减速器壳体相连接, 考虑这一影响,对轴承进行建模模拟。主要考虑轴承 在各个方向上的刚度及径向游隙,建立的圆锥滚子轴 承模型如图 3 所示。其中,对轴承内圈和外圈进行实 体建模,并用 Connector 单元模拟滚珠。



图 3 轴承简化模型 Fig.3 Simplified bearing model

2.3 壳体模型简化

为简化计算,省略了减速器壳体的 FE 模型,通过 GUYAN 方法缩聚出支撑刚度矩阵,并将该刚度矩阵作为支撑边界条件计算差速器疲劳应力谱。缩聚计算模型如图 4 所示。



图 4 减速器壳体支撑刚度计算模型 Fig.4 Calculation model of housing support stiffness

壳体非线性支撑刚度矩阵的计算命令行如下:

*STEP, NAME=Differential Stiffness matrix extraction

*SUBSTRUCTURE GENERATE, TYPE=Z0002, OVERWRITE, RECOVERY MATRIX=YES

*RETAINED NODAL DOFS, SORTED=YES 110, 1, 6

120, 1, 6

*SUBSTRUCTURE MATRIX OUTPUT, FILE NAME=Differential_stiffness, STIFFNESS=YES

2.4 边界条件定义

差速器系统的承受载荷主要分为两种,一种是螺 栓预紧力,另一种是齿轮载荷。前一种用于固定差速 器壳体与齿圈,后一种用于模拟差速器系统的疲劳应 力谱。

差速器系统在正常行驶状态下产生疲劳破坏的 概率较低,在前进—倒退—前进工况下发生疲劳破坏 的概率较大。因此,需要重点分析在极限工况下,齿 轮在前进挡及倒挡的载荷疲劳性能。

通过 MASTA 软件计算出齿轮前进挡及倒挡的 极限扭矩下,各加载点的啮合力及差速器的半轴齿轮 力和行星齿轮力。以某款减速器为例,各加载力见表 1 和表 2。

在进行疲劳应力谱计算时,为了模拟差速器旋转 一周的疲劳应力谱,采用载荷位置变化、差速器不旋

表 1 齿轮啮合力 Tab 1 Gear meshing force

Tab.1 Ocal meshing force					
工况	扭矩/(N·m)	切向力/N	法向力/N	径向力/N	
前进	250	38 583	22 727	14 118	
倒退	210	32 423	19 098	11 864	

表 2	半轴	齿轮及行星	齿轮力
A TT 1C 1	0	1 1 /	0

Tab.2 Half shaft	gear and	planetary	gear forces	
------------------	----------	-----------	-------------	--

				Ν
位署	前进工况		倒退工况	
[丛.且.	F_x	F_y	F_{x}	F_y
行星齿轮	/	19 033	/	12 987
半轴齿轮	-27 468	/	-18 742	/

转的方法,即每间隔 18°选择 3 个齿进行啮合力加载,共计进行 40 次加载(前进工况及倒挡工况各加载 20 次),加载位置如图 5 所示。



Fig.5 Example of meshing force loading position

2.5 疲劳应力计算结果

采用 Abaqus 软件的准静态分析模块计算差速器的疲劳应力。从应力分布云图(见图 6)中可以看出, 差速器壳体的应力集中位置主要在根部圆角处。



图 6 应力分布云图 Fig.6 Cloud map of stress distribution

3 差速器壳体疲劳寿命分析

3.1 疲劳累积损伤理论

大多数旋转机构是在幅值周期性变化的载荷下工 作,其疲劳破坏是由不同频率、不同幅值的载荷造成 损伤,并经过多个循环逐渐积累的结果。因此,疲劳 累积损伤理论^[3-6]对于结构寿命的计算有重要意义^[7]。目前所提出的疲劳累积损伤理论可归为 3 类:线性疲劳 累积损伤理论^[8-10]、修正的线性疲劳累积损伤理论和 非线性疲劳累积损伤理论^[11-12]。文中采用工程中广泛 应用的线性疲劳累积损伤理论的 Miner 法则^[13-18]。

幅值相同的载荷下, n个循环造成损伤的计算公

式为:
$$D = \frac{n}{N}$$

幅值周期性变化载荷下, n个循环造成损伤的计 算公式为: $D = \sum_{i=1}^{n} n_i = \frac{n_i}{N_i}$ 。

疲劳试验机在工作中承受幅值相同的载荷,当损 伤累积大于等于1时,认为试验机的疲劳强度不满足 要求。

3.2 疲劳寿命分析方法

由于差速器总成为非完全对称结构,在工作过 程中,随着受力点的不断变化,壳体上最大应力的 分布区域和大小均在不断变化,具有典型的多轴疲 劳特征。

差速器台架试验过程中,壳体局部位置会因应力 集中而进入弹塑性应力状态。针对此问题,有两种解 决方案,一种是应用弹塑性材料进行强度计算,获得 弹塑性应力结果;另一种是在疲劳分析过程中进行弹 塑性应力修正。由于差速器壳体分析过程中工况较 多、载荷复杂,第一种方法耗时长、浪费计算资源, 故选用第二种方法进行疲劳寿命计算。第二种方法采 用 Neuber 公式,结合材料的循环应力-应变曲线方程 和应力-应变迟滞回线方程来修正线弹性应力^[19-20]。

3.3 疲劳载荷谱

为更好地模拟差速器运行的极限工况,识别差速 器实际运行中的疲劳风险,采用三正一负(三个前进 循环,一个倒退循环)载荷类型进行加载计算,具体 载荷情况如图 7 所示。



3.4 疲劳寿命分析过程

采用 FEMFAT ChannelMax 模块,将差速器材料

参数、材料表面粗糙度、影响因子等输入软件,运用 Matlab 软件编制通道矩阵,并导入软件进行疲劳计 算,通道矩阵如图 8 所示。



Fig.8 FEMFAT channel matrix

3.5 疲劳寿命分析结果

差速器壳体疲劳分析结果如图 9 所示,可以看 出,最大损伤值(0.0037)出现在差速器壳体过渡圆 角处,其可承受的载荷循环次数为 1/0.0037=270 次 (基于前文提到的"线性疲劳累积损伤理论的 Miner 法则"计算)。而差速器壳体在此载荷下设计目标为 350 次,故初步判定此设计在试验中有断裂风险,需 要进行结构优化。

差速器壳体 90%以上的损伤源于载荷换向引起 的应力幅值变化,损伤直方图如图 10 所示,其中柱 体所对应的损伤是由载荷换向引起。差速器在单个运 行工况下的应力幅值变化曲线如图 11 所示,载荷换 向时的应力幅值最大。

4 仿真试验对比及分析

经过疲劳耐久台架试验后, 差速器壳体出现断



图 9 差速器壳体疲劳寿命云图 Fig.9 Cloud diagram of fatigue life of differential housing



图 10 差速器损伤直方图 Fig.10 Differential damage histogram



图 11 应力幅值变化曲线 Fig.11 Stress amplitude curve

裂,其断裂起始位置的判定结果与前期仿真预测结果 一致,断裂面如图 12 所示。从断口形貌看,初始裂 纹产生于壳体的最大应力区域,随着循环次数的增 多,裂纹逐渐扩展,直至无法承担载荷而突然断裂。

5 改进方案及改进后试验结果

仿真及试验结果表明,差速器壳体的疲劳破坏 发生在壳体的过渡圆角处。针对此结果,采用增大 过渡圆角半径及壳体厚度对差速器壳体进行优化。 对优化后的差速器壳体进行疲劳计算,计算结果如 图 13 所示。



图 12 差速器壳体疲劳断裂面 Fig.12 Fatigue fracture surface of differential housing



图 13 优化后差速器壳体疲劳寿命云图 Fig.13 Cloud diagram of fatigue life of differential housing after optimization

优化后, 差速器壳体的疲劳寿命明显增加, 可承受 的载荷循环次数为 1/0.0024=417 次, 满足当前 350 次循 环的设计要求。疲劳耐久台架试验后, 差速器壳体未 发生断裂情况, 与仿真预测结果吻合。该分析方法能 准确预测差速器壳体疲劳寿命的设计风险, 在计算精 度方面是完全可信的, 可以运用在实际项目开发中。

6 总结

在差速器壳体的疲劳寿命分析过程中,考虑了轴 承刚度,并将减速器壳体支撑刚度作为边界条件引入 计算,解决了计算时间长、收敛困难、浪费计算资源 等问题。

文中, 仿真与试验很好地对应, 能够准确识别开 发中的试验性问题。该分析方法在精度方面是可信 的, 能够在差速器壳体设计初期进行疲劳耐久的精准 预测, 并采用适当的方法对差速器壳体的薄弱区域进 行优化; 在产品设计后期, 能够有效杜绝疲劳破坏的 发生, 提高产品的可靠性。

参考文献:

[1] 蔡泽高. 金属的疲劳断裂[J]. 上海金属(钢铁分册),

1984, 6(1): 52-64.

CAI Ze-gao. Fatigue fracture of metal[J]. Shanghai metals, 1984, 6(1): 52-64.

- [2] 秦玉林, 祝林, 汤天宝, 等. 基于 ABAQUS/FEMFAT 的同步环组件疲劳寿命分析[J]. 汽车实用技术, 2015(10): 35-37.
 QIN Yu-lin, ZHU Lin, TANG Tian-bao, et al. Analysis of fatigue life for the synchronizer rings based on ABAQUS/FEMFAT[J]. Automobile applied technology, 2015(10): 35-37.
- [3] 曾春华. 金属疲劳累积损伤理论的研究[J]. 航空材料, 1981, 9(2): 37-40.
 ZENG Chun-hua. Study on cumulative damage theory of metal fatigue[J]. Aeronautical materials, 1981, 9(2): 37-40.
- [4] 杨晓华,姚卫星,段成美.确定性疲劳累积损伤理论进展[J].中国工程科学,2003,5(4):81-87.
 YANG Xiao-hua, YAO Wei-xing, DUAN Cheng-mei. The review of ascertainable fatigue cumulative damage rule[J]. Engineering science, 2003, 5(4): 81-87.
- [5] 李荣,邱洪兴,淳庆.疲劳累积损伤规律研究综述[J]. 金陵科技学院学报,2005,21(3):17-21.
 LI Rong, QIU Hong-xing, CHUN Qing. Research review of fatigue accumulative damage rule[J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2005, 21(3): 17-21.
- [6] 匡林,杨晓华.疲劳累积损伤理论的适用性研究[J]. 科技信息(科学教研), 2007(17): 677-678.
 KUANG Lin, YANG Xiao-hua. A study on the applicability of fatigue cumulative damage theory[J]. Science & technology information, 2007(17): 677-678.
- [7] SKORUPA M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading—a literature review. part 1: Empirical trends[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 1998, 21(8): 987-1006.
- [8] 冯胜,程燕平,赵亚丽,等.线性疲劳损伤累积理论的研究[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(5):608-610. FENG Sheng, CHENG Yan-ping, ZHAO Ya-li, et al. Linear fatigue damage cumulation theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(5): 608-610.
- [9] 嵇应凤,姚卫星,夏天翔.线性疲劳累积损伤准则适用 性评估[J].力学与实践, 2015, 37(6): 674-682.
 JI Ying-feng, YAO Wei-xing, XIA Tian-xiang. An applicability assessment of linear cumulative fatigue damage rules[J]. Mechanics in engineering, 2015, 37(6): 674-682.
- [10] 刘建伟.疲劳累积损伤理论发展概述[J].山西建筑, 2008, 34(23): 76-78.
 LIU Jian-wei. Summarize theoretical development of fatigue accumulation damage[J]. Shanxi architecture, 2008, 34(23): 76-78.
- [11] 冯胜,程燕平,赵亚丽,等.非线性疲劳损伤累积理论 研究[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(12):1507-

1509.

FENG Sheng, CHENG Yan-ping, ZHAO Ya-li, et al. Unlinear fatigue damage cumulative theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(12): 1507-1509.

- [12] 王海巧, 孙青云, 陈敏, 等. 基于非线性累积损伤理论 与冲击模型的疲劳寿命预测[J]. 扬州大学学报(自然科 学版), 2020, 23(4): 27-30.
 WANG Hai-qiao, SUN Qing-yun, CHEN Min, et al. Research on fatigue life prediction based on nonlinear accumulative damage theory and shock model[J]. Journal of Yangzhou University (natural science edition), 2020, 23(4): 27-30.
- [13] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版 社, 2003.
 YAO Wei-xing. Fatigue Life Prediction of Structures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [14] 王旭亮, 聂宏. 考虑载荷加载顺序的模糊 Miner 理论研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(22): 2725-2728.
 WANG Xu-liang, NIE Hong. Study on fuzzy miner's rule considering load sequence[J]. China mechanical engineering, 2008, 19(22): 2725-2728.
- [15] 黄相又. 基于 Miner 累积损伤理论的模数式伸缩装置 疲劳寿命研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
 HUANG Xiang-you. Research on fatigue life of modular expansion joint based on miner cumulative damage theory[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [16] 夏祥春. 基于 Miner 线性累积损伤理论的摇枕疲劳寿命分析[J]. 时代农机, 2018, 45(1): 76.
 XIA Xiang-chun. Fatigue life analysis of bolsters based on Miner's linear cumulative damage theory[J]. Times agricultural machinery, 2018, 45(1): 76.
- [17] 高宏兴,高飞,张沙.用 Miner 法则计算齿轮的损伤率
 [J]. 机械工程师, 2014(7): 252-253.
 GAO Hong-xing, GAO Fei, ZHANG Sha. Calculation of gear damage rate by Miner's rule[J]. Mechanical engineer, 2014(7): 252-253.
- [18] 赵少汴. 常用累积损伤理论疲劳寿命估算精度的试验 研究[J]. 机械强度, 2000, 22(3): 206-209.
 ZHAO Shao-bian. Study on the accuracy of fatigue life predictions by the generally used damage accmulation theory[J]. Journal of mechanical strength, 2000, 22(3): 206-209.
- [19] EICHLSEDER W, UNGER B. Prediction of the fatigue life with the finite element method[C]// International Congress & Exposition. 1994.
- [20] 尚德广,王瑞杰.基于动态响应有限元模拟的点焊接 头疲劳寿命预测[J]. 机械工程学报,2005,41(5):49-53. SHANG De-guang, WANG Rui-jie. Fatigue life prediction based on dynamic response finite element simulation for spot-welded joint[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2005, 41(5): 49-53.