

某车型汽车差速器结构设计及其齿轮的性能研究

陆奕帆

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年8月4日; 录用日期: 2024年8月28日; 发布日期: 2024年9月4日

摘要

汽车在转向行驶的相同时间段内左右两侧车轮所滚过的行程通常是不一样的。在左右两个车轮行驶里程不等的情况下, 如果车辆的驱动桥使用一个一体的传动轴, 将能量传递到两个车轮上, 这个传动轴可以使车辆两侧的旋转速度相同, 但是两个车轮冲程的不同, 将导致两个车轮发生滑转或滑动, 并造成前桥和后桥的超负荷运转, 从而影响到车辆的操控稳定性。因此, 为降低差速器齿轮副的质量风险, 对汽车差速器齿轮的强度及抗振动性能进行分析是十分有必要的。本文拟采用CATIA软件对某车型汽车差速器进行结构设计, 并对差速器的行星齿轮用CAE软件进行强度分析及模态分析并做出评估。通过静力学分析可知, 行星齿轮齿顶和半轴齿轮齿根部位在长时间工作后最容易发生疲劳磨损和点蚀, 因此需在应力较大处对齿形做出调整与优化; 前6阶模态分析表明, 齿轮副在啮合工作时, 工作频率远小于固有频率, 不会发生共振现象, 满足设计要求。

关键词

差速器, 行星齿轮, 结构设计, 模态分析

Design of Differential Structure and Performance Study of Gears for a Certain Vehicle Model

Yifan Lu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 4th, 2024; accepted: Aug. 28th, 2024; published: Sep. 4th, 2024

Abstract

The amount of travel rolled by the left and right wheels during the same period of time that a vehicle

文章引用: 陆奕帆. 某车型汽车差速器结构设计及其齿轮的性能研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(5): 5107-5115.

DOI: 10.12677/mos.2024.135462

is being steered for travel is usually not the same. In the case that the left and right wheels do not travel the same mileage, if the vehicle's drive axle uses a one-piece driveshaft to transfer energy to the two wheels, this driveshaft can make both sides of the vehicle rotate at the same speed, but the difference in the strokes of the two wheels will lead to slippage or slipping of the two wheels, and cause overloading of the front and rear axles, thus affecting the handling stability of the vehicle. Therefore, in order to reduce the quality risk of the differential gear pair, it is very necessary to analyze the strength and anti-vibration performance of automotive differential gears. This paper intends to use CATIA software for the structural design of a certain model of automobile differential, and the planetary gears of the differential are analyzed and evaluated by CAE software for strength analysis and modal analysis. Through the static analysis, it can be seen that the top of the planetary gear teeth and the root of the half-axle gear teeth are most prone to fatigue wear and pitting corrosion after a long time of work, so it is necessary to make adjustments and optimization of the tooth shape in the place of higher stress; the first 6-order modal analysis shows that the gear pair in the mesh, the operating frequency is much smaller than the intrinsic frequency, and will not resonate, so it meets the design requirements.

Keywords

Differential Mechanism, Planetary Gear, Structure Design, Modal Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

差速器是汽车传动系的重要组成部分[1], 其主要由两个行星齿轮, 半轴齿轮及壳体等组成, 其主要作用是在汽车不同行驶工况下将转矩合理分配给左右车轮, 作为汽车传动系统中一个不可或缺的零件, 它可以改变万向传动装置传递过来的发动机转矩的方向, 并将转矩有效地传递给左右半轴和驱动车轮[2], 通过传动比大于 1 的齿轮啮合实现减速增扭的功能[3]。当汽车在转向行驶和在路况恶劣的条件下行驶时, 差速器可以保证左右两侧车轮以不同的速度旋转, 由此保证车轮作不发生滑动的纯滚动运动[4], 从而保证了车身的稳定性与安全性, 与此同时差速器自身要求能在猛烈的冲击环境下稳定运行。差速器的行星齿轮与半轴齿轮相比体积较小, 在承受相同载荷的情况下, 行星齿轮更易损坏[5], 因而行星齿轮必须满足一定的强度要求。为解决因汽车左右轮胎在运动学上的不一致和干涉所引起的问题, 在汽车左右驱动轮间都设置有差速器, 以降低轮胎的磨损[6], 并保证了车辆在各种工况下, 车辆的速度都是不相等的, 以满足车辆的运动特性。

目前, 国内学者并没有充分关注其在减振、防冲击等方面的应用。事实上, 汽车在运行过程中所引起的各类振动载荷, 及伴随行驶里程的增加都会严重影响动力差速效率。所以, 对其基础性能、安全性、可靠性和耐用性等方面的研究具有十分重要的意义, 而对其进行适当的力学和力学结构的优化是提升其性能的关键。因此, 随着电动汽车产业化趋势的进一步扩大, 必须对汽车差速器振动与冲击动力学的分析研发给予足够的重视。同时由于差速器传统齿轮设计中采用的设计及校核方法忽略因素较多, 误差较大, 为了能够更准确地对齿轮进行结构设计和接触应力分析, 使用先进的 CAE 工具对齿轮进行相关结构设计和强度分析显得愈加重要[7]。在此基础上, 本文采用 CATIA 软件对某车型汽车差速器进行结构设计, 并对差速器的行星齿轮用 CAE 软件进行强度分析及模态分析, 提出了当前分析中的主要问题, 为新一代车辆的防振研究提供了依据。

2. 差速器结构设计

2.1. 基本参数

本次设计的参数以小型 SUV 或者小型 MPV 为基础参数进行设计，其基本参数如下：

- 1) 发动机功率/转速：135 KW/6000 rpm；
- 2) 发动机最大扭矩/转速：275 N·m/4000 rpm；
- 3) 一档传动比：3.9；
- 4) 主传动比：4.5；
- 5) 汽车驱动方式：前置前驱 FF。

2.2. 差速器结构设计计算

普通圆锥轮式差速器因具有结构简单，工作稳定，可靠的特点，因此在一般行驶工况下，在车辆的传动轴上得到了广泛的应用。一般 ω_0 为差速器壳的角速度； ω_1 、 ω_2 是左右两个方向上的角速率； T_0 为差速器壳接受动力传递的转矩； T_r 为差速器内摩擦力矩； T_1 、 T_2 分别为左、右半轴接受动力后输出的反转矩。

根据运动分析可得：

$$\omega_1 + \omega_2 = 2\omega_0 \quad (1)$$

很明显的是，一端半轴静止不动，而另外一端半轴转动时，其转动角度为差速器外壳的两倍。在不转动的情况下，左臂和右臂分别作等速和相反方向的转动。

根据力矩平衡可得：

$$T_1 + T_2 = T_0 \quad T_2 - T_1 = T_r \quad (2)$$

差速器性能常以锁紧系数 k 来表征，定义为差速器的内摩擦力矩与差速器壳接受动力后输出的转矩之比，由此可得：

$$k = T_r / T_0 \quad (3)$$

结合力矩平衡式得：

$$T_1 = 0.5T_0(1-k) \quad T_2 = 0.5T_0(1+k) \quad (4)$$

定义半轴的转矩比为 $k_b = T_2 / T_1$ ，则 k_b 与 k 之间有：

$$k_b = (1+k)/(1-k) \quad k = (k_b - 1)/(k_b + 1) \quad (5)$$

通锥齿轮差速器的锁定因数 k 通常在 0.04~0.16 之间，两半轴扭矩比 k_b 在 1.11~1.35 之间，表明左右半轴扭矩差异较小，因此可假定左右半轴扭矩分布基本相同，此分布比率适用于在良好道路条件下行驶的车辆。在此基础上，选取锁定因数 k 为 0.1，从而得出了传动轴的扭矩比 k_b 为 1.22。

取行星齿轮齿数 $z_1 = 9$ ，半轴齿轮齿数 z_2 取为 13。 $z_2/z_1 = 1.44$ ，半轴齿数和为 26，保证啮合条件且能够正常装配，满足设计要求。图 1 为行星齿轮实体模型，图 2 为半轴齿轮实体模型。

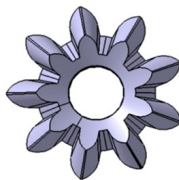


Figure 1. Planetary gear
图 1. 行星齿轮

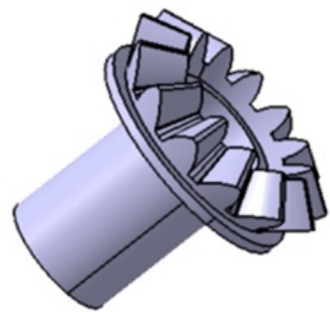


Figure 2. Half shaft gear
图 2. 半轴齿轮

2.3. 差速器材料的选择

根据在生产汽车差速器齿轮时，一般使用碳化合金属，其主要材质为 45 钢、18CrMnTi、20CrMnTi、22CrMnMo、20CrMo 等等。近年来在我国采用的新材料有 20MnVB 和 20MnTi，其优点是外表坚硬，耐磨性能较好，而心部较软，对冲击的耐受性强，韧性好。因此本次设计选择 20CrMnTi 作为差速器齿轮的材料。材料的主要力学属性见表 1。

Table 1. Main mechanical properties of 20CrMnTi
表 1. 20CrMnTi 的主要力学属性

参数名称	20CrMnTi
密度/(kg·m ⁻³)	7800
弹性模量/GPa	207
泊松比 μ	0.25
抗拉强度/MPa	885
屈服强度/MPa	980

3. 差速器齿轮静力学分析

行星齿轮作为差速器的重要组成部分，承担着发动机动力传递的关键任务，并直接影响汽车差速器的可靠性和使用寿命。工作时，行星齿轮不仅要承受来自发动机的扭矩，还需接受驱动桥的切向力、径向力和斜驱动桥的周向力。因此，在差速器设计中，对行星齿轮的刚度要求非常高。如果其刚度不足，可能导致齿轮发生弯曲变形，进而影响正常啮合，产生过大的噪音，并严重降低差速器的强度、耐磨性及寿命。传统设计和检验方法主要依赖于解析公式进行接触强度分析，而有限元分析技术的应用则为差速器齿轮的设计和分析提供了新的接触强度和动力学仿真手段，使关键部件的强度分析更加全面和准确。

3.1. 差速器齿轮有限元模型建立

将三维模型导入 ANSYS Workbench 的接触强度模块中，准备对其进行力学分析，并在在 Engineering Data 中添加设置差速器材料为 20CrMnTi，并插入补丁适形法进行划分网格，并对关键齿面单独划分，同时在细节处做出调整优化，新建加密网格并将尺寸设置为 2 mm，如图 3；节点总数为 34,741，单元总数为 19,127。

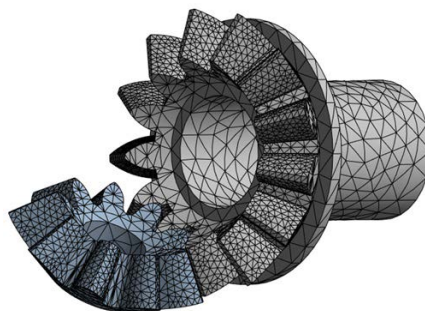


Figure 3. Finite element model of differential gear
图 3. 差速器齿轮的有限元模型

3.2. 差速器齿轮边界条件施加

网格划分完成后, 需在齿轮副之间定义接触关系, 将行星齿轮齿面设定为主动接触面, 半轴齿轮齿面设定为被动接触面, 接触类型设定为摩擦, 摩擦系数为 0.2。如图 4 所示, 设定差速器一侧行星齿轮传给半轴齿轮的最大转矩 $T = 2628.2 \text{ N}\cdot\text{m}$, 半轴齿轮左轴处施加约束, 行星齿轮转动施加主动位移输入。

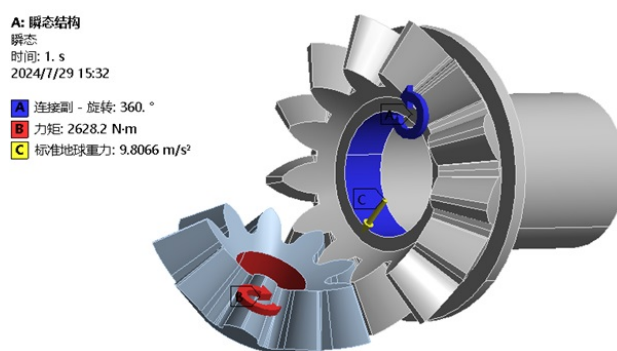
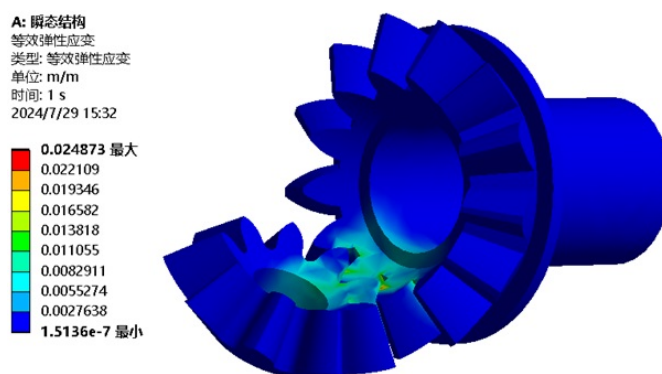


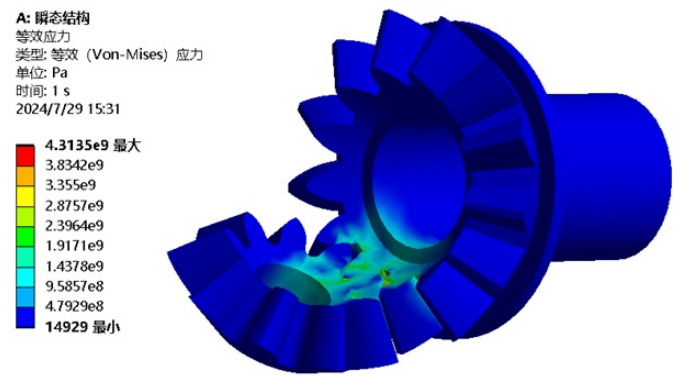
Figure 4. Boundary conditions of differential gear
图 4. 差速器齿轮边界条件

3.3. 差速器齿轮强度分析

经过有限元分析得知该齿轮的最大等效应力结果远远小于该材料的屈服极限; 因此, 齿轮安全。由图 5(a)所示, 最大应变处于轴中间的凸台部位。



(a) 差速器齿轮等效弹性应变



(b) 差速器齿轮等效应力

Figure 5. Strength analysis results of differential gears
图 5. 差速器齿轮强度分析结果

由图 5(a)和图 5(b)可知,当汽车处于直线行驶状态时,齿轮副之间不发生相对转动,行星齿轮起到一体式轴的作用,通过以上应力云图和应变云图可得,行星齿轮齿顶和半轴齿轮齿根部位在长时间工作后最容易发生疲劳磨损和点蚀,因此需在应力较大处对齿形做出调整与优化。且在转弯行驶时行星齿轮和半轴齿轮啮合降到最小,才有利于提高其自身强度,并进一步提高其耐久可靠性。

4. 差速器行星齿轮模态分析

模态分析是一种用于研究和确定结构或系统振动特性的工程技术。通过模态分析,可以识别结构在不同频率下的振动模式、自然频率以及每种频率下的振型。这些信息有助于设计师了解结构在振动环境下的行为,预测可能的共振问题,并优化设计以提高结构的稳定性和安全性。此外,模态分析还可以评估结构的阻尼特性,即在振动过程中能量的耗散情况。因此,对行星齿轮的振动进行分析,就成为了整车行驶过程中所引起的噪声、振动、噪声及噪声的一个主要方向。模态是振动系统特性的表征,通过模态分析可以得到振动系统各种振动特性,固有频率,振型等系统参数,为 NVH 研究和机械的故障诊断提供依据[8]。

4.1. 差速器齿轮边界条件施加

对行星齿轮进行模态分析的目的是求出该齿轮各阶模态的固有属性,因此只需要对其进行自由度约束,而不需要对模型进行加载。如图 6,所采用约束条件为:约束齿轮内表面所有自由度。

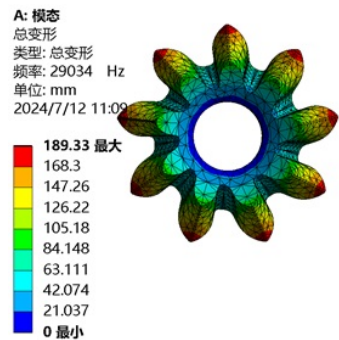


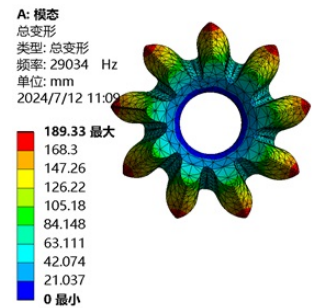
Figure 6. Constraint condition of planetary gear
图 6. 行星齿轮约束条件

4.2. 差速器行星齿轮振型分析

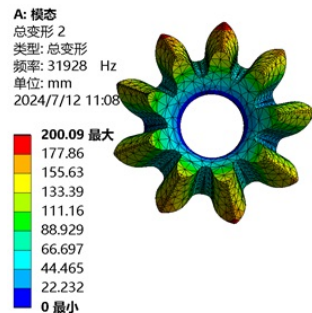
低阶模态在结构分析中占据主要作用,由于高阶振动模态对结构整体影响不大,所以在分析结果时,主要考虑行星齿轮的低阶模态频率与齿轮副频率是否会引起共振。理论上,单一零件存在无数个固有频率,且固有频率伴随模态阶数的变化而变化,因此低阶模态固有频率与工作频率的相近程度是分析考察的重点。行星齿轮前 6 阶固有属性如表 2 所示:

Table 2. Natural frequency of planetary gear
表 2. 行星齿轮固有频率

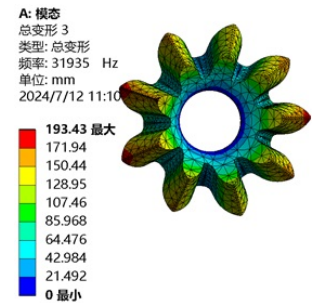
阶数	固有频率/Hz	振型描述
1	29,034	圆周振动
2	31,928	摆振
3	31,935	摆振
4	32,959	伞形振动
5	33,856	对折振动
6	33,877	对折振动



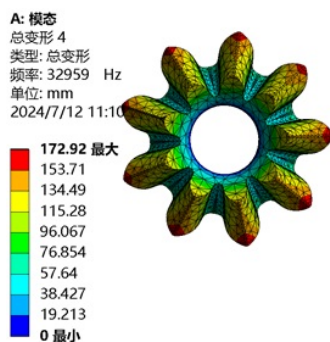
(a) 第 1 阶模态振型



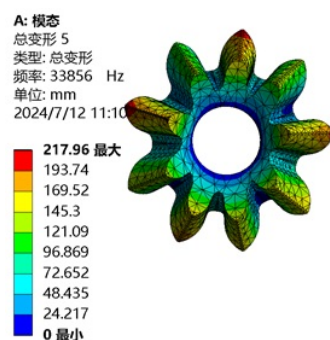
(b) 第 2 阶模态振型



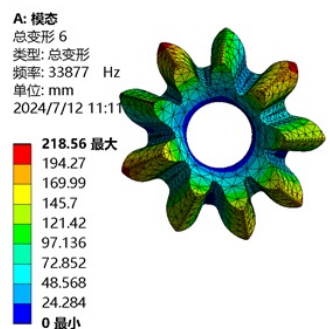
(c) 第 3 阶模态振型



(d) 第 4 阶模态振型



(e) 第 5 阶模态振型



(f) 第 6 阶模态振型

Figure 7. Vibration shape of planetary gear**图 7.** 行星齿轮振型

结果分析:

由振型图分析可得,固有频率随着阶数的增加而增大。第 1 阶为圆周振动,齿轮表现为绕轴线摆动,轴向基本无振动[9]。第 2 阶和第 3 阶为摆型振动,表现为齿轮分别绕着俩条轴线摆动。第 4 阶为伞形振动,其振型表现为伞状振动。第 5 阶和第 6 阶为对折振动,表现为相对的齿轮瓣数在端面内相互吸引和排斥。行星齿轮振型如图 7 所示。

5. 结论

以 CATIA 知识工程为基础,对锥齿轮进行结构化造型,与直接在 ANSYS 中进行造型相比,可以大大缩短三维造型的时间,同时还可以大幅提升造型效率。同时,ANSYS 可以对其进行准确的有限元建模,并可以对其进行精细的分析,从而使 CATIA 的工作更加高效,更加准确。

采用有限元法对差速器齿轮进行受力分析与传统计算相比能更直接、方便地反映齿轮啮合时受力的情况,为齿轮进一步进行提高强度计算以及抗振性能提供了依据[10]。且本齿轮设计合理,符合实际应用,满足加工要求,具有较好的经济性。

(1) 通过计算求出齿轮在正常工况下所受载荷大小,借助 ANSYS Workbench 对差速器的行星齿轮及半轴齿轮副进行静力学分析,得到齿轮的应力图及变形图[11],结合在该工况下的应力云图和变形云图,并根据所得到的数据结果进行分析,在齿轮啮合过程中,齿轮的关键啮合部分,如齿顶、齿根部,都会产生较小的应力,且齿轮表面易产生磨损、点蚀等。

(2) 模态分析表明,齿轮副在啮合工作时,工作频率远小于固有频率,不会发生共振现象[12]并由此得到了行星齿轮低阶模态的固有属性,为以后改进和提高差速器设计提供了参考[13]。

参考文献

- [1] 刘飞. 差速器的参数化设计及有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [2] 刘成. 拖拉机差速器的有限元分析与优化设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [3] 王秋平. 汽车差速器的建模与强度分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [4] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 周智慧, 龚仁春, 刘建芳, 等. 差速器行星齿轮结构优化[J]. 南方农机, 2018, 49(19): 3.
- [6] 鲁磊, 王飞, 戴之祥. 刚柔耦合条件下的差速器齿轮机构力学研究[J]. 宜春学院学报, 2021, 43(3): 55-57+99.
- [7] 王良模, 刘飞, 等. 某汽车差速器齿轮的强度分析及疲劳寿命预测[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2012, 26(11): 1-4.
- [8] 张启城. 汽车差速器的参数化设计, 有限元分析及实验[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [9] 许春停, 张冲. 高速铣削时铣削力的研究[J]. 电子机械工程, 2009, 25(1): 4.
- [10] 李维国, 李剑敏, 陈文华, 等. 差速器齿轮有限元精确建模与强度分析[J]. 机械传动, 2011, 35(12): 3.
- [11] 刘连, 谢霞. 基于 ANSYS Workbench 的差速器半轴齿轮弯曲应力分析[J]. 机械工程师, 2015(10): 3.
- [12] 樊智涛, 王亮, 陶泽南. 高强度锥齿轮差速器轮齿强度校核及模态分析[J]. 军事交通学院学报, 2019(11): 5.
- [13] 诸葛晓宇, 杨超云. 差速器锥齿轮参数化建模及模态分析[J]. 汽车零部件, 2011(11): 68-70.