

基于有限元分析的钢制轮毂结构设计与优化

熊东东 王富城 汪 康

浙江金固股份有限公司 浙江 杭州 311400

摘 要：本文探讨了基于有限元分析的钢制轮毂结构设计与优化过程，首先介绍有限元法的基本原理和常用软件，然后分析了钢制轮毂的结构组成、功能及设计要求。并详细阐述了轮毂参数化模型的建立、网格划分与边界条件设置，以及有限元分析结果的解读与应用。通过一个实例研究，展示有限元分析在钢制轮毂结构设计中的应用效果，并对分析结果进行讨论，提出优化设计建议。本研究为钢制轮毂的结构设计与优化提供有力支持。

关键词：有限元分析；钢制轮毂；结构设计；优化

1 有限元分析的基本原理与方法

1.1 有限元法的基本概念

有限元法（FiniteElementMethod，简称FEM）是一种强大的数值分析方法，广泛应用于工程和科学领域的复杂问题求解中。其核心思想是将一个连续的求解区域划分为有限个不重叠且相互连接的子区域，即“有限单元”或“有限元”，然后对每个单元选择合适的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。通过组合所有单元上的近似解，从而推导出整个求解域的解。这种方法通过将复杂问题简化为一系列简单问题的组合，极大地降低了求解难度，使得原本难以解析求解的复杂边值问题得以数值求解。

有限元法的理论基础源于变分原理和加权余量法，它不仅能够处理静态问题，还能有效应对动态、热传导、流体流动等多种物理现象。在机械设计中，有限元法常被用来分析结构的应力、应变、位移、振动模式等，为设计者提供了精确的设计验证手段。通过将连续的几何体离散化为一系列通过节点相连的单元，有限元模型能够捕捉到结构的局部细节，从而更准确地预测结构的响应。有限元法还允许在模型中考虑材料的非线性特性，如塑性变形、大变形、温度依赖性等，使得分析结果更加贴近实际。

1.2 有限元分析软件介绍

随着计算机技术的发展，有限元分析软件已成为工程设计中不可或缺的工具。这些软件集成了前处理、求解器和后处理三大模块，为用户提供了从模型建立、网格划分、边界条件设定、求解到结果可视化的一站式解决方案。一些知名的有限元分析软件包括ANSYS、Abaqus、SolidWorksSimulation（前身为COSMOSWorks）、MSCNastran等。ANSYS以其广泛的物理场模拟能力和高度的灵活性著称，适用于结构、

流体、热、电磁等多物理场的耦合分析。Abaqus则以其强大的非线性分析能力闻名，特别适合于处理复杂的材料和几何非线性问题。SolidWorksSimulation作为SolidWorksCAD软件的集成插件，提供了直观易用的界面，便于设计师在设计过程中直接进行有限元分析，实现设计与分析的无缝对接^[1]。MSCNastran则在航空航天、汽车等行业中有着深厚的应用基础，以其高效的求解能力和稳定的计算结果受到青睐。这些软件通常提供图形化的用户界面，使用户能够方便地导入几何模型、设置材料属性、划分网格、定义边界条件和载荷，以及查看和分析计算结果。

2 钢制轮毂的结构特点与设计要求

2.1 钢制轮毂的结构组成与功能

钢制轮毂作为汽车轮系中的关键部件，其结构组成与功能直接关系到车辆的安全性和行驶性能。钢制轮毂主要由轮辋、轮辐（或称轮盘）、轮缘以及连接部件组成。轮辋是轮毂的外缘部分，用于安装轮胎，并承受轮胎与地面接触产生的径向和切向力。其设计需保证足够的刚度和强度，以支撑轮胎并传递车辆的重量和行驶过程中的各种负荷。轮辋的内表面通常设计有特定的胎圈座，用于固定轮胎，确保轮胎在高速行驶时不会脱落；轮辐是连接轮辋和轮毂中心的部分，通常由多个辐条或辐板组成，形成坚固的框架结构。轮辐的主要功能是传递车轮受到的力到轮轴，同时承受因刹车、转向等动作产生的扭矩和弯矩。合理的轮辐设计不仅能提高轮毂的承载能力，还能有效减轻重量，降低能耗；轮缘是轮毂外缘的扩展部分，通常用于安装刹车系统（如刹车鼓或刹车盘）以及轮毂轴承。轮缘的设计需确保刹车系统的稳定安装和可靠运行，同时避免与轮胎产生干涉；另外，连接部件如轮毂螺栓孔和法兰盘等，用于将轮毂固定到车辆的车桥上。这些部件的设计需满足严格的公差

要求,确保轮毂与车桥的牢固连接,防止因松动或脱落导致的安全事故;钢制轮毂作为车辆与地面接触的桥梁,不仅承受着车辆的全部重量,还承受着行驶过程中产生的各种动态负荷。

2.2 钢制轮毂的设计要求

钢制轮毂的设计需满足一系列严格的要求,以确保其在使用过程中的安全性和可靠性。首先,钢制轮毂必须具有足够的强度和刚度,以承受车辆的重量、行驶过程中的动态负荷以及刹车、转向等动作产生的力。这要求在设计过程中充分考虑材料的力学性能,选择合适的钢材牌号,并合理设计轮毂的结构和尺寸。其次,钢制轮毂的设计还需考虑轻量化。随着汽车工业的快速发展,轻量化已成为提高车辆燃油经济性和环保性能的重要途径,在保证强度和刚度的基础上,钢制轮毂的设计应尽量减轻重量,减少材料的使用量,以降低车辆的能耗和排放。此外,钢制轮毂还需具备良好的耐久性和抗疲劳性能,在长期使用过程中,轮毂会受到频繁的交变负荷和振动,容易产生疲劳损伤^[2]。设计过程中需对轮毂的疲劳寿命进行预测和评估,确保其在规定的使用期限内不会发生疲劳破坏。最后,钢制轮毂的设计还需考虑其与其他部件的兼容性。例如,轮毂的尺寸和形状需与轮胎、刹车系统、轮毂轴承等部件相匹配,以确保整个轮系的协调运行。

3 基于有限元分析的钢制轮毂结构设计

3.1 轮毂参数化模型的建立

在基于有限元分析的钢制轮毂结构设计中,首先需要建立一个精确的轮毂参数化模型。建立轮毂参数化模型通常涉及以下几个关键步骤:(1)几何建模,使用三维CAD软件,如SolidWorks、Catia或UG等,根据轮毂的设计要求和尺寸规范,精确地构建轮毂的三维几何模型。这包括轮辋、轮辐、轮缘等关键部件的详细设计。(2)参数化定义,在几何建模的基础上,定义轮毂的关键参数,如轮毂直径、宽度、辐条数量、辐条截面形状和尺寸等。这些参数将被用于后续的有限元分析和优化设计过程中,以便快速调整设计。(3)材料属性设置,根据轮毂所选用的钢材牌号,设置其材料属性,包括弹性模量、泊松比、密度、屈服强度和抗拉强度等。这些属性将直接影响有限元分析的结果。(4)导出模型,将建立好的参数化模型导出为有限元分析软件能够识别的格式,如IGES、STEP或SAT等,以便进行后续的网格划分和边界条件设置。

3.2 网格划分与边界条件设置

为确保分析结果的准确性,网格划分需要遵循一定

的原则:(1)网格密度,在应力集中区域和关键部位(如轮辐与轮辋的连接处、轮缘等)采用较密的网格,以捕捉细节处的应力变化;而在应力较小的区域,可以适当采用较疏的网格,以提高分析效率。(2)网格质量,确保网格的单元形状规则、大小均匀,避免出现过大的变形或扭曲,以保证分析结果的准确性。(3)边界条件设置,根据轮毂的实际使用情况,设置合理的边界条件。例如,在轮毂的中心孔处施加固定约束,模拟轮毂与车轴的连接;在轮辋的外表面施加压力载荷,模拟轮胎与地面接触产生的压力。此外,还需要考虑刹车、转向等动态工况下的边界条件设置。完成网格划分和边界条件设置后,即可将模型提交给有限元分析软件进行求解。

3.3 有限元分析结果的解读与应用

有限元分析完成后,需要对结果进行深入解读和应用。这通常涉及以下几个步骤:(1)结果可视化。使用有限元分析软件的后处理功能,将分析结果以云图、等值线图或矢量图等形式可视化展示。这有助于直观地了解轮毂在特定工况下的应力分布、变形情况和振动特性等;(2)结果分析。根据可视化的分析结果,评估轮毂的强度和刚度是否满足设计要求。特别关注应力集中区域和最大变形位置,判断是否存在潜在的失效风险^[3];(3)优化设计。基于分析结果,对轮毂的设计进行优化。例如,通过调整辐条数量、截面形状和尺寸等参数,来改善应力分布和减轻重量。或者,通过修改边界条件来模拟更复杂的工况,以验证轮毂的适应性和可靠性;(4)验证与实验。在优化设计完成后,需要进行实验验证以确保分析结果的可靠性。这通常包括静载实验、疲劳实验和动态性能测试等。通过实验数据与分析结果的对比,可以进一步修正和优化轮毂的设计。

4 钢制轮毂有限元分析的实例研究

4.1 实例选择与背景描述

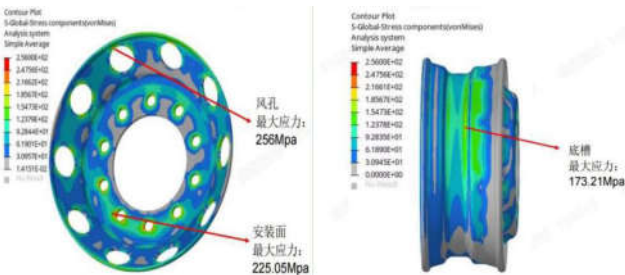
在本次实例研究中,选择一款常用于轻型商用车的钢制轮毂作为研究对象。这款轮毂设计为五辐式,采用高强度钢材制造,旨在满足车辆在复杂路况下的承载和行驶需求。随着车辆行业的发展和市场竞争的加剧,对轮毂的轻量化、高强度和耐久性的要求越来越高,通过有限元分析来评估和优化这款轮毂的结构设计显得尤为重要。背景方面,该轮毂在实际使用中可能会遇到多种工况,如高速行驶、紧急刹车、重载行驶以及通过不平整路面等。这些工况下,轮毂会受到复杂的应力和变形,可能导致疲劳损伤甚至失效。为了确保轮毂的可靠性和安全性,有必要通过有限元分析来模拟这些工况,

评估轮毂的应力和变形情况，从而指导设计优化。

4.2 有限元分析的实施过程

在实施有限元分析的过程中，遵循以下步骤：（1）几何模型建立。首先，使用三维CAD软件根据轮毂的设计图纸精确构建了其几何模型。模型包括了轮毂的所有关键部件，如轮辋、轮辐和轮缘，并确保尺寸和形状的准确性；（2）材料属性设置。根据轮毂所采用的高强度钢材的力学性能，设置相应的材料属性，包括弹性模量、泊松比、密度以及屈服强度和抗拉强度等关键参数；（3）网格划分。为了平衡分析精度和计算效率，采用了四面体单元对轮毂进行网格划分。在应力集中区域（如轮辐与轮辋的连接处）采用较密的网格，以确保这些区域的应力变化能够被准确捕捉；（4）边界条件设置。根据轮毂的实际使用情况，设置合理的边界条件。在轮毂的中心孔处施加固定约束，模拟了轮毂与车轴的连接。同时，在轮辋的外表面施加均匀分布的径向压力载荷，以模拟轮胎与地面接触产生的压力；（5）求解与后处理。将设置好的有限元模型提交给求解器进行求解。求解完成后，使用后处理软件对结果进行可视化和分析，包括应力分布、变形情况和应变能等关键指标。

4.3 分析结果与讨论



通过有限元分析，得到轮毂在特定工况下的应力和变形情况。以下是对分析结果的详细讨论：（1）应力分布，分析结果显示，轮毂不同部位存在应力差异。如图所示，图中分别呈现了底槽、风孔、安装面等关键部位的应力分布云图。可以看出，风孔处最大应力为256Mpa，安装面最大应力为225.05Mpa，而轮毂的最大应力出现在轮辐与轮辋的连接处（如图所示），这是应力集中的典型位置。底槽最大应力为173.21Mpa，这些位置的应力值并未超过材料的屈服强度，说明轮毂在该工

况下能够保持结构完整性。另外还发现轮缘处的应力相对较小，这可能是由于该区域主要承受的是轴向载荷，而非径向载荷。（2）变形情况，在施加载荷后，轮毂发生一定程度的变形。变形主要集中在轮辋的外边缘和轮辐与轮辋的连接处。然而，这些变形量均在可接受范围内，且未对轮毂的整体结构和功能产生显著影响。通过比较不同区域的变形量，可以发现轮辐的设计对于分散和传递载荷起到了重要作用，有效地减小轮毂的整体变形^[4]。（3）安全性评估，基于有限元分析的结果，对轮毂的安全性进行评估。通过检查轮毂的最大应力是否超过材料的许用应力，以及变形量是否在允许范围内，可以判断轮毂在该工况下的安全性能。分析结果显示，轮毂的最大应力远低于材料的屈服强度，且变形量也在可接受范围内，因此可以认为轮毂在该工况下是安全的。

（4）优化设计建议，虽然轮毂在当前设计下已经表现出良好的性能，但通过分析结果，仍然发现一些可以优化的方面。例如，轮辐与轮辋的连接处是应力集中的关键位置，可以通过优化连接设计（如增加过渡圆角、采用更合理的截面形状等）来进一步减小应力集中。另外，考虑到轻量化的需求，可以尝试减小轮辐的厚度或采用更轻质的材料，同时确保轮毂的强度和刚度不受影响。

结束语

综上所述，有限元分析在钢制轮毂的结构设计与优化中发挥着重要作用。通过精确的模型建立、合理的网格划分与边界条件设置，可以准确评估轮毂在特定工况下的应力和变形情况。分析结果不仅为设计优化提供有力依据，还有助于提高轮毂的安全性、耐用性和轻量化水平。

参考文献

[1]刘向刚,陈剑峰,杨越,等.复杂山地多跨单曲拱-斜柱结构设计与有限元分析[J].建筑结构,2022,52(S1):673-679.
[2]吴琼.复杂组合水池结构设计要点及变壁厚池壁有限元分析[J].特种结构,2020,37(03):7-11.
[3]赵开祖.基于有限元分析的建筑设计[J].中国建筑金属结构,2023,22(11):128-130.DOI:10.20080.
[4]戴丽薇.民用建筑设计中的基础设计[J].工程建设与设计,2023(22):16-18.DOI:10.13616.