

考虑实际工况的压杆拓扑优化

史帅杰, 林传开, 朱 宇, 刘宇超, 朱浩文

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月22日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月22日

摘 要

在一些大型的游乐设施中, 座椅的安全性一直被广泛地关注着。但是在一些安全座椅的设计中, 对于一些实际情况考虑不周, 使得乘客在乘坐的时候遇到危险, 为此文章对于安全座椅的主要零部件进行优化。方法: 首先对压杆这一模型进行静态分析、屈曲分析, 然后对实际主要零件进行强度分析, 并进行拓扑优化。

关键词

压杆, 屈曲分析, 静态分析, 强度分析

Rod Topology Optimization Considering Actual Working Conditions

Shuaijie Shi, Chuankai Lin, Yu Zhu, Yuchao Liu, Haowen Zhu

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

Received: Dec. 22nd, 2024; accepted: Jan. 15th, 2025; published: Jan. 22nd, 2025

Abstract

In some large amusement facilities, the safety of the seat has been widely concerned. However, in the design of some safety seats, the actual situation is not considered, so that passengers encounter danger when riding, for this article to optimize the main parts of the safety seat. Methods: Firstly, the static analysis and buckling analysis of the model were carried out, and then the strength analysis of the actual main parts was carried out, and the topology optimization was carried out.

Keywords

Pressure Bar, Buckling Analysis, Static Analysis, Strength Analysis



1. 引言

在极限运动、游乐设施中，安全压杆是保证游玩者人身安全的重要保障。在大型游乐设施比如过山车、大摆锤运行的过程中，为了防止由于受到较大的惯性和作用力致使乘客遇到危险，因此安全压杆成为了安全保障中必不可少的一环[1]。安全压杆主要分为胸压力肩和腿压力两种。其中，腿压力式安全压杆主要固定住了乘客的双腿，避免乘客离开座位；胸压力肩式安全压杆可以让乘客获得全方位的保护。本文中主要讨论的就是胸压力肩式安全压杆[2]。

目前最常使用的安全压杆一般使用的是由 Q345B 钢材刚性结构，将材料进行拉伸、弯曲、扭转等方式制成所需要的安全压杆。由于技术的成熟和人们对刺激的追求，一些大型的游乐设施设计的运行速度越来越大，因此对于安全压杆的要求就越来越高。针对这个问题，国外的研究者使用 ADAMS 虚拟样机和 ANSYS 有限元分析技术对大型游乐设施进行动力学和静力学仿真分析，而国内也使用 ADAMS 和 SOLIDWORKS 等仿真软件对这些大型游乐设施的某些零件进行建模和仿真并进行优化[3]。

屈曲分析主要是用于研究结构在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷，是工程计算的一种失效模式。屈曲的特征是结构杆件突然侧向变形并导致结构失稳，失稳往往是突然发生的，具有很大的危害性，因此在设计构件的阶段，屈曲分析是很重要的。拓扑优化是一种根据给定的负载情况、约束条件和性能指标，在给定的区域内对材料分布进行优化的数学方法，可以确定出最佳的结构型。针对这两种方法，本文对安全压杆的直杆进行屈曲分析和静态分析和对关键零件进行拓扑优化。

2. 直杆的屈曲分析

2.1. 静力学分析

利用 ANSYS 软件进行分析，总体上可以分为以下三步。首先，进行前处理，对结构进行建模，然后对压杆增加载荷和约束。选择合适的单元大小和材料的属性，然后通过 Design Modeler 进行建模并在 Workbench 中划分网格，并增加约束。其次，求解，根据添加的约束和力对目标模型进行求解，进行有限元分析。最后，后处理，将计算结果通过动画和图像显示出来，分析应力情况[4]。

(1) 使用 Workbench 新建静力学分析和屈曲分析，首先建立一个静态结构分析的界面，然后将屈曲分析板块拖入静态结构的求解中，使两者产生关联。

(2) 使用 Design Modeler 对直杆进行建模，长度为 1000 mm，横截面为一个边长为 30 mm 的矩形的杆件。选择显示横截面实体。

(3) 打开模型，对杆进行网格划分，分区数量设置为 50。然后对杆的底部添加简单支撑，顶部添加远程位移，使 X 方向为自由变量，Y、Z 方向进行位移约束；使 Z 方向自由旋转，X、Y 方向进行旋转约束，这样就使杆件只能在轴向方向上位移。

(4) 对杆的顶部施加一个沿 X 轴向下的力，大小为 1N，用来模拟杆所受到的压力。

(5) 对静力学分析进行求解，观察压杆在受力的时候杆件的变形情况，如图 1 所示。

2.2. 对屈曲分析进行求解

选择 5 阶模态，以总位移为结果，得到屈曲模态如图 2 所示。根据欧拉压杆公式可以计算出，在顶

端受到 1 N 的压力的时候该屈曲分析的第一阶负载系数和公式计算所得出的结果基本一致。

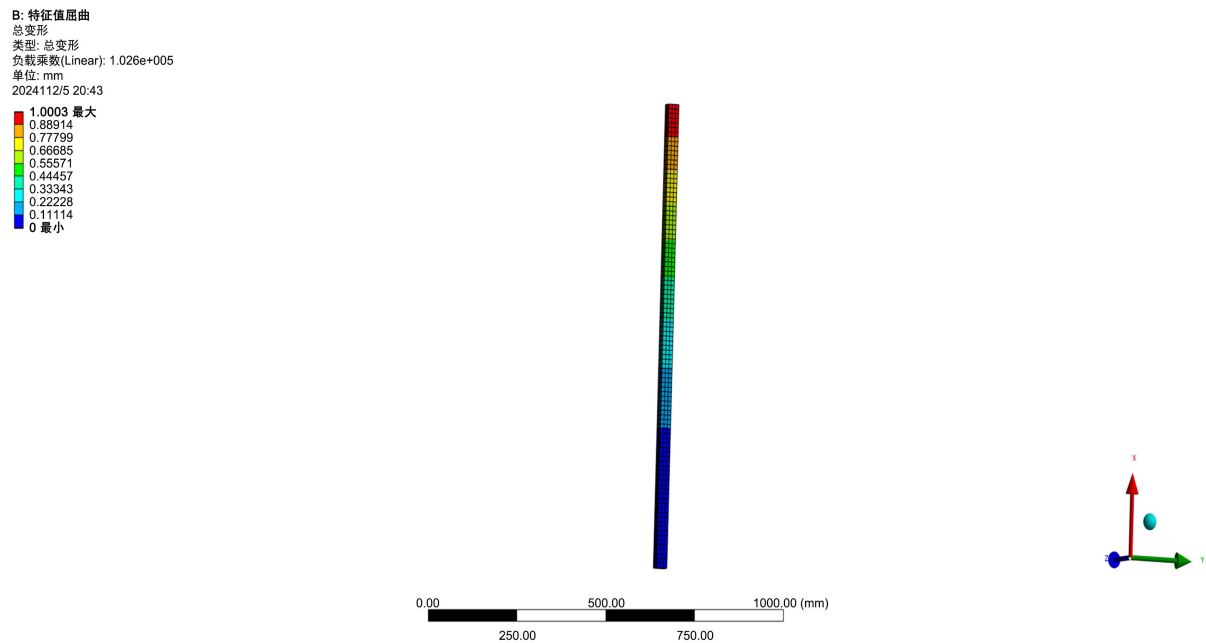


Figure 1. Deformation nephogram

图 1. 变形云图



Figure 2. Buckling mode

图 2. 屈曲模态

通过上述求解可以得出, 讨论线性屈曲的分析, 杆件两端铰支, 轴向压力为 P , 线性屈曲分析以微小弯曲变形为前提条件, 分析理想平衡状态附近的解[5]。结合边界条件和特征值屈曲分析求解可以解得轴向压力 P , 又由于失稳往往发生在第一阶解, 虽然往往有多阶的解, 因此定义临界载荷为 $P = (\pi^2 * E * I) / L^2$, 即压杆欧拉公式。从公式中可以看出, 提高结构的稳定性主要可以通过提高材料的弹性模量、增加截面的转动惯量、降低杆的长度这三个方面来进行。把这一研究结果可以适用于大型游乐设施比如过山车的杆件中, 棘爪也是安全压杆中的一个关键零件, 本质上也是压杆。接下来对安全压杆的棘爪进行分析和拓扑优化。

3. 棘爪的拓扑优化

(1) 使用 SOLIDWORKS 进行建模, 然后导入到 WORKBENCH 中, 如图 3 所示。

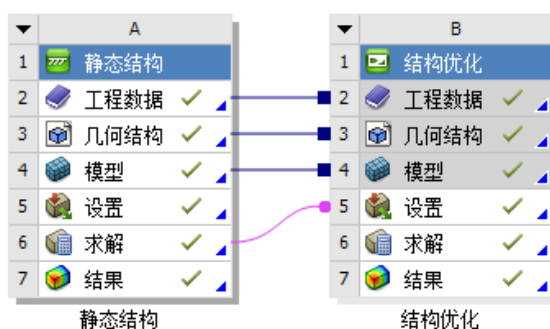


Figure 3. Flow chart

图 3. 流程图

(2) 定义材料属性为结构钢，密度为 7580 kg/m^3 ，杨氏模量为 $2\text{e}+11\text{pa}$ ，泊松比为 0.3。然后划分网格，网格划分的越小，得到的分析结果相对越准确，但计算量越大，耗费的时间越长。因为 ANSYS 程序只对单元类型编号等于 1 的单元网格进行拓扑优化，对于单元类型编号等于 2 或者大于 2 的单元网格部分不进行拓扑优化，所以在划分模型网格的时候，必需保证拓扑优化的区域的单元类型编号为 1，如图 4 所示。

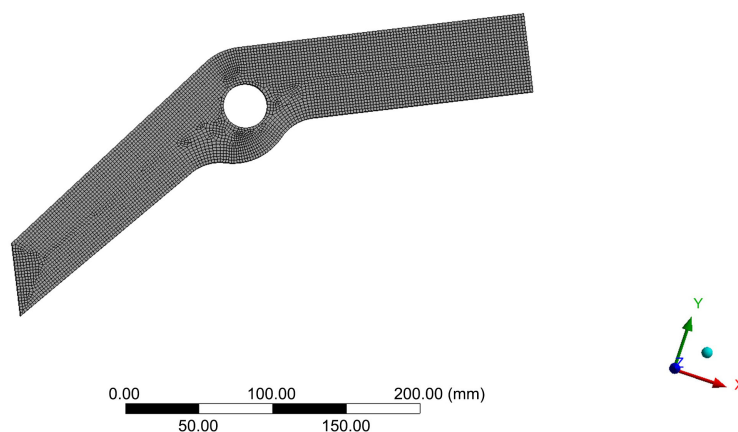


Figure 4. Grid model

图 4. 网格化模型

(3) 对该棘爪结构施加力，由图 5 可知，对最右侧施加固定约束，在最左侧施加一个往 x 轴方向的大小为 20 N 的力。

(4) 对该棘爪的静态结构进行求解。由图 6 可知，棘爪的两端和孔内受到的应力较大。可以使受到应力较大的地方减小应力，使受到应力较小的地方减小尺寸以达到轻量化、节省材料的目的。

由图可知，该压杆的本体和压杆转轴处应力较大，如果不能满足安全系数，可以调节零件的尺寸。以最小柔度为目标，体积约束 0.5，并且施加最大最小尺寸约束，最大为 15，最小为 5。该棘爪在齿端面的应力较大，因此可以适当增大受力面积；棘爪的两端所受到的应力较大，为了防止两端所受到的应力过大而使得棘爪发生断裂，应该增大棘爪两端的厚度[6]。在设计中利用 ANSYS 对结构进行拓扑优化的时候，不能兼顾到一些结构中的具体细节比如说棘爪的长度、棘爪弯折的角度等等，因此在优化设计中要照顾到结构的美观性和零件的制造工艺等，让构件的变动更能够满足需求，以达到预期的理想数值，迭代图如图 7 所示。

A: 静态结构
静态结构
时间: 1. s
2024/12/5 22:14

A: 力: 20. N
B: 固定支撑

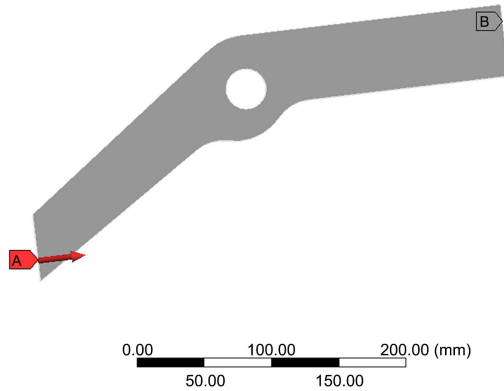


Figure 5. Static analysis condition
图 5. 静态分析工况

A: 0.0042184
0.0037497
0.0032809
0.0028122
0.0023435
0.0018748
0.0014061
0.00093741
0.00046871
0

mm
1 s
2024/12/5 22:04

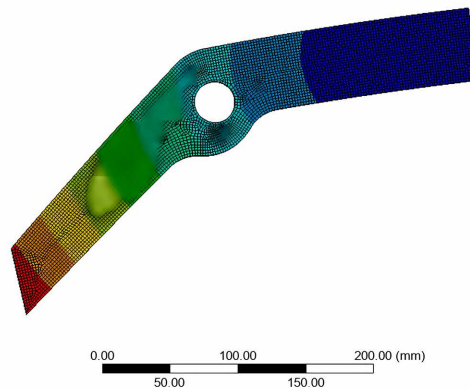


Figure 6. Displacement nephogram
图 6. 位移云图

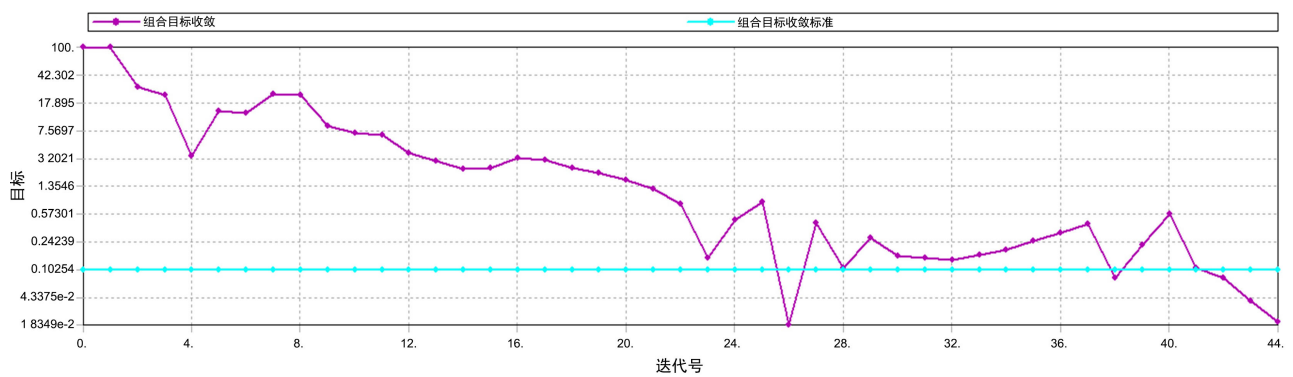


Figure 7. Iterative graph
图 7. 迭代图

ANSYS 在进行多种工况加权求和的时候, 加权关系可以用资预定定义的数组, 也可以取加权系数均

为工况总数的倒数。在拓扑优化的倒数。在拓扑优化结果的一定基础上，还可以利用 APDL 命令提取相应的构件的节距，让满足一定强度条件下的截面在尺寸优化得以完成[7]。优化结果如图 8 所示。



Figure 8. Topology optimization result
图 8. 拓扑优化结果

4. 结论

本文针对游乐设施中安全压杆设计的优化问题进行了深入研究。通过静态分析和屈曲分析，明确了压杆在受力条件下的变形和失稳行为，并利用欧拉公式得出了提高结构稳定性的方法，包括提升材料弹性模量、优化截面惯性矩及缩短杆件长度等。这些分析结果为提高压杆在实际使用中的安全性提供了理论依据。

在棘爪的研究中，通过有限元分析确定了其应力集中区域，并利用拓扑优化技术，提出了减少材料消耗、优化结构强度的设计方案，成功实现了棘爪在轻量化和安全性之间的平衡。优化后的设计不仅提高了零件的受力性能，还显著降低了生产成本。

此外，本文验证了 ANSYS 软件在拓扑优化中的重要作用，为复杂机械结构的优化设计提供了有效工具。这种方法具有显著的实际意义，可广泛应用于安全压杆等机械部件的优化设计，以满足现代机械设计对高效、经济和安全的需求。通过利用拓扑优化，在满足构件条件的基础上，确定出构件的具体尺寸，优化出构件的设计概念。现阶段无论是在什么方面，使用 ANSYS 软件的拓扑优化是一个重要的进步，具有里程碑的意义，在现代社会中在机械设计中完成合理数据的分析，达到规范设计流程，减少成本、提高美观度，是建筑设计的基础，所以 ANSYS 拓扑优化法值得大力的发展与推进。

参考文献

- [1] 陈晓林. 一种基于有限元和运动分析的安全压杆结构优化方法[J]. 大众科技, 2022, 24(4): 62-66.
- [2] 张新东. 关于游乐设施人体束缚装置的思考[J]. 中国特种设备安全, 2017, 33(5): 9-13, 18.
- [3] 燕薪全, 刘伟. 大型游乐设施乘客束缚装置安全隐患分析[J]. 劳动保护, 2022(10): 68-70.
- [4] 甘泉, 韩伟, 沈佳铭, 陈擎宇, 侯守坤, 樊帆. 基于 ANSYS Workbench 的细长压杆屈曲分析研究[J]. 石化技术, 2017, 24(1): 46-47+57.
- [5] 吕建国, 胡仁喜. ANSYS14.0 有限元分析入门与提高[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [6] Hellman (2008) A Simulation of Complete Vehicle Dynamics Using FE Code Abaqus. Lulea University of Technology.
- [7] Timoshenko, S. (1961) Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill Book Company.