

发动机排气阀执行器传动机构结构优化设计

史若华

宁波大学科学技术学院 浙江 宁波 315000

摘要: 随着汽车工业向高效节能与智能化转型,发动机全可变配气控制技术成为提升燃油经济性与减排性能的核心方向。本文针对发动机排气阀执行器传动机构(一套蜗轮蜗杆系统)展开结构优化设计研究,旨在解决现有产品在轻量化、耐高温及动态响应方面的局限性。通过ANSYS Workbench 2024 R1对聚丙烯(PP)、尼龙6(PA6)等候选材料进行静力学仿真,分析其在 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 扭矩、 $-40\sim 100^\circ\text{C}$ 工况下的应力分布与形变特性。进一步采用拓扑优化方法对蜗轮进行减重设计,结合正交试验筛选最优参数组合,最终实现传动机构结构优化的目标,满足设计要求。研究为汽车精密传动系统的轻量化与耐久性提升提供了理论依据与参考。

关键词: 蜗轮蜗杆传动机构;材料优化;结构优化;有限元分析;正交试验

1 引言

汽车发动机排气阀执行器传动是汽车发动机中的一套重要构件。其最为核心的结构是一套蜗轮蜗杆传动机构,这套机构可以精确的参数化调节气门的开合,实现对废气的排放的精确控制,它的性能可以直接影响发动机的运行效率和排放废气的水平。

本文研究某发动机排气阀执行器传动机构中的一套蜗轮蜗杆系统。原设计在结构上使用了整个齿面的整体化设计,导致蜗轮原结构自重较大,使其在传动过程中产生较大的机械负荷并会加大接触面的法向力,造成滚动摩擦损耗成比例上升最终导致传动效率降低 $5\%\sim 10\%$ 。并且,这种设计还会导致转动惯量显著上升、动态响应时间增加从而造成能源消耗增加,其中蜗轮现行设计需增加 8% 的功率才能维持相同输出,这些设计上的问题会影响整个系统的各项性能指标。

本文主要围绕两大核心方向展开:一是斜齿轮结构改进,二是材料性能优化。通过ANSYS软件构建有限元模型,进行以拓扑优化为基础的结构减重设计,之后再进行材料特性仿真对比实验,通过多水平多因素正交实验法,探究结构、材料对应力和形变等关键参数的影响,最后根据要求得出相应的蜗轮蜗杆结构,使其具备更轻的重量、更小的摩擦力等特性。这些工作为实际生产提供了理论依据,能有效减低蜗轮蜗杆系统的开发周期。

2 有限元模型的建立与结构拓扑优化

2.1 工况环境性

本蜗轮蜗杆系统的设计防护等级为IP67,响应时间 450ms ,在传动系统中受到最小转矩为 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$,适用于中低速控制场景,蜗轮为平放于端盖内,因此只有单面开深设计。蜗轮蜗杆传动比为 $1:62$,模数为 2 。其作为

汽车发动机排气阀的执行器结构,无需在高温废气环境中工作,因此只要符合 $-40^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$ 温度即可,在本文中统一采取室温 22°C 的工况环境进行分析。

2.2 材料模型的建立

本文使用两种材料:聚丙烯(PP)和尼龙6(PA6)进行不同结构下的对比分析,从而得出最优的材料与结构。塑料材料在轻量化、降噪和低成本制造方面展现出独特优势,逐渐成为替代传统金属材料的新兴选择^[1]。工程塑料因其优异的自润滑性、耐磨性和减震性能,被广泛应用于汽车传动系统。

聚丙烯(PP)在汽车排气阀执行器齿轮传动系统中展现出显著的成本优势与耐化学腐蚀性,其低密度($0.9\text{g}/\text{cm}^3$)和吸湿稳定性为轻量化设计提供了潜在空间。当前可行性研究指出,PP仅适用于非关键、间歇工作的低负载场景^[2]。

尼龙6(PA6)材料在汽车排气阀齿轮传动执行器($0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 扭矩工况)中展现出显著优势。PA6凭借其高拉伸强度(可达 160MPa)和耐磨性(摩擦系数 $0.1\sim 0.3$),能够有效应对动态载荷下的机械应力,而其自润滑特性可降低传动噪声^[3]。

2.3 有限元模型的建立

某汽车发动机排气阀执行器传动机构的核心使用一套蜗轮蜗杆系统,材料为PP,现有三维模型,其中蜗轮为轮面单面设计。首先使用ANSYS软件的静态结构和结构优化模块,针对斜齿轮齿面进行结构优化,该步骤使用PP材料进行,工况环境中最小许用力矩 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 、作用时间设定为 450ms ,选择模型中需要进行分析的区域设置网格大小为 0.001m ,安全平面为齿平面向下 4mm ,否则会切穿 4.5mm 的齿面,网格图如图所示,其中棕色部分为

优化区域。

2.4 静态结构分析

进行静力结构分析求解，得出总形变和等效应力，分析在静力载荷或优化后的变形情况，分析变形的分布和大小，判断结构的变形在允许范围内。结果解算最大变形为0.8849mm，其结果在允许范围内。查看结构的应力分布情况，静态结构分析得到的等效应力范围为1.163e8--1.744e8，蜗轮蜗杆传动结构中的应力分布与力学理论中的应力分布规律一致。等效应力在蜗杆与蜗轮的接触面，即齿面上呈现集中趋势。

2.5 结构优化

以静态结构分析的结果为基础进行结构优化。本文根据“质量-应力比”的参数以及优化后的质量保留百分比两个参数作为结构优化的基本依据。（1）质量=5：1，质量保留百分比为60%，（2）质量=2：1，质量保留百分比为50%，（3）质量=1：2，质量保留百分比为40%。上述参数的设置直接影响优化过程的效率和结果的准确性^[4]。

通过更改上述响应类型与质量占比，可以得出多种不同结果，如图所示为优化后的三个模型。

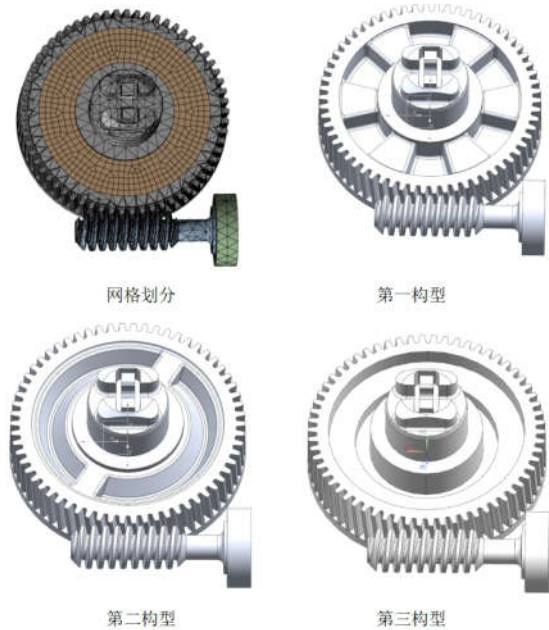


图1

3 执行器传动机构的材料—结构优化

3.1 瞬态结构

在对于本课题的蜗轮蜗杆系统中进行后处理分析时，本文选择使用ANSYS软件中的瞬态结构模块进行仿真。由于这套蜗轮蜗杆系统中的动态特性和实际功效较为复杂，而瞬态结构又能够分析这种由周期性载荷带来的动态特性和冲击载荷。除此之外，瞬态分析模块可以

更加真实地模拟动态行为，包括滑动摩擦与接触应力等其他一些可以导致局部应力集中的问题^[5]。

进入瞬态结构模块后，设置摩擦系数为塑料材料间理论的摩擦系数0.2，具体网格划分为蜗轮0.005m，对蜗杆划分为0.001m，设置步骤的时间为450ms

3.2 正交试验

依据瞬态结构仿真分析过程，选择合适的物理量，设计正交试验。设计正交试验的目的是探索在预设工况下，影响蜗轮蜗杆传动机构性能的多种结构参数和材料参数的最优组合，从而找到最优的结构材料，以达到优化整体结构的目的。

本文材料选择PP和PA6两种，力矩设置为0.8N·m和1.6N·m两种，结构采用前文第2部分的三种构型。

3.2.1 正交实验设计

本文将力矩（2水平）、两种材料（2水平）作为因素，三种结构（3水平）作为水平数，设计正交试验优化参数组合^[6]。

因素与水平定义如下表1所示：

表1 因素与水平定义表

因素	符号	水平1	水平2	水平3
输入力矩	A	低	高	\
蜗杆材料	B	PP	PA6	\
蜗杆结构	C	构型1	构型2	构型3

表格说明如下：

因素：A：力矩、B：材料、C：结构。

水平：力矩设置为2水平，材料设置为2水平，结构设置为3水平。

正交表选择：L12（2²×3¹），一共12组实验，覆盖所有主效应。

实验矩阵设计如下表2所示：

表2 实验矩阵表

实验组	A（力矩）	B（材料）	C（结构）	输出指标
1	低（0.8N·m）	PP	构型1	总变形
2	低（0.8N·m）	PP	构型3	
3	低（0.8N·m）	PP	构型2	
4	高（1.6N·m）	PP	构型1	
5	高（1.6N·m）	PP	构型3	
6	高（1.6N·m）	PP	构型2	
7	低（0.8N·m）	PA6	构型1	
8	低（0.8N·m）	PA6	构型2	
9	高（1.6N·m）	PA6	构型3	
10	高（1.6N·m）	PA6	构型1	
11	高（1.6N·m）	PA6	构型2	
12	低（0.8N·m）	PA6	构型3	

3.2.2 仿真结果及数据整理

经过12次仿真,得到的所有结果如下表3所示:

表3 变形结果表

实验组	最大变形量 (m)	最小变形量 (m)
1	0.00015614	1.4167e-12
2	0.0035548	2.5817e-8
3	0.0022143	1.7882e-10
4	0.00030849	4.7114e-12
5	0.0071073	5.0855e-8
6	0.0044486	3.9699e-10
7	0.00020457	1.5999e-12
8	0.0026192	2.3348e-10
9	0.0093951	5.8331e-8
10	0.00040208	6.5672e-12
11	0.0052336	4.8075e-10
12	0.0046986	2.9321e-8

4 结果分析

通过以上12次的仿真分析,得出正交试验的最终结果。

(1) 构型一在所有测试的构型中表现出最优的性能。无论是面对 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 转矩,还是 $1.6\text{N}\cdot\text{m}$ 转矩,构型一都能展现出最小的变形量,这表明其结构设计在应对不同工况时具有卓越的稳定性和可靠性。

(2) PP材料在所有测试的材料中表现最为出色。无论是在构型一、构型二还是构型三中,使用PP材料的传动机构在相同工况下产生的变形量都小于使用PA6(尼龙6)材料的构型。这表明在本文以条件下PP材料在减轻重量、降低成本的同时,还能保持优异的机械性能。

结语

综合以上分析,可以明确地得出结论:在本文预设前提下,优化后的发动机排气阀执行器传动机构中,采用构型一并结合PP材料是最佳选择,这种构型成功减少优化区域50%的重量,综合减少斜齿轮21.7%体积,有效的在力学性能上满足了发动机对传动机构的要求,而且在材料成本和加工难度上也具有明显优势。

参考文献

- [1]赵葵,刘海岷,雷海胜,等.基于ANSYSWorkbench的蜗杆斜齿轮静力学仿真[J].武汉工业学院学报,2012,31(1):28-31.DOI:10.3969/j.issn.1009-4881.2012.01.007
- [2]胡成,杨豪.薄壁低密度PP材料的开发与应用研究[J].汽车实用技术,2019,(18):208-210.DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2019.18.071.
- [3]王刚,金智康,宋俊杰,等.复合涂层对玻璃纤维增强尼龙6复合材料界面性能的影响[J].复合材料学报,2023,40(12):6668-6680.DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20230330.002.
- [4]田静.一种基于ANSYS的齿轮齿面接触强度分析与结构优化[J].中国设备工程,2018,(16):44-46.
- [5]马玉娟,吉卫喜,宋丽娟,等.基于ANSYSWorkbench的ZC1型蜗杆副瞬态动力学分析[J].组合机床与自动化加工技术,2018,(03):114-117+120.DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2018.03.031.
- [6]陈文强,梁发周,冷文杰,等.基于正交试验的汽车发动机罩冲压工艺的模拟分析及优化[J].锻压技术,2025,50(02):46-52.DOI:10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.007.