

基于 NVH 的齿轮修形技术

张 昆

贵州航天凯星智能传动有限公司 贵州 563000

【摘要】：齿轮传动误差作为系统振动与啸叫噪声的主要内部激励源，直接决定了齿轮副啮合过程中的冲击与速度波动程度。本文以降低传动误差为目标，阐述了通过遗传算法对齿向斜度、齿向鼓形、渐开线斜度、渐开线鼓形 4 个参数进行修形。分析表明，通过合理对齿轮参数进行修形，可极大程度上提高齿轮传动精度，较小系统噪音。可有效平缓传动误差曲线中的突变成分，从根源上减小啮合冲击与辐射噪声。结合分析软件的动态仿真验证了低传动误差设计与噪声抑制之间的正相关性，为低噪声齿轮传动系统的主动设计提供了关键理论依据与工程实现路径。

【关键词】：齿轮箱；NVH；微观修形；传动精度

DOI:10.12417/3083-5526.25.08.032

1 引言

齿轮箱传动系统模型及行星齿轮传动简图如图所示，该系统直行工况由电机驱动，经斜齿轮组减速传递至齿圈，通过行星架输出动力，转向工况时，转向电机启动，将动力转递至左右汇流排和太阳轮，此时，转向功率与直行功率汇流，左右行星架输出转速差，实现车辆转向。

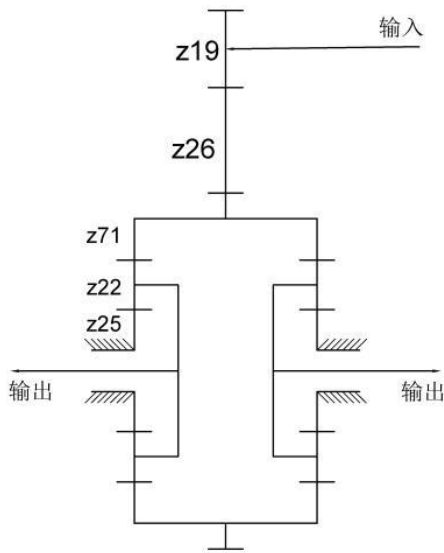


图 1 行星齿轮传动简图

在高转速下，齿轮箱传动误差易引发剧烈振动与异常噪声，若未及时识别和处理，可能导致齿轮、轴承等关键零部件异常磨损或疲劳断裂。当前基于中低速工况的齿轮设计方法难以适配高速电传动系统的动态特性，本文基于齿轮箱仿真分析软件，以齿面微观修形技术作为核心降噪手段，结合遗传算法优化修形参数，实现降噪效果与安全性能的协同提升^[1]。从根源上削弱噪声激励源，提升高速行星传动系统运行稳定性。

2 系统模型搭建

导入行星传动系统模型，在建立输入轴、中间轴行星架轴以及齿圈轴后，依据齿轮参数选择各轴间中心距，选择合适轴

承安装在轴颈，完成整个行星轮系轴部分建模。即完成整个传动系统轴部分搭建。

齿轮的创建需要先创建概念齿轮模型，在验证传动的可行性后再转换为相信齿轮模型。齿轮的创建需要定义齿数、模数、压力角、齿宽等基本参数。行星轮系传动系统模型如图 2 所示。

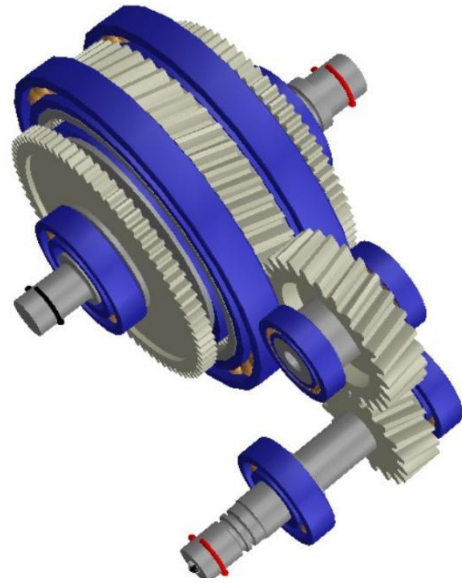


图 2 行星传动系统模型

3 传动误差

3.1 传动误差理论

实际工程中，齿轮在材料设计、制造和安装过程中存在不可避免的人为误差，齿轮齿面不能完全贴合传动，并且在啮合过程中因受到外力载荷也会产生一定的刚度形变，这就是传动误差^[1]。

传动误差范围决定了齿轮的稳定性，若传动误差过大则整个系统将会表现出明显振动，从而导致工作效率降低。这种情况可能降低齿轮系统的综合性能和生命周期，也会在齿轮运转过程中使得齿轮接触状态不稳定，加速齿面的磨损，同时，磨

损还会进一步增大误差波动，形成不良螺旋效应。除了影响齿轮的生命周期，较大的误差波动还会增大齿轮传动中产生的啸叫噪声^[2]。

如图3所示。传动误差 TE 的计算可以用啮合线方向的线位移误差表示。理想情况下，传动误差 TE=0。计算原理如式(6)：

$$TE = r_{b2}(\theta_2' - \theta_1 / i) = r_{b2}\theta_2' - r_{b1}\theta_1 \quad (6)$$

式中， θ_1 为主动轮的理论转动角， θ_2' 为从动轮的实际转动角， r_{b1} 、 r_{b2} 为主从动轮的基圆半径， i 为传动比。

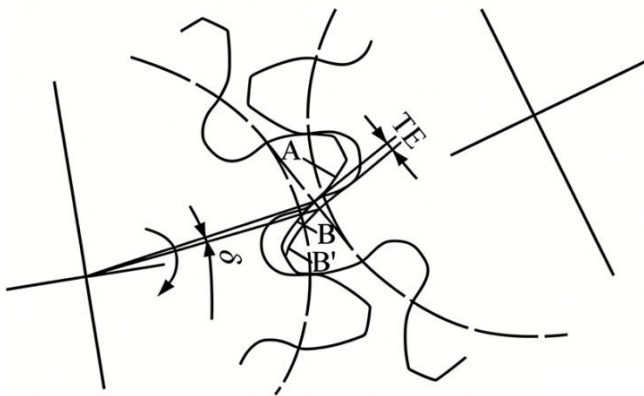


图3 传动误差

3.2 传递误差分析

基于传递误差理论，对该系统中传递误差进行分析。如图1所示，该系统中主要有5根轴、14对齿轮副，在齿轮箱分析软件中依次搭建轴、齿轮模型，并添加轴承、约束等边界条件，输入轴扭矩设定为180N.m，输入功率为70Kw。运行功率流分析可得到各齿轮副传动误差结果如下表1所示。

表1 各齿轮副的传动误差

序号	齿轮副	传动误差	齿轮副	传动误差
1	Z19Z26	3.56	右 Z71Z22-3	2.09
2	Z26Z54	2.56	左 Z25Z22-1	2.72
3	右 Z25Z22-1	2.53	左 Z25Z22-2	2.31
4	右 Z25Z22-2	2.33	左 Z25Z22-3	2.55
5	右 Z25Z22-3	2.3	左 Z71Z22-1	2.47
6	右 Z71Z22-1	2.28	左 Z71Z22-2	1.97
7	右 Z71Z22-2	2.1	左 Z71Z22-3	2.28

为了能够保证传递的平稳性，应使沿着啮合线位移的变化

量尽可能小（即差值越小），根据经验传动误差差值应控制在1 μ m以内为最佳。

4 基于遗传算法的齿轮修形

4.1 遗传算法

高转速齿轮箱齿面微观修形涉及齿向斜度、齿向鼓形、渐开线斜度、渐开线鼓形、齿顶修缘等多个参数，各参数相互影响、相互制约，仅通过理论计算或经验难以获得最优修形参数，无法实现降噪效果与安全性能的协同提升。遗传算法模拟生物进化规律，可通过优化迭代，高效搜寻最优参数组合。

遗传算法先通过编码将问题解表示为染色体（个体），初始化种群并计算适应度（衡量个体优劣与繁殖能力）。随后迭代繁殖：选择运算保留优良个体淘汰劣质个体；交叉运算重组部分基因以增强搜索能力；变异运算随机改变个别基因，维持种群多样性、防止过早收敛。多次迭代后，达到接近最优解或最大迭代次数时终止，输出最佳方案。

4.2 修形参数及结果

本文以行星齿轮传动系统作为研究对象，结合高转速齿轮箱降噪要求，选取齿向斜度、齿向鼓形、渐开线斜度、渐开线鼓形4个参数作为优化变量，确定各参数优化范围，如表2所示；以齿轮副传动误差最小为核心优化目标，同时兼顾齿轮接触强度提升，确保降噪效果的同时，减少齿轮故障发生概率，保障齿轮箱安全运行^[3]。

表2 参数优化范围表

齿轮修形参数	参数修形范围 (μ m)
齿向斜度	-20~20
齿向鼓形	0~30
渐开线斜度	-20~20
渐开线鼓形	0~40

设定初始种群数为100，软件根据种群的数量及种群适应程度自动评估种群突变概率为0.3，交叉概率为0.2，经历多次种群迭代，直至满足收敛条件时输出最优修形结果，修形后的各齿轮修形参数如表3所示。

表3 遗传算法修形结果

齿轮	齿向斜度 / μ m	齿向鼓形 / μ m	渐开线斜度 / μ m	渐开线鼓形 / μ m
斜 z19	-0.41	0.96	19.61	9.96
斜 z26	8.97	23.54	-5.40	15.31

斜 z54	0.58	15.86	-12.42	20.97	z26z54	2.56	1.37	46.5%
z18L	-6.39	16.67	-14.14	1.41	右 Z71Z22-1	2.28	0.83	63.6%
z29L	9.81	28.48	13.44	3.76	右 Z71Z22-2	2.1	0.87	58.6%
z75L	-2.15	5.90	12.36	34.35	右 Z71Z22-3	2.09	0.86	58.9%
z23R	5.69	7.05	12.65	35.76	左 Z25Z22-1	2.72	2.56	5.9%
z35R	2.59	12.42	14.74	37.91	左 Z25Z22-2	2.55	2.54	0.4%
z18R	-8.22	6.13	-5.77	4.49	左 Z71Z22-1	2.47	0.16	93.5%
z24R	13.40	19.09	1.72	21.81	左 Z71Z22-2	1.97	0.17	91.4%
z29R	1.29	2.74	-18.51	24.03	左 Z71Z22-3	2.28	0.16	92.9%
z75R	9.27	5.88	-4.16	37.51				
Z25R	6.91	4.52	-14.53	19.40				
Z22R	-4.66	18.74	-17.82	9.28				
Z71R	-17.98	27.20	-8.82	11.46				
Z25L	15.98	12.65	5.34	19.17				
Z22L	-11.90	10.31	-6.68	5.78				
Z71L	13.34	20.98	-8.09	7.53				

5 修形结果对比

将遗传算法优化之后的修形数据应用到模型，在相同工况下，再次进行动力学仿真分析，通过对比修形前后的各项结果，发现各齿轮副间传动误差均有减小。修形前后各齿轮副传动误差对比如表 4 所示。

表 4 修形前后传动误差对比

齿轮副	修形前传动误差	修形后传动误差	变化幅值
z19z26	3.56	1.08	69.7%

参考文献:

- [1] 潘显琦. 基于 Romax 的新能源电动汽车减速器齿轮修形仿真研究[J]. 装备制造技术, 2025, No.364(04): 37-41.
- [2] 杨欣荣. 高速齿轮修形技术在大功率新型高速齿轮箱上的应用[J]. 机械制造与自动化, 2005, (03): 44-47.
- [3] 张强,王君,杨超,等. 变速器齿轮修形对齿轮啸叫的影响研究[J]. 时代汽车, 2017, No.290(22): 93-94+97.

由表 4 可知，通过遗传算法，得到各齿轮修形量，然后对齿轮进行修形，修形后齿轮副之间的传动误差有不同程度地降低，最高可降低 93.5%，证明修形方法的有效性。

综上，齿面微观修形通过优化齿面啮合状态，在降低传动误差的同时，提高了传动精度与平稳性，为齿轮系统的减振降噪与可靠性提升提供了有效途径。

6 结论

本文研究以降低齿轮间传动误差、抑制行星齿轮传动系统噪音为目标，采用遗传算法和齿轮分析软件修形优化的方法。

首先，在齿轮分析软件中搭建行星齿轮传动系统模型，把齿廓修形量、齿向修形量及修形长度作为修形变量，以传动误差为优化目标。然后，采用遗传算法进行全局寻优，通过选择、交叉与变异操作迭代搜索最优齿轮修形参数。优化结果表明，齿轮箱在修形后齿轮副之间的传动误差均有不同程度的降低，最高可达 93.5%，显著降低传动误差。

该方法通过分析传动误差并进行齿轮微观修形优化，能有效降低 NVH 水平。为低噪声齿轮传动系统的主动设计提供了一种高效、可靠的技术路径。