

汽车零部件机电产品齿轮传动噪声优化设计研究

王容华 郑小燕 李志明

浙江长江汽车电子有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：齿轮传动系统是汽车常用机电部件，噪声问题影响其性能与舒适性，本文研究汽车零部件机电产品中齿轮传动系统噪声来源，提出优化设计方法，分析齿轮齿形、齿面润滑、传动比等因素，设计不同工作条件下的齿轮系统，合理调整齿轮参数、精细化表面处理可降低传动噪声，提升系统稳定性与可靠性。优化后的齿轮传动系统能减少能源损失，提升整车性能，本研究为齿轮噪声优化设计提供理论依据和工程指导，具备实际应用价值。

【关键词】：齿轮传动；噪声优化；机电产品；汽车零部件；设计优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.062

引言

齿轮传动系统是汽车关键动力传递组件，应用于动力总成、变速器等部件，齿轮啮合时的摩擦、冲击及振动，使传动噪声成为汽车工程亟待解决的问题，噪声影响驾驶舒适性，还会损害汽车零部件长期稳定性与可靠性。探索齿轮传动噪声优化设计，是提升汽车性能、解决汽车噪声问题的关键，分析齿轮传动系统噪声源，结合先进优化设计理论，可有效抑制传动噪声，为汽车工业发展提供更高效、更安静的解决方案。

1 齿轮传动噪声产生的主要因素分析

齿轮传动噪声是汽车常见机电系统问题，成因集中在齿轮啮合过程的各种因素，齿轮啮合阶段，齿面间持续接触与分离，形成冲击和摩擦，这类力学表现直接作用于噪声生成，齿轮几何形状、接触面质量关联噪声产生，齿轮齿形误差、齿距不均、齿面粗糙度等，会让啮合过程形成周期性冲击力^[1]。例如，当齿形误差达到 $\pm 10\mu\text{m}$ 时，啮合冲击可导致噪声增加约5~8dB(A)；而齿面粗糙度Ra值从 $0.8\mu\text{m}$ 降低至 $0.2\mu\text{m}$ ，可使噪声降低约3~5dB(A)。不规则作用力提升传动摩擦，同时引发振动，最终产生噪声，齿轮材料选用、加工工艺，对噪声水平同样有显著作用，不同材质齿轮啮合时，摩擦特性、耐磨性存在差异，进而影响噪声强度，齿轮负载、转速、润滑状态等工作条件，均会大幅影响噪声表现，探究齿轮传动噪声的产生机理，是有效降低噪声的根本前提。

齿轮啮合噪声的生成，与传动动态特性紧密关联，齿轮啮合过程中，齿面接触面并非完全平滑，啮合点会出现弹性与塑性变形，齿面接触的不均匀性，造成啮合力分布失衡，既提升局部接触应力，又会诱发振动，振动出现的同时，噪声也会随之传播，高速、高负荷工况下，噪声表现会更为突出。齿轮系统动力学特性、齿轮质量分布、齿面接触状态，均直接影响噪声的强度与频率特性，齿轮传动系统在高速运转时，共振现象会进一步放大噪声，齿轮固有频率与啮合频率相近时，系统噪声会明显升高，齿轮负载分布变化、啮合间隙改变，也会造成噪声波动，这类变化的出现，可能源于外部负载变动、润滑不

足或是齿轮磨损。

润滑条件对齿轮噪声有决定性影响。润滑不足会直接增加齿面接触压力与摩擦力，引发强烈振动和噪声。润滑油的粘度、油膜厚度及油品质量直接影响摩擦系数和系统稳定性。如采用高粘度指数(VI>150)的合成润滑油，相较于普通矿物油，可在高温工况下使齿轮噪声降低约4~7dB(A)。图1展示了不同润滑油粘度下齿轮噪声随转速的变化曲线，可见粘度适中的润滑油在宽转速范围内均能维持较低噪声水平。正常润滑条件下，油膜能有效减少齿面摩擦与磨损，缓解齿轮啮合过程中产生的噪声，当润滑系统失效、润滑油性能下降时，齿轮运转产生的噪声便会明显加剧，探究并针对性改善齿轮的润滑条件，是降低齿轮噪声的关键环节。

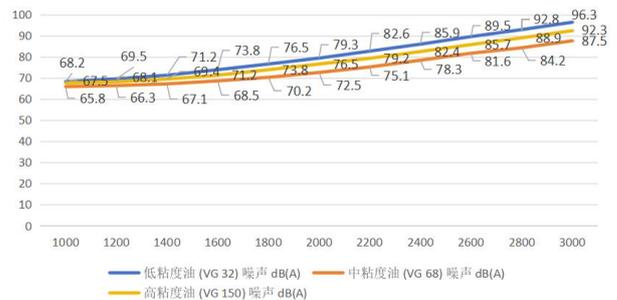


图 1 不同润滑油粘度下齿轮噪声-转速特性曲线数据图

2 机电产品齿轮传动系统的噪声优化方法

优化机电产品齿轮传动系统噪声，需关注齿轮设计与制造精度，齿轮几何形状直接影响啮合过程的噪声产生，优化齿形和齿距是噪声控制的关键措施，精准计算齿形误差，保障齿轮啮合平稳过渡，减少齿面不规则接触，减小啮合冲击力，运用精细加工工艺，改善齿面光滑度，减少摩擦与噪声的传播^[2]。采用磨齿或珩齿工艺可将齿面粗糙度控制在 $Ra0.4\mu\text{m}$ 以下，相较于传统滚齿工艺($Ra1.6\mu\text{m}$)，能够将传动噪声降低约4~6dB(A)。设计阶段考量齿轮材料选择，选用高强度、低摩擦系数的材料，保障齿轮强度，降低啮合时的摩擦阻力，抑制噪声生成，齿轮传动比与工作条件的优化，能在一定程度上降低

噪声水平，负荷较大或转速较高的工作环境中，合理设计可平衡传动效率与噪声控制的矛盾。

机电产品齿轮传动系统噪声优化中，齿轮润滑系统发挥关键作用，齿面润滑可有效减少齿面间的摩擦作用，同时形成柔性缓冲效果，减轻齿面接触瞬间产生的冲击力，优化润滑方案，选取并匹配适配的润滑油型号与对应的润滑方式，能显著降低齿轮啮合时的噪声水平，润滑油的粘度参数与油膜形成的厚度，直接影响齿面间的摩擦力大小和运转温度，油膜过薄易引发润滑不充分问题，加剧齿面摩擦与磨损，进而提升噪声数值。设计时兼顾润滑系统布局与油路走向设计，保障润滑油在齿轮各接触面均匀分布，避免局部润滑不良造成的噪声增大，润滑油的质量把控与定期更换，直接影响齿轮的噪声表现，使用高质量润滑油可减少齿面磨损，延长齿轮使用寿命，同时降低噪声产生。

机电产品齿轮传动系统的噪声优化，可通过减少振动实现，齿轮系统振动是噪声产生的重要源头，减少系统振动是控制噪声的有效方法，优化齿轮动态特性设计，减少共振现象发生，降低噪声，实际应用中，调整齿轮质量分布与支撑结构，优化装配精度，提升系统稳定性，减少齿轮振动引发的噪声。例如，通过调整轴承支撑刚度（如从 $1e8N/m$ 提高至 $5e8N/m$ ），可将系统共振峰偏移，使特定频段（如 $800-1500Hz$ ）噪声降低 $6-9dB(A)$ 。采用减振材料与隔音措施，在齿轮箱和机电系统中合理布设隔音装置，有效控制噪声水平，对齿轮传动系统开展综合优化，从设计、加工、润滑到振动控制多方面改进，大幅降低齿轮传动噪声，提升机电产品性能，优化用户使用体验。

3 齿轮参数调整对噪声控制的影响

齿轮参数调整对噪声控制影响显著，啮合精度、齿面接触比例、齿轮传动比均为关键影响维度，齿轮齿形参数含压力角、齿距、齿宽，直接作用于啮合过程的噪声水平，合理调整此类参数，可降低齿面间接触冲击，削减噪声产生，增大齿轮压力角，能改善啮合接触稳定性，减小齿面滑移，降低摩擦与噪声^[3]。压力角过大会让齿轮啮合产生较大径向力，影响负载承载能力与传动效率，齿轮参数选择，需在噪声控制和传动效率间形成适配平衡，优化设计齿轮几何形状，可改善啮合时的噪声特性，提升传动系统整体性能。

齿轮齿面接触比对噪声的影响同样关键，齿面接触比具体指一个齿轮完整啮合周期内，齿面实际接触的时长与整个啮合周期总时长的比值，合理调整齿轮齿面接触比，可直接改变齿轮啮合过程中的力学作用行为，进而实现对噪声生成的有效控制，齿面接触比较高时，齿轮啮合接触的平稳性明显更佳，能有效减少因啮合不均匀所引发的瞬时冲击力，从而减少噪声的产生。接触比过高易造成齿轮整体尺寸增大，直接影响齿轮系统的结构紧凑性与整体重量，调整齿面接触比时，需综合考量

齿轮传动的承载能力与噪声控制效果，合理设定的齿面接触比可改善齿轮齿面耐磨性，延长齿轮实际使用年限，助力提升齿轮传动系统的运行稳定性与工作可靠性。

齿轮传动比是噪声控制的另一关键参数，齿轮传动比直接决定啮合速率及齿轮间的力传递方式，较高的传动比往往对应更高的齿轮啮合频率，可能带来更高的噪声水平，高速运转的齿轮系统中，调整传动比可成为降低噪声的有效手段，优化传动比，能使啮合频率避开系统固有频率，减少共振现象发生，降低共振引发的噪声。传动比优化可改善齿轮传动系统动力学特性，减小不规则啮合力的波动，进一步提升齿轮系统的平稳性与传动效率，合理调整齿轮传动比，助力提高传动效率，也能有效抑制噪声产生，优化整个齿轮传动系统性能，实际应用中，齿轮传动比的选择，需结合不同工作环境与噪声控制需求做针对性设计调整，实现最优的噪声抑制效果。

4 精细化表面处理在噪声优化中的应用

精细化表面处理是降低齿轮传动噪声的重要手段，齿轮啮合过程中，齿面间的摩擦、冲击与振动是噪声产生的主因，齿面粗糙度、表面质量、表面硬度直接决定齿轮啮合的平稳性与噪声水平，精细化表面处理技术能大幅提升齿轮表面质量，改善啮合接触状态，有效减少噪声^[4]。磨光、超精加工、表面涂层、热处理等处理方式，可消除齿面不平整与微小裂纹，优化齿面光滑度，让齿轮啮合更顺畅，减少摩擦与振动的产生，这类处理能提升齿面接触稳定性，抑制啮合冲击与振动，大幅降低传动噪声。

热处理与表面涂层技术是优化齿轮噪声的有效手段，齿轮在高负载、高速的工作条件下，易产生剧烈摩擦和磨损，热处理可通过改变齿轮表面硬度提升其耐磨性，渗碳、氮化、感应硬化等表面硬化处理，能有效提高齿面硬度，减少啮合过程中的齿面磨损，延长齿轮使用寿命，同时降低噪声。氮化硅涂层、陶瓷涂层等表面涂层技术，能在齿轮表面形成致密保护膜，优化齿面间的摩擦性能，减少摩擦热产生，降低过高摩擦引发的噪声，这类表面处理技术可提升齿轮强度与耐磨性，同时有效降低噪声，是齿轮传动系统噪声优化的关键技术。

齿轮噪声优化中，表面润滑与表面处理的结合发挥关键作用，即便完成齿轮全维度的表面优化处理，若配套的润滑条件达不到适配标准，依旧会在啮合中产生较大摩擦力，进而引发明显噪声，精细化的齿轮表面处理工艺必须搭配相适配的润滑系统协同作用，优质的润滑油或润滑脂能在齿面形成均匀且稳定的油膜，大幅减少齿面间的直接硬性接触，进一步降低啮合时的摩擦损耗与齿面磨损，从源头减轻噪声的产生。表面处理与润滑技术的协同结合应用，能从多维度有效抑制齿轮啮合过程中的摩擦作用与振动幅度，显著降低整体噪声水平，精细化表面处理技术不仅能针对性实现噪声优化目标，还可从结构层

面改善齿轮的动力学特性,让齿轮在运转中更平稳,减少非规则振动,进而进一步降低噪声传播。

5 噪声优化设计的实践效果与性能提升

噪声优化设计的实际应用效果,核心体现在齿轮传动系统运行平稳性提升与噪声水平显著降低,先进噪声控制技术落地应用,齿轮几何优化、精细化表面处理、改进润滑方案落地,齿轮传动系统实际运行中的噪声得到有效抑制,优化设计降低齿轮啮合的冲击力与振动,同时削减齿轮材料、加工精度带来的各类噪声源^[9]。齿轮传动系统噪声幅度的降低,与齿面接触稳定性提升高度关联,精准设计齿轮几何参数,优化啮合角度与压力角,减少啮合产生的震动,最终实现更低的运行噪声。

噪声优化设计既降低齿轮传动系统的噪声水平,也大幅提升系统整体性能与传动效率,传统齿轮传动系统中,噪声引发的不稳定振动,往往会影响整体传动效率,优化齿轮传动设计,降低齿面摩擦与不规则接触,传动系统的能量损失得到有效控制,实践数据显示,优化后的齿轮传动系统不仅提升动力传递效率,还减少系统内部的热量积累,进一步提高系统整体工作效率与耐用性。表面处理技术升级、润滑系统改进,降低齿轮表面摩擦系数,减少摩擦引发的能量损耗,持续提升系统工作性能与机械使用寿命,齿轮传动系统在负载波动较大的工作环

境中,运行稳定性大幅提升,减少运行过程中的不确定性与意外故障发生。

噪声优化设计显著提升齿轮传动系统的长期性能。优化后的系统不仅有效降低噪声,更通过减少摩擦磨损大幅延长使用寿命。改进的润滑与表面处理工艺增强了系统在高负载、高温下的工作可靠性,减少了维修更换频率,从而显著降低运维成本。实践表明,优化设计在长期运行中展现出更优的噪声控制与稳定性,为对低噪声、高效率有严格要求的工业领域提供了可靠解决方案。

6 结语

噪声优化设计应用于齿轮传动系统,大幅提升系统运行性能与使用舒适性,优化后的齿轮传动系统有效降低噪声水平,同时提升传动效率与运行稳定性,实际应用中,精细化表面处理、润滑技术改进、齿轮参数优化,充分发挥噪声控制与性能提升的优势,优化设计延长齿轮使用寿命,降低设备维护成本。实践结果证实,这些优化措施对提高整体机械系统可靠性与效率作用显著,为汽车工业及其他相关领域齿轮传动系统的设计应用提供有力支撑,持续改进下,未来齿轮传动系统的噪声控制与性能优化将更为完善,推动机械系统向高效、环保方向稳步发展。

参考文献:

- [1] 肖小平,李德鑫,陈祯,等.基于非圆齿轮传动的仿生扑翼机器人的机构设计[J].机械设计,2025,42(S2):23-27.
- [2] 申鹏,谭来春,胡泽华,等.考虑弹流润滑的变位行星齿轮传动动态特性分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2025,53(12):67-75.
- [3] 莫帅,王震,曾彦钧,等.纯电动汽车齿轮传动系统非线性动力学特性分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2025,53(12):76-84+94.
- [4] 刘睿,王德平,赵雪松,等.电驱行星齿轮传动阶次噪声仿真优化研究[J].传动技术,2025,39(02):30-34.
- [5] 焦东风.面向低噪声驱动桥的齿轮及传动系统优化技术研究[D].合肥工业大学,2022.