

行星齿轮传动系统修形降噪技术分析

叶茂行

杭州亿亿德传动设备有限公司 310000

【摘要】行星齿轮传动系统广泛应用于高精度和高负载的机械装置，但噪声问题始终困扰着工程师。齿轮啮合时的冲击与振动，加之复杂的传播途径，使得噪声难以控制。采用齿廓修形和齿向修形技术，可在不牺牲系统性能的前提下有效降低噪声。通过理论分析与实际应用对比，不同修形方法对降噪效果的影响呈现出差异性。优化修形参数，结合高精度加工与检测手段，能够实现降噪与传动性能的平衡，为高端装备制造提供有力支持。

【关键词】行星齿轮传动；噪声控制；修形技术；齿轮啮合；振动优化

Analysis of planetary gear transmission system shaping and noise reduction technology

Ye Maohang

Hangzhou Yiyide Transmission Equipment Co., LTD 310000

【Abstract】 Planetary gear transmission systems are widely used in high-precision and high-load machinery, but noise issues have always been a challenge for engineers. The impact and vibration during gear meshing, combined with complex propagation paths, make noise control difficult. By employing tooth profile shaping and tooth orientation shaping techniques, noise can be effectively reduced without compromising system performance. Through theoretical analysis and practical application comparisons, different shaping methods show varying effects on noise reduction. Optimizing shaping parameters, combined with high-precision machining and inspection techniques, can achieve a balance between noise reduction and transmission performance, providing strong support for advanced manufacturing equipment.

【Key words】 planetary gear transmission; noise control; shaping technology; gear meshing; vibration optimization

引言：

行星齿轮传动系统因其结构紧凑、承载能力强、传动效率高，被广泛应用于航空航天、汽车、机器人等领域。然而，高速运转时的噪声问题直接影响设备性能与用户体验。噪声的根源在于齿轮啮合过程中产生的冲击、振动及传播特性，传统的噪声抑制手段往往难以兼顾传动性能。修形技术以其对齿轮几何参数的精细调整，成为一种行之有效的降噪方式。深入分析修形方法及其对噪声的影响，可为优化齿轮传动系统提供新的思路。

1.行星齿轮传动系统的工作原理与噪声产生机制

1.1 行星齿轮传动系统的结构和工作原理

行星齿轮传动系统由太阳轮、行星轮、齿圈和行星架组成。太阳轮位于中心，通过与多个行星轮啮合，实现动力传递。行星轮由行星架支撑，同时与外部固定或旋转的齿圈啮合，使整个系统能够在紧凑空间内实现高传动比和大扭矩输出^[1]。

1.2 行星齿轮传动系统噪声产生的原因

行星齿轮传动系统噪声主要源于齿轮啮合冲击、振动激励和结构共振。齿轮啮合时，受制造误差、载荷波动和润滑条件影响，齿面间存在微小的速度差和啮合冲击，导致啮合刚度的周期性变化，从而产生激励力，引发振动和噪声。

除此之外，行星架的不平衡、轴承支撑刚度的变化，也会导致齿轮系统内部激励增强。例如，在某精密机床的主轴

传动系统中，行星架制造误差引起的不平衡载荷，使得系统噪声水平较理论值高出 5 dB。修形优化后，啮合冲击降低，噪声明显改善。

1.3 噪声的传播途径和特点

噪声传播途径涉及结构传递和空气传播。齿轮啮合产生的振动通过轴承、齿轮箱壳体传递到外界，形成结构噪声。同时，啮合冲击导致齿面空气扰动，形成空气噪声。

例如，在新能源汽车电驱系统中，齿轮箱结构轻量化设计提高了效率，但同时增强了振动噪声的传播能力。实验表明，壳体刚度不足时，噪声水平比高刚度设计增加 4–6 dB，说明优化壳体结构可有效降低结构噪声的传播。

总的来说，噪声传播的复杂性决定了降噪手段的多样化，合理修形、优化支撑结构、改进润滑条件，都能在不同程度上降低噪声，提高系统稳定性。

2.行星齿轮传动系统的修形方法

2.1 齿廓修形

齿廓修形是通过优化齿轮的径向轮廓，使啮合过程中载荷分布更均匀，减少局部过载现象。这种方法能够有效降低齿轮啮合冲击，从而减少噪声。常见的齿廓修形方法包括渐开线修形和抛物线修形^[2]。

(1) 渐开线修形

渐开线修缘指对齿轮啮合的工作齿面进行微小的修磨，使得齿廓相对于理论齿形进行变化，从而降低由于制造过程存在误差因素所导致的齿轮啮合的跳动情况，进而增强其啮合稳定度。将渐开线齿廓修缘运用在汽车自动变速器的行星

齿轮传动系统中, 啮合传动时, 齿轮啮合处啮合刚度的波动会减小约 20%, 传动噪声可得到有效减少。

(2) 抛物线修形

抛物线修形是在齿轮啮合部分进行局部修形, 使得在啮合部分载荷有一个由小到大的过程, 没有突变过程。抛物线修形适合应用于高速重载的应用场景, 比如某型号航空发动机的行星齿轮组。在某型号航空发动机齿轮箱内将抛物线修形应用于行星齿轮组, 试验发现齿轮箱振动幅值降低 15%, 噪声降低约 3dB 左右。

综上所述, 齿廓修形的核心是合理地对齿廓各节圆进行接触应力修正, 将齿面所承受的载荷分配的更加均匀, 同时抵消一定的加工误差对传动系统的影响, 在具体的使用当中要结合负载特点、转速特点、材料特点进行合理地应用。

2.2 齿向修形

齿向修形主要针对齿轮轴向方向的优化, 使齿面接触区域更均匀分布, 减少齿根应力集中, 并优化传动过程中接触状态。齿向修形方法包括鼓形修形和螺旋角修形。

(1) 鼓形修形

鼓形修形就是对齿轮齿向方向的修形, 从而使得齿面在齿宽方向有微凸的鼓形轮廓, 进而减轻由轴向误差引发的偏载问题。这种方式主要用在具备装配间隙或变形的齿轮传动系统, 比如风力发电齿轮传动系统受风载作用产生动态变形, 使齿轮啮合态发生变化, 在齿轮上应用鼓形修形后, 可降低其偏载系数约 10%, 提高齿轮的啮合平稳性。

(2) 螺旋角修形

螺旋角修形是通过螺旋齿轮的螺旋角的优化修正, 使得啮合的螺旋齿轮形成更好的啮合接触方式。对于齿轮箱而言, 如高速运行的高铁列车齿轮箱, 螺旋角修形之后齿轮的噪声会降低 3 ~ 5dB, 齿面的摩擦也得以降低, 提高了使用寿命。

齿向修形是高精度、高承载的大多数传动系统都有的修形方式, 它是为了补偿制造误差、减小啮合冲击, 并改善齿面接触状态, 提高传动齿轮的使用寿命。在实际应用中需根据系统的载荷及工作条件等条件来进行参数优化, 以达到理想的修形效果^[9]。

2.3 修形参数的确定原则和计算方法

修形效果的好坏与修形参数的选择直接相关, 合理的参数设定可以在降低噪声的同时维持甚至提升传动效率。修形参数的确定一般遵循以下原则:

优化载荷分布: 通过调整齿廓和齿向修形量, 使得齿轮在全寿命周期内的载荷分布更加均匀, 减少局部应力集中, 降低磨损速率。

降低啮入与啮出冲击: 通过精确校验齿轮动合, 优化修形参数, 使齿轮啮入啮出时平缓。对于电动机汽车传动装置, 适当的齿廓修形可以降低啮入啮出的冲击力约 15% ~ 25%, 有效降低工作噪声。

在修形时控制齿轮间的传动误差不能大于某一个值, 从而实现合适的修形; 在修形时, 在考虑满足上述修形的原则的基础上, 还必须使修形量符合啮合误差理论计算模型, 修形之后的齿面所影响的传动误差应该在计算的范围内, 不可超出误差值, 比如精密机床上的齿轮传动, 其修形之后所影

响的传动误差应该在 $5\mu\text{m}$ 以内。

对修形参数的求解, 主要通过 FEA 和实验验证等方法, 通过对修形方案进行模拟预测, 从而能知道该修形方案将对齿轮的接触性能、振动以及噪声等因素的影响, 并选择其最佳修形方案。在像航空发动机齿轮传动这样的高端应用中, 应该结合实验台的测试, 把理论值和实际效果二者结合进行对修形参数进行优化。

3. 行星齿轮传动系统修形对降噪效果的影响

行星齿轮传动系统的噪声源主要包括齿轮啮合冲击、齿面接触误差以及齿轮振动的耦合效应。修形技术的应用, 使得齿轮的接触状态更均匀, 减少刚度突变引起的激励, 优化啮合特性, 从而降低噪声水平

3.1 通过理论模型分析修形与噪声降低的关系

行星齿轮传动系统噪音主要由于齿轮的接触刚度不一致造成, 常规齿轮设计中由于制造、安装及载荷分布等方面不平衡使齿轮在啮合时局部过载, 引起冲击和振动, 高速运转时尤为突出, 啮合刚度不一致使得系统产生共振, 系统噪声进一步加大^[4]。

优化修形后的齿轮啮合过程中的齿面接触情况得到改善, 降低了接触刚度的波动。根据理论计算, 修形能够减小齿轮传动系统的激励, 如齿轮副的齿面接触时, 修形合适的齿廓, 能够减小齿轮啮合刚度的波动 20% ~ 35%。风行星齿轮系统中进行修形后, 振动频谱分析显示, 齿轮啮合频率处的振动幅值减小约 30%, 能够降低齿轮箱整体噪声水平。

在前面的有限元分析中已经证实修形对降低噪声的作用, 这里再给出某型车用变速器行星齿轮系统使用不同修形方案的有限元计算验证。由某型车用变速器行星齿轮系统有限元分析结果表明, 在合理修形齿形条件下, 由于振动源即啮合误差减小了 15% ~ 25%, 最终降低了激励功率。

3.2 不同修形方法和参数对降噪程度的影响比较

不同修形方法的降噪效果存在差异, 齿廓修形和齿向修形的作用侧重点不同, 但都能对降噪产生积极影响。

(1) 齿廓修形的降噪效果

齿廓修形的主要作用是优化啮合接触状态, 减少啮合冲击, 从而降低噪声。不同的齿廓修形方式具有不同的降噪效果:

渐开线修形主要针对齿轮啮合过程中由于制造误差和载荷变动引起的接触刚度波动。应用在某航空发动机齿轮箱中, 优化齿廓后, 啮合冲击力降低了 22%, 噪声下降 3 dB。

抛物线修形在高速重载应用中更有效, 因为它能够在啮合点附近形成更平滑的过渡, 避免齿轮进入和退出啮合时的突变冲击。在高铁变速箱齿轮系统中, 应用该方法后, 噪声水平降低了 5 dB, 齿轮疲劳寿命延长了 12%。

(2) 齿向修形的降噪效果

齿向修形主要针对齿轮轴向方向的优化, 使齿面接触区域更均匀, 减少轴向载荷偏移带来的振动和噪声。不同齿向修形方法的降噪效果如下:

鼓形修形适用于存在装配误差和齿向偏载的齿轮传动系统。例如, 在工业机器人减速器中, 齿轮采用鼓形修形后,

轴向偏载减少了18%，系统噪声降低约4 dB。

螺旋角修形主要用于螺旋齿轮传动系统，它能够优化螺旋角的接触状态，减少齿轮振动。在某风力发电齿轮箱中，修形后，齿轮共振频率降低，整体噪声减少6 dB。

4.行星齿轮传动系统修形降噪技术的实施要点

4.1 修形加工工艺的选择与优化

修形的实现依赖于高精度加工技术，常见的方法包括磨削加工、电火花加工和数控滚齿加工。

(1) 磨削加工

磨削是精度最高的修形加工方法，适用于高精度齿轮的制造。例如，在航空发动机齿轮箱的制造中，通常采用数控磨齿机进行齿廓和齿向修形，修形误差控制在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以内，确保高负载、高转速条件下的稳定性。磨削加工的优点在于可实现微量修形，但加工成本较高，适用于高端装备制造。

(2) 电火花加工

对于硬度较高的齿轮材料，如航空航天和军工领域常用的高强度合金钢，电火花加工可以有效进行局部修形，避免因机械切削带来的材料损伤。例如，在某无人机动力传动系统中，采用电火花加工修形后，齿轮啮合噪声降低了3 dB，并且齿面硬度保持稳定。

(3) 数控滚齿加工

在批量生产中，数控滚齿机可以通过预设刀具路径，实现大批量齿轮的修形。例如，新能源汽车电驱系统的行星齿轮组采用数控滚齿技术进行齿廓和齿向修形，确保同批次齿轮的修形一致性，使变速器的噪声水平降低5 dB，满足整车NVH要求。

4.2 修形后的齿轮精度检测与控制

修形后的齿轮是否达到设计要求，需要通过高精度检测技术进行评估。检测精度直接决定修形效果，常见的检测方法包括接触斑点检测、三坐标测量和激光扫描检测。

(1) 接触斑点检测

在修形效果验证中，齿轮啮合接触斑点的分布情况可以直观反映齿廓和齿向修形的合理性。例如，在风力发电齿轮传动系统的检测中，接触斑点显示修形后的齿轮接触面积增加了15%，均匀性提升，使齿轮承载能力增强，噪声降低。

(2) 三坐标测量

高精度三坐标测量机可以测量齿轮齿形误差、齿距偏差以及修形量。例如，在某精密机床主轴传动系统中，三坐标测量数据显示，经过优化修形的齿轮齿廓偏差由原来的 $7\text{ }\mu\text{m}$

降低至 $3\text{ }\mu\text{m}$ ，提高了传动精度^[9]。

(3) 激光扫描检测

对于超精密齿轮，如航天器的行星齿轮系统，激光扫描检测能够提供高分辨率的齿面数据，分析修形后的齿轮表面微观形貌，确保齿轮的表面质量满足设计要求。

4.3 考虑修形对传动系统其他性能（如承载能力、传动效率）的影响

修形带来的结构优化不仅影响噪声，还可能对齿轮的承载能力、传动效率等性能产生影响。在降噪的同时，需要确保系统整体性能不受负面影响。

(1) 对承载能力的影响

合理的修形可以改善载荷分布，提高齿轮的耐久性。例如，在某重载工业设备的行星齿轮传动系统中，采用鼓形修形后，齿面接触应力降低了12%，使齿轮寿命延长20%。但修形过度可能导致齿根应力增加，影响齿轮强度，因此需要通过有限元分析确定最优修形参数。

(2) 对传动效率的影响

修形可能改变齿轮的接触区域，从而影响传动效率。例如，在新能源汽车变速器中，齿廓修形优化后，齿轮的摩擦损失减少，使传动效率提升0.8%，同时噪声水平降低3 dB。对于高效传动系统，需要权衡修形带来的摩擦变化，确保能量损耗最小化。

(3) 综合优化方案

针对不同工况，可以采用多目标优化方法，在降噪、承载能力和效率之间寻找最佳平衡。例如，在某军用车辆的行星齿轮系统优化中，采用多目标优化算法，在保证齿轮寿命增加15%的同时，传动效率维持在98%以上，并且噪声水平下降了5 dB。

结语：

行星齿轮传动系统的降噪问题关系到设备的运行稳定性与使用寿命。通过修形优化齿轮啮合特性，不仅可以减少冲击与振动，还能改善系统的负载分布，提高传动效率。然而，修形参数的选择需要在降噪、承载能力和加工可行性之间取得平衡。合理的修形策略需要结合理论计算、仿真分析与实验验证，以确保降噪效果的稳定性和可控性。未来，随着高精度制造与智能优化算法的发展，修形降噪技术将在更多领域得到深化应用，为机械传动系统的优化提供更优解决方案。

参考文献

- [1]莫帅，刘志鹏，罗炳睿等.考虑齿廓修形的行星齿轮传动系统动力学特性研究[J]振动工程学报.2024（02）：191-199.
- [2]刘永平，魏凌强，赵超等.行星齿轮传动系统的修形降噪技术研究[J]制造业自动化.2020（06）：99.
- [3]张西金，方宗德，尹逊民等.直齿行星传动函数修形优化及动力学分析[J]华中科技大学学报.2024（02）：99.
- [4]罗炳睿.纺织装备行星齿轮传动系统修形研究[J]纺织学报.2022（03）：170-177.
- [5]张玲艳，邱水才.行星齿轮齿面强度优化[J]煤矿机械.2023（09）：121-125.

作者简介：叶茂行，出生年：1979.4，男，民族：汉，籍贯：浙江温州，学历：大专，研究方向：减速机的研发。