

轻量化设计在变速器壳体中的应用与研究

王一琦

陕西法士特齿轮有限责任公司 陕西 西安 710119

摘要：随着汽车工业对节能减排和性能提升需求的不断增长，变速器壳体轻量化设计成为关键研究方向。本文系统分析了变速器壳体轻量化的技术路径，包括材料替代、结构优化、拓扑优化及制造工艺创新。通过铝合金材料应用、壁厚优化、加强筋布局调整、多体动力学仿真等手段，结合工程案例验证了轻量化设计的有效性。研究结果表明，合理设计可使壳体重量降低，同时满足强度、刚度及NVH性能要求，为汽车轻量化提供重要技术支撑。

关键词：变速器壳体；轻量化设计；铝合金；拓扑优化；多体动力学

1 引言

汽车工业作为全球能源消耗和碳排放的主要领域，正面临着日益严格的节能减排法规约束。据统计，汽车整备质量每降低10%，燃油消耗可减少6%-8%，同时二氧化碳排放量可降低约4%。变速器作为汽车动力传动系统的核心部件，其性能直接影响整车的动力性、经济性和可靠性。而变速器壳体作为变速器的支撑和保护结构，不仅需要承受齿轮啮合产生的载荷，还要为内部零部件提供精确的定位和可靠的密封。其质量占变速器总成的30%-40%，因此成为轻量化的重点研究对象。

传统变速器壳体多采用灰铸铁材料，虽然灰铸铁具有成本低、铸造性能好、减振性强等优点，但其密度较高（约为 $7.35\text{g}/\text{cm}^3$ ），导致壳体质量较大，不利于汽车的轻量化发展。随着材料科学和制造技术的不断进步，铝合金等轻质材料逐渐在变速器壳体中得到应用。铝合金具有密度低（约为 $2.77\text{g}/\text{cm}^3$ ）、比强度高、良好的铸造性能和耐腐蚀性等优点，能够有效减轻变速器壳体的重量，同时满足其力学性能要求。本文将从材料选择、结构设计、仿真优化及制造工艺四个维度，系统探讨变速器壳体轻量化设计的关键技术及应用案例。

2 轻量化材料的应用

2.1 铝合金材料的优势与应用

铝合金因其独特的性能优势，成为变速器壳体轻量化的首选材料。以某重型商用车变速器为例，原壳体采用灰铸铁材质，质量较大。在将其替换为铝合金壳体后，壳体重量减轻了40%以上。这一显著的减重效果主要得益于铝合金的低密度特性。虽然铝合金的弹性模量（约为71GPa）低于灰铸铁（约为130GPa），但通过合理的结构设计，可以弥补其刚度不足的问题。在实际应用中，为了确保变速器壳体在高应力区域的强度和刚度，通常会在轴承座等部位增加局部壁厚。例如，在某

铝合金变速器壳体设计中，通过将轴承孔附近的局部壁厚增加至合适尺寸，使轴承孔在承受载荷时的变形量控制在0.05mm以内，满足了变速器的使用要求。此外，铝合金还具有良好的铸造性能，能够通过高压铸造等工艺实现复杂结构的成型，进一步提高变速器壳体的设计自由度。

2.2 镁合金与复合材料的探索

除了铝合金，镁合金和复合材料也在变速器壳体轻量化领域展现出一定的潜力。镁合金的密度更低（约为 $1.74\text{g}/\text{cm}^3$ ），具有更高的比强度，是一种极具吸引力的轻量化材料。然而，镁合金的耐热性较差，工作温度一般不超过150℃，这限制了其在高温环境下的应用。为了解决这一问题，研究人员通过在AZ91D镁合金中添加0.8%的Ce元素，成功将其耐热性提升至180℃，并应用于混合动力变速器壳体，实现了减重35%的效果。碳纤维增强复合材料（CFRP）具有优异的比强度和比模量，其密度仅为 $1.5\text{-}2.0\text{g}/\text{cm}^3$ ，远低于金属材料。但目前CFRP的成本较高，且成型工艺复杂，尚未在变速器壳体的大规模生产中得到广泛应用^[1]。不过，随着材料技术和制造工艺的不断进步，CFRP有望在未来成为变速器壳体轻量化的重要选择。

3 结构优化设计方法

3.1 壁厚优化设计

变速器壳体的壁厚设计是平衡轻量化与力学性能的关键环节。在设计过程中，需要根据壳体不同部位的功能和受力情况，合理确定壁厚尺寸。一般来说，基础壁厚通常控制在3.5-4.0mm，轴承位由于需要承受较大的载荷，壁厚设计为5.5-7.5mm，而螺栓凸台部位则需要更厚的壁厚（6-7mm）以保证连接的可靠性。以某乘用车变速器壳体为例，通过将基础壁厚从4.0mm减至3.5mm，并对轴承孔附近的局部壁厚进行优化，增加至6mm，在

保证壳体强度和刚度的前提下，实现了8%的减重效果。同时，该壳体还通过了严格的台架耐久试验，验证了壁厚优化设计的有效性。在壁厚过渡处，为了避免应力集中，需要设置圆角。内部圆角半径建议为壁厚的1-2倍，外部圆角为2-3倍，这样可以有效降低应力集中系数，提高壳体的疲劳寿命。

3.2 加强筋布局优化

加强筋是提升变速器壳体刚度的重要结构元素。合理的加强筋布局可以在不显著增加壳体质量的情况下，有效提高其抗变形能力。某重型变速器壳体在设计过程中，通过多体动力学分析确定了应变能集中的区域。在高应变能位置添加矩形加强筋后，壳体的刚度提升了12%，同时重量减轻了5%。在加强筋的设计中，截面形状、高宽比和布置方向是关键参数。研究表明，矩形加强筋在相同质量下，其应力水平比等腰梯形和三角形加强筋低15%，因此具有更好的综合性能^[2]。加强筋的高度与宽度比值建议控制在1.5-2.0之间，过高会导致铸造过程中容易出现缺陷，如缩孔、裂纹等。此外，正交加强筋的布置方式比单向加强筋更有利于降低辐射声压级，在某变速器壳体设计中，采用正交加强筋后，辐射声压级比单向加强筋降低了3-5dB，显著改善了变速器的NVH性能。

3.3 拓扑优化技术应用

拓扑优化是一种基于数学算法的结构优化方法，它能够在给定的设计空间内，通过优化材料的分布，实现结构的轻量化和性能提升。在变速器壳体设计中，拓扑优化通常用于确定加强筋的最佳布局和形状。以某六速机械式变速器箱体为例，其拓扑优化设计流程如下：首先，定义设计空间，保留功能性螺栓孔和齿轮轴连接处等关键部位，对加强筋的分布区域进行优化设计。然后，施加载荷约束，通过Romax软件模拟一档100%扭矩（155Nm）的工况，约束轴承孔的位移，确保优化后的结构能够满足实际使用要求。接着，设定优化目标，以体积分数不超过0.4为约束条件，最小化柔度（即最大化刚度）。最后，对优化结果进行验证，通过Abaqus软件进行有限元分析，结果表明优化后的箱体重量减轻了1.77kg，同时静强度和模态性能均满足设计要求。

4 多学科仿真优化

4.1 强度与刚度分析

强度和刚度是变速器壳体设计的重要性能指标。为了确保壳体在各种工况下都能安全可靠地运行，需要对其进行详细的强度和刚度分析。通常采用Hypermesh软件进行有限元建模，通过Romax软件获取轴承力载荷，然后在Abaqus软件中求解壳体的应力分布。以某乘用车

变速器壳体为例，在一档工况下，最大应力出现在输入轴轴承座附近，应力值为185MPa，而材料的屈服强度为230MPa，安全系数为1.24，满足设计要求。但为了进一步提高壳体的可靠性，对该区域进行了结构优化，将壁厚增加至5.0mm，优化后最大应力降至160MPa，进一步提高了安全系数。

4.2 模态与NVH优化

变速器在工作过程中会产生振动和噪声，影响整车的NVH性能。因此，变速器壳体的模态设计需要避开发动机的激励频率（通常在300-800Hz之间）。某变速器壳体在初始设计中，在3809Hz处振幅达到58μm，通过调整纵向加强筋的位置，使振幅降至40μm以下，有效改善了壳体的振动特性^[3]。为了进一步优化NVH性能，还采用了统计能量法（SEA）分析不同加强筋布置形式的声辐射特性。研究发现，正交加强筋的场点响度比单向加强筋低2-3sone，这表明正交加强筋的布置方式能够更有效地降低变速器的噪声辐射。

4.3 热-力耦合分析

变速器在工作过程中会产生大量的热量，导致壳体温度升高。高温环境会对壳体的强度和刚度产生影响，因此需要考虑热应力对壳体性能的影响。某混合动力变速器壳体在工作时温度可达120-150℃，通过热-力耦合分析发现，高温工况下轴承座区域的应力增加了20%。为了解决这一问题，对壳体的散热筋布局进行了优化。通过增加散热筋的数量和优化其排列方式，使壳体的温度梯度降低了15%，热应力减小至安全范围，确保了变速器在高温环境下的可靠运行。

5 制造工艺创新

5.1 高压铸造工艺

铝合金变速器壳体通常采用高压铸造（HPDC）工艺进行生产。高压铸造工艺具有生产效率高、表面质量好和复杂结构成型能力强等优点。其单件生产周期可控制在2分钟以内，能够满足大规模生产的需求^[4]。同时，高压铸造可以实现Ra3.2μm的表面粗糙度，减少了后续的加工工序，降低了生产成本。在高压铸造过程中，浇注系统的设计对壳体的质量至关重要。某企业通过优化浇注系统，将壳体的气孔率从8%降至2%，废品率降低了40%。这主要得益于合理的浇注系统设计能够使金属液在型腔内平稳流动，减少卷气和夹杂物的产生，从而提高壳体的内部质量。

5.2 半固态成型技术

半固态成型（SSM）技术结合了铸造和锻造的优点，具有低缩孔率、高力学性能和近净成型等特点。在

半固态成型过程中,金属材料处于半固态状态,球状晶粒组织使缩孔率控制在1%以内,同时抗拉强度比高压铸造提高15%-20%,材料利用率可达95%以上。某电动车变速器壳体采用半固态成型工艺,实现了12%的减重效果,并且通过了30万公里的耐久试验。这表明半固态成型技术能够生产出高质量、高性能的变速器壳体,为轻量化设计提供了可靠的制造保障。

6 工程应用案例

6.1 某重型商用车变速器轻量化

某12挡重型变速器壳体采用灰铸铁材质,重量达到125kg。为了实现轻量化目标,采用了以下措施:首先,将材料替换为A356铝合金,使壳体重量降至75kg。其次,对壳体结构进行优化,将壁厚从8mm减至5mm,并添加矩形加强筋以提高刚度。最后,采用真空高压铸造工艺,将气孔率控制在1.5%以下,确保壳体的质量。台架试验结果表明,优化后的壳体刚度提升了8%,模态频率提高了12%,满足30万公里耐久要求。这充分证明了铝合金材料应用、结构优化和先进制造工艺相结合能够有效实现变速器壳体的轻量化设计。

6.2 某乘用车E-CVT壳体轻量化

丰田9代凯美瑞搭载的E-CVT变速器壳体采用了多项轻量化设计技术。其中,干式油底壳设计降低了润滑油的动力油位,减少了齿轮搅拌损失,提高了传动效率。同时,使用低黏度机油,黏度降低50%,使齿轮阻力减小15%,进一步降低了能耗。在结构方面,通过拓扑优化技术对加强筋布局进行优化,使壳体重量减轻了10%。实测显示,该设计使整车油耗降低了3.2%,NVH性能提升了5dB,显著提高了车辆的燃油经济性和舒适性。

结语

变速器壳体轻量化设计是一个涉及材料、结构、工艺等多学科的综合性课题。通过多年的研究和实践,目前在材料替代、结构优化、仿真优化和制造工艺创新等方面已经取得了显著成果。铝合金材料的应用使壳体重量降低了30%-40%,镁合金和复合材料也展现出了一定的应用潜力;拓扑优化技术能够实现结构的轻量化和性能提升;高压铸造和半固态成型等先进制造工艺保障了轻量化结构的可靠制造。

未来,变速器壳体轻量化设计可以朝着以下几个方向发展:一是开展多材料混合设计研究,结合铝合金、镁合金和复合材料的优势,实现局部区域性能定制,进一步减轻壳体重量;二是应用智能优化算法,如遗传算法和深度学习,提高拓扑优化的效率和准确性;三是建立全生命周期评估模型,综合考虑轻量化设计对环境的影响,推动绿色制造的发展。通过持续的技术创新,变速器壳体轻量化将为汽车工业实现“双碳”目标提供关键技术支撑。

参考文献

- [1]陈丹.变速器壳体轻量化设计浅析[J].时代汽车,2020,(06):71-72.
- [2]吴荣华,汪滋润,李小建,等.某轻卡变速器壳体深度轻量化设计[J].汽车零部件,2022,(03):36-42.
- [3]曹立为,经济型商用车变速器轻量化壳体绿色铸造工艺技术研究.浙江省,金华万里扬机械制造有限公司,2022-03-03.
- [4]陈亮,吴仕赋.壳体截面形状结构对变速器轻量化影响的研究[J].机械设计与制造,2025,(05):182-185+193.