

# 同步器设计与换挡平顺性提升策略研究

叶旭强 贺明 李小兰 姜勇俊

浙江万里扬股份有限公司金华分公司 浙江 金华 321000

**摘要:** 同步器是汽车变速器关键部件,其工作原理基于摩擦传动与锁止机构协同,主要有常压式、惯性式和自行增力式。换挡平顺性受摩擦系数、锥面角度等因素影响,通过对摩擦材料、锥面结构等关键部件优化设计,结合电控液压执行系统、多工况自适应控制及智能补偿算法等策略,可有效提升同步器性能与换挡平顺性,对汽车传动系统发展意义重大。

**关键词:** 同步器设计;换挡平顺性;变速器;提升策略

## 1 同步器的基本原理与类型

### 1.1 同步器的基本原理

同步器作为汽车变速器中的关键部件,其核心功能是在换挡过程中使待啮合的齿轮副实现转速同步,从而降低换挡冲击力,避免齿轮间的刚性碰撞,确保换挡操作能够平稳、顺畅地进行。从机械传动的角度来看,当驾驶员进行换挡操作时,变速器内原本啮合的齿轮副需要分离,而新的齿轮副要进行啮合。在这个过程中,由于不同挡位齿轮的转速存在差异,如果直接进行啮合,必然会产生巨大的冲击力,不仅会加剧齿轮的磨损,还会导致换挡困难,影响驾驶的舒适性和变速器的使用寿命。同步器正是通过巧妙的设计解决了这一难题,其工作原理基于摩擦传动和锁止机构的协同作用<sup>[1]</sup>。当换挡时,同步器首先通过摩擦元件(通常为摩擦锥面)与待啮合齿轮接触,利用摩擦力矩使二者的转速逐渐趋于一致。在转速同步的过程中,锁止机构会阻止齿轮副的提前啮合,防止因转速不同步而造成的冲击。一旦转速完全同步,锁止机构解锁,齿轮副便可顺利啮合,完成换挡过程。这种先同步后啮合的工作方式,极大地提高了换挡的平顺性和可靠性。

### 1.2 同步器的类型

根据结构和工作方式的不同,同步器主要可分为常压式、惯性式和自行增力式三种类型。常压式同步器是最早出现的同步器类型,它主要依靠驾驶员的操作力度来实现同步。在换挡时,驾驶员通过操纵变速杆,使同步环与待啮合齿轮的锥面接触,依靠两者之间的摩擦力来实现转速同步。然而,常压式同步器存在明显的缺陷,由于其同步效果完全依赖驾驶员的操作技巧,若操作不当,很容易出现同步不彻底的情况,导致换挡冲击,因此在现代汽车中已很少使用。惯性式同步器是目前应用最为广泛的同步器类型,它主要由同步环、滑

块、锁销等部件组成,利用惯性原理来实现同步。当换挡时,同步环与待啮合齿轮接触,由于两者存在转速差,会产生惯性力矩。这个惯性力矩会使同步环相对于滑块发生一定角度的偏转,从而使锁销与同步环上的锁止面相互接触,阻止齿轮副的提前啮合。只有当两者的转速完全同步时,惯性力矩消失,同步环才能顺利进入啮合位置,完成换挡。惯性式同步器具有结构紧凑、同步效果好、可靠性高的优点,能够适应各种复杂的驾驶工况。自行增力式同步器则是在惯性式同步器的基础上发展而来的。它通过特殊的结构设计,使同步过程中产生的摩擦力矩能够自动增大,从而加快同步速度,提高换挡效率。自行增力式同步器的工作原理是,在同步过程中,摩擦力矩会使同步环产生一个附加的增力作用,这个增力作用会进一步增大摩擦力矩,使同步过程更加迅速、平稳。

## 2 同步器工作原理与平顺性影响因素分析

### 2.1 同步器结构与换挡过程解析

同步器的结构设计直接决定了其工作性能和换挡过程的平顺性。以常见的惯性式同步器为例,其主要由接合套、同步环、滑块、锁销、花键毂等部件组成。接合套通过内花键与花键毂相连,可在花键毂上轴向移动;同步环套在待啮合齿轮的锥面上,与锥面之间形成摩擦副;滑块安装在花键毂的槽内,可在槽内轴向滑动,并通过凸起部分与同步环的缺口配合,限制同步环的转动角度;锁销则固定在接合套上,与同步环上的锁止面配合,起到锁止作用。在换挡过程中,驾驶员通过操纵变速杆,使接合套沿轴向移动。当接合套开始移动时,首先推动滑块,滑块再推动同步环与待啮合齿轮的锥面接触<sup>[2]</sup>。由于两者存在转速差,接触瞬间会产生摩擦力矩,该摩擦力矩会使同步环相对于滑块发生偏转,进而使锁销与同步环上的锁止面相互接触,阻止接合套继续前

移,实现锁止。随着摩擦力矩的作用,待啮合齿轮与同步环的转速逐渐趋于一致,当转速完全同步时,惯性力矩消失,同步环在摩擦力的作用下回到初始位置,锁止解除,接合套便可顺利通过同步环,与待啮合齿轮完成啮合,实现换挡。

## 2.2 影响因素敏感性分析

影响同步器换挡平顺性的因素众多,包括摩擦系数、锥面角度、转动惯量、弹簧刚度等。通过敏感性分析,可以确定这些因素对换挡平顺性的影响程度,从而有针对性地进行优化设计。摩擦系数是影响同步器同步性能的关键因素之一,摩擦系数越大,摩擦力矩就越大,同步速度也就越快。然而,摩擦系数过大也会导致同步过程过于剧烈,产生较大的冲击。通过数值模拟和实验研究发现,当摩擦系数在一定范围内时,换挡平顺性最佳。锥面角度同样对同步器的工作性能有着重要影响,锥面角度越大,正压力在轴向方向上的分力就越大,有助于加快同步速度。但锥面角度过大,会增加换挡力,使驾驶员操作费力。经过分析,存在一个最佳的锥面角度,能够在保证同步效率的同时,降低换挡力,提高换挡平顺性。转动惯量主要与待啮合齿轮和同步环的质量分布有关,转动惯量越大,惯性力矩就越大,同步所需的时间也就越长。因此,在设计同步器时,应尽量减小转动惯量,以提高同步效率和平顺性。弹簧刚度决定了同步环与锥面之间的初始接触压力,弹簧刚度过大,会增加换挡力;弹簧刚度过小,则可能导致同步环与锥面接触不紧密,影响同步效果。通过敏感性分析,可以确定弹簧刚度的合理取值范围,以优化同步器的性能。

## 3 同步器关键部件优化设计

### 3.1 摩擦材料选型与表面处理

摩擦材料是同步器实现同步功能的核心部件,其性能直接影响同步器的工作效率和平顺性。在摩擦材料的选型上,需要综合考虑摩擦系数、耐磨性、耐热性等多方面因素。目前,常用的摩擦材料主要有粉末冶金材料、纸基材料和碳基材料等。粉末冶金材料具有较高的强度和耐磨性,能够在高温和高压环境下稳定工作,但其摩擦系数相对较低,且成本较高。纸基材料具有良好的摩擦性能和自润滑性,成本较低,但耐热性较差,在高温下容易发生磨损和变形。碳基材料则具有摩擦系数稳定、耐磨性好、耐热性强的优点,是一种较为理想的摩擦材料,但价格昂贵,目前主要应用于高性能车辆。除了材料选型,表面处理技术也对摩擦材料的性能有着重要影响,通过表面处理,可以改善摩擦材料的表面粗糙度、硬度和化学性质,从而提高其摩擦性能和耐磨

性。常见的表面处理方法包括涂层技术、渗氮处理、激光处理等。例如,采用涂层技术在摩擦材料表面涂覆一层特殊的耐磨涂层,可以有效提高其耐磨性和抗疲劳性能;渗氮处理则可以提高摩擦材料表面的硬度和耐磨性,延长其使用寿命。

### 3.2 锥面结构参数优化

锥面作为同步器的关键结构,其参数对同步器的工作性能起着决定性作用。锥面结构参数主要包括锥面角度、锥面长度、锥面直径等。如前所述,锥面角度对同步器的同步效率和换挡力有着重要影响。通过优化设计,可以确定不同工况下的最佳锥面角度。一般来说,对于轻型车辆,锥面角度可适当减小,以降低换挡力;对于重型车辆,由于需要较大的同步力矩,锥面角度可适当增大。锥面长度也会影响同步器的同步性能<sup>[1]</sup>。锥面长度越长,摩擦面积越大,摩擦力矩也就越大,同步速度越快。但锥面长度过长,会增加同步器的轴向尺寸和重量。因此,需要在保证同步性能的前提下,合理确定锥面长度。锥面直径的大小则与同步器的承载能力和转动惯量有关,增大锥面直径,可以提高同步器的承载能力,但同时也会增加转动惯量,影响同步效率。在设计锥面直径时,需要综合考虑同步器的工作要求和性能指标,进行优化设计。

### 3.3 弹性元件设计改进

弹性元件在同步器中扮演着不可或缺的角色,其核心功能在于提供初始接触压力和缓冲作用,对换挡过程的平顺性与可靠性有着深远影响。常见的弹性元件以螺旋弹簧和波形弹簧为主,二者在实际应用中呈现出显著差异。传统的螺旋弹簧,凭借其结构简单、制造工艺成熟的优势,曾在同步器中广泛应用。然而,在换挡频繁、工况复杂的工作过程中,螺旋弹簧受力不均匀的弊端逐渐凸显。这种不均匀受力会导致同步环与锥面接触压力分布不均,进而影响摩擦力矩的稳定性,降低同步效率,严重时甚至会引发换挡冲击,影响同步器的整体性能。相比之下,波形弹簧以其独特的结构设计脱颖而出。它能够在有限的空间内实现较大的变形量,且在压缩和伸展过程中受力均匀,能确保同步环与锥面始终保持稳定且均匀的接触压力,为同步过程提供更可靠的保障,从而更好地满足同步器在不同工况下的工作要求。在弹性元件的设计改进进程中,结构参数的优化是关键环节。弹簧的直径、圈数、节距等参数相互关联,通过精准调整这些参数,可灵活改变弹簧的刚度和弹性特性。新型弹性材料的引入为弹性元件性能提升开辟了新路径。以记忆合金为例,其具备的形状记忆效应和超弹

性特性,使其在受力变形后能自动恢复原状,有效避免因长期使用导致的弹性衰减问题,大幅提高弹性元件的使用寿命和可靠性,为同步器性能优化注入新活力。

#### 3.4 热-力耦合场分析

在同步器的工作过程中,由于摩擦生热,会导致同步器部件的温度升高,进而引起材料性能的变化和部件的热变形。这些热效应会对同步器的工作性能产生不利影响,因此需要进行热-力耦合场分析。热-力耦合场分析是一种将热传导分析和结构力学分析相结合的方法。通过建立同步器的热-力耦合模型,利用有限元分析软件,可以模拟同步器在工作过程中的温度分布、应力分布和变形情况。分析结果表明,在换挡过程中,摩擦锥面和同步环的温度升高最为明显,局部温度可达数百度。高温会导致摩擦材料的摩擦系数下降,耐磨性降低,同时还会引起部件的热变形,影响同步器的正常工作。基于热-力耦合场分析的结果,可以采取相应的措施来优化同步器的设计。

### 4 换挡平顺性控制策略研究

#### 4.1 电控液压执行系统设计

为了实现对同步器换挡过程的精确控制,提高换挡平顺性,需要设计电控液压执行系统。电控液压执行系统主要由液压泵、电磁阀、液压缸、传感器等部件组成。液压泵用于提供液压动力,将机械能转化为液压能;电磁阀则根据电子控制单元(ECU)的指令,控制液压油的流向和流量,从而实现了对液压缸的精确控制;液压缸通过活塞杆的伸缩,推动同步器的接合套进行换挡操作;传感器则用于实时监测同步器的工作状态,如转速、位移、压力等参数,并将这些信息反馈给ECU。在电控液压执行系统的设计中,关键是要实现液压系统的快速响应和精确控制。通过优化电磁阀的结构和控制策略,可以提高液压系统的响应速度;采用高精度的传感器和先进的控制算法,可以实现对同步器换挡过程的精确控制,从而提高换挡平顺性。

#### 4.2 多工况自适应控制

汽车在不同的行驶工况下,对同步器换挡平顺性的要求也不同。因此,需要开发多工况自适应控制策略,使同步器能够根据不同的行驶工况自动调整换挡参数,以满足不同工况下的换挡要求。多工况自适应控制策略

主要基于车辆的行驶状态信息,如车速、发动机转速、油门踏板位置、变速器挡位等,通过建立工况识别模型,实时判断车辆所处的行驶工况<sup>[4]</sup>。然后,根据不同工况下的换挡要求,自动调整电控液压执行系统的控制参数,如液压压力、换挡速度等,实现同步器的自适应换挡控制。实验结果表明,采用多工况自适应控制策略后,同步器在不同工况下的换挡平顺性均得到了显著提高。

#### 4.3 智能补偿算法开发

在同步器的实际工作过程中,由于零部件的磨损、环境温度的变化等因素的影响,会导致同步器的性能发生变化,从而影响换挡平顺性。为了保证同步器在各种工况下都能保持良好的工作性能,需要开发智能补偿算法。智能补偿算法主要基于传感器采集的实时数据,如摩擦系数的变化、弹簧刚度的衰减等,通过建立性能预测模型,对同步器的性能变化进行实时预测。然后,根据预测结果,自动调整电控液压执行系统的控制参数,对性能变化进行补偿。例如,当检测到摩擦系数下降时,智能补偿算法会自动增加液压压力,提高摩擦转矩,以保证同步器的同步性能。通过实验验证,智能补偿算法能够有效地补偿同步器的性能变化,提高换挡平顺性和可靠性。

#### 结束语

本研究系统探讨了同步器设计与换挡平顺性提升策略,明确了同步器工作原理、类型及影响换挡平顺性的关键因素,并提出针对性优化设计与控制策略。研究成果有助于提高汽车变速器性能与驾驶舒适性。未来,随着汽车技术发展,同步器设计与控制策略将向更智能、高效方向迈进,以满足汽车行业不断升级的需求。

#### 参考文献

- [1]刘洪岩.DCT同步器设计方法研究[J].汽车工艺师,2024(1):62-64.
- [2]高敏,欧淑红.CATS5-16变速器的同步器设计[J].东北电力大学学报,2020,40(5):40-44.
- [3]陈明鑫.电动汽车机械自动变速器挂挡分析与控制[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2023,39(06):39-49.
- [4]高瑞娟,刘亮亮,胡建功.电子诊断技术在汽车自动变速器维修中的应用[J].电子产品世界,2023,30(07):37-40+45.