

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.003

# 汽车变速器疲劳寿命的研究与发展综述\*

刘新猛, 胡职梁, 谢里阳, 何雪泓\*

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 为了进一步推进汽车变速器疲劳寿命研究的发展,根据汽车变速器疲劳寿命研究方法的特点和应用状况,分别从变速器的载荷、变速器的疲劳试验和变速器的寿命预测3个方面对变速器寿命的研究进行了综述,为以后的研究提供参考。针对变速器载荷谱的编制,分析总结了现有的变速器载荷谱编制方法,其结果表明:程序载荷谱的编制是变速器载荷谱编制最准确有效的方法,但是现有的程序载荷谱并不能满足所有变速器寿命预测的要求;对于不同载荷谱作用下的疲劳试验,分析了每种试验的加载和试验结果,其结果表明:基于程序谱加载的疲劳试验能很好地模拟变速器的实际工作过程,试验结果最为准确;通过分析对比变速器寿命预测的几种常用的方法,其结果表明:概率疲劳寿命预测可以为变速器的研发和维修提供更全面的数据,是未来研究的重点。最后针对变速器载荷谱编制、虚拟试验和变速器疲劳数值仿真等,提出了其可能的研究热点和方向。

**关键词:** 汽车变速器; 疲劳试验; 疲劳寿命预测

**中图分类号:** TH132.46; U463.2 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2014)06-0689-08

## Review on research and development of fatigue life of automotive transmission

LIU Xin-meng, HU Zhi-liang, XIE Li-yang, HE Xue-hong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** To further promote the development of automotive transmission fatigue life studies, based on the characteristics and applications of fatigue life research methods about the automotive transmission, the current research status of relevant literatures were reviewed, transmission fatigue life was studied from the aspects of the transmission of loads, fatigue test of transmission and fatigue life prediction of transmission. Aiming at the transmission load spectrum, the existing methods of compiling transmission load spectrum were analyzed and summarized. The results indicate that, compiling program load spectrum of transmission is the most accurate and effective method. To fatigue test based on different loads, the load and test results were analyzed. The results indicate that the actual work process can be well simulated by the test based on program load spectrum and the test results are the most accurate. By analyzing several commonly methods of predicting transmission life, the results show that, the method of predicting probability fatigue life can provide more comprehensive data for the study and maintenance of transmission and is the focus of future research. Finally, the possible research focus and directions in the transmission load spectrum, the design of fatigue test-bed, virtual test and numerical simulation of transmission fatigue were put forward.

**Key words:** automotive transmission; fatigue test; fatigue life prediction

## 0 引 言

汽车变速器是汽车的主要传动部件。近年来,随

着汽车技术的完善、车速的提高,汽车变速器的工作条件变得更为恶劣。在汽车行驶过程中,由于变速器的档位不断变化,发动机也不是一直处于最大扭矩状

**收稿日期:** 2013-12-19

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2012AA040104)

**作者简介:** 刘新猛(1989-),男,河南商丘人,主要从事变速器疲劳分析方面的研究。E-mail:lxmeng1108@163.com

**通信联系人:** 何雪泓,女,博士后,副教授,硕士生导师。E-mail:hxhly001@163.com

态,变速器的工作转矩处于经常变化状态,疲劳破坏是变速器最常见的失效形式<sup>[1-3]</sup>。在变速器失效零件中,齿轮失效大概占60%(在变速器失效零件中所占比例最大)轴承失效占19%,齿轮轴失效占10%,箱体、紧固件和油封所占比例最小,分别为7%、3%、1%<sup>[4]</sup>。因此,对变速器疲劳破坏问题的研究非常重要,而其中的重点在于变速器疲劳寿命的分析预测。

由于变速器具有档位多、工况多等特点,现在对于变速器疲劳寿命的研究大都集中在以下几个方面:①变速器载荷的研究;②变速器疲劳试验的研究;③变速器寿命预测的研究。

本研究对变速器寿命的研究进行综述,概括总结变速器寿命研究的关键技术,分析总结当前变速器疲劳寿命研究的难点以及存在的主要问题。

## 1 变速器载荷的研究

要研究变速器的疲劳寿命,首先要知道变速器的载荷,然后才能进行寿命预测。汽车变速器的载荷受发动机、路况、车辆负载等的影响,而且不同的档位变速器的载荷也不同,为了能准确地预测变速器的寿命,对变速器载荷的研究必不可少。目前,计算和试验中常见的变速器载荷有:稳态工况载荷、程序谱载荷和随机载荷。

### 1.1 变速器稳态工况载荷

稳态工况载荷是理想情况下的载荷,通常将变速器所匹配的发动机最大扭矩和相匹配的转速作为变速器的稳态工况载荷,其中倒档载荷为发动机最大扭矩的50%。在QC/T 568-2010汽车机械式变速器总成台架试验方法中<sup>[5]</sup>,给出了乘用车和商用车变速器稳态工况疲劳试验中的各档载荷和循环次数,如表1、表2所示。

但是车辆在行驶中,变速器的运行工况是时间的函数。据统计,车辆在道路上行驶期间,其动态过程占50%以上,汽车在起步、换档、制动、加减速、路况发

生变化时变速器所承受的载荷处于动态过程<sup>[6]</sup>。随着汽车行业的发展,对变速器性能的要求越来越高,如果在试验和计算中还按稳态工况载荷进行计算,结果就会存在误差,所以稳态工况载荷已经不能满足变速器寿命预测的要求。

### 1.2 变速器随机载荷

变速器在实际工作中所受的载荷为随机载荷,为了使变速器的寿命预测结果更接近实际寿命,需要利用随机载荷进行试验和寿命计算。在变速器试验和计算中常用的随机载荷有:实测载荷和伪随机载荷,即:

#### 1.2.1 实测载荷

研究者在目标车辆变速器上加装扭矩和速度传感器,记录下扭矩—时间和速度—时间历程,用于变速器寿命预测,从而准确地再现汽车道路行驶工况。这种载荷使预测结果准确,但费时较长,需要专业的设备,而且所测的数据十分有限,不能完全代表变速器的全部载荷—速度历程。

#### 1.2.2 伪随机载荷

研究者对采集到的变速器载荷—时间历程进行数据处理,得到载荷时间的峰—谷值序列,形成峰—谷值二维矩阵,矩阵中的元素表示峰—谷出现的次数。去除小载荷后对矩阵中其他数据按新的随机顺序重新排列,并且每一新周期都另按新的随机顺序进行重新编排。这种方法可以代表实际的载荷,而且可以大大节约时间。但是由于其是根据实测载荷产生的伪随机载荷,它同样不能代表变速器的全部载荷—速度历程。

### 1.3 变速器程序谱载荷

为了提高变速器寿命预测的准确性,要利用能反映变速器真实工作状态的载荷进行寿命预测。如何处理变速器实际工作中的载荷,将其用于疲劳寿命预测中进行预测,已成为研究的重点。目前研究者主要采用雨流法对实测载荷进行统计,然后将统计的载荷谱用于变速器的疲劳寿命预测。目前,为了得到符合

表1 变速器疲劳寿命试验输入转矩

档位	1档	2档	3档	4档	5档	6档	倒档
转矩( $M_{e\max} \times 100\%$ )	100	100	100	100	100	100	50

表2 变速器寿命试验各档循环次数

变速器类型	寿命指标—输入轴循环次数( $\times 10^5$ )							
	1档	2档	3档	4档	5档	6档	倒档	
乘用车 变速器	5档变速器	3.5	20	72	100	120	/	1.5
	6档变速器	3.5	20	72	100	120	180	1.8
商用车 变速器	5档变速器	15	50	72	直接档	100	/	1.5
	6档变速器	15	50	72	100	直接档	120	1.8

实际工况的变速器程序谱载荷,一些学者做了很多相关的研究。符代竹<sup>[7]</sup>通过选择典型行驶路面,取好、中、坏3种路面进行载荷采集。用传感器分别对速度和扭矩数据进行采集,最后用雨流计数法对速度和扭矩载荷进行统计处理,得到变速器的程序载荷谱。王林刚<sup>[8]</sup>在对变速器的疲劳试验研究时通过实车测试得到道路载荷,将实测的道路载荷信号谱经过信号预处理,利用雨流法统计处理,得到静态程序载荷谱,然后对整车的动力学模型进行分析,利用动力学方程实时计算得到变速器动态载荷谱。北京理工大学的陈欣等人<sup>[9]</sup>对传动系多工况随机载荷谱的统计方法进行了分析与研究,主要包括幅值和均值的二维分布函数的获得及检验、多工况的载荷频次的分配问题,以及从原始载荷谱向程序载荷谱转换过程中的若干问题和相应的解决办法。陈清红根据合肥城市典型道路工况下的车速样本,通过对车进行力学分析得出变速器的输入扭矩与车速之间的关系,为变速器载荷的获取提供了一种新的方法,即:

$$T_i = \frac{(G \cdot f + G \cdot i + \frac{C_d \cdot A}{21.15} \cdot \mu_a^2 + \delta \cdot m \cdot \frac{du}{dt}) \cdot r}{(i_g \cdot i_0 \cdot \eta_r)} \quad (1)$$

式中:  $T_i$ —器输入扭矩;  $G$ —汽车重力, N;  $f$ —滚动阻力系数;  $i$ —道路坡度;  $C_d$ —空气阻力系数;  $A$ —迎风面积;  $\mu_a$ —汽车与空气相对速度, 无风时为车速;  $\delta$ —汽车旋转质量换算系数,  $\delta > 1$ ;  $m$ —汽车总质量, kg;  $i_g$ —变速器传动比;  $i_0$ —主减速比;  $\eta_r$ —传动效率。

彭为、余天明等人<sup>[10-11]</sup>研究了道路模拟试验中道路载荷谱的选择方法,在对实测道路载荷谱进行名义疲劳损伤计算的基础上,根据统计学原理,提出了一种道路载荷谱的实用选择方法。郭虎等人<sup>[12]</sup>在对汽车前桥研究时测定其在山区公路、一般沥青公路及汽车试验场路面的道路载荷谱利用雨流法统计各路面载荷谱的均值、幅值计数结果,然后利用数理统计的方法得到了各路面的载荷分布数学模型,为以后前桥的疲劳设计、试验和寿命预测奠定了基础。这种方法获得的载荷具有各种路面的工况,包含的载荷信息较为全面,可以为变速器的程序载荷的研究提供参考。

变速器程序载荷谱的编制,有助于提高变速器寿命预测结果的可靠度,但是现在采集的只是针对特定地点的载荷,汽车换一个地点行驶变速器可能会承受不同的载荷,所以目前的程序载荷谱不能完全满足汽车变速器寿命预测的要求。如何才能得到包含更多信息的载荷,使其更适用于变速器寿命预测,还有待

进一步研究。

## 2 变速器疲劳试验的研究

汽车变速器试验贯穿于汽车变速器的开发、研究和生产等各个阶段,是研究汽车变速器的必要手段。变速器疲劳试验包括路谱实车试验和台架试验。路谱实车试验是将变速器安装到目标车辆上在随机变载荷作用下发生疲劳破坏的试验,该方法较全面地反映了变速器的实际工作情况,可以准确地预测变速器的寿命,但试验周期长、成本高,不能适应规模化需求。目前比较常用的是变速器台架试验<sup>[13]</sup>,我国对变速器的台架疲劳试验可以参照以下相关标准:QC/T 568-2010 汽车机械式变速器总成台架试验方法、QC/T 29063-92 汽车机械式变速器总成技术条件<sup>[14]</sup>和ZB/T 21005-1985 微型货车变速器台架试验方法<sup>[15]</sup>等。

根据我国国家标准,变速器的疲劳寿命试验设备一般采用开式总成试验台或闭式总成试验台<sup>[16-17]</sup>。用扭矩转速测量仪监视输入轴的扭矩和转速,当转速接近或小于1 450 r/min时可取1 450 r/min,试验油温为(80±5)℃或按设计工作油温确定。变速器的输入轴输入扭矩和试验循环次数(输出轴)应符合表1和表2中的规定。

变速器疲劳寿命试验按载荷类型可分为:稳态工况加载的疲劳试验、随机载荷加载的疲劳试验和程序谱载荷加载的疲劳试验,其中基于程序谱载荷的变速器疲劳试验是现在研究的重点。

### 2.1 稳态工况加载的疲劳试验

稳态工况加载试验要求的试验设备简单,试验结果能满足工程要求,是变速器试验常用的一种方法。

周方等人<sup>[18]</sup>对手动变速器的试验进行了研究,对比分析了MSX8-7801、台湾标准及ES-X18123之间的差异,制定了手动变速器疲劳试验的流程。卢曦等人<sup>[19]</sup>应用轿车变速箱总成和单对螺旋锥齿轮闭式试验台,分别对国产某轿车主减速器齿轮进行疲劳试验。试验结果表明,螺旋锥齿轮闭式试验台试验的结果和变速箱总成试验台试验的结果相差很大,因此不能直接用闭式试验台疲劳试验的结果估算变速箱总成中主动螺旋锥齿轮的疲劳强度和疲劳寿命,为变速器试验方法的研究提供了参考。

由于变速器在实际工作中所受的载荷为随机载荷,采用稳态工况载荷进行试验所得的结果不准确。为了估算变速器的使用寿命和进行可靠性分析,试验中的载荷要能反映变速器真实工作状态。随着研究

的不断深入,为提高变速器的性能及产品的可靠性,采用稳定工况方式已不能满足要求。

## 2.2 随机载荷加载的疲劳试验

对于承受随机载荷的变速器,最好能进行随机疲劳试验。对于随机疲劳试验有3种常用的试验方法:载荷复现法、伪随机疲劳试验和功率谱密度函数法。将变速器随机载荷谱利用试验台加载到变速器上进行试验,这种试验得到的结果更接近实际情况,但是随机载荷的获取比较复杂,而且随机疲劳试验机价格昂贵,所以目前这种方法在变速器试验中用得较少。

## 2.3 程序谱载荷加载的疲劳试验

由于变速器在实际工作中所受的载荷是随机载荷,最好进行随机疲劳试验。但随机疲劳试验必须使用昂贵的随机疲劳试验机,试验费用高,所以常将其转化为程序载荷,以进行程序控制疲劳试验。进行程序疲劳试验时,研究人员将程序载荷谱缩小为程序块,并按一定的加载顺序进行程序疲劳试验。

针对我国变速器进行的基于程序谱载荷加载的疲劳试验,国内也进行了相关的研究。王林刚在对变速器的疲劳试验研究时针对汽车变速器特征,将处理编辑后的道路载荷谱引入到变速器疲劳耐久性试验中,得到了更符合实际的疲劳寿命。符代竹通过选择典型行驶路面,取好、中、坏3种路面采集变速器载荷信息,并用雨流计数法对载荷进行编谱。最后通过试验台架将载荷谱加载到变速器上,以进行变速器的疲劳耐久性试验。陈清红根据合肥市典型道路工况下的车速样本,通过对车进行力学分析得出变速器的输入扭矩与车速之间的关系,根据合肥市汽车道路行驶工况得到载荷谱,进行加载试验研究。钱锋<sup>[20]</sup>研究如何将计算机工程软件ADAMS、NASTAN、UG等结合起来形成计算机模拟试验系统,用以解决汽车零部件新产品开发中的疲劳试验方案及制定如何来保证整车路试的问题。通过模拟试验可以确定零件的疲劳寿命,为变速器虚拟试验提供了一种新思路。罗小青<sup>[21]</sup>以虚拟仪器技术、传感器技术和控制技术为基础,结合测功机、采集卡和驱动电机等硬件设备,实现了自动变速器工作性能检测和分析。蒋强<sup>[22]</sup>基于SolidWorks软件开发了摩托车无级变速器的虚拟实验系统,为变速器试验技术的研究提供了一种新的思路。

目前,针对各国变速器总成疲劳寿命试验的评定指标是不同的,我国QC/T29063-925汽车变速器总成技术条件规定:变速器按QC/T568-2010规定的规范进行试验以后,齿面不允许出现面积为 $4\text{ mm}^3$ 点蚀或深度超过 $0.5\text{ mm}$ 的点蚀凹坑。但德国、日本和英美等

国家规定:当变速器按规范进行试验以后,①变速器总成必须具有正常的使用功能;②齿轮、轴承允许出现明显的损坏,但是不允许超过规定的极限<sup>[23]</sup>。对比国内外试验评定指标,可以发现我国的QC/T29063-92评定指标高于国外指标。

综上所述:稳态工况加载试验操作简单,但是不能满足现代汽车制造业发展的需要,随着汽车行业的发展,这种试验会被慢慢淘汰<sup>[24]</sup>。随机疲劳试验真实性比较好,但是过程复杂,需要处理大量的数据并需要进行验证,在实际处理的过程中,需要投入大量的人力和物力,因此目前基于随机载荷加载的试验较少。基于程序谱载荷的疲劳试验可以很好地模拟随机载荷,而且试验结果准确,因此基于程序谱载荷的疲劳试验是变速器疲劳可靠性检测的重要方法。

## 3 变速器疲劳寿命预测的研究

通过试验法来预测变速器的寿命虽然结果准确,但耗费时间长,费用较高,能得到的样本有限,特别是在变速器的研发阶段,依靠试验法会极大地延长研发周期,所以在变速器研发阶段研究者广泛采用计算方法预测变速器寿命,在计算结果满足要求后,再用试验法做最后的检验。

经典的疲劳寿命预测模型主要有:名义应力法、局部应力应变法、应力场强法、断裂力学法和能量法等。各种疲劳寿命估算方法由于出发点和依据不同,计算的疲劳寿命各有差异,有一定的适用范围,不能完全互相取代。目前对于变速器的疲劳寿命预测,没有固定的寿命预测模式,变速器疲劳大部分属于高周疲劳,应用比较广泛的主要是名义应力法和概率疲劳寿命算法。

### 3.1 基于名义应力法的疲劳寿命预测

目前,变速器疲劳寿命的计算主要针对单个零部件进行,如齿轮、轴承、齿轮轴等。研究者根据变速器所载荷,对零部件进行受力分析,利用公式求解危险点应力,然后利用名义应力法进行寿命预测。在变速器工作时,齿轮和轴承高速旋转,承受不同工况的载荷,极易发生疲劳失效。目前,对变速器疲劳失效的研究主要是针对在齿轮和轴承。

#### 3.1.1 变速器齿轮寿命的计算

变速器是个复杂的齿轮传动系统,在变速器损坏零件中,齿轮失效大概占60%,在变速器失效零件中所占比例最大,因此关于变速器齿轮寿命的研究比较多。

近年来随着计算机技术的快速发展,数值仿真技

术在许多领域得到了广泛应用,现在疲劳研究的一个热点,就是数值仿真技术在疲劳载荷模拟和疲劳应力模拟中的应用。目前,有限元疲劳寿命仿真技术已经成为变速器设计开发中一种重要的分析工具。有很多高校以及汽车行业的专家对齿轮的强度和寿命进行了深入研究,并取得了一定的成果。

Tiande Wang<sup>[25]</sup>和 Ian Howard<sup>[26]</sup>在齿轮啮合的有限元分析方面进行了大量的研究,分析了直齿轮传动过程中啮合刚度的变化,应用有限元软件 ANSYS,建立了直齿轮的全齿模型,对齿轮的啮合过程进行了有限元分析,得到了齿轮啮合过程的接触应力。西北工业大学的袁菲<sup>[27]</sup>对某火炮传动系统齿轮副寿命预测时,将实测的随机载荷进行编谱,应用有限元法得到应力谱,最后根据 Miner 损伤累积原则预测变速器各个齿轮副的疲劳寿命。同济大学章文强<sup>[28]</sup>在对燃料电池轿车变速器齿轮进行研究时,更精确地计算齿轮的疲劳寿命,建立齿轮三维模型,根据变速器实际载荷谱,求得当量载荷,应用有限元方法对齿轮的接触应力进行仿真计算,根据 Miner 准则对齿轮的疲劳寿命进行计算,得到齿轮的接触应力和疲劳寿命。但是等效的当量载荷与实际载荷的结果存在误差。浙江理工大学夏云清<sup>[29]</sup>在对变速器齿轮研究时,利用非线性接触有限元法对变速器齿轮接触的全过程进行数值模拟,运用  $3\sigma$  法则和概率统计法编制了程序载荷谱,通过有限元分析和疲劳寿命预测分析,得出与实际工作状态基本一致的分析结果,为齿轮寿命预测提供了新的方法和理论。谢娟娟在对 30 t 重卡变速器关键部件疲劳寿命的研究中,建立了变速器的三维模型,对变速器的一对常啮合齿轮进行了疲劳寿命分析,并根据变速器的试验载荷,运用 Design-life 软件计算了齿轮的寿命。楼建勇<sup>[30]</sup>利用故障诊断技术对齿轮传疲劳断裂进行研究,建立了齿轮传动系统的动力学模型,为变速器齿轮疲劳断裂寿命的研究提供了理论支持。

随着有限元技术的发展,协同仿真技术是未来发展的趋势,通过多种大型商用软件的无缝集成作业,构建协同仿真平台,实现变速器疲劳寿命预测。

南京理工大学的张剑雄<sup>[31]</sup>用 CATIA 软件,建立了汽车变速器倒档齿轮的三维模型,运用 Hyperworks 软件完成了有限元分析、定义单元属性、网格划分等前处理过程,用 MSC.Nastran 对汽车变速器倒档齿轮进行了有限元静态分析。在静力学分析的基础上,将加载过程输入到疲劳分析软件 MSC.Fatigue 中,对汽车变速器倒档齿轮进行疲劳寿命的分析,得出疲劳寿命的分布情况,并对疲劳失效部位进行原因分析与研究。

张景柱<sup>[32]</sup>构建了传动箱被动齿轮寿命预测的协同仿真平台,通过 4 种商业软件的集成,对传动箱齿轮的疲劳寿命进行了预测。魏忠良<sup>[33]</sup>利用 Pro/E、MSC.Patran/Nastran、MSC.Fatigue 构建了齿轮寿命预测协同仿真平台,有机整合了各种商用软件,实现了传动齿轮的疲劳寿命预测。

### 3.1.2 变速器轴承寿命的计算

在变速器实际工作中,轴承在非稳定工况下工作。汽车变速器轴承所受载荷主要受以下因素影响:①发动机输出转矩;②不同的档位受力状况不一样,并且每个档位的使用情况也不同。汽车行驶的实际工况比较复杂,换挡频繁,发动机输出转矩不断变化,因此变速器轴承受力的大小、方向是不断变化的,很难确定其实际载荷,在进行变速器轴承寿命计算时,大都采用经验公式求出各个档位的当量载荷,然后进行寿命计算。

张祖隆<sup>[34]</sup>在对货车变速器可靠性设计时,根据各档位的工作时间和各档的转速提出了一种关于变速器轴承当量载荷的计算方法,为轴承寿命计算提供了参考。广西工学院的韦志林<sup>[35]</sup>在损伤积累假说的基础上,根据各档位使用情况,确定轴承的当量动载荷,以此作为其寿命校核的依据,计算了变速器轴承的疲劳寿命。郑泉<sup>[36]</sup>以变速器轴承为研究对象,针对变速器轴承进行了力学分析,并在此基础上推导了变速器各轴承的受力公式,并开发了轴承计算与选型软件。王丽娟<sup>[37]</sup>针对汽车变速器轴承的应用工况及特点,分类介绍了汽车变速器轴承的寿命计算方法,并详细介绍了轴承轴向力的计算方法。张吉健<sup>[38]</sup>利用二参数威布尔分布建立了轴承各元件的寿命可靠性模型,提高了汽车轮毂轴承寿命预测精度。张明<sup>[39]</sup>提出了一种在任意使用载荷下航空航天轴承接触疲劳寿命的分析方法,利用轴承线接触应力公式和等寿命转化公式对载荷输入数据进行转化,然后利用高周疲劳的常用经验公式,经修正得到任意使用载荷下的轴承接触疲劳寿命。

利用有限元法计算轴承寿命是一种重要的方法,但是由于变速器档位较多,而且不同的档位轴承所受载荷不同,对变速器轴承的有限元计算比较复杂,目前利用有限元法对变速器轴承的研究较少。

为了进一步研究变速器轴承寿命计算,可以参考其他机器轴承寿命的计算方法,如吕华强等人<sup>[40]</sup>应用 Monte-Carlo 法对实验进行了模拟,并编写计算程序,建立了滚动轴承疲劳寿命的预测系统,实现使用计算机对滚动轴承的寿命进行计算、数值模拟和预测。王露<sup>[41]</sup>对轮毂轴承的疲劳寿命进行了仿真计算,但轴承

外载荷的加载方式比较单一,随后也仅做了轴向加载这一种加载方式的疲劳试验。翟保超<sup>[42]</sup>对风力发电机组主轴轴承做了故障分析和疲劳寿命仿真方法的研究,利用有限元软件和Fe-Safe疲劳软件对主轴轴承进行了寿命估算。

### 3.1.3 变速器其他零部件寿命的计算

变速器其他零部件如齿轮轴、箱体、紧固件和油封等相比于齿轮和轴承,其寿命较长,在变速器失效零件中所占比例较少,对这些零部件寿命计算的研究较少。

Medepalli等人<sup>[43]</sup>对疲劳寿命分析预测所需要的路面载荷进行分析讨论,利用计算机在变速器设计阶段就对其在实际中所行驶的道路进行预测路面载荷状况,然后利用MSC.ADAMS进行仿真。Kubilay Yay等人<sup>[44]</sup>通过实测载荷—时间历程,利用nCode-ICE-flow软件将从特定的实际道路上采集到的载荷信号进行处理,然后进行疲劳损伤的计算。胡祝田<sup>[45]</sup>以某型汽车变速器第一齿轮轴为研究对象,结合变速器的工作状况系统的分析了该齿轮轴及其轮齿的失效形式,研究了变速器第一齿轮轴疲劳寿命预测方法,并利用MSC.Fatigue软件计算该齿轮轴的疲劳寿命。湖北汽车工业学院吴胜军、徐有良等人<sup>[46]</sup>利用UG结构分析模块和ANSYS通用疲劳分析模块相结合的方法,对汽车变速器第一轴进行了疲劳分析。陈婷<sup>[47]</sup>建立了某轻型货车变速器箱体有限元模型,过实车强化坏路试验采集了整车轮心垂直方向振动加速度信号,利用MSC.ADAMS进行动力学仿真计算,获得了箱体与车架连接点的载荷时间信号。将各载荷通道的应力分布和载荷时间历程输入MSC.Fatigue,得到了箱体的疲劳寿命结果。霍福祥等人<sup>[48]</sup>以某轿车手动变速器壳体为研究对象,考虑轴承、齿轮轴刚度的影响,应用有限元方法计算壳体在所有档位下的应力分布,并进行了分析评价。然后结合轿车实际使用工况下的变速器工作载荷谱,应用多轴疲劳理论预测整个壳体的损伤分布,获得了壳体寿命。

综上所述:目前对变速器疲劳寿命的研究主要是对关键部件齿轮和轴承的研究,主要是结合程序载荷谱,利用有限元软件进行计算,并且随着有限元技术的发展,利用多种软件的协同仿真来计算变速器各部件寿命是未来研究的趋势。

## 3.2 变速器概率疲劳寿命预测

在常规寿命计算中是将与剩余寿命有关的参数,例如零件尺寸、载荷、材料特性等当作确定性的量来处理。然而工程实际中这些参数往往不是确定值,而且预测得到的寿命是很分散的,是具有一定分布特征

的随机量。因此,要对构件的安全使用作出更符合实际的评价,就迫切需要引入概率统计理论,以使构件的疲劳寿命预测有一个可靠的定量概念。如果已知各参数的分布规律,并采用概率方法考虑参数的随机性,就可以得到具有一定可靠度的剩余寿命<sup>[49]</sup>。

汽车变速器通常采用批量生产,每个变速器零件的尺寸、形状和安装条件都有一定的差异。使得一批零件即使在同一恒幅循环载荷的作用下产生的应力仍然有一定的差异。如轴直径的差异而产生不同的轴应力;齿形的误差使齿根产生不同的应力;不同的偏心量使齿轮轴产生不同的离心力等。这种应力的离散性可以通过统计得到一分布,称这种分布为应力的横向分布。而所有使疲劳应力产生横向分布的因素称为横向影响因素。对于某一确定的变速器零件来说,可以认为零件的尺寸、形状、安装条件等都是确定的。当这个零件受复杂的载荷—时间历程时,其危险点的应力是一个随机变量。通过对这个应力进行统计分析得到一个应力分布。称这种应力分布为疲劳应力的横向分布,使疲劳应力产生纵向分布的因素称为纵向影响因素<sup>[50-51]</sup>。

影响变速器疲劳应力的横向因素和纵向因素是同时存在的,由于横向影响因素的分布的确定比较困难,而且同时考虑横向和纵向因素时计算困难,在变速器疲劳寿命预测时很多研究者只考虑了纵向影响因素,忽略了横向因素的影响。目前对变速器的概率疲劳寿命研究较少,但有很多针对齿轮系统的概率疲劳寿命的研究,可以给变速器的研究提供参考。

普度大学的S.S.Rao<sup>[52]</sup>为提高汽车变速器系统的可靠性,在设计过程中考虑了动力传动链的最薄弱的轴和齿轮的环节,其主要受到弯曲疲劳和表面磨损的影响,此外还考虑了一些变量,包括传输功率、齿面宽度、花键长度以及材料特性等并且研究其参数变化对整体变速器系统可靠性的影响。乐晓斌等人<sup>[53]</sup>提出以修正的材料P-S-N曲线为基础,采用传统的名义应力法和Miner法则估算双圆弧齿轮的疲劳寿命。袁菲对某火炮传动系统齿轮副寿命预测时,建立了P-Sa-Sm-N曲面方程,求得随机载荷作用下的齿轮副的概率疲劳寿命。陶振荣<sup>[54]</sup>从齿轮接触疲劳强度出发,提出了一种改进的齿轮强度计算方法。将常规的设计方法与可靠性设计方法相结合,计算齿轮在使用寿命期间的可靠度。这种方法对于变速器齿轮研究具有十分重要的意义。赵富强首先利用Abaqus计算各档齿轮的应力,根据存活率为99%时,考虑几何尺寸、温度环境以及非对称循环因素的影响设定并修正材料S-N曲线,利用FE-safe软件运用修正的疲劳寿命损伤

理论对变速器各档齿轮进行疲劳寿命预测,并与变速器疲劳试验结果进行了对比,为等寿命周期设计提供数据支持。

由于变速器是汽车的关键部件,而且变速器所承受载荷比较复杂,基于概率统计的疲劳寿命计算方法可以用于预测变速器破坏的概率和可靠寿命,为变速器的研发和维修提供更全面的数据,因此,基于概率统计的变速器整体疲劳寿命计算是未来研究的方向。

## 4 变速器疲劳寿命研究的发展方向

随着汽车行业的发展,要求汽车变速器的寿命越来越长,因此对变速器的研究会不断进行。根据对目前研究现状的分析,以下几个方面可能会成为未来研究的重点:

(1) 要进一步加强变速器载荷的研究,针对我国的地理形势,通过统计各个地方的载荷数据,整合出一套变速器寿命预测的载荷谱,作为变速器后期研究的基础。

(2) 要加强对变速器试验台的研究,开发能模拟实际随机载荷的、价格低、精度高的试验台,替代变速器的实车试验。虚拟试验技术在国内还是一个崭新的技术,目前变速箱虚拟试验只有国外有MTS的VTL虚拟仿真包含该试验。可以通过ADAMS等仿真软件构建发动机、变速器、转向机构等在内的参数化汽车,通过LABWINDOW/CVI等软件构建虚拟仪器,再以VC等软件开发汽车行驶虚拟场景进行虚拟试验,实现变速器的虚拟试验。

(3) 目前对变速器疲劳特性的研究,普遍做了大量的简化或者针对具体的部件进行耐久性的研究,如齿轮、轴类、轴承等。但变速器总成作为一个复杂系统,各部件之间相互影响,彼此关联,应该作为一个整体作系统地研究,可以利用UG等三维软件建立变速器整体模型,通过ADAMS等动力学仿真软件计算变速器工作载荷,将计算载荷导入ANSYS等有限元软件进行寿命计算。以这些大型的商业软件为基础,构建一个变速器设计、校核、优化、寿命预测于一体的协同仿真平台。

(4) 随着对变速器性能要求的不断提高,变速器概率疲劳寿命预测在工程中的应用越来越广泛,是未来研究的趋势。可以根据变速器各个零件的尺寸、精度、载荷和安装情况能,全面考虑各个零件应力的横向和纵向影响因素,求出每个零件的可靠度寿命,再根据变速器的整体情况,结合可靠度计算理论,求得变速器整体结构的可靠度寿命。希望能开发出一款

针对变速器的疲劳寿命预测软件,将其集成到有限元软件中,实现对变速器整体可靠度寿命的求解。

## 参考文献(References):

- [1] 姚占辉,方海峰. 汽车变速器发展趋势[J]. 汽车与配件, 2011(33):40-43.
- [2] 张炳力,赵 韩,金朝勇,等. 汽车自动变速器研究现状及展望[J]. 中国机械工程,2006,17(S2):417-420.
- [3] UMEZAWA K. Vibration of power transmission helical gear with narrow face width[J]. ASME Paper, 1984(84):150-159.
- [4] 谢娟娟. 30吨重卡变速器关键部件疲劳寿命的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2012.
- [5] 全国汽车标准化技术委员会. QC/T 568-2010机械式变速器台架试验方法[S]. 北京:中华人民共和国工业和信息化部,2010.
- [6] 陈清红. 基于动态载荷的变速器疲劳试验台控制系统设计[J]. 机械工程师,2010(5):3-5.
- [7] 符代竹. 基于载荷谱的MT变速器疲劳设计及试验研究[D]. 重庆:重庆大学机械学院,2006.
- [8] 王林刚. 基于道路载荷谱的汽车变速器加载试验技术的研究[D]. 合肥:合肥工业大学机械与汽车工程学院,2012.
- [9] 陈 欣,项昌乐. 车辆传动系多工况随机载荷谱的统计处理方法[J]. 汽车工程,1999,21(4):232-237.
- [10] 彭 为,靳晓雄,孙士炜. 道路模拟试验中道路载荷谱的选择方法[J]. 上海工程技术大学学报,2004,18(1):6-9.
- [11] 余天明. 基于模拟载荷的变速器疲劳加载试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学机械与汽车工程学院,2011.
- [12] 郭 虎,邓耀文,吴慧敏,等. 车辆随机载荷谱的统计分析[J]. 汽车科技,2003(6):43-45.
- [13] 赵富强. 商用车变速器疲劳实验特征辨识与寿命预测[D]. 太原:太原理工大学机械工程学院,2012.
- [14] QC/T29063-925汽车机械式变速器总成技术条件[S].
- [15] ZB/T 21005-1985微型货车变速器台架试验方法[S].
- [16] 周大容. 浅谈汽车变速器试验[J]. 科技创新导报,2012(14):53-54.
- [17] 王英娇. 乘用车机械式变速器(MT)试验加载技术的研究[D]. 合肥:合肥工业大学机械与汽车工程学院,2007.
- [18] 周 方,胡子涛. 手动变速器的试验方法[J]. 海峡科学,2010(12):9-12.
- [19] 卢 曦,郑松林. 轿车主减速器齿轮疲劳寿命的试验研究[J]. 机械强度,2008,30(4):664-667.
- [20] 钱 锋,张 治. 汽车零部件计算机模拟疲劳试验研究[J]. 北京汽车,2002(4):3.
- [21] 罗小青. 基于虚拟仪器的自动变速器测控系统研究[J]. 机械科学与技术,2010,29(4):509-513.
- [22] 蒋 强,杨 英,吴 敏. 基于SolidWorks软件的摩托车无级变速器虚拟实验系统开发[J]. 机电工程技术,2007,36(3):47-48.
- [23] 唐天元. 汽车试验工程[M]. 北京:国防工业出版社,2006:324-330.

- [24] 崔华芳. 变频调速技术在变速箱试验台上的应用[J]. 建筑机械, 2006(3):46-49.
- [25] WANGAND J, HOWARD I. The torsional stiffness of involute spur gears [J]. **Mechanical Engineering Science**, 2004, 218(1):131-142.
- [26] HOWARD I, JIA Sheng-xiang, WANG R. The dynamic modeling of a spur in mesh including friction and a crack. mechanical systems and signal processing [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**. 2001, 15(5):831-853.
- [27] 袁菲, 徐颖强. 某火炮传动系统随机载荷下齿轮疲劳寿命预测方法研究[D]. 西安:西北工业大学机电学院, 2006.
- [28] 章文强, 盛云, 于莉, 等. 燃料电池轿车变速器齿轮接触应力分析及疲劳寿命计算[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(4):36-39.
- [29] 夏云清. 装载机变速器齿轮的非线性接触与疲劳寿命分析[D]. 杭州:浙江理工大学机械与自动控制学院, 2010:1-7.
- [30] 楼建勇, 林江. 齿轮传动装置轮齿疲劳裂纹的故障诊断[J]. 机电工程, 1997, 14(6):118-120.
- [31] 张剑雄. 变速器倒档齿轮疲劳及其加工工艺的研究[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院, 2013.
- [32] 张景柱, 崔清斌, 徐诚. 基于协同仿真的传动箱齿轮疲劳寿命预测方法[J]. 兵工学报, 2007, 28(12):1424-1427.
- [33] 魏忠良, 陈玉振, 岳振兴. 传动齿轮疲劳寿命的仿真分析[J]. 电子机械工程, 2010(6):56-58.
- [34] 张祖隆, 徐志伟. 货车变速器滚动轴承的可靠性计算[J]. 汽车工程, 1997, 19(4):240-245.
- [35] 韦志林. 汽车变速器轴承寿命的校核计算[J]. 广西工学院学报, 2000, 11(2):37-40.
- [36] 郑泉, 陈黎卿. 汽车变速器轴承受力分析与软件开发[J]. 机械传动, 2009, 33(3):88-90.
- [37] 王丽娟, 白冰. 汽车变速器轴承的寿命计算[J]. 轴承, 2013(3):5-7.
- [38] 张吉健, 王秋成. 汽车轮毂轴承的可靠性建模分析[J]. 机电工程, 2009, 26(9):94-96.
- [39] 张明, 李志勇. 航空航天轴承接触疲劳寿命分析[J]. 机械科学与技术, 2012(6):19.
- [40] 吕华强, 王黎钦, 古乐, 等. 滚动轴承疲劳寿命数值仿真技术的研究[J]. 机械研究与应用, 2005, 18(5):42-44.
- [41] 王露. 轮毂轴承多工况疲劳寿命建模与数值仿真[J]. 杭州:浙江大学机械工程学系, 2009.
- [42] 翟保超. 大型风力发电机组主轴轴承故障分析及疲劳寿命数值模拟[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院, 2011.
- [43] MEDEPALLI S, RAO R. Prediction of road loads for fatigue design, a sensitivity study [J]. **International Journal of Vehicle Design**. 2000, 23(1/2):161-175.
- [44] KUBILAY Y, EREKE I M. Technical University of Istanbul. Fatigue Strength of an Urban Type Midi Bus Vehicle Chassis byUsing Fem Analysis and Accelerated Fatigue Life Test[N], SAE Paper, 2009-01-1453.
- [45] 胡祝田, 宋守许, 刘志峰. 变速器齿轮轴有限元及动力仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(8):59-62.
- [46] 吴胜军, 徐有良. 基于ANSYS汽车变速箱主轴的疲劳分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2008, 35(5):32-33.
- [47] 陈婷, 赵文峻, 马天飞. 路面激励下变速器箱体疲劳寿命预估方法研究[J]. 汽车技术, 2012(11):30-34.
- [48] 霍福祥, 康一坡, 魏德永, 等. 应用实测载荷谱预测轿车变速器壳体寿命[J]. 机械设计, 2012, 29(4):84-88.
- [49] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社, 1986.
- [50] 徐灏. 概率疲劳[M]. 沈阳:东北大学出版社, 1994.
- [51] 邱炎. 四立柱振动台架在车辆疲劳试验中的应用[J]. 机电技术, 2013(1):58-59.
- [52] RAO S S, TJANDRA M. Reliability-based design of automotive transmission systems [J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 1994.46(2):159-169.
- [53] 乐晓斌, 胡宗武, 范祖尧. 渐开线齿轮接触疲劳可靠度计算[J]. 起重运输机械, 1994, 31(1):7-11, 22.
- [54] 陶振荣. 齿轮强度计算方法的改进[J]. 机械科学与技术, 1990(1):2.

[编辑:罗向阳]

## 本文引用格式:

刘新猛, 胡职梁, 谢里阳, 等. 汽车变速器疲劳寿命的研究与发展综述[J]. 机电工程, 2014, 31(6):689-696.

LIU Xin-meng, HU Zhi-liang, XIE Li-yang, et al. Review on research and development of fatigue life of automotive transmission[J]. Journal of Mechanical &amp; Electrical Engineering, 2014, 31(6):689-696.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>