

我国汽车齿轮传动系统基础试验与测试技术发展现状

张敬彩

中国机械科学研究总院集团有限公司 北京 100044

摘要：试验与检测贯穿齿轮传动产品的全生命周期，是产品质量保证与提升重要的手段，是汽车传动产品设计、制造过程中不可或缺的一部分。未来我国的汽车齿轮传动试验检测技术与装备将朝着高端化、平台化、智能化发展，为提升企业自主创新能力和正向设计、制造一体化水平提供更好的保障。

关键词：关键词 汽车齿轮传动；试验检测；测试装备

我国汽车齿轮传动试验与检测技术经过数十年的发展，已基本形成包含基础试验、开发试验、对标试验、下线检测、在线监测为一体的覆盖产品全寿命周期的试验与检测体系。

基础试验及其发展概况

汽车齿轮传动产品的基础试验主要目的是为齿轮设计和质量升级提供基础数据（疲劳性能、动态性能等），支持优化材料、工艺、润滑油以及进行齿轮抗疲劳设计、制造技术研究。齿轮传动相关基础试验通常包括齿轮承载能力试验，齿轮传动误差试验等，这类试验一般不以具体产品为目标，而是选择具有代表性的被试零件进行测试，得到的试验数据具有一定的普遍应用价值。

在我国，真正全面开展齿轮承载能力试验研究起步较晚。20世纪80年代初，以郑州机械研究所、北京

钢铁学院（现北京科技大学）和哈尔滨工业大学等为核心的研究团队，用3年时间进行了200多对齿轮的运转试验，对我国软/硬齿面齿轮的承载能力进行了全面的试验测试与对标（ISO标准）研究，这是至今为止的一次较大规模的齿轮试验研究，形成了一定的基础数据，奠定了基础试验的试验方法。

此后，一些软/硬齿面钢齿轮的极限应力测定、齿轮的变形和刚度测定、油膜厚度及齿面温度测定等都取得了一些成果。在承载能力试验设备研制方面，CL-100、JG-150等疲劳试验机制造已经形成小批量规模。试验规程的标准化工作也加快了步伐，基于ISO的接触疲劳强度、弯曲疲劳强度和齿轮胶合承载能力的国家标准于20世纪90年代初相继颁布。

但在随后较长一段时间里，国家在基础研究领域投资减少，对基础试验的重视程度降低，导致齿轮承载能力试验研究基本处于停滞状态，因此我国的齿轮

承载能力测试与抗疲劳设计制造技术研究水平与国外先进水平相差甚远。与先进国家同类产品相比，传递同样转矩，我国齿轮传动产品的体积、质量比国外大30%~50%甚至更多；同样体积的产品则传递转矩明显偏低，振动噪声及可靠性水平也有较大差距。

近年来，在企业发展需求推动和国家政策的支持下，齿轮基础试验在汽车行业得到逐步重视，部分高校、研究院所和高端、大型汽车齿轮传动企业已重启齿轮承载能力测试研究，获得的试验数据已能初步指导正向设计的开展与制造工艺的优化，推动了设计制造一体化进程，对提高产品可靠性起到了有效作用。

企业对试验检测的重视也推进了相关试验设备的研发。机械科学研究总院下属中机生产力促进中心测试技术与装备研究所，在引进国外先进测试方法与技术的基础上，成功研制了背靠背齿轮疲劳性能试验台及齿轮接触疲劳试验方法，自适应均载齿轮弯曲疲劳试验夹具与试验方法，以及带载高精度齿轮接触斑点、传递误差试验台及相关试验方法，为国内企业提供了先进可靠的试验设备和全面深入的技术服务，有力推动了汽车行业齿轮基础试验的开展。

齿轮疲劳测试

1. 齿轮疲劳试验的作用与意义

齿轮疲劳试验是齿轮产品寿命与可靠性的保证，产品功率密度及成本控制的基础。通过疲劳试验，可以建立全面可靠的基础数据库，提供分析设计可靠性，缩短开发时间，降低开发成本，解决产品寿命可靠性和承载能力（功率密度）问题，从根本上提高产品竞争力。

齿轮疲劳试验的作用和意义如下：

（1）获取基于实际工艺及润滑条件下的齿轮材料S-N曲线 齿轮的强度与寿命，不仅与材料牌号有关，还与齿轮的热处理工艺、冷加工工艺、表面处理工艺以及润滑油性能有关。因此，从材料手册上查出的材料强度数据无法代表本企业的齿轮强度，要想获得可靠的数据，必须通过试验测试本企业工艺条件下齿轮材料的疲劳特性。

基于实际所用材料、加工工艺、油品条件等，通过测试齿轮材料的疲劳性能，获取S-N曲线，从而用于产

品正向设计，制造出样机后再进行载荷谱下的疲劳寿命试验，最终实现批量生产。这样的技术路线（见图1）才能从根本上解决齿轮疲劳寿命问题，实现高功率密度和高可靠设计，形成设计——试验——生产的闭环。

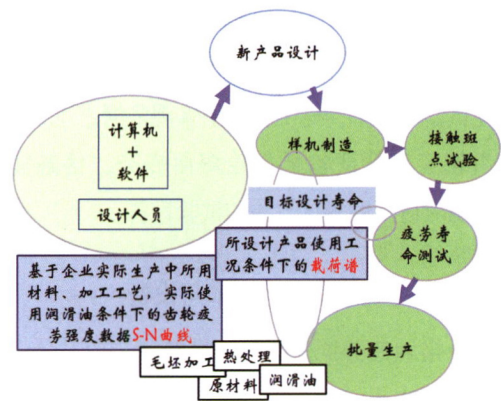


图1 提高齿轮传动疲劳可靠性的技术路线

将企业所用齿轮材料和对应工艺加工出的齿轮疲劳强度特性，通过试验测试出来，提供给设计部门。一方面解决了设计部门在进行设计时缺少依据的问题；另一方面，让设计部门选择已有实际测试数据的材料进行设计，可以实现以下目标。

1) 设计部门的设计以企业使用的材料和工艺为基础，因此，新产品设计完成后，工艺部门无需再进行齿轮加工工艺的开发，而是直接采用指定材料和工艺，提高效率。

2) 确保所用材料和工艺加工出的齿轮疲劳强度符合设计计算结果，保证产品可靠性，免除制造产品强度指标不确定的风险和问题。

（2）以试验数据为基础确定企业齿轮加工工艺优化方向 哪一种工艺更好？在材料相同、成本相当的情况下，能够获得最好的齿轮强度和寿命指标的工艺显然是好工艺。通过试验测试不同工艺下的齿轮强度和疲劳寿命特性进而进行比较，是优化工艺的重要指南和客观指标。

一个好的齿轮加工企业，正是通过不断的测试对应不同材料和工艺的齿轮疲劳特性，对比选择，达到不断优化齿轮加工工艺的目的。其结果是，在材料相同、成本相当的条件下，生产出疲劳强度更高的齿轮，提高产品竞争力。

（3）为企业决策提供客观依据 齿轮疲劳试验结果可以为企业大型决策提供客观依据。例如：一种齿轮加工工艺（强力喷丸的呢等）是否应该采用，需要

进行投资和回报比较，而回报的关键指标就是齿轮的疲劳强度提升量有多少；决定是否需要引进一种新型齿轮材料时，同样需考虑其对齿轮强度和寿命的提升程度；在投资额给定条件下，是投资于提升齿轮材料还是投资于提升工艺水平，同样需比较采用不同改进后所得到的齿轮强度和寿命提升量的大小。齿轮疲劳寿命对比试验即可以为此决策提供客观依据。

齿轮疲劳测试包括齿轮弯曲疲劳、接触疲劳测试，分别对应不同测试方法和试验设备。

2. 齿轮接触疲劳试验技术与设备

齿轮接触疲劳试验的目的是测试齿轮在传递一定转矩（不同水平转矩）的情况下，齿面出现点蚀等接触疲劳前所能运行的循环周次。齿轮接触疲劳试验需要将载荷（转矩）施加到一对齿轮上，通过齿轮进行啮合运行来进行测试。

齿轮接触疲劳试验一般采用背靠背结构，功率封闭模式试验台，这样的布置使得运转成本低。

为保证试验结果的可靠性，试验设备必须满足以下基本要求：

（1）高系统刚度 试验台需确保在全部的加载转矩范围内，都能保持齿轮处于良好的啮合状态，保证齿轮啮合状态不随载荷变化而变化。保证试验台好的系统刚度，无法通过提高试验台的零件刚度而实现，而是需要通过优化设计，刚柔搭配，最终保证试验齿轮的基本额啮合状态不随载荷变化而改变。

如果试验台设计刚柔搭配不合理、系统刚度不好，加载后会导致齿轮轴、轴承和齿轮箱体的变形，从而使齿轮产生错位，并最终导致在齿轮局部产生较高的接触应力。这将导致试验结果失真并将误差带入到齿轮材料疲劳强度数据，将这样的数据用于齿轮的分析和计算，将误导设计，导致设计结果不可靠。

（2）长寿命、高可靠性 作为疲劳寿命测试设备，齿轮疲劳寿命试验台需要具备高可靠性，具有每天连续24h运行能力，而且使用寿命尽量长。

该类设备的典型代表是机械科学研究总院中机生产力促进中心与英国纽卡斯尔大学齿轮技术中心合作产品。该设备以英方全套技术为基础，形成了系列化产品。如图6所示分别为91.5mm和160mm两种中心距的齿轮接触疲劳试验台，其参数见表1，其用户包括陕西法

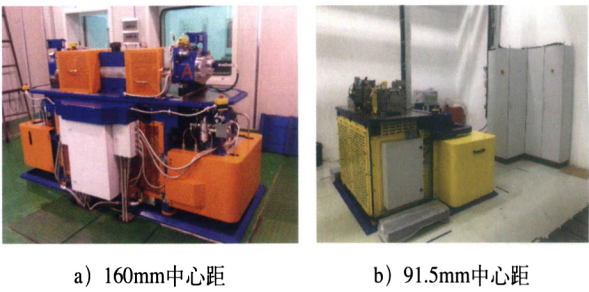


图2 中机-DU系列化齿轮疲劳寿命试验台

表1 中机-DU系列化齿轮疲劳寿命试验台技术参数

型号	中机 -DU160/160H	中机 -DU91.5/91.5H
试验齿轮中心距/ mm	160	91.5
齿轮最大齿宽/mm	60	35
试验齿轮模数/mm	2~10	2~5
最大试验功率/kW	2000	880
工作转速/ (r/min)	0~4500	0~6000
最大测试转矩/N·m	6000	2100
电机功率/kW	75	30
油温/℃	50~100/70~140	50~100/70~140
试验齿轮螺旋角/°	0~30	0~30

士特齿轮传动有限公司、上汽变速器有限公司等大型汽车齿轮传动企业。试验设备性能代表国际先进水平。

中机-DU系列化齿轮疲劳寿命试验台除了满足上述齿轮疲劳寿命试验台的基本要求之外，还具有如下特点：

1) 液压加载，先起动后加载，避免带载起动瞬间过载损伤齿面。采用液压加载器，转矩与转速无关随时可调，因此可以实现试验台起动运行平稳后再逐渐加载至试验转矩，然后开始计数。很好地避免了机械扭杆加载所无法避免的加载后强行起动所带来的起动载荷远大于设定载荷而导致的不应该有的损伤，保证试验结果的可靠性。

2) 液压加载，闭环控制，转矩稳定、精度高。采用液压加载器，转矩加载通过计算机及安装在转矩封闭环中的转矩测量单元和遥测系统形成转矩闭环控制回路，实现了与转速无关的、连续无极可调的转矩控制。转矩控制准确、稳定，因此可以保证整个试验过程中的转矩稳定在目标试验转矩值，避免了机械扭杆

加载式试验台在试验过程中转矩由于长时间运行而逐渐衰减的问题。

3) 液压加载, 增加阻尼减振、振动小。液压加载器作为连接两个试验箱中的一个柔性环节, 起到了增加阻尼和减小振动的作用。与扭杆加载式试验台相比振动小, 避免了振动对试验结果的影响, 因此可以保证试验结果的可靠性。

4) 试验效率高。试验台具有两个试验齿轮箱, 两个试验箱可同时进行试验 (而不是一个试验箱, 一个陪试箱)。因此每次试验, 可给出两组疲劳强度或磨损数据, 效率是只有一个被试箱试验台的两倍。在两个试验齿轮箱里可以同时测试不同的齿轮材料、热处理工艺和润滑油品, 更方便用于对比测试, 可以准确得到相同工况下的不同材料、工艺加工齿轮的疲劳寿命区别。

5) 节约试验齿轮。试验台可正反转和加载, 可以对齿轮两侧齿面进行试验。在不拆卸齿轮的情况下, 每对齿轮可以获得两个数据。

6) 加载无滞后、试验结果更准确。试验台液压转矩加载器采用间隙密封 (无密封圈), 具有长寿命, 免维护, 无滞后的特点。

7) 锥孔配合, 对中精度高、易装卸。试验齿轮安装方式为锥孔配合, 可实现齿轮快速安装和拆卸, 而且齿轮和轴对中精度高, 无磨损, 确保试验结果可靠性。

试验台主要功能如下:

建立使用现有热处理方法和加工工艺加工的齿轮材料性能数据, 该数据可以直接用于齿轮设计, 也可作为评估替代材料或热处理工艺的评价标准。

评估新型齿轮钢的性能及工艺水平, 如空气渗碳淬火钢、直接淬火钢、新型渗氮钢和其他替代钢或新的热处理工艺。

评估可供选择的表面处理工艺对齿轮疲劳性能的改善程度, 例如强力喷丸、激光喷丸、齿根研磨及表面镀膜 (例如基于PVD技术的薄碳膜) 等。

评价齿轮、润滑油微观点蚀性能——由于台架具备高速、大转矩性能, 因此可用于评价初期微观点蚀的发生。试验台布局决定了该试验台可用于小齿轮为主动齿轮和被动齿轮两种运行方式的微观点蚀的研究分析。

齿轮胶合性能——试验台的设计运行速度远远超过齿轮胶合速度极限。由于台架可以严格控制驱动功率, 因此胶合试验可以安全进行。

齿轮润滑试验——每个试验齿轮箱有一套独立的润滑系统, 并具备温度控制功能。结合高速大转矩运行能力, 试验台可准确地评估针对实际齿轮几何形状啮合的润滑油性能。

齿轮修形验证——可用于对基于3D技术的微观几何修形设计进行验证。

该系列试验台已广泛逐步应用于国内重点传动企业, 其中汽车行业用户包括法士特汽车传动集团公司、上海变速器有限公司。

3. 齿轮弯曲疲劳试验技术与设备

齿轮弯曲疲劳试验可以在上一节介绍的背靠背齿轮疲劳寿命试验机上, 通过对滚连续运行方式进行。这种方法更接近实际工况, 但试验时间长, 试验成本高。

另一种方法是将被试齿轮固定, 通过加载夹具由脉动加载试验机在齿轮轮齿上施加周期变化的载荷。这种方法没有上述方法更贴近齿轮实际工作情况, 但可以代表轮齿交变受载, 优点是试验效率高、试验成本低。

为了提高试验效率, 通常更多采用脉动疲劳试验机+专用齿轮加载夹具的单齿加载试验方式来进行齿轮弯曲疲劳寿命试验。脉动疲劳试验机是通用成熟产品, 试验夹具是专门为齿轮弯曲疲劳试验而研制, 是保证试验结果可靠性的关键。原因是: 试验载荷能否均匀加载到被试齿轮整个齿宽和正确位置上, 将直接影响齿轮弯曲疲劳试验结果, 以下对这两部分分别进行简要介绍。

(1) 脉动疲劳试验主机 脉动疲劳试验机制造技术在我国已相对成熟, 用于齿轮典型的电磁激励共振性疲劳试验机如图10所示, 主要性能参数见表2。

(2) 专用试验夹具 高频疲劳试验机是一种通用设备, 要完成齿轮弯曲疲劳寿命试验, 需要配备专门的试验夹具。夹具的作用是保证在试验过程中轮齿加载的大小和位置准确, 载荷能在齿宽方向上均匀分布。因此疲劳试验专用夹具的设计是试验成功与否的关键。

专用夹具需保证按齿轮强度评价标准位置加载,

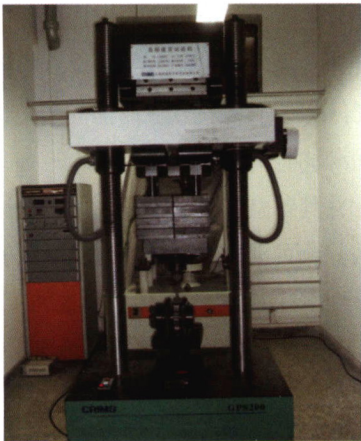


图3 高频疲劳试验机

表2 高频疲劳试验机参数

最大平均负荷/kN	± 200
最大交变负荷峰值/kN	100
最大单向脉动负荷/kN	± 200
负荷精度	示值的± 1%
频率范围/Hz	80~250
整机消耗功率	380V 4500W
	220V 750W

且保证齿宽方向加载均匀性。目前GBT 14230——1993规定了两种齿轮弯曲疲劳的试验夹具存在一定的问题：

加载压头刚度过好，这样可以确保断齿而不至于使压头压溃，但是齿轮必然存在加工和安装误差，由于压头没有适应能力，很容易导致轮齿局部受载，从而造成轮齿局部折断或者轮齿断面出现较大倾斜（见图4），致使试验数据离散性很大。这种离散不是由于材料本身缺陷造成，而是由于夹具加载不均造成的。

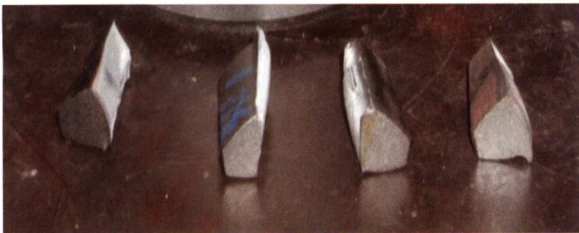


图4 受载不均匀的断齿

为解决这一问题，已研制出一种新型弯曲疲劳夹具，新型夹具具有自适应齿轮的加工及安装误差的功能，因此能保证试验载荷均匀加在被试齿轮整个有效齿宽上，同时保证加载位置准确，以确保齿轮弯曲疲劳试验数据的可靠性。

新型夹具试验轮齿的断口形貌见如图5所示，试验轮齿的断面形状规则，断齿部位在齿根圆角部位。



图5 新型夹具断口形状

4.试验齿轮设计与制造

齿轮疲劳寿命试验属于基础共性试验，试验结果将用于各种不同参数的齿轮设计，因此，试验齿轮非产品齿轮。齿轮尺寸及精度要求不同于产品齿轮，但对于影响齿轮基本疲劳特性的材料、热处理工艺等，需要与产品齿轮生产条件相同。对于不同的试验目的，试验齿轮的设计要求不同。试验齿轮设计是否合理、制造是否符合规范，将直接决定试验能否完成，以及试验结果是否可用。

针对行业需求，国内已有科研单位通过与先进国家权威机构合作，学习、引进并消化掌握了齿轮疲劳寿命试验齿轮的设计精髓和加工制造过程中应遵循的规则和要求，因此具备了根据用户试验目的和用户产品特点进行试验齿轮设计和指导企业进行试验齿轮加工的能力。此基础上自主开发了齿轮疲劳寿命试验齿轮设计软件，软件界面如图6所示。该软件可用于进行接触和弯曲疲劳试验齿轮的优化设计和应力水平的计算。

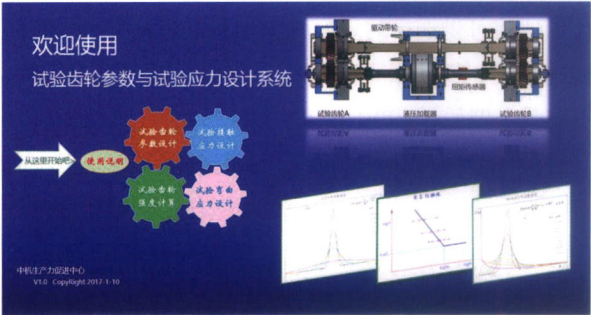


图6 试验齿轮参数与试验应力设计系统

5.数据处理方法及软件

齿轮疲劳寿命试验不同于针对变速器总成的性能或耐久试验，其试验结果需要进行处理后才能用于设计软件的输入，对试验数据的分析和处理是决定试验结果能否正确应用的关键。国内已有研究院所对齿轮疲劳寿命试验结果的处理方法进行了深入研究，并在此基础上自主编制了一套软件，专门供试验人员进行齿轮应力计算，且根据不同的试验方法和实际测试结果，自动计算和绘制齿轮R-S-N曲线，完成从试验数据到设计可用数据的转化过程。

齿轮传递误差测试技术与设备

1.齿轮传递误差测试发展情况概述

齿轮传动误差是机械传动链中振动、噪声的主要激励源，是检测齿轮啮合质量的重要指标。传动误差试验可以帮助设计人员进行齿轮的修形设计提供试验依据，以达到降低振动噪声的目的。

齿轮传递误差测试从测试方式上可分为空载和带载测试，从测试对象上可以分为单对齿轮和传动系统总成。在我国研究较早的大部分为空载单对齿轮传递误差测量，适宜于齿轮几何形状与传递误差关系的理论研究，因此多用于高校和研究机构。

随着人们对传动系统（如汽车变速器）振动噪声性能要求的提高，企业迫切需要解决实际产品的振动噪声问题，因此需要测试齿轮在受载变形后的传递误差测试结果。带载传递误差测试属于重载高精度测量，难度很大。国际上也只有极少几家公司可以提供此类设备。在国内用户的强烈需求推动下，近几年，我国在齿轮传递误差测试设备研发方面取得了突破性进展，2016年国内首台带载传递误差试验台研制成功并在汽车变速器企业得到应用，试验设备技术水平达到了国际先进行列，满足了汽车变速器企业的需求。

2.齿轮传递误差测试技术与设备

齿轮传递误差需要在专用试验台上进行测试，并通过专门软件进行分析。针对汽车变速器的传递误差测试，目的是找到引起变速器啸叫的根源，以便从根本上解决变速器啸叫问题。

传递误差检测结果可与设计模拟软件相结合分

析，优化齿廓修形，主动降低NVH问题产生的可能性。对于存在NVH问题的变速箱，帮助确定激励源。通过实际测试结果验证及优化软件分析模型，提高设计模拟软件分析结果的可靠性。

传递误差测量方式分为空载、加载条件下的单齿和系统测量。检测齿轮在实际受载情况下的传递误差值，需要采用加载测量方法。另外，由于传递误差与齿轮转速没有直接关系，特别是传递误差频谱相对啮合齿频阶次成分，与齿轮转速没有关系，为保证所测传递误差值不受振动等因素的影响，齿轮传递误差采用在低速运转下测试。

我国自主研发的典型的齿轮传递误差试验台，采用双电动机结构，配备高精度低背隙减速箱，采用高精度圆光栅及自主专有角度测量技术，实现加载工况下的高精度传递误差检测。其功能、特点如下。

(1) 单对齿轮实际工况模拟测试 试验台可直接安装单对齿轮，进行传递误差测试，减少了轴系变形等不可计量因素的影响，可用于齿轮传递误差与齿轮设计参数、加工质量之间的关系研究。同时该试验台还能够模拟齿轮在变速器中的实际错位情况，通过集成齿轮轴线夹角高精度调整和测量系统，试验人员只需将齿轮错位量输入试验台软件对应窗口中，软件便可自动计算出调整量，指导操作人员进行齿轮角度调整。

因此，本试验台可用于研究齿轮修形、制造误差、错位量及加载大小等因素对齿轮传递误差的影响；可模拟齿轮在整箱中实际受载和错位情况下测量传递误差；可用于验证设计模拟软件分析结果。

(2) 移动型角度测量单元 对于需要安装变速器整箱测试的工况，除主机上安装的角度测量单元，试验台配置移动型角度测量单元，在变速器总成测量时，可将移动型测量单元直接安装在待测轴端（非加载端），最大限度减小轴系变形对转角测量的影响，获得准确的传递误差数值。通过直接在变速器中对指定变速器齿轮副传递误差进行测量，可以帮助对有问题变速器的问题根源确定。

(3) 专有高精度角度测量技术 进行高精度的传递误差测试，首先需要选择高精度的角度传感器，但更关键的是如何保证其最终实际测量精度，即综合测量精度。为此该试验台采用了下列精度控制技术与措施，确保测量数据的可信度及结果分析可靠性。

- 1) 精密回转轴系的设计：通过精密测量系统设计、机构调节、安装调试，保证光栅主轴的高回转精度。
- 2) 机械回转机构误差消除技术：采用软硬件结合的设计方案与技术，消除光栅回转偏心误差。
- 电路抗干扰能力：通过专门研制的告诉信号采集系统，保证传感器采集信号的稳定可靠。
- 3) 系统误差标定技术：采用专门设计高精度标定组件，对试验台系统误差进行标定，并在试验结果中进行分离。
- (4) 双闭环控制技术 试验台基于矢量变频控制，采用转速、转矩双闭环，转速和转矩稳定性好，特别是低速稳定性，其具体指标如下：转速稳定性 $\leq \pm 0.1r/min$ ；转矩稳定性 $\leq 1\%FS$ ；可稳定工作最低转速 $\leq 1r/min$ 。
- (5) 数采系统高性能 试验台采用美国NI-

FPGA板卡，自行设计开发信号预处理系统及采集软件，经长期使用验证，可靠性好。角度采样频率40~100MHz，转速、转矩采样频率4MHz，传感器信号采集同步性可控制在0.01 μs 。

(6) 电控系统抗干扰 传动误差的高精度高频测量，对电控系统的抗干扰能力要求极高，稍有干扰，就可能导致测量信号失真。该试验台采用强弱电分离、多层屏蔽等多项技术，大大提高了电控系统的抗干扰能力，确保测量可靠性。

(7) 数据分析软件 传递误差数据分析软件功能包括：数据整理、误差补偿、数据滤波、时域分析及频域分析等，软件可输出时域测试结果、频域分析结果，并按照齿频阶次显示。

图7~图9 所示为我国自主研发的多功能齿轮传递误差试验台及试验台控制软件和数据处理软件界面。



图7 多功能齿轮传递误差试验台

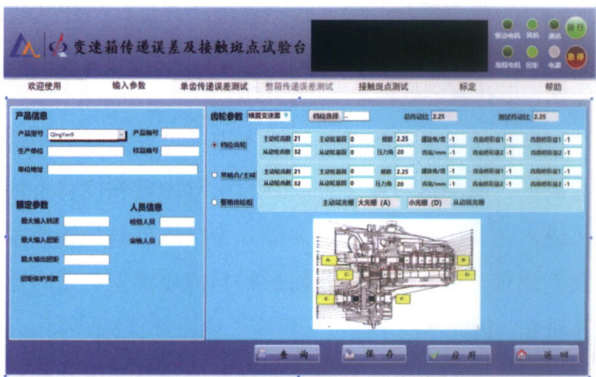


图8 齿轮传递误差试验台控制软件参数设置界面

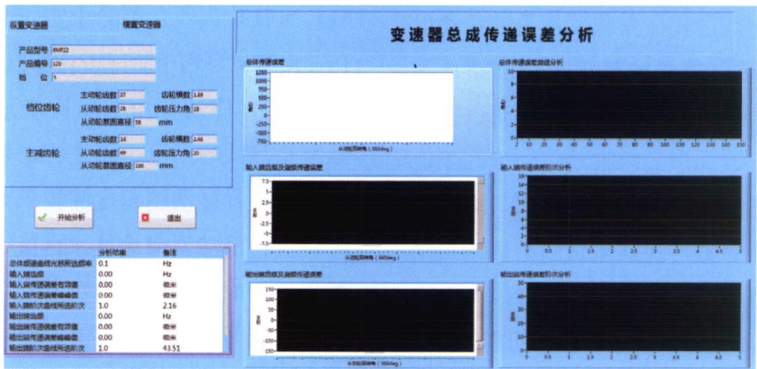


图9 齿轮传递误差试验台数据处理软件界面

结语

随着我国汽车行业的快速发展，我国汽车传动系统试验与检测技术水平得到了空前推进。通过自主研发和引进技术的消化吸收，我国自主研发的测试装备水平不断提高，但仍与国际先进水平有一定差距。因此，我

们应不断加强汽车传动系统试验测试技术研究和装备研制，以满足我国汽车行业发展的迫切需要，促进该领域向高端化、高精度、智能化发展，向国际先进水平看齐。

AUTO1950