

# 轴承试验机及试验技术

洛阳轴研科技股份有限公司 刘苏亚

随着科学技术的发展，轴承产品越来越多，厂家对轴承试验的要求也越来越高。人们也越来越认识到轴承试验的重要性。在轴承产品开发阶段，要做的是轴承结构的试验，试验产品能否满足其轴承的使用工况，主要是对轴承结构的考核。产品定型试验后，主要是对轴承质量的考核，鉴别其轴承产品质量等级，促进质量的提高，从而在轴承结构、材料、制造工艺等某个薄弱环节找到问题的所在，并加以控制。因此，轴承试验是轴承设计、制造过程中一个不可缺少的重要的验证过程。它是把质量风险有效的控制在轴承企业内部，而不是把用户当试验场的重要手段。

目前，轴承试验的种类大致有寿命试验、模拟试验、性能试验、轴承零部件试验、材料试验、设计验证试验、强化试验等。寿命试验即确定轴承疲劳寿命的试验。模拟试验：在轴承试验机上按照轴承的实际安装工况、实际运行状态，即轴承的转速、轴向载荷、径向载荷以及环境温度、润滑状态等按实际工况给定进行运转，达到预定寿命或到轴承失效。常见的有轮毂轴承模拟试验、汽车离合器分离轴承模拟试验、汽车水泵轴联轴轴承模拟试验。性能试验：即考核轴承的某种特殊性能，如极限转速试验、大载荷试验、润滑性能试验、防尘试验、脂漏试验、温升试验、高温试验、低温试验、喷水试验、轴承打滑试验等。零部件试验主要对钢球、滚子、密封圈试验。强化试验是寿命试验的一种，即给定试验轴承载荷较大，达额定载荷的 0.5 倍，用来缩短试验时间。设计验证试验是根据轴承实验的数据，如温升、振动、噪音、提出设计改进意见。

与上述试验所对应的轴承试验机有寿命试验机、模拟试验机、性能试验机、零部件试验机等。虽然这些试验机的功能不同，但他们的主体结构、测试技术、加载技术、控制技术、驱动技术却基本相同。下面就试验机常用技术及轴承试验方法向大家做简单介绍。

## 1 试验主体

试验机主体结构包括试验轴承、轴系及支撑部分，是试验机的核心，其结构的优劣决定试验机的最高转速和承受的最大载荷，轴系的精度决定了试验机的精

度，进而确定试验数据的准确度。任何一种试验机试验的轴承大小都是有一定范围的，结构设计的主要目的就是要解决转速、载荷和轴承尺寸范围的矛盾。

1.1 桥式结构：主要用于寿命机、一次可试深沟球轴承或短圆柱轴承四套、试验角接触轴承或圆锥滚子轴承二套。该主体结构特点是加工精度高，适用于高转速试验。

1.2 悬臂结构：每次只能试验一套轴承，拆装方便，测试方便，可用于润滑状态测试，油膜厚度测试，内圆温度测试以及轴心运动轨道等测试，适用于性能试验及研究。

1.3 组合式结构：实际也是一种桥式结构，有三个活动的方块在方箱内，试验轴承跨距在一定范围内可调，该结构紧凑，试验轴承的范围较大。由于支撑试验轴承的衬套没有固定，因为转速较低。当转速超过一定值后，整机振动较大，影响试验效果

## 2 测试技术

测试技术是试验机的关键技术，其性能的优劣直接影响数据的准确性。随着计算机技术的发展，测试技术发展很快，常用的测试方式均采用不同类型计算机测试，在计算机和传感器之间安装接口电路（滤波等信号处理系统）测试频率、测试精度由计算机和传感器确定。

### 2.1 单片机测试：

这种测试方法简单、成本低，但是内存比较小，对数据要求高的试验机一般不采用这种系统。

### 2.2 计算机直接测试：

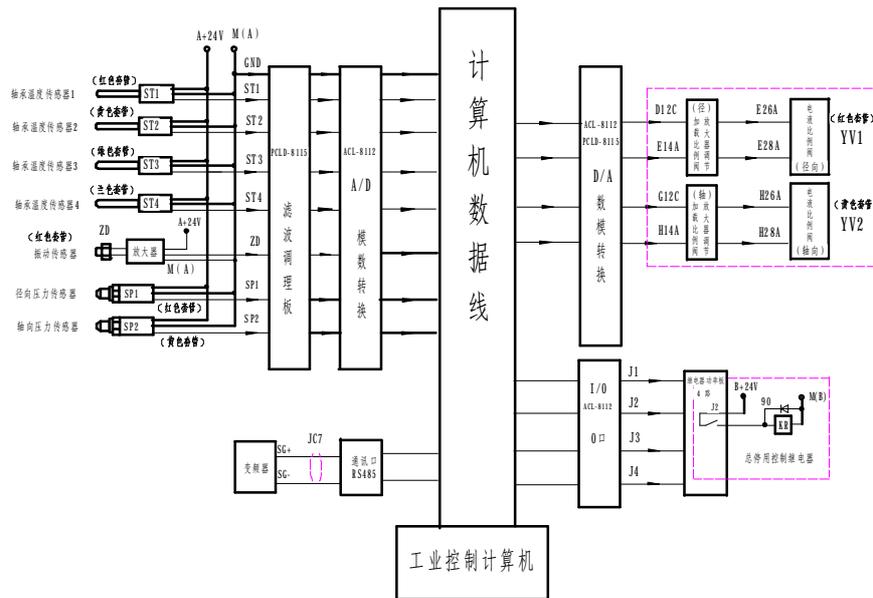


图 1 试验机测试控制原理图

测试结构如图 1 示：由传感器、滤波器、A/D 转换和计算机组成。能存储大量信息，可记录轴承的全部试验数据，记录间隔按秒、分、时可以任意设置，可以真正做到无人看守、无人记录。但由于受 CPU 的限制，采样频率较低，每秒钟采样低于 100 次，若需要更高的采样频率，则 CPU 只能停止其他工作，在某一段时间内采样频率每秒可达几千次。采样精度则根据 A/D 采集卡的位数确定，一般高于 0.1%

### 2.3 计算机网络测试：

对于测量的参数很多、又要求采集频率很高的测试系统，则采用网络测试。即计算机上、下位机测试。上位机只管理系统，读取数据进行处理；而下位机采用单片机或 PLC 单独测试数据存入下位机中存储器，当存储器即将存满后，将数据传送到上位机。下位机和上位机还可采取无线通信协议。这种测试系统复杂、造价高，但抗干扰性好、测试速度快，一般用于采集振动信号，并进行分析，以及测试参数较多的场合。

### 2.4 测试参数

#### 2.4.1 温度测试：

一般测试试验轴承的外圈温度，特殊场合测试试验轴承的供油、回油温度。轴承温度是轴承试验机必测参数，轴承温升的高低是确定轴承质量高低的特征参数之一。由于温度参数变化缓慢，因而测试频率要求不高，测试精度一般为 1%，

要求较高的场合可达 0.5%或更高，普通轴承的外圈温度传感器测试范围在 0-200℃。

#### 2.4.2 载荷测试：

试验轴承的载荷也是试验机测试的重要参数，其准确度的高低直接影响轴承的试验结果，对于寿命试验机，采用压力传感器测出加载系统油压，根据加载油缸面积，计算出载荷。由于油缸的边沿效应，实际测试中存在误差；最高达 10%。因此，要用力传感器进行校正。在载荷恒定不变的情况下，采样速度和响应速度一般传感器均满足要求。汽车轮毂轴承试验机载荷的测试，采用力传感器直接测试。由于轮毂轴承试验机为变载荷系统，因此测试频率、响应速度均要高于载荷的变化速度。否则测试误差可达 30%以上。由于变载荷加载系统是闭环控制系统，因而测试精度及响应速度对加载精度有着非常重要的作用。

#### 2.4.3 振动测试：

振动参数是判定轴承是否失效的重要参数之一。国标：GB/T24607-2009 标准《滚动轴承寿命及可靠性试验与评定》中规定：疲劳失效是轴承的主要失效形式，疲劳失效指轴承样品的套圈式滚动体工作表面基体金属出现的疲劳剥落。剥落深度 $\geq 0.05\text{mm}$ ，剥落面积球轴承零件 $>0.5\text{mm}^2$ ，滚子轴承零件 $\geq 1.0\text{mm}^2$ 。这就要求测试振动信号要求精度高，灵敏度也要高，以便在轴承试验过程中准确判断轴承失效的最佳时机，有效地保留疲劳失效样本，为进一步的轴承失效分析奠定良好的基础。当然，轴承疲劳失效时的振动值并不是一个定值，对不同的试验轴承，不同的试验机的失效振动信号是不同的，这需要试验人员根据经验来确定，不同的试验机采用振动信号的单位也不太一样。一般采用振动信号的均方根值来确定失效，当需要对振动信号分析时则采用瞬时振动信号，采样频率则要求大于每秒一万次。

另外，主机电流也是测试的主要参数，其大小可以直接反映试验机是否正常工作。有些有特殊要求的试验，则要测试摩擦力矩、启动力矩、轴心运动轨迹等，保持架转速、轴承转速、润滑油流量、环境温度等参数。

不管什么样的传感器，随着时间的推移，测试精度、变送器放大倍数都要发生漂移。为保证测试精度，需要在测试软件中对每个测试参数设置校正系数，以便定期校正。

### 3 加载技术

载荷是试验机的一个主要指标，其加载精度和加载速度确定了试验结果的准确度，其精度和速度的不同可能导致加载系统的价格相差几倍或更高。常用的加载方法有：

#### 3.1 杠杆砝码加载：

优点是结构简单，不需要载荷传感器测试，由加载砝码可以确定出载荷的大小，但不适合高速，若速度过高会引起砝码振动，导致载荷不稳，变载荷也不方便，仅适用于寿命试验，成本低。

#### 3.2 弹簧加载：

载荷的大小取决于弹簧的大小和弹簧的压缩量，加载范围较小，所占空间比较大，成本比较低，一般用于特殊试验。

#### 3.3 液静压加载：

即手动螺旋液压加载。加载方式手动调节小液压缸的压力达到控制试验机油缸的压力，这种加载方式简单、无噪声，但受温度影响大，精度低，一般用于寿命试验，在环境温度变化时需人工调节。特别是开机第一小时内注意试验机温度变化情况 & 压力变化情况，随时调节压力。

#### 3.4 液压比例自动加载：

这种加载方式由液压系统、工控机和压力传感器组成闭环系统。试验机加载系统结构如图 2 示，由工控机数字调节器控制液压比例阀进而控制载荷。这种系统结果复杂、成本高，但控制精度高，可达 1%。系统的最大特点是载荷可控；可按照预先编制的程序变化；特别适合做模拟试验。如汽车发电机轴承试验机。对于汽车轮毂轴承，试验机加载结构比较复杂，轴向载荷为交变载荷，控制比较困难，如系统调整不好，超调量可达 60%，将导致试验数据严重失真；为解决这一问题，需要选用响应速度快的油缸，在控制软件中除采用 PID 算法外，还要增加智能控制技术软件。图 3 是模拟试验机的加载图。这种系统在程序模拟试验机中的响应时间一般为 1 秒，超调量 7%。另外还需注意的是，液压油要采用标准的液压油，绝对不能采用再生油，否则将使整个系统报废。

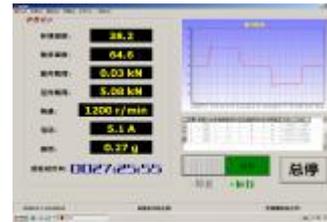
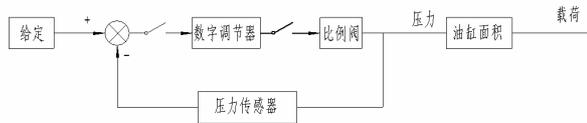


图 2 试验机液压加载结构图

### 3.5 液压伺服加载：

当比例加载系统的加载频率不能满足试验要求时，就要选择液压伺服系统，其原理和比例加载相同，采用液压伺服阀来控制载荷，这种系统的加载频率可达每秒 20 次，但成本更高，对油的清洁度要求也高，一般用于军工试验和特殊试验等。

除上述加载方式外，有砝码加载和液静压加载组成的加载系统。还有液静压加载和伺服电机组成的自动加载系统；弹簧加载和伺服电机组成的弹簧自动加载系统。

## 4 驱动技术

### 4.1 三相异步电动机驱动：

由电机、变频器、同步带和传动组件组成，电机采用变频调速电机，转速一般在 10000 转/分以内，开环系统调速精度在 2%以内，调速范围为 1：10。由于电机调速为恒转矩调速，而试验机工作时的调速方式为恒功率调速，要使电机适用于试验机的调速方式，还需采用其他措施，提高电机功率或更换皮带轮。

### 4.2 电主轴直接驱动：

当轴承试验机的转速要求更高，超过 10000 转/分速时，则采用电主轴直接驱动。该系统由电主轴、变频器、转速传感器、润滑冷却器组成。转速一般在 10000—70000 转/分，考虑到转速的稳定性，采用转速闭环调速系统，调速精度 0.5%，调速范围有所扩大，达到 1：20。

### 4.3 伺服电机驱动：

当试验轴承的调速范围要求很高时即超过 1：50 时，要采用伺服电机驱动，这种驱动系统由伺服电机、驱动器、编码器组成；调速范围宽，转速控制精度高，达到 0.05%，成本也较高，最高转速为 10000 转。一般用于特殊场合。

## 5 控制技术

目前的试验机绝大部分为工业计算机控制。控制可以完全做到无人值守，也可以做到一键式操作。试验机的运行，可以完全按照预先编制好的程序进行运行，载荷的变化，转速的变化，以及环境温度的变化在允许的范围内可以任意实现，每个测试参数均设有上限报警值，当所测试的参数超过报警值时，计算机控制自动停机。并记录当前参数。转速、载荷、环境温度均采用计算机闭环控制，转速稳态控制精度为 0.5%，载荷稳态控制精度为 2%，温度稳态控制精度为 1%。若不计成本，控制精度还可提高。

## 6 试验机简介

### 6.1 寿命试验机：

普通寿命试验机主体采用桥式结构，液压自动加载，计算机自动控制。分 6 个型号（尺寸段）覆盖试验轴承的内径范围从  $\Phi 2$ — $\Phi 240$ ；转速从 50—30000 转/分，载荷从 10N—800KN，试验轴承的环境温度从常温—200℃，滑油温度从常温—200℃的寿命试验机。在软件中根据国标 24607-2009 编制了可靠度的计算方法；用户可根据试验数据直接得到轴承的可靠度。

### 6.2 模拟试验机：

汽车轮毂模拟试验机，模拟汽车的运行方式及安装结构进行运转，试验轴承内径尺寸  $\Phi 15$ — $\Phi 45$  和  $\Phi 30$ — $\Phi 70$  两种型号，可试验一代、二代、三代汽车轮毂轴承，还可试验 SUV 轿车轮毂轴承、大客车轮毂轴承等。试验机外形图 4 示。转速最高 2500 转/分和 1500 转/分，载荷最大 20KN 和 50KN、温度测量范围：0-200℃，精度  $\pm 2^\circ\text{C}$ 。环境温度  $150^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 。试验机主轴的径跳和端跳不超过 0.015mm。可以实现内圈或外圈旋转。采用液压加载方式，提供拉力和压力交变载荷，按径向水平加载（拉力）、轴向水平加载（拉压力）的结构布局；进行轮毂单元性能试验（一般耐久性试验），轴向力通过车轮半径加载。轴向和径向加载分布试验体两侧。其轴向加载油缸行程  $\pm 30\text{mm}$ 、力臂调节范围（车轮半径）300mm 或 400mm；径向加载油缸行程  $\pm 20\text{mm}$ 。径向加载位置可根据不同型号轴承力线调整，轴向加载位置（即车轮半径）可调。控制系统采用计算机控制，加载采用闭环控制。在计算机参数设定窗口设置系统的参数：转速、载荷、循环步数（可任意设置）、循环时间、数据自动存盘时间等，系统可监控试验的振动、电机电流、转速、载荷、试验时间、循环次数等。具有电机电流、试验机的振动及试验轴承温度超限自动报警停

机功能等。



图 4

除此之外，还有模拟汽车离合器轴承的离合器轴承试验机；汽车水泵轴联轴器试验机；汽车涨紧轮试验机等。还有模拟风力发电机的变桨轴承运行状态的变桨轴承试验机，试验轴承的外径达 4 米，倾覆力矩为  $8000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，模拟风力发电机偏航轴承的偏航轴承试验机，变速箱轴承试验机，发电机轴承试验机等。

### 6.3 航空、航天轴承试验机：

航空、航天专用轴承的技术性能较高，工作条件恶劣，并且其可靠性要求也很高。在试验时不仅要满足载荷、转速、环境温度变化等要求，轴承的安装方式、供油方式也要求和实际工况相同，还要模拟航空发动机的飞行包线，进行变载荷、变转速运行。航空、航天轴承试验机均采用电主轴直接驱动，某种航天轴承试验机最高转速达 15 万转/分。航空轴承试验机的电主轴最大驱动功率达 100 千瓦、17000 转/分。某型航空发动机轴系轴承试验器可同时试验航空发动机主轴的全部 5-7 套轴承，各套轴承均可模拟在发动机的工作工作状态，该试验器结构复杂、驱动功率大、噪音低、效率高，为国内首创，2009 年获机械工业科技进步二等奖。

## 7 试验方法

### 7.1 寿命试验方法：

国标 GB/T24607-2009 规定：寿命试验方法有三种，即完全试验方法、截尾试验方法、序贯试验方法；根据用户要求选取。试验时，要采用鉴定合格的轴承寿命试验机，按要求选取轴承与轴及外衬套的配合尺寸，选用合适的润滑方式，取 8-20 套轴承进行编码，确定试验轴承的载荷、转速，一般选取额定动负荷的 20-30%，转速选取极限转速的 20-60%。在试验过程中监控试验机的载荷、转速、油压、振动、噪声、温升，当试验轴承发生故障，不能正常试验时，或疲劳剥落

大于规定值时，轴承判定为失效。根据失效的时间及样品容量，由 Weibull 分布参数进行分析处理，即可得出该试验轴承的可靠度。

## 7.2 模拟试验方法：

根据用户的试验要求或试验任务书，编制试验大纲，确定试验轴承的载荷谱曲线、转速曲线以及试验轴承环境温度。根据用户提供的轴承安装方式，设计试验工装，确定轴承受力点、加载半径、供油方式等轴承工况及公差配合，对试验轴承编号，检查加工工装的精度，安装试验轴承，并在试验机上检查安装位置、供油状态是否符合任务书要求。运转记录试验参数。试验轴承不能正常运转或疲劳剥落超过规定值即为失效，根据试验记录，选写试验报告。

## 8 轴承试验技术展望

轴承试验技术的发展，是和轴承新产品的研发紧密相连的。随着我国轴承新产品的大量开发，对轴承的各种试验方法、试验装置、数学模型的建立、失效数据和非失效数据的处理和变换、试验机的控制技术、各种试验信号等物理量的拾取精度和反映速度、自动控制技术等等，都将提出越来越高的要求，这是未来轴承试验技术的难点所在。

在轴承试验机发展的同时，试验软件技术的发展也是相辅相成的，它包括：试验规程（或规范）、试验数据的处理方法和评定方法、试验数据库的建立和对今后如何加以利用、试验信号的积累和轴承寿命的预测推论、老化筛选试验技术、轴承的性能寿命试验技术和轴承的精度寿命试验技术，这些都是以后要解决的软件问题。

由于轴承寿命试验机是个性化、专用性较强的设备。随着轴承产品的多样化和个性化轴承试验机的发展必然呈现出多品种、小批量、高精度、多控制和群控化、模拟工况化、专用性的格局。

轴承品种多样性和广泛的应用领域，决定了轴承试验机试验技术、试验方法和试验结果处理方法的研究和发展方向，是一门将数学、力学、材料学、机械学、控制学等综合学科交织在一起的应用学科。在轴承行业广大技术人员的共同努力下，轴承试验技术必定迅速向前发展。

（刘苏亚：教授级高工，洛阳轴研科技股份有限公司试验技术开发部部长、中轴

协技委会轴承检测与试验技术专委会副主任委员)

**BEARING • 2010**

**2010 上海国际轴承峰会演讲之十八 (2010/9)**