

# 水力测功机在航空发动机及燃气轮机试验中的应用

## Application of Hydraulic Dynamometer System for Aero Engine and Gas Turbine Test

■ 邹剑峰 / 中国航发研究院

水力测功机具有单位质量吸功能力强、转动惯量小、转速功率测量范围宽、调节便利、稳定性高等优点。

航空发动机和燃气轮机的涡轮部件以及带动力涡轮的燃气轮机整机在开展试验时功率较大,需要采用耗功装置进行功率吸收。一般来说,电涡流测功机、磁滞测功机和磁粉测功机等均无法满足耗功需求;电力测功机可以满足大功率耗功需求,但其尺寸、质量和转动惯量相对更大,动态响应速度慢,转速相对较低<sup>[1]</sup>;而水力测功机具有单位质量吸功能力强、转动惯量小、转速功率测量范围宽、调节便利、稳定性高等优点<sup>[2]</sup>,被广泛应用于相关的试验中。因此,在航空发动机、燃气轮机试验台中,水力测功机成为吸收功率的主流设备。

### 水力测功机工作原理

水力测功机机体部分的功能是吸收驱动机的有效转矩,其结构如图1所示,主要由转子、定子、轴、外壳等组成。定子直接与外壳铸造为一体,接受转子产生的反作用力矩产生摆动,转子轴端采用联轴器与被测传动设备相连接。

根据转子结构形式的不同,水力测功机主要有叶轮式(见图2)、孔盘式和光盘式。其中叶轮式的水力测功机比功率(功率与重力之比)最

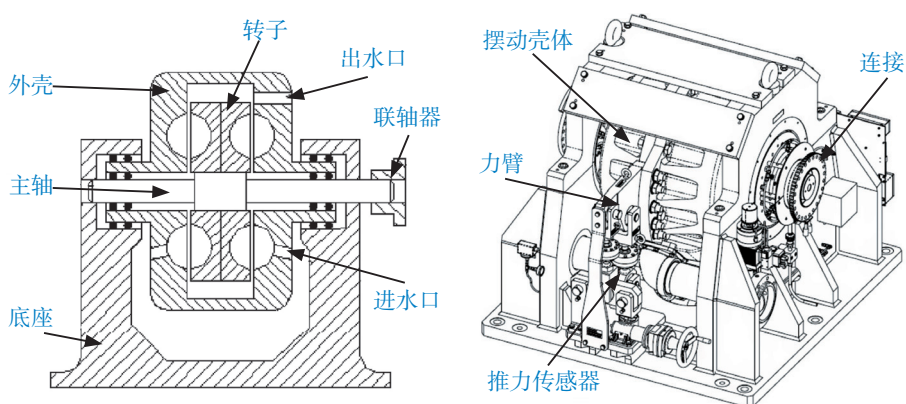


图1 水力测功机结构示意图

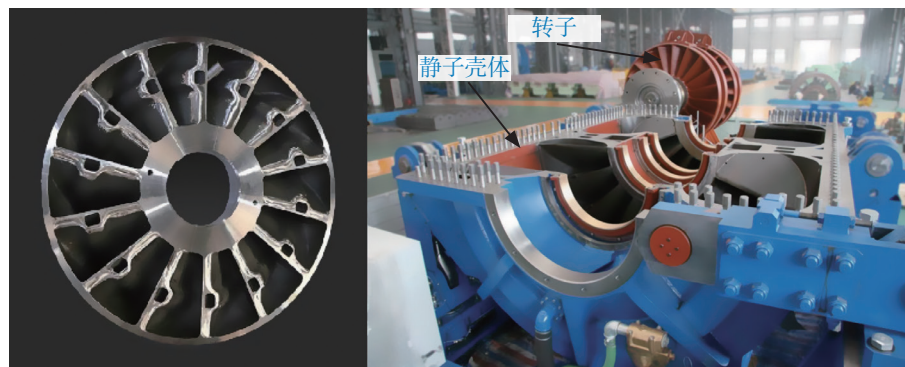


图2 叶轮式水力测功机转子

大<sup>[1]</sup>,同等功率等级,该形式的测功机尺寸更小,转子惯量也小,控制系统响应速度快,适用于涡轴发动机测试中的加减速试验。由于其结构特点,水流在壳体内部叶轮之间产生强烈的湍流现象,在将测功机

的输入能量转换为水的内能过程中,由于水温的升高和局部压力的降低容易出现气蚀现象。气蚀会产生高频噪声和压力脉动,进而引起高速水力测功机运行不稳定,直接导致运行寿命明显缩短<sup>[2]</sup>。

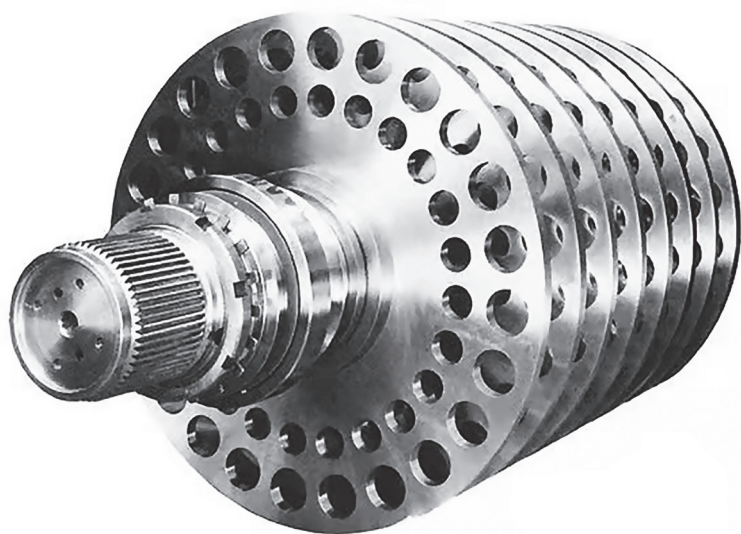


图3 孔盘式水力测功机转子

与叶轮式测功机相比，孔盘式测功机比功率较小，尺寸质量相对较大，其耗功原理与叶轮式类似，但气蚀风险大大降低。孔盘式测功机转子结构如图3所示。

与叶轮式和孔盘式测功机相比，光盘式测功机是通过黏性剪切而非湍流作用吸收动力，使其在抗气蚀能力方面具有更大的优势，寿命相对较长，如图4所示。由于光盘式吸收功率的原理，使其比功率较小，同等功率等级的测功机，光盘式尺寸更大，转动惯量大，对外界的控

制敏感度相对较低，控制响应较慢。

叶轮式测功机通常为单向旋转，对于存在双向测试需求的情况，可选用轴两端均可连接被测设备的测功机，通过调转测功机位置<sup>[3]</sup>，实现不同旋向的试验需要；也可通过额外配置转盘的方式实现双向旋转。孔盘式和光盘式测功机可用于双向测功，不需掉转方向，也无须配置额外的转盘。

### 水力测功机产品

在航空发动机和燃气轮机领域，国

外的水力测功机制造商主要有美国卡恩公司、英国佛罗德公司，其中卡恩公司的产品以孔盘式和光盘式为主，佛罗德公司的产品以叶轮式为主。国内的制造商主要为江苏联测公司，产品以叶轮式和孔盘式水力测功机为主，也可生产光盘式测功机。

#### 佛罗德公司产品

佛罗德水力测功机根据使用转速和功率范围的不同，主要分为F系列、LS系列和HS系列，均为叶轮式测功机，其扭矩测量精度为额定扭矩的 $\pm 0.25\%$ ，转速精度为 $\pm 1r/min$ ，转盘可进行双向配置，以达到双向旋转的目的。

F系列测功机设计紧凑、运行稳定且易于维护，该系列测功机适用750kW ~ 25MW的功率范围，转速最高可达10000r/min。F系列测功机工作舱由特殊的半圆形叶片铸造成，采用不锈钢转子和定子。水在叶片周围以环形涡流模式流动，通过测功机外壳产生扭矩反作用力，由精密测力传感器抵抗和测量。测功机负荷由蝶形出水阀控制，由闭环电液伺服系统操作。F系列测功机主要应用在以下场合：工业和船用柴油发动机，涡桨、涡轴发动机，涡轮发电机及发动机部件。

LS系列测功机主要用于蒸汽轮机及舰用燃气轮机等低速、大功率应用场合，该系列测功机适用8950kW ~ 100MW的功率范围，可提供串联机器。其外壳固定在3个球铰基座上，基座包含测力传感器和液压作动缸，使测功机能够快速直接连接到发动机，消除了对中间联轴器的需要。由于测功机可以自由跟随发动机转动，轴向推力减小，

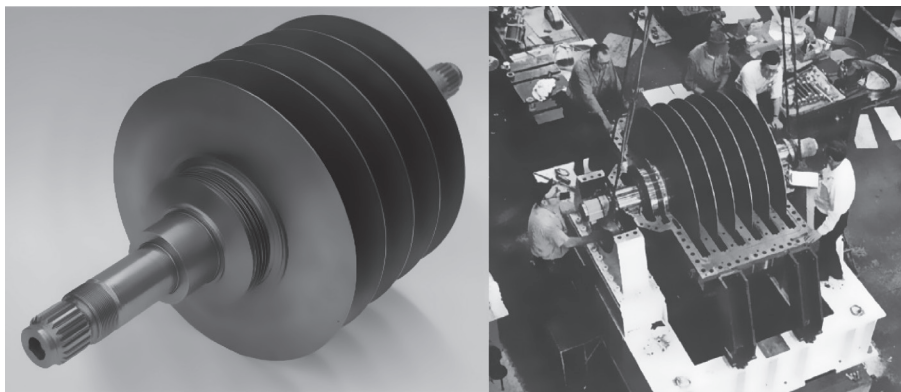


图4 光盘式水力测功机转子



因此没有特殊的推力轴承需求。

HS系列水力测功机适用1680kW ~ 30MW的功率范围, 转速最高可达30000r/min, 可提供串联机器。HS型号测功机具有以下特点: 转速高达30000r/min, 快速反应, 运行稳定, 具有高可靠性。

### 卡恩公司产品

卡恩水力测功机产品有50多个标准型号, 根据测功机类型的不同和使用功率、转速的不同, 主要有100系列、101系列、102系列、301系列、400系列、404系列, 其中100系列、101系列、102系列、301系列为孔盘式, 400系列、404系列为光盘式。同一系列下, 又分为法兰安装式和基座安装式两种, 法兰安装式测功机体积小、质量轻, 可直接安装在被测设备上。法兰安装式测功机普遍功率较低, 基本在5MW以内, 但转速较高, 最高可到60000r/min。基座安装式测功机的质量和体积相对较大, 须安装在地基平台

上, 基座安装式测功机普遍功率高, 最高60MW, 但转速较低, 基本在18000r/min以内。

100系列水力测功机为孔盘式测功机, 如图5所示。转子轴上采用碳环密封结构对水和滑油进行密封; 为了提高抗气蚀和腐蚀能力, 功率元件(转子和定子)由热处理的不锈钢制成。转子通过自动定心的多边形连接装于轴上, 该连接不需要热缩配合, 盘与轴之间的拆卸简单, 更换组件方便。盘需要更换时可方便拆卸更换, 但该结构也导致加工过程复杂。该系列测功机可双向旋转, 最大转速15000r/min(对应最大功率4875kW), 但对应的功率较小, 随着最高转速降低, 最大功率逐渐升高, 最高可到60MW(对应最大转速4500r/min)。

卡恩400系列测功机为底座安装形式的光盘式水力测功机, 如图6所示。内部光滑盘式动力元件提高了抗气蚀能力, 可以吸收高达60MW的

功率, 可在转速18000r/min下工作。测功机为单转子, 采用单独供水保证了运行稳定性; 采用非接触式两级迷宫式密封; 正反两个转动方向上均可吸收全功率。400系列测功机最大转速可达18000r/min(对应最大功率5250kW), 最大功率可到60MW(对应最大转速4500r/min), 包线涵盖的范围与100系列相差不大, 适用场合与100系列相同。

卡恩404系列为光盘式测功机, 通过法兰安装边与被测设备安装, 外形和结构如图7所示。404系列法兰盘式水力测功机为高速水力测功机, 可在转速60000r/min内工作。卡恩404系列水力测功机具有以下特点: 采用光滑盘式动力元件提高了抗气蚀能力; 较小惯性矩和较小的内部储水量保证了快速瞬态响应; 可在更高转速下工作; 可在正反两个转动方向上吸收全功率; 为了达到高转速, 采用弹簧支承的航空球轴承。404系列测功机最大转速可到



图5 卡恩100系列水力测功机

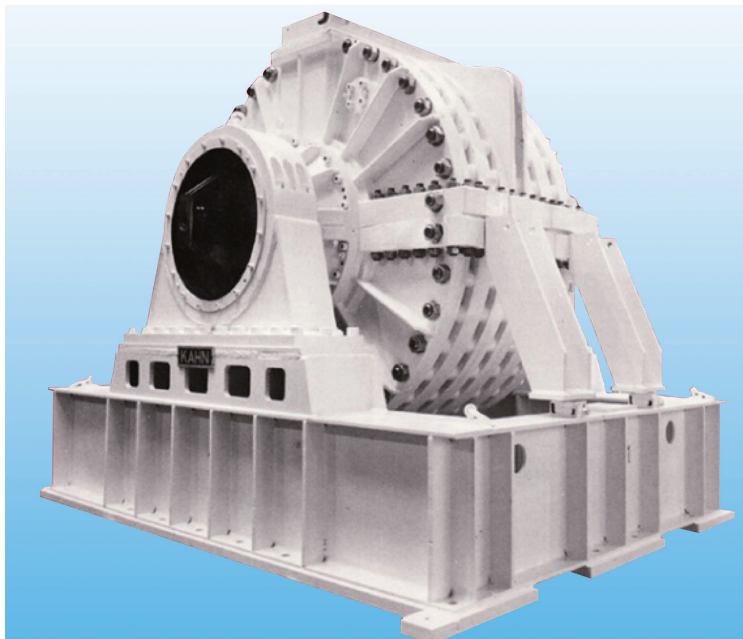


图6 卡恩400系列水力测功机

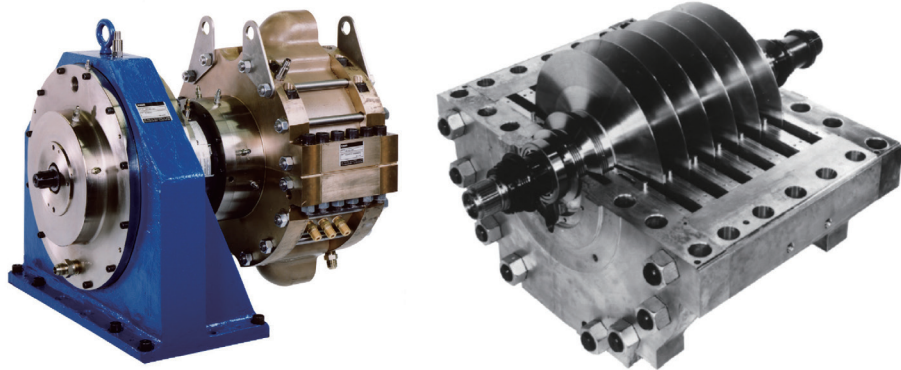


图7 卡恩404系列水力测功机

60000r/min (对应最大功率525kW), 最大功率可到4125kW (对应最大转速24000r/min)。为满足60000r/min的高转速的运行需求, 404系列测功机配备最新技术的高速陶瓷球轴承, 采用专有的多级轴密封设计。

#### 江苏联测公司产品

应用在航空发动机及燃气轮机试验设备中的国内水力测功机厂家主要为江苏联测公司, 其产品以YG系列叶轮式水力测功机和PG系列孔盘式水力测功机为主, 同时也有P系列光盘式水力测功机。

YG系列测功机为叶轮式测功机, 其主轴采用双转子结构, 转

子叶片45°, 测功机安装采用低中心距直接安装。YG系列水力测功机的最大吸收功率为2.6MW (对应最大转速26500r/min), 最高转速可达30000r/min (对应最大功率1800kW)。

PG系列测功机为孔盘式测功机, 采用串联式大直径孔盘式转子, 吸收功率密度高, 如图9所示。PG系列水力测功机的最大吸收功率可达30MW (对应最大转速6000r/min), 最高转速可达40000r/min (对应最大功率700kW)。

P系列水力测功机属于光盘式水力测功机, 主要适合耐久可靠性寿命

试验, 采用整体硬化不锈钢抗蚀转子组成, 大功率的测功机采用龙门式框架高刚性结构底座支撑, 高速小功率测功机采用悬臂式无底座结构, 使用碳环密封结构, 如图10所示。P系列水力测功机的最大吸收功率可达17MW (对应最大转速9500r/min), 最高转速可达30000r/min (对应最大功率1800kW)。

### 水力测功机技术难点

水力测功机运行在高速、大功率的工况下, 且核心件需要长期在水环境中高速旋转运行, 这对水力测功机的研制提出了较高的技术挑战。在国内外水力测功机多年的技术提升进程中, 主要面临的技术难点包括抗气蚀性、油-水密封性和高速轴承。

#### 抗气蚀

高速大功率水力测功机的定、转子处于高功率密度工作状态, 内部局部区域会发生气蚀, 气蚀剧烈时会影响测功机的工作, 缩短测功机功率元件的寿命, 特殊的抗气蚀结构设计、抗气蚀材料以及吸功元件表面强化处理工艺等会提升测功



图8 联测YG系列水力测功机



图9 联测PG系列水力测功机



图10 联测P系列水力测功机



元件的抗气蚀能力,延长测功机使用寿命。

卡恩公司为了提高测功机的抗气蚀能力,研制出光盘式水力测功机,通过在转子和静子表面上的黏性剪力吸收功率,从而有效降低了发生气蚀的可能性。佛罗德公司和江苏联测公司则通过结构、材料、热处理和表面强化处理等4个方面来提高叶轮式水力测功机抗气蚀能力,结构上转子和主轴一体锻造;材料上使用双相不锈钢06Cr13Ni4Mo、05Cr17Ni4Cu4Nb;热处理上采用固溶+时效处理、HRC $\geq$ 40;表面强化处理上,采用抛丸、超声速火焰喷涂(HVOF)、等离子喷涂(ASP)、耐蚀涂料。

### 密封

水力测功机的转子同时与水 and 润滑油接触,在运行的过程中,油、水相互泄漏将严重影响测功机的运行,危害测功机安全,须确保轴承压力供油不能有任何内外泄漏,同时定、转子工作腔压力供水水路不能有任何内外泄漏。主要的密封方式包括碳环密封和迷宫密封。

碳环密封包括浮环和接触两种,在低转速下使用接触密封,在高转速下使用浮环密封。可通过以下措施提高水力测功机的密封性能:一是在轴承外侧采用镍包石墨、巴氏合金涂层衬套、梳齿轴套小间隙气路组合密封;二是在轴承内侧采用巴氏合金涂层、碳精石墨浮环气膜油、水路分隔密封环组合密封;三是在定子和主轴之间采用巴氏合金涂层、镍包二硫化钼衬套和梳齿轴套小间隙气路组合密封。

碳环密封实现水、油和轴承之间的隔离,这种结构可在低负荷下

启动测功机,并且在最大负荷时实施完全紧急停机(至零转速)。与迷宫式间隙密封相比,碳环密封不需要在停机时对测功机卸荷以防止水流入轴承,可快速、安全地紧急停机至零转速而不会损坏测功机。

### 高速轴承

从转子动力学安全裕度的角度,要求高速水力测功机的最大运行转速控制在一阶临界转速的75%以下,且要保证能够同时传递大功率,这要求轴径不能过小,且对高速轴承提出了很高的技术要求。

水力测功机一般选用滚动轴承,对于高速水力测功机,需要军品级的精密高速轴承,国产民用轴承很少能够满足要求。目前国产水力测功机采用的进口品牌包括英国TIMKEN品牌、美国BARDEN和德国FAG品牌,均存在采购周期长或受贸易壁垒和管制风险的影响,需要研发能够满足大功率使用的国产民用高速轴承产品。

## 水力测功机选型建议

基于以上不同转子结构形式的水力测功机的工作原理和性能参数,并结合国内外产品供应和造价情况,在对水力测功机进行选型时,可以从以下几个方面进行综合考虑:

- 对于要求开展动态特性测试的试验台,建议采用高比功率、低转动惯量的叶轮式测功机;
- 对于以稳态性能测试为主的试验台,建议采用抗气蚀性较好的孔盘式或光盘式测功机;
- 对于功率和转速都较高的试验台,单台测功机不能同时满足功率和转速指标时,建议采用转速满足指标的两台低功率测功机串联使用;

• 对于建设投资较少,且主要以稳态性能测试为主的试验台,建议采用“低速测功机+齿轮箱”的方案。

在对水力测功机的类型进行选型后,要根据试验台的指标、测试对象的试验工况,选择水力测功机的具体型号,确保水力测功机的最大转速、最大功率满足试验台的指标,同时功率-转速包线能够涵盖所有测试工况点;再根据测试对象的旋向要求最终选定测功机。

## 结束语

综上,水力测功机造价高、供货周期长,作为试验台的核心设备,单纯依靠进口容易受制于人。未来其主要的技术突破点在密封和抗气蚀性,可以从机械加工精度、安装精度、高速轴承、高速动密封和高强度材料等方面进行提升,并推进高速大功率水力测功机的国产化进程。

**航空动力**

(邹剑峰,中国航发研究院,工程师,主要从事航空发动机试验技术研究)

### 参考文献

- [1] 李宗帅,董春,刘颜.国内外电力测功机发展现状[J].电机与控制应用,2007,34(5).
- [2] 周腊吾,郭浩,赵晗,等.测功机系统的研究综述[J].电机与控制应用,2020,47(12).
- [3] 强国芳.美国卡恩工业公司的盘式高速水力测功器[J].内燃机工程,1981(1).
- [4] 胡龙兵,王蓬葱,蔡其波.高速水力测功器过流部件抗空蚀技术研究[J].机械工程,2019(11).
- [5] 郭强.涡轴发动机与水力测功器连接安装总结[R].江油:中国燃气涡轮研究院,2004.