

燃气轮机性能试验用的康氏水力测功器

盖尔哈特·默克尔

(Kahn Industries Inc, Wethersfield USA CT06109)

关键词: 水力测功器; 性能
中图分类号: TK39 文献标识码: B

1 前言

一个多世纪以来, 水力测功器一直是测量和诊断发动机性能的重要设备。由于较诸电力与气动机械具有若干固有优点(如单位造价较低, 尺寸紧凑, 惯性小, 快速瞬态响应以及在高转速和大功率工况下的运行能力), 水力测功器已经成为航空及工业用和船用燃气轮机发动机进行研制、耐久性、生产性试验和维修后试验用的一致公认的标准手段。电子式快速响应涡轮控制系统的应用更是加快了这一趋势, 因为这对动态试验程序提出了更高要求。

本文对工业和船用燃气轮机性能试验用的康氏公司高速水力测功器做了介绍并描述了在测功器快速响应闭环控制方面的最近进展。对于若干特殊的涡轮试验程序和水力测功器对供水系统的要求也进行了讨论。

2 康氏公司高速水力测功器

康氏公司的水力测功器产品系列有 50 多个标准型号——在全世界来说其选择范围最为宽广。康氏测功器广泛地用于各种发动机试验, 而其重点则是燃气轮机和航空发动机试验用的直接传动和高速的测功器。由于其先进的设计理念, 一直领先于众多竞争对手的任何高速测功器很多年, 因此康氏公司所售出的直接传动的高速测功器比所有其它制造商加起来的总和还要多。康氏测功器销售给以下这些主导的涡轮发动机制造商就是一个明证: 阿尔斯通、阿维奥、德莱塞兰特、通用电气、石川岛播磨重工、川崎重工、三菱、弗里德利希沙芬发动机和透平

联合公司、努沃·皮约尼公司、劳斯莱斯、普拉脱惠特尼、三星、斯耐克玛公司、德里达因、透博梅卡和沃尔沃公司等等。

康氏公司出售给中国的第一台测功器是在 1985 年。这台 1 200 kW 和 35 000 r/min 的设备是用于研制燃气轮机的涡轮试验台。此后, 有多台高速水力测功器售给了中国的研究机构, 主要用于航空发动机的开发研制性试验。

康氏高速测功器被用来试验各种各样的航空推进以及工业与船用燃气轮机, 包括通用电气公司的 LM500、LM1600、LM2500、LM5000, 普拉脱惠特尼公司的 FT8, 劳斯莱斯公司的 501-K、601-K、埃汶、RB211 和泰因。

按照具体应用及功率、转速要求的不同, 康氏公司可以为直接传动燃气轮机试验提供两种基本型式的水力测功器:

- °100 系列穿孔盘测功器
- °400 系列免受气蚀的光滑盘测功器。

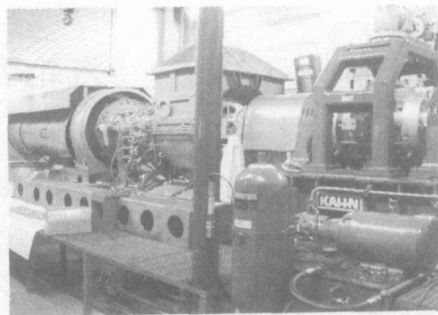


图 1 工业燃气轮机科研性和生产性试验的康氏公司 100 系列水力测功器 (功率 22 000 kW, 转速 6 500 r/min)

20 世纪 50 年代末期推出的康氏 100 系列穿孔盘测功器标志着燃气轮机试验的新纪元。与当时采

收稿日期: 2005-08-04; 修订日期: 2005-08-31

作者简介: Gerhard Merkle(1939-), 男, 美国康氏公司副董事长。

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

用的大而重的基座安装式测功器形成对比, 这些尺寸紧凑而重量轻的设备的特点是法兰安装结构, 并且可以通过适配器直接与涡轮的功率输出端相连接。这种设计概念很快就成为直升飞机发动机和辅助动力装置试验的公认标准。在其法兰安装式测功器用于航空发动机试验成功的基础上, 康氏公司研制了供工业和船用燃气轮机试验用的 100 系列大功率、高转速测功器。

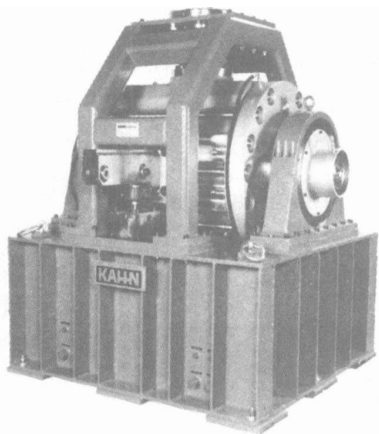


图2 LM500 船用燃气轮机检修后试验用的康氏公司 100 系列测功器 (功率 12 000 kW, 转速 10 000 r/min)

100 系列穿孔盘测功器通过在穿孔盘转子和静子中产生的漩涡吸收功率, 与叶片式水力测功器一样, 当它们在高功率密度和高转速下运行时会受到气蚀。对于中等水平的运行参数而言, 功率元件的运行寿命可超过 2 000 h。

在燃气轮机试验的很多场合, 100 系列水力测功器提供了一种最为经济的手段。除了紧凑和经济的设计特点以外, 它们还采用了机械式炭精密封以实现在所有运行条件下的“可靠密封”。其功率元件则用高强度不锈钢制造, 使之具有最大的抗气蚀和腐蚀的能力。为了减少维修停机时间, 转子是用自对中的多角形(截面)连接的方式安装在转轴上而不需要红套配合。可通常, 当某 100 系列测功器需要维修时, 康氏公司可向客户提供功率元件, 使客户能以最少的停机时间在自己的车间内完成安装。

100 系列是世界上使用得最广的高速大功率测功器。其卓越的可靠性和维护方便使它们已被世界上主导的燃气轮机制造商, 研究机构以及涡轮维修中心, 包括阿尔斯通, 美国国家宇航局, 美国海军等所选用。

康氏公司在 20 世纪 70 年代早期推出 400 系列

光滑盘测功器乃是测功器技术领域向前跨越的又一重要步伐。在那时, 对在最苛刻运行条件下能长时间工作的直接传动测功器有明显需求。

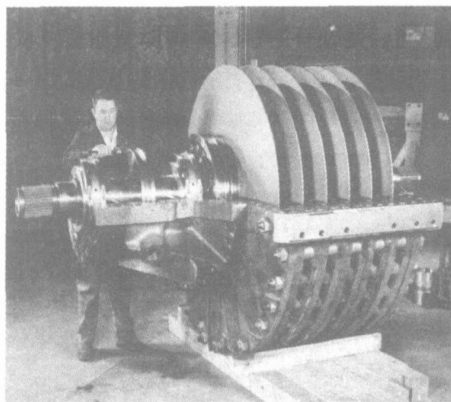


图3 对正在装配中的 400 系列水力测功器进行检查。此光滑盘转子的直径为 1 600 mm, 重量 8 200 kg。它是由 6 个单盘装配而成——通过预应力的轴向连结螺栓固定在一起。

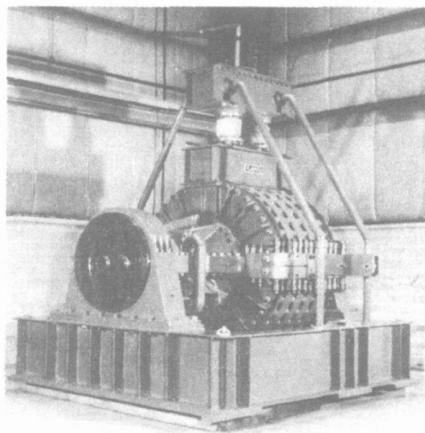


图4 400 系列水力测功器(功率 60 000 kW, 转速 4 500 r/min)正准备从康氏公司发运。本设备是用于工业和船用燃气轮机科研性和生产性试验的。

400 系列光滑盘测功器通过在转子和静子表面上的粘性剪力吸收功率。这种功率吸收过程本身就会阻止气蚀的发生, 从而消除了对功率元件频繁更换的需要。因此, 400 系列乃是惟一能够提供其动力元件 5 000 h 5 年不发生气蚀损坏的特殊保证的测功器。现场运行经验表明, 其动力元件的实际运行寿命已经大大地超过了 10 000 h。

康氏公司光滑盘测功器首批应用实例之一乃是

用来进行航空改装型工业与船用燃气轮机 LM2500 研制、耐久性 & 生产性试验的 406-160 型。LM2500 被应用于美国海军大部份水面舰艇, 如巡洋舰、驱逐舰、护卫舰和供应船的动力装置。它也被诸如阿维奥、德莱塞兰特和石川岛播磨重工等涡轮发动机制造商用来作为发电、海上平台、天然气管线及船舶的动力装置。当原技术任务书要求测功器能够胜任 1 000 h 的连续耐久性试验时, 没有一台测功器能提供所需的寿命。在 1971 年投运的这台测功器可以吸收 37 000 kW 的功率, 其运行转速则高达 4 500 r/min。这是当时在美国生产的最大的水力测功器。在连续工作了 20 年之后, 当它最终被一台功率更大的新的康氏测功器所置换时, 它利用原先的动力元件累计运行时间居然超过 27 000h。

基于其基座安装式光滑盘测功器在工业与船用燃气轮机领域的成功应用, 康氏公司又研发了用于较小功率的高速涡轮发动机试验的法兰安装式 404 系列水力测功器。这种功率可达 4 000 kW, 转速高达 30 000 r/min 的 404 系列现已成为高速航空发动机性能试验的标准设备。

3 先进技术的细节

康氏公司的先进技术以及其对设计细节的关注给用户带来了在别处无法取得的一系列真正的具体好处。例如: 100 及 400 系列水力测功器都具备如下的标准设计特点。

°双向转动

所有康氏测功器都设计成可在正反两个方向吸收全部功率。在某些特种发动机试验中可能会需要改变旋转方向, 对康氏测功器来说, 其安装不需进行任何调整即可适应转向的改变。这就免除了调转测功器位置并对传动轴再找中所造成的费时的程序。

°直接传动和高速工作的能力

这种技术能保证平滑和可靠的运行, 因为不需要复杂的传动链或减速齿轮箱。由于没有齿轮箱的功率损失, 发动机全部试验工况点, 包括高转速、低功率区的那些状态, 都可以成功地测试。由于控制是直接作用于动力涡轮转速, 控制精度要高些。此外, 还不需要采用昂贵的扭矩传感器。

°可靠密封

由机械式炭精密封环来实现水和轴承座之间的隔离。这种设计使用户可在负荷下起动测功器, 并且在最大负荷时实施完全紧急停机(至零转速)。与

曲径式密封不同, 它不需要在停机时对测功器卸荷以防止水流入轴承。因此, 有可能实现快速而安全的紧急停机至零转速而不会损坏测功器。

4 先进的测功器控制系统

由于是为需要精确的稳态控制和快速瞬态响应的发动机试验程序所专门研制, 康氏公司 545 数字式测功器控制系统对于近代的“全面核准的认同数字电子控制系统 (FADEC)”控制的燃气轮机显得特别合适。因为它带有快速响应的 PID 控制器以及利用高性能的电液控制阀来实现对进排水阀的同时控制。有两个可编程序负荷函数来提供特定的负荷调定特性和螺旋桨定律的模拟。这种快速和精确的控制, 有效的人机和谐的接口, 发动机和测功器参数的信息模拟和数字显示, 以及几种有用试验模式上述各因素的组合, 使得 545 系列控制系统成为燃气轮机试验中无与伦比的精品。

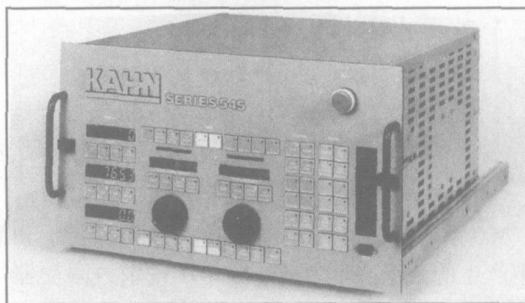


图 5 用于康氏测功器快速响应和闭环控制的 545 系列数字控制系统可以提供信息模拟和数字显示以及各种实用的试验模式。

- °闭环控制模式 转速, 扭矩, 功率定律, 非线性负荷曲线(涡轮功率杆位置的函数)
- °开环控制模式 阀门位置
- °总的控制环路时间 10 ms
- °排水控制阀(150 ms) 全行程时间 < 200 ms
- °排水控制阀频率响应 > 45Hz

545 系列控制系统可提供如下的数据交换接口:

- °与转速、扭矩和功率成比例的模拟输出;
- °远景设置点控制的模拟输入;
- °远景控制模式选择(即转速、扭矩和功率定律模式的选择)的数字输入;
- °报警状态的数字输出;

· 离线构形设置的“以太网”。

545 系列也具有卓越的控制特性:

- 不同控制模式间的无扰动切换;
- 多重构形设置的储存及复位;
- 内置式校准基准;
- 英制及公制工程单位的选择按钮;
- 转速、扭矩和功率的数字显示;
- 指令信号显示;
- 报警。

此外, 545 系列还具有其它测功器控制系统所不具备的特性:

· 进水阀和排水阀的同时控制。与所有其它厂商所用的单阀控制系统相比, 它可提供大为改善的控制响应及稳定性。此特性在按螺旋桨模拟模式运行时显得尤为重要, 因为连续改变负荷的指令需要快速的控制动作;

- 以 CSV 文件夹格式表示的内置式数据纪录;
- 供远距(遥控)构形及文件传递用的“以太网”接口;
- 利用可编程干扰器函数进行用户协助下的调谐;
- 供用户选择的不同停机模式;
- 可编程序设置点的时间变化斜率;
- 可编程序试验序列化。

5 特殊试验程序

康氏公司在使其水力测功器满足各种特殊试验要求方面有广泛的经验。这些特殊要求是: 工业燃气轮机快速甩负荷试验以及航空发动机的姿态、高空、陀螺仪以及瞬态试验等。

发电用燃气轮机可能要快速甩负荷试验, 后者的程序要模拟当发电机突然从电网脱开时发生的状况。试验的目的则是验证燃气轮机能控制负荷的突然丧失, 使它不超出转速极限。

在姿态试验中, 发动机和测功器均安装在可变姿态的试验台架上以进行从水平位置到垂直位置以及在大滚转角下的各种运行。这种试验能力使发动机制造商能在试验车间中模拟真实的飞行状态和条件。与此相似的是在高空试验中发动机和测功器是安装在高空舱内以模拟在不同飞行高度下出现的压力和温度状况。

在陀螺试验中, 发动机和测功器均安装在一旋转平台上。当在全转速和不同的功率下运行时, 由

于平台的转动产生高的回转性负荷, 从而模拟了在实际飞行操纵时作用于发动机上的负荷。

对现代航空发动机最重要的要求之一乃是迅速地空转慢车状态加速到全负荷、全转速。反之亦然。为了验证发动机瞬态特性有必要与测功器一起提供一个飞轮, 以便在试验车间中来复制直升飞机转子或螺旋桨的惯性效应。

6 水系统设计

通过水力测功器所需的水流量只与所吸收的功率和测功器进口与出口之间的温升有关, 这一点对不同型式和牌号的所有水力测功器来说都是适用的:

$$Q = \frac{14.33}{t_2 - t_1} P$$

其中: Q = 流量, L/min;

P = 吸收的功率, kW;

t_1 = 进口水温, °C;

t_2 = 出口水温, °C。

对于带蒸发式冷却塔的循环水系统, 推荐的最低流量率为每千瓦 30 升/时, 它相当于跨越整个测功器的温升为 28 °C。考虑到水垢形成及较高温度下的腐蚀等与温度有关的不利影响, 测功器出水温度不应超过 60 °C。

测功器进口控制阀前的供水压力应为 3.5×10^5 Pa。对测功器的运行稳定性来说, 稳定和不脉动的供水乃是最重要的前提。一旦水系统已经安装完毕, 供水压力和流量的脉动就很难消除, 不管它们是由于泵的气蚀, 空气漏入, 控制阀振荡, 扰动或者只是因其它水用户的存在等原因而引起的。

为了消除因泵和管道诱发的供水脉动, 并在泵出现故障时为紧急停机提供水量, 推荐在管线中设置蓄水器。此蓄水器应为通流式设计, 并具有 15% ~ 25% 的捕集空气容积。其总容积(升)至少应为最大水流量(升/分)的 3 倍。

此外, 为确保供水泵始终在性能稳定区中运行, 推荐在从供水管路到热水箱(池)的旁通线路中设置背压调节阀。后者的作用是保持水泵的流量为恒定, 其方法是把测功器工作时不需要的水排至热水箱(池)中。而为了保证背压调节阀在所有运行条件下的正确运行, 包括最大额定功率在内, 测功器的供水泵的设计流量应比流经测功器所需流量大 10% ~ 20%。

在已制定的界限内,水质不会影响测功器的功能或精度,但也许会缩短其使用寿命。水的硬度过大会加速水垢的形成,使测功器中水流通道变窄,甚至造成炭精密封的过早磨损。高酸度的水会在不同的金属之间引起电解腐蚀。当水的品质超出了以下的限制值时,应当考虑水处理:

pH 值(酸碱度)	7.0~8.5
等价碳酸钙含量(硬度)	< 50ppm
导电率	≤120 ms/m

总固体量	≤750ppm
氯化物含量	< 50ppm

当对水系统进行处理时需要注意防止“生物生长”,因为氯的使用会使氯化物浓度提高到不能接受的水平。通常,测功器在较低排水温度下运行总是可以减少水垢形成和腐蚀发生,禁止使用海水及咸水。要在进水控制阀前面装设一个带有 40 目(340 微米)的可置换式网格的滤器以阻挡固体物的进入。

1. 本文作者的联系地址: info@kahn.com
2. 本文译者: 强国芳, 1934 年生, 现为康氏公司技术代表。
联系地址: qiang703@pub.wx.jsinfo.net

· 会 讯 ·

第三届工程计算流体力学研讨会

随着计算流体力学理论与实践应用水平的不断提高,各高等学校、科研院所基于商用软件平台的计算模拟、数值仿真、数值实验的研究工作也获得迅速发展。

清洁能源网(社区)本着立足 CFD 人才培养、面向工程实践、建设网络平台、服务科研创新、推进产业应用的宗旨,应广大会员朋友的要求,清洁能源网(社区)将于 2006 年 1 月 5 日~6 日在哈尔滨工业大学与热能动力工程杂志联合举办“第三届工程计算流体力学研讨会”,希望大家踊跃投稿及参加会议。

1、研讨会征稿要求

稿件形式可以是学术论文,也可以是经验报告,经验报告可以以学术论文的形式提交,也可以以 Power Point 的形式提交,但是无论那种形式,都需附带提交稿件内容及摘要。

对于学术论文要求如下:

- (1) 应征论文要有针对性、创新性、工程性、经验性;
- (2) 应征论文要求观点明确、论据充分、公式明确、数据准确、图表清晰、文字简炼。计量单位应采用法定计量单位;
- (3) 中英文摘要 200 字为宜;
- (4) 文章总篇幅包括摘要、图表和参数文献在内不超过 6000 字;
- (5) 凡在国内外公开刊物、书籍和全国性学术会议上发表过的论文,恕不接受。

2 会议论文出版

- (1) 本次会议我们与热能动力工程杂志社联办,会议中的优秀论文将被推荐给热能动力工程杂志;
- (2) 我们已与国内的 EI 及 ISTP 检索机构取得了联系,会议中的优秀论文也将被推荐给 EI 及 ISTP 检索机构,以备收录;
- (3) 我们将根据论文征集情况,将会议中的论文及经验报告整理成电子版和纸质文集,发给各位与会代表。

3 投稿方式

■ 论文模板

会议咨询及论文模板下载请访问: 清洁能源网→计算流体力学综合版→学术会议专版

网址: <http://www.ceclub.cn/huiyi.asp>

会议征文也可直接在该版内采用最高威望加密的方式提交。

■ 电子邮件递交:

E-mail: caoqx@hit.edu.cn 或 jackywzq@hit.edu.cn

邮件主题请用“研讨会投稿”,正文请以附件方式发送,建议用 word2000/XP 排版。

为了便于联系,作者无论通过哪种方式投稿,都请写明详细通讯地址和邮政编码,联系电话或移动电话号码及 E-mail 地址。

por-water swelling might rise to about 6000 mm. The steam-purging factor of the superheater and reheater is respectively greater than 1.3 and 2.0, thus contributing to a relatively high steam-purging effectiveness. By increasing the combustion rate and slowly opening a temporary purging valve it is possible to prevent the drastic rise and lowering of the separator water level. During a sustained stable-pressure steam purging the steam superheating of the separator has been controlled at about 20 °C. Desuperheating water was used to control the superheater and reheater outlet temperature, thereby preventing the materials from being subjected to an excessively high temperature. **Key words:** startup system of the atmospheric flash-off type, supercritical once-through boiler, stable-pressure steam purging

船用蒸汽动力装置机炉协调系统的总体结构设计 = **The Design of an Overall Construction Scheme of a Turbine-boiler Coordinated Control System for a Marine Steam Power Plant** [刊, 汉] / ZHANG Shao-kai (Naval Representative Office Resident at No.426 Factory, Dalian, China, Post Code: 116000), LU Shu-ju, LIU Huan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2005, 20(6). — 643 ~ 646

Through the analysis of a commonly used turbine-boiler coordinated control system and in conjunction with the specific conditions of and the implementation feasibility for a marine boiler and steam turbine presented is a control mode and overall construction design scheme for a marine turbine-boiler coordinated control system. The theory of turbine-boiler coordinated control theory is analyzed and the configuration of main control modules given. **Key words:** marine, main boiler, main steam turbine, coordinated control

燃气轮机进气系统结霜分析及对策 = **Analysis of and Countermeasures Taken for the Frosting of a Gas-turbine Air-inlet System** [刊, 汉] / CHEN Ren-gui (China Petroleum Talimu Oil Field Co., Kule, Xinjiang, China, Post Code: 841000), TAO Yue (Wuxi Division of No. 703 Research Institute, Wuxi, China, Post Code: 214151) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2005, 20(6). — 647 ~ 649

The safe operation of a gas turbine will be seriously affected when frosting occurs at the gas turbine air-inlet system. The generation mechanism of such a frosting is analyzed and measures for coping with it are put forward, which can serve as a useful reference for gas turbine users and design-packaging units. **Key words:** gas turbine, air inlet system, frosting

燃气轮机性能试验用的康氏水力测功器 = **Kahn Hydraulic Dynamometers for Performance Testing of Gas Turbines** [刊, 汉] / Gerhard Merkle (Kahn Industries, Inc., Wetherisfield, USA, ct 06109) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2005, 20(6). — 650 ~ 654

QPY 油气润滑技术—在小功率燃气涡轮发电机、涡轮压缩机上的应用设想 = **Oil-gas Lubrication Technology for Low-duty Gas-turbine Generator Sets and Turbo-compressors** [刊, 汉] / ZHANG Chun-lin (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), JIANG San-yong (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, — 2005, 20(6), — 655 ~ 656