

旋转机械的功率在线测试技术

(哈尔滨七〇三研究所) 徐军 李春兰 卢文发
(大庆石油化工工程公司) 顾喜春

[摘要] 介绍了在恶劣条件下功率在线测试技术的基本原理, 测试系统的构成及标定技术, 指出了关键技术及系统特点, 解决了这一技术难题。该测试系统具有广泛的应用前景。

关键词 功率 遥测 在线测量

中图分类号 TM933.3

1 引言

旋转机械物理参数的测量和应用, 无疑地将为新产品的的设计提供可靠的动态设计参数, 也可为故障分析提供实质性依据。早期的测量系统常用水银引电器或刷环引电器, 由于汞中毒的危害和较大噪声, 已逐渐被淘汰。70年代末, 由于电子设备小型化, 美国、日本等发达国家相继推出无线电遥测技术在旋转体上应用。

某大型化工厂为扩大生产能力, 对原汽轮机机组进行扩容改造, 要求测出改造后机组在运行状态下的实发功率值, 并要求长期监测, 以保障机组有序生产的安全运行。除此之外, 研制的测试系统必须适应恶劣的大、小环境(大环境: 易燃、易爆化工企业; 小环境: 油气和油浸, 高速旋转体和封闭壳体), 当然, 绝不允许改变原机组结构和运行状态, 其实质也就成为在运行机组上实施功率在线测量。

从目前国内外技术水平来看, 传输精度高、抗干扰能力强的遥测系统并不少见, 但旋转遥测系统的电源及发射组件必须装在转子上, 需视测试对象不同而专门作结构设计, 因此国内外均是专题专做, 而无成套设备可供直接采用。

按照要求和现实条件, 研制了感应供电无线电功率遥测系统, 实施了在线测量, 投入运行已10个多月, 所有测试数据准确可靠, 操作极为简便, 工程误差小于1.5%。投入运行的初始阶段, 就为机组发生意外故障提供了判据, 缩短了检修周期, 增加了经济效益。

2 基本原理的应用

2.1 功率与扭矩的关系

$$N = M \cdot n / 97403.2 \quad (1)$$

式中: N —功率 kW

M —旋转轴扭矩 kg·cm

n —旋转轴转速 r/min

式(1)又可改写为:

$$N = 0.1047 M n \quad (2)$$

由式(1)、(2)可知, 功率的测量实质上就是在一定转速下的扭矩测量。

2.2 扭矩与应变的关系

汽轮机通过套齿联轴器与负载连接, 在不改变套齿联轴器功能的前提下, 将联轴器作为应变式扭矩传感器的弹性元件, 在其适当部位粘贴电阻应变计并组成全桥, 经标定后即成应变式扭矩传感器, 其应变与扭矩的关系为:

$$\epsilon = (1 + \nu) M / \omega \cdot E \quad (3)$$

式中: ϵ —轴的扭转应变

ν —轴材料泊桑系数

E —轴材料弹性模量

ω —轴抗扭断面系数

M —扭矩

由式(3)可知, 测得旋转轴扭转应变即得该轴扭矩值。其它数据皆为常数, 它取决于轴材料和其结构尺寸。

2.3 输出电压与应变的关系

根据应变计全桥线路的理论, 其输出电压与应变的关系为:

$$\Delta U = UK \epsilon_1 \quad (4)$$

式中: ΔU —输出电压

U —供桥电压

K —应变计灵敏系数

ϵ_1 —应变值

由此亦可得出电桥输出灵敏度:

$$\Delta U / U = K \cdot \epsilon_1 \quad (5)$$

3 遥测系统的构成

遥测系统的构成为图 1 框图所示, 它包括感应供电设备、微型发射机、应变式扭矩传感器、耦合线圈、发射和接收天线以及接收机等。安装示意图见图 2。现对各主要设备作一简要叙述。

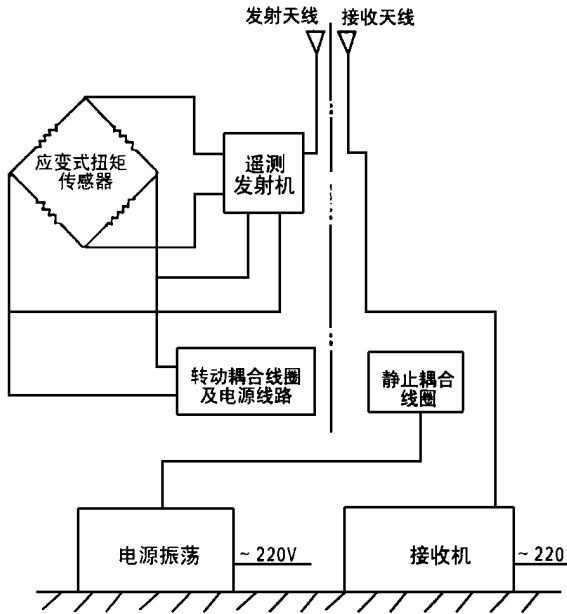


图 1 遥测系统框图

弹性元件, 在其适当部位粘贴电阻应变计研制而成, 现将其综合性能列表如下:

序号	特性名称	单位	值
1	输出灵敏度	mV/V	1.05
2	非线性误差	%/(F·S)	0.14
3	不重复性误差	%/(F·S)	0
4	蠕变	με/h	0
5	零漂	με/h	0
6	热输出	%/(F·S)	0.33
7	工作温度范围	°C	80

3.2 感应供电系统

感应供电原理如同一般变压器, 基本结构如图 3 框图所示。由电源振荡器产生的 160 kHz 的交变信号送到静止线圈并耦合到旋转的次级线圈。次级线圈上的感应电压经变压器变换成所需电压, 然后再进行整流、滤波, 最后经稳压输送至应变电桥和发射机。图 4 为整流稳压电路图。

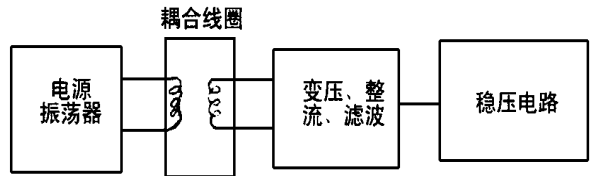
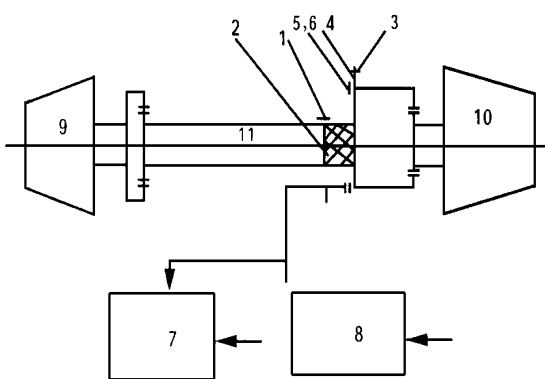


图 3 感应供电原理框图



- 1. 应变式扭矩传感器 2. 遥测发射机 3. 发射天线
- 4. 转动耦合线圈及电源线路 5. 接收天线 6. 静止耦合线圈
- 7. 接收机 8. 感应供电电源振荡器 9. 汽轮机 10. 压缩机
- 11. 联轴器

图 2 遥测系统安装图

3.1 应变式扭矩传感器

应变式扭矩传感器是将原机组中的联轴器作为

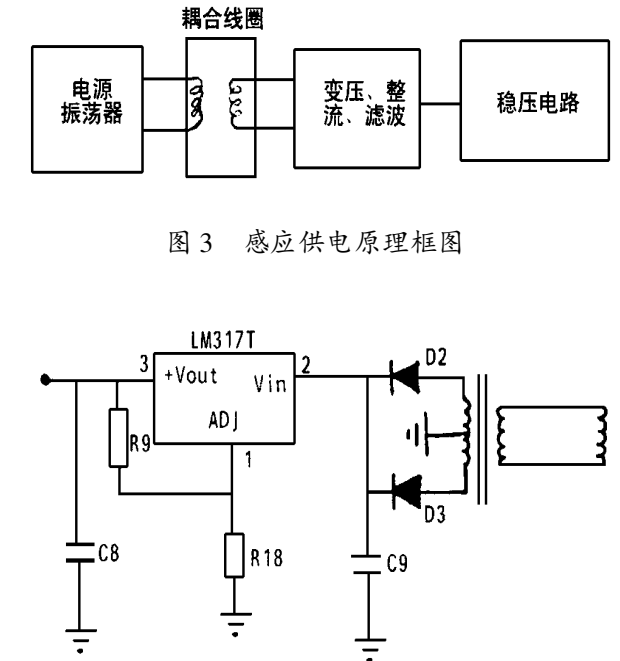


图 4 整流、稳压电路

多项性能测试表明, 该系统耦合线圈间隙以 1 mm 至 30 mm 都能正常可靠地工作, 负载电流从 7 mA 至 50 mA, 供电电压仍稳定不变, 长时间测量无漂移现象, 80°C 温度范围内, 系统正常工作。高速转动试验表明, 系统输出量增加了 3 mV, 约占满量程的 0.2%。

3.3 遥测发射机

遥测发射机系采用从美国 Accurex 公司引进的

206A 型, 其特点是体积小、重量轻 ($\phi 25\text{mm} \times 21\text{mm}$, 重 21g); 灵敏度高 $500\mu\epsilon/\text{v}$, 信噪比高 (相当于输入端 $10\mu\epsilon$), 能承受较大离心加速度 ($3000g$), 密封性好, 能在油雾中工作。

主要技术性能见表 2。

表 2 206A 发射机技术性能

电源电压	V	2~2.7
应变计电阻	Ω	350~1K
灵敏度	V	0.2 以上
射频	MHz	88~108
频响	kHz	0~1 ($\pm 1\text{dB}$)
使用温度范围	$^{\circ}\text{C}$	~100

3.4.1 基本原理及框图

由射频输入的调频信号经高频放大后与压控振荡器 (VCO) 产生的第一本振信号混频, 产生 10.7 MHz 的第一中频信号。第一中频经滤波、放大后与第二本振进行二次混频, 第二本振频率由晶振产生为 10 245 MHz, 故第二中频为 455 kHz, 经滤波、放大后馈入精密鉴频器进行调频解调, 鉴频器输出调频的基带信号, 经全波整流、滤波、直流放大等, 输出信号的大小与零点可通过增益粗调电位计和零点粗调电位计来调节。直流输出的基带幅度信号经衰减后由四位半的 LED 数码显示器予以指示。通常再通过增益细调和零点细调进行精确标定。框图见图 5。

3.4 接收机

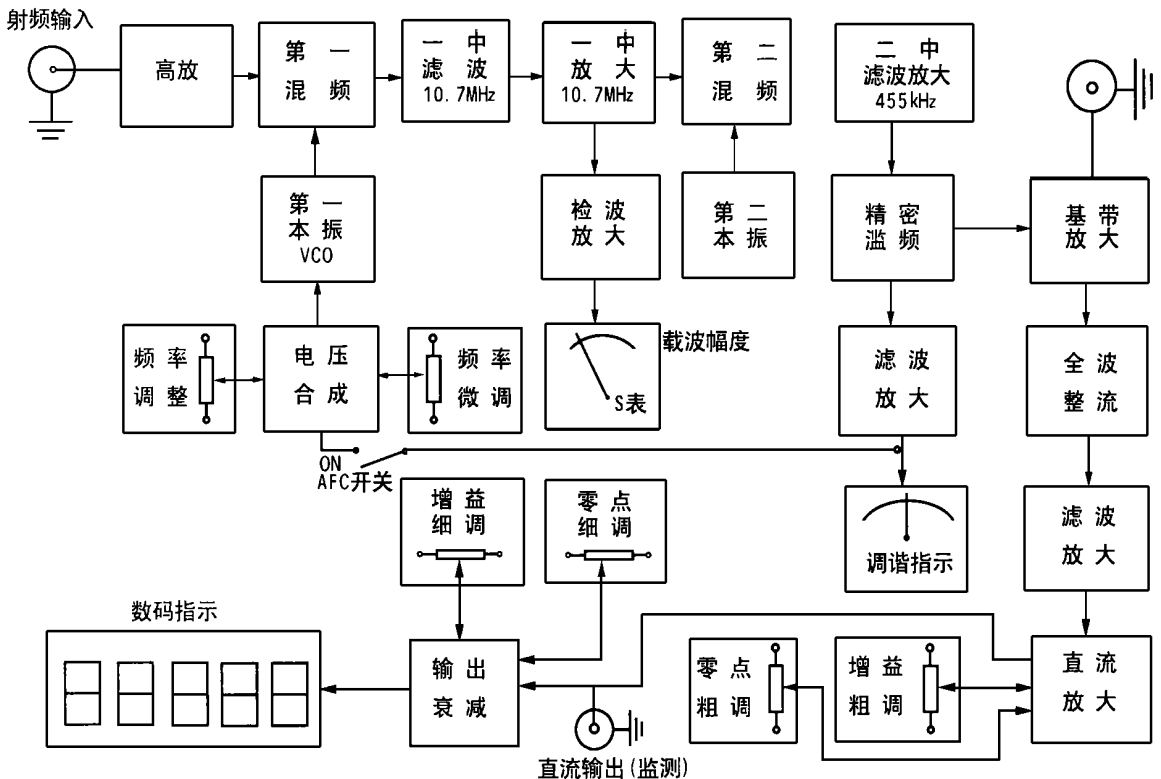


图 5 接收机原理框图

3.4.2 主要技术性能

接收机主要技术性能见表 3。

4 标定

为了减少整个测试系统各组成部分间的匹配误差, 有条件时, 常采用现场标定或模拟标定的方

法。我们采用了系统绝对标定法, 即通过专用标定设备, 输入被标物理量, 然后, 直接从接收系统获得显示数值, 稍加整理后即可获得标定常数并可进行误差分析。图 6 为扭矩校验台。用液压千斤顶施加载荷, 由标准测力计读数, 其乘积就是标准扭矩, 标定结果见表 4。



图 6 扭矩校验台

表 3 接收机技术性能

	数值	备注
频率范围 MHz	88~108	
灵敏度 μV	4	7.5 Ω
最大频偏 kHz	± 75	
监频线性 %	0.5	
最大输入 $\text{dB}\mu\text{V}$	90	30mV
AFC 捕获范围 kHz	± 100	输入 $> 10\mu\text{V}$
AFC 跟踪范围 kHz	± 400	
S 表指示 V	1~4.6	
调谐指示 kHz	± 5	
频率微调 kHz	$\pm 300 \sim \pm 150$	88~108MHz
增益粗调 dB	10	
增益细调 %	± 4.5	
零点细调 LSB	± 250	
电源	AC220V	

表 4 遥测系统标定结果

扭矩 $\text{kN}\cdot\text{m}$	1 次	2 次	3 次	平均值 $\times 0.1\text{kN}\cdot\text{m}$	ΔM $\times 0.1\text{kN}\cdot\text{m}$	相对误差 %
	$\times 0.1\text{kN}\cdot\text{m}$					
0	0	0	0	0	0	0
10	103	103	103	103	3	3
20	203	204	204	204	4	2
30	302	303	303	303	3	1
40	400	401	400	400.3	0.3	0.08
43.8	438	438	439	438.3	0.3	0.06

5 基本误差分析

遥测系统总的标定常数应为各环节标定常数之积,如下式所示

$$K = nKi$$

式中 K —总标定常数;

Ki —环节标定常数;

n —环节总系数。

采用系统绝对标定法,将直接获得显示数据与标准扭矩的关系,即:

$$A = KM_0$$

式中 A —遥测系统显示数值;

M_0 —标准扭矩值;

K —标定系数。

根据表 4 的标定结果,简要分析如下:

5.1 基准误差

扭矩 M_0 为施加的力和力臂杆长度之乘积,即

$$M_0 = PL$$

则标准扭矩之误差为

$$\sigma_{M_0} = \sqrt{\delta_0^2 + \delta_L^2}$$

测力计经标准计量局检定和传递,精度为 0.3 级,力臂杆长度计量误差以 $\pm 2\text{mm}$ 计,误差为 0.2%,则标准扭矩的误差代入上式计算得:

$$\delta_{M_0} = 0.36\%$$

5.2 其他误差

由表 4 的标定结果按全量程分析计算得,非线性误差 δ 为 1.0% (含滞后误差),重复性误差 δ 为 ± 1 个数,即 0.23%。

5.3 总误差

遥测系统总的测量误差可按下式计算:

$$\delta = \sqrt{\delta_{M_0}^2 + \delta^2 + \delta^2} = 1.1\%$$

由此可见,该遥测系统总的测试误差小于 1.5%。

6 关键技术及特点

6.1 自行研制的高精度应变式扭矩传感器,采用了严密的防护措施和保护技术,致使传感器在恶劣

条件下运行也无任何漂移现象, 保证传感器长期可靠地工作。

6.2 电源系统和发射机组件在高速旋转的构件中处于全密封状态, 隔绝可能泄漏的可燃气体, 保证安全可靠。

6.3 二半环组合的静止耦合线圈, 得以使感应供电技术实现, 解决了传感器和发射机的供电问题, 从而实现长期在线测量的要求。

6.4 结构设计新颖, 不改变机组原结构, 不改变机组运行状态, 且能实现系统绝对标定, 提高了测试精度。

7 工程应用

该系统 1997 年 4 月进入现场安装并投入使用。至今已 10 个多月, 不仅准确测出了改造后机组实发功率值, 且对机组运行实施监控, 保障有序生产和安全运行。测试误差小于 1.5%。

该系统投入运行的初始阶段, 曾显示了异常扭矩值, 机组发生了意外故障, 为迅速查找故障, 该系统提供了有力判据, 最后迅速排故, 缩短了检修

周期, 赢得了时间和经济效益。

8 结束语

研究的功率在线遥测系统还可应用于汽车主轴扭矩测试, 轧钢机轧辊的扭矩测试, 船舶功率测定, 装载机随机功率分配和扭矩分配的测试等, 配以不同传感器, 对旋转机械实施故障诊断的新技术更具有重大的发展前景。

在从事该项研究工作过程中, 曾得到马良理教授、周富大教授, 关德新教授的指导和热忱帮助, 在此表示谢意。

参考文献

- 1 袁希光主编. 传感器技术手册. 国防工业出版社, 1986 年 12 月
- 2 刘瑞复主编. 工程遥测技术. 机械工业出版社, 1985 年 12 月
作者简介 徐军, 男, 1966 年生, 工程师, 1989 年毕业于哈尔滨工业大学工程力学系。现在哈尔滨七〇三研究所从事结构强度和测试技术研究工作。参与研究的“数显扭力扳手”获 1993 年中船总公司科技进步三等奖。通讯处: 150030 哈尔滨 77-5 信箱。

·信息之窗·

我国最大功率单级烟气轮机在西航研制成功

总重量达 22 吨、输出功率为 16500 千瓦的国内最大功率的单级烟气能量回收装置——TP11 烟气轮机, 日前在西安航空发动机(集团)有限公司机械厂制造完成, 一次试车运转成功, 并通过用户的现场检测。

烟气轮机是石油化工企业催化裂化装置烟气能量回收系统的关键设备, 它利用废高温烟气产生动力驱动风机或发电机运转, 不但能变废为宝重新获得廉价电力资源, 达到能量回收再生的功效, 而且还大大减少了废气所造成的污染, 具有良好的经济效益和社会效益。这台烟气轮机是西航集团公司自行设计、制造的 TP 系列十余台烟机中功率最高、体积最大的产品, 其 16 500 千瓦的输出功率居国内所有自行生产和进口的同类产品之首。在制造过

程中, 西航集团公司机械厂用国标质量管理体系严格控制每一个零备件的生产, 以军工技术优势攻克了多道制造难关, 使一万多个零组件一次装配合格在试车过程中一次运转成功, 各项技术指标全部达到设计要求, 其中主轴转速达每分钟 5000 转, 超过了每分钟 4660 转的设计要求, 体现了该公司烟机设计、制造技术的国内领先水平。

日前, 该烟机已交付中国石化总公司浙江镇海石化总厂使用。此前, 由西航集团公司设计制造的十余台烟机已分别被大庆油田、辽河油田、南京炼油厂、天津炼油厂、吉林炼油厂、广东茂名炼油厂、湖南长岭炼油厂、呼和浩特炼油厂等国内众多石化企业广为使用并收到良好成效。

(刘安瑞 于建军)

—design conditions. **Key words:** design system, naval steam turbine, S_2 stream surface, three—dimensional calculation, loss

卧式内燃油和燃气锅炉的结构和设计 = **Construction and Design of Oil—fired and Gas—fired Horizontal Boilers** [刊, 中] /Gao Yukuan, et al (Harbin Municipal Labor Bureau) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2) —122~124

Discussed in this paper are the overall construction and design of oilfired and gas—fired horizontal boilers. Put forth are the requirements for the design of the furnace, tail heating surfaces and burners for such boilers. **Key words:** oil—fired boiler, gas—fired boiler, overall construction, design

汽轮发电机密封油冷却系统模糊建模与仿真研究 = **Fuzzy Model Creation and the Simulation Study of a Turbogenerator Seal Oil Cooling System** [刊, 中] /Wang Hongwei, Zhang Tong, Wang Zicai (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —125~127

The seal oil cooling system of a turbogenerator constitutes a complicated system in the simulation study of thermal power plants. After a study of the fuzzy model creation method the authors constructed a fuzzy model for a turbogenerator seal oil cooling system with satisfactory results being attained. **Key words:** fuzzy identification, fuzzy clustering, linear interpolation, Kalman filter, turbogenerator seal oil cooling system

双线圈电液转换器的可靠性分析 = **Reliability Analysis of a Double—coil Electro—hydraulic Converter** [刊, 中] /Yu DaRen, Xujiyu (Harbin Institute of Technology), Wang Hongbin, Yang Ge, Lin Bingjian (Harbin Turbine Co. Ltd.) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —128~130

A dynamic mathematical model is set up for a double—coil electro—hydraulic converter and a simulation analysis conducted of the coil broken wire fault. It is shown that the double—coil structure used for the electro—hydraulic converter of zero—steady current type can significantly enhance its reliability. **Key words:** electro—hydraulic converter, double—coil, reliability, fault tolerance

考虑变比热的冷却涡轮弯曲叶栅流场的数值模拟 = **Numerical Simulation of a Cooled Turbine Curved Cascade Flow Field with Variable Specific Heat Being Taken into Account** [刊, 中] /Chen Fu, Yang Ke, Wang Zhongqi (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —131~134

A numerical simulation is conducted with respect to an in—cascade flow field of a high—pressure turbine nozzle assembly of curved vanes in the case of the presence and absence of an air cooling spray. A three—dimensional variable specific heat computation method has been employed with the cooling air source reflecting the cooling air mixing/dilution effect. The calculation results show that the cooling air spray in the curved cascades led to a change in Mach number and temperature with the blade surface and end wall obtaining an effective low—temperature protection. Under the same cooling air flow rate the temperature reduction near a pressure side appears to be more marked than at the suction side with the cooling air film playing a more effective role. The in—cascade secondary flow exercises an influence on the cooling air distribution. **Key words:** curved cascade, air cooled turbine, numerical simulation, variable specific heat

旋转机械的功率在线测试技术 = **Rotating Machinery Power Output On—line Testing Techniques** [刊, 中] /Xu Jun, Li Chunlan, Lu Wenfa (Harbin 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (1). —135~139

The difficult problem of power output on—line measurement under unfavorable conditions can be solved by utilizing state—of—the—art science and technology. Described in this paper are the basic principles, the structure and composition of a measuring and testing system and calibration techniques with key issues and system features also pinpointed. The recommended measuring and testing system has broad application prospects. **Key words:** power output, remote measurement, on—line measurement