

文章编号: 1000-8055(2003) 02-0244-04

旋转系下的实时压力测量方法研究

张 东, 狄汀, 陶 智, 徐国强, 宁 磊
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083;)

摘要: 航空发动机旋转盘表面的压力测量需要压力传感器与旋转盘一同旋转, 因此压力传感器在感受测点压力的同时, 其感压膜片还将受到旋转离心力的影响。为了能使压力传感器能反应真实被测点的压力值, 在旋转设备上的压力传感器的实时标定技术成为解决这一问题的关键。本文利用空气柱在离心力场中的理论压差给出了旋转状态下的标准压力, 进而对传感器进行了实时标定。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 压力传感器; 标定; 旋转测量

中图分类号: TK312

文献标识码: A

The Simultaneous Measurement of Pressure in Rotating System

ZHANG Dong, DING Shui-ting, TAO Zhi, XU Guo-qiang, NING Lei

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Pressure transducers for pressure measurement of rotating disk surface have to rotate with the disk and this may give rise to the difficulty that measuring error may be unavoidable due to the membrane deformation caused by the centrifugal force. A real time local calibration, thus, has to be introduced for an accurate pressure measurement. A device was installed onto the test rig to generate a standard pressure source under rotating frame and this standard pressure was used for real time calibration.

Key words: aerospace propulsion; pressure sensors; calibration; rotating measurement

1 引 言

现代航空发动机中, 压气机的总压比愈来愈大, 尤其在后几级盘腔中, 压力的变化十分明显。在设计压气机后几级转盘时, 对于压力的影响不容忽视, 因此需要进行多级旋转盘腔压力特性的研究。图 1 为典型的盘腔压力特性研究实验器^[1]。

需要测量转盘表面的压力分布, 就需要在转盘表面开取压孔, 通过取压管和压力传感器相连, 然后将旋转件上物理量的信号通过滑环引电器过渡到静止仪器上。这样的测量方法则存在着以下问题:

(1) 由于压力传感器的输出均为毫伏级电信

号, 在这些信号的传输过程中, 尤其是经过滑环引电器会引入一些噪音信号, 使原有的信号有可能失真。

(2) 压力传感器是用以感受压力并将其转换为与压力成一定关系的电信号的装置。在模拟航空发动机旋转换热试验中, 为了达到高转速, 高精度的压力测量, 常使用惯性小, 灵敏度高的应变式压力传感器。图 2 是压力传感器的轴线和旋转轴共轴时的示意图。压力传感器在随旋转试验件一起旋转时, 无法避免感压膜片在离心力作用下的变形; 因此, 在旋转离心力的作用下, 感压膜片的变形将是被测点压力与离心力的共同结果^[2], 压力传感器的输出将无法反映被测点的真实压

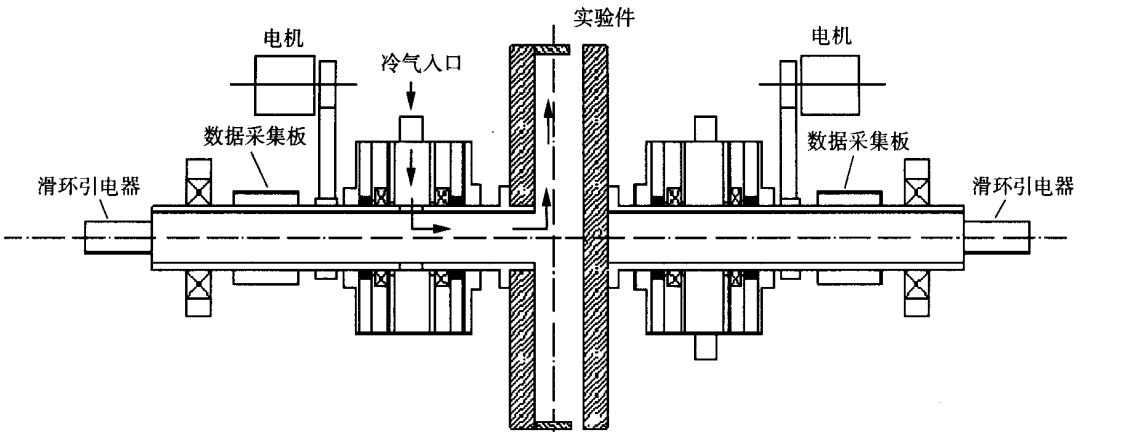


图 1 典型盘腔实验器示意图
Fig. 1 The model experimental system

力。实际上压力传感器的轴线很难和旋转轴线共轴,这时离心力引起的膜片变形更加突出^[3]。

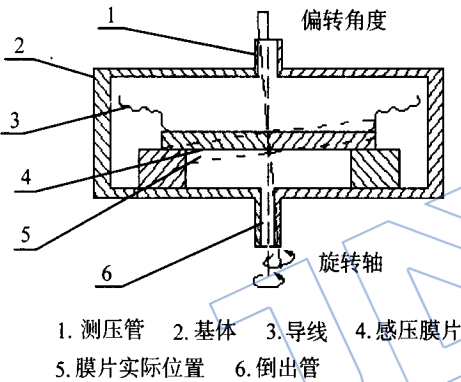


图 2 旋转状态下的压力传感器感压膜片的位置示意图
Fig. 2 The position of sensor during the rotating condition

为了解决这一问题,必须对压力传感器进行旋转状态下的实时标定,以消除离心力场下由于膜片变形带来的附加压力的影响。

2 压力传感器的实时标定技术

2.1 旋转系下压力传感器的受力及标定

当气体压力作用在不锈钢弹性体上,使弹性体产生变形,在弹性体上制作了组成惠斯登电桥的合金薄膜应变电阻器,膜片变形使电阻器的阻值发生变化,电桥输出相应的电信号。显然,当压力传感器和旋转的试验件一同旋转时,使感压膜片变形的力有离心力及测点气体的压力两部分。这时,为了剔除离心力造成的变形对传感器输出的影响,在压力传感器使用之前,必须对压力传

感器的旋转效应进行实时研究。

2.2 动态标定的原理

静态的压力传感器的标定通常是给定一个标准的压力源,针对不同的标准压力,标出它们的输出值,最后得到一个回归公式。而在旋转的装置上,标准的压力源的给出将是动态标定的成功与否的关键。

极细的旋转空心圆柱中的气体在旋转离心力场中,将感受的离心力所产生的压强的计算如下:

$$-\frac{dP}{dr} + \rho\omega^2 r = 0$$
$$\text{积分可得: } \Delta P = \int_{r_2}^{r_1} \rho\omega^2 r dr = \rho\omega^2 \frac{r_1^2 - r_2^2}{2} \quad (1)$$

其中: r 为气柱在径向的位置, ω 为旋转角速度^[4]。

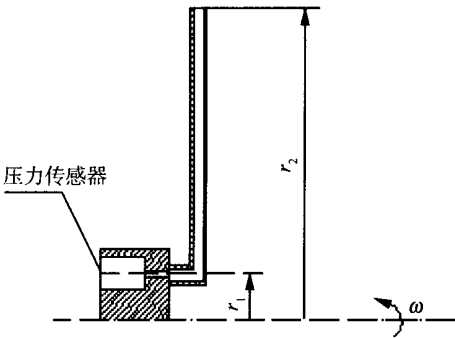


图 3 动态标定原理示意图
Fig. 3 The principle of rotating demarcation

如图 3,压力传感器所感受的压力是气体的压强和离心力的共同作用;根据公式(1)该气柱的压强和旋转角速度有固定关系且已知,因此离心力的影响就被孤立出来。

2.3 实时标定具体方案

给定标定空气柱的位置, 取回转半径 $r_1=300\text{ mm}$, $r_1=45\text{ mm}$, 空气密度 $\rho=1.205\text{ kg/m}^3$, 转速 $n=200\sim3000\text{ r/min}$, 在不同的转速下空气柱的压强可用公式一准确计算得到。显然, 此时压力传感器的输出是膜片离心力与气柱离心力的共同作用的结果, 而气柱压强可求得, 于是膜片受离心力影响的误差可以得到, 根据该压力传感器的静态标定结果, 可以由此得到一条该传感器的标定回

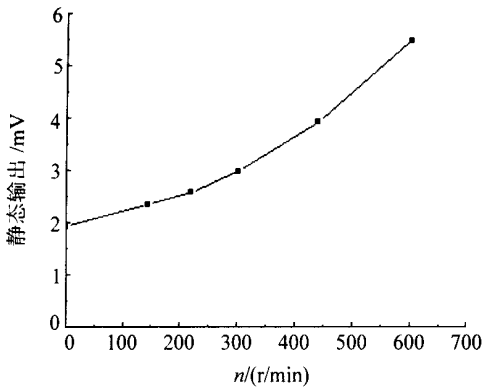


图4 静态标定结果

Fig4. The Demarcated Value of No. 1 Sensor in Static State

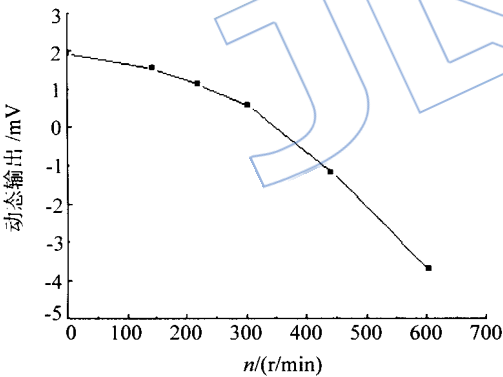


图5 动态标定结果

Fig5. The Demarcated Value of No. 1 Sensor in Rotating State

归曲线。具体标定方法如下:

首先, 在静止条件下, 用标准压力源得到传感器的静态数据, 其次根据标准压力和公式 (1) 反算转速, 最后在相应的转速下得到动态数据, №1 传感器的数据见表 1, 其静态标定与动态标定情况如图 4、图 5 所示。

如表 1 所示, 静态输出与动态输出之差即为膜片在离心力下变形而产生的压强, 实际试验中, 在相同传感器的安装位置, 只要将所测值与该差值相减即为被测实际气体的压强。

为了和图 5 的横坐标相一致, 图 4 的横坐标取为转速, 实际为标准压力源供给的压力折合的相应转速, 通过旋转实验台的取压盘装置的动态标定结果表明, 由于旋转的影响, 压力传感器的动态输出与静态输出结果有很大的不同。

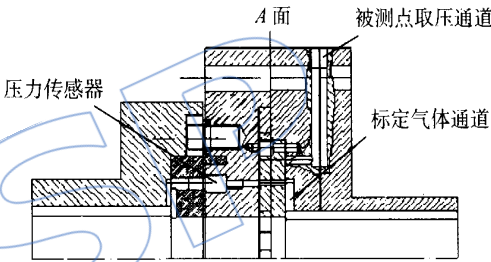


图6 实际的装置图

Fig.6 The actual equipment

2.4 具体解决方案

如图 6 所示, 旋转换热实验台采用了压力传感器的测压与标定一体化设计方案。设计中, 采用了左右开合结构的盘状联接构成气体通道, 左右两半的开合相对角度有两个, 开合, 传感器对应标定气体通道, 开合传感器对应被测点取压通道, 既解决了测压与标定的方便切换, 同时也解决了空气密封的难题。

如图 7、8 所示的装配图 A 面左视图与 A 面右视图。在 A 面左视图压力传感器所在位置是固定的, A 面右视图标定气体通道和被测点取压通

表 1 №. 1 压力传感器的标定结果

Table1 The demarcated value of No. 1 sensor

转速 $n/(r/min)$	0	144	220	302	442	605
标准气柱压强/ Pa	0	12.04	28.10	52.96	113.44	212.54
静态输出/ mV	1.93	2.336	2.583	2.974	3.925	5.483
动态输出/ mV	1.93	1.546	1.131	0.570	- 1.168	- 3.701
动、静态输出之差/ mV	0.0	0.790	1.452	2.404	5.093	9.183

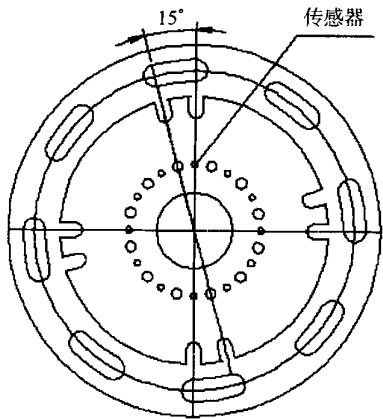


图 7 A 面左视图

Fig7. The view of left side

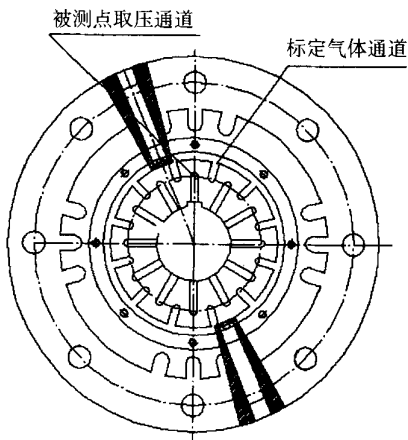


图 8 A 面右视图

Fig 8. The view of right side

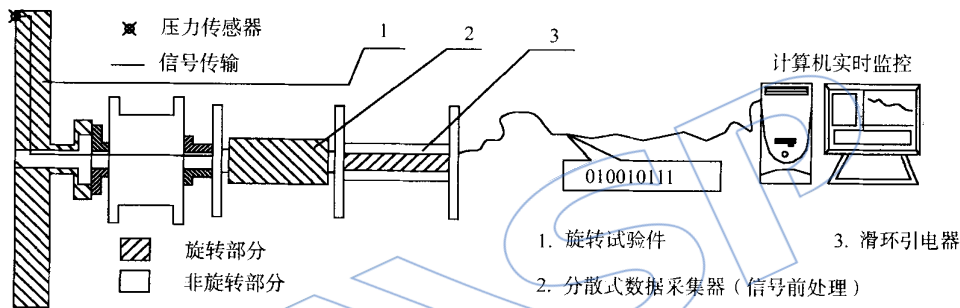


图 9 测量系统示意图

Fig.9 The system of measure

道是固定的。试验中,传感器首先对应标定气体通道,在不同的转速下,对压力传感器进行动态标定,然后将取压盘进行开合,传感器与被测点取压通道对应,即可开始真实压力测量。

3 实验过程的程控测量系统

采用图 9 的测量系统,压力传感器信号由分散式数据采集器测量,经放大并转换为数字信号,大大的消除高速滑环引电器对信号的干扰。本实验测试系统的控制程序具有对实验的监视、稳态数据记录、瞬态数据记录和压力传感器零漂的校正的功能。程序中还加入了一些工具和数据图形化窗口,如某些点的参数随时间的变化,实验件上的参数分布等,便于及时掌握实验情况和发现问题。实验验证了该数据采集程序具有信息量大、使用方便、精度高等优点。

4 结 论

在航空发动机的旋转换热试验中,要进行准

确的盘面压力测量,首先要使用高精度,小惯性的应变薄膜压力传感器。小惯性应变薄膜可以降低在离心力场中离心力的影响,相对于真实压力,这个影响不是主要因素。

同时,利用实时标定技术对压力传感器进行动态实时标定,其原理是利用离心力场中气柱压力理论进行标定压力传感器。最后选择旋转系上进行 A/D 转换的数采系统,得到较为准确的结果。

参考文献:

- [1] 詹治国. 正反转旋转盘间流动与换热的实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
- [2] Lin Jeffrey S. Sensor Validation for on-Line Diagnostics [D]. Instrumentation in the Aerospace Industry, 1994.
- [3] 刘迎春. 传感器原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [4] 涂国平. 传感器线性度的统计分析[J]. 传感器技术, 2000. 19(3): 36- 37.