doi:10.11887/j.cn.202001021 http://journal.nudt.edu.cn

应变天平测量电路退化及失效检测技术*

王南天,许晓斌,马晓宇,王 雄,童 帅
(中国空气动力研究与发展中心,四川 绵阳 621000)

摘 要:针对振动、温度应力等引起的风洞应变天平检测电路(惠斯登电桥)的退化或失效,提出一种检测方法。基于不同时刻在电桥不同节点施加激励并测量其响应,通过理论计算实现电桥的参数解析,基于聚类实现失效检测。研制了原理样机,并开展实验研究,实验结果表明该方法有效,可以实现电桥的失效检测,电桥电阻的测量精度可以达到0.2‰以上。基于该方法设计的样机,可以实现应变天平检测电路的退化及失效的自动检测,节省故障诊断时间,提高风洞试验的可用时间。

关键词:风洞;应变天平;惠斯登电桥;故障诊断;退化
中图分类号:TH17 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)01-150-06

Degradation and failure detection technology on strain balance measuring circuit

WANG Nantian, XU Xiaobin, MA Xiaoyu, WANG Xiong, TONG Shuai
(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the degradation and failure caused by vibration, temperature cycling and etc in strain balance's measuring circuit (Wheatstone bridges), a detection method was presented. In the method, the bridge was driven on different nodes at different periods and the responses were measured. The bridge's parameters were calculated on the basis of the theoretical calculation, and its failure was detected on the basis of the clustering method. A principle prototype was developed and the experiment research was conducted. Experiment results show that the presented method is effective, and it can indeed detect the failure and its test accuracy of bridge resistance can reach 0.2‰. The designed prototype realizes the auto-detection of degradation and failure of strain balance measuring circuit, which costs less time consumption than traditional test method and lifts the available time of the wind tunnel test.

Keywords: wind tunnel; strain balance; Wheatstone bridge; fault detection; degradation

风洞天平是风洞测力试验最基础、最重要的测量设备,一直倍受重视[1-2],其中应变天平作为常规测力试验的主要测量设备之一,被广泛应用于各类风洞特别是高超声速风洞的测力试验中。典型应变天平的核心是弹性梁与测量梁变形的惠斯登电桥[3-5]。在高超声速风洞测力试验中,风洞启动时的高温高压气流冲击会使模型发生较大的振动,气流的不稳定等因素也可能引起模型振动,这些都可能引起模型内天平测量电路的退化或者失效,影响天平使用。

目前,当天平数据发生异常时,一般由"老师傅"手动检测电桥各点位的电压,依据经验对故障进行分析诊断,这将花费较多的时间,而且没有发现针对此问题的文献。为此,本文引入自动测试技术,通过不同时刻在电桥不同节点施加激励并测量响应,基于理论模型分析电桥的特征参数,引入聚类的方法对测量电路进行失效检测,并研制相应的退化及失效检测系统,以节省其故障诊断时间,提高风洞试验的可用时间,以更好地保证风洞试验任务的完成。

1 检测方法建模

1.1 应变天平基本原理

应变天平的基本原理是通过测量外力引起的变形,来测量输入的外力和力矩。应变天平一般包含多个测量通道,每个天平的测量通道数不一定相同且通道间测量结果之间的耦合也不相同,单个通道的基本测量结构一致,为惠斯登电桥,如图1所示。

当天平有力输入时,会引起天平的机械本体的应变,进而引起与其固连的应变片的电阻值 R_1 发生 ΔR_1 的变化。当在节点1与4之间输入一个

* 收稿日期:2018-09-20
作者简介:王南天(1986—),男,重庆人,工程师,博士,E-mail:wangnant@126.com

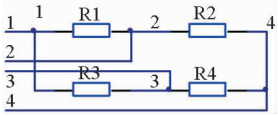


图 1　天平测量电路基本结构

Fig. 1　Structure of the balance's measuring circuit

电压时,R_1 的变化引起节点 2、3 之间的电压(如式(1)所示)发生变化。由于 $\Delta R_1 \ll R_1$,对两边求导并作线性处理,可得到式(2):ΔU_{23} 与 ΔR_1 呈线性关系,故在节点 1、4 间电压稳定的情况下,可通过测量 ΔU_{23} 得到表征天平应变量的 ΔR_1,再通过耦合公式,解析出各个分量的力和力矩。由于电路的对称性,如果使用电阻 R2 作为测量电阻,则可以去掉式(2)中增益系数的负号,将增益改为正。

在工程上,一般取 R1 与 R2(R3 与 R4)为相同阻值、同一批次的电阻,且安装在温度几乎一致的环境,这样温度变化将引起相同的电阻变化,从而抵消掉零位漂移,式(2)可简化为式(3)。由式(3)可以看出,电阻的零位阻值变化 R_1 将引起增益的变化;此外 U_{14} 的变化也将引起测量增益的变化,在模数转化时,用 U_{14} 作为参考电压理论上可以抵消该影响。

$$U_{23} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) U_{14} \tag{1}$$

$$\Delta U_{23} = -\frac{\Delta R_1 R_2 U_{14}}{(R_1 + R_2)^2} \tag{2}$$

$$\Delta R_1 = -4R_1 \cdot \frac{\Delta U_{23}}{U_{14}} \tag{3}$$

1.2　检测电路失效模式与检测模型

长期的风洞试验表明,应变天平可能发生的退化和失效模式主要包括零点漂移、增益变化、开路、短路、虚焊等。随着天平使用时间的增加,加之天平处于温度应变的工作环境,受到热的影响,其总应变片可能发生退化而导致其电阻变化,这将主要引起天平零点的漂移,也会引起天平增益的变化。由于应变片的松动,相同天平机械应变引起的应变片电阻变化减小,会使天平的增益减小。由于外力拉动、挤压等原因,天平应变片的焊点甚至导线本身可能会出现断开的情况,发生开路故障。天平应变片引线焊点的虚焊,可能引起间歇性的电阻增加或者开路。此外,测量电路和模型短路的情况也可能发生。

针对上述可能的故障失效模式,建立如图 2 所示失效检测电路模型:电阻 R1 ~ R4 为电桥本身的电阻,R5 ~ R8 为引出的 4 条线的线电阻,R9

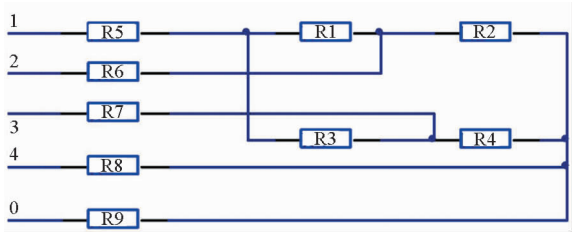


图 2　天平测量电路故障检测电路模型

Fig. 2　Failure detection model of balance's measuring circuit

为测量电路与大地(天平本体)的隔离电阻。一般情况下,$R_1 \sim R_4$ 为百欧姆量级,$R_5 \sim R_8$ 的大小与线缆的长度等有关,常用的 AWG30 铜线电阻约为 0.34 Ω/m,R_9 一般可认为为无穷大。

该模型对外有 5 个输入输出节点,与物理结构相符:节点 0 对天平本体,通过依次连接的支杆—攻角机构—风洞本体与大地连接,节点 1 ~ 4 分别对应电桥的 4 条引线端点。基于电路对称结构,为下文论述方便,如无特殊说明,假定 R1 为测量应变片,R2 为温度补偿电阻,R3 和 R4 为另一桥臂。表 1 给出了不同退化或者失效在模型中的表现形式。

表 1　退化或者失效在模型中的表现形式

Tab. 1　Manifestations of degradation and failure in model

序号	退化失效原因	模型表现形式
1	应变片电阻改变	R1 ~ R4 某电阻小范围改变
2	应变片粘黏不稳	无明显变化
3	某引线断裂或脱焊	R5 ~ R8 某电阻为无穷大
4	某应变片脱焊	R1 ~ R4 某电阻为无穷大
5	应变片短路	R1 ~ R4 某电阻近似为 0
6	测量电路与大地短路	R9 电阻变小,近似为 0
7	虚焊引起的瞬时开路	R1 ~ R8 电阻瞬时断开

1.3　失效检测模型

退化或者开路断路等永久性故障,表现形式为模型中静态指标的变化,即电阻的变化,表 1 也可表明此。本检测方法针对此类故障,其本质是电阻的测量与聚类。

由于该模型只有 5 个输出节点,要估计 9 个模型参数比较困难。在实际应用中,由于电桥的 4 条导线一般长度相同且选用同样的型号,因此假设 4 条导线的电阻相等,即:

$$R_5 = R_6 = R_7 = R_8 \tag{4}$$

采用图 3 所示基本原理对测量电路进行检测:将开关 SW1 和 SW2 连接到不同位置,分别在

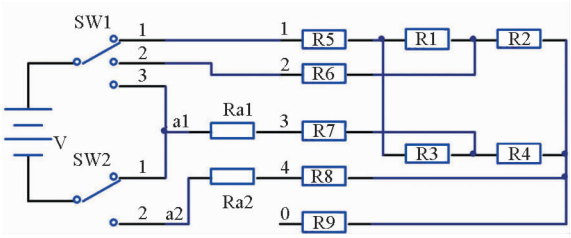


图 3　退化与开路短路失效检测原理

Fig. 3　Detecting principle of circuit degradation or open/short circuit failure

电桥的节点 1 或 2 与节点 3 或 4 之间施加激励，并测量节点 0 ~ 4、a1 和 a2 这 7 个节点之间的电压差，通过解算得到各参数。图中 V 为电源，Ra1 和 Ra2 为高精度低温漂参考电阻。

首先在节点 1 与 4 之间添加电压，设电流为 I_{14}，基于基尔霍夫定律可以得到：

$$U_{12} = R_5 I_{14} + \frac{R_{1234} I_{14}}{R_1 + R_2} R_1 \tag{5}$$

$$U_{4a2} = Ra_2 I_{14} \tag{6}$$

其中，

$$R_{1234} = (R_1 + R_2)//(R_3 + R_4) = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \tag{7}$$

联立式(5) ~ (7)可以得到：

$$R_5 + \frac{R_1(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{U_{12}}{U_{4a2}} Ra_2 \tag{8}$$

与式(8)类似，在节点 2 与 4 之间加电流可以得到：

$$R_8 + \frac{R_2 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{U_{34}}{U_{4a2}} Ra_2 \tag{9}$$

$$\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{U_{13}}{U_{4a2}} Ra_2 \tag{10}$$

在节点 3 与 4 之间加电流可以得到：

$$\frac{R_1 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{U_{12}}{U_{4a2}} Ra_2 \tag{11}$$

在节点 2 与 3 之间加电流可以得到：

$$R_7 + \frac{R_3(R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{U_{12}}{U_{3a1}} Ra_1 \tag{12}$$

方程(8) ~ (12)中，其右侧的电压比可以通过模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)测量得到，且 Ra1 和 Ra2 为已知的高精度低温漂电阻，电阻值 Ra_1、Ra_2 已知，即可以通过联系方程(8) ~ (12)和假设条件方程(4)得到 $R_1 \sim R_8$。

基于精确测量的 $R_1 \sim R_8$ 可以对天平进行退化分析。针对模型中电阻 R1 ~ R8 中某电阻发生开路，R1 ~ R4、R9 某电阻发生短路，可基于理论分析的方式得到各种失效模式下的测量值，通过测量值聚类的方式进行失效分析。一般情况下，单故障发生概率相对较高，考虑到多故障同时发生将有特别多的故障表现形式且发生概率很小，因此本方法暂时针对单故障。

2　检测样机研制

为使样机简洁灵活，采用“前端测量装置 + 计算机软件”的结构：基于前端测量装置进行原始数据采集，保证采样数据的精确方便；基于计算机软件进行数据分析，可以在不改变前端的基础上升级检测方法，增加设计的灵活性。

2.1　前端测量装置

ADS1263 是 TI 公司的 32 位高精度 ADC[6]，支持 11 个模拟量引脚，它们不仅可作为 ADC 转换差分输入或者参考电源输入，还可以用于电流源输出和作为通用输入输出(General-Purpose Input/Output, GPIO)。这些特征使该芯片特别适合于本样机的前端采集电路设计。

基于 ADS1263 设计的前端测量装置结构如图 4 所示：采用 ADS1263 + 单片机的基本结构。ADS1263 是采集的核心部分，某个 INx(如图中红色长虚线)作为电流输出驱动电桥(电桥通过连接器节点①②③④接入样机)，另一个 INx(如图中蓝色短虚线)设置为 GPIO 输出，并输出低电平作为电流源的回流通路，剩余的 INx 作为差分输出，用于测量需要检测的电压，如 U_{2a2}、U_{3a2}、U_{13} 等。单片机则提供 ADS1263 与上位机软件的通信接口。

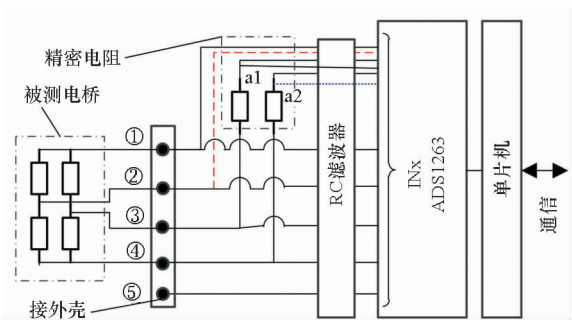


图 4　前端测量装置原理示意

Fig. 4　Schematic diagram of front-end measuring system

2.2　上位机软件

上位机软件的主要任务是基于式(4)和式(8) ~ (12)实现电阻 $R_1 \sim R_8$ 的求解。考虑本系统为样机，需要后期改进升级的地方较多，而 MATLAB 是工程计算中十分常用的软件，故选用 MATLAB 作上位机软件。

软件具有仿真模式和测试模式。仿真模式基

于 MATLAB Simulink,需要的电压数据从 Simulink 获取,用于算法的仿真与验证。测试模式则使用前端采集电路获取电压数据,用于天平测量电路退化与失效检测。软件还支持将天平检测电路的测量数据按照天平名称和通道进行后台存储,并包含时间戳,用于对天平的整个退化过程进行监控、分析等。

图 5 给出了上位机软件的主界面。图中数字为仿真结果,仿真的输入电阻为 $R_1 = 350\ \Omega$, $R_2 = 351\ \Omega$, $R_3 = 352\ \Omega$, $R_4 = 353\ \Omega$, $R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = 1\ \Omega$, $R_9 = \mathrm{Inf}$(无穷大)。

仿真结果与输入的真实值相同,表明该方法对 $R_1 \sim R_8$ 的估计理论上是无偏的。

图 5　上位机软件主界面

Fig. 5　Main interface of the upper computer software

3　实验与应用

3.1　功能测试

图 6 给出了实现本检测方法的原理样机的前端检测电路(图中上方)和电桥模拟电路(图中下方),电桥模拟电路可以设置模型中的 $R_1 \sim R_8$ 为无穷大、近似为 0 或者百欧姆范围内调整,设置 R_9 近似为 0 Ω。

1)调整 $R_1 \sim R_4$,用该原样测试结果,可以检测到相应电阻变化。图 7(a)为其中一次检测结果。

2)设置 $R_1 \sim R_8$ 为无穷大(相应支路的开关断开),可以检测到相应的开路故障。图 7(b)为其中一次检测结果,图中"Inf"表示断开。

3)设置 $R_1 \sim R_4$ 或 R_9 为 0(相应支路的开关闭合),可以检测到相应的故障。图 7(c)为其中一次检测结果,图中"0"表示短路。

测试结果表明,该系统具备 R1 ~ R8 的阻值

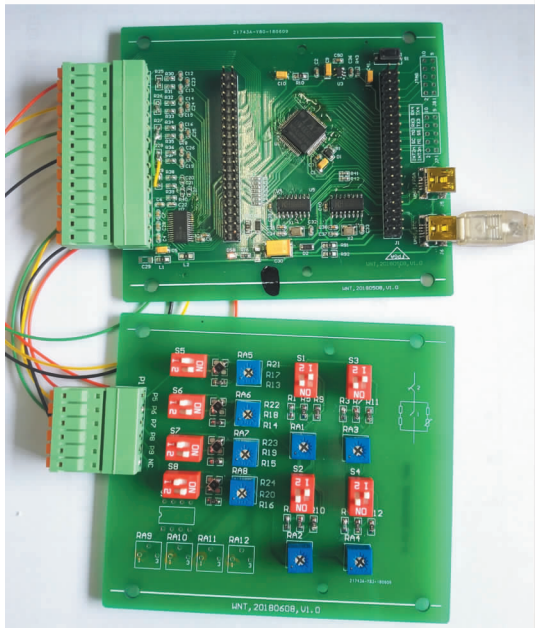
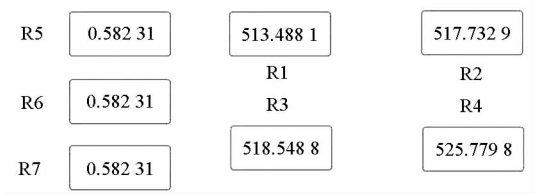


图 6　前端测量电路与被测电桥

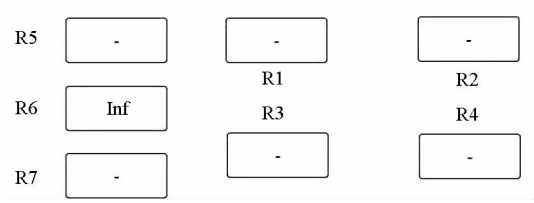
Fig. 6　Hardware of front-end measuring circuit and tested bridge

测量与开路测量能力、R1 ~ R4 以及 R9 的短路测量能力,即本样机具备检测表 1 中的第 1 项和第 3 ~ 6 项对应的退化或者失效。



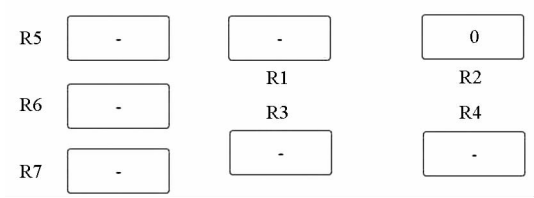
(a) 电阻变化

(a) Resistance change



(b) R6 断开

(b) R6 open-circuit



(c) R2 短路

(c) R2 short-circuit

图 7　试验测试结果

Fig. 7　Results of experiment

3.2 精度测试

用4个25 ppm的300 Ω的精密电阻组成电桥,连接到原理样机进行精度测试。

表2给出了20次的测试结果,表3给出了表2中数据的统计结果,其中ave为平均值,Δmax(Δmin)为其中最大(小)值与平均值的差的绝对值,err_max(err_min)为Δmax(Δmin)与ave的比值。

从测试结果看,该样机测量电桥电阻为300 Ω,桥臂电阻R1~R4的电阻值测量最大误差约为0.113‰(表3中下划线数值)。由式(3)可知由此测量可能带来的增益误差最大为4×0.113‰≈0.46‰。由于导线电阻本身较小,测量的误差较大,最大约为10 mΩ。由于导线采用的是弹簧压接的方式,模型中的导线电阻实际是导线电阻和接触电阻,因此不同的测试之间可能存在小的变动,这可能是导致测量结果有较大偏差的一个原因。

4 结论

针对应变天平检测电路失效快速检测的需求,研究了电桥的退化与失效自检测方法,仿真结果表明该电阻估计方法理论无偏;设计了原理样机,实验结果表明该方法有效,电桥电阻测量精度可达0.2‰,导线电阻测量精度约为2%。该方法可以为电桥的退化分析与故障诊断提供支持,实现应变天平检测电路的故障自动检测,节省故障诊断时间,提高风洞试验可用时间。下一步将研究提高测量精度的装置。

表2 20次测量结果

Tab.2 Results of 20 tests

Ω

序号	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
1	299.748 4	299.998 9	299.533 4	299.821 4	0.569 60
2	299.768 9	300.037 9	299.545 7	299.821 1	0.562 95
3	299.764 8	300.031 6	299.512 8	299.783 0	0.576 19
4	299.748 3	299.990 1	299.529 5	299.814 9	0.576 33
5	299.741 5	300.003 0	299.509 9	299.816 0	0.571 41
6	299.765 1	300.037 7	299.532 3	299.804 7	0.570 68
7	299.758 9	300.031 7	299.509 0	299.831 1	0.564 74
8	299.745 7	300.004 9	299.526 4	299.817 7	0.571 97
9	299.744 4	300.019 1	299.505 6	299.827 3	0.572 81
10	299.760 0	300.028 2	299.514 3	299.814 5	0.572 00
11	299.766 4	300.034 8	299.530 0	299.808 3	0.570 31
12	299.740 4	300.010 7	299.512 9	299.821 1	0.574 52
13	299.744 0	300.013 1	299.514 5	299.811 9	0.574 46
14	299.743 5	300.006 0	299.516 7	299.821 2	0.571 91
15	299.744 9	300.027 6	299.509 9	299.831 7	0.574 98
16	299.750 3	300.042 4	299.519 1	299.822 1	0.574 20
17	299.737 9	300.035 5	299.498 1	299.819 0	0.574 61
18	299.729 8	300.027 7	299.507 7	299.832 2	0.573 55
19	299.748 1	300.039 5	299.506 6	299.828 6	0.575 69
20	299.770 3	300.055 9	299.504 2	299.792 1	0.577 85

表3 统计结果

Tab.3 Statistic results of tests

Ω

名称	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
ave	299.751 1	300.023 8	299.516 9	299.817 0	0.572 54
Δmax	0.019 176	0.032 115	0.028 768	0.015 254	0.005 31
Δmin	0.021 256	0.033 695	0.018 846	0.033 999	0.009 591
err_max	0.000 064	0.000 107	0.000 096	0.000 051	<u>0.009 270</u>
err_min	0.000 071	0.000 112	0.000 063	<u>0.000 113</u>	0.016 751

参考文献(References)

[1] 舒海峰, 许晓斌, 孙鹏. 高超声速风洞多天平测力试验技术研究[J]. 实验流体力学, 2014, 28(4): 49 – 53.
SHU Haifeng, XU Xiaobin, SUN Peng. Technology investigation on force test with multi-balance in hypersonic wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(4): 49 – 53. (in Chinese)

[2] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
HE Dexin. Wind tunnel balance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)

[3] 杨双龙, 周全, 徐科军. 杆式风洞应变天平动态解耦 – 补偿[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1598 – 1605.
YANG Shuanglong, ZHOU Quan, XU Kejun. Dynamic decoupling-compensation for bar-shaped wind tunnel strain gauge balance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(7): 1598 – 1605. (in Chinese)

[4] 李纯, 李琦, 姚程炜, 等. 应变天平零点温度漂移补偿研究[J]. 传感器世界, 2016, 22(7): 14 – 17.
LI Chun, LI Qi, YAO Chengwei, et al. Study of temperature drift compensation in strain gauge balance[J]. Sensor World, 2016, 22(7): 14 – 17. (in Chinese)

[5] Ulbrich U. Combined load diagram for a wind tunnel strain-gauge balance [C]. 27th AIAA Aerodynamics Measurement and Ground Testing Conference, 2010: AIAA 2010 – 4203.

[6] Texas Instruments. ADS126x 32-bit, precision, 38-kSPS, analog-to-digital converter (ADC) with programmable gain amplifier (PGA) and voltage reference[EB/OL]. (2015 – 06 – 10) [2018 – 09 – 08]. http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1263.pdf.