

doi: 10.7690/bgzdh.2024.03.009

低速风洞应变天平通道极性判断方法

成 垒, 陈 丹, 廖 威, 贾凤欣

(中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高低速风洞应变天平工作效率, 提出一种直接单分量加载判断天平通道极性的方法。通过对单分量加载结果进行估计, 筛选不同通道极性组合时的天平计算结果。实验结果表明: 该方法能快速、有效地判断天平通道极性, 并且不依靠经验, 支持自动化程序化运行; 对加载精度要求较低, 容易满足实用要求。

关键词: 风洞; 应变天平; 天平通道极性判断; 估计

中图分类号: TJ011; V211.74 **文献标志码:** A

Polarity Judgment Method of Low-speed Wind Tunnel Strain Gauge Balance Channel

Cheng Lei, Chen Dan, Liao Wei, Jia Fengxin

(Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of the low-speed wind tunnel strain-gauge balance, a method for judging the polarity of the balance channel by direct single-component loading is proposed. By estimating the results of single component loading, the balance calculation results of different channel polarity combinations are screened. The experimental results show that the method can quickly and effectively judge the polarity of the balance channel, and does not rely on experience, supports automatic programmed operation, and has low requirements for loading accuracy, and is easy to meet the practical requirements.

Keywords: wind tunnel; strain gauge balance; balance channel polarity judgment; estimation

0 引言

气动中心低速风洞的主要试验类型是测力试验, 测力试验的主要传感器是天平^[1-4]。当前, 除个别风洞使用外置式机械天平外, 主要使用内置式应变天平。应变天平主要由天平基体和粘贴在天平基体上的应变片组成, 且应变片组成电桥电路。天平工作的基本原理: 应变片因天平受力产生变形, 进而导致电阻变化, 可以通过检测电桥输出信号进行测量, 从而完成力到电信号的转变^[5-6]。为提高天平性能, 天平的一个分量由一个或多个通道(一个通道即一个电桥电路)组合测量, 在天平使用前, 需要对天平各通道极性进行判断, 确保天平测量结果正确。当前, 一般使用“2步法”判断天平通道极性: “手动推方向”初步判断(“手动推方向”指徒手对天平进行单分量加载)和使用砝码、弹簧秤等进行“单分量加载”校核初步判断结果。这种判断方法具有较好的可操作性, 但判断过程存在依靠经验、效率低等问题。笔者通过对单分量加载结果进行估计, 筛选不同通道极性组合时的天平计算结果, 进而确定天平通道极性, 即提出一种直接单分量加载判断天平通道极性的方法。

1 应变天平使用方法介绍

应变天平从结构上分为杆式、盒式和圆柱梁式等。天平在使用时, 一端与模型连接、一端与支杆连接, 连接方式有锥套、法兰等^[7-10]。杆式应变天平与支杆、模型连接如图1所示。

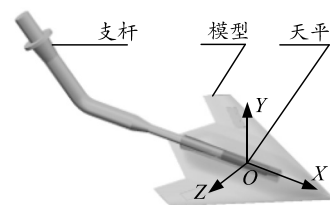


图1 杆式应变天平安装

天平通道极性判断一般在天平安装到支杆后进行, 此时, 由于缺乏测量基准, 安装精度较低, 天平(支杆)有较小俯仰角、天平与支杆间有较小滚转角, 如图2所示。

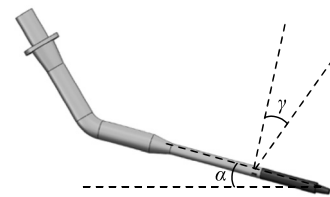


图2 天平初始安装

收稿日期: 2023-11-11; 修回日期: 2023-12-16

第一作者: 成 垒(1988—), 男, 陕西人, 硕士。

应变天平各分量输出一般由 1、2、3 个或多个通道组合而成，以某杆式应变天平 TGXX01E 为例，该天平为 7 通道 6 分量天平。某杆式天平 TGXX01E 的通道组合形式为：

$$\left. \begin{aligned} Y &= B_2 - B_1 \\ X &= B_7 \\ M_z &= B_1 + B_2 \\ Z &= B_3 - B_4 \\ M_y &= B_5 + B_4 \\ M_x &= B_5 + B_6 \end{aligned} \right\}。$$

式中：Y 为升力；X 为阻力； M_z 为俯仰力矩；Z 为侧力； M_y 为偏航力矩； M_x 为滚转力矩。

为测量天平力(矩)，需将通道组合后的电信号代入天平公式进行计算，TGXX01E 的天平公式为：

$$F_i = K_{i1}N_i + K_{i2}N_i^2。$$

式中： $N_i = \Delta N_i - \sum_j (K_{ji1} \cdot F_j + K_{ji2} \cdot F_j^2) - \sum_{m,n} K_{mni} \cdot F_m \cdot F_n$ ； F_i 为各分量载荷大小； ΔN 为组合后各分量末读数减初读数； K_{i1}, K_{i2} 为各分量的主系数和平方项系数； K_{ji1}, K_{ji2} 为 j 分量对 i 分量的一次干扰系数和平方干扰系数； K_{mni} 为 m 分量和 n 分量对 i 分量的交叉干扰系数， $i = \{X, Y, Z, M_x, M_y, M_z\}$ ， $j = \{X, Y, Z, M_x, M_y, M_z\}$ ， $j \neq i$ ， $m = \{X, Y, Z, M_x, M_y, M_z\}$ ， $n = \{X, Y, Z, M_x, M_y, M_z\}$ ， $n \neq m$ 。

2 “2 步法”判断天平通道极性

“2 步法”第 1 步为：“手动推方向”初步判断。原理为：天平在设计时，为提高灵敏度，遵循

“力(矩)分量增大，该分量各组合通道电信号往有助于组合值增大的方向变化”的原则，以 TGXX01E 天平为例，当分别加载各分量正方向力(矩)时， B_2 、 B_3 、 B_5 、 B_6 、 B_7 通道电信号应当增大， B_1 、 B_4 为矛盾项，无法在推方向阶段确定。“2 步法”第 2 步为：“单分量加载”校核初步判断结果。对各分量进行单分量加载，将加载前后的天平电信号差值代入天平公式计算，与加载值进行对比，依据比对结果，最终确定天平通道极性。

“2 步法”判断天平通道极性流程如图 3 所示。

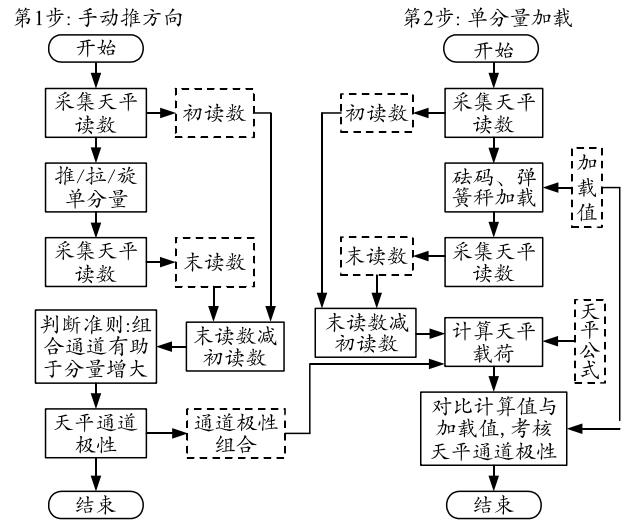


图 3 “2 步法”判断天平通道极性流程

3 “2 步法”判断天平通道极性实验

按照“2 步法”判断天平通道极性，首先进行“手动推方向”。采集天平初读数及徒手加载单分量时的天平读数，如表 1 所示。

表 1 “手动推方向”天平数据

mV

加载项目	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7
无(初读数)	-2.57	-0.35	-0.29	-0.36	0.13	0.19	-2.13
升力	-2.16	1.51	-0.37	-0.69	0.14	0.21	-1.66
阻力	-2.51	-0.09	-0.34	-0.50	0.13	0.20	0.12
俯仰力矩	-2.13	1.72	-0.34	-0.53	0.14	0.21	-1.51
侧力	-2.52	-0.16	-0.77	-2.35	0.13	0.18	-1.96
偏航力矩	-2.51	-0.08	0.29	2.29	0.13	0.20	-1.65
滚转力矩	-2.54	-0.17	-0.27	-0.42	0.29	0.35	-1.81

“手动推方向”时的天平数据减去天平初读数得到变化量，按照“力(矩)分量增大，该分量各组合

通道电信号往有助于组合值增大的方向变化”的原则，初步判断天平通道极性，结果如表 2 所示。

表 2 “手动推方向”天平读数变化量及通道极性判断结果

mV

加载项目	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7
升力	0.41(-)	1.86(+)	—	—	—	—	—
阻力	—	—	—	—	—	—	2.25(+)
俯仰力矩	0.44(+)	2.07(+)	—	—	—	—	—
侧力	—	—	-0.48(-)	-1.99(+)	—	—	—
偏航力矩	—	—	0.58(+)	2.65(+)	—	—	—
滚转力矩	—	—	—	—	0.16(+)	0.16(+)	—

根据“手动推方向”结果，初步判断天平通道极性： B_2 、 B_4 、 B_5 、 B_6 、 B_7 极性为正， B_1 因加载升力、俯仰力矩时给出结果矛盾暂无法判断， B_3 因加载侧力、偏航力矩时给出结果矛盾暂无法判断。

为最终确定天平通道极性，必须对天平进行“单分量加载”。由于仅 B_1 、 B_3 通道极性无法判断，可

表 3 天平“单分量加载”计算结果

加载项目	通道极性	升力/kg	俯仰力矩/(kg·m)	侧力/kg	偏航力矩/(kg·m)
升力-15 kg, 163 mm	B_1+	-14.99	—	—	-2.45
升力-15 kg, 163 mm	B_1-	-27.95	—	—	0.01
侧力 10 kg, 163 mm	B_3+	—	-1.69	10.60	—
侧力 10 kg, 163 mm	B_3-	—	-0.92	19.47	—

由计算结果可知，加载-15 kg 升力实验，当 B_1 极性为正时，升力计算值为-14.99 kg，与加载值吻合；加载 10 kg 侧力实验，当 B_3 极性为正时，侧力计算值为 10.60 kg，由于侧力使用弹簧秤加载，加载精度相较砝码偏低，故仍可判定计算结果与加载值吻合；因此，容易判断通道 B_1 、 B_3 的极性均为正。另外，通过计算 2 次实验中力矩与力的比值得到力臂分别为 163.4、159.4 mm，也支持同样判断结果。

至此，通过“2 步法”，已完全判断天平各通道

表 4 单分量加载计划

序号	加载目标	方向	大小/kg	加载点坐标/m	备注
1	-15 kg 升力	竖直向下	15	(0.163, 0, 0)	砝码
2	10 kg 侧力	从天平模型端看去指向左侧	10	(0.163, 0, 0)	弹簧秤
3	-10 kg 阻力	沿天平轴线指向模型端	10	(0, 0, 0)	弹簧秤
4	3.1 kg·m 滚转力矩	竖直向下	15	(0.163, 0, 0.209)	砝码

为对加载结果进行估计，除需确定加载量外，还需确定天平初始安装角，以及加载量、加载角度、天平初始安装角的最大误差。设初始俯仰角为 0、滚转角为 0，最大误差均为 $\pm 2^\circ$ ；砝码加载精度为 0.1/10 kg，弹簧秤加载精度为 1/10 kg，弹簧秤加

表 5 单分量加载部分分量估计值

加载目标	Y/kg	X/kg	M_z /(kg·m)	Z/kg	M_y /(kg·m)	M_x /(kg·m)
-15 kg 升力	-15.15~-14.83	-0.53~0.53	-2.47~-2.42	-0.53~0.53	-0.09~0.09	—
10 kg 侧力	-1.91~0.38	-1.91~0	-0.31~0.06	8.86~11.00	-1.79~-1.44	—
-10 kg 阻力	0.05~1.91	-11.00~-8.86	—	-1.91~0	—	—
3.14 kg·m 滚转力矩	-15.15~-14.83	—	—	—	—	3.10~3.17

天平通道极性包括“+”“-”2 种可能，对于 7 通道的 TGXX01E 天平，共有 $2^7 = 128$ 种通道极性组合，分别将所有通道极性组合带入天平公式计算，即可得到各种通道极性组合下的计算结果。判断天平通道极性的问题即转换为寻找哪一种通道极性组

通过加载升力和侧力进行分析。

使用砝码在升力方向加载，加载量-15 kg，加载点在天平轴线上、距离天平中心 163 mm；使用弹簧秤在侧力方向加载，加载量 10 kg，加载点在天平轴线上，距离天平中心 163 mm。分别计算天平通道 B_1 、 B_3 为不同极性时的结果，如表 3 所示。

极性。

4 直接加载法判断天平通道极性

通过“2 步法”判断天平通道极性，第 1 步“手动推方向”，即单分量不定量加载，可进行天平通道极性初步判断，仅用于减少通道极性组合的可能性。事实上，第 2 步“单分量加载”也包含了可用于初步判断通道极性的信息，并且由于可以定量估计，因此可以直接使用加载结果判断通道极性。

首先制定加载计划表，加载分量要求覆盖所有天平通道参与计算，如表 4 所示。

载角度最大误差 10° (使用弹簧秤加载时要求加载角度 > 0 ，以减小各分量估计值范围)。则按上述计划加载后，根据力分解原理，计算得到各分量的估计值 (仅列出数值较大分量估计值，用于后续筛选数据的限定条件)，如表 5 所示。

合的计算结果完全落入天平各分量估计区间的问题。筛选结果如图 4 所示 (为便于展示，对各种通道极性组合进行编号：1—“-----”，2—“- - - - - +”，3—“- - - - - + -”，…，128—“+++++++”)。

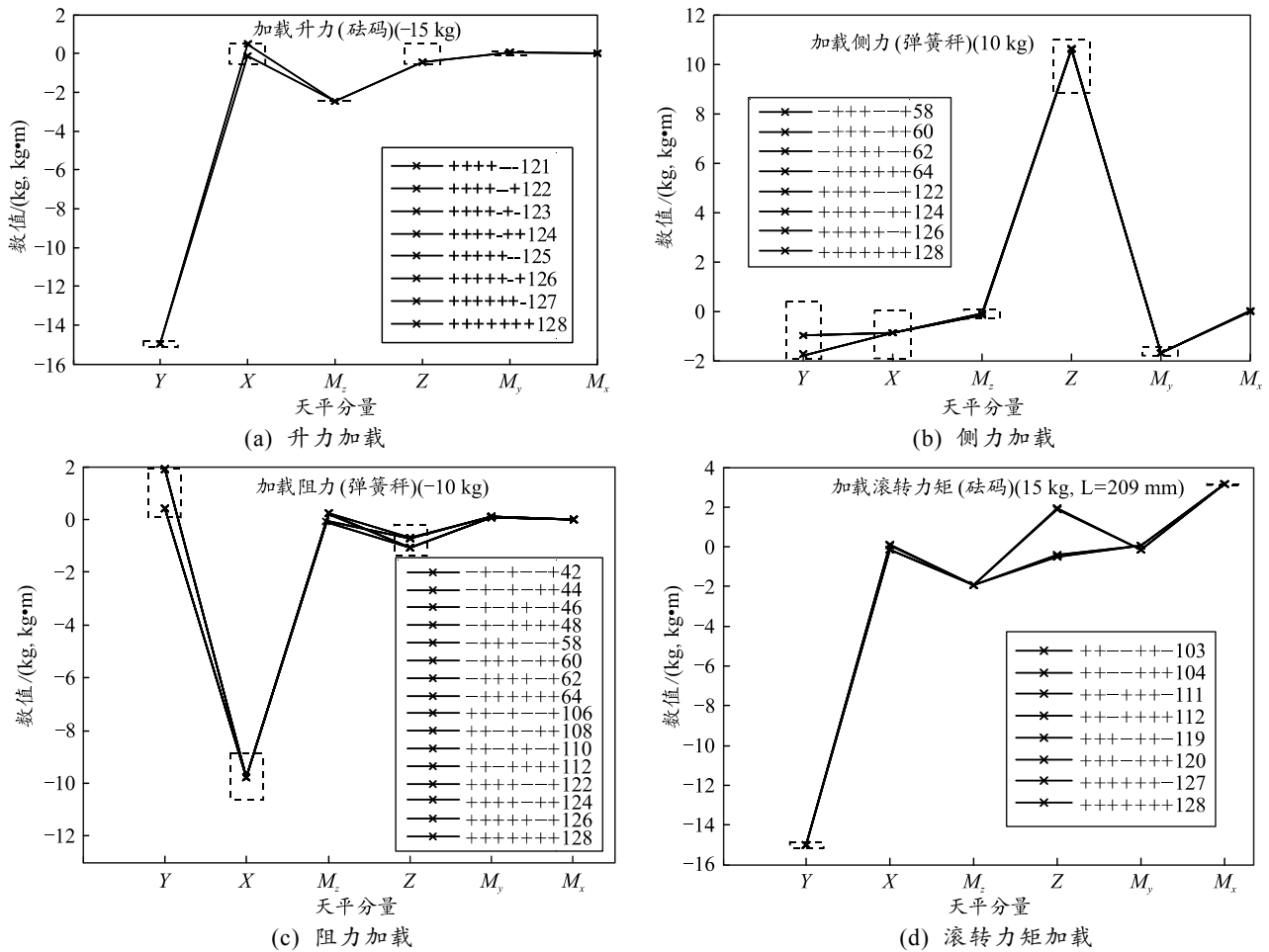


图 4 不同通道极性组合时的计算值与估计值匹配结果

显然，仅 1 种通道极性组合，即编号为 128，各通道极性为“+++++++”时，天平计算值完全落入各次加载天平分量估计值范围内，即为天平通道极性判断结果。

5 结束语

通过对天平“单分量加载”结果进行估计，筛选符合估计值的天平通道极性组合，最终确定唯一的天平通道极性组合，完成天平通道极性判断过程。该方法仅要求对天平进行数次加载(覆盖所有通道参与计算)，即可程序化地完成天平通道极性判断，且该方法具有较强有效性。由实验结果可知，将加载量、加载角度、天平初始安装角最大误差均扩大 3 倍，仍可以得到相同判断结果。下一步，可依托该方法，建设天平自动加载判断系统，对天平进行复合加载，全自动完成天平通道极性判断或天平性能检测。

参考文献：

[1] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京：国防工业出版社，2001：

67-200.
 [2] 王勳年. 低速风洞试验[M]. 北京：国防工业出版社，2002：111-149.
 [3] 孙海生，祝明红，黄勇，等. $\Phi 3.2\text{m}$ 风洞战斗机大迎角试验关键技术研究[J]. 实验流体力学，2011，25(3)：50-55.
 [4] 章荣平，王勳年，黄勇. 低速风洞全模 TPS 试验空气桥的设计与优化[J]. 实验流体力学，2012，26(6)：48-52.
 [5] 中国人民解放军总装备部司令部. 风洞应变天平规范：GJB2244A-2011[S]. 北京：中国标准出版社，2011：1-4.
 [6] 王帆，施洪昌，盖文，等. 风洞测控技术[M]. 北京：国防工业出版社，2019：51-89.
 [7] 朱本华，梁磊，程尧. 天平自动校准架复位测量的关键技术研究[J]. 兵工自动化，2009，28(12)：79-81.
 [8] 李璐，姚进. 天平校准系统中位置姿态非接触式测量与计算方法[J]. 四川大学学报，2003，35(3)：90-92.
 [9] 许晓斌. 新型应变天平地轴系校准系统研制与应用研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2005.
 [10] 谢斌，史玉杰，易国庆. 70kN 载荷应变天平校准系统研制进展[J]. 实验流体力学，2014，28(5)：71-75.