

文章编号:1674-8190(2014)03-364-05

风洞天平装配应力分析

王惠伦,解亚军

(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要:天平在风洞模型安装过程中由于加工误差通常会产生装配应力,对元件输出值存在干扰,影响测量准确度。针对此现象,采用有限元仿真方法,在保持天平总长度不变前提下,研究不同天平元件固支端长度对装配应力带来的测量准确度影响情况。结果表明:只要存在装配应力,天平测量结果就会产生变化,而元件固支端长度大小对其无明显影响。因此,在风洞天平设计或实验中,提高测量准确度的方法是采取措施尽可能减小天平安装产生的附加应力,而不是改变元件固支端长度。

关键词:风洞天平;固支端长度;装配应力;有限元仿真

中图分类号: V211.72

文献标识码: A

Analysis of Assembly Stress of Wind Tunnel Balance

Wang Huilun, Xie Yajun

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Balance in the installation of wind tunnel model of the processing error tend to produce the assembly stress. The interference of element output value affects the accuracy of measurement. In view of this phenomenon, using the finite element simulation method, the influence on measurement results of different balance's fixed end length on the assembly stress is investigated based on keeping the total length invariant. The results show that: as long as the assembly stress exists, balance measurement results will be influenced. But the length of fixed end has no obvious effect on this. Therefore, methods of improving the measurement accuracy is to take actions to reduce the additional installation stress in wind tunnel balance design or experiment instead of changing fixed end length of balance.

Key words: wind tunnel balance; length of the clamped end; assembly stress; finite element simulation

0 引言

风洞天平是风洞测力实验中最重要测量装置之一,用于测量作用在模型上的空气动力载荷(力和力矩)的大小、方向、作用点。测力实验对风洞天平的技术要求很高,其中最重要的是要求天平具有高的精度与准确度。风洞天平静态校准实验是指在天平校准设备上,按已知的坐标轴系模拟天平在风洞实验时的受力状态,对天平精确地施加静态载荷,求得天平各分量的输出信号与校准载荷的变

化关系,以便在风洞实验中根据天平各分量的输出信号,求得作用在模型上的空气动力载荷^[1-3]。

飞行器模型风洞测力试验或天平校准中,风洞天平中常用的杆式天平是以前后锥面与模型或支杆接头连接固定,在大量的天平安装实践中发现,天平的锥面配合不当对天平测量值有很大影响,使得天平的测量值不稳定,显示出载荷与应变的非线性关系,目前国内外相关研究较少。这种由于加工误差而在装配时产生的应力称为装配应力,是载荷作用之前已经具有的应力^[4]。因此本文将天平安装过程中由于加工误差或安装不当等因素产生的附加应力称为“装配应力”。

本文通过对某杆式天平进行工程计算和有限元分析对比,研究元件固支端长度对装配应力的

收稿日期:2013-12-23; 修回日期:2014-03-04

通信作者:王惠伦,895882694@qq.com

影响。

1 有限元数据仿真

选取杆式天平(型号为 9001)主体直径为 58 mm,长为 400 mm。元件固支端长为 10 mm,直径为 52 mm。元件固支端是指天平前后锥与元件之间相连接的等值段部分,如图 1 所示。

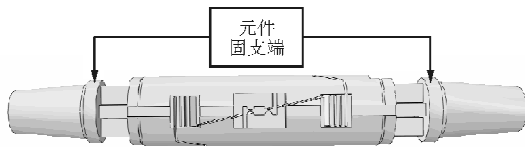


图 1 杆式天平 9001 元件固支端示意图

Fig.1 Clamped end sketch of bar-shaped balance 9001

为了便于分析,以指定方向的集中力(F)代替两端锥面的装配应力,将天平结构进行简化,如图 2 所示。有限元计算软件为 ABAQUS^[5-9],网格划分采用全局网格控制,局部加密方法。对杆式天平采用四面体网格划分 C3D10,单元大小取 5 mm,局部大小 1 mm,节点总数为 166 155,单元总数为 104 964,天平网格划分如图 3 所示。天平材料为 0Cr17Ni4Cu4Nb,有限元仿真中的物理参数:弹性模量 $E=200$ GPa,泊松比 $\nu=0.3$ 。

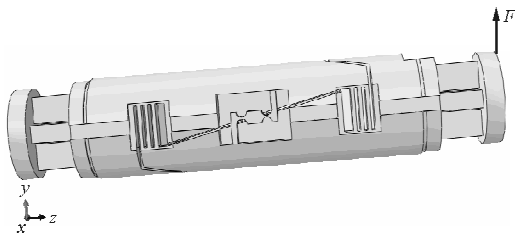


图 2 杆式天平 9001 结构简化图

Fig.2 Structure sketch of bar-shaped balance 9001

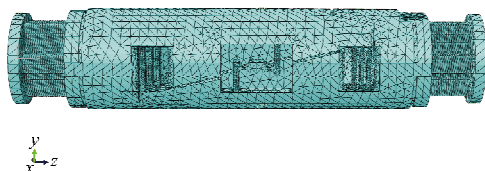


图 3 杆式天平 9001 网格图

Fig.3 Mesh diagram of bar-shaped balance 9001

施加单分量载荷,即在天平中心分别施加法向力(Y)、侧向力(Z)、俯仰力矩(M_x)、偏航力矩(M_y)、滚转力矩(M_z),在固支端端面施加轴向力

(X),同时在固支端面施加模拟的装配应力(F)。在原有天平实验数据及有限元仿真对比基础上,改变元件两端固支端长度(同时改变天平主体长度以保持天平总长度不变),探究元件固支端长度对天平测量的影响。

2 结果与分析

在不考虑装配应力情况下,所有应变仅为测量载荷产生。依次施加的单分量载荷如表 1 所示,天平设计载荷如表 2 所示。该天平校准实验^[4,7]得出的应变值与有限元计算得出的应变值对比,如表 3 所示。

表 1 天平 9001 单分量载荷

Table 1 Force data of balance 9001

分量	载荷值	分量	载荷值
X/N	392	$M_x/(N \cdot m)$	98
Y/N	1 960	$M_y/(N \cdot m)$	196
Z/N	490	$M_z/(N \cdot m)$	98

表 2 天平 9001 设计载荷

Table 2 Design load of balance 9001

分量	载荷值	分量	载荷值
X/N	900	$M_x/(N \cdot m)$	150
Y/N	4 200	$M_y/(N \cdot m)$	200
Z/N	600	$M_z/(N \cdot m)$	200

表 3 无装配应力时应变值对比

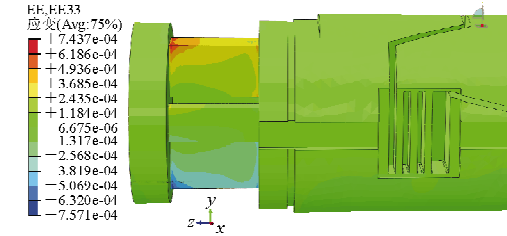
Table 3 Comparison of data without assembly stress

分量	校准应变/ 10^{-6}	有限元计算的应变/ 10^{-6}
X/N	195	191
Y/N	425	407
Z/N	248.7	235
$M_x/(N \cdot m)$	219	220
$M_y/(N \cdot m)$	766	715
$M_z/(N \cdot m)$	153	151

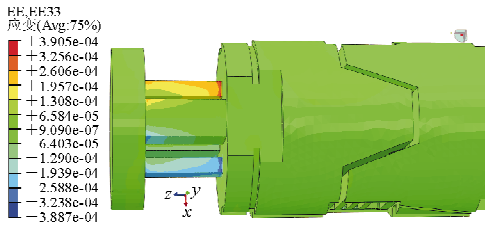
从表 3 可以看出:应变值相差不大,其中法向力方向相差 4%,轴向力方向相差 2%,侧向力相差 5%,滚转力矩相差 0.4%,偏航力矩相差 6%,俯仰力矩相差 1%。分析其原因,实验数据为应变片粘贴部位的平均应变,而有限元分析为相应某点处的值;实验数据存在环境因素影响,而有限元仿真为理想条件下分析得出的数据。综上所述,有限元仿真中网格划分及计算方法可行,可以根据有限元仿

真数据的趋势判断实验趋势。

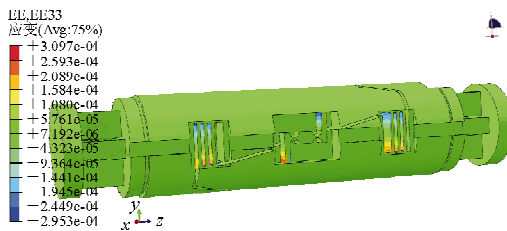
有限元软件分析无装配应力时的应变云图如图 4 所示。



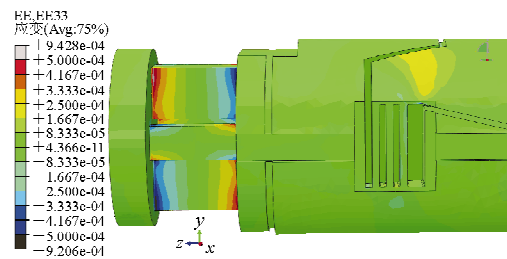
(a) 升力



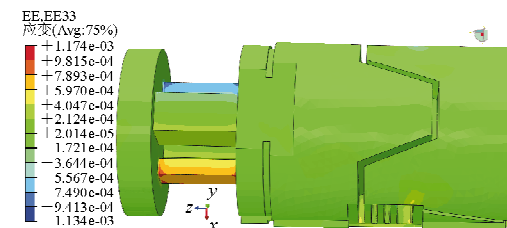
(b) 侧向力



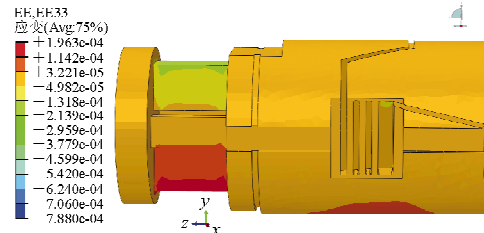
(c) 轴向力



(d) 滚转力矩



(e) 偏航力矩



(f) 俯仰力矩

图 4 杆式天平 9001 有限元分析云图(无装配应力)

Fig. 4 Force and moment FEM analysis of bar-shaped balance 9001 (without assembly stress)

在上述单分量加载的基础上,叠加法向装配应力。模拟的装配合力为 100 N,是施加法向载荷的 5%,方向与施加法向载荷方向相反。用有限元软件 ABAQUS 对 9001 天平模型固支端进行不同长度的仿真,即选取固支端长度分别为 8、10、12、14、16、18 mm,测量相应应变计粘贴处的有限元仿真结果。各长度固支端无装配应力应变值对比如表 4 所示,施加装配应力后各长度固支端应变值对比如表 5 所示,天平典型状态各单分量分别加载装配应力的应变云图结果如图 5 所示。

表 4 不同长度固支端产生应变对比(无装配应力)

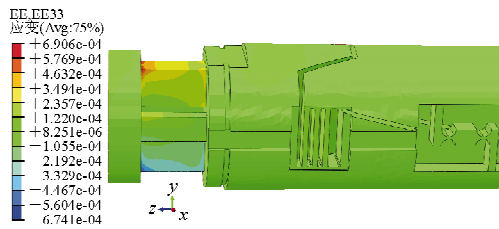
Table 4 Comparison of data based on different length of the clamped end (without assembly stress)

固支端长度/mm	$\mu\epsilon_x$	$\mu\epsilon_y$	$\mu\epsilon_z$	$\mu\epsilon_{M_x}$	$\mu\epsilon_{M_y}$	$\mu\epsilon_{M_z}$
8	185	427	247	220	695	152
10	191	407	239	219	717	151
12	182	411	235	213	709	152
14	188	399	236	214	705	154
16	185	399	228	212	712	153
18	187	386	224	207	709	155

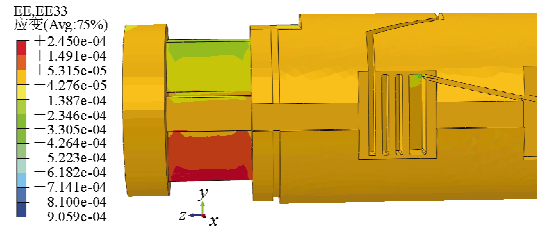
表 5 不同长度固支端产生应变对比(有装配应力)

Table 5 Comparison of data based on different length of the clamped end (with assembly stress)

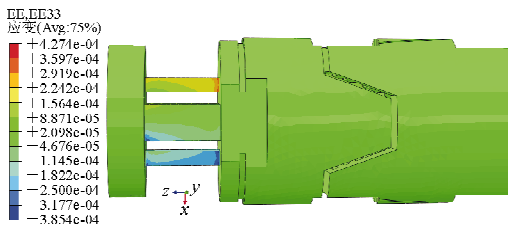
固支端长度/mm	$\mu\epsilon_x$	$\mu\epsilon_y$	$\mu\epsilon_z$	$\mu\epsilon_{M_x}$	$\mu\epsilon_{M_y}$	$\mu\epsilon_{M_z}$
8	186	385	243	199	695	187
10	190	375	231	198	715	186
12	183	370	230	192	709	186
14	189	359	232	193	705	188
16	186	358	224	191	709	186
18	187	340	221	186	709	188



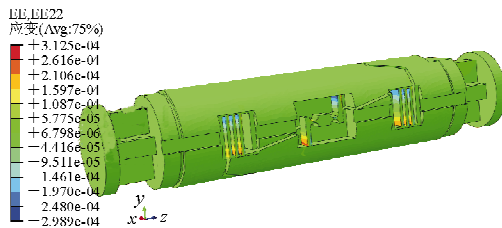
(a) 升力



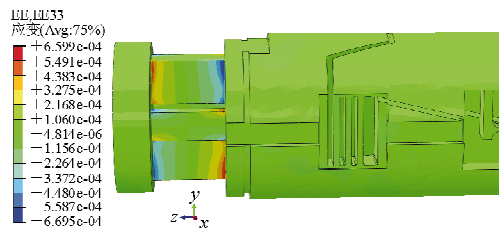
(d) 俯仰力矩



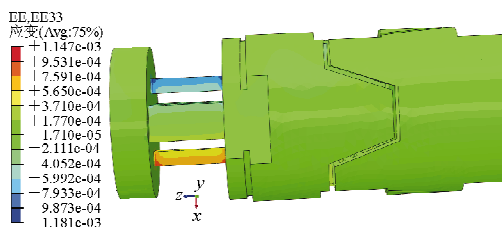
(b) 侧向力



(c) 轴向力



(d) 滚转力矩



(e) 偏航力矩

图 5 典型状态应变云图(固支端长 12 mm)

Fig. 5 Strain contours of typical state (the length of the clamped end is 12 mm)

从表 4 可以看出:在无装配应力情况下,法向力、侧向力和滚转力矩随着固支端长度增长,应变值减小(由于天平总长度不变,增长固支端则需减小天平主体的长度,天平受力和力矩的作用点到测量元件位置的长度减小,故应变值减小,趋势合理);对于轴向力、偏航力矩、俯仰力矩三个分量,随固支端长度变化不发生明显改变。

从表 5 可以看出,施加与升力方向相反的装配合力,对法向力、滚转力矩、俯仰力矩产生影响。

从表 4~表 5 可以看出:在天平总长度不变前提下,固支端从 8 mm 增长到 18 mm,法向装配应力使法向力产生的应变相比于无装配应力时减小 10%左右,使滚转力矩均减小 9.6%,使俯仰力矩增大 22%左右,对轴向力和偏航力矩几乎无影响,对侧向力产生小量干扰,均不随长度变化而明显改善;侧向装配应力对各分量应变产生的影响与法向装配应力类似,对侧向力、滚转力矩和偏航力矩产生明显影响,对法向力、轴向力、俯仰力矩产生干扰,均不随长度变化而明显变化。

在风洞实验或天平静态校准实验中,由于安装不当,装配应力可以是任意方向,仍以杆式天平 9001 为例,在天平元件固支端为 10 mm、直径为 52 mm 的条件下,分别对元件固支端施加 100 N 的法向、侧向以及法向和侧向同时施加的装配应力,与无装配应力时的测量应变值进行对比,如表 6 所示。可以看出,不同方向的装配应力对除轴向力外的各个分量产生不同程度的影响。

表6 天平9001不同方向装配应力应变值对比

Table 6 Comparison of data based on different sides of the assembly stress of bar-shaped balance 9001

分量	无装配应力 应变/ 10^{-6}	法向应变/ 10^{-6}	侧向应变/ 10^{-6}	法向和侧向 应变/ 10^{-6}
Y/N	407	375	408	368
X/N	191	190	193	194
Z/N	235	231	146	142
$M_x/(N \cdot m)$	220	198	266	245
$M_y/(N \cdot m)$	715	715	805	796
$M_z/(N \cdot m)$	151	186	151	185

由于阻力元位于杆式天平中心,远离两端连接锥,所以天平与模型或支座的装配应力不会影响阻力分量,而其他五分量元件对称分布,靠近连接锥,因此只要存在装配附加应力,就会对其所在方向的分量产生明显影响,并且这种影响量与元件固定端长度几乎无关,故在飞行器模型实验过程中必须采取措施减小装配应力对测量结果的影响。

3 结 论

(1) 在天平总长度不变的前提下,装配应力大小对杆式天平除轴向力外的力与力矩均有不同程度的影响,与固支端长度关联不明显。

(2) 在飞行器模型实验中减小天平装配应力是提高实验准度的关键因素。

参考文献

- [1] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 379.
He Dexin. Wind tunnel balance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 379. (in Chinese)
- [2] 战培国. 国外风洞天平校准技术研究进展[J]. 航空科学技术, 2012(2): 18-20.
Zhan Peiguo. The development of wind tunnel balance calibration techniques[J]. Aeronautical Science and Technology, 2012(2): 18-20. (in Chinese)
- [3] Zhang Zhaoming, Han Buzhang. Development for high precision six component strain gauge balance[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 21(2): 152-156.
- [4] 苟文选. 材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Gou Wenxuan. Strength of materials[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [5] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 393.
Shi Yiping, Zhou Yurong. Finite element analysis of detailed examples for ABAQUS[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 393. (in Chinese)
- [6] 于亚婷, 杜平安, 王振伟. 有限元法的应用现状研究[J]. 机械设计, 2005, 22(3): 6-9.
Yu Yating, Du Ping'an, Wang Zhenwei. Research on the current application status of finite element method [J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(3): 6-9. (in Chinese)
- [7] 美国 ABAQUS Inc. ABAQUS有限元软件 6.4 版入门指南[M]. 庄茁, 朱以文, 肖金生, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2004: 365.
ABAQUS Inc. in USA. The finite element software version 6.4 entry guide for ABAQUS[M]. Translated by Zhuang Zhuo, Zhu Yiwen, Xiao Jinsheng, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 365. (in Chinese)
- [8] 顾岩, 虞伟建. 有限元分析法在风洞天平中的应用[J]. 流体力学实验与测量, 1999, 113(4): 82-86.
Gu Yan, Yu Weijian. The application of finite element analysis in wind tunnel balance[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 1999, 113(4): 82-86. (in Chinese)
- [9] 刘喜贺, 王天昊, 邱俊文. 四分量片式铰链力矩天平技术及风洞实验应用研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(2): 88-91.
Liu Xihe, Wang Tianhao, Qiu Junwen. Technique and application of hinge moment balance with four components in wind tunnel test[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(2): 88-91. (in Chinese)

作者简介:

王惠伦(1988—),女,硕士研究生。主要研究方向:流体力学。

解亚军(1965—),女,高级工程师。主要研究方向:实验流体力学、风洞测力传感器。

(编辑:赵毓梅)