

doi: 10.7690/bgzdh.2021.03.008

一种风洞天平信号电磁干扰补偿方法

成 垒, 段丕轩, 康洪铭, 陈 丹

(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: 为解决风洞中的大功率伺服系统在运行时对弱小天平信号产生较强的电磁干扰, 严重影响数据的精度和可靠性的问题, 提出一种在时域上对信号进行干扰补偿的方法。通过在天平上引入旁路电桥, 用于敏感干扰信号, 使用减除法补偿天平信号, 并模拟风洞试验环境, 开展伺服驱动器和大功率电机的干扰补偿实验。结果表明: 该方法能显著减弱电磁干扰的影响, 达到提高数据精度和可靠性的目的。

关键词: 风洞; 天平; 电磁干扰; 信号补偿

中图分类号: TN911.4 **文献标志码:** A

An EMI Compensation Method for Balance Signal in Wind Tunnel

Cheng Lei, Duan Pixuan, Kang Hongming, Chen Dan

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

Abstract: To solve the problem that the electromagnetic interference (EMI) on balance signal when high power servo system is on work in wind tunnel, which will seriously affect the precision and reliability of the data, an EMI compensation method in time domain was studied. Introduce a by-pass circuit bridge to sense the interference signal, then compensate the balance signal by subtraction method. Simulate wind tunnel test environment, and carry out the inference compensation test for servo driver and high power motor. The results show that the method can reduce the EMI effectively, which can meet the demands of improving the precision and reliability of the data.

Keywords: wind tunnel; balance; EMI; signal compensation

0 引言

在风洞测力试验中, 天平是主要的传感器设备^[1]。天平上分布着众多应变片, 组成多个全桥电路, 用于感知各个方向气动力和力矩的变化^[2]。试验时, 通过高精度电源给出激励, 采集得到天平的响应信号, 即可计算气动载荷^[3]; 因此, 天平信号的精度直接决定了风洞试验的精度。提高天平信号的稳定性、可靠性和抗干扰能力非常重要。

随着风洞试验能力和自动化水平的提高, 逐步引入了大攻角系统、地效试验装置、移测架系统^[4]和带动力系统^[5-6]等大功率伺服系统。这些系统在运行时对毫伏级的天平信号产生了严重电磁干扰, 直接影响天平信号的稳定性和可靠性。在试验中, 已采取了屏蔽干扰源、光电隔离、接地和数字滤波等方法^[7-11], 消除或减弱了部分干扰, 但由于电磁干扰的复杂性, 且以上措施多是依靠经验; 因此, 在实际使用时效果有限, 有必要根据天平信号的特点, 研究效果更好的处理方法。

笔者提出了一种在时域上的天平信号干扰补偿法, 通过天平上的旁路电桥敏感干扰信号来补偿天

平信号, 达到减弱或消除电磁干扰的目的。为验证方法的有效性, 开展了伺服驱动器和大功率电机的干扰补偿实验。

1 干扰补偿法原理

常见的应变天平, 如杆式天平或盒式天平均为金属结构, 在风洞中使用时, 一般通过金属连接件与支撑机构相连。同时, 风洞的大功率设备, 如角度机构、运动机构等, 由于安装的需要, 设备的壳体或地线常常不可避免地支撑机构相连, 导致天平信号上叠加了严重的容性共地干扰。天平上叠加的此类电磁干扰, 就耦合途径来定义, 属于传导型电磁干扰。伺服驱动器地线上的干扰电流通过连接件传导到天平主体, 天平主体上的电磁干扰通过容性耦合传导到粘贴在天平表面的应变片, 从而叠加到天平桥路的输出信号。

考虑此类电磁干扰的传播特点, 可在天平上设置一路阻值恒定的桥式电路, 用于敏感干扰信号。由于该桥路阻值恒定, 给定激励, 未受干扰时, 信号输出为常量, 叠加干扰时, 信号输出为常量加干

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2020-12-25

作者简介: 成 垒(1988—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事风洞测控技术、风洞视觉测量技术研究。E-mail: dalishx@qq.com。

扰量，减除常量即得到干扰量，可用于补偿天平信号。干扰补偿法的原理如图 1 所示。

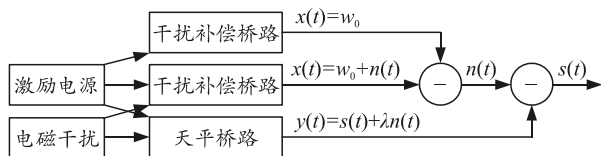


图 1 干扰补偿法原理

无电磁干扰时，干扰补偿电路的输出为常量 w_0 ，有电磁干扰时，干扰补偿桥路的输出信号为 $x(t)$ ，可得到干扰信号

$$n(t) = x(t) - w_0 \quad (1)$$

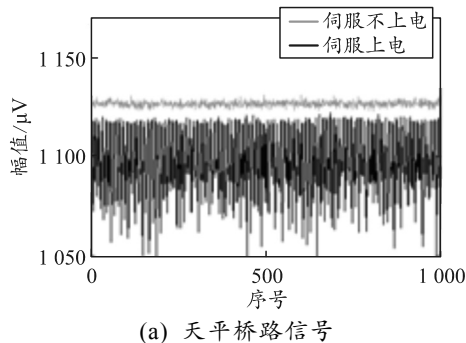
天平的真实信号为 $s(t)$ ，叠加了干扰噪声 $n(t)$ ，设 λ 为干扰信号在天平桥路和干扰补偿桥路传输的衰减比例，则输出信号为 $y(t) = s(t) + \lambda n(t)$ 。代入式(1)，得到补偿后的天平信号

$$s(t) = y(t) - \lambda[x(t) - w_0] \quad (2)$$

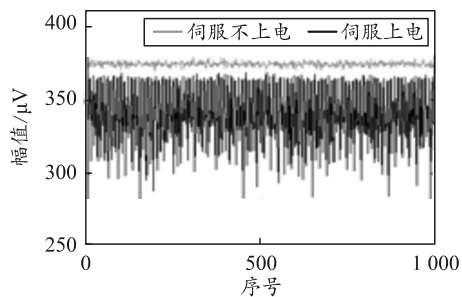
其中， λ 的值通过分析叠加干扰的天平信号和补偿桥路信号的幅度谱得到，一般取最大幅值的比值。干扰补偿法在时域上处理信号，为避免天平信号和补偿电路信号的相位差，要求两路信号同步触发采集。

2 伺服驱动器干扰下的信号补偿实验

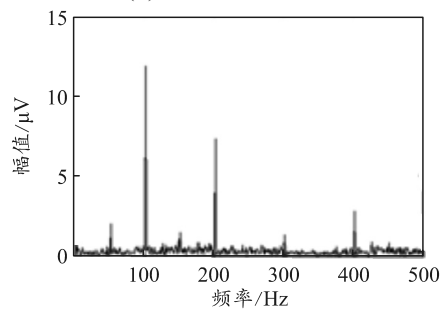
伺服驱动器广泛用于风洞的运动机构系统，是电磁干扰的主要来源之一。实验选用路斯特牌伺服驱动器，驱动 400 W 电机。选用某六分量八通道天平，天平一通道作为天平桥路，二通道作为补偿桥路，验证干扰补偿法的有效性。选用 KEYSIGHT E3631A 提供高精度 10 V 直流激励电源，选用 100 倍的前置放大器放大信号，选用 NI PXIe4309 作为数据采集卡采集信号。模拟实际使用场景，将伺服驱动器地线与天平安装面连接。数据采集频率为 1 000 Hz，采集时长为 1 s，天平桥路、补偿桥路外触发同步采集。当伺服驱动器不上电或上电时采集信号，使用干扰补偿法处理信号。实验数据如图 2 所示。



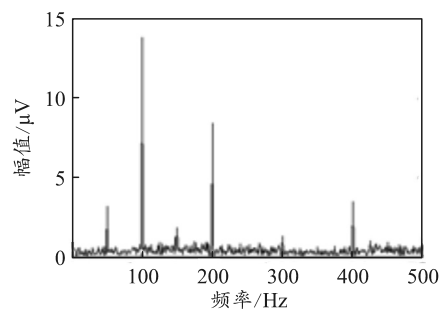
(a) 天平桥路信号



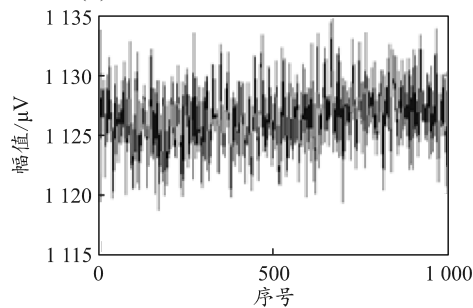
(b) 补偿桥路信号



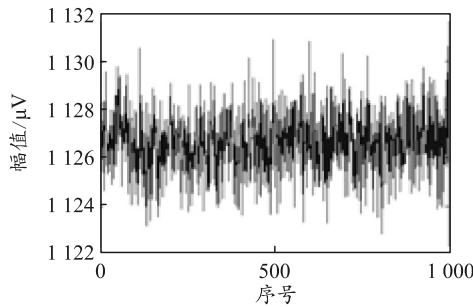
(c) 受干扰的天平桥路幅度谱



(d) 受干扰的补偿桥路幅度谱



(e) 补偿后的天平桥路信号



(f) 无干扰时的天平桥路信号

图 2 伺服驱动器干扰补偿实验数据

伺服驱动器上电前，天平桥路信号与补偿桥路信号平稳，仅在小范围波动；伺服驱动器上电后，

信号出现整体平移且波动量显著增大。对信号进行频谱分析发现,天平直流信号中叠加了 100、200 Hz 等频率的干扰信号。对天平桥路信号进行干扰补偿后,信号均值回归到无干扰时的值且波动量显著减小,说明电磁干扰得到有效减弱。实验结果如表 1 所示。

表 1 伺服驱动器干扰补偿实验结果 μV

受干扰的天平桥路信号		干扰补偿后的天平桥路信号		无干扰的天平桥路信号	
均值	波动量	均值	波动量	均值	波动量
1 097.8	76.3	1 126.4	16.3	1 126.6	8.0

3 大功率电机干扰下的信号补偿实验

大功率电机同样是风洞电磁干扰的主要来源之一,本次选用 12 kW 交流永磁电机。该电机主要用于螺旋桨带动力风洞试验。模拟风洞试验场景,选用某型带动力天平作为实验天平,测试干扰补偿法。实验场景如图 3 所示。

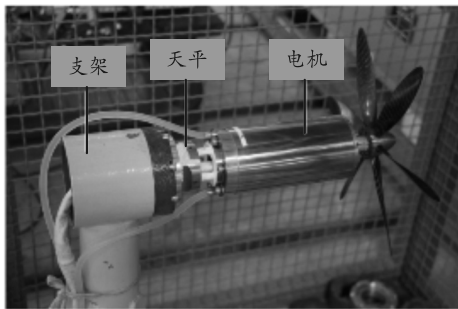
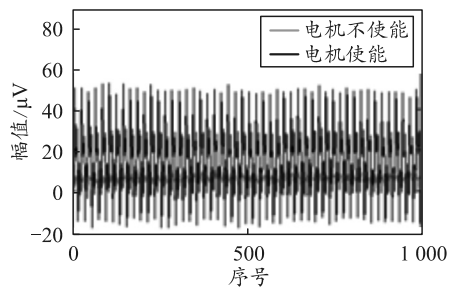
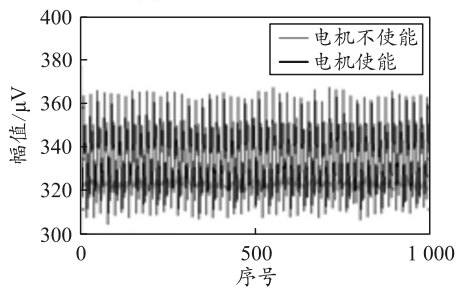


图 3 大功率电机干扰补偿实验场景

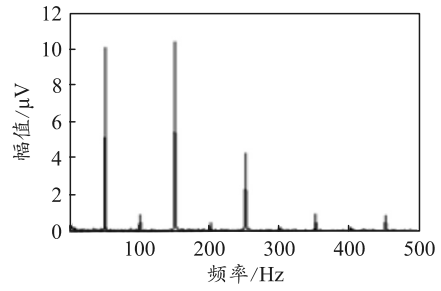
数据采集频率为 1 000 Hz,采集时长为 1 s,天平桥路、补偿桥路外触发同步采集。实验数据如图 4 所示。



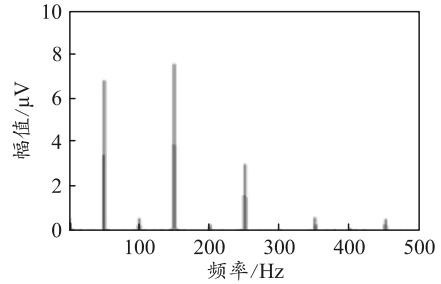
(a) 天平桥路信号



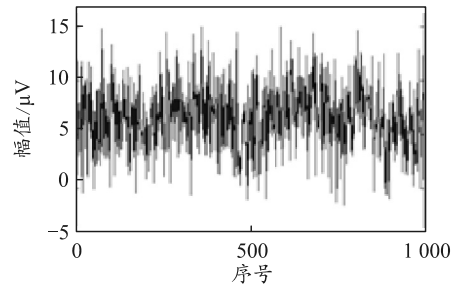
(b) 补偿桥路信号



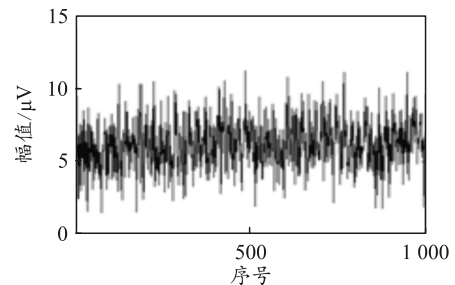
(c) 受干扰的天平桥路幅度谱



(d) 受干扰的补偿桥路幅度谱



(e) 补偿后的天平桥路信号



(f) 无干扰时的天平桥路信号

图 4 大功率电机干扰补偿实验数据

大功率电机上电使能后,天平信号中叠加了 50、150、250 Hz 等频率的干扰信号。对天平桥路信号进行干扰补偿后,信号的波动量显著减小,平均值回归到无干扰时的值。实验结果如表 2 所示。

表 2 伺服驱动器干扰补偿实验结果 μV

受干扰的天平桥路信号		干扰补偿后的天平桥路信号		无干扰的天平桥路信号	
均值	波动量	均值	波动量	均值	波动量
15.1	71.0	6.6	16.5	6.2	9.7

4 结束语

在风洞复杂电磁环境下,天平信号容易叠加电磁干扰,通常使用屏蔽干扰源、切断传输途径和数

字滤波等方法。当这些方法不能完全满足要求时，干扰补偿法提供了一种减弱或消除电磁干扰的新思路。笔者使用天平上的固有通道进行了传导型电磁干扰补偿实验，取得了预期效果。为将该方法应用于风洞试验，可在天平设计时，对每个天平桥路引入一对一的干扰补偿桥路，与通过引入冗余桥路解决天平零点温度漂移的设计^[12]类似，是一种可行的解决方案。

参考文献：

- [1] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京：国防工业出版社，2002：111-127.
- [2] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京：国防工业出版社，2001：67-200.
- [3] 宋晋，孙棣华，赵敏，等. 风洞旋转天平试验装置测控系统[J]. 兵工自动化，2016，35(6)：43-45.
- [4] 杨立军，施洪昌. 风洞移测架控制系统[J]. 兵工自动化，2005，24(4)：80-81.

(上接第9页)

案例评价是案例学习的一个前提条件。案例评价可由系统完成，系统根据案例实施效果采用预先定义的“效果-效用”评价函数给出评价。案例评价也可由用户完成，用户结合自身经验根据应用效果给出相应评价。

3 结束语

笔者在对无人机集群智能涌现和演化概念、方法阐述的基础上，针对其智能涌现的4个应用领域论述了其建模需求及原理；指出智能演化的3个方向及其实现演化的建模途径。该研究还属于初步阶段：一是没有对智能涌现和演化的实体建模和仿真建模加以区分，二是没有对各个领域的建模方法作具体深入的探讨，有待在后续研究中加以解决。

参考文献：

- [1] 许国志. 系统科学[M]. 上海：上海科技教育出版社，2000：20-21.
- [2] 王凤娟，姜淑凤，单永瑞，等. 群智能优化算法的研究与分析[J]. 信息通信，2018(10)：1-2.

- [5] 霍国，康洪铭，李涵，等. 风洞螺旋桨试验电机现状及发展方向[J]. 兵工自动化，2016，35(11)：20-23.
- [6] 霍国，康洪铭，刘晓林，等. L-12风洞螺旋桨带动力试验系统[J]. 兵工自动化，2018，37(6)：23-27.
- [7] 钱照明，程肇基. 电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[M]. 杭州：浙江大学出版社，2006：61-142.
- [8] PATRICK G A, KENNETH D W. 崔强，译. 产品设计的电磁兼容故障排除技术[M]. 北京：机械工业出版社，2019：25-42.
- [9] 阎成，邓晓曼，贾霜，等. 提升风洞测力数据采集系统电磁兼容能力初步研究[J]. 计算机测量与控制，2019，27(9)：28-31.
- [10] 施洪昌，张永双，许海燕，等. 风洞测控系统干扰及抑制[J]. 工业控制计算机，2004，17(9)：7-8.
- [11] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 3版. 北京：清华大学出版社，2019：126-188.
- [12] 赵莉，邹满玲，田静琳，等. 国外低温内式应变天平技术研究进展[J]. 实验流体力学，2016，30(6)：1-9.
- [3] 梁晓龙，孙强，尹忠海，等. 大规模无人系统集群智能控制方法综述[J]. 计算机应用研究，2015，32(1)：11-16.
- [4] 廖守亿，王仕成，张金生. 复杂系统基于Agent的建模与仿真[M]. 北京：国防工业出版社，2015：62-63.
- [5] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2004：10-11.
- [6] 苏菲. 动态环境下多UCAV分布式在线协同任务规划技术研究[D]. 长沙：国防科技大学，2013：57，74.
- [7] 成成，张跃，储海荣，等. 分布式多无人机协同编队队形控制仿真[J]. 计算机仿真，2019，36(5)：31-37.
- [8] 邱华鑫，段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队[J]. 工程科学学报，2017，39(3)：317-322.
- [9] 景晓年，梁晓龙，孙强，等. 基于规则的无人机集群运动控制[J]. 计算机仿真，2016，33(9)：50-54.
- [10] 周志华. 机器学习[M]. 北京：清华大学出版社，2016：3，350.
- [11] 叶春明，李永林，刘长平. 新型仿生群智能算法及其生产调度应用[M]. 北京：科学出版社，2015：10.
- [12] 冯肖雪，潘峰，梁彦，等. 群集智能优化算法及应用[M]. 北京：科学出版社，2018：26，57.
- [13] 侯玉梅，许成媛. 基于案例推理法研究综述[J]. 燕山大学学报(哲学社会科学版)，2011，12(4)：102-108.