

含零漂的遥测加速度振动信号时域积分方法研究

王万金, 张志国, 徐洪洲

(中国人民解放军 92124 部队, 辽宁 大连 116023)

摘要: 提出通过遥测加速度振动信号时域数值积分和最小二乘相结合的方法消除零漂对积分结果精度的影响, 即采用最小二乘原则对加速度振动信号时域数值积分结果根据其包含的趋势项形式进行多项式拟合, 获得修正参数, 进一步对积分结果进行修正, 获取遥测速度和位移振动信号的修正值; 方法在仿真信号上进行了应用, 修正结果和真实结果的误差较小, 结果精度较高, 说明方法的有效性, 在此基础上将方法在遥测加速度振动信号的处理上进行了应用, 鉴于方法模型的在仿真信号上的有效性, 可以推断获取的遥测速度和位移振动信号的修正结果具有较高的置信度。

关键词: 遥测; 零漂; 加速度; 振动信号; 时域数值积分; 最小二乘

Research of Telemetry Acceleration Vibration Signals with Zero Drift in Time Domain Integration

Wang Wanjin, Zhang Zhiguo, Xu Hongzhou

(PLA92124, Dalian 116023, China)

Abstract: Proposed by telemetry acceleration vibration signals in time domain numerical integration and least-squares method to eliminate the influence of a combination of zero-drift precision of the results of the integration, namely the principle of least squares acceleration vibration signals in time domain numerical integration results in the form of trend items it contains according to polynomial fitting, obtain correction parameters, further integration results were corrected to obtain a correction value telemetry vibration velocity and displacement signals. Method on the application of the simulated signal error correction results and actual results is small, the results of high precision and validity of the method described, on this basis, the method in dealing with telemetry vibration acceleration signal is applied, in view of the method on the validity of the model simulation signal can be inferred telemetry speed and vibration displacement signal correction results obtained with a higher degree of confidence.

Keywords: telemetry, zero drift, acceleration, vibration signal, time domain numerical integration, least squares

0 引言

飞行器结构设计的改进和试验工作评价很大程度上依托于试验数据的采集, 合理布置无线传感器对结构的振动情况进行测量获取加速度振动信号是飞行器飞行试验重要的组成部分。无线传感器受温度变化、电源电压不稳定等因素的影响从而导致输出端电压会偏离初始值而上下飘动, 即零点漂移(简称零漂), 尽管传感器在信号采集过程中进行了消噪, 但在采集的加速度振动信号中仍然可能存在一定的直流分量, 在基于加速度振动信号积分获取速度和位移振动信号过程中会产生一次和二次趋势项, 这将影响积分后的速度和位移振动信号精度, 导致信号失真, 无法真实反映飞行器飞行过程的实际状况, 不利于飞行器飞行试验结构健康状况的鉴定。目前, 飞行器飞行试验数据处理过程中, 对采集的加速度振动信号主要采用整体去零漂的方式进行处理, 即统计信号特征段落的均值, 认为其是信

号中包含的零漂直流分量, 将其从信号中剔除从而获得真实的加速度振动信号。受各种条件影响, 双向(正负)无线传感器采集的加速度振动信号往往不完全对称, 即局部点处的信号均值去除零漂影响后可能非零。因此, 采用目前方法去零漂难以真正消除其对信号后续处理结果精度的影响。本文致力于寻求更为可行的方式提高零漂存在情况下通过加速度振动信号积分提取速度和位移振动信号的结果精度。

1 含零漂的加速度振动信号时域积分

飞行器飞行试验过程采集的遥测振动信号 $a(i) + \mu$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为离散加速度信号, 假定其包含零漂直流分量 μ 项, 为求取该振动信号对应的时域离散速度振动信号 $\bar{v}(i)$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$), 需对其进行一次数值积分, 积分结果为含有趋势项的速度振动信号估计值:

$$\bar{v}(i) = \bar{v}(i-1) + \frac{a(i+1) + a(i)}{2f_s} + \mu/f_s + R_k \quad (1)$$

其中, f_s 为采样频率, R_k 为积分误差。

令 $\bar{v}(0) = 0$, 则由公式(1)归纳得:

收稿日期:2018-02-23; 修回日期:2018-03-27。

作者简介:王万金(1982-),男,辽宁人,理学硕士,工程师,主要从事信号处理及电磁拓扑技术方向的研究。

$$\bar{v}(1) = \frac{[a(2) + a(1)]}{2f_s} + \mu/f_s + R_1$$

$$\bar{v}(2) = v(1) + \frac{[a(3) + a(2)]}{2f_s} + \mu/f_s + R_2 =$$

$$\frac{[a(3) + 2a(2) + a(1)]}{2f_s} + 2\mu/f_s + R_1 + R_2$$

⋮

$$\bar{v}(n-1) = \bar{v}(n-2) + \frac{[a(n) + a(n-1)]}{2f_s} + \mu/f_s + \sum_{k=1}^{n-1} R_k =$$

$$\frac{[a(n) + 2\sum_{k=2}^{n-1} a(k) + a(1)]}{2f_s} + (n-1)\mu/f_s + \sum_{k=1}^{n-1} R_k$$

可以证明在高采样的情况下, 针对上述归纳结果其一次积分误差 $\sum_{k=2}^{n-1} R_k$ 对积分结果的影响可以忽略。为便于后续推导过程, 此处暂舍弃梯形法时域数值积分过程中的误差, 令 $\tilde{v}(n-1) = \frac{[a(n) + 2\sum_{k=2}^{n-1} a(k) + a(1)]}{2f_s} + (n-1)\mu/f_s$, 则含趋势项的速度振动信号估计值 $\bar{v}(n-1)$ 可以通过 $\tilde{v}(n-1)$ 来估计, 即:

$$\bar{v}(n-1) \approx \tilde{v}(n-1) = \frac{[a(n) + 2\sum_{k=2}^{n-1} a(k) + a(1)]}{2f_s} + (n-1)\mu/f_s \quad (2)$$

假定零漂直流分量 μ 的估计值为 $\tilde{\mu}$, 则加速度振动信号 $a(i) + \mu$ ($i=1, 2, \dots, n$) 的修正值为: $\bar{a}(i) = a(i) + \mu - \tilde{\mu}$, ($i=1, 2, \dots, n$), 对该修正值进行二次时域数值积分, 得到含趋势项的位移振动信号估计值 $\bar{s}(i=1, 2, \dots, n-2)$ 为:

$$\bar{s} = \bar{s}(i-1) + \frac{[v(i+1) + v(i)]}{2f_s} + Q_k \quad (3)$$

令, 则由公式 (3) 归纳得:

$$\bar{s}(1) = \frac{[v(2) + v(1)]}{2f_s} + Q_1 = \frac{[2a(1) + 3a(2) + a(3)]}{(2f_s)^2} +$$

$$3(\mu - \tilde{\mu})/2(f_s)^2 + \frac{[2R_1 + R_2]}{2f_s} + Q_1$$

$$\bar{s}(2) = \bar{s}(1) + \frac{[v(3) + v(2)]}{2f_s} + Q_2 =$$

$$\frac{[4a(1) + 7a(2) + 4a(3) + a(4)]}{(2f_s)^2} +$$

$$\frac{8(\mu - \tilde{\mu})}{2(f_s)^2} + \frac{[4R_1 + 3R_2 + R_3]}{2f_s} + Q_1 + Q_2$$

⋮

$$\bar{s}(n-2) = \bar{s}(n-3) + \frac{[v(n-1) + v(n-2)]}{2f_s} + Q_{n-2}$$

同上, 可以证明在高采样的情况下, 针对上述归纳结果其二次积分误差 Q_{n-2} 对积分结果的影响可以忽略。此处舍弃梯形法时域数值积分过程中的误差 Q_{n-2} , 令 $\tilde{s}(n-2) = \bar{s}(n-3) + \frac{[v(n-1) + v(n-2)]}{2f_s}$, 则含趋势项的位移振动信号估计值 $\bar{s}(n-2)$, 可以通过 $\tilde{s}(n-2)$ 来估计, 即:

$$\bar{s}(n-2) \approx \tilde{s}(n-2) = \bar{s}(n-3) + \frac{[v(n-1) + v(n-2)]}{2f_s} \quad (4)$$

上述数值积分过程中, 速度和位移振动信号离散值估计时, 我们只考虑理想情况下即速度初值 $\bar{v}(0)$ 和位移初值 $\bar{s}(0)$ 均为零的情况。在飞行器飞行试验实际过程当中, 速度初值 $\bar{v}(0)$ 和位移初值 $\bar{s}(0)$ 很可能不全为零, 因此应该进一步考虑更普遍的情况, 即当 $\bar{v}(0) \neq 0$ 时, 此时速度振动信号的估计值为 $\bar{v}(n-1) = \tilde{v}(n-1) + \bar{v}(0)$, 对加速度振动信号 $a(i) + \mu$ ($i=1, 2, \dots, n$) 进行一次数值积分后的一次趋势项则变为:

$$(n-1)\mu/f_s + \bar{v}(0) \quad (5)$$

当 $\bar{s}(0) \neq 0$ 时, 此时位移振动信号估计值为 $\bar{s}(n-2) = \tilde{s}(n-2) + \bar{v}(0) \cdot (n-2)/f_s + \bar{s}(0)$, 对加速度振动信号修正值 $\bar{a}(i) = a(i) + \mu - \tilde{\mu}$, ($i=1, 2, \dots, n$) 进行二次数值积分后的二次趋势项则变为:

$$\frac{1}{2}(\mu - \tilde{\mu})\left(\frac{n-2}{f_s}\right)^2 + \bar{v}(0) \cdot (n-2)/f_s + \bar{s}(0) \quad (6)$$

对于 (5) 式和 (6) 式, 可以采用最小二乘法通过多项式拟合的方法, 获取更普遍意义下的速度和位移振动信号离散值估计过程中一次和二次趋势项中的待定值, 即通过对 (5) 式进行一次多项式拟合, 可以获取, 通过对 (6) 式进行二次多项式拟合可以获取。

通过上述估计, 我们可以在此基础上对加速度、速度和位移振动信号的离散值进行修正, 即:

$$\bar{a}(i) = a(i) + \mu - \tilde{\mu} \quad (7)$$

$$v(i) = \bar{v}(i) - \tilde{\mu}(i/f_s) + \bar{v}(0) \quad (8)$$

$$s(i) = \bar{s}(i) - \frac{1}{2}(\mu - \tilde{\mu})(i/f_s)^2 + \bar{v}(0)(i/f_s) + \bar{s}(0) \quad (9)$$

2 仿真信号分析

为了验证上述算法理论推导的正确性和在振动信号速度和位移离散值估计过程中的有效性, 本节我们采用仿真振动信号对其进行验证。此处假定仿真加速度振动信号为 $-(2\pi 10)^2 \sin(2\pi 10t) - (2\pi 50)^2 \sin(2\pi 50t) - (2\pi 100)^2 \sin(2\pi 100t)$, 零漂直流分量为 $7.4e+003$, 采样频率为 5000Hz , 采样数据长度 n 为 1024 。该仿真加速度振动信号在 0 至 0.2s 区间的时域历程如图 1 所示, 可以看出其物理幅值关于零轴并不严格对称, 其对应的速度振动信号 $2\pi 10 \cos(2\pi 10t) + 2\pi 50 \cos(2\pi 50t) + 2\pi 100 \cos(2\pi 100t)$ 在 0 至 0.2s 区间的时域历程如图 4 所示, 对应的位移振动信号 $\sin(2\pi 10t) + \sin(2\pi 50t) + \sin(2\pi 100t)$ 在 0 至 0.2s 区间的时域历程如图 7 所示。

针对上述如图 1 所示的含零漂的仿真加速度振动信号, 通过 1 节的式 (2) 可以求得其如图 2 所示的速度估计值。观察图 2 可以发现其中含有一次趋势项, 此处采用最小二乘法对其进行一次多项式拟合, 通过拟合结果可以获取零漂直流分量估计值和速度初值估计值。在此基础上, 分别

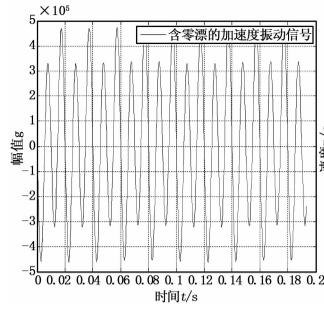


图 1 含零漂的加速度振动信号

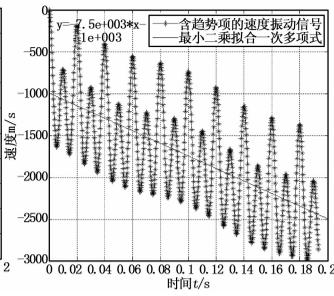


图 2 含趋势项的速度振动信号估计值和一次拟合多项式

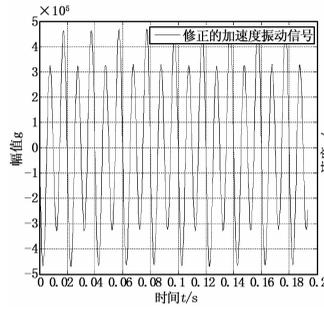


图 3 修正的加速度振动信号

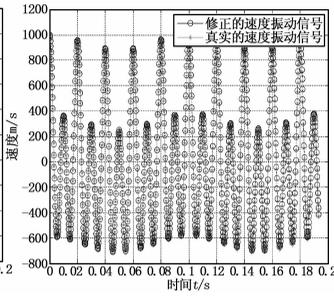


图 4 修正的和真实的速度振动信号

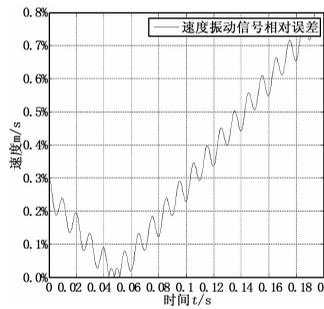


图 5 速度振动信号相对误差

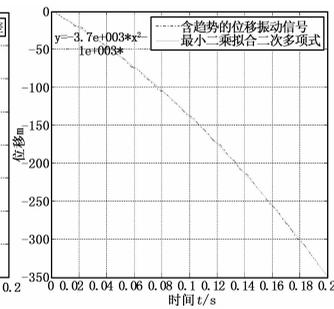


图 6 含趋势项的位移振动信号估计值和二次拟合多项式

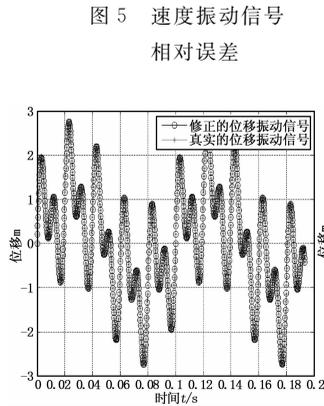


图 7 修正的和真实的位移振动信号

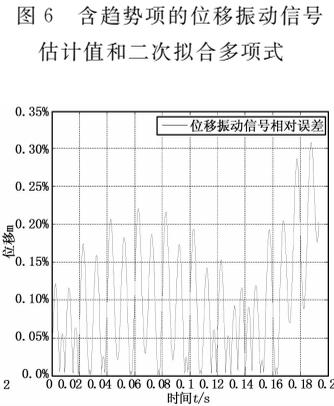


图 8 位移振动信号相对误差

的相对误差如图 5 所示, 由图 5 不难发现相对误差在 0~0.8% 区间内, 说明采用式 (8) 的速度振动信号修正方法是正确且有效地, 能够通过该方法对含零漂的加速度振动信号一次积分获取的速度振动信号进行修正, 结果精度较高。

针对上述如图 3 所示修正后的仿真加速度振动信号, 根据式 (4) 可以求得其如图 6 所示的位移振动信号估计值, 观察图 6 可以发现其中含有二次趋势项, 采用最小二乘法对其进行二次多项式拟合, 获取位移初值估计值, 根据式 (9) 对位移振动信号进行修正, 修正后的位移振动信号和真实位移振动信号如图 7 所示, 位移修正值和真实值之间的相对误差如图 8 所示, 由图 8 不难发现相对误差在 0~0.33% 区间内, 说明采用式 (9) 的位移振动信号修正方法是正确且有效地, 能够通过该方法对含零漂的加速度振动信号二次积分获取的位移振动信号进行修正, 结果精度较高。

3 实测信号分析

图 9 为飞行器某次飞行试验采集的含零漂的遥测加速度振动信号, 采样频率为 5 000 Hz, 采样数据长度为 252。该信号为瞬态振动信号, 尽管飞行器飞行试验过程中采用了高灵敏度双向振动传感器对振动信号进行采集和消噪, 但受飞行环境的影响以及其激励源和飞行器自身结构的复杂性, 导致该瞬态信号波形复杂、周期性不强, 且幅值关于零轴不严格对称, 含有零漂项, 采用传统简单的均值去零漂方式难以奏效, 进一步通过一次和二次积分获取的速度和位移振动信号不能够真正体现信号的真实特征, 这对飞行器飞行试验后续的分析鉴定工作带来不可控的风险。鉴于上节通过仿真振动信号对上述方法模型正确性和有效性的检验结果, 我么可以大胆推断其在飞行器飞行试验含零漂的加速度振动信号速度和位移数值积分中的可行性和可靠性。此处我们以飞行器飞行试验采集到的含零漂的遥测加速度振动信号如图 9 为例, 通过 1 节所推导算法对速度和位移振动信号进行提取。结果如图 10 至图 14 所示。

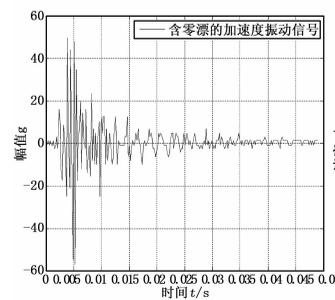


图 9 含零漂的遥测加速度振动信号

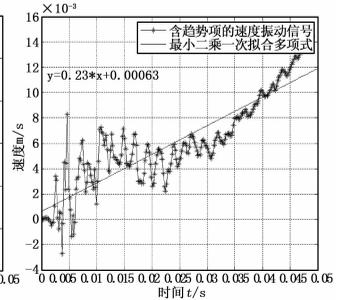


图 10 含趋势项的遥测速度振动信号和一次拟合多项式

对仿真加速度和速度振动信号进行修正, 修正后的仿真加速度振动信号如图 3 所示, 修正后的仿真速度振动信号和真实的速度振动信号如图 4 所示, 速度修正值和真实值间

针对如图 9 所示的含零漂的遥测加速度振动信号, 根据 1 节式 (2) 可以求得其如图 10 所示的速度振动信号估计

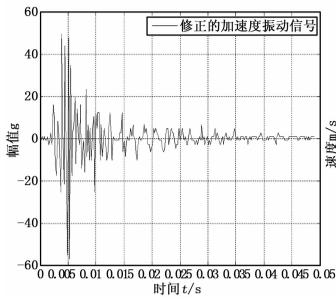


图 11 修正的遥测加速度
振动信号

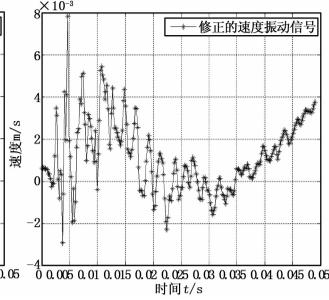


图 12 修正的遥测速度
振动信号

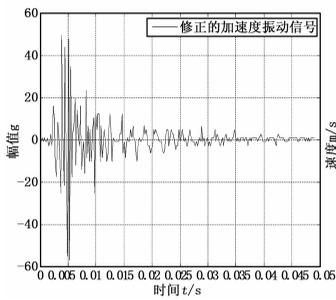


图 13 含趋势项的遥测位移
振动信号和二次拟合多项式

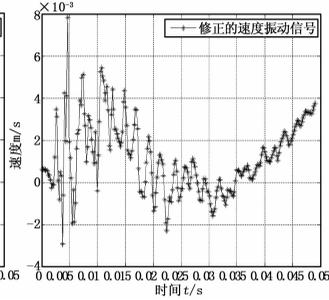


图 14 修正的遥测位移
振动信号

值, 观察图 10 不难发现其中含有一次趋势项, 采用最小二乘法对其进行一次多项式拟合, 获取零漂直流分量估计值和速度初值估计值, 根据式 (7) 和式 (8) 分别对加速度和速度振动信号进行修正, 修正后的加速度和速度振动信号如图 11 和图 12 所示。

针对如图 11 所示修正后加速度振动信号, 根据 1 节式 (4) 可以求得其如图 13 所示的位移振动信号估计值, 观察图 13 不难发现其中含有二次趋势项, 采用最小二乘法对其进行二次多项式拟合, 获取位移初值估计值, 根据式 (9) 对位移振动信号进行修正, 修正后的位移振动信号如图 14 所示。由上节仿真信号的验证结果可知图 13 和图 14 所示的速度和位移振动信号修正结果置信度是较高地, 给飞行器飞行试验结构健康诊断提供较为可靠的参考信息。

4 结论

飞行器飞行试验过程中无线传感器易受温度变化、电源电压不稳定等因素的影响在信号输出过程中产生直流分量, 从而导致采集的遥测加速度振动信号中含有零漂, 尽管传感器在信号采集过程中进行了消噪, 但在采集的加速度振动信号中仍然可能存在一定的直流分量, 在利用其积分获取速度和位移振动信号过程中会产生一次和二次趋势项, 严重影响积分结果的精度。文中提出通过遥测加速度振动信号时域数值积分和最小二乘相结合的方法, 采用最小二乘原则对加速度振动信号时域数值积分结果根据其包含的趋势项形式进行多项式拟合, 获得修正参数, 进一步

对积分结果进行修正, 获取遥测速度和位移振动信号的修正值。该方法在仿真信号上进行了应用, 修正结果和真实结果的误差较小, 结果精度较高, 说明方法的正确性和有效性。在此基础上, 将方法在遥测加速度振动信号的处理上进行了应用, 鉴于方法模型的在仿真信号上的有效性, 可以推断获取的速度和位移振动信号的修正结果具有较高的置信度, 在飞行器飞行试验结构健康诊断方面具有重要意义。

参考文献:

- [1] Faulkner BC, Furman WB, Thomas TB, Wallace TM. Determination of bridge response using acceleration data [R]. Report No. FHWA/VA-97-R5, Virginia Department of Transportation; 1996.
- [2] Li Huibin, Qin Quan, Qian Liangzhong, et al. Time Domain Modal Identification of Tsing Ma Suspension Bridge [A]. Proc. of IMAC 19 [C]. Kissimmee, Florida, USA, 2001, 1585 - 1591.
- [3] Leuriem J M, Vold H. A Time Domain Linear Modal Estimation Technique for global Modal Parameter Identification [A]. Proc of the 2 nd IMAC [C]. 1984.
- [4] Ki-Tae Park, Sang-Hyo Kim, Heung-Suk Park, et al. The demetermination of bridge displacement using measured acceleration [J]. Engineering Structures, 2005, 27: 371 - 378.
- [5] Zhang L, Xu J, Yang J, et al. Multiscale morphology analysis and its application to fault diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22 (3): 597 - 610.
- [6] Stathis C. Stiros. Errors in Velocities and displacements deduced from accelerographs: An approach based on the theory of error propagation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2008, 28(5): 415 - 420.
- [7] 张志涌. 精通 MATLAB 6 (第 5 版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [8] 张文斌, 周晓军, 林勇. 广义形态滤波器在振动信号处理中的应用研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24 (6): 203 - 205.
- [9] Abraham S R. Efficient random decrement computation for identification of ambient responses [A]. Proceedings of the 19th IMAC [C]. Orlando, FL, 2001, : 698 - 703.
- [10] Darryll Pines, A Emin Aktan. Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States [Z]. Proc. Struct. EngngMate; r. 4, 2002, 372 - 380.
- [11] Jyrki Kullaa, Timo Tirkkonen. System Identification of a Bridge from Response Data Comprising Spurious Harmonics [A]. Proc. of IMAC 19 [C]. Kissimmee's, Florida, USA, 2001, 1112 - 1117.
- [12] Yang J, Li J, Lin G. A simple approach to integration of acceleration data for dynamic soil structure interaction analysis [J]. Soil Dynamites and Earthquake Engineering, 2006, 26: 725 - 734.