

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.04.01

关于多通道同步数据采集的探讨

梁志国, 刘渊, 尹肖, 孙浩琳, 张大治

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要: 针对多变量综合测量问题, 提出一种多物理量群体效应思想, 以具有公共时基的多维矢量空间方式表征多变量测量结果, 展现它们之间的耦合、关联、因果、时序等关系。阐述了数据采集系统通道间延迟时间差的地位、作用和价值, 介绍了用通道间延迟时间差方式来定量评估不同通道的同步差异, 用以进行多通道同步采集的时基补偿和修正, 最终将数据采集的同步界面延展到各通道传感器的测量端。

关键词: 同步采样; 多通道数据采集; 动态测量; 多变量; 综合测量; 表征; 通道间延迟时间差

中图分类号: TB971

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)04-0001-06

Discussion on Multi-channel Synchronous Data Acquisition

LIANG Zhiguo, LIU Yuan, YIN Xiao, SUN Haolin, ZHANG Dazhi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Aiming at the problem of multi-variable comprehensive measurement, a multi-physical quantity group effect idea is proposed, which represents multi-variable measurement results in a multi-dimensional vector space with common time base, and shows the coupling, correlation, causality, and time sequence among them. The status, function and value of the delay time difference between channels in data acquisition system are explained. The method of using the delay time difference between channels to quantitatively evaluate the synchronization difference of different channels is introduced, and the time base compensation and correction of multi-channel synchronous acquisition is presented. Finally, the synchronization interface of data acquisition is extended to the measurement terminals of the sensor in each channel.

Key words: synchronous sampling; multi-channel data acquisition; dynamic measurement; multi-variable; comprehensive measurement; characterization; delay time difference between channels

0 引言

多通道数据采集, 在工程应用中有多数不同的表述方式, 如针对多传感器不同物理量测量特征的“多变量综合测量”、体现同一被测系统复杂条件下不同指标特征的“多参量综合测量”、侧重同一物理对象不同参数的“多参数综合测量”, 以及复杂系统多物理量综合测量、复杂环境多参量综合测量等, 均属于同一事情的不同表征方式。本文后续讨论, 将不再对它们进行区分, 视为等同。

多通道同步采集特指数据采集中各个通道采样时刻完全相同的采样方式, 也称为多通道同时采集。包括等间隔采样状态和非等间隔采样状态。它往往与多通道动态信号采集测量密不可分。此时, 多需要构建不同通道信号的同步、正交、固定延迟等技术条件, 并进行条件判定。

尽管有些静态多变量测量系统也使用多通道同步采集方式, 由于信号平稳且没有变化, 其同步采集优势并不明显, 仅仅在出现异常或故障时, 用于追踪分析故障状况, 才显现出一定优势。

工程实践表明, 需要多通道同步采集的场合, 实际上是指需要在各个通道的不同传感器测量点处实现同时采样, 并非是指在采集系统本身的端口处实现同时采样, 两者具有明确差异。由于通道放大器、信号调理器等的存在且参数存在差异, 使得它们的含义并不相同。在系统本身端口处各个通道的同步, 并不能保证它们在不同传感器测量点处实现同时采样。因此, 多通道同步采集问题, 既包含设备设计、制造问题, 也包括设备使用、标定、修正、补偿问题。缺少了这些环节, 即使是进行了多通道同步采集的设计和制造, 也并不能获得真正的多通道同步采集结果。这也正是本文后续所要讨论的核心问题。

1 多变量动态测量

动态测量问题,一直被认为是时变量值波形的采样测量问题^[1]。其关注的是量值随时间的变化情况,以及量值波形是否真实,失真是否足够小。实际上,这仅仅是针对单物理量值的测量思路,仅是动态测量中的一个特例。多数情况下的动态测量,人们需要关注的均为多个物理量值的群体行为。它们变化多端,包括有规律变化和无规律变化,已知规律变化和未知规律变化。即使是按照同一规律变化,也涉及到规律出现的先后时序问题。由此,体现出多通道同步数据采集在动态测量中的意义和价值。

俄国科学家B. A. 格拉诺夫斯基曾说,动态是矢量^[2],本质含义便是多维空间的矢量问题,其完整表征应体现出如何表征其矢量特性。对于单物理量变化规律而言,不仅是量值波形的变化规律,也包括其规律对应的时间刻度;对于多物理量值的群体变化行为而言,除了各自的时序变化规律外,其时间刻度的统一一致和先后时序关系,也是矢量特性的重要表述特征。

以最简单的正弦交流电压 $u(t)$ 为例,其时域表示为

$$u(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

其矢量表述式为

$$\dot{U} = A \cdot e^{j\varphi} \quad (2)$$

式中: A 为电压幅度; f 为电压频率; φ 为电压波形的初始相位; t 为时间变量; \dot{U} 为电压的矢量幅度; j 为复数算子符号。

将其加载到阻抗为 Z 的无源器件之上,通过的电流 $i(t)$ 可表述为

$$i(t) = B \cdot \sin(2\pi ft + \varphi + \theta) \quad (3)$$

其矢量表述式为:

$$\dot{I} = B \cdot e^{j(\varphi+\theta)} \quad (4)$$

式中: i 为电流幅度; $\varphi + \theta$ 为电流波形的初始相位; \dot{I} 为电流的矢量幅度。

$$\theta = 2\pi f \cdot \Delta\tau \quad (5)$$

式中: $\Delta\tau$ 为延迟时间。

当 $\theta = 0$ 时,阻抗为纯电阻,电压和电流同相;

当 $\theta = \pi/2$ 时,阻抗为纯电容,电压落后电流 $\pi/2$ 相位;

当 $\theta = -\pi/2$ 时,阻抗为纯电感,电压超前电流 $\pi/2$ 相位。

相位差 θ 对应的是延迟时间 $\Delta\tau$,延迟时间 $\Delta\tau$ 符号的不同,体现出的是阻性、容性、感性等截然不同的电路特性。矢量特性在这里与时间延迟特性拥有完全等价的关系,其表征方式不同,表面上的含义有差别,但本质上是一致的。

复杂条件下的动态测量,一直是动态测量中的难点^[3]。但条件复杂程度,因不同问题而有所不同。以航空发动机为例^[4],问题有:①多元激励特征,如转子不平衡、对中偏离、气动、热变形、机械松动等不同激励;②复杂工况特征,如高温、高速、高加速度、变化负荷、飞行起降、爬升、俯冲等各种复杂工况组合方式;③复杂振动响应特征,如幅值、相位、频率、模态、瞬变多频、宽频率范围、非线性、复杂路径、强噪声下的微弱信号等响应特征。

这类问题的解决方式多被称为多参量综合测量,是指以不同被测对象的关联性综合表征为目的的多参量测量活动。

综合测量中的多个参量相互依存、互为条件,一些参量存在相互关联和耦合特性。它们的关联特征、条件性特征、耦合性特征等在完整表征物理对象不同量值的群体行为时必不可少。从量值种类来说,包括不同的物理量,如几何量、热学量、力学量、电磁量、声学量、光学量、电子学量、化学量、电离辐射量、生物学量等;也包括同一物理量的不同参量方式,如幅度、频率、相位、谐波、噪声等。

最常见的多参量综合测量为被测物理量与对其有影响的环境参量的多参数群体综合测量^[5-6]。环境参量包括:环境温度、湿度、压力、震动、冲击、电磁环境干扰、声环境干扰、光环境干扰、大气粉尘干扰等。

涡轮风扇发动机整机试车中^[7-8],每次试验都需要记录燃油质量流量、发动机喷管面积、进气流量管流通截面面积、发动机转速、发动机燃气温度、空气流场、大气环境温度、湿度、试车台架变形、试车台架推力、试车台架振动、发动机噪音水平、发动机开机特性等多种过程量值及其变化过程,以综合表征其总体性能,并深入分析每一参量对总体性能的贡献规律。每个类型的参量都需要记录采集多个测量点位的参数量值及其变化过程。不同类型的参量、不同测量点位参数之间的相互关联,对评价航空发动机的性能均有影响。而发动机整机试车特性的评估就是一个多参量群体综合测量结果,即在多通道同步测量的基础上,综合分析处理与表述的结果。

机载大气数据计算机所测量的大气数据参量^[9], 包括飞行高度、指示空速、真空速、马赫数、升降速度、空速变化率、大气总温、大气静温, 以及迎角、侧滑角等飞行控制参数, 具有同步相关性及因果性, 直接影响飞行安全。机载大气数据计算机系统的多参数综合测量, 需要在多参数同步测量基础上进行综合分析处理与表征。

多参数综合测量的表述并非一成不变, 伴随着对被测对象要求的深入, 其综合表征方式, 呈现逐步深化和完善的特点。

完整表述正弦波需要幅度、频率、初始相位、直流分量四个参数, 使用各种手段获取上述四个参数以表征正弦波, 称为正弦波四参数综合测量^[10-11]。实际工作中, 除上述四个参数外, 还需要表征其失真特性, 即失真度。若进一步细化, 则需要表征其噪声失真、谐波失真、次谐波失真、杂波失真、抖动失真、残余调制失真、频谱特性等, 以便对所测量的正弦波进行系统性综合表征。

多参数综合测量中, 由于它们的群体关联性、因果性、互补性等因素, 使得到底选取多少参量作为被测对象, 以及如何以最小的工作量获得最全面的被测对象信息, 成为人们关注的目标。

在没有特别明确结论的前提下, 一种被称为“全域”数据采集的概念被提出^[12], 它是指在不十分清楚各量影响机理、关联性、因果性、时序性等群体规律特征的前提下, 对可能影响被测对象的全部物理量值进行全息同步采集存储, 以便能够通过后续深入分析

处理, 寻找出被测各个物理量之间的内在关联和规律。

多通道数据采集的结果形式, 是多个采集通道的数据序列集合。每一通道的数据序列均属于数据域信息, 以具有时序坐标的幅度信息呈现, 可以看作是一个二维矢量; 多个通道的矢量集合构成一种数据域的矢量空间, 用以表征被测量的多变量群体。由于组成矢量空间的各个矢量并不相互独立, 因此由它们构成的矢量空间并不是正交空间。

多变量波形测量问题, 是一种将多个时变物理量波形通过多通道数据采集转化成包含完整群体信息的状态空间问题。这是一个矢量空间。由此可见, 对表征该空间准确性的各个不同通道的时序统一和一致性的重要性, 以及多通道同步数据采集的意义和价值。

实际上, 高速、高精度、高动态范围、多通道同步采集, 是多变量群体测量的基本手段。本文后续内容, 将主要针对多通道同步数据采集问题进行讨论。

2 同步采集技术及问题

人们很早就意识到了多通道同步数据采集的重要性和价值, 并采取了相应的技术措施^[13-15]。使用同一采样时钟是基本技术手段, 而采样保持器芯片, 其作用之一, 就是可以从硬件上确保其同步采样在多通道共用同一 A/D 转换器情况下仍然能够得以实现。所有这些措施, 都是为保证各个测量通道在仪器输入端面 $T_1 - T_2$ 面上的同时采样状态。多通道共用同一 A/D 的同步数据采集系统典型结构如图 1 所示。

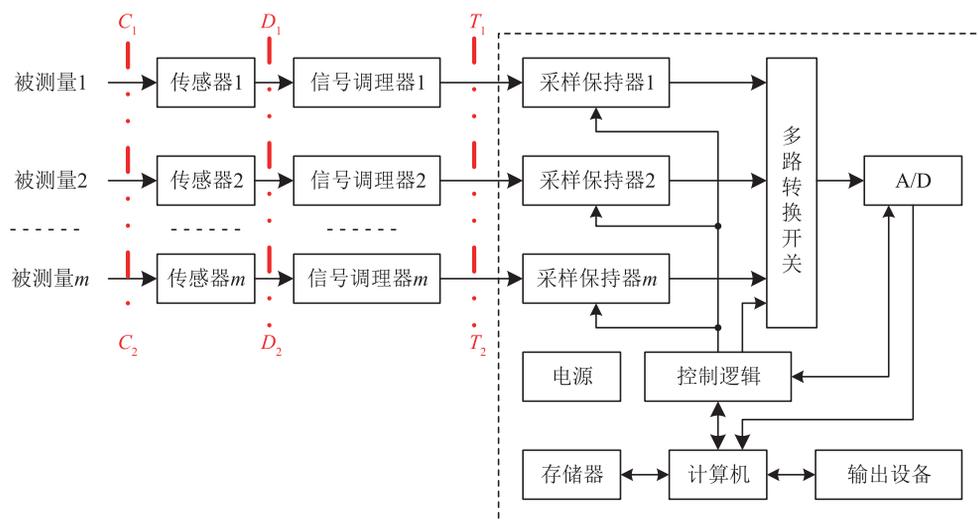


图 1 同步数据采集系统典型结构

图 1 中, 传感器 1 ~ 传感器 m 是为适应不同的被测物理量由使用者所额外配置, 作用是将各个被测物

理量信号转换为成比例变化的电信号。信号调理器为适应传感器输出信号和后续数据采集通道性能相匹配

所由用户额外配置的,主要用于信号的平移、滤波、放大等变换。它们均不属于数据采集系统的标准配置,而是可选择配件。由于用户选择和设置的自由性,不可避免地造成了时间延迟的差异性。

虚线框内所表述部分,为数据采集系统及板卡通常所携带的标准配置部分。通道1~通道 m 为数据采集系统的 m 个采集通道。

通常的多通道同步数据采集系统,其同步界面为图1所示的 $T_1 - T_2$ 面。从技术逻辑上能够保证采样保持器输入端界面的时刻统一和一致。

当 $T_1 - T_2$ 面同步后,由于信号调理器之间时间延迟的差异性,不同采集通道的通道放大器延迟^[16]、引线长度延迟、不同传感器的延迟等均有差异,不能保证在传感器输出端面 $D_1 - D_2$ 面也同步,更无法保证传感器测量端面 $C_1 - C_2$ 面上的同步特性。而传感器测量端面 $C_1 - C_2$ 面上的同步特性才是多变量数据采集同步的真正要求。

因此,数据采集系统仪器输入端面 $T_1 - T_2$ 面上的时间“同步”并不能保证各个不同传感器输入端面 $C_1 - C_2$ 面上的采样时刻统一和一致,而不同传感器输入端面 $C_1 - C_2$ 面上的采集时刻统一一致才是多通道同步数据采集的最初目的。这也是到目前为止,多数多通道同步数据采集过程中存在的主要问题。而该问题,在微波器件测量中很早就得到关注,并以测量端面调整和校准方式予以了先期补偿和修正^[17]。而在同步数据采集,却鲜有提及。

由此可见,真正实现多通道同步数据采集的关键,并不主要在于是否采取了多通道同时采样保持技术策略,更为关键的是:要在此措施基础上,对不同通道间的延迟时间差进行校准和标定^[18],并在实际的采集序列的时刻确定中,予以补偿和修正^[19-20]。

在用户的观念中,多通道数据采集系统,不同通道采集数据序列,其相同序号的采集数据对应的采集时刻应该是相同的,而实际上,由于不同通道的物理路径延迟的不同,导致它们并不相同。

通道间延迟时间差的校准和标定,即将不同测量通道相同序号的采样点对应时刻的差异定量表征出来。通道间延迟的补偿和修正就是通过技术手段使得不同通道相同序号的采样点的采集时刻达到相同,进而实现同步数据采集的效果。

毫无疑问,在不同通道需要进行同时采样的应用场合,例如上述第1节所述的各种不同的多变量动态测量场合,均需要进行通道间延迟的校准、补偿和

修正。

对于发动机而言,其燃油流量、转速、推力、效率等参数均应存在确定的关系,各个参数采样时刻之间的刻度差异将导致对于发动机性能评估的误差,进而影响其性能的使用和特性的掌握。

对于机载大气数据计算机而言,其飞行高度、指示空速、真空速、马赫数、升降速度、空速变化率、大气总温、大气静温,以及迎角、侧滑角等飞行控制参数均应是同步测量的结果,若飞行姿态变化中的各种高度、速度参数与迎角、侧滑角之间存在时间差,或者它们与发动机推力等参数之间存在时间差异,导致的后果无疑是灾难性的,飞行控制将无法达到安全和最优,极易发生空难。

另外,在需要进行正交测量的场合,如各种信号的正交解调、正交变换等,也需要进行通道间延迟的补偿和修正。另外,在需要两个通道之间存在固定时间延迟、固定相位差等情况下,也需要进行通道间延迟的修正和补偿。

经过通道延迟的补偿修正后,所有共用A/D的多通道数据采集系统,以及共用采样时钟的多通道数据采集系统,均可以实现在传感器输入端面 $C_1 - C_2$ 面上的多通道同步采集。

3 通道间延迟时间差

数据采集系统通道间延迟时间差被从众多指标中单独拿出来,并被冠以矢量特性^[21-22],主要是因为,多通道采集时序的统一和一致是不同通道数据序列构成矢量空间的基础和前提,而通道间延迟时间差直接影响多维矢量空间的复现和表征。

到目前为止,通道间延迟时间差最好的评价方法依然是正弦波拟合法^[18],是国家规范采用的标准方法^[23-24];其它方法包括直接测量法和三角波直线拟合法。直接测量法由于受时间抽样间隔误差影响,只适合大延迟测量,不能实现小于一个采样间隔的时间差的测量;三角波直线拟合法虽然可实现小延迟的测量,但易受局部噪声及幅度量化误差的影响,不易获得高精度结果。

正弦波拟合法与相位差测量方法在本质上是一致的。其优越性表现为:①既可用大时间差测量,也可用于小时间差测量,不受采样间隔的影响,没有原理方法误差;②时间差可为正值、负值和0值,具有良好的适应性;③可以设定不同通道上的任意两点作为同步界面进行评估和修正,能对不同通道引线路径不

一致、信号调理、滤波、放大等环节造成的时间延迟差异统一进行评估,进行整体补偿和修正,将不同通道的同步界面直接拓展到传感器的输出端面 $D_1 - D_2$ 面;在各个传感器自身延迟特性已知的情况下,将同步测量界面直接拓展到各传感器的输入端面 $C_1 - C_2$ 面上,实现真正物理意义上的多通道同步采集与测量;④降低了对数据采集系统同步特性的要求,使得在仪器输入端实现不同通道同时采集变得不再重要。

4 讨论

综上所述,本文主要针对多通道同步数据采集中的问题,提出一种基于多通道同步采集基础的多变量群体综合测量的矢量空间表征思想,其核心是将处于变化过程中的多变量综合测量,视为针对一个被测对象的整体测量,被测对象类似一个完整的生命体,其不同变量仅仅是该生命体在不同方面的表现形式,其不同变量之间的测量时刻点均应统一和一致。在此前提下,各个不同变量之间的相互时序关系、因果关系、耦合关系、关联关系等才能精确无误地展现出来,也才能真正体现出多变量综合的意图。否则,多变量之间如何“综合”?它与不“综合”的差异如何体现?均无法说清楚。

在该思想的基础上,提出一种将测量同步界面提前到传感器的输入端,以实现真正被测物理量值测量序列的时间尺度的统一和一致的技术方式,而不是仅仅在数据采集系统仪器端子面 $T_1 - T_2$ 面上的同步采集,使得同步采集测量的结果更加契合本源的意义和要求。

针对不同通道物理路径上不同时间延迟的估算、补偿和修正,提出了以最终实现各个通道测量时刻点统一一致为目标的整体解决思路。其中可见,真实的数据采集系统不同通道间的延迟时间差最为重要,它的精确测量与估算,是解决多通道同步采样问题的基础。当然,不同通道的采样时基的统一和一致是其基础和前提。

本文所述工作,仅仅是多变量综合测量的基础和前提,针对变量之间的耦合、因果、时序等更加深入的关系,并未涉及,需要在此基础上进行深入分析和处理,方能予以逐渐解决。

5 结论

针对动态测量中多物理量值的综合测量及表征问题,提出一种多变量群体效应分析与表征的矢量空间思想,并分析了其对多变量同步数据采集的客观需求,

以及目前仍然存在的同步问题。针对多通道数据采集同步问题,讨论了以通道间延迟时间差进行路径延迟差异的标定、补偿、修正方法,为多通道同步数据采集的实现展现了一种切实可行的技术途径,可在实际工作中拓展应用,以解决多通道同步采集的各类同步问题。

参考文献

- [1] 梁志国, 张大治, 吕华溢. 动态校准、动态测试与动态测量的辨析[J]. 计测技术, 2017, 37(1): 30-34.
- [2] B. A. 格拉诺夫斯基. 动态测量[M]. 中国计量出版社, 1989.
- [3] 梁志国, 尹肖, 孙浩琳, 等. 计量校准中的复杂环境的剖析与应对之策[J]. 计测技术, 2018, 38(2): 4-8.
- [4] 高金吉. 航空发动机振动故障监控智能化[J]. 测控技术, 2019, 38(1): 5-8.
- [5] 张赤军, 马宏. 火箭炮多参数的综合测量[J]. 兵工学报, 2007, 28(3): 374-376.
- [6] 杨修杰, 李雁灵, 杨照, 等. 多参数综合人工环境试验系统设计[J]. 自动化仪表, 2018, 39(10): 61-65.
- [7] 张章, 侯安平, 脱伟, 等. 室内发动机试车台推力校准的数值研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 308-313.
- [8] 焦天佑. 涡喷涡扇发动机试车台校准方法的研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1999, 12(4): 5-7.
- [9] 罗云林, 任文杰. 大气数据计算机自动测试系统研究[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(1): 26-28.
- [10] 梁志国, 孟晓风. 正弦波形参数拟合方法述评[J]. 测试技术学报, 2010(1): 1-8.
- [11] 梁志国, 孙璟宇. 正弦波模型化测量方法及应用[J]. 计测技术, 2001, 21(6): 3-7.
- [12] 吴小丹, 张程, 刘伟亮, 等. 一种全域数据采集与交换载荷技术的研究[J]. 空间电子技术, 2018, 15(1): 97-104.
- [13] 何浩, 杨俊峰, 武杰, 等. 多通道同步高速数据采集系统研制[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(2): 179-181.
- [14] 山昆, 刘建业, 赵伟, 等. 多通道同步采样数据采集系统研究[J]. 微处理机, 2006, 27(4): 20-22.
- [15] 韩海安, 彭宇翔, 薛建立, 等. 高精度多通道同步采样系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(4): 44-47.
- [16] 梁志国, 王雅婷, 吴娅辉. 基于四参数正弦拟合的放大器延迟时间的精确测量[J]. 计量学报, 2019, 40(6): 1101-1106.
- [17] 王一帮, 栾鹏, 吴爱华, 等. 基于 Multi-TRL 算法的传输线特征阻抗定标[J]. 计量学报, 2017, 38(2): 225-229.
- [18] 梁志国, 沈文. 数据采集系统通道间延迟时间差的精确评

- 价[J]. 数据采集与处理, 1998, 13(2): 183 - 187.
- [19] 梁志国. 一种非均匀采样系统采样均匀性的评价新方法[J]. 计量学报, 2006, 27(4): 384 - 387.
- [20] 梁志国, 孟晓风. 非均匀采样波形的修正与补偿[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(1): 126 - 132.
- [21] 梁志国, 方军. 数据采集系统动态特性的总体评价[J]. 计测技术, 2000, 20(4): 17 - 19.
- [22] 梁志国, 孙璟宇, 郁月华. 数字示波器计量校准中的若干问题讨论[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 628 - 632.
- [23] 国家技术监督局. JJF 1048 - 1995 数据采集系统校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 1995.
- [24] 国家质量技术监督局. JJF 1057 - 1998. 数字存储示波器校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 1998.

收稿日期: 2021 - 05 - 10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0206202)

引用格式: 梁志国, 刘渊, 尹肖, 等. 关于多通道同步数据采集的探讨[J]. 计测技术, 2021, 41(4): 1 - 6.