

使用LTspice分析 状态监控系统中的 振动数据

Simon Bramble, 现场应用工程师

摘要

本文介绍如何使用LTspice®分析状态监控系统中振动数据的频谱，以便能够在工业机械电机故障的早期发出预警。同时介绍如何从Microsoft Excel®电子表格中提取X、Y和Z平面数据，并将其转化为可以通过LTspice进行傅里叶变换的格式，以生成振动数据的谐波量图。

简介

数字技术的进步没有丝毫放缓的迹象，已渗透到我们生活的方方面面。为机器提供智能并非奥威尔式的反乌托邦；由于自动化反馈环路有助于减少直接维护时间，因此可提高工厂自动化的效率。

工业4.0描述了将大数据的优势带入工厂车间的概念。装有传感器的机器可监控自身的性能并相互通信，从而共同分担整个工作载荷，同时向后台提供重要的诊断信息，而且无论在同一座建筑物里还是在不同的大陆都可以实现。

对ADI产品进行的一项快速调查显示，ADI公司主要致力于为工业物联网(IIOT)提供解决方案，即从传感器到云的各种稳定可靠的高性能信号链组件。

在工业自动化中的一个应用领域就是状态监控(CbM)，通过仔细校准机器的标称工作特性，然后使用本地传感器密切监控机器本身的状态。偏离标称信号的状态即表示机器需要维护。因此，配备状态监控系统的机器可根据实际需要进行维护，而不是相对随意地安排维修计划。

确定电机运行状态的一种比较好的方法是检查其振动特征。ADI的MEMS技术可用于持续监控电机的振动特征，并与已知无故障电机的特征比较，由此判断电机的运行状况。事实上，每种电机故障都有其自己的独特谐波特征。通过查看振动模式的谐波成分，可以检测轴承、内环和外环，甚至齿轮箱齿中的故障。

在LTspice中分析振动数据

为了产生用于在LTspice中进行傅里叶分析的数据，将三个ADXL1002加速度计连接到电机，如图1所示，以测量侧向、垂向和纵向（分别为X、Y和Z）振动。

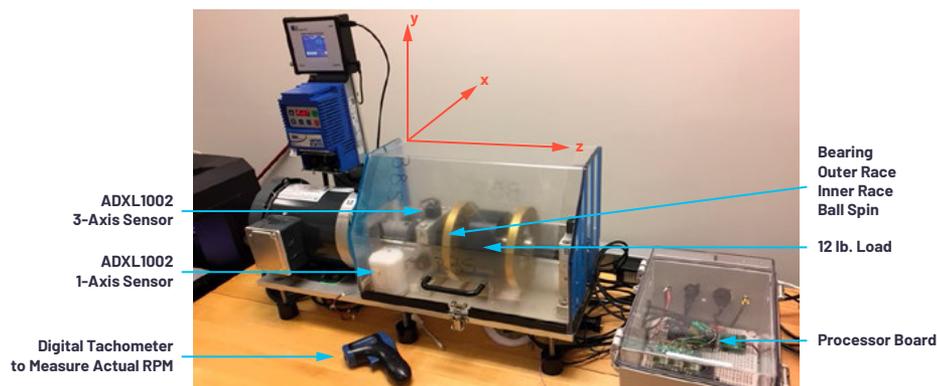


图1. 分别在侧向、垂向和纵向测得X、Y和Z通道的振动。

将振动数据下载并保存到Microsoft Excel电子表格中。在500 kSPS速率下进行数据采样，通过一秒振动数据得到三列Microsoft Excel数据，每列数据长500,000行。X、Y和Z数据样本如图2所示。

	A	B	C
1	35403	34899	35171
2	35411	34900	35180
3	35403	34910	35184
4	35404	34912	35181
5	35412	34921	35185
6	35404	34913	35174
7	35401	34915	35177
8	35388	34917	35181
9	35399	34927	35181
10	35399	34924	35178

图2. 提取X、Y和Z数据。

现在可检查此数据的谐波成分，以确定电机的运行状况。傅里叶分析是从波形中提取分量频谱的数学过程。纯正弦波的频谱中仅包含一个频率，称为基波频率。如果正弦波失真，将出现除基波频率之外的其他频率。通过分析电机振动模式的频谱，可精确地诊断其运行状况。

由于能够执行傅里叶分析的硬件和软件通常价格很高，所以这里我们介绍一种可以对MEMS数据进行傅里叶分析的方法，基本上无需任何成本。

LTspice是一款功能强大、可免费使用的电路仿真器，它可以使用从状态监控系统的MEMS传感器中获取的振动数据，通过傅里叶分析绘制任何波形的频谱。

通过图3所示的数据格式，LTspice能够生成傅里叶分析图，其中每个振动数据点都与其相应的时间戳配对。

	A	B
1	time1	value1
2	time2	value2
3	time3	value3
4	.	.
5	.	.
6	.	.
7	.	.
8	.	.

图3. 时间和电压实例的格式。

使用Microsoft Excel将数据转换成这种格式相对比较容易。过程如下。

首先，将图2中的数据列分成Excel文件中的三个工作表，命名为X、Y和Z，如图4所示。

	X	Y	Z
11	35396		
12	35405		
13	35391		
14	35406		
15	35407		
16	35409		
17	35418		
18	35406		
19	35422		
20	35423		
21	35430		

图4. 创建三个工作表后，将X、Y和Z数据复制到相应的工作表中。

在数据左侧插入一列——此列为每个数据值的时间戳。

由于在一秒内提取了500,000个数据样本，每个数据点间隔2 μs。因此，在新列的第一个单元格中，输入

2E-6

代表2 μs处的第一个时间戳。

填充其余时间戳列数值的最简单方式是使用**Series**命令。在Microsoft Excel的**搜索**框中，键入“Series”以显示图5所示的菜单选项。

从下拉菜单中选择**填充系列或模式(Fill Series or Pattern)**，然后选择**系列...(Series...)**。

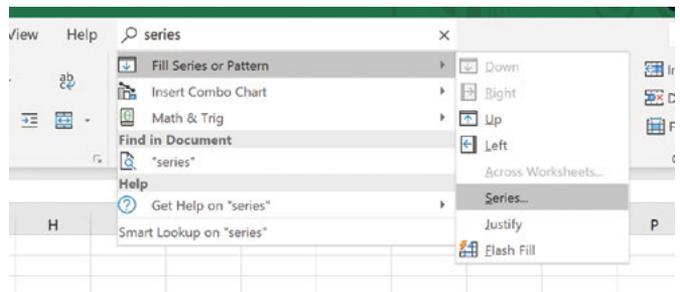


图5. 如何在Microsoft Excel中填充多个单元格。

此时出现图6所示的对话框，选中**列(Columns)**和**线性(Linear)**单选按钮。在**步进值(Step value)**中输入2E-6，在**停止值(Stop value)**中输入1。

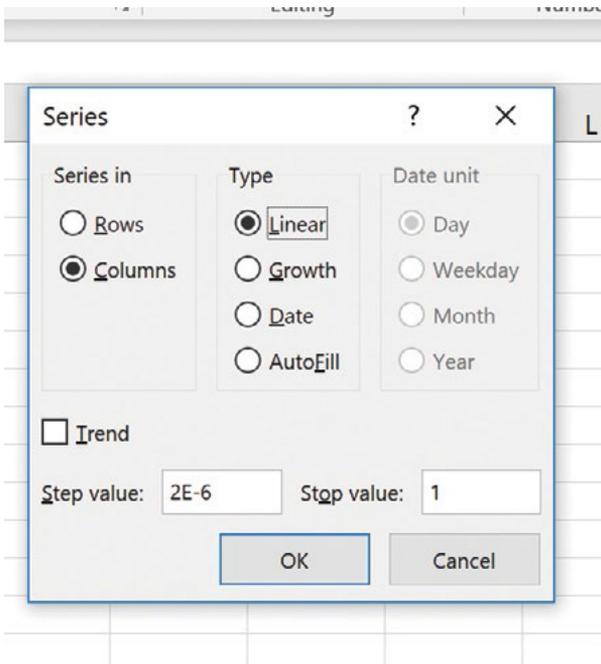


图6. 使用线性扩展数据集填充单元格。

点击**确定(OK)**填充左列数据时间戳，从2 μs递增至1秒。先填充前几个值，然后将光标一直拖到数据范围末尾的底部单元格，也可达到同样的目的——但对于500,000行数据，需要拖得很长。

现在就得到LTspice可以处理的数据格式，如图7所示。

	A	B	C
1	2.00E-06	35403	
2	4.00E-06	35411	
3	6.00E-06	35403	
4	8.00E-06	35404	
5	1.00E-05	35412	
6	1.20E-05	35404	
7	1.40E-05	35401	
8	1.60E-05	35388	
9	1.80E-05	35399	
10	2.00E-05	35399	
11	2.20E-05	35396	
12	2.40E-05	35405	
13	2.60E-05	35391	
14	2.80E-05	35406	
15	3.00E-05	35407	
16	3.20E-05	35409	
17	3.40E-05	35418	
18	3.60E-05	35406	
19	3.80E-05	35422	
20	4.00E-05	35423	

图7. 显示时间戳和相应数据样本的列。

如果数据集很大，采样间隔短，则Microsoft Excel可能会将时间戳四舍五入为不恰当的小数位数。如果出现这种情况，则突出显示第一列，然后选择**格式化(Format) > 格式化单元格(Format Cells)**，如图8所示。

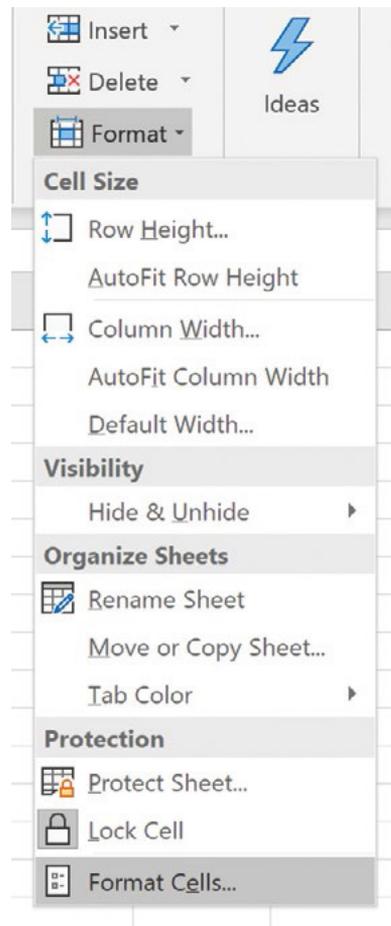


图8. 重新选择单元格的格式以去除所有舍入误差。

选择合适的小数位数，如图9所示。

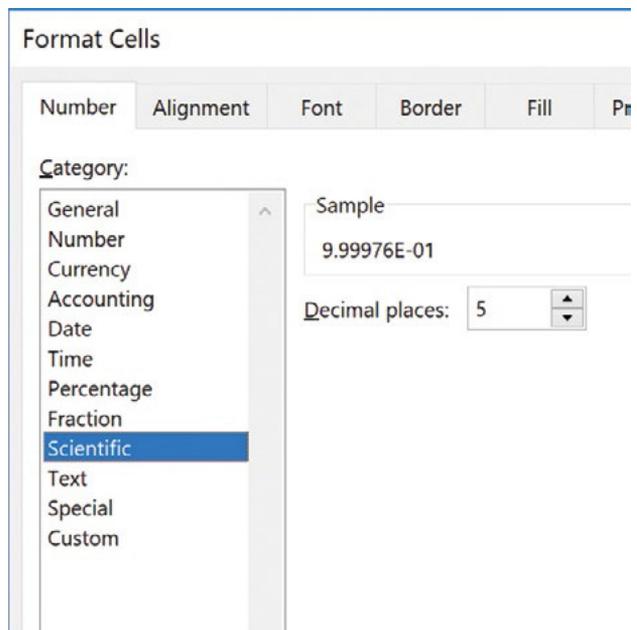


图9. 将时间戳分辨率增加到小数点后5位。

在填充时间戳列并扩展有效位数后，将每个工作表的两列复制到记事本或其他文本编辑器文件中，如图10所示。

File	Edit	Format	View	Help
2.00000E-06				35403
4.00000E-06				35411
6.00000E-06				35403
8.00000E-06				35404
1.00000E-05				35412
1.20000E-05				35404
1.40000E-05				35401
1.60000E-05				35388
1.80000E-05				35399
2.00000E-05				35399
2.20000E-05				35396
2.40000E-05				35405
2.60000E-05				35391
2.80000E-05				35406
3.00000E-05				35407
3.20000E-05				35409
3.40000E-05				35418
3.60000E-05				35406
3.80000E-05				35422
4.00000E-05				35423
4.20000E-05				35430
4.40000E-05				35439
4.60000E-05				35436
4.80000E-05				35438
5.00000E-05				35430

图10. 包含时间和振动数据的文本文件。

总共应该有三个文本文件，其中包含状态监控系统中X、Y和Z轴的振动数据。

现在，可将此数据直接读入LTspice中。

按照图11所示在LTspice中构建原理图。在该设计中，有六个电压源分别对应于故障和非故障的X、Y、Z轴的数据。这样就可以对新电机的振动数据执行傅里叶分析，并将分析结果与疑似故障电机数据的傅里叶分析进行比较。此方法的一大优势是新（非故障）电机的频率图可以叠加在疑似故障电机的频率图上，因此，性能差异一目了然。

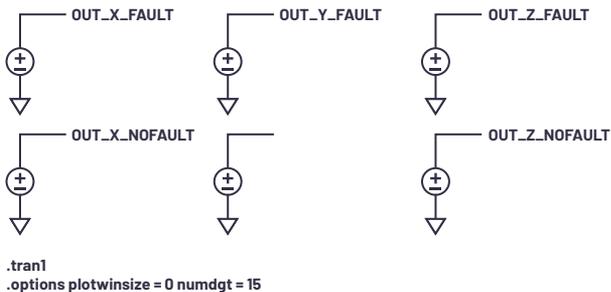


图11. 显示故障电机和非故障电机振动数据电压输出的LTspice原理图。

LTspice命令

.options plotwinsize=0 numdgt=15

去除了LTspice中的默认压缩设置，有时会产生更清晰的结果。如果忽略此行，仿真运行速度会更快，但产生的结果可能不太精确。

完成原理图后，右键单击每个电压源，选择**高级(Advanced)**按钮，选中**PWL文件(PWL File)**单选按钮，然后输入包含振动数据的相应文本文件的文件名，如图12所示。这将创建一个分段线性电压源，其中包含一系列电压及其相应的时间实例。如果这些文本文件与LTspice文件存储在同一个目录中，则操作会更简单。

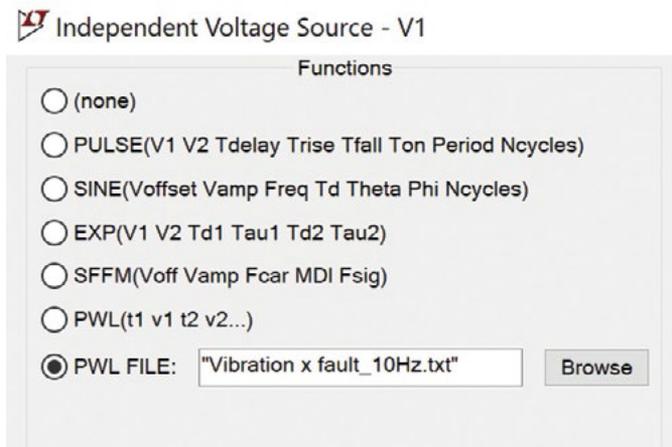


图12. 根据振动数据创建分段线性电压源。

然后应使用以下命令进行配置，在原始振动测试过程中运行瞬态分析

.tran 1

最后运行仿真。仿真可能需要一段时间才能完成，具体取决于数据点和瞬态分析时长。

故障电机和非故障电机的仿真结果如图13所示。该实验在一台转速为587.3 rpm的电机上进行，电机的轴承出现故障，外环未对准，负载为12磅。图中还显示了同一转速下无故障电机的振动模式。显然，与非故障电机相比，故障电机的振动特征幅度明显更高。

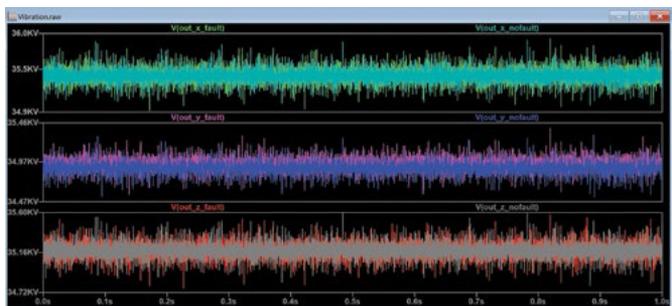


图13. 故障和非故障电机振动数据的时域结果。

突出显示**波形(Waveform)**窗口，然后从菜单栏中选择**查看(View) > FFT**。这将基于瞬态数据计算FFT。

从图2中的数据可以看到，在35,000 V这样如此高的失调电压上，我们通过数字只能看到很小的变化。在LTspice中进行仿真时，这些数据会转换成一个35,000 V的直流失调电压，并在此失调电压上还会叠加一个交流波形。

在傅里叶分析图中，此失调电压在频谱位置的直流点上表现为很大的一个尖刺，因此，当LTspice自动缩放Y轴时，相关谐波比例极小。右键单击X轴，指定高于直流电压的频率范围，由此可忽略直流失调电压——5 Hz至1 kHz应该足够。

右键单击Y轴，选择**线性(Linear)**单选按钮以查看谐波，如图14所示。

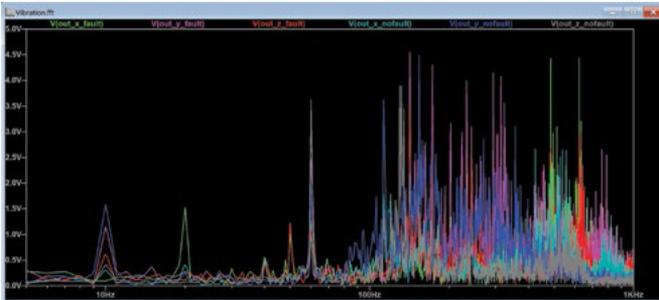


图14. 去除直流杂散在线性坐标系中显示的傅里叶图。

在图形区单击鼠标右键，可添加额外的绘图窗格，即可将振动频谱成分以X、Y和Z图分别呈现，如图15所示。

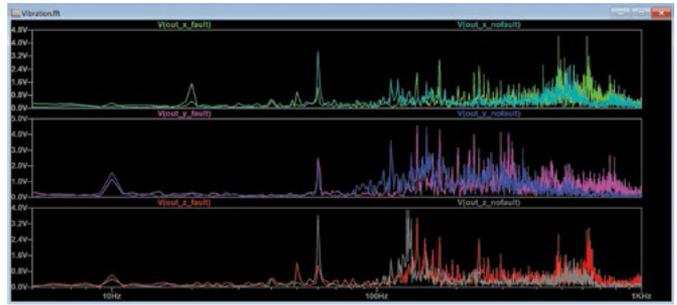


图15. X、Y和Z振动图分离。

可以清楚地看到电机的10 Hz旋转频率，以及60 Hz、142 Hz和172 Hz处存在明显的谐波。虽然本文不会分析电机内部的哪些组件导致了这些谐波，但毫无疑问，振动模式因电机磨损而改变。

结论

ADI的MEMS加速度计系列能够提供关键数据，进而在早期检测出电机故障，但这只是解决方案的一半。必须通过傅里叶分析仔细研究这些数据。遗憾的是，能够执行傅里叶分析的设备或软件通常很昂贵。而LTspice能够免费精确分析CbM数据，从而实现早期检测和诊断机器故障。



作者简介

Simon Bramble于1991年毕业于伦敦布鲁内尔大学，拥有电气工程和电子学学位，专门从事模拟电子器件和电源工作。他的职业生涯主要从事模拟电子器件工作，就职于凌力尔特（现为ADI公司的一部分）。联系方式：simon.bramble@analog.com。

