



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106197807 A

(43)申请公布日 2016.12.07

(21)申请号 201610669413.8

(22)申请日 2016.08.15

(71)申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 徐勇 郭红杰

(74)专利代理机构 北京永创新实专利事务所

11121

代理人 姜荣丽

(51)Int.Cl.

G01L 5/00(2006.01)

G01L 23/00(2006.01)

G01L 23/22(2006.01)

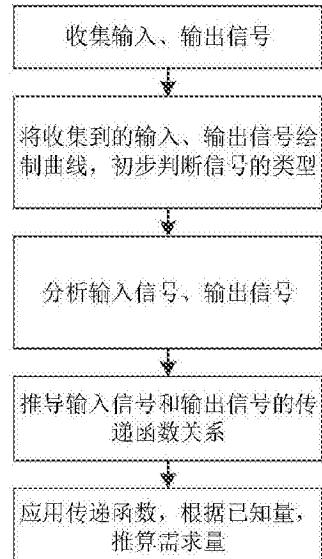
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

一种用于动态力的测量方法

(57)摘要

本发明公开了一种用于动态力的测量方法，属于力学和信号处理技术领域。所述测量方法通过动态力测量系统收集输入信号、输出信号以及其他信号，利用绘图软件绘制出曲线，初步判断各信号的，据此获取信号特征值和特征函数；推导输入信号和输出信号的传递函数关系；应用传递函数，推算出输出信号或输入信号。本发明适用范围广、易于操作、结果可靠；本发明适合于不能直接测量动态力场合，所得结果的准确性高。



1. 一种用于动态力的测量方法,其特征在于:

假设1、动态力测量系统经过校准或者动、静态标定且符合技术要求;

假设2、动态力测量系统的数据采集系统数据量足够且精度符合要求;

所述的用于动态力的测量方法,具体包括如下步骤:

步骤1:通过动态力测量系统收集输入信号和输出信号;

步骤2:将收集到的输入信号、输出信号,利用绘图软件绘制出曲线,初步判断各信号的类型;

步骤3:根据信号的类型,获取信号特征值和特征函数;

步骤4:信号处理,推导输入信号和输出信号的传递函数关系;

所述信号处理具体实施流程如下:

首先,对信号进行预处理;

其次,信号的类型须是稳态确定性的,针对周期信号和非周期信号的处理方法不同;周期信号频谱分析采用离散傅里叶级数分析,非周期信号频谱分析采用离散傅里叶变换;先辨识求解传递函数,接着求解传递函数的零极点并绘制测量系统的零极点分布图,判断动态力测量系统稳定性;求解出动态力测量系统的频率响应函数的幅频特性、相频特性,估计动态力测量系统的工作频带,定量评价动态力测量系统的动态测量能力;

步骤5:应用传递函数,推算出输出信号或输入信号。

2. 根据权利要求1所述的一种用于动态力的测量方法,其特征在于:所述的动态力,包括运动员的踏跳力、动力机械承受的动载荷或产生的动态力和火药爆炸时产生的冲击力。

3. 根据权利要求1所述的一种用于动态力的测量方法,其特征在于:所述的判断信号的类型包括判断信号的离散连续性、稳定性、确定性和周期性。

4. 根据权利要求1所述的一种用于动态力的测量方法,其特征在于:所述的步骤3具体为,

步骤3.1:使用数据分析软件显示所有信号,每种信号单独显示,输入和输出信号同坐标显示,信号曲线均以时间为自变量;再次详细获取信号数据的时域的上升时间、过冲和异常值;

步骤3.2:使用数据分析软件求出输入、输出信号的特征统计量和进行频谱分析,初步研判频域的有效频带和截止频率。

5. 根据权利要求1所述的一种用于动态力的测量方法,其特征在于:步骤4中所述的信号处理,具体为:

已知:压力 $p[n_1]$ 、推力 $f[n_2]$,两种物理信号均是离散信号序列, n_1, n_2 分别是每种信号数据的序列号;

未知:传递函数 $H(z)$, z 为任意的复数, z 域是含有复数的频域;

步骤4.1,信号的预处理:

步骤4.2,对离散信号做单边 z 变换,将离散时间信号分解为离散复指数的线性组合,求解线性时不变离散时间系统的传递函数 $H(z)$;

将压力 $[n_1]$ 表示为 z^n 线性组合:

$$p[n_1] = \frac{1}{2\pi j} \oint_C P_S(z) \cdot z^{n_1-1} dz \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{L}^{-1}\{P_S[z]\}, \quad n_1 \in [0, +\infty)$$

其中:压力信号的单边z变换为 $P_S(z) = \sum_{n_1=0}^{+\infty} p[n_1] \cdot z^{-n_1} \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{L}_S\{p[n_1]\}$

推力信号 $f[n_2]$ 的单边z变换同上,用 $F_S(z)$ 表示, $F_S(z) = \sum_{n_2=0}^{+\infty} f[n_2] \cdot z^{-n_2} \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{L}_S\{f[n_2]\}$,
 $n_2 \in [0, +\infty)$;

得, $P_S(z) = \mathcal{L}\{p[n_1]\}$ 和 $F_S(z) = \mathcal{L}\{f[n_2]\}$,所以有传递函数如下:

$$H(z) = \frac{F_S(z)}{P_S(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}}$$

b_k, a_k 指不随时间变化的系统参数,M、N分别是分子项和分母项变量多项式的阶数;

步骤4.3,求解动态推力测量系统传递函数的零极点,传递函数转换成零极点形式,作出零极点分布图;

变换离散时间系统的传递函数表达式为零极点形式:

$$H(z) = \frac{F_S(z)}{P_S(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}} = \frac{b_0}{a_0} z^{N-M} \frac{\prod_{k=1}^M (z - z_k)}{\prod_{k=1}^N (z - p_k)} = \frac{b_0}{a_0} \frac{\prod_{k=1}^M (1 - c_k z^{-1})}{\prod_{k=1}^N (1 - d_k z^{-1})}$$

其中, a_0, b_0 表示不随时间变化的z的零阶系统参数;零点是指使 $H(z)$ 的值为零的值,以 z_k 表示,极点是指使 $H(z)$ 的值为 ∞ 的值,以 p_k 表示;M、N分别表示分子多项式、分母多项式的阶数, c_k, d_k 分别指分子项、分母项提取z变量后的系数;

步骤4.4,求离散频率响应函数,系统的幅频、相频特性函数或图像:

对于定义域包含 $|z| = 1$ 的 $H(z)$,取 $z = e^{j\omega T_s}$,其中 T_s 是动态推力测量系统的取样时间, ω 表示角频率,得到离散频率响应函数:

$$\hat{H}(j\omega) = \begin{cases} H(e^{j\omega T_s}) = H(e^{j\Omega}), \omega \in [0, \omega_s/2] \text{ 或 } \Omega \in [0, \pi] \\ 0, \omega > \omega_s/2 \end{cases}$$

ω_s 是采样角频率;定义, $\Omega = \omega T_s$ 为无量纲化频率,取值范围是 $[0, \pi]$;

由于取样时间 T_s 量级上足够小,故离散频率响应函数认为是连续时不变系统的频响函数;

$$\text{幅频函数: } |H(e^{j\Omega})| = \left| \frac{b_0}{a_0} \right| \frac{\prod_{k=1}^M |1 - c_k e^{-j\Omega}|}{\prod_{k=1}^N |1 - d_k e^{-j\Omega}|}$$

相频函数:

$$\arg[H(e^{j\Omega})] = \arg \left[\frac{b_0}{a_0} \right] + \sum_{k=1}^M \arg[1 - c_k e^{-j\Omega}] - \sum_{k=1}^N \arg[1 - d_k e^{-j\Omega}]$$

绘制出相应的幅相频曲线;

步骤4.5,求出输入、输出信号的自相关和互相关函数。

6.根据权利要求1所述的一种用于动态力的测量方法,其特征在于:步骤5中,先将动态力测量系统的传递函数分解为经典测量系统的串联组合,再进行推算、仿真和验证。

一种用于动态力的测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于力学和信号处理技术领域,具体涉及一种用于动态力的测量方法。

背景技术

[0002] 动动态力指零件或部件等物体在进行加速或减速运动(直线或旋转运动)、单自由度物体受外力作强迫振动时产生的力,以及物体作加速或减速旋转运动时产生的力或旋转力矩。力的测量分为静态和动态两种形式。其中,静态测量指测量期间其值可认为是恒定的量的测量;而动态测量指为确定量的瞬时值及其随时间变化所进行的测量,即被测量是随时间而变化的。动态力具有各种各样的形式表现,例如,踏跳力(指运动员起跳瞬间对地面的作用力)、脉冲爆震发动机推力(这种发动机以周期的、脉动的方式产生推力)、姿态控制火箭发动机改变姿态时产生的动态推力、轨道控制火箭发动机在轨道变换时产生的动态推力(后文简写为,姿/轨控火箭发动机)、减震器上受的载荷等等。

[0003] 一个完整的测试系统应包括以下几部分:被测参数的检测部分、信息转换部分和参数的显示部分。测试系统的检测部分直接与被测对象发生关系,直接感受被测参数的变化,并把被测参数变换为易于传输、处理、测量的信号,通常称完成这一任务的装置(或器件)为传感器(或一次变换器)。信号的放大、变换、运算部分是将传感器的输出信号进行再变换、放大和衰减、调制和解调、阻抗变换、分析和运算等项处理,使信号变成适于需要而又便于记录和显示的信号,它是联系传感器和参数显示部分的中间环节,称为中间变换器(二次变换器或测量电路)。测试系统的最后部分是参数显示装置,即记录器、显示器,又称为输出变换器(胡寿松.自动控制原理(胡寿松+第五版)[M].)。因此,一个测试系统可由三个基本环节组成,即传感器、中间变换器、记录显示仪器(李永新,吴健.信号与动态测量系统[M].人民邮电出版社,2014.)。

[0004] 现有技术中常用的测量方法为弹簧-质量-阻尼系统法(王济.matlab在振动信号处理中的应用[M].中国水利水电出版社,知识产权出版社,2005.),如图1所示原理图,弹簧2将动架和力产生装置3连接在推力测试台静架,同时设置阻尼1,使其形成一个弹簧-质量-阻尼系统,动架和力产生装置3工作时,通过测量该振动响应来推算出动态力4,并进一步求得平均力。动架和力产生装置3的底部和两侧安装有滚动轴承,以保证力产生装置工作时整个动架和力产生装置3只能在轴向产生振动。这个系统可看为一个单自由度的弹簧-质量-阻尼系统。依据简化的原理图,由牛顿运动定律列写,推力求解表达式,

$$[0005] \text{令 } \omega^2 = \frac{K}{m_d + m_e}, \xi = \frac{c}{2\omega(m_d + m_e)}, \text{ 上式可以变为:}$$

$$[0006] \ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2x = \frac{F(t)}{(m_d + m_e)}$$

[0007] 上式中, ω 为系统的角频率; ξ 为阻尼比。这两个特性参数可以通过系统识别的方法获得。

[0008] $F(t)$ 为发动机推力;

- [0009] m_d+m_e 为动架、发动机的质量和；
[0010] C为阻尼系数；
[0011] K为弹簧刚度系数；
[0012] (x, \dot{x}, \ddot{x}) 为质量块的振动响应。
[0013] 在已知质量时，力产生装置的瞬时推力和平均推力可以通过测量质量块的振动响应 (x, \dot{x}, \ddot{x}) 求得。
[0014] 注意事项：一、选用的传感器频响范围要宽；二、对某一时刻各个振动响应的测量应同步进行，这样才能保证计算时的正确性和所测推力信号的不失真。
[0015] 现有动态力测量方法的不足：
[0016] 1.脉动式的产生动态力，导致力产生装置和动架部分，突然在轴向产生振动，因间断产生力时间极短，又接着导致力产生装置和动架连续的振动，动态力作用于弹簧上，产生轴向位移，因此用位移一次求导得到速度，二次求导得到加速度，再求出动态力，动态力因克服自身惯性力而小于实际动态力值。
[0017] 2.据现有技术方案中所述，对振动系统在模拟多循环脉冲力作用下的强迫振动响应进行动态仿真。选取不同的弹簧刚度系数、阻尼系数，获得了振动系统的位移、速度、加速度响应曲线。理论分析和数值仿真都发现，根据振动系统位移响应平均值求出的平均力，即为力产生装置的平均力。发现弹簧刚度系数过大，会导致振动系统平均位移的减小，不利于准确测量；反之，弹簧刚度系数过小则会引起振动系统位移量峰值的增大，很难选择到合适量程范围的位移传感器。现有技术方案中选取合适刚度的弹簧，没有明确可靠的方法或者经验。文章通过多次仿真试验与个人经验来选择弹簧。因此，试验准备阶段工作复杂，可操作性差。
[0018] 3.现有技术方案中，选取适合刚度弹簧的做法是，实验前预估力产生装置的力值范围并多次试验不同刚度的弹簧，以求试验得到使位移传感器产生位移大小适中的弹簧。如果换一台不同力值范围的力产生装置意味着，需要重新选取合适刚度的弹簧，相对于其他推力测量方法，这会导致试验程序过于繁琐。

发明内容

- [0019] 本发明为了解决现有技术中存在的问题，提供一种用于动态力的测量方法，对现有的动态力测量方法进行改进，可以高精度、快响应的测量动态力。
[0020] 本发明提供的用于动态力的测量方法基于如下两点假设：
[0021] 假设1、动态力测量系统经过校准或者动、静态标定且符合技术要求。
[0022] 假设2、动态力测量系统的数据采集系统数据量足够且精度符合要求。
[0023] 所述的用于动态力的测量方法，具体包括如下步骤：
[0024] 步骤1：通过动态力测量系统收集输入信号和输出信号。输出信号即为所述的需要测量的动态力。
[0025] 步骤2：将收集到的输入信号、输出信号，利用绘图软件绘制出曲线，初步判断各信号的类型。
[0026] 步骤3：根据信号的类型，获取信号特征值和特征函数，如峰值、均值、功率、能量、平均功率、方均根值等特征值以及频谱、概率密度函数等。

- [0027] 步骤4:信号处理,推导输入信号和输出信号的传递函数关系。
- [0028] 所述信号处理具体实施流程如下:
- [0029] 首先,对信号进行预处理,例如,去趋势项、数据平滑、滤波等等。
- [0030] 其次,信号的类型须是稳态确定性的,针对周期信号和非周期信号的处理方法不同。周期信号频谱分析采用离散傅里叶级数分析,非周期信号频谱分析采用离散傅里叶变换。先辨识求解系统(或理论分析)的传递函数,接着求解传递函数的零极点并绘制测量系统的零极点分布图,判断动态力测量系统稳定性。求解出动态力测量系统的频率响应函数的幅频特性(线性增益或分贝增益)、相频特性,估计动态力测量系统的工作频带,定量评价动态力测量系统的动态测量能力。
- [0031] 步骤5:应用传递函数,推算出输出信号或输入信号。
- [0032] 使用动态力测量系统测量输入信号,应用步骤4中的传递函数,得出输出信号即需要测量的动态力,具体为:
- [0033] 首先,根据步骤4中传递函数,判断动态力测量系统的传递函数是否可以分解为典型系统(理想放大系统、典型一阶系统、典型二阶系统、理想微分系统、理想积分系统、一阶微分系统和二阶微分系统等)的串联组合,以简化应用工作;
- [0034] 其次,对于不同组试验,输入信号作为输入量利用传递函数求解到输出信号并与实测输出信号对比。
- [0035] 本发明测量方法中所述的动态力,包括运动员的踏跳力、动力机械(分为,风力机械、水力机械和热力发动机三大类)承受的动载荷或产生的动态力(比如,风力机的叶片承受的动载荷、水轮机发电时叶片承受的动载荷、以热力发动机为动力源的机械装置产生的动态力)和火药爆炸时产生的冲击力。
- [0036] 本发明的优点在于:
- [0037] (1)分解传递函数,将复杂函数简单化,成熟的典型系统的特性理论易于理解,加快数据处理进程。软件仿真能在一定程度上验证系统传递函数的准确性。
- [0038] (2)本发明适用范围广、易于操作、结果可靠。
- [0039] (3)本发明方法适合于不能直接测量动态力场合,例如,运动员的踏跳力,可运用本发明方法,测量运动员作用接触面上的压力反推踏跳力;以热力发动机为动力源的机械装置产生的动态力(例如,脉冲爆震发动机的推力测量,可以通过测量发动机的燃气压力来近似求解推力;姿态/轨道控制火箭发动机在调整姿态或者变换轨道时产生的动态推力,可以通过测量燃气压力来推算瞬态推力);火药爆炸时产生的冲击,可通过测量瞬时气压压力来测算冲击力。
- [0040] (4)本发明方法的应用所得结果能作为参考标准。本发明方法对数据进行了有效化处理,所得结果的准确性高。

附图说明

- [0041] 图1为现有技术中的弹簧-质量-阻尼系统法原理图。
- [0042] 图2为本发明方法总体步骤流程图。
- [0043] 图3为姿态/轨道控制火箭发动机动态推力测量系统原理图。
- [0044] 图4为系统的传递函数形象图。

[0045] 图5为本发明的测量方法中信号处理和推导关系流程图。

[0046] 图中：

[0047] 1.阻尼；2.弹簧；3.动架和力产生装置；4.动态力；5.静架；

[0048] 6.动态力传感器；7.力产生装置；8.动架；9.测量输入信号的传感器。

具体实施方式

[0049] 下面以姿态/轨道控制火箭发动机动态推力测量(后文简写为,姿轨控火箭发动机)为实例说明应用本发明动态力的测量方法,不同领域的动态力测量需灵活运用本发明方法。

[0050] 在本实例中,姿态/轨道控制火箭发动机的动态推力测量系统经静态和动态标定过且在误差范围内,静态标定采用砝码增减法或机械螺旋加载方式,动态标定采用力锤锤击法。动态推力测量系统经过校准或者动、静态标定且符合技术要求。动态推力测量系统的数据采集系统数据量足够且精度符合要求。

[0051] 姿轨控火箭发动机动态推力测量系统如图3所示,所述动态推力测量系统包括静架5、动态力传感器6、力产生装置7、动架8、测量输入信号的传感器9。所述的动态力传感器6设置在静架5和力产生装置7之间,动架8设置在静架5上,力产生装置7位于动架8上,在所述的力产生装置7上设置有测量输入信号的传感器9。

[0052] 结合图2所示流程,应用本发明提供的用于动态力的测量方法,对姿轨控火箭发动机动态推力进行测量,具体包括如下步骤:

[0053] 步骤1:通过动态推力测量系统收集输入、输出信号。

[0054] 姿轨控火箭发动机动态推力测量系统测量得到两个物理参数:推力(输出信号)和压力(输入信号)。

[0055] 在保证测量精度与采样数据足够的前提下,测量动态推力采用压电式动态力传感器,测量压力采用压电式动态压力传感器。

[0056] 所述的压电式动态力传感器位于发动机封闭端,测量轴向主矢推力,压电式动态压力传感器位于喷管出口,测量发动机内部压力。

[0057] 发动机工作时,燃烧室的高温、高压燃气是产生推力的主要因素。因此,为了获得发动机的推力(输出信号),可将发动机内部压力作为输入信号。

[0058] 姿轨控火箭发动机做地面试验时,可以近似看成单自由度的振动系统。这时发动机只有轴向一个自由度,发动机推力主要沿着轴向产生,因此压电式动态力传感器安置于发动机封闭端,这样测量简单高效。

[0059] 发动机工作时,发动机内部压力急剧变化,高温燃气喷出喷管时产生推力,测量喷管出口部位的压力变化,有利于后续探索压力-推力的关系。

[0060] 步骤2:将测量收集到的输入信号和输出信号,利用绘图软件绘制出曲线,初步判断信号的类型。

[0061] 初步判断信号的类型,具体实施流程如下:

[0062] 步骤2.1:判定动态推力测量系统的类型;

[0063] 从不同角度来判断,如果信号是离散时间信号,则动态推力测量系统就是离散时间系统;如果是连续时间信号,则动态推力测量系统就是连续时间系统。如果所测物理量之

间的约束关系全部是线性(不仅仅是简单的比例关系)的,则动态推力测量系统是线性系统,反之,所测物理量之间不全是线性关系,则动态推力测量系统是非线性系统。如果动态推力测量系统的结构参数保持常量,不随时间变化,则动态推力测量系统为定常系统(时不变系统);反之,则动态推力测量系统为时变系统。动态推力测量系统类型主要从以上三方面来判断。

[0064] 一般而言,如果信号为数值形式存储,则动态推力测量系统为离散时间系统;动态推力测量系统的结构/性能参数比如,各阶固有频率、相应的阻尼比、振型、响应时间、采样周期及采样数据精度等等几乎不随时间变化的,故认为动态推力测量系统为定常系统;测量输入物理量与输出物理量之间存在某种确定的函数关系(一般精确的通用的数学表达式无法理论推导得出),认为动态推力测量系统是线性的。总之,当前的推力测量系统(动态推力/静态推力)绝大部分是离散时间线性定常系统。

[0065] 步骤2.2:根据信号曲线,先判断信号稳态性与否,接着判断信号确定性与否;

[0066] 步骤2.3:判断确定性信号的周期性与否;

[0067] 将不同试验条件下或同试验条件下的多组压力、推力数据分别在两个坐标系(时间为自变量)绘制出;将同试验条件下同一组压力和推力数据同坐标系显示。观察同一物理量的不同组实验数据的峰值、周期、噪声、上升沿、衰减等特征,得出信号类型。

[0068] 在实例中,观察同一物理量(压力、推力)的不同组实验数据的峰值、周期、噪声、上升沿、衰减等特征。结果显示,同一试验条件下,同一物理量的不同组试验数据,峰值趋同、周期相近、上升沿变化趋势一致、衰减趋势相同、噪声情况相仿。不同试验条件下,不同物理量的变化趋势基本一致,压力、推力的变化曲线呈周期性、脉冲式、负指数衰减的变化特征。结合信号的分类,初步判定两种物理量信号是稳态确定性周期性信号。

[0069] 上述处理过程中,将数值形式的信号以曲线的形式显示,便于发现规律和判别信号类型。判定信号的类型,便于后续采取相应的信号分析方法获取信号的幅值相频特性。

[0070] 步骤3:根据信号的类型,利用数据分析软件显示并分析输入信号和输出信号。

[0071] 具体实施流程:

[0072] 步骤3.1:使用数据分析软件(Matlab、Tecplot、Excel、Python等)显示所有信号,每种信号单独显示,输入和输出信号同坐标显示,信号曲线均以时间为自变量。再次详细获取信号数据的变化情况,包括时域的上升时间、过冲和异常值等衡量信号数据的动态特性参数。

[0073] 步骤3.2:使用数据分析软件求出输入、输出等信号的特征统计量和进行频谱分析,初步研判频域的有效频带、截止频率等,又例如,峰值、有效值、平均绝对值和高、低频特性等。

[0074] 获取时域的信号动态特性,可以初步判断动态推力测量系统的动态测量性能(响应快慢、测量精度两方面)以及了解信号的特征参数的量级。

[0075] 获取上升时间、衰减趋势与稳态状况以了解信号的瞬态变化所处的量级、预判衰减函数刻画与得出极值的量级。判断有无过冲、趋势项、异常值等,以了解动态推力测量系统固有误差或者随机动态误差,以便于下一步骤采取相应的信号处理措施(消除趋势项、剔除异常值等措施)。

[0076] 输入信号与输出信号同坐标显示,以获得幅值、时延的情况,判断动态推力测量系

统响应质量、输入和输出信号的相关程度,以研判在下一步骤中是否需要采取信号相关分析定量的考察关系密切程度。

[0077] 通过傅里叶变换对,将信号从时域变换到频域分析,以了解信号的频域范围、不同频率的幅值大小与相位变化情况、有效频带的范围。

[0078] 实例中,压力和推力均以时间为自变量在两个坐标系分开绘制变化曲线。另外将压力和推力曲线在同一个坐标系即第三个坐标系中显示;

[0079] 求出压力、推力的特征统计量并分析频谱特性。

[0080] 步骤4:处理输入信号和输出信号,推导输入信号和输出信号的关系。

[0081] 输入信号和输出信号的关系,即传递函数对动态推力测量系统的形象化见图4,输入信号 $x(t)$ 经过动态推力测量系统得到输出信号 $y(t)$,用 $h(t-k)$ 来表征动态推力测量系统因输入信号的激励所产生的响应。

[0082] 实例中,已知压力、推力信号数据(数字信号、离散时间、离散量化数值),利用数据处理软件分别求出输入和输出信号序列的z变换,然后用输出信号z函数比输入信号z函数得到动态推力测量系统的z传递函数。将z传递函数变换为零极点形式,求出零极点。做出零极点图,判断动态推力测量系统的稳定性。稳定动态推力测量系统的z传递函数,可令 $z = e^{j\omega}$, ω 表角频率,求出动态推力测量系统的频率响应函数和幅相特性曲线。

[0083] 用公式表达上述的处理流程为:

[0084] 已知:压力 $p[n_1]$ 、推力 $f[n_2]$,两种物理信号均是离散信号序列, n_1 、 n_2 分别是每种信号数据的序列号;

[0085] 未知(需求解量):传递函数 $H(z)$ (z 可为任意的复数, z 域是含有复数的频域)。

[0086] 结合图5所示流程,所述的处理输入信号、输出信号,具体方法步骤为:

[0087] 步骤4.1,信号的预处理:

[0088] 对输入信号、输出信号进行去趋势项、数据平滑、滤波等处理。

[0089] 对于步骤3中的输入信号和输出信号,如果信号因偏离基线而存在波形畸变,则需要进行去趋势项处理(常用多项式最小二乘法);如果信号存在的噪声,则需要对信号进行数据平滑处理(平均法、五点三次平滑法)。通过滤波过滤信号次要甚至无用频段(脉冲响应信号一般选用指数窗,脉冲信号推荐用矩形窗)。

[0090] 步骤4.2,对离散信号做单边z变换,将离散时间信号分解为离散复指数的线性组合(复变函数的罗朗级数展开发现:离散时间信号一般都可以分解为 $x_a[n] = z^n$ 的线性组合),求解线性时不变离散时间系统的传递函数 $H(z)$ 。

[0091] 将压力 $p[n_1]$ 表示为 z^n 线性组合:

$$[0092] p[n_1] = \frac{1}{2\pi j} \oint_c P_S(z) \cdot z^{n_1-1} dz \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{L}^{-1}\{P_S[z]\}, \quad n_1 \in [0, +\infty)$$

[0093] 其中:压力信号的单边z变换为 $P_S(z) = \sum_{n_1=0}^{+\infty} p[n_1] \cdot z^{-n_1} \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{L}_S\{p[n_1]\}$

[0094] 推力 $f[n_2]$ 的单边z变换同上,用 $F_S(z)$ 表示, $F_S(z) = \sum_{n_2=0}^{+\infty} f[n_2] \cdot z^{-n_2} \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{L}_S\{f[n_2]\}$ 。
 $n_2 \in [0, +\infty)$

[0095] 可得, $P_S(z) = \mathcal{L}\{p[n_1]\}$ 和 $F_S(z) = \mathcal{L}_S\{f[n_2]\}$,

$$[0096] H(z) = \frac{F_S(z)}{P_S(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}}$$

[0097] b_k 、 a_k 指不随时间变化的系统参数, M 、 N 分别是分子项和分母项 z 变量多项式的阶数。

[0098] 仿真一个可实现的、稳定连续时间系统(其数学特征包括: $t < 0$ 时, $h(t) = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = 0$)的实用离散时间系统的传递函数 $H(z)$ 的定义域一般都为:包含 $|z| = 1$ 的圆外开区间: $|z| > r_1$, $r_1 < 1$, r_1 是小于1的数值。

[0099] 动态推力测量系统内部的结构、原理不清楚时(看成黑箱),根据输入和输出信号,建立一种能衡量动态推力测量系统动态特性的函数关系,并依据这种关系来推算任意输入情况下的输出量。这种动态力的测量方法,简便高效。

[0100] 求解动态推力测量系统的传递函数,据此判断动态推力测量系统的稳定性。根据系统频率响应函数得出的幅相特性,来定量评价系统的动态响应性能。

[0101] 步骤4.3,求解动态推力测量系统传递函数的零极点,传递函数变换为零极点形式,作出零极点分布图;

[0102] 变换离散时间系统的传递函数表达式为零极点(零点:使 $H(z)$ 的值为零的值,以 z_k 表示,极点:使 $H(z)$ 的值为 ∞ 的值,以 p_k 表示。)形式:

$$[0103] H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}} = \frac{b_0}{a_0} z^{N-M} \frac{\prod_{k=1}^M (z - z_k)}{\prod_{k=1}^N (z - p_k)} = \frac{b_0}{a_0} \frac{\prod_{k=1}^M (1 - c_k z^{-1})}{\prod_{k=1}^N (1 - d_k z^{-1})}$$

[0104] 其中, a_0 、 b_0 表示不随时间变化的 z 的零阶系统参数; M 、 N 分别表示分子多项式、分母多项式的阶数, c_k 、 d_k 分别指分子项、分母项提取 z 变量后的系数。

[0105] 绘制零极点图,判断动态推力测量系统的稳定性(一个线性时不变系统,当且仅当它的传递函数 $H(z)$ 的收敛域包括单位圆 $|z| = 1$ 时,该系统就是稳定的)。

[0106] 步骤4.4,求离散频率响应函数,系统的幅频、相频特性函数或图像:

[0107] 对于定义域包含 $|z| = 1$ 的 $H(z)$,取 $z = e^{j\omega T_s}$,其中 T_s 是动态推力测量系统(离散时间系统)的取样时间, ω 表示角频率,得到离散频率响应函数:

$$[0108] H(j\omega) = \begin{cases} H(e^{j\omega T_s}) = H(e^{j\Omega}), \omega \in [0, \omega_s/2] \text{ 或 } \Omega \in [0, \pi] \\ 0, \omega > \omega_s/2 \end{cases}$$

[0109] ω_s 是采样角频率。定义, $\Omega = \omega T_s$ 为无量纲化(角)频率,取值范围是 $[0, \pi]$ 。

[0110] 由于取样时间 T_s 量级上一般足够小,故离散频率响应函数认为是连续时不变系统的频响函数。

$$[0111] \text{幅频函数: } |H(e^{j\Omega})| = \left| \frac{b_0}{a_0} \right| \frac{\prod_{k=1}^M |1 - c_k e^{-j\Omega}|}{\prod_{k=1}^N |1 - d_k e^{-j\Omega}|}$$

[0112] 相频函数:

$$[0113] \arg[H(e^{j\Omega})] = \arg \left[\frac{b_0}{a_0} \right] + \sum_{k=1}^M \arg[1 - c_k e^{-j\Omega}] - \sum_{k=1}^N \arg[1 - d_k e^{-j\Omega}]$$

[0114] 绘制出相应的幅相频曲线。

[0115] 步骤4.5,求出输入、输出信号的自相关和互相关函数:

[0116] 根据步骤3判断的信号类型及信号关联性的预判,采用不同的函数定量的衡量信号的相关性。

[0117] 自相关函数:

[0118] 对于能量信号 $x(t)$ (时限信号)的自相关函数 $R_{xx}(\tau)$,

$$[0119] R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) dt$$

[0120] 对于功率信号(大部分的周期信号)的自相关函数,

$$[0121] R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot x(t - \tau) dt$$

[0122] 互相关函数 $R_{yx}(\tau)$:

[0123] 对于能量信号 $x(t)$ 与 $y(t)$,

$$[0124] R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) \cdot x(t - \tau) dt = y(\tau) * x(-\tau)$$

[0125] 对于功率信号,

$$[0126] R_{yx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \int_{-T/2}^{T/2} y(t) \cdot x(t - \tau) dt$$

[0127] τ 指时间延迟,T指信号。

[0128] 该步骤中,对周期或非周期的信号进行离散时间傅里叶级数或离散时间傅里叶变换进行频谱分析,是为了了解信号的频率成分、判断信号的高低频属性和噪声频率成分。

[0129] 求解自相关函数,可以知道信号 $x(t)$ 或 $x[n]$ 与信号时延后 $x(t-\tau)$ 或 $x[n-k]$ 的结果呈线性比例关系的程度,能有效的描述信号波形前后关联性。互相关函数能描述一种信号与另一种信号的相似程度,从而客观的评价测量系统的动态特性。

[0130] 在实例中,利用数据处理软件对压力信号、推力信号(均为功率信号)分别求取自相关和互相关函数。

[0131] 步骤5:应用传递函数,推算出推力或者压力。

[0132] 在实例中,测量姿轨控火箭发动机的喷管出口的压力,压力作为输入信号,应用传递函数,得出推力。

[0133] 将传递函数各项分解为经典测量系统的串联组合,使处理数据步骤简化。进一步的使用仿真模块,模拟输入信号,观测输出信号的波形变化。

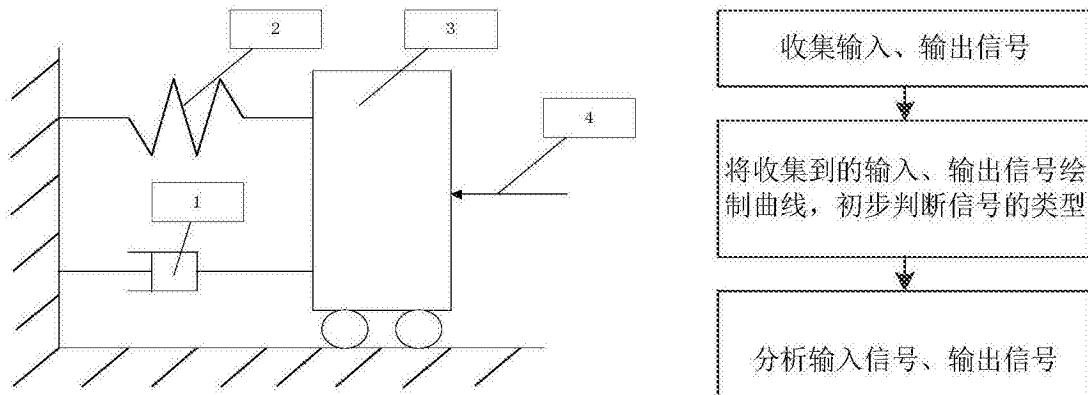


图1

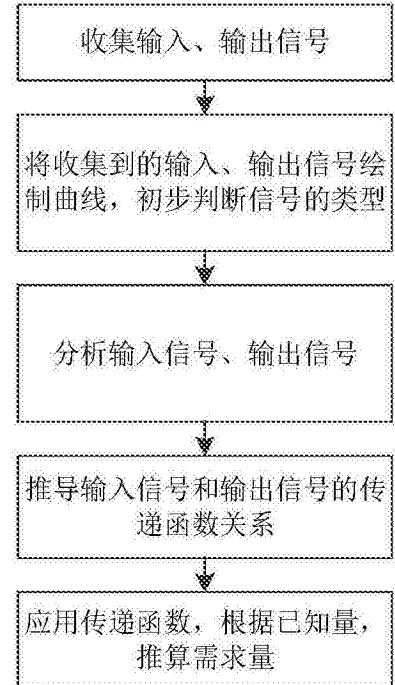


图2

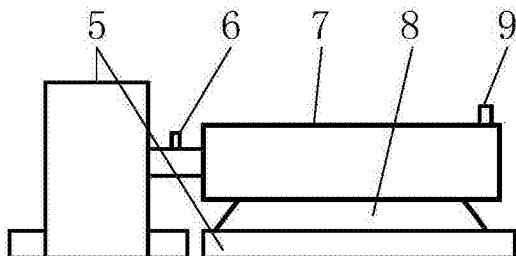


图3

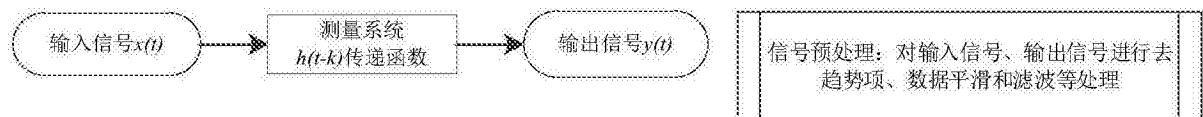


图4

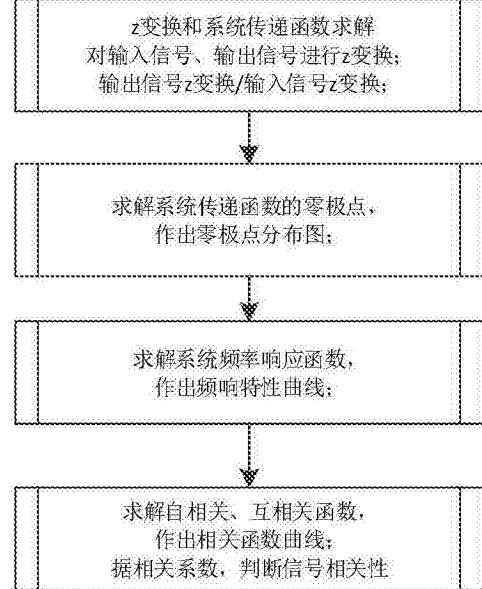


图5