



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103674578 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 26

(21) 申请号 201210339860. 9

(22) 申请日 2012. 09. 14

(71) 申请人 南车青岛四方机车车辆股份有限公司

地址 266111 山东省青岛市城阳区棘洪滩镇
锦宏东路 88 号

(72) 发明人 李鹏 高宝杰 丁叁叁 田爱琴
孙维光 赵岩 项盼

(74) 专利代理机构 北京元中知识产权代理有限公司
11223

代理人 曲艳

(51) Int. Cl.

G01M 17/08 (2006. 01)

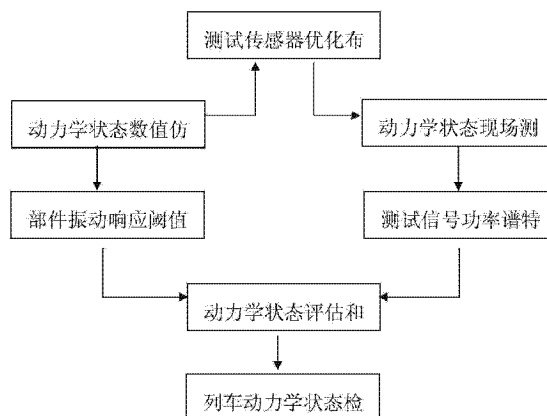
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

高速列车运行动力学性能状态的检测方法

(57) 摘要

本发明涉及一种高速列车运行动力学性能状态的检测方法,包括如下步骤:步骤A、建立列车动力学状态检测的数值仿真模型,确定列车各检测点处的动态响应控制阈值;步骤B、对列车动力学状态检测传感器进行布设和优化;步骤C、利用传感器测量列车运营时各检测点的动态响应信号,并将检测到的信号数据进行分析及处理,得出列车各检测点动力学状态的检测数值;步骤D、将由步骤C中得出的检测数值与由步骤A中得出的控制阈值进行比较,进而对列车的动力学状态进行评估。本发明将在线监测技术与动力学仿真技术相结合,实现高速运行状态实时检测,为高速列车安全、可靠运输提供技术保障。



1. 一种高速列车运行动力学性能状态的检测方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤 A、建立列车动力学状态检测的数值仿真模型,确定列车各检测点处的动态响应控制阈值;

步骤 B、对列车动力学状态检测传感器进行布设和优化;

步骤 C、利用传感器测量列车运营时各检测点的动态响应信号,并将检测到的信号数据进行分析及处理,得出列车各检测点动力学状态的检测数值;

步骤 D、将由步骤 C 中得出的检测数值与由步骤 A 中得出的控制阈值进行比较,进而对列车的动力学状态进行评估。

2. 根据权利要求 1 所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,其特征在于:在上述步骤 A 中,以实测轨道不平顺谱为激励,构造合适的虚拟激励载荷输入形式,作用于列车动力学系统,通过简谐振动分析后,按虚拟激励原理完成列车随机振动的功率谱分析,计算车辆动力学系统中列车关键部位的动态位移、加速度、应力和应变等响应,进而得到列车各检测点处的动态响应控制阈值。

3. 根据权利要求 2 所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,其特征在于:所述列车动力系统包括弹性车体有限元模型、转向架模型、轮对及一、二系连接系统。

4. 根据权利要求 1 所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,其特征在于:在上述步骤 B 中,所述传感器的布设包括检测列车整体动力学特征的传感器及用于检测局部动力学特征的传感器。

5. 根据权利要求 4 所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,其特征在于:用于检测列车整体动力学特征的传感器的布设包括在列车轴箱、转向架、空气弹簧、弹性车体布设至少包括加速度和应变类型的传感器。

6. 根据权利要求 4 所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,其特征在于:在所述步骤 B 中,将列车分成多个速度等级,以随机轨道不平顺谱为激励,按步骤 A 完成各检测点的动力学的检测数值仿真,确定传感器的优化布置。

7. 根据权利要求 1 所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,其特征在于:在所述步骤 C 中,列车各检测点动力学状态检测数值的得出,采用现代功率谱估计方法,具体包括:首先通过对布设的所述传感器采集的测试数据估计出信号的 AR 参数模型、MA 模型或 ARMA 模型,再按照不同参数模型的输出功率完成时域信号的功率谱估计。

8. 根据权利要求 1 所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,其特征在于:在上述步骤 D 中,经过功率谱处理所得的动力学状态检测数值与响应阈值比较,如果超出响应阈值则发出预警。

高速列车运行动力学性能状态的检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种高速列车运行动力学性能状态的检测方法,特别涉及一种在线监测技术与动力学仿真技术相结合的列车运行动力学性能检测方法。

背景技术

[0002] 高速列车运行动力学性能状态是铁道车辆的运行品质的重要指标,在北美和欧洲一些发达国家,同时也把铁道车辆的运行品质作为评定铁路车辆安全性的指标,因此对于高速列车运行动力学性能的检测具有重要的实际意义。

[0003] 一般而言,可以通过两种途径进行高速列车动力学性能检测,一是采用试验测试技术,二是通过数值仿真技术。试验测试技术对于车辆动力学评价具有非常好的可信度,但同时试验也具有明显的一些不足之处,如由于人力、物力和财力的有限,不可能实现列车动力学状态的完全观测。基于计算机程序系统的动力学仿真技术,在一定程度上弥补了试验手段的不足,日益强大的计算机允许人们建立愈加精细的数值模型,能够实现对所观察到真实自然特性更为接近的描述。将试验技术与高精细数值仿真技术相结合成为高速列车动力学检测未来的重要发展方向之一。

发明内容

[0004] 本发明主要目的在于解决上述问题和不足,提供一种高速列车运行动力学性能状态的检测方法,将在线监测技术与动力学仿真技术有机结合,实现对高速运行状态的实时监测。

[0005] 为实现上述目的,本发明的技术方案是:

[0006] 一种高速列车运行动力学性能状态的检测方法,包括如下步骤:

[0007] 步骤 A、建立列车动力学状态检测的数值仿真模型,确定列车各检测点处的动态响应控制阈值;

[0008] 步骤 B、对列车动力学状态检测传感器进行布设和优化;

[0009] 步骤 C、利用传感器测量列车运营时各检测点的动态响应信号,并将检测到的信号数据进行分析及处理,得出列车各检测点动力学状态的检测数值;

[0010] 步骤 D、将由步骤 C 中得出的检测数值与由步骤 A 中得出的控制阈值进行比较,进而对列车的动力学状态进行评估。

[0011] 进一步,在上述步骤 A 中,以实测轨道不平顺谱为激励,构造合适的虚拟激励载荷输入形式,作用于列车动力学系统,通过简谐振动分析后,按虚拟激励原理完成列车随机振动的功率谱分析,计算车辆动力学系统中列车关键部位的动态位移、加速度、应力和应变等响应,进而得到列车各检测点处的动态响应控制阈值。

[0012] 进一步,所述列车动力系统包括弹性车体有限元模型、转向架模型、轮对及一、二系连接系统。

[0013] 进一步,在上述步骤 B 中,所述传感器的布设包括检测列车整体动力学特征的传

感器及用于检测局部动力学特征的传感器。

[0014] 进一步,用于检测列车整体动力学特征的传感器的布设包括在列车轴箱、转向架、空气弹簧、弹性车体布设至少包括加速度和应变类型的传感器。

[0015] 进一步,在所述步骤 B 中,将列车分成多个速度等级,以随机轨道不平顺谱为激励,按步骤 A 完成各检测点的动力学的检测数值仿真,确定传感器的优化布置。

[0016] 进一步,在所述步骤 C 中,列车各检测点动力学状态检测数值的得出,采用现代功率谱估计方法,具体包括:首先通过对布设的所述传感器采集的测试数据估计出信号的 AR 参数模型、MA 模型或 ARMA 模型,再按照不同参数模型的输出功率完成时域信号的功率谱估计。

[0017] 进一步,在上述步骤 D 中,经过功率谱处理所得的动力学状态检测数值与响应阈值比较,如果超出响应阈值则发出预警。

[0018] 综上内容,本发明所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,以高速列车的动力学参数作为监测对象,将在线监测技术与动力学仿真技术相结合,实现高速运行状态实时检测,为高速列车安全、可靠运输提供技术保障。

附图说明

[0019] 图 1 是本发明流程图;

[0020] 图 2 是本发明数值仿真原理图;

[0021] 图 3 是本发明现场测试原理图。

具体实施方式

[0022] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述:

[0023] 如图 1 所示,本发明所述的高速列车运行动力学性能状态的检测方法,将现场测试技术与数值仿真技术相结合,具体包括如下步骤:

[0024] 步骤 A:建立列车动力学状态检测的数值仿真模型,确定列车各检测点处的动态响应控制阈值。

[0025] 车辆系统在线路运营过程中,会受到来自轨道不平度的激励,这种激励具有明显的随机性,而作为系统输入的轨道不平度一般是以谱的形式给出的。对于轨道车辆而言,前后车轮所受同一轨道的随机不平度激励之间存在时间差,传统随机振动算法不易处理此类问题。

[0026] 本实施例中,将这类高速列车多点激励问题转化为广义单点激励问题,采用虚拟激励原理精确高效地完成高速列车随机振动的功率谱分析。如图 2 所示,具体是以实测轨道不平顺谱为激励,构造合适的虚拟激励载荷输入形式,作用于列车动力学系统,通过常规的简谐振动分析后,按虚拟激励原理完成列车随机振动的功率谱分析,再计算车辆动力学系统中列车关键部位的动态位移、加速度、应力和应变等响应,进而得到列车各检测点处的动态响应控制阈值。

[0027] 其中,建立由弹性车体、转向架、轮对以及一系、二系连接系统的车辆有限元模型动力学方程,其频域内表达式为

$$[0028] \quad (K - \omega^2 M + i \omega C) u = f \quad (1)$$

[0029] 其中, M , C 和 K 分别为车辆系统的质量阵、阻尼阵和刚度阵; f 为车辆系统的载荷向量。

[0030] 高速列车由同一轨道随机不平顺激励源所产生的多个激励之间, 无其它干扰, 可认为是完全相干的。随机激励向量 $f(t)$ 可以表示为

$$[0031] \quad f(t) = \{f(t-t_1), f(t-t_2), \dots, f(t-t_m)\}^T \quad (2)$$

[0032] 其中, $f(t)$ 是随机轨道不平顺。

[0033] 如令 $t_1=0$, 则 $t_j (j=1, 2, \dots, m)$ 是各激励相对第一个激励的滞后时间常数。假设 $S_{ff}(\omega)$ 为 $f(t)$ 的自功率谱密度, 则 $f(t)$ 的相干功率谱密度矩阵表示为:

$$[0034] \quad S_{in}(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & e^{i\omega(t_1-t_2)} & \dots & e^{i\omega(t_1-t_m)} \\ e^{i\omega(t_2-t_1)} & 1 & \dots & e^{i\omega(t_2-t_m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{i\omega(t_m-t_1)} & e^{i\omega(t_m-t_2)} & \dots & 1 \end{bmatrix} S_{ff}(\omega) \quad (3)$$

[0035] 系统响应的功率谱矩阵 $S_{out}(\omega)$ 与激励的功率谱矩阵 $S_{in}(\omega)$ 存在如下关系:

$$[0036] \quad \begin{aligned} S_{out}(\omega, \alpha) &= \mathbf{y}^*(\omega, \alpha) \mathbf{y}^T(\omega, \alpha) \\ \mathbf{y}(\omega, \alpha) &= \mathbf{H}(\omega, \alpha) \{e^{-i\omega t_1} \quad e^{-i\omega t_2} \quad \dots \quad e^{-i\omega t_m}\}^T \sqrt{S_{in}(\omega)} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

[0037] 其中, $H(\omega, \alpha)$ 为频响函数矩阵, 上标“*”和“T”分别为复共轭和转置。

[0038] 依照上述的对应关系, 即可确定列车各检测点处的动态响应控制阈值 $S_{\text{阈值}}(\omega, \alpha)$ 。

[0039] 步骤 B: 对列车动力学状态检测传感器进行布设和优化。

[0040] 高速列车动力学状态线路的检测过程主要是依靠在列车的各检测点布设传感器, 利用传感器测量高速列车运营时各检测点的动态响应信号, 传感器的布设需要考虑尽可能捕捉车辆动力学状态的特征信息, 包括高速列车整体动力学特征与局部动力学特征。

[0041] 从车辆整体动力学特征状态上, 传感器的布设包括在列车轴箱、转向架、空气弹簧、弹性车体布设至少包括加速度和应变类型的传感器, 对轮轴、转向架、空气弹簧和弹性车体等关键构件运动特性进行在线检测。从车辆局部动力学特征状态上, 如车体局部区域测点的布置密度应能够正确识别车体振动模态特性等。最终, 通过大量的高速列车动力学性态的数值仿真完成传感器整体(传感装置, 导线, 电源等)布设方案设计与优化研究, 为测试数据有效点筛选方法提供依据。

[0042] 随机轨道不平顺 $r(x)$ 假定为以空间坐标 x 为自变量的零均值平稳随机过程, 其自功率谱密度函数为 $S_{rr}(\Omega)$ 已知。如列车以速度 v 匀速行驶, 车轮沿轨道移动不发生滑动, 且无爬轨、跳轨等现象。通过位移与速度之间关系式: $x=vt$, 可以将随机轨道不平顺由空间域 $r(x)$ 转换到时间域 $r(t)$, 即以时间坐标 t 为自变量的零均值平稳随机过程, 且其自功率谱密度函数 $S_{rr}(\omega)$ 与 $S_{rr}(\Omega)$ 存在如下转换关系为:

$$[0043] \quad S_{rr}(\omega) = S_{rr}(\Omega)/v, \quad \omega = \Omega v = 2\pi v/\lambda \quad (5)$$

[0044] 其中 λ 为空间波长。

[0045] 在进行测点布置优先时, 随机轨道不平顺谱采用美国 6 级谱和我国短波不平顺

谱,表达式如下:

[0046]

$$S_r(\Omega) = \begin{cases} \frac{0.25 \times 0.0339 \times 0.8245^2}{\Omega^2(\Omega^2 + 0.8245^2)} (\text{cm}^2 / \text{rad} / \text{m}), & \text{当 } \Omega \leq 2\pi \\ 0.036(\Omega / 2\pi)^{-3.15} (\text{mm}^2 / \text{rad} / \text{m}), & \text{当 } \Omega > 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

[0047] 合理选择列车运行参数,最高速度应较该车辆的设计构造速度高 10km/h,自最高速度以下,分若干速度级,各速度级差为 10-20km/h,按步骤 A 完成高速列车动力学状态检测的数值仿真,确定传感器的优化布置。

[0048] 步骤 C:利用传感器测量列车运营时各检测点的动态响应信号,并将检测到的信号数据进行分析及处理,得出列车各检测点动力学状态的检测数值。

[0049] 对检测信号数据进行分析及处理包括:数据管理设计、数据分析处理以及软件模块与其它程序数据交互接口设计。数据分析是核心设计模块,其适应不同测点位置的选择,以及不同测试信息的切换选择。

[0050] 针对经典功率谱估计分辨率和方差性低的不足,如图 3 所示,本实施例采用现代功率谱估计方法,通过对列车轴箱,转向架、空气弹簧和弹性车体布设传感器采集的各检测点的测试数据,通过 A/D 数据转换,将信号传输至数据处理系统,数据处理系统提取各检测点的信号特征,估计出信号的 AR 参数模型、MA 模型或 ARMA 模型等,并进一步按照不同参数模型的输出功率完成时域信号的功率谱估计,即可得出列车各检测点动力学状态的检测数值。

[0051] 该信号处理的基本思想是认为时间序列 $x(n)$ 是白噪声通过某种模型产生。通过选择某种模型,将已观测到的样本数据或自相关函数数据确定该模型的参数,进而提取信号的功率谱特征估计。如下:

$$[0052] \quad x(n) = \sum_{l=0}^p b_l w(n-l) - \sum_{k=0}^p a_k x(n-k) \quad (7)$$

[0053] 其中, $w(n)$ 为白噪声序列,进行 z 变换得:

$$[0054] \quad \sum_{k=0}^p a_k X(z) z^{-k} = \sum_{l=0}^p b_l W(z) z^{-l} \quad (8)$$

[0055] 系统模型的传递函数为:

$$[0056] \quad H(z) = \frac{X(z)}{W(z)} = \frac{\sum_{l=0}^p b_l z^{-l}}{\sum_{k=0}^p a_k z^{-k}} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (9)$$

$$[0057] \quad \text{其中, } A(z) = \sum_{k=0}^p a_k z^{-k}, B(z) = \sum_{l=0}^p b_l z^{-l}。$$

[0058] 如果输入白噪声的功率谱密度为 $P_w(z) = \sigma_w^2$,则输出的功率谱密度为:

$$[0059] \quad P_x(z) = \sigma_\omega^2 H(z) H(z^{-1}) = \sigma_\omega^2 \frac{B(z)B(z^{-1})}{A(z)A(z^{-1})} \quad (10)$$

[0060] 将 $z=e^{j\omega}$ 代入上式,得:

$$[0061] \quad P_x(z) = \sigma_\omega^2 \left| \frac{B(e^{j\omega})}{A(e^{j\omega})} \right|^2 \quad (11)$$

[0062] 当确定了 σ_ω^2 和系数 a_k 、 b_l , 就可以求得随机信号时域序列的功率谱密度。

[0063] 对于 AR 参数模型、MA 模型或 ARMA 模型分别有:

[0064] AR 模型:

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + w(n) \quad (12)$$

[0065] MA 模型:

$$x(n) = \sum_{l=1}^p b_l w(n-l) \quad (13)$$

[0066] ARMA 模型:

$$x(n) = \sum_{l=0}^p b_l w(n-l) - \sum_{k=0}^p a_k x(n-k) \quad (14)$$

[0067] 步骤 D、将由步骤 C 中得出的检测数值与由步骤 A 中得出的控制阈值进行比较,进而对列车的动力学状态进行评估,如果检测数值超出响应控制阈值则发出预警。

[0068] 如图 1 所示,以实测轨道不平顺谱为激励,采用前述步骤 A 的高速列车动力学状态检测的数值仿真方法分析计算车辆动力学系统中列车关键部位的动态位移、加速度等响应,得到列车各检测点处的动态响应控制阈值 $S^{\text{阈值}}(\omega, \alpha)$ 。

[0069] 通过前述步骤 B 进行检测传感器优化布设,在列车轴箱,转向架、和弹性车体布设至少包括加速度和应变类型传感器的传感器,测量高速列车运营时各检测点的动态响应信号。

[0070] 通过前述步骤 C 的信号经过功率谱估计处理所得高速列车动力学状态检测数值 $S^{\text{测试}}(\omega, \alpha)$ 。

[0071] 将 $S^{\text{测试}}(\omega, \alpha)$ 与 $S^{\text{阈值}}(\omega, \alpha)$ 相比较,如 $S^{\text{测试}}(\omega, \alpha)$ 超出所述控制阈值 $S^{\text{阈值}}(\omega, \alpha)$, 即

$$[0072] \quad S^{\text{测试}}(\omega, \alpha) \geq S^{\text{阈值}}(\omega, \alpha)$$

[0073] 则发出预警,设计人员可以根据预警提示,更改相应的设计参数。

[0074] 至此,混合现场测试技术与数值仿真技术高速列车运行动力学性能状态的检测结束。

[0075] 如上所述,结合附图所给出的方案内容,可以衍生出类似的技术方案。但凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等

同变化与修饰,均仍属于本发明技术方案的范围内。

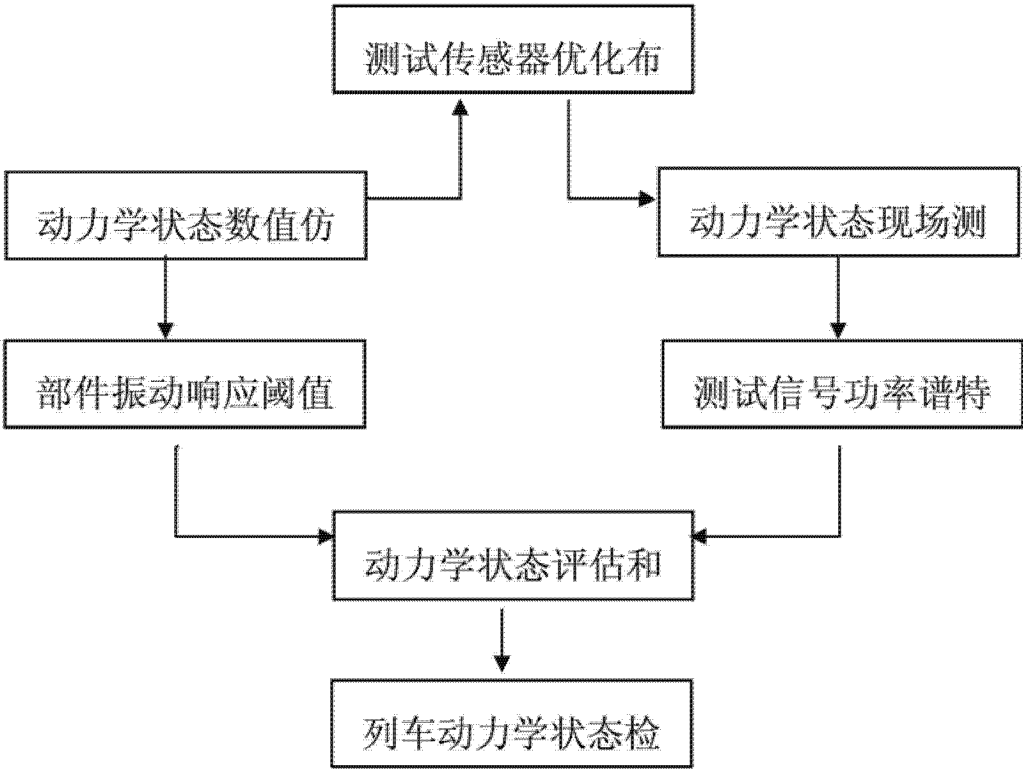


图 1

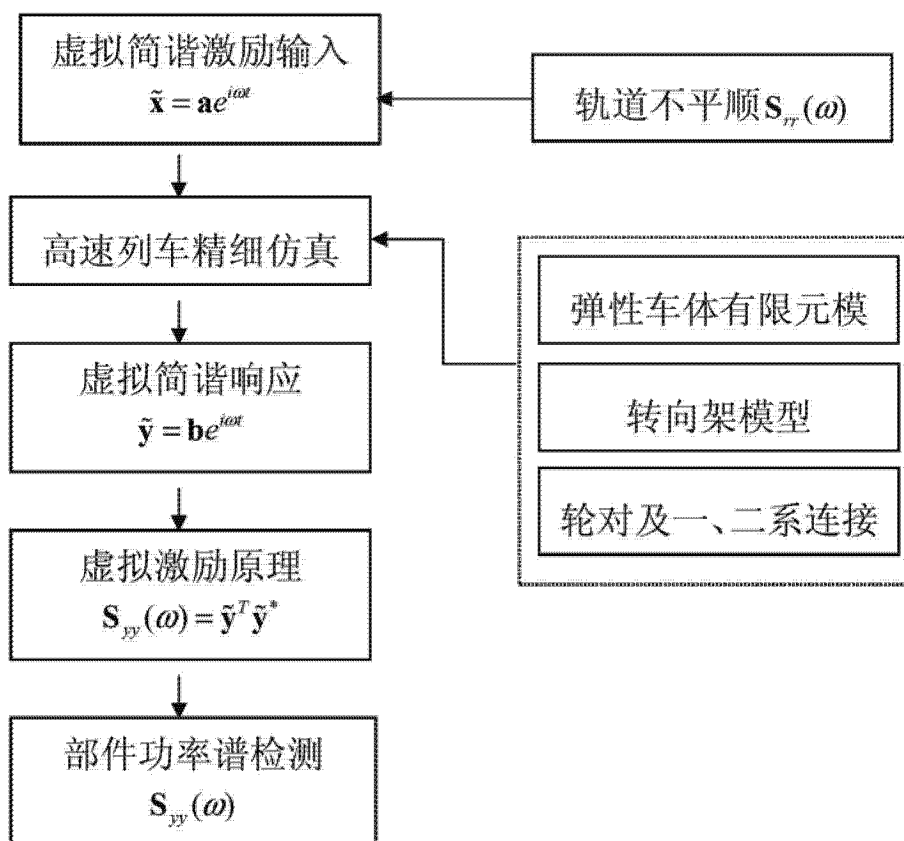


图 2

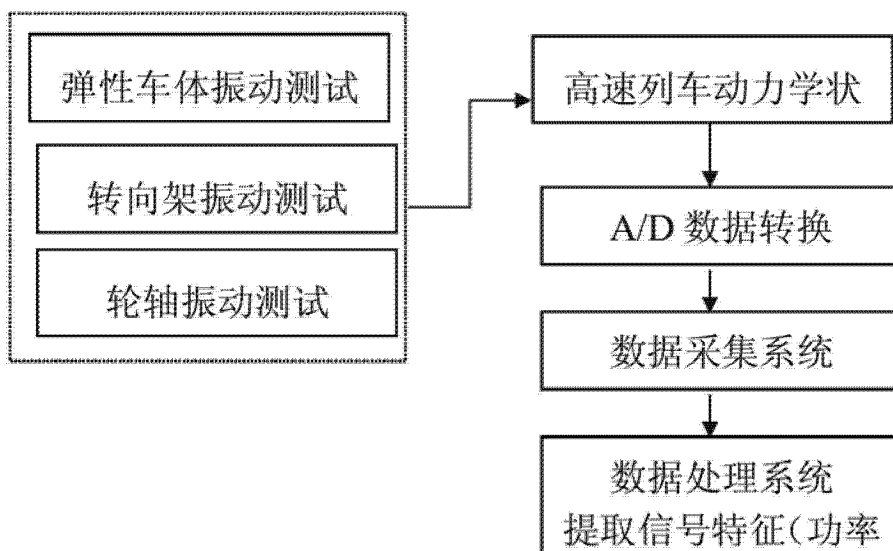


图 3