



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116067594 A

(43) 申请公布日 2023. 05. 05

(21) 申请号 202310073755.3

G01M 13/027 (2019.01)

(22) 申请日 2023.01.16

(71) 申请人 远景能源有限公司

地址 214444 江苏省无锡市江阴市申港街道申庄路3号

(72) 发明人 牛菁 赵华俊 严雪 黄磊

钟大伟 马亚军 董晓华 许宏华 单卫东

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

专利代理师 廖程

(51) Int. Cl.

G01M 5/00 (2006.01)

G01M 13/022 (2019.01)

G01M 13/028 (2019.01)

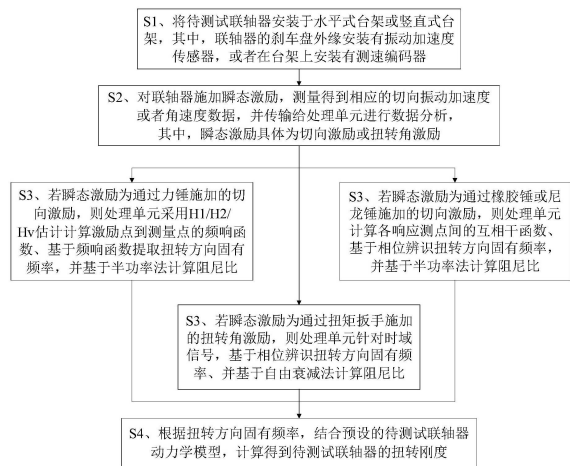
权利要求书2页 说明书6页 附图7页

(54) 发明名称

一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置及其方法

(57) 摘要

本发明涉及一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置及其方法,该方法包括:将待测试联轴器安装于水平式台架或竖直式台架;对联轴器施加瞬态激励,测量得到切向振动加速度或者角速度数据,瞬态激励具体为切向激励或扭转角激励;针对不同的瞬态激励,采用相应的数据处理方式,以提取出联轴器扭转方向固有频率、并计算出阻尼比;再根据扭转方向固有频率,结合预设的待测试联轴器动力学模型,计算得到待测试联轴器的扭转刚度。与现有技术相比,本发明通过动力学方法对联轴器进行扭转刚度和阻尼的测试,无需持续的静扭矩加载、精准的扭矩和扭转角幅值测量,因此无需液压缸/电机等加载机构以及联轴器扭转角测量机构,具有低成本、效率高、适用范围广的优点。



1. 一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,包括用于水平固定安装联轴器的水平式台架或者用于竖直固定安装联轴器的竖直式台架,所述测试装置还包括用于施加瞬态激励给联轴器的激励源,所述联轴器的刹车盘外缘安装有用于测量联轴器切向振动加速度的振动加速度传感器,或者在台架上安装有用于测量联轴器角速度的测速编码器,所述振动加速度传感器或测速编码器连接至处理单元,所述处理单元用于提取联轴器扭转方向固有频率以及阻尼比,并计算联轴器扭转刚度。

2. 根据权利要求1所述的一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,所述联轴器为竖直安装状态时,所述联轴器的发电机侧假轴固定于地面,所述联轴器的风轮侧假轴与竖直式台架的固定工装相连接,所述固定工装与地面之间的距离可调节。

3. 根据权利要求2所述的一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,所述风轮侧假轴通过角接触球轴承与竖直式台架的固定工装相连接。

4. 根据权利要求2或3所述的一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,所述测速编码器安装于竖直式台架的固定工装上。

5. 根据权利要求1所述的一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,所述联轴器为水平安装状态时,所述联轴器的发电机侧假轴固定于水平式台架的第一固定工装,所述联轴器的风轮侧假轴与水平式台架的第二固定工装相连接,所述第一固定工装与第二固定工装之间的距离可调节,所述第一固定工装、第二固定工装与地面之间的距离可调节。

6. 根据权利要求1所述的一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,所述风轮侧假轴通过角接触球轴承与水平式台架的第二固定工装相连接。

7. 根据权利要求5或6所述的一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,所述测速编码器安装于水平式台架的第二固定工装上。

8. 根据权利要求1所述的一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,所述激励源具体为切向激励源或扭转角激励源,所述切向激励源具体是通过力锤、橡胶锤或尼龙锤对联轴器施加切向激励;

所述扭转角激励源具体是通过扭矩扳手对联轴器风轮侧假轴施加扭矩。

9. 根据权利要求8所述的一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,其特征在于,所述激励源为扭转角激励源时,所述联轴器风轮侧假轴位置安装有用于方便施加扭矩的测试工装,所述测试工装由脆性材料制成,所述脆性材料包括但不限于铸铁、淬火高碳钢,所述测试工装的上部设置有用于卡合连接扭矩扳手的转接段,所述测试工装的中部设置有颈缩段,通过扭矩扳手施加扭矩,使测试工装在预设扭矩范围内失效断裂,从而对联轴器施加扭转角激励。

10. 一种联轴器扭转刚度与阻尼测试方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、将待测试联轴器安装于水平式台架或竖直式台架,其中,联轴器的刹车盘外缘安装有振动加速度传感器,或者在台架上安装有测速编码器;

S2、对联轴器施加瞬态激励,测量得到相应的切向振动加速度或者角速度数据,并传输给处理单元进行数据分析,其中,瞬态激励具体为切向激励或扭转角激励;

S3、若瞬态激励为通过力锤施加的切向激励,则处理单元采用H1/H2/Hv估计计算激励点到测量点的频响函数、基于频响函数提取扭转方向固有频率,并基于半功率法计算阻尼比;

若瞬态激励为通过扭矩扳手施加的扭转角激励,则处理单元针对时域信号,基于相位辨识扭转方向固有频率、并基于自由衰减法计算阻尼比;

若瞬态激励为通过橡胶锤或尼龙锤施加的切向激励,则处理单元计算各响应测点间的互相干函数、基于相位辨识扭转方向固有频率,并基于半功率法计算阻尼比;

S4、根据扭转方向固有频率,结合预设的待测试联轴器动力学模型,计算得到待测试联轴器的扭转刚度,具体为:

$$K_a = (2 * \pi * f_0)^2 * J_1$$

其中, K_a 为联轴器的扭转刚度, f_0 为联轴器扭转方向固有频率, J_1 为联轴器含刹车盘风轮侧的转动惯量、中间体转动惯量、膜片转动惯量和上部假轴转动惯量之和。

一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置及其方法

技术领域

[0001] 本发明涉及联轴器性能测试技术领域,尤其是涉及一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置及其方法。

背景技术

[0002] 联轴器作为机械传动中的重要部件,为确保其工作可靠性,往往需要进行联轴器进行相应的性能测试,现有技术主要是通过液压/电机等作动器的方式,以对联轴器施加静扭矩,从而测量出联轴器的静态扭转角、计算出联轴器的扭转刚度。

[0003] 比如中国专利CN107345882B公开一种用于联轴器扭转性能测试的装置及其测试方法,其液压驱动组件通过驱动第一扭转待测部件的周向转动,以对第一扭转待测部件的扭转性能进行测试,该装置具有能够进行大扭矩、小角度的扭转性能测试的优点以及还具有测试精确度高的优点。

[0004] 中国专利CN115096585A公开一种联轴器三向加载试验装置和联轴器扭转角度测量方法,该技术方案是在试验平台上安装对联轴器进行扭转加载的扭转加载组件、对联轴器进行轴向加载的轴向加载组件和对联轴器进行径向加载的径向加载组件,联轴器水平安装在试验平台上,前端与扭转加载组件同轴连接,后端与轴向加载组件和径向加载组件分别连接,联轴器随扭转加载组件的转动而扭转,联轴器前端装有测量联轴器前端扭转角度的前测量摆臂、后端装有测量联轴器,后端摆动角度的后测量摆臂,前测量摆臂和后测量摆臂均沿径向伸出,随联轴器的扭转而同步摆动。以使联轴器的试验承载工况更接近实际承载工况,从而提高联轴器扭转刚度计算的精准性、提高试验的可靠性。

[0005] 另有中国专利CN106052983A、CN101726377A分别公开一种弹性联轴器动静态扭转刚度简便测试装置及测试方法、风力发电机联轴器试验台及试验方法,此外,还有韩国专利KR1020220107391A公开一种扭转刚度测量装置。

[0006] 以上现有技术均通过作动器加载静态扭矩、测量静态扭转角的方式进行联轴器扭转静刚度测试,这种方式需要保证持续的静扭矩加载、精准的扭矩和扭转角幅值测量,并且需要设置液压缸/电机/……等加载机构以及联轴器扭转角的测量装置,导致测试成本增加、测试周期较长,且由于需要考虑联轴器测试扭矩范围要求,当测试联轴器发生变化时,加载机构无法适用性地调整其加载能力。

发明内容

[0007] 本发明的目的就是为了克服上述现有技术存在的缺陷而提供一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置及其方法,通过动力学方法对联轴器进行扭转刚度和阻尼的测试,无需持续的静扭矩加载、精准的扭矩和扭转角幅值测量,无需液压缸/电机等加载机构,也无需联轴器扭转角的测量装置,能够低成本、高效地测试得到联轴器扭转刚度与阻尼。

[0008] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置,包括用于水平固定安装联轴器的水平式台架或者用于竖直固定安装联轴器的竖直式台

架,所述测试装置还包括用于施加瞬态激励给联轴器的激励源,所述联轴器的刹车盘外缘安装有用于测量联轴器切向振动加速度的振动加速度传感器,或者在台架上安装有用于测量联轴器角速度的测速编码器,所述振动加速度传感器或测速编码器连接至处理单元,所述处理单元用于提取联轴器扭转方向固有频率以及阻尼比,并计算联轴器扭转刚度。

[0009] 进一步地,所述联轴器为竖直安装状态时,所述联轴器的发电机侧假轴固定于地面,所述联轴器的风轮侧假轴与竖直式台架的固定工装相连接,所述固定工装与地面之间的距离可调节。

[0010] 进一步地,所述风轮侧假轴通过角接触球轴承与竖直式台架的固定工装相连接。

[0011] 进一步地,所述测速编码器安装于竖直式台架的固定工装上。

[0012] 进一步地,所述联轴器为水平安装状态时,所述联轴器的发电机侧假轴固定于水平式台架的第一固定工装,所述联轴器的风轮侧假轴与水平式台架的第二固定工装相连接,所述第一固定工装与第二固定工装之间的距离可调节,所述第一固定工装、第二固定工装与地面之间的距离可调节。

[0013] 进一步地,所述风轮侧假轴通过角接触球轴承与水平式台架的第二固定工装相连接。

[0014] 进一步地,所述测速编码器安装于水平式台架的第二固定工装上。

[0015] 进一步地,所述激励源具体为切向激励源或扭转角激励源,所述切向激励源具体是通过力锤、橡胶锤或尼龙锤对联轴器施加切向激励;

[0016] 所述扭转角激励源具体是通过扭矩扳手对联轴器风轮侧假轴施加扭矩。

[0017] 进一步地,所述激励源为扭转角激励源时,所述联轴器风轮侧假轴位置安装有用于方便施加扭矩的测试工装,所述测试工装由脆性材料制成,所述脆性材料包括但不限于铸铁、淬火高碳钢,所述测试工装的上部设置有用于卡合连接扭矩扳手的转接段,所述测试工装的中部设置有颈缩段,通过扭矩扳手施加扭矩,使测试工装在预设扭矩范围内失效断裂,从而对联轴器施加扭转角激励。

[0018] 进一步地,所述测速编码器具体为激光编码器或磁电编码器。

[0019] 一种联轴器扭转刚度与阻尼测试方法,包括以下步骤:

[0020] S1、将待测试联轴器安装于水平式台架或竖直式台架,其中,联轴器的刹车盘外缘安装有振动加速度传感器,或者在台架上安装有测速编码器;

[0021] S2、对联轴器施加瞬态激励,测量得到相应的切向振动加速度或者角速度数据,并传输给处理单元进行数据分析,其中,瞬态激励具体为切向激励或扭转角激励;

[0022] S3、若瞬态激励为通过力锤施加的切向激励,则处理单元采用H1/H2/Hv估计计算激励点到测量点的频响函数、基于频响函数提取扭转方向固有频率,并基于半功率法计算阻尼比;

[0023] 若瞬态激励为通过扭矩扳手施加的扭转角激励,则处理单元针对时域信号,基于相位辨识扭转方向固有频率、并基于自由衰减法计算阻尼比;

[0024] 若瞬态激励为通过橡胶锤或尼龙锤施加的切向激励,则处理单元计算各响应测点间的互相干函数、基于相位辨识扭转方向固有频率,并基于半功率法计算阻尼比;

[0025] S4、根据扭转方向固有频率,结合预设的待测试联轴器动力学模型,计算得到待测试联轴器的扭转刚度,具体为:

$$[0026] \quad K_a = (2 * \pi * f_0)^2 * J_1$$

[0027] 其中, K_a 为联轴器的扭转刚度, f_0 为联轴器扭转方向固有频率, J_1 为联轴器含刹车盘风轮侧的转动惯量、中间体转动惯量、膜片转动惯量和上部假轴转动惯量之和。

[0028] 与现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0029] 一、本发明采用动力学方式, 通过设置水平式台架或竖直式台架, 以对联轴器进行水平固定安装或竖直固定安装, 并设置激励源, 以施加瞬态激励给联轴器, 此外, 在联轴器的刹车盘外缘安装用于测量联轴器切向振动加速度的振动加速度传感器, 或者在台架上安装用于测量联轴器角速度的测速编码器, 再通过处理单元提取联轴器扭转方向固有频率以及阻尼比, 并计算联轴器扭转刚度。由此整个测试装置无需额外设计加载机构以及扭转角测量机构, 也无需持续进行静扭矩加载、精准的扭矩和扭转角幅值测量, 仅需对联轴器施加瞬态激励并采集响应数据, 不仅能够有效降低测试成本, 同时也降低了测试时长、提升了测试效率。

[0030] 二、本发明针对竖直式台架, 设计用于连接联轴器的风轮侧假轴的固定工装, 且该固定工装与地面之间的距离可调节; 针对水平式台架, 设计用于连接联轴器的发电机侧假轴的第一固定工装, 以及用于连接联轴器的风轮侧假轴的第二固定工装, 第一固定工装与第二固定工装之间的距离可调节, 第一固定工装、第二固定工装与地面之间的距离可调节。由此无需考虑联轴器测试扭矩范围要求, 充分考虑轴向和径向尺寸调节范围, 实现一种可调可拓展结构设计, 能够很好地适用于不同型号、尺寸、额定扭矩的联轴器测试。

[0031] 三、本发明设计激励源为切向激励源或扭转角激励源, 其中, 切向激励源可通过力锤、橡胶锤或尼龙锤对联轴器施加切向激励; 扭转角激励源则通过扭矩扳手以及设计的测试工装对联轴器风轮侧假轴施加扭矩, 该测试工装的所述测试工装由脆性材料制成, 所述脆性材料包括但不限于铸铁、淬火高碳钢, 所述测试工装的上部设置有用于卡合连接扭矩扳手的转接段, 所述测试工装的中部设置有颈缩段, 通过扭矩扳手施加扭矩, 使测试工装在预设扭矩范围内失效断裂, 从而确保能够方便可靠地对联轴器施加相应的瞬态激励。

[0032] 四、本发明通过动力学方法对联轴器进行扭转刚度和阻尼的测试, 对联轴器施加扭转方向的瞬态激励并采集响应数据, 采用基于频域和时域的模式辨识方法获取联轴器扭转方向固有频率和阻尼比, 然后通过联轴器的动力学模型计算其扭转刚度和阻尼。不仅确保了测试结果的准确度, 还能够同时测量得到联轴器的扭转刚度和阻尼比, 提升了测试范围, 有利于后续进行传动链动力学特性仿真分析工作。

附图说明

[0033] 图1a为本发明中联轴器竖直安装效果示意图;

[0034] 图1b为本发明中联轴器水平安装效果示意图;

[0035] 图2a为竖直安装联轴器时振动加速度传感器的安装位置示意图;

[0036] 图2b为竖直安装联轴器时测速编码器的安装位置示意图;

[0037] 图3为切向激励施加效果示意图;

[0038] 图4为扭转角激励施加效果示意图;

[0039] 图5a为施加扭转角激励时的一种测试工装示意图;

[0040] 图5b为施加扭转角激励时的另一种测试工装示意图;

- [0041] 图6为本发明的方法流程示意图；
- [0042] 图7a为施加切向激励后提取的联轴器扭转方向固有频率和阻尼比示意图；
- [0043] 图7b为施加扭转角激励后提取的联轴器扭转方向固有频率和阻尼比示意图；
- [0044] 图8为联轴器动力学模型示意图；
- [0045] 图中标记说明：1.1、风轮侧假轴，1.2、角接触球轴承，1.3、固定工装/第二固定工装，3、振动加速度传感器，4、测速编码器，6.1/6.2、测试工装。

具体实施方式

[0046] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0047] 实施例

[0048] 如图1a~1b、2a~2b所示，一种联轴器扭转刚度与阻尼测试装置，包括用于水平固定安装联轴器的水平式台架或者用于竖直固定安装联轴器的竖直式台架，测试装置还包括用于施加瞬态激励给联轴器的激励源，联轴器的刹车盘外缘安装有用于测量联轴器切向振动加速度的振动加速度传感器3，或者在台架上安装有用于测量联轴器角速度的测速编码器4（测速编码器4可采用激光编码器或磁电编码器），振动加速度传感器或测速编码器连接至处理单元，处理单元用于提取联轴器扭转方向固有频率以及阻尼比，并计算联轴器扭转刚度。

[0049] 如图1a所示，联轴器为竖直安装状态时，联轴器的发电机侧假轴固定于地面，联轴器的风轮侧假轴1.1通过角接触球轴承1.2与竖直式台架的固定工装1.3相连接，保持扭转方向自由状态，联轴器安装应保证满足联轴器对中补偿范围要求。固定工装1.3与地面之间的距离可调节，从而适应不同型号、尺寸、额定扭矩的联轴器测试。相应的，如图2b所示，测速编码器4安装于竖直式台架的固定工装1.3上。

[0050] 如图1b所示，联轴器为水平安装状态时，联轴器的发电机侧假轴固定于水平式台架的第一固定工装，联轴器的风轮侧假轴1.1通过角接触球轴承1.2与水平式台架的第二固定工装1.3相连接，保持扭转方向自由状态，通常要求不低于10倍联轴器扭转刚度且不低于10倍联轴器转动惯量，联轴器安装应保证满足联轴器对中补偿范围要求。第一固定工装与第二固定工装1.3之间的距离可调节，第一固定工装、第二固定工装1.3与地面之间的距离可调节，从而适应不同型号、尺寸、额定扭矩的联轴器测试。相应的，测速编码器4安装于水平式台架的第二固定工装1.3上。

[0051] 在实际测试时，激励源可采用切向激励源或扭转角激励源，切向激励源具体是通过力锤、橡胶锤或尼龙锤对联轴器施加切向激励（如图3所示）；扭转角激励源具体是通过扭矩扳手对联轴器风轮侧假轴施加扭矩（如图4所示）。

[0052] 当激励源为扭转角激励源时，联轴器风轮侧假轴位置安装有用于方便施加扭矩的测试工装6.1/6.2（采用脆性材料如铸铁、淬火高碳钢等制成），如图5a和5b所示，测试工装的上部设置有用于卡合连接扭矩扳手的转接段、中部设置有颈缩段，具体是在联轴器风轮侧假轴1.1上套设安装测试工装6.1/6.2，再通过扭矩扳手施加扭矩直至测试工装6.1/6.2断裂，并测量断裂前后的切向振动加速度或者角速度数据。

[0053] 应用上述测试装置，实现一种联轴器扭转刚度与阻尼测试方法，如图6所示，包括以下步骤：

[0054] S1、将待测试联轴器安装于水平式台架或竖直式台架,其中,联轴器的刹车盘外缘安装有振动加速度传感器,或者在台架上安装有测速编码器;

[0055] S2、对联轴器施加瞬态激励,测量得到相应的切向振动加速度或者角速度数据,并传输给处理单元进行数据分析,其中,瞬态激励具体为切向激励或扭转角激励;

[0056] S3、若瞬态激励为通过力锤施加的切向激励,则处理单元采用H1/H2/Hv估计计算激励点到测量点的频响函数、基于频响函数提取扭转方向固有频率,并基于半功率法计算阻尼比(如图7a所示);

[0057] 若瞬态激励为通过扭矩扳手施加的扭转角激励,则处理单元针对时域信号,基于相位辨识扭转方向固有频率、并基于自由衰减法计算阻尼比(如图7b所示);

[0058] 若瞬态激励为通过橡胶锤或尼龙锤施加的切向激励,则处理单元计算各响应测点间的互相关函数、基于相位辨识扭转方向固有频率,并基于半功率法计算阻尼比(如图7a所示);

[0059] S4、根据扭转方向固有频率,结合预设的待测试联轴器动力学模型(如图8所示),计算得到待测试联轴器的扭转刚度,具体为:

$$[0060] \quad K_a = (2 * \pi * f_0)^2 * J_1$$

[0061] 其中, K_a 为联轴器的扭转刚度, f_0 为联轴器扭转方向固有频率, J_1 为联轴器含刹车盘风轮侧的转动惯量、中间体转动惯量、膜片转动惯量和上部假轴转动惯量之和。

[0062] 本技术方案是通过动力学方式来解决刚度测量这一静力学问题,其测量原理与传统方案具有本质不同。本技术方案无需进行静态扭矩加载和静态扭转角测试,因此台架中无需考虑加载机构以及联轴器扭转角测量机构的设计,联轴器可以采用一端固定、一端自由的方式安装。本技术方案无需进行静态扭转角的测量,仅需要获取扭转方向固有频率,因此传感器选型、安装均与传统方法不同,仅需保证能够获取扭转方向的频域和时域响应即可。本技术方案采用瞬态激励方法而非静扭矩对联轴器进行加载,采用基于时域和频域的模态频率与阻尼辨识方法来提取联轴器扭转方向固有频率和阻尼比,其中振型方向的确定主要依靠相位信息。本技术方案通过识别和建立联轴器动力学模型,并基于模型推导扭转刚度和测试所得联轴器扭转固有频率的关系,然后计算获取联轴器扭转刚度。

[0063] 在实际应用中,本技术方案的台架可以采用水平A和竖直B两种安装设计方式,测试时则可采用力锤激励C、扭转角激励D、橡皮锤/尼龙锤激励E三种方式之一,此外,测量传感器则可采用振动加速度传感器F、激光编码器G或磁电编码器H,由此可以通过以下任意组合开展相应的联轴器性能测量:

[0064] 1、A+C+F;

[0065] 2、A+C+G;

[0066] 3、A+C+H;

[0067] 4、A+D+F;

[0068] 5、A+D+G;

[0069] 6、A+D+H;

[0070] 7、A+E+F;

[0071] 8、A+E+G;

[0072] 9、A+E+H;

[0073] 10、B+C+F;

[0074] 11、B+C+G;

[0075] 12、B+C+H;

[0076] 13、B+D+F;

[0077] 14、B+D+G;

[0078] 15、B+D+H;

[0079] 16、B+E+F;

[0080] 17、B+E+G;

[0081] 18、B+E+H。

[0082] 综上所述可知,本技术方案的测试精度高:经多款联轴器测试验证,与KTR、Regal等业内领先供应商联轴器设计扭转刚度和测试结果差异在3%以内;

[0083] 测试周期短:由于无需精确的加载扭矩和扭转角幅值,仅需获取固有频率值,因此台架无需安装和调试加载机构、测试系统时间,测试用时也短于静态扭矩加载时长。经数据统计,台架安装、测试、后处理与拆解,单台份共需约10h人工时,KTR相同测试单台份测试周期2.5个月;

[0084] 台架适用性强:台架无需考虑联轴器测试扭矩范围要求,加载机构无需根据测试联轴器的增大而提高加载能力;台架设计时已考虑轴向和径向尺寸调节范围,采取可调可拓展结构设计,可适用于不同型号、尺寸、额定扭矩的联轴器测试;

[0085] 无需机械/电气加载动力源:与传统方案不同,本技术方案无需扭矩加载,无需液压缸/电机/……等加载机构,因此不存在长期测试成本;

[0086] 测试成本低:台架自身要求低、无需加载机构、无需高精度扭转角测量、安装调试速度快,因此成本远低于传统台架和测试方案;

[0087] 测试范围广:除扭转刚度外,还能够测量获取联轴器阻尼比,可用于后续传动链动力学特性仿真分析工作。

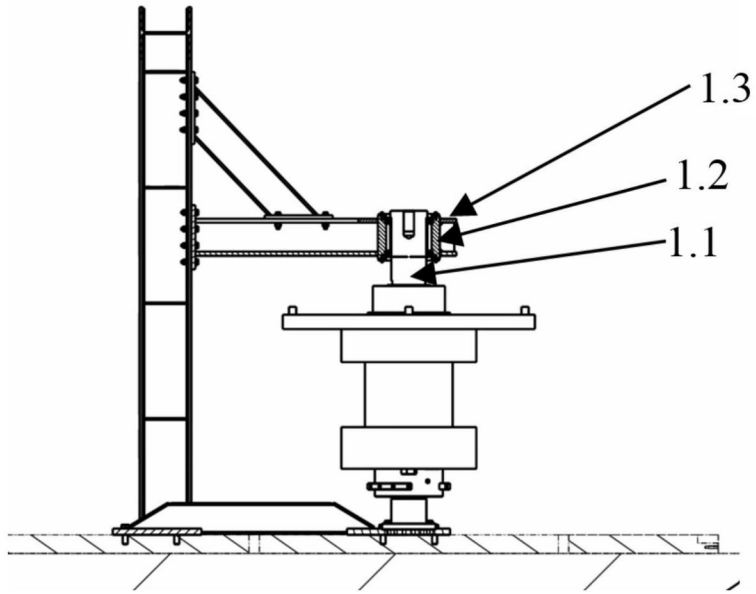


图1a

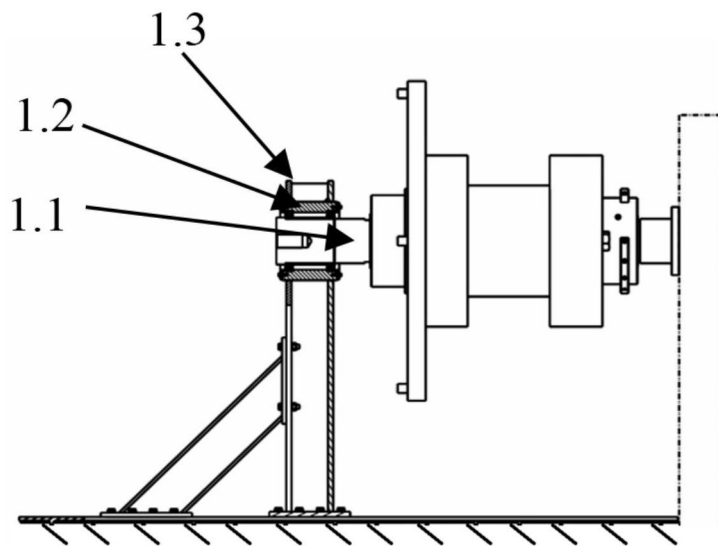


图1b

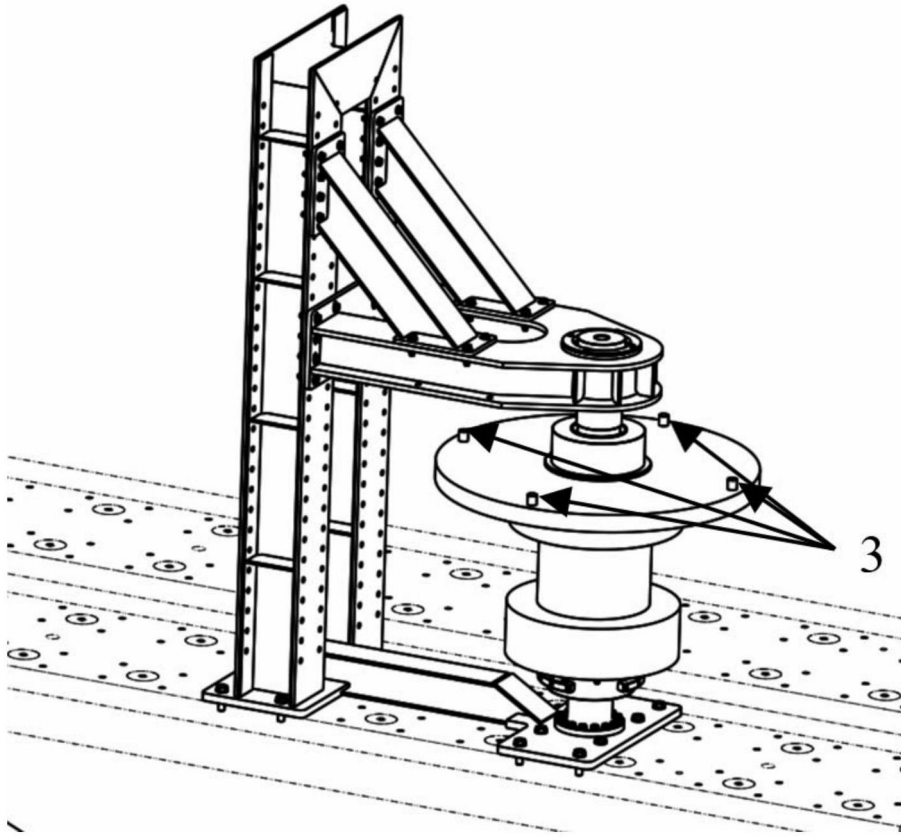


图2a

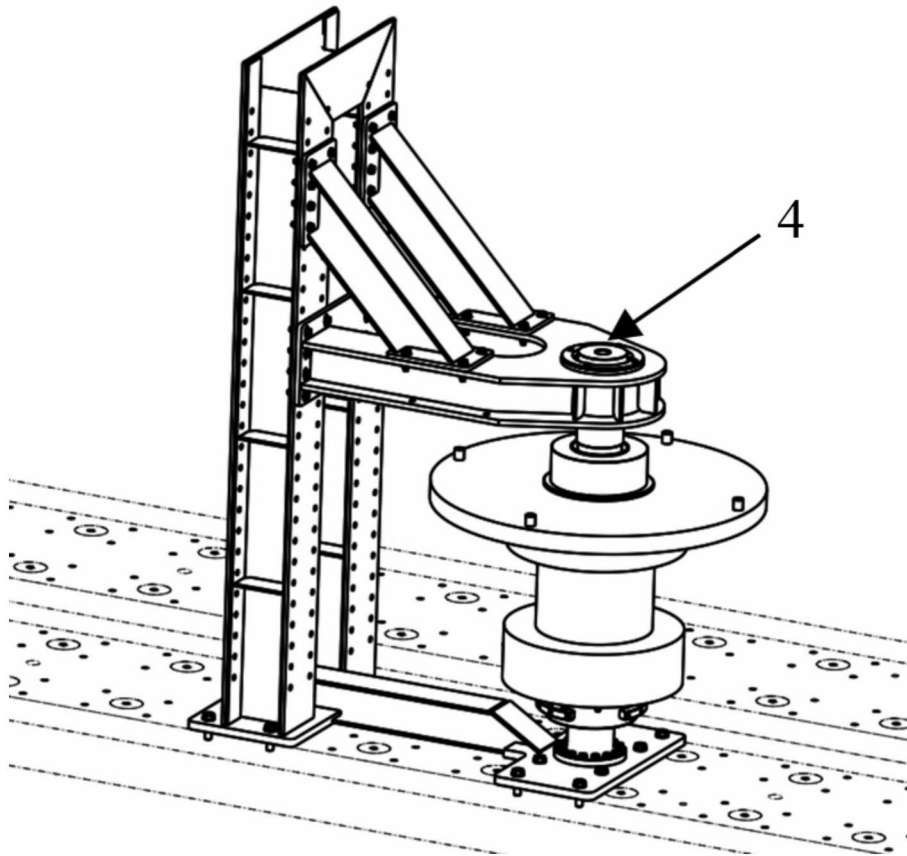


图2b

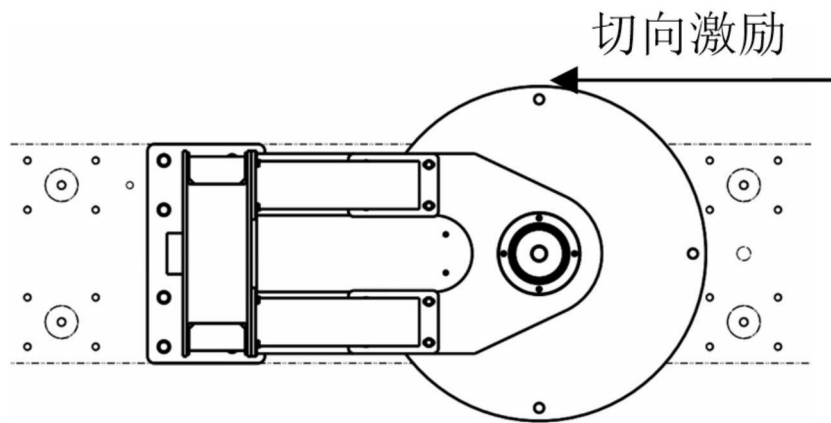


图3

扭转角激励

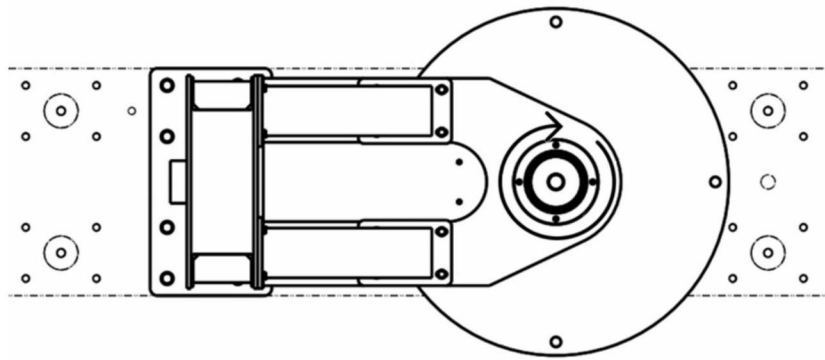


图4

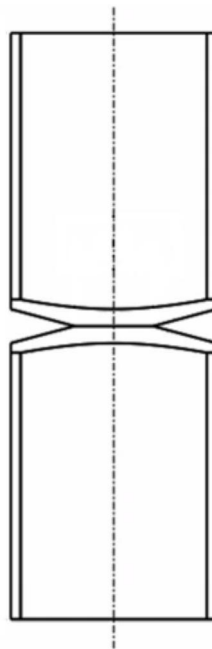


图5a

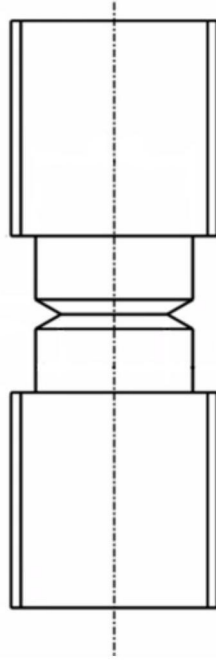


图5b

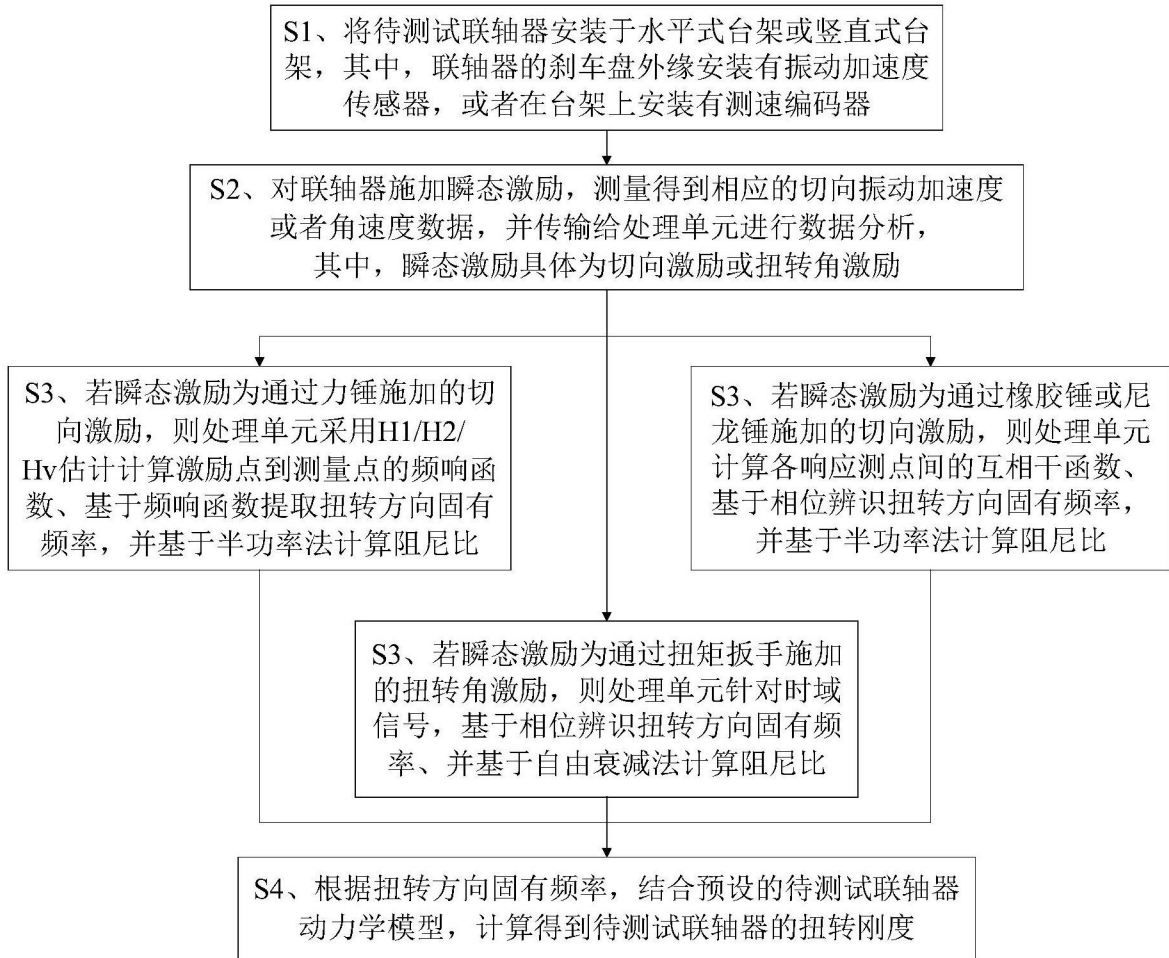


图6

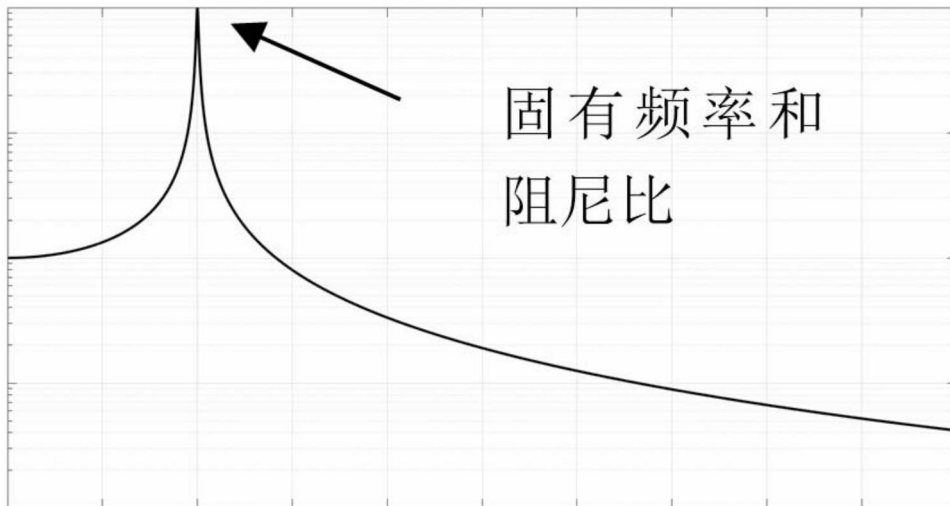


图7a

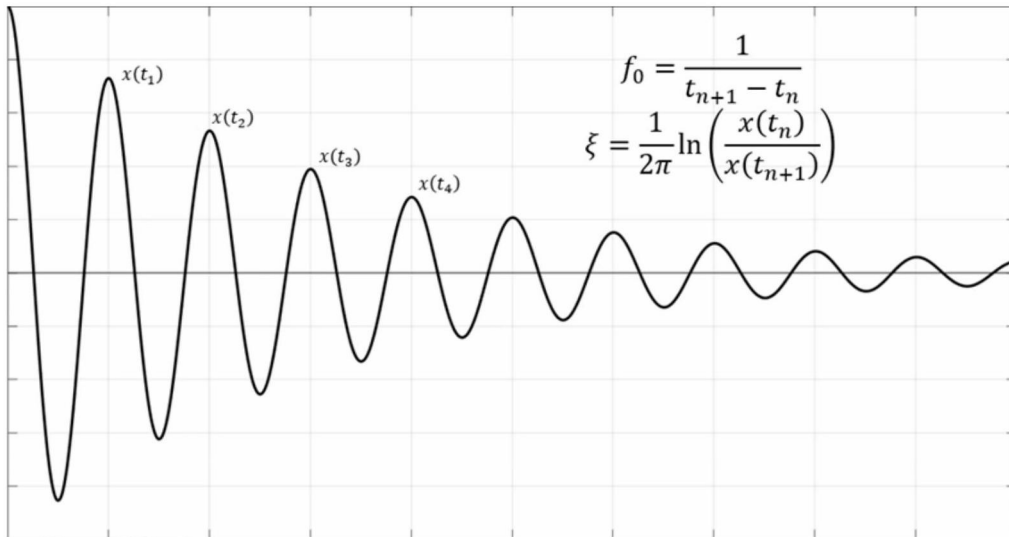


图7b

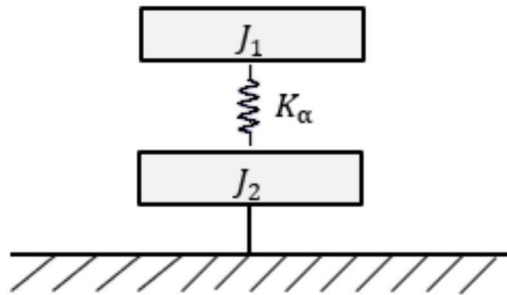


图8