## (19) 中华人民共和国国家知识产权局



# (12) 发明专利



(10) 授权公告号 CN 112729760 B (45) 授权公告日 2021.10.19

- (21) 申请号 202110074011.4
- (22)申请日 2021.01.20
- (65) 同一申请的已公布的文献号 申请公布号 CN 112729760 A
- (43) 申请公布日 2021.04.30
- (73) 专利权人 中国科学院力学研究所 地址 100190 北京市海淀区北四环西路15 묵
- (72)发明人 杨乾锁
- (74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理 事务所(普通合伙) 11390

代理人 胡剑辉

(51) Int.CI.

GO1M 9/06 (2006.01)

(54) 发明名称

一种气动升力和气动阻力系数联合测量方 法

(57) 摘要

112729760

S

本发明公开了一种气动升力和气动阻力系 数联合测量方法,包括如下步骤:步骤100:建立 用于动模型实验的模型装置;步骤200:在模型装 置上设置数据采集模块,并称量模型装置与数据 采集模块形成的整体的实验模型的重量,重量记 为m\_;步骤300:将实验模型在动模型实验装置上 完成不同速度区域的实验,并得到多次有效的实 验值;步骤400:基于数据采集模块获得的实验模 型的多个加速度值和垂向力值,并经过数据处理 和计算依次获得实验模型在动模型实验过程中 的气动升力系数和气动阻力系数。本发明中进行 m 的气动模型实验不仅能够实现气动升力和气动 阻力系数的联合测量,还可以完成许多风洞试验 无法完成的实验。



## (56) 对比文件

- CN 103471803 A,2013.12.25 CN 105258906 A,2016.01.20 CN 111649903 A,2020.09.11
- CN 102967474 A,2013.03.13
- US 2017356925 A1,2017.12.14
- 杨国伟 等.高速列车的关键力学问题.《力
- 学进展》.2015,第45卷

审查员 李天润

权利要求书2页 说明书6页 附图1页

1.一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100:建立用于动模型实验的模型装置;

步骤200:在所述模型装置上设置数据采集模块,并称量所述模型装置与所述数据采集 模块形成的整体的实验模型的重量,测得的所述重量记为m<sub>n</sub>;所述数据采集模块用于以第 一时间间隔 Δt<sub>a</sub>依次测量所述实验模型的加速度值,以第二时间间隔 Δt<sub>F</sub>依次测量所述实 验模型的垂向力值;

步骤300:将所述实验模型在动模型实验装置上完成不同速度区域的实验,并得到多次 有效的实验值;

步骤400:基于所述数据采集模块获得的所述实验模型的多个所述加速度值和所述垂向力值,并经过数据处理和计算依次获得所述实验模型在动模型实验过程中的气动升力系数和气动阻力系数;

所述实验模型在所述动模型实验装置内每次实验的运动过程包括加速段、实验段和减 速段,且所述实验模型自零速度起依次经过加速段、实验段和减速段直至停止;其中,

所述加速度值包括所述加速段、所述实验段和所述减速段的实验值,依次记为 $a_i$ (i=1, K), $a_i$ (i=K+1,M)和 $a_i$ (i=M+1,N);

所述垂向力值为所述实验段的实验值,记为 $F_i(i=1,M')$ ;

其中,K表示为实验模型达到加速段的终点,M表示实验模型达到实验段的终点,并表示 实验模型开始减速,N表示实验模型在减速段运行后的终点静止状态;

所述气动阻力系数的计算方法包括:

步骤421、计算所述实验模型在实验段的平均速度值 $V_{T,K}$ 和平均加速度值 $\alpha_{T,K}$ ;其中,K= 1 $\sim$ N<sub>0</sub>且N<sub>0</sub> $\geq$ 3为实验次数;

步骤422、利用空气动力学中的戴维斯方程Ma=A+BV+CV<sup>2</sup>;

得到重量为m\_的所述实验模型的戴维斯方程

 $m_m a_{T,K} = A + BV_{T,K} + CV_{T,K}^2;$ 

并利用所述实验模型的戴维斯方程和(V<sub>T,K</sub>,a<sub>T,K</sub>)的最小均方误差的数值拟合,可以分别获得常数值A,B和C;

步骤423、利用A=m<sub>m</sub>gu和C<sub>D</sub>=C+ $\mu$ C<sub>L</sub>,可以计算得到动摩擦系数 $\mu$ 和气动阻力系数C<sub>D</sub>;

其中,M为实验模型或实际物体的质量,a是实验模型或实际物体的加速度,V是实验模型或实际物体的直线运动速度;

A为实验模型或实际物体的动摩擦力,B为实验模型或实际物体的与速度成正比的力的 系数,C为气动阻力系数,气动阻力与速度的平方成正比。

2. 根据权利要求1所述的一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法,其特征在于,

在所述加速段时,所述实验模型的速度单调上升;

在所述实验段时,所述实验模型的速度缓慢均匀下降;

在所述减速段时,所述实验模型的速度急剧下降。

3.根据权利要求1所述的一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法,其特征在于,所述气动升力系数的计算方法包括如下步骤:

步骤411、依据所述第一时间间隔和获取的所有所述加速度值计算所述实验模型在实

验段的速度值,记为 $V_i$ (i=K+1,M);

步骤412、基于气动升力的关系式: $F_L = C_L V^2$ ,得到气动升力系数 $C_L = F_L / V^2$ ;

依据在空气动力学中,气动升力和实验模型速度的平方成正比,得到气动升力系数  $C_L = \frac{F_L}{v^2} = \int_{t_0}^{t_t} F_L dt / \int_{t_0}^{t_t} V^2 dt;$ 

转换到动模型实验中,气动升力系数 $C_L = \frac{F_i + mg}{V_i^2} = \frac{\sum_j (F_i + mg) \Delta t_F}{\sum_j V_i^2 \Delta t_a};$ 

其中,F<sub>L</sub>表示实验模型在动模型实验过程中的气动升力,V是模型的速度;F<sub>i</sub>为实验测量 得到的气动升力值;j取实验模型在实验段的全部或一个时间范围内的值;

当 $\Delta t_{F}$ 和 $\Delta t_{a}$ 取值时间同频率且同步时,则 $\Delta t_{F} = \Delta t_{a}$ ; 上述实验测试中C<sub>L</sub>的离散数值表达式简化为: $C_{L} = \frac{F_{i}+mg}{V_{i}^{2}} = \frac{\sum_{j}F_{i}+mg}{\sum_{i}V_{i}^{2}}$ ,

得到所述气动升力系数:  $C_L = \frac{\sum_{i=1}^{M'} (F_i + m_m g) \Delta t_F}{\sum_{i=K+1}^{M} V_i^2 \Delta t_a};$ 

步骤413、依据多次实验得到的多个气动升力系数,计算平均值以得到目标气动升力系数C<sub>L</sub>。

4.根据权利要求3所述的一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法,其特征在于,所 述步骤411中数据处理的方法包括:

依据所述第一时间间隔和获取的所有所述加速度值制作所述实验模型的速度-时间演 化曲线。

### 一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法

#### 技术领域

[0001] 本发明涉及气动模型实验技术领域,具体涉及一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法。

#### 背景技术

[0002] 在一般的车辆或飞行器的气动参数测试中,由于这些装置的缩比模型在长度和宽度上基本相当,可以使用风洞进行相关气动实验测试,而高速列车缩比模型的长度远比其横向尺寸大得多,不宜采用风洞进行相关气动实验,但动模型能够自然和真实地模拟轨道上的列车运动。此外,对于列车穿越隧道和交会等方面相关的实验模拟,几乎无法采用风洞实验来完成,而动模型实验很容易模拟这些过程;并且,列车穿越长隧道过程中的气动阻力和升力能够用上述方法进行实验测试,而风洞则难以开展这方面的测试工作。

[0003] 戴维斯方程用来描述具有固定外形物体在做直线运用过程中的力学参数和运动参数的关系,例如,铁轨上运动的列车,空中飞行的固定翼飞机等。戴维斯方程的正式表达式为:Ma=A+BV+C<sub>D</sub>V<sup>2</sup>,这里M是模型或实际物体的质量,a是模型或实际物体的加速度,V是模型或实际物体的直线运动速度。A是通常为模型或实际物体的动摩擦力,B是模型或实际物体的与速度成正比的力的系数,C通常是气动阻力系数,气动阻力与速度的平方成正比,B通常很小。

[0004] 目前,妨碍动模型实验测试替代风洞实验测试的主要问题是气动阻力和气动升力的测量。在动模型实验中,当模型的气动升力不能被忽略时,在测试过程中则必须考虑模型气动升力对轨道面压力的影响。由于在轨道上运动模型的气动阻力遵循戴维斯方程,且气动升力也与速度的平方成正比 $F_L = C_L V^2 (\mu E 动摩擦系数)$ 。而气动升力的出现将改变模型对轨道面的压力,从而导致模型动摩擦阻力的变化,即影响戴维斯方程中的A项值;模型对轨道面压力的减小会导致动摩擦力的减小,这种减小在戴维斯方程中的表现为: $F_D = (mg - C_L V^2) \mu + BV + C_D V^2 = mg \mu + BV + (C_D - C_L \mu) V^2$ ,这是实际测试得到的结果所遵循的数学描述。

[0005] 因此基于戴维斯方程测试的气动阻力系数需要考虑气动升力对轨道面的压力而导致动摩擦力的变化转化为对气动阻力系数的影响,但目前在国内外缺乏在动模型实验中同时测量气动升力和气动阻力及其系数的方法和技术。

#### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法,以解决现有 技术中缺乏同时测量气动升力和气动阻力的方法的技术问题。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明具体提供下述技术方案:

[0008] 一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法,包括如下步骤:

[0009] 步骤100:建立用于动模型实验的模型装置;

[0010] 步骤200:在所述模型装置上设置数据采集模块,并称量所述模型装置与所述数据 采集模块形成的整体的实验模型的重量,测得的所述重量记为m\_;所述数据采集模块用于

以第一时间间隔Δt<sub>a</sub>依次测量所述实验模型的加速度值,以第二时间间隔Δt<sub>F</sub>依次测量所述实验模型的垂向力值;

[0011] 步骤300:将所述实验模型在所述动模型实验装置上完成不同速度区域的实验,并 得到多次有效的实验值;

[0012] 步骤400:基于所述数据采集模块获得的所述实验模型的多个所述加速度值和所述垂向力值,并经过数据处理和计算依次获得所述实验模型在动模型实验过程中的气动升力系数和气动阻力系数。

[0013] 作为本发明的一种优选方案,所述动模型实验装置包括加速段、实验段和减速段, 所述实验模型自零速度起依次经过加速段、实验段和减速段直至停止;其中,

[0014] 所述加速度值包括所述加速段、所述实验段和所述减速段的实验值,依次记为 $a_i$ (i=1,K), $a_i$ (i=K+1,M)和 $a_i$ (i=M+1,N);

[0015] 所述垂向力值为所述实验段的实验值,记为F<sub>i</sub>(i=1,M');

[0016] 其中,K表示为实验模型达到加速段的终点,M表示实验模型达到试验段的终点,并 表示试验模型开始减速,N表示试验模型在减速段运行后的终点静止状态。

[0017] 作为本发明的一种优选方案,

[0018] 在所述加速段时,所述试验模型的速度单调上升;

[0019] 在所述实验段时,所述试验模型的速度缓慢均匀下降;

[0020] 在所述减速段时,所述试验模型的速度急剧下降。

[0021] 作为本发明的一种优选方案,所述气动升力系数的计算方法包括如下步骤:

[0022] 步骤411、依据所述第一时间间隔和获取的所有所述加速度值计算所述实验模型 在实验段的速度值,记为V<sub>i</sub>(i=K+1,M);

[0023] 步骤412、基于气动升力的关系式: $F_L = C_L V^2$ ,得到气动升力系数 $C_L = F_I / V^2$ ;

[0024] 依据在空气动力学中,气动升力和实验模型速度的平方成正比,得到气动升力系 数 $C_L = \frac{F_L}{v^2} = \int_{t_0}^{t_t} F_L dt / \int_{t_0}^{t_t} V^2 dt;$ 

[0025] 转换到动模型试验中,气动升力系数 $C_L = \frac{F_i + mg}{V_i^2} = \frac{\sum_j (F_i + mg)\Delta t_F}{\sum_j V_i^2 \Delta t_a};$ 

[0026] 其中,F<sub>L</sub>表示实验模型在动模型试验过程中的气动升力,V是模型的速度;F<sub>i</sub>为实验测量得到的气动升力值; j取实验模型在实验段的全部或一个时间范围内的值;

[0027] 当 $\Delta t_{F}$ 和 $\Delta t_{a}$ 取值时间同频率且同步时,则 $\Delta t_{F}$ = $\Delta t_{a}$ ;

[0028] 上述实验测试中C<sub>L</sub>的离散数值表达式简化为:  $C_L = \frac{F_i + mg}{V_i^2} = \frac{\sum_j F_i + mg}{\sum_j V_i^2}$ ,

[0029] 得到所述气动升力系数: $C_L = \frac{\sum_{i=1}^{M'} (F_i + m_m g) \Delta t_F}{\sum_{i=K+1}^{M} V_i^2 \Delta t_a};$ 

[0030] 步骤413、依据多次实验得到的多个气动升力系数,计算平均值以得到目标气动升力系数C<sub>L</sub>。

[0031] 作为本发明的一种优选方案,所述气动阻力系数的计算方法包括:

[0032] 步骤421、计算所述实验模型在实验段的平均速度值V<sub>T,K</sub>和平均加速度值a<sub>T,K</sub>;其中,K=1~N<sub>0</sub>且N<sub>0</sub>之3为实验次数;

[0033] 步骤422、利用空气动力学中的戴维斯方程Ma=A+BV+CV<sup>2</sup>;

[0034] 得到重量为m\_的所述实验模型的戴维斯方程

 $[0035] \quad m_m a_{T,K} = A + BV_{T,K} + CV_{T,K}^2;$ 

[0036] 并利用所述实验模型的戴维斯方程和(V<sub>T,K</sub>,a<sub>T,K</sub>)的最小均方误差的数值拟合,可以分别获得常数值A,B和C;

[0037] 步骤423、利用A= $m_{m}g\mu$ 和C<sub>D</sub>=C+ $\mu$ C<sub>L</sub>,可以计算得到动摩擦系数 $\mu$ 和气动阻力系数 C<sub>D</sub>;

[0038] 其中,M为实验模型或实际物体的质量,a是实验模型或实际物体的加速度,V是实验模型或实际物体的直线运动速度;

[0039] A为实验模型或实际物体的动摩擦力,B为实验模型或实际物体的与速度成正比的力的系数,C为气动阻力系数,气动阻力与速度的平方成正比。

[0040] 作为本发明的一种优选方案,所述步骤411中数据处理的方法包括:

[0041] 依据所述第一时间间隔和获取的所有所述加速度值制作所述实验模型的速度-时间演化曲线。

[0042] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0043] 本发明通过采用安装有数据采集模块的气模型实验装置进行多次气动模型实验, 并利用加速度与速度时间的关系、升力与速度关系及戴维斯方程联合对采集到的动模型运 动过程中的加速度和垂向力测量数据进行数据处理,实现气动升力和气动阻力系数的联合 和同时测量。相对于风洞试验,本发明中采用的动模型进行气动模型实验不仅能够实现气 动升力和气动阻力系数的联合和同时测量,而且所采用的动模型研究方法可以完成更多的 运行状况,包括完成许多风洞试验无法完成的实验,例如模拟轨道上高速列车的运动、列车 穿越隧道和交会等方面相关的实验模拟,具有更广泛的速度测试范围,而且实验时间短,费 用低,为利用动模型替代风动测试提供了实验和测试基础。

#### 附图说明

[0044] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0045] 图1为本发明实施例提供的测量方法流程图;

#### 具体实施方式

[0046] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0047] 目前,妨碍动模型实验测试替代风洞实验测试的主要问题是气动阻力和气动升力 的测量,但目前国内外缺乏气动升力和气动阻力系数的联合和同时测量的方法和技术,为 此,本发明提供了一种气动升力和气动阻力系数联合测量方法,如图1所示,包括如下步骤:

[0048] 步骤100:建立用于动模型实验的模型装置。

[0049] 步骤200:在模型装置上设置数据采集模块,并称量所述模型装置与所述数据采集 模块形成的整体的实验模型的重量,测得的所述重量记为m<sub>m</sub>,应当注意的是,在实验中,m<sub>m</sub>的 值不能太大,太大导致实验模型在实验段的减速度绝对值变小;所述数据采集模块用于以 第一时间间隔 Δ t<sub>a</sub>依次测量所述实验模型的加速度值,以第二时间间隔 Δ t<sub>F</sub>依次测量所述 实验模型的垂向力值。安装在实验模型上的测试仪器不会改变模型的气动外形,且由于本 动模型实验适用在高速运动的交通工具和武器系统,特别像高速列车、赛车、飞机、亚声速 导弹等高速运行的装置中,在模型中直接安装传感器更加便捷方便,能够实时测量并传输 数据,测量结果更准确。

[0050] 步骤300:将实验模型在动模型实验装置上完成不同速度区域的实验,并得到多次 有效的实验值。原则上有效实验次数越多,气动升力和气动阻力系数越准确,因此,在进行 实验时,进行多次试验取关键数据平均值。

[0051] 步骤400:基于数据采集模块获得的实验模型的多个加速度值和垂向力值,并经过数据处理和计算依次获得实验模型在动模型实验过程中的气动升力系数和气动阻力系数。 [0052] 根据动模型实验得到的加速度数值曲线,一次完整的实验中模型实验装置的运动 过程可以明显区分为加速度段、实验段和减速段,动模型实验装置包括加速段、实验段和减 速段,实验模型自零速度起依次经过加速段、实验段和减速段直至停止,即每次实验的初速 度数据和最后速度数据基本等于零;其中,

[0053] 在一次完整实验过程中,加速度值包括加速段、实验段和减速段的实验值,依次记为a,(i=1,K),a,(i=K+1,M)和a,(i=M+1,N);

[0054] 垂向力值为实验段的实验值,记为F,(i=1,M')。

[0055] 这里K对应模型加速度过程的终点,也对应模型进入实验段;M对应模型到达实验段的终点,也对应模型开始减速;N对应模型在减速段减速至静止状态。

[0056] 基于加速度数据积分得到速度随时间的演化曲线,这里积分过程遵循:V<sub>i</sub>=V<sub>i-1</sub>+a<sub>i</sub> Δt<sub>a</sub>,因此速度根据加速度的特征也有能够明显区分的三个过程:加速阶段(速度单调上 升)、实验段(速度以较小的减速度均匀下降)和减速段(速度急剧下降)。实验段的平均速度 可以为实验段的最高速度和最低速度之平均。

[0057] 气动升力系数的计算方法包括如下步骤:

[0058] 步骤411、依据第一时间间隔和获取的所有加速度值计算实验模型在实验段的速度值,记为V<sub>i</sub>(i=K+1,M);

[0059] 步骤412、根据得到的模型装置在实验段的垂向力测试数据 $F_i$ (i=1,M'),垂向力向上为正,在去除重力影响后,得到在实验段纯升力随时间演化的数据,升力数据结合速度数据,根据气动升力和模型速度之间的关系 $F_L = C_L V^2$ ,得到气动升力系数 $C_L = F_L / V^2$ 。

[0060] 依据在空气动力学中,气动升力和模型速度的平方成正比,得到气动升力系数  $C_L = \frac{F_L}{V^2} = \int_{t_0}^{t_t} F_L dt / \int_{t_0}^{t_t} V^2 dt;$ 

[0061] 转换到动模型试验中,气动升力系数 $C_L = \frac{F_i + mg}{V_i^2} = \frac{\sum_j (F_i + mg)\Delta t_F}{\sum_j V_i^2 \Delta t_a}$ ,

[0062] 其中,F<sub>1</sub>表示实验模型在动模型实验过程中的气动升力,V是模型的速度,C<sub>1</sub>是气动

升力系数, $F_i$ 为实验测量得到的气动升力值,j取实验模型在实验段的全部或一个时间范围内的值; $\Delta t_p \pi \Delta t_a$ 分别为测力传感器和加速度传感器的数据采集时间步长,当 $\Delta t_p \pi \Delta t_a$ 取值时间同频率且同步时,则 $\Delta t_p = \Delta t_a$ ;

[0063] 上述实验测试中
$$C_L$$
的离散数值表达式简化为: $C_L = \frac{F_i + mg}{V_i^2} = \frac{\Sigma_j F_i + mg}{\Sigma_j V_i^2}$ ,

[0064] 得到气动升力系数: 
$$C_L = \frac{\sum_{i=1}^{M'} (F_i + m_m g) \Delta t_F}{\sum_{i=K+1}^{M} V_i^2 \Delta t_a}$$

[0065] 步骤413、一次实验得到一个C<sub>L</sub>,若干次有效实验对应若干个C<sub>L</sub>,依据多次实验得到的多个气动升力系数,计算平均值以得到目标气动升力系数C<sub>L</sub>。

[0066] 气动阻力系数的计算方法包括:

[0067] 步骤421、根据采集的加速度数据,利用 $V_1 = a_1 \Delta t_a n V_{i+1} = V_i + a_i \Delta t_a$ ,得到模型装置在实验段的速度数据为: $V_i$ (i = K+1, M),及模型实验装置速度随时间的演化曲线,该演化曲线基本为一条速度随时间均匀下降的斜直线,利用该斜直线,得到每次实验中模型装置在实验段的平均速度值 $V_{T,K}$ 和平均加速度值 $a_{T,K}$ , $K=1 \sim N_0 n N_0 \ge 3$ 为实验次数。

[0068] 在具体实施时,需要注意,每次实验的速度数值要有一定的离散度,不能太接近。 另外,模型在实验段的速度不能太小,太小会导致模型由于气动阻力在实验段的减速度绝 对值变小,不利于求解。为了求解方便,实验段不能太长,若实验段太长的话,实验段的速度 演化变为曲线,不利于模型速度和加速度的取值,拟合误差较大,通常以实验段的速度曲线 为斜直线最好。

[0069] 在空气动力学中,戴维斯方程用来描述具有固定外形物体在做直线运用过程中的 力学参数和运动参数的关系,例如铁轨上运动的列车,空中飞行的固定翼飞机等。戴维斯方 程的正式表达式为:Ma=A+BV+C<sub>p</sub>V<sup>2</sup>,

[0070] 这里M是模型或实际物体的质量,a是模型或实际物体的加速度,V是模型或实际物体的直线运动速度。A是通常为模型或实际物体的动摩擦力,B是模型或实际物体的与速度成正比的力的系数,C通常是气动阻力系数,气动阻力与速度的平方成正比,B通常很小。

[0071] 对于亚声速范围内的、具有固定气动外形的飞行器或高速列车,在风洞和动模型 实验中,只要得到模型的气动升力和气动阻力系数,将其固定外形,按等比例放大,其气动 升力和气动阻力值可以精确推算:比例系数等于尺寸放大系数的平方,即等于截面积的放 大系数:如果模型的缩比为1:10,模型测量得到的阻力系数为X的话,实际物体的气动阻力 系数变为100X。

[0072] 对于高速列车或固定翼飞行器来讲,缩比尺寸不能小于1:10,即实验模型的尺寸 应该不能小于实际尺寸的1/10。这样,可以保证实验数据准确外推至实际物体对应的气动 参数值。

[0073] 步骤422、利用空气动力学中的戴维斯方程:

[0074] F<sub>D</sub>=ma=A+BV+C<sub>D</sub>V<sup>2</sup>=mg\mu+BV+C<sub>D</sub>V<sup>2</sup>

[0075] 得到重量为m\_的所述实验模型的戴维斯方程

 $[0076] \quad m_m a_{T,K} = A + BV_{T,K} + CV_{T,K}^2;$ 

[0077] 并利用实验模型的戴维斯方程和平均速度值和平均加速度值(V<sub>T.K</sub>, a<sub>T.K</sub>)的最小均

方误差的数值拟合,可以分别获得常数值A,B和C:

[0078] 其中,A,B和C的求解步骤如下:

[0079] 首先,根据模型速度曲线,得到多次模型在实验段的平均加速度a,和平均速度V,,

其次,利用最小均方差求得A,B和C, [0080]

 $\mathcal{Q} = \sum_i (A + BV_i + CV_i^2 - Ma_i)^2, i 表示试验次数;$ [0081]

根据A=m\_gµ和C<sub>p</sub>=C+µC<sub>1</sub>,和气动阻力系数C<sub>p</sub>。 [0082]

最小均方误差要求, $\partial O / \partial A = \partial O / \partial B = \partial O / \partial C = 0$ , [0083]

[0084] 可以的到:

$$[0085] \qquad \sum_{i} (A + BV_i + CV_i^2 - Ma_i) = 0$$

[0086]

086] 
$$\sum_{i} (A + BV_{i} + CV_{i}^{2} - Ma_{i}) V_{i} = 0$$
  
087] 
$$\sum_{i} (A + BV_{i} + CV_{i}^{2} - Ma_{i}) V_{i}^{2} = 0$$

[0088] 其中,M为实验模型或实际物体的质量,a是实验模型或实际物体的加速度,V是实 验模型或实际物体的直线运动速度:

[0089] A为实验模型或实际物体的动摩擦力,B为实验模型或实际物体的与速度成正比的 力的系数,C为气动阻力系数,气动阻力与速度的平方成正比。

[0090] 利用上述线性方程组(只有三个未知数A,B和C)即可求得A,B和C。

[0091] 步骤423、利用A=m\_gµ和C\_=C+µC\_,可以计算得到动摩擦系数µ和气动阻力系数 Cn°

[0092] 步骤411中数据处理的方法包括:

依据第一时间间隔和获取的所有加速度值制作实验模型的速度-时间演化曲线。 [0093]

在本发明中,通过对采集到的模型实验装置在实验运动过程中的加速度和垂向力 [0094] 测试数据进行合适的数据处理,实现了气动升力和气动阻力系数的联合和同时测量,为利 用动模型替代风动测试提供了实验和测试基础。可以用于动模型实验中,对模型气动升力 系数和气动阻力系数联合的测试和评估,进而求得在不同速度下实际车辆或飞行器的气动 升力和气动阻力的大小。

相对于风洞试验,本发明中的动模型实验有更广泛的速度测试范围,更大的雷诺 [0095] 数和近似无线的流场空间,而且实验时间短,费用低;并且,动模型实验可以完成更多的运 行状况,如高速列车的明线交会,列车的隧道通过和隧道交会等。

以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围 [0096] 由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各 种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。



图1