

位于剪切层的移测架流固耦合分析

李启良, 杨志刚, 王毅刚, 刘巧云

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 基于数值计算与风洞试验相结合, 研究了移测架的流动特性, 验证了采用数值方法的准确性. 通过分析剪切层内的移测架的受力, 得知: 移测架受到的总气动阻力和总气动升力随着它与喷嘴距离的增加而增加, 其增加速度在距离为 5 m 时达到最大. 利用流固耦合计算方法, 了解到移测架受到的最大气动升力远大于平均气动升力, 约在 3 倍左右. 升阻力不再具有单一频率特性, 而是在 2~60 Hz 内分布着较大的振幅. 如此宽范围的频率容易引起移测架共振, 从而使移测架发生强烈抖动, 导致测点定位的不准确, 影响到汽车风洞试验数据的准确度.

关键词: 移测架; 剪切层; 气动力; 流固耦合

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

Fluid-structure Interaction of Traversing System in Shear Layer

LI Qiliang, YANG Zhigang, WANG Yigang, LIU Qiaoyun

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on a combination of numerical simulation and wind tunnel, flow behavior of the traversing system was investigated and the feasibility of numerical method was proved. The aerodynamic forces acting on the traversing system under different situations were calculated. It is found that with the increasing of the distance between the traversing system and the nozzle, the force increases, and the growth rate peaks at a distance of 5 m. Based on the method of fluid-structure interaction, it is found that the maximum unsteady lift force is larger than the average forces, which is about 3 times. The single frequency characteristic isn't found at the power spectral density of drag and lift forces. High amplitude occurs at the frequency from 2 to 60 Hz, which is easy to lead to resonate the traversing system. It must cause a severe vibration of the system, which results in the inaccuracy of the automotive wind tunnel test data.

Key words: traversing system; shear layer; aerodynamic force; fluid-structure interaction

汽车风洞试验中, 为了实现对试验测点的精确定位, 需要引进一套测量仪器——移测架. 将移测架安装在风洞试验段中, 会对风洞试验段流场造成干扰作用. 笔者曾分析移测架位于均匀流场中, 它在不同离地高度时, 周围流场变化及移测架的受力情况^[1]. 然而, 在非均匀流场, 特别是在剪切层时, 移测架的受力情况如何是值得研究的. 因为在开口回流式风洞中, 喷嘴喷入的气流会在喷嘴上边缘出现明显的射流剪切层^[2]. 该射流剪切层内包含大量涡的信息, 涡与涡之间不断进行能量传递, 形成了复杂的涡旋运动. 如果移测架位于射流剪切层内, 受到剪切层内复杂涡旋运动的影响, 测点的定位就会变得不精确了. 值得指出的是, 相关方面的研究很少. 唯一能作参考的就是方柱绕流的研究^[3-4]. 为此本文通过数值计算方法, 研究了处于剪切层内的移测架与喷嘴相隔不同距离时, 移测架受力情况. 同时也采用流固耦合方法, 分析移测架气动力的频率特性, 以及由此产生的位移和振幅特性. 借此为风洞试验时移测架的正确使用提供更为全面的理论以及数据依据.

1 简化移测架的试验与数值对比

1.1 试验方法

加工 1/2 缩比的简化移测架模型在 1/15 的模型风洞进行平均压力和速度的测量. 模型风洞的喷嘴截面: 宽×高为 433 mm×283 mm, 试验段: 长×宽×高为 1 517 mm×1 185 mm×818 mm. 简化移测架由滑块, 前导轨, 后导轨和连接杆组成, 如图 1

收稿日期: 2013-08-11

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711203); 国家自然科学基金青年科学基金(11302153); 同济大学青年优秀人才培养行动计划(2013KJ037); 上海市科学技术委员会重点实验室计划(11DZ2260400)

第一作者: 李启良(1980—), 男, 工学博士, 副研究员, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: qiliang@tongji.edu.cn

通讯作者: 王毅刚(1964—), 男, 理学博士, 副研究员, 主要研究方向为气动声学. E-mail: w5w5w5wyg@sina.com

所示。

模型安装在试验段,且滑块中心距喷口出口约 300 mm. 试验时,控制喷口来流速度为 15, 25 和 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 将移测架滑块中心距试验段地面的高度设定为 $H_1=170 \text{ mm}$ 和 $H_2=210 \text{ mm}$, 使用静压管和皮托管测量移测架表面静压和尾部速度. 静压和速度测点如图 2 所示。

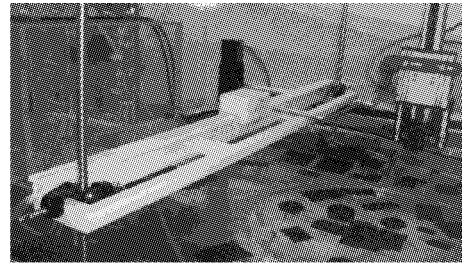


图1 试验模型安装

Fig.1 Installment of test model

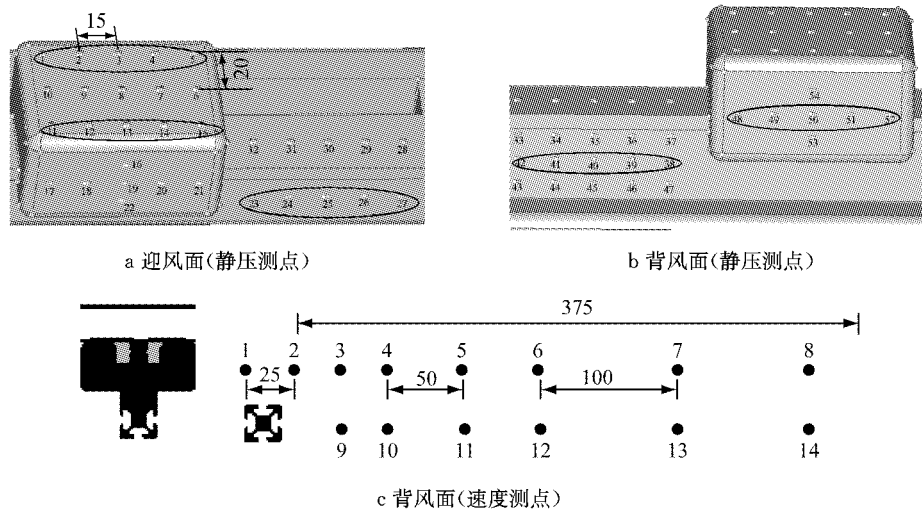


图2 静压和速度测点(单位:mm)

Fig.2 Test point of static pressure and velocity (unit:mm)

1.2 数值方法

建立与风洞试验相一致的简化移测架数值模型. 将该模型放置在由收缩段、试验段、扩散段以及延长段组成的计算域中, 如图 3 所示. 计算域的表面创建三角形网格, 网格间距为 2~20 mm. 为了更好地模拟移测架的边界层, 在移测架表面生成边界层网格. 第一层网格厚度为 1 mm, 沿法线向上增长率均为 1.15, 共计 6 层. 计算域内部空间创建四面体网格, 网格总数为 377 万个。

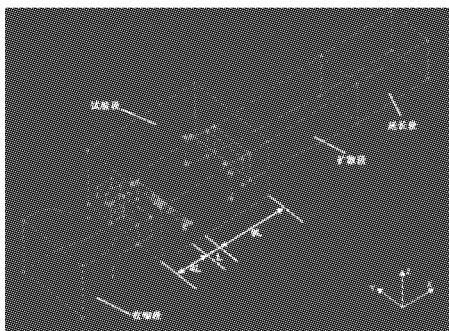


图3 计算域

Fig.3 Computational domain

商用软件 Fluent 用于计算域内湍流场的求解, 选用 Realizable $k-\epsilon$ 两方程湍流模型和非平衡壁面函数^[5]. 压力与速度耦合算法采用 Simple. 首先对湍流场进行一阶迎风格式迭代计算, 以加快收敛速度; 其次再进行二阶迎风格式迭代计算直至残差小于 10^{-4} 以及监控静压系数和速度变化小于 10^{-2} , 认为收敛。

1.3 结果对比

图 4 给出的部分压力和速度(v)测点的试验与数值对比表明, 数值计算结果与试验结果具有一致性, 本文采用的数值计算方法具有可行性. 观察测点的平均静压系数可以看到: 除正对来流的迎风面测点压力系数较大外, 其他各测点的压力系数均处于 -0.4 左右. 测点的压力系数并不随速度增加有明显变化. 至于测点速度在靠近移测架较小, 随着远离移测架, 速度逐渐增加. 3 种风速下, 试验与计算所得结果的发展趋势相同, 它们之间的误差约为 5%, 在允许的误差范围之内。

移测架高度变化并不改变压力系数和速度的变化规律, 并不改变数值与试验结果相一致的趋势. 为此仅对高度为 170 mm 进行分析。

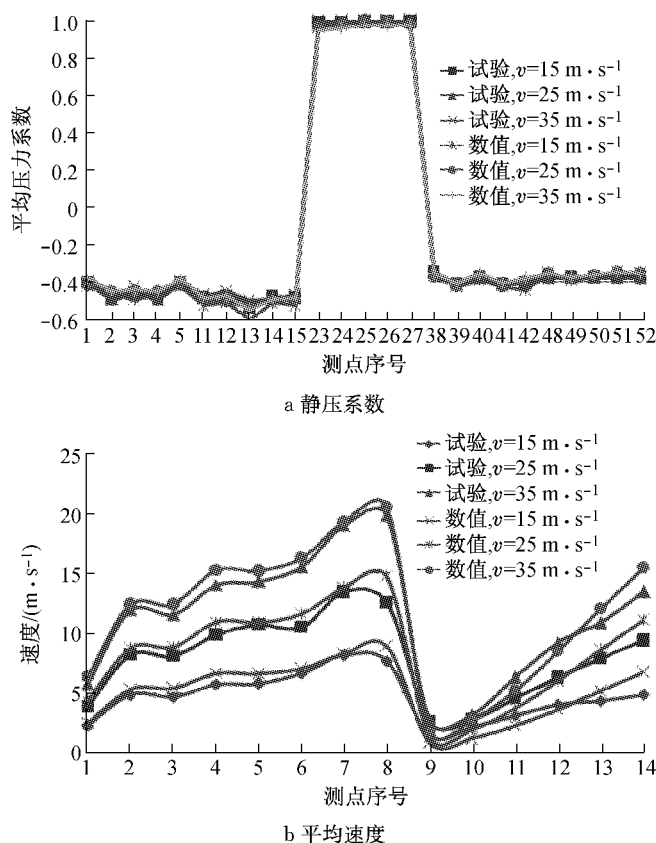


图 4 测点试验结果与数值结果对比

Fig.4 Comparison of test and numerical results

2 位于剪切层的移测架气动分析

2.1 数值方法

移测架位于均匀来流的流场中,已在文献[1]进行详细分析.由于汽车风洞试验段内存在射流剪切层,尽管移测架工作区域常处于均匀来流,但是个别试验工况要求移测架位于剪切层内.此时剪切层的强烈涡流将使移测架的流动具有更强烈的非定常特性,自身所产生的气动力必将更大.为此有必要专门分析移测架在剪切层的气动力.

将移测架模型置于整车风洞试验段剪切层处.图 5 所示的是移测架位于距喷口 1 m 处.由于剪切层厚度随着远离喷口逐渐增加,为此有必要研究移测架距喷口不同距离的气动特性.按照上述类似的网格创建方法来生成计算域的网格,网格总数约为 800 万个.当然,不同距离对应的体网格总数稍有差别,但是差异不大.定常计算设置和计算过程与上述基本相同,不予论述.为了计算移测架非定常气动力,使用非定常 Realizable $k-\epsilon$ 两方程湍流模型和非平衡壁面函数.其中时间步长取 0.002 s,共计算 1 s.

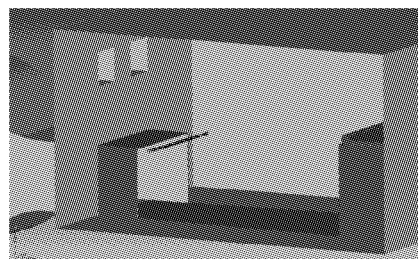


图 5 移测架位于剪切层

Fig.5 Traversing system in the shear layer

2.2 气动阻力与气动升力

表 1 是喷口速度为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,移测架与喷口不同距离时,各组件的平均受力情况.由表 1 可以看出,连接杆受到的气动阻力和气动升力比较小,均可以忽略不计;而前导轨受到的气动阻力和气动升力均最大.这是因为当流体流经前导轨时,受到了前导轨几何形状极大的阻碍作用.随着移测架与喷口距离的增加,移测架受到剪切层的影响就会越来越大,剪切层内复杂的涡旋运动作用于移测架上,会导致移测架受到的总气动阻力和总气动升力逐渐增加.当距离小于 5 m 时,随着距离的增加,移测架受到的总气动阻力和总气动升力均会急速增加,然而当距离超过 5 m 时,移测架受到的合力增加速度就逐渐

变得缓慢了。

表1 移测架各组件的气动阻力和气动升力

Tab.1 Drag and lift of traversing system component

	气动阻力/N					气动升力/N				
	1 m	3 m	5 m	7 m	9 m	1 m	3 m	5 m	7 m	9 m
后导轨	7.4	5.9	5.5	6.8	8.8	-3.4	-1.1	0.2	1.1	1.9
前导轨	44.7	90.4	109.2	111.9	118.3	0.6	7.0	9.6	9.8	13.4
连接杆	0.1	0.1	0.1	0.1	0	-0.6	-0.5	-0.5	-0.3	-0.1
合力	52.2	96.4	114.8	118.8	127.1	-3.4	5.4	9.3	10.6	15.2

表2是喷口速度为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,距离喷口9 m时,移测架受力情况.从表2可知,移测架受到气动力的最大值要比平均值大得多.对于气动阻力来讲,其最大值比平均值约大40%,而气动升力则要大3倍左右,因此移测架容易发生抖动现象,影响测点的准确定位和测试结果.

表2 移测架各组件的气动阻力和气动升力对比

Tab.2 Comparison of drag and lift of traversing system components

	气动阻力/N		气动升力/N	
	平均值	最大值	平均值	最大值
后导轨	8.8	46.5	1.9	22.9
前导轨	118.3	130.8	13.4	22.2
连接杆	0	0.1	-0.1	3.0
合力	127.1	177.4	15.2	48.1

3 流固耦合动力学分析

3.1 计算方法

为了更深入了解移测架的动力学特性,有必要进行非定常力的计算,并以此为基础进行流固耦合动力学分析.受计算资源的限制,仅创建移测架距喷口1 m的数值模型,并划分整个计算域网格总数为1 570万个.边界层网格贴附在移测架表面,其中第一层网格厚度满足大涡模拟^[6]的要求,对应的量纲一近壁面数 $y^+ \approx 5$.考虑到移侧架杆件升阻力脉动能量主要集中在频率小于100 Hz的低频段,将时间步长设定为0.002 s,不仅能够准确获得100 Hz以下的能量,也能够考虑到100~250 Hz的能量.每个时间步最大迭代步数为40步.总共计算时间为1 s,这样最低的计算频率可达2 Hz.

移测架的固体域网格则采用结构化网格,以尽可能避免在计算中出现网格变形过大而超出线弹性范围的情况.体网格总数为5.4万个.采用有限元方法进行固体变形计算.结构支承方式采用两端铰支承,材料选取的是铝合金,杨氏模量为 7.1×10^{10} ,泊松比为0.33,密度为 $2\,770\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,时间步长取为

0.002 s.

流固耦合分为单向和双向流固耦合.本文采用单向流固耦合方法,即仅仅考虑流体对固体变形的影响,而忽略固体变形对流场的影响.首先进行流体流场计算.应用有限体积法并使用Realizable $k-\epsilon$ 模型和非平衡壁面函数进行定常流动计算,然后采用大涡模拟进行非定常流动计算,从而获得移测架平均和瞬时气动载荷.将气动载荷作为输入,应用有限元方法进行固体变形计算,从而获得移测架横梁结构的平均和瞬时响应,以该响应来得到移测架的平均变形量和瞬时变形量.

3.2 结果分析

图6是剪切层工况下气动力的频率分析.移测架气动升阻力频率特性不具有明显的峰值,基本上在2~60 Hz范围内分布着各种频率振幅,并且振幅相当接近.此外,在60 Hz以上的频率范围内,几乎看不到明显的高频率分量.由于激振力频率的多样性,这种频率范围分布的激振力造成移测架的振动情况更加恶劣.

从上述频谱分析可知,移测架位于剪切层内所受到的气动力频率范围要大得多.由于多种频率分量的非定常气动力的存在,对于移测架的动态响应而言,更容易发生共振.发生共振的一个最重要的特征就是振幅的突然增大.图7给出的移测架上游横梁背风侧中心点的时域响应位移可以看到,剪切层工况下移测架沿流动方向的平均变形量为2.72 mm.由于剪切层在流动方向上造成移测架迎风侧和背风侧的压强差比较小,因此变形量也相应的较小.但是从振幅角度看,剪切层工况可以达到2.37 mm,数值与流动方向变形量相当.可见,当移测架位于剪切层内时,受到脉动量的影响更大,但是时均量更小.另外一方面,从垂直方向上看,情况又有所不同.当移测架位于剪切层内,其受到的气动升力平均值和脉动值较大.对于位移的平均量,剪切层工况约为2 mm,但是垂直方向的振幅达到了2.08 mm.这说明剪切层工况更加恶劣,并且这一影响主要表现在垂直方向上.

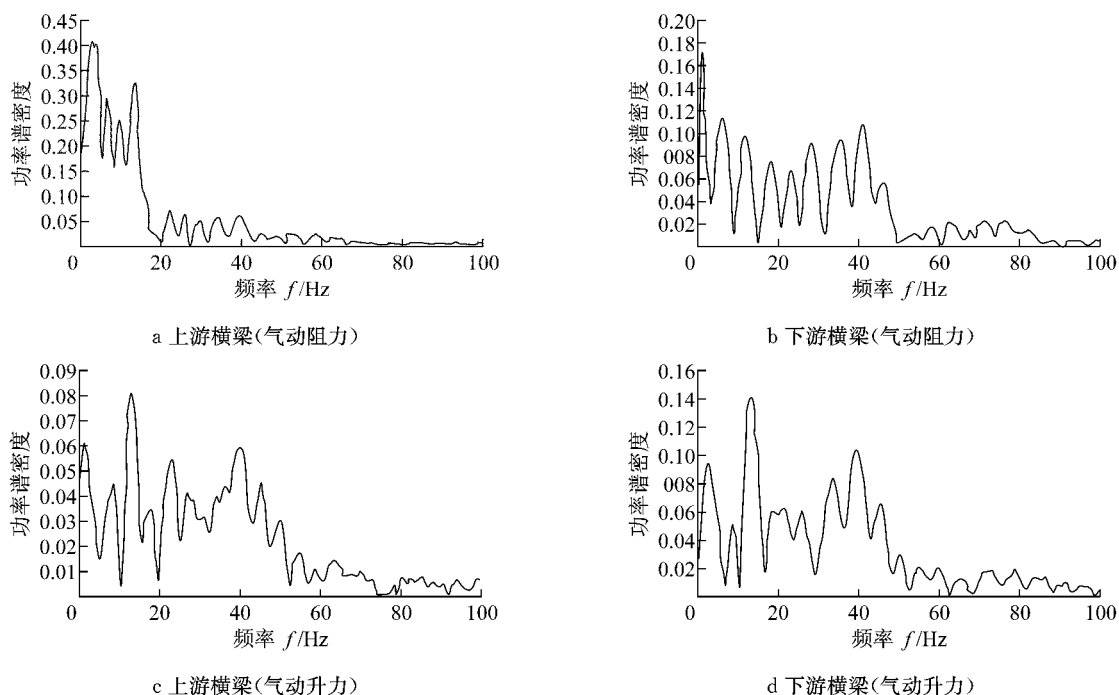


图 6 气动阻力和气动升力系数的功率谱密度

Fig.6 Power spectral density of drag and lift coefficients

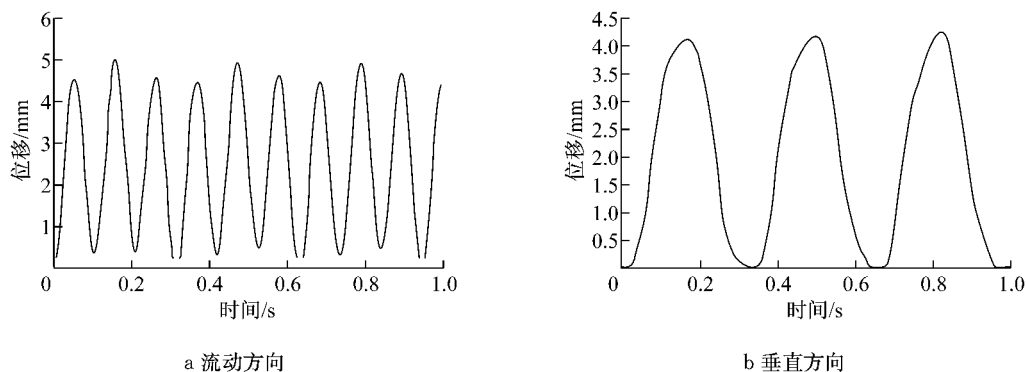


图 7 移测架的位移

Fig.7 Displacement of traversing system

共振,从而加剧移测架的振动。

4 结论

数值与试验相结合研究移测架的压力和速度特性.通过对比发现数值计算结果与试验结果具有一致性,本文采用的数值计算方法具有可行性。

位于剪切层的移测架,所受的气动阻力在来流 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时可达 100 N.随着与喷口距离的加大,移测架受到的总气动阻力和总气动升力会随之增加,其增长速度在距离为 5 m 时达到最大值。

受剪切层强烈涡流运动影响,移测架的气动升力具有明显非定常特性.它不具有明显的峰值,基本上在 1~60 Hz 范围内分布着各种频率振幅,并且振幅相当接近.这样的频率特性更容易出现

参考文献:

- [1] YANG Zhigang, LIU Qiaoyun, LI Qiliang. The effect of traversing system on wind tunnel flow field [J]. Procedia Engineering, 2011, 12: 15.
- [2] 贾青,李启良,杨志刚.汽车风洞试验段非定常流场的试验研究[J].同济大学学报:自然科学版, 2011, 25(6): 33.
JIA Qing, LI Qiliang, YANG Zhigang. Test research of the unsteady characteristic of the flow inside the test section of the automotive wind tunnel [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 25(6): 33.
- [3] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社, 2001.

(下转第 955 页)