

汽车空气动力学虚拟仿真实验

实验报告

专 业_____

班 级_____

姓 名_____

序 号_____

实验日期_____

山东理工大学

车辆工程与交通国家级虚拟仿真实验教学中心

2019.09

一、实验简介

汽车行驶过程中，受到空气作用在车身上的气动力和气动力矩，对汽车的动力性、经济性、舒适性和安全性有着极大的影响，特别是在超车与会车行驶过程中，汽车受到大小和方向不断变化的气动侧向力和横摆力矩，严重影响汽车的操纵稳定性和安全性，甚至有丧失操纵、引发交通事故的危险。本实验以分析和掌握汽车空气动力学特性为切入点，选取有/无侧风的单车、超车、会车四种行驶工况，采用计算流体动力学方法模拟了汽车行驶时的空气动力学特性，并采用三维建模、虚拟现实等技术，构建了汽车空气动力学虚拟仿真实验平台。

二、实验目的

(1) 知识目标

- ① 通过线上自主学习认知，形象理解空气动力学的基本原理和作用在汽车上的气动力、气动力矩；
- ② 通过汽车空气动力学实验研究方法的展示，了解风洞实验、道路实验的基本原理和方法，熟悉数值方法的基本流程，以及各种方法的优缺点；
- ③ 测量无侧风工况下单车行驶的气动特性，了解汽车外流场的基本特性；分析汽车阻力、升力等气动特性随行驶速度的变化特性；
- ④ 测量有侧风工况下单车行驶的气动特性，对比分析侧风条件下汽车气动特性的变化，测量汽车气动阻力和侧向力随侧风速度的变化规律，研究侧风对操纵稳定性的影响；
- ⑤ 测量超车工况下的气动特性，记录超车过程中主超车、被超车的阻力、侧向力和横摆力矩，并与单车进行对比，分析超车过程中车身压力波的变化；分析相对速度对车辆气动特性的影响，研究超车过程中的操纵稳定性和安全性；
- ⑥ 测量会车工况下的气动特性，对比会车过程中的压力波干扰特性，获得会车过程中车辆的阻力、侧向力和横摆力矩；研究会车速度对两车气动特性的影响，讨论会车过程中的安全性。

(2) 素质与能力目标

- ① 能够利用汽车空气动力学基础知识解释汽车道路行驶的空气动力学现象，并能够进行简单的车身气动外形设计；
- ② 能够根据复杂工况下汽车的气动特性，评估汽车道路行驶的操纵稳定性和安全性；
- ③ 锻炼自主学习能力、思维批判与分析能力和跨学科思维能力，培养团队协作意识和严谨的科学精神，训练利用所学知识分析、解决工程实际问题的能力。

三、实验原理

针对汽车空气动力学基础和实验方法介绍模块，采用理论 3D 模型、数值仿真和虚拟现实等手段，形象呈现汽车空气动力学基本原理、实验环境及操作；针对虚拟仿真实验模块，首先通过计算流体动力学（Computational Fluid Dynamic, CFD）方法对汽车道路行驶的空气动力学特性进行数值模拟，得到汽车受到的气动力和气动力矩特性，以及车身表面及周围的流场分布特性；然后基于虚拟现实技术，构建虚拟仿真实验的实验场景，建立汽车空气动力学虚拟仿真实验平台。实验中涉及的基本原理和数值模拟的流程如下：

（1）流动运动的基本方程

汽车在空气中运动，空气的流动过程遵循物理学的基本定理。流体运动的连续方程、动量/动量矩方程和能量方程，分别描述了流体运动中所遵循的质量守恒定理、牛顿运动定律和能量守恒定律等。借助虚拟仿真可以形象呈现流体运动的物理定律，流体运动的基本方程组可以表示为：

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho dV + \oiint_{CS} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) \rho dA = 0 \quad (1)$$

$$\iiint_{CV} \rho \mathbf{f} dV + \oiint_{CS} \mathbf{f}_s dA = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho \mathbf{u} dV + \oiint_{CS} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) \rho \mathbf{u} dA \quad (2)$$

$$P + \Phi - \oiint_{CS} \left(e + \frac{u^2}{2} + gz \right) \rho (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) dA = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \left(e + \frac{u^2}{2} + gz \right) \rho dV \quad (3)$$

（2）汽车气动力和气动力矩

汽车在空气中运动时，受到空气的作用力。理论和实验研究表明，气动力与速度的平方、汽车的迎风面积以及取决于车身形状的无量纲系数成正比。如图 1 所示，在计算分析气动力和气动力矩时，可以将其沿坐标轴分解，表示为升力、阻力、侧向力，以及侧倾力矩、横摆力矩和纵倾力矩，可表示为：

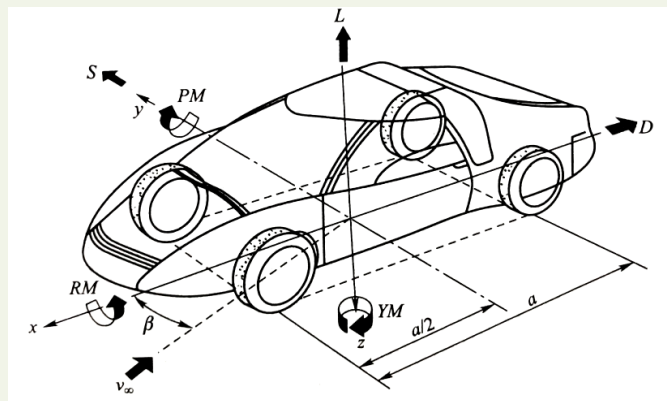


图 1 汽车气动六分力

① 气动阻力 F_D 、气动升力 F_L 以及侧向力 F_S

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D \quad (5)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \quad (6)$$

$$F_S = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_S \quad (7)$$

式中, ρ -空气密度, v -汽车速度, S -参考面积(汽车迎风面积), C_D -阻力系数, C_L -升力系数, C_S -侧向力系数。

② 纵倾力矩 M_P 、横摆力矩 M_Y 以及侧倾力矩 M_R

$$M_P = \frac{1}{2} \rho v^2 S L C_{PM} \quad (8)$$

$$M_Y = \frac{1}{2} \rho v^2 S L C_{YM} \quad (9)$$

$$M_R = \frac{1}{2} \rho v^2 S L C_{RM} \quad (10)$$

式中, L -参考长度(汽车轴距), C_{PM} -纵倾力矩系数, C_{YM} -横摆力矩系数, C_{RM} -侧倾力矩系数。

(3) 数值模拟流程

通过计算机和数值方法求解流体运动的控制方程,并借助图像显示技术呈现汽车周围流场特性分布。汽车空气动力学数值模拟的流场如图 2 所示,首先建立流体运动的守恒方程,并选择湍流模型对方程组进行封闭,并确定初始条件与边界条件,然后划分计算网格,建立离散化方程,并将初始条件和边界条件离散化,随后给定求解器控制参数,求解离散方程组,达到指定精度后结束求解过程,最后利用后处理程序显示和输出计算结果。

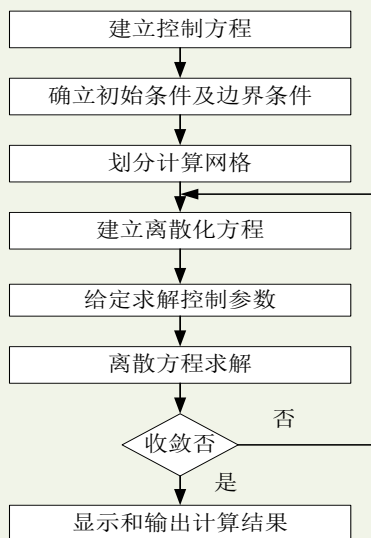


图 2 数值模拟流程

三、实验步骤

- ① 实验前在汽车上安装风速仪、陀螺仪、陀螺盒、五轮仪、压力采集器、加速度计等测量设备；
 - ② 设置车辆行驶速度和侧风速度等参数，开始实验，等待汽车加速到指定速度，并完成数据采集；
 - ③ 实验结束后，切换到结果输出模块，查看并记录汽车气动力系数和汽车流场特性图；
 - ④ 分析仿真实验结果，完成实验报告，得出实验结论。
- 各项实验的详细步骤见实验指导书。

四、仿真实验内容及结果

1、基准实验

汽车空气动力学虚拟仿真基准实验，共包含“单车无侧风、单车有侧风、超车、会车”四项实验内容。通过基准实验，掌握不同工况下汽车空气动力学实验的实验方法，记录汽车气动力系数和气动力矩系数，并分析不同工况下车身及周围的流场特性。实验具体如下：

1.1 单车无侧风实验

通过无侧风工况单车行驶的空气动力学实验，得到整车的气动力，以及速度场和压力场分布。

(1) 实验数据

实验条件：车辆行驶速度 100 km/h；

实验结果：阻力系数 0.2850，升力系数 0.0405，纵倾力矩系数 0.6809。

(2) 流场特性

云图类型	流场特性图
车身压强云图 (标明视角)	

流场压强云图 (标明截面位置)	
流场流线图 (标明截面位置)	

(3) 实验结果分析。

结合流场特性图，运用汽车空气动力学的基础理论，分析车身压强与周围速度场的关系，并分析车身气动力产生的原因。

1.2 单车有侧风实验

通过有侧风工况下单车行驶的空气动力学实验，分析侧风对汽车空气动力学特性的影响。

(1) 实验数据

实验条件：车辆行驶速度 100 km/h，风速 6 m/s，

实验结果：阻力系数 0.3435，升力系数 0.1927，侧向力系数 0.3984，横摆力矩系数 0.7125。

(2) 流场特性

类型	结果
车身压强云图 (标明视角)	
流场压强云图 (标明截面位置)	
流场流线图 (标明截面位置)	

(3) 实验结果分析

通过与无侧风情况下流场特性和气动力系数进行对比,分析侧风对汽车气动特性的影响。

1.3 超车实验

测量超车过程中的汽车气动特性，并结合流场特性分析其变化原因。

(1) 实验条件

主超车车速_____km/h，被超车车速_____km/h，

(2) 实验结果

类型	结果
流场压强云图 (标明截面位置 和相对位置)	
主超车 阻力系数	
被超车 阻力系数	
主超车 侧向力系数	
被超车 侧向力系数	

(3) 实验结果分析

根据伯努利方程的基本原理，并结合流场速度和压强的动态分布，分析两车阻力系数和侧向力系数变化的原因。

1.4 会车实验

(1) 实验条件

车辆行驶速度：_____km/h。（两车行驶速度相同）

(2) 实验结果

类型	结果
流场压强云图 (z=0.55m)	
1 车 侧向力系数	

2 车 侧向力系数	
1 车 阻力系数	
2 车 阻力系数	

(3) 实验结果分析

结合两车交会过程中车身周围流场的分布特性,总结两车气动力的动态变化规律,并分析论述其产生机理。

2、研究探索实验

汽车空气动力学研究探索实验主要研究不同行车工况下车辆行驶速度和侧风速度等参数对汽车气动特性的影响，主要包括“行驶速度影响、侧风速度影响，超车速度影响和会车速度影响”。实验具体如下：

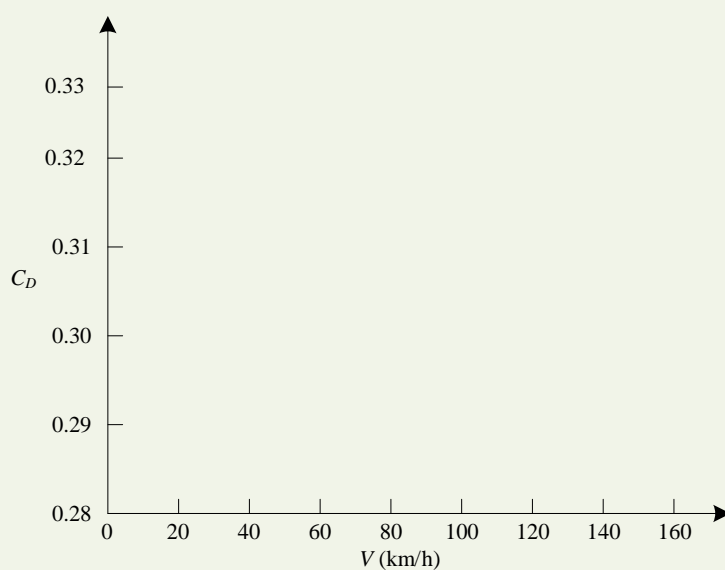
2.1 行驶速度影响

在单车无侧风工况下，设置不同的行驶速度进行测试，并记录汽车的气动力系数。经过多次实验后，绘制汽车的阻力系数、升力系数、纵倾力矩系数等气动特性随车速的变化规律，并与系统预置曲线进行对比。

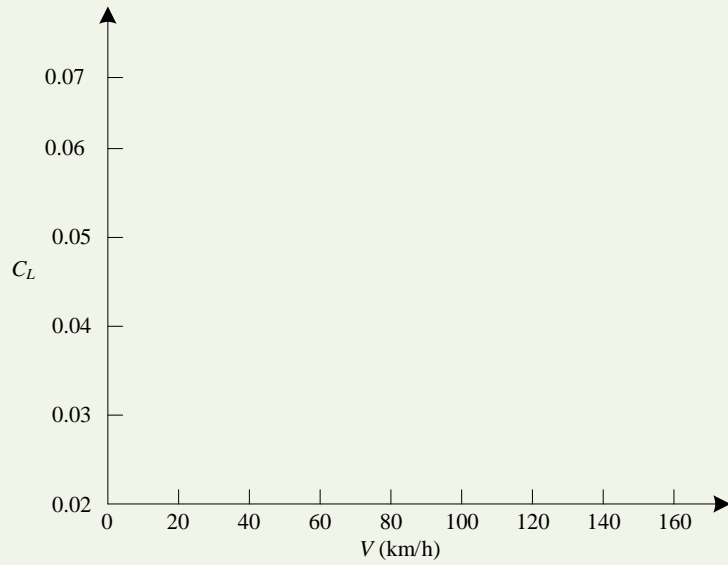
(1) 汽车行驶速度及气动力

测试次数	车速(km/h)	阻力系数	升力系数	纵倾力矩系数
1				
2				
3				
4				
5				
6				

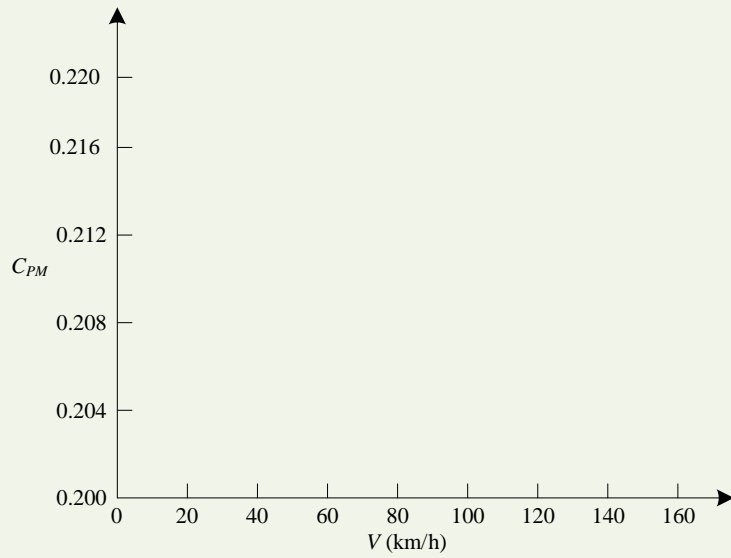
(2) 阻力系数、升力系数、纵倾力矩系数随车速的变化规律



阻力系数随车速变化曲线



升力系数随车速变化曲线



纵倾力矩系数随车速变化曲线

(3) 实验结果分析

分析气动力系数和气动力矩系数随汽车行驶速度的变化规律，并与实验平台的预置曲线进行对比。

2.2 侧风速度影响

在单车有侧风工况下,选择车辆行驶速度,并设置不同的侧风风速进行测试,记录汽车的气动力系数,经过多次实验后,绘制汽车的阻力系数、升力系数、侧向力系数和横摆力矩系数随车速的变化规律,并与系统预置曲线行对比。

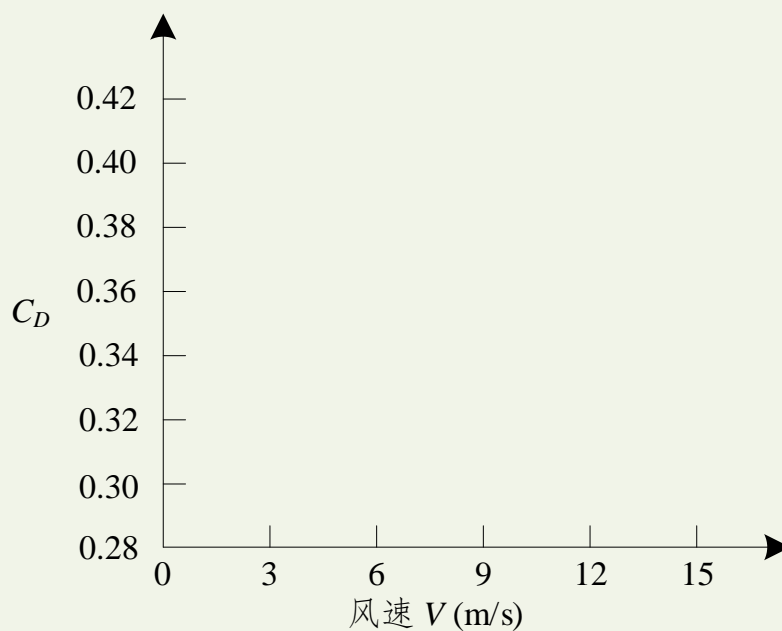
(1) 实验条件

车辆行驶速度为_____km/h。

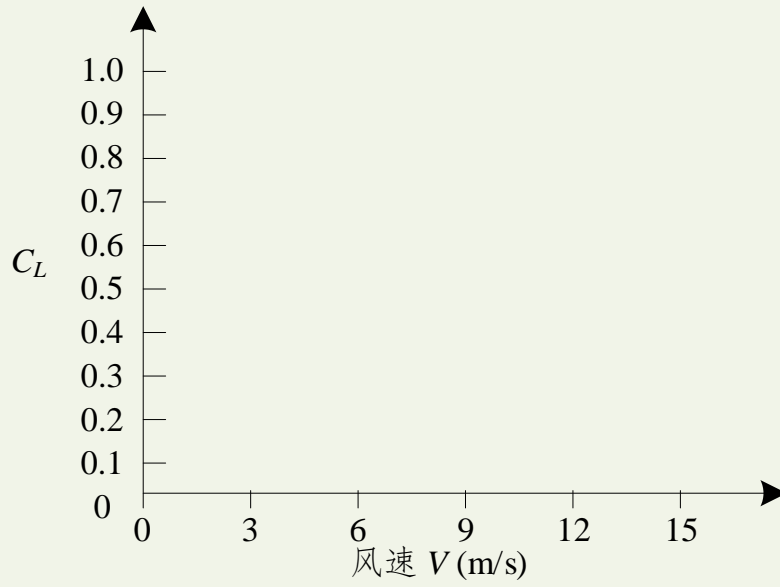
(2) 侧风风速及各力系数数值表

测试次数	侧风风速 (m/s)	阻力系数	升力系数	侧向力系数	横摆力矩系数
1					
2					
3					
4					
5					

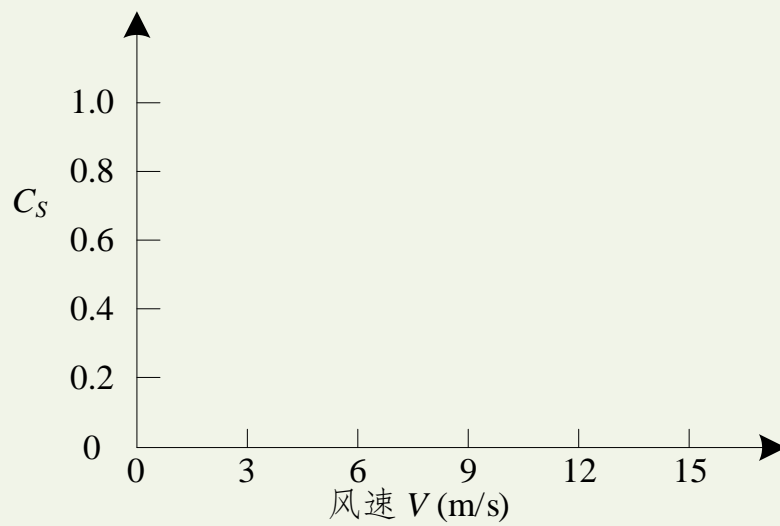
(3) 阻力系数、升力系数、侧向力系数和横摆力矩系数等气动特性随侧风风速的变化规律



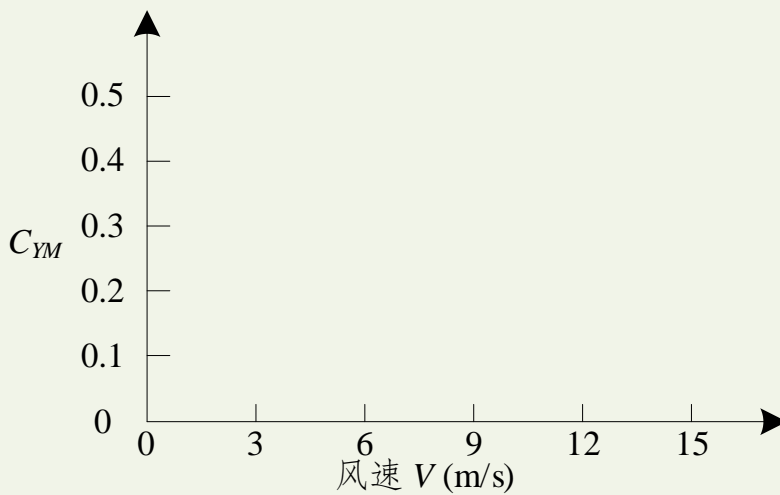
阻力系数随侧风风速变化曲线



升力系数随侧风风速变化曲线



侧向力系数随侧风风速变化曲线



横摆力矩系数随侧风风速变化曲线

(4) 实验结果分析

对比实验平台的预置曲线,分析侧风工况下汽车的气动力系数和气动力矩系数随侧风速度的变化规律,并讨论侧风对操纵稳定性和安全性的影响。

2.3 超车速度影响

改变主超车速度,进行多次实验,记录实验数据,对结果进行对比,分析相对超车速度对两车气动特性的影响。

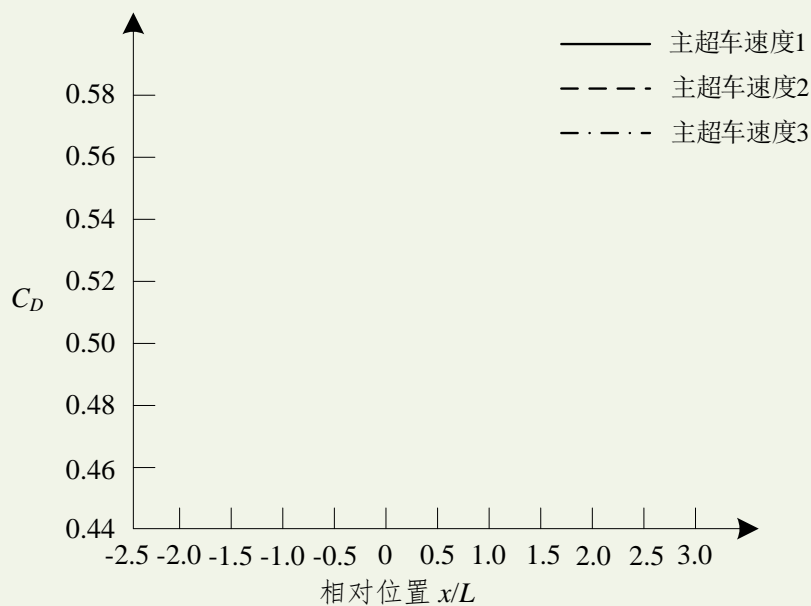
(1) 实验条件

被超车速度: _____ km/h;

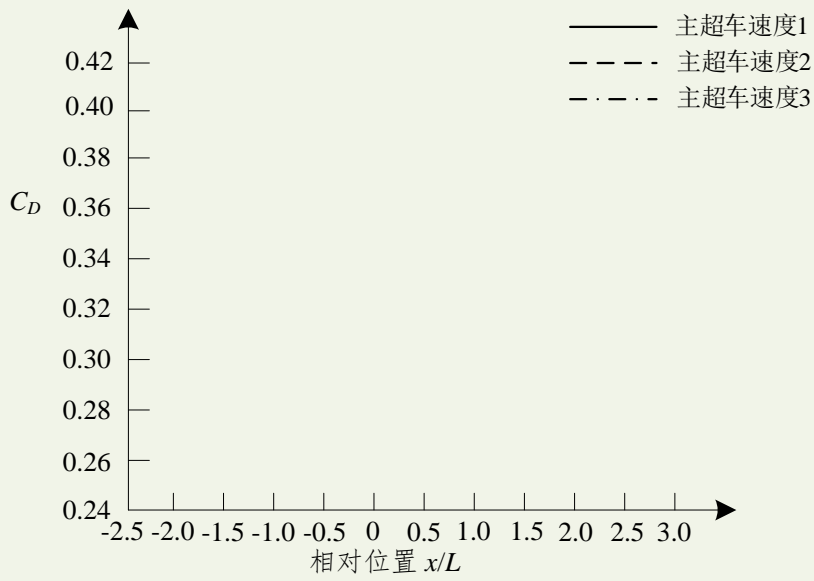
主超车速度: ① _____ km/h; ② _____ km/h; ③ _____ km/h。

(2) 实验结果

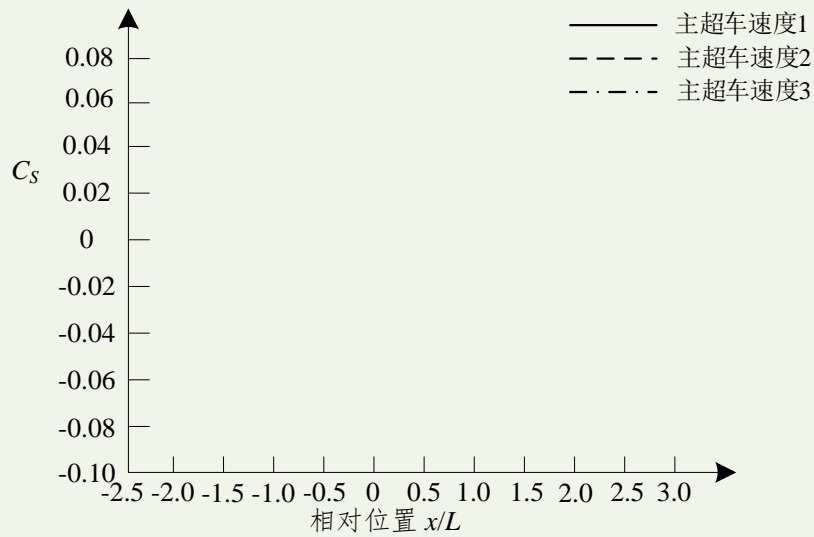
绘制不同超车速度下,主超车和被超车的阻力系数与侧向力系数的变化规律。



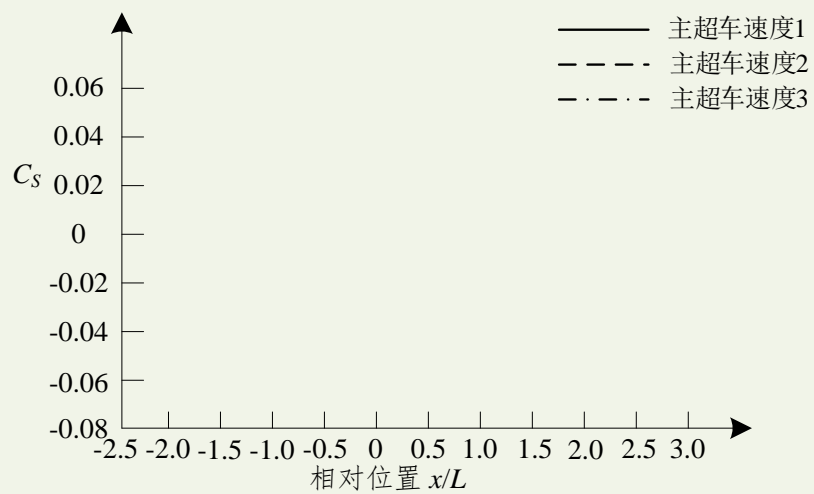
主超车阻力系数变化曲线



被超车阻力系数变化曲线



主超车侧向力系数变化曲线



被超车侧向力系数变化曲线

(3) 仿真实验结果分析

分析相对超车速度对两车阻力系数变化规律的影响，指出两车阻力系数和侧向力系数的最大/最小值随超车速度的变化，并针对汽车超车过程中的稳定性和安全性，提出相应的建议。

2.4 会车速度影响

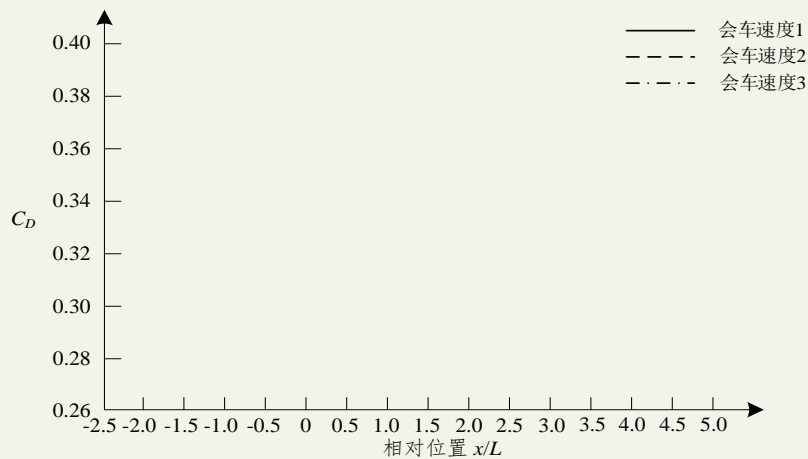
改变车辆交会速度，进行多次实验，记录实验数据，对结果进行对比，分析交会速度对两车气动特性的影响。

(1) 实验条件

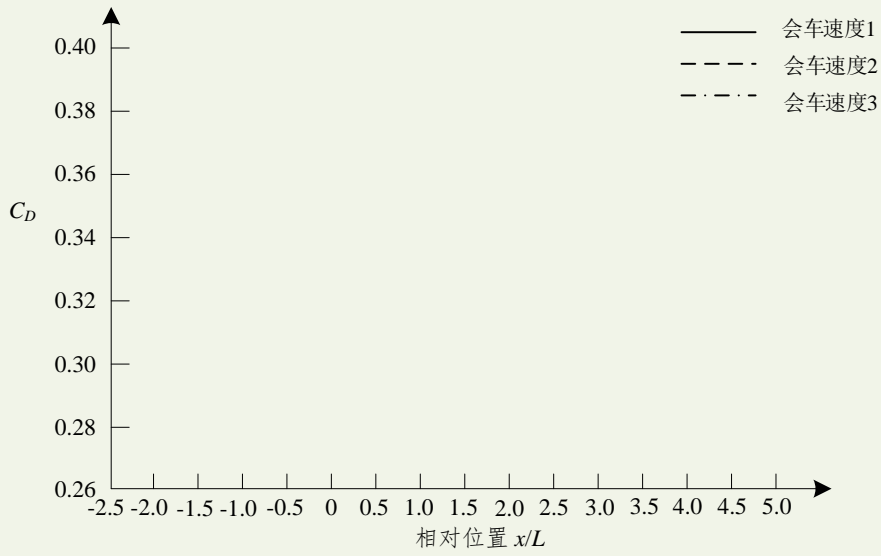
车辆速度：① _____ km/h;
② _____ km/h;
③ _____ km/h。

(2) 实验结果

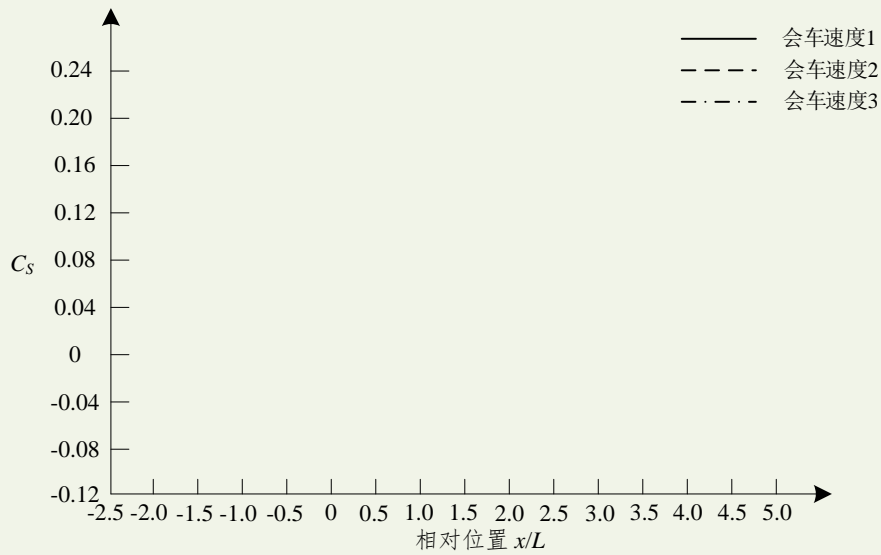
绘制不同超车速度下，两车阻力系数与侧向力系数的变化规律。



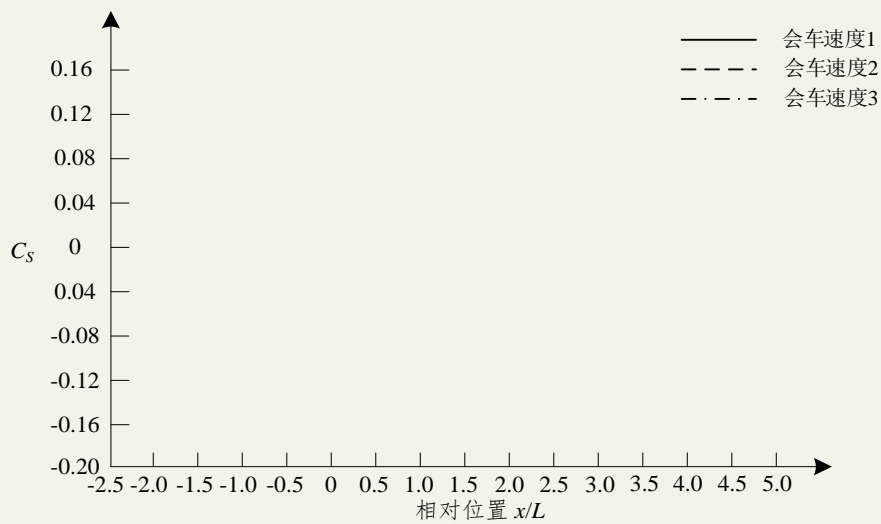
1 车阻力系数变化曲线



2 车阻力系数变化曲线



1 车侧向力系数变化曲线



2 车侧向力系数变化曲线

(3) 实验结果分析

分析交会速度对两车阻力系数变化规律的影响,指出两车阻力系数和侧向力系数的最大/最小值随交会速度的变化,并针对汽车交会过程中的稳定性和安全性,提出相应的建议。

五、实验反思与总结

回顾实验过程,总结实验中得到的结果和结论,以及实验中的收获。

实验成绩	
指导教师	
批改时间	