

# 重型卡车实车风洞试验结果修正

付强<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1</sup>, 芦克龙<sup>2</sup>

(1. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 201804; 2. 吉利汽车研究院(宁波)有限公司, 宁波 315336)

**摘要:** 重型卡车牵引车及载货状态属于“非连续体”(形体不连续), 传统的修正方法不完全适用于该类形体的结果修正, 因此建议使用道路试验和数值模拟相结合的方式深入研究。为此, 介绍了重型卡车风洞试验的特点及某车型在加拿大 NRC 风洞的试验过程, 基于试验报告的部分信息和闭式风洞标定方法对 NRC 风洞的修正方法进行推导, 获得了修正公式。使用推导得到的修正公式对原始数据进行处理, 结果与试验报告有较高吻合度, 证明推导公式的有效性, 因此可为闭式风洞进行重型卡车的空气动力学试验提供参考。

**关键词:** 重型卡车; 汽车空气动力学; 风洞试验; 修正; 非连续体

中图分类号: U462.1

文献标志码: A

## Correction of Wind Tunnel Test of a Heavy-Duty Truck

FU Qiang<sup>1,2</sup>, YANG Zhigang<sup>1</sup>, LU Kelong<sup>2</sup>

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Geely Automobile Research Institute (Ningbo), Ningbo 315336, China)

**Abstract:** This paper introduces the characteristics and the process in NRC wind tunnel test of a heavy-duty truck in Canada. Based on some information in the test report and the calibration method for closed wind tunnels, the correction method of NRC wind tunnel is deduced and the correction formula is obtained. The original data are processed with the derived correction formula, and the results are in good agreement with the test report, which proves the validity of the derived formula, provides reference for the aerodynamic test of heavy trucks in the closed test section wind tunnel.

**Key words:** heavy-duty truck; vehicle aerodynamic; vehicle wind tunnel; correction; non-continuous body

风阻是汽车空气动力学研究的主要目标, 对卡

车与乘用车有同等重要的意义, 但重型卡车(以下简称“重卡”)由于自重及尺寸等问题, 研究手段和积累远没有乘用车丰富。纵观世界范围内的汽车风洞主要适用于乘用车, 可用于重卡的有限几个风洞缺少模拟贴近实际路面行驶工况(车轮旋转, 地面效应等)的能力<sup>[1-2]</sup>。缩比模型风洞试验和数值模拟, 是长期以来重卡空气动力学研究的主要方法。但小比例模型限于雷诺数等因素只能进行趋势研究, 而数值模拟基础理论尚不完整, 不能作为最终检验手段, 仍需试验验证。目前国内缺少能够进行全尺寸重卡匹配真实货箱进行风洞试验的资源, 借用国外资源是目前唯一可行的方案。

本文以某重卡为研究对象, 介绍了在加拿大 NRC 风洞<sup>[3-5]</sup>进行试验的试验过程, 并根据试验报告提供的部分信息和闭式风洞的修正法, 对 NRC 风洞的修正方法进行研究和推导, 最终使用推导出的公式对原始数据进行处理, 获得了与 NRC 提供报告吻合度较高的试验结果。提出重卡牵引车及载货状态属于“非连续体”, 传统的修正方法不完全适用于该类形体的结果修正, 建议使用道路试验和数值模拟相结合的方式深入研究。

## 1 重卡实车风洞试验

### 1.1 实车风洞试验资源简介

目前, 世界范围内具备进行重卡实车空气动力学整车(重卡牵引车加装真实货箱)风洞试验, 且有试验经历的风洞主要有 3 个: 美国航空航天局(NASA)的 NFAC 风洞<sup>[6-7]</sup>、德-荷风洞机构(DNW)的 LLF 风洞<sup>[8-10]</sup>及加拿大国立科学研究协会(NRC)的大尺寸风洞。这 3 个风洞均为航空专用风洞, 具备汽车试验段和试验能力, 可以切换成汽车风洞试验模式, 按照需求在某些时段为汽车提供试验时间

收稿日期: 2022-10-30

第一作者: 付强(1980—), 男, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学。E-mail: ft999999@163.com

通信作者: 杨志刚(1961—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向空气动力学。E-mail: zhigang.yang@sawtc.com

窗口。其中,仅NRC和DNW为中国企事业单位可用的风洞资源,NASA资源较难利用。此外,奔驰商用车风洞可以进行商用车牵引车的试验<sup>[11]</sup>,但是其试验段仅有12 m,无法进行带货箱工况的试验。DNW、NRC与奔驰商用车风洞相关参数见表1。

表1 商用车风洞参数

Tab.1 Three heavy duty truck vehicle wind tunnel parameters

参数	NRC风洞	DNW风洞	奔驰风洞
最大风速/(km·h <sup>-1</sup> )	200	223	250
喷口面积/m <sup>2</sup>	80.80	88.25	32
试验段长度/m	22.9/闭式	22.9/闭式	12/开式
横摆角范围/(°)	±0	±10	±180
天平最大载荷/t	—	50	10

位于绵阳的低速大风洞喷口为48 m<sup>2</sup>,可以进行重卡牵引车级别的试验。2008年一汽集团曾在该风洞进行过实车牵引车及加装简化货箱的试验,如图1所示。但由于天平最大载重限制,对整车进行了一定程度的拆解以减重(2008年绵阳风洞天平最大载重为5 t,重卡牵引车自重约8 t)。2013年一汽集团在德国奔驰商用车风洞进行对标试验,如图2所示。两次风洞试验的经验和结果为后来NRC整车级的风洞试验提供了依据和指导。



图1 重卡实车+简化货箱绵阳风洞试验现场

Fig.1 Heavy duty truck+ simple trailer in Mianyang wind tunnel

本文研究的重卡于2016年在NRC风洞进行了空气动力学风洞试验,货箱为NRC提供的专用试验货箱,尺寸为28英尺(8.5 m),牵引车根据NRC风洞进出口尺寸要求(车辆进出为顶部吊装,对车辆长度有严格要求)设为4×2的驱动形式,并在试验过程中进行了压力测点的测量,并于合同中对提供原始数据进行了要求,构成了本文能够进行修正的数据基础,试验车辆状态如图3所示。



图2 重卡实车+简化货箱奔驰风洞试验现场

Fig.2 Heavy duty truck+ simple trailer in Benz wind tunnel



图3 重卡+28英尺货箱工况NRC风洞试验现场

Fig.3 Heavy duty truck+ 28ft trailer in NRC wind tunnel

## 1.2 重卡风洞试验特点

重卡车型和试验所用风洞均有一定特殊性,难以像乘用车风洞试验具有较大的一致性,故以下几点需要讨论和明确:

(1) 重卡风洞试验的修正方法。本文主要试验状态(牵引车+货箱)阻塞比约为12.4%,根据SAE J1252推荐需要进行较大幅度的修订<sup>[12]</sup>。NRC未在报告中提供完整的修正方法,需要参考文献及NRC报告提供的部分信息进行推导。NRC风洞的修正参考了Maskell法则<sup>[10]</sup>,针对尾流部分采用Thom-Herriot方法修正。需要注意的是,不同修正方法对结果具有决定性的影响。David Soderblom在文章中给出的不同修正方法最大差值可达0.077<sup>[10]</sup>,超过基础值的10%。

(2) 试验装载状态。NRC试验段为22.9 m,无法进行通常开发和研究中常用的40英尺(12.2 m)或45英尺(13.7 m)货箱,NRC风洞仅可以使用由其提供的28英尺(8.5 m)平板货箱(图3中白色货箱)。

故针对大尺寸货箱及集装箱只能通过数值模拟和道路试验的方式进行拓展研究,否则其结果应用价值有限。

(3) 车辆进出方式。NRC风洞采用吊装方式,吊装口在顶部,由于开口尺寸限制,对牵引车总长有一定要求,本文的牵引车为4×2驱动行驶,尺寸刚刚满足最大长度限值。

(4) 固定装置和测力。乘用车一般的固定位置在前后轮中间,且固定杆小,沿着来流方向布置,对结果影响基本可以忽略。重卡由于长度原因,无法直接通过天平进行测力。NRC的测力方式比较有代表性。图3牵引车第二轴下方固定装置连接到天平上进行测力;前轮下方连接装置试验过程中下部会有高压气流流出,通过气体使前轮及后部货箱轮胎悬浮到空中,与地面无接触进行试验,最大程度减少阻力;货箱的支撑方式与前轮相同,试验过程中也被高压气体举起,与地面无接触。NRC报告中未对该部分单独进行修正,会构成试验和修正的误差来源;

(5) 地面边界层的影响。NRC风洞使用近50年,风洞地面斑驳,不平度较大,对边界层的产生和发展具有较大的影响,风洞没有提供详细标定和评估数据,也是试验误差的重要来源之一。

### 1.3 风洞试验方案

整个试验方案主要包括:①牵引车及牵引车匹配28英尺(8.5 m)货箱试验,如图3所示,主要考察冷却阻力、导流罩、侧护板、A柱饰条、底护板、姿态等对风阻的影响;②偏航角测量,因风洞试验段尺寸影响,偏航角分别进行了±3°、±6°、±9°测量;③针对特征工况进行了表面压力测量。

## 2 NRC风洞试验修正方法

NRC提供的报告在结果修正方面的有效信息仅包括参考SAE修正方法及参考Thom-Herriot修正方法针对尾流阻塞的修正,不足以了解如何从原始数据修正到报告中试验结果的过程,需要对其可能的修正过程进行研究和推导。

针对闭式风洞主要修正系数为:固体阻塞修正系数 $\epsilon_s$ ,尾流修正系数 $\epsilon_w$ ,尾流变形部分产生的阻力增量 $\Delta C_{d,WD}$ 。

### 2.1 Maskell III修正法

参考SAE标准及相关文献内容,采用Maskell III修正法对NRC风洞结果进行修正修。

固体阻塞系数 $\epsilon_s$ 修正公式为

$$\epsilon_s = 0.36 \left( \frac{W_t}{2h_t} + \frac{2h_t}{w_t} \right) \frac{v_{dm}}{C_{dt}^{1.5}} \quad (1)$$

式中: $W_t$ 为风洞宽度; $h_t$ 为风洞高度; $C_{dt}$ 为2倍试验段截面积; $v_{dm}$ 为2倍车辆体积。

尾流阻塞修正系数 $\epsilon_w$ 修正公式为

$$\epsilon_w = \sqrt{1 + \theta \left( \frac{1}{1 + \theta} - \frac{\Delta C_{d,WD}}{C_{dm}} \right)} \quad (2)$$

式中 $\theta$ 的计算式为

$$\theta = (0.96 + 1.94e^{-0.06h_m/W_m}) C_{d,M} \frac{S_{dm}}{C_{dt}} \quad (3)$$

式中: $h_m$ 为车高; $W_m$ 为车宽; $S_{dm}$ 为2倍车正投影面积。式(2)中尾流变形部分产生的阻力增量由式(4)表示。

$$\Delta C_{d,WD} = C_{d,M} \left( \frac{1}{1 + \theta} + \frac{1 - \sqrt{1 + 4\theta}}{2\theta} \right) \quad (4)$$

式中 $C_{d,M}$ 为测量所得 $C_d$ 值

定义修正系数如下:

$$n_k = (1 + \epsilon_s + \epsilon_w)^2 \quad (5)$$

修正所得如式(6)所示:

$$C_{d,c} = \frac{C_{d,M}}{n_k} + \Delta C_{d,WD} \quad (6)$$

由于NRC所提供报告未详细阐明修正过程,从结果看,尾流阻塞部分使用的是Maskell-III修正方法,固体阻塞部分相差较大,使用Maskell-III修正的结果与报告相比偏低。

### 2.2 Thom-Herriot修正法

Thom-Herriot修正方法针对尾流阻塞 $\epsilon_w$ 的修正为

$$\epsilon_w = \frac{1}{4} C_{d,m} \frac{S_{dm}}{C_{dt}} \quad (7)$$

尾流变形部分产生的阻力增量 $\Delta C_{d,WD}$ 公式为

$$\Delta C_{d,WD} = -\frac{C_{d,m}\epsilon_s}{n_k} \quad (8)$$

原始数据在经过该修正公式处理后,与NRC最终报告数据匹配度较高,但也无法做到完全还原,且多数结果的修正幅度超过报告值的30%。选取其中3组有代表性的试验状态数据,使用两种修正方法进行修正,报告结果对比见图4。其中工况1为牵引车状态,工况2为牵引车+28英尺(8.5 m)集装箱,工况3为牵引车+28英尺(8.5 m)集装箱+导流罩。NRC针对固定装置和边界层的等影响如何处理未有明确说明。从以上分析过程也可以看出,闭式风洞针对重卡的修正方法包含大量的经验公式和假

设。使用不同修正方法,对试验结果的修正和解读会造成较大影响<sup>[13-16]</sup>。

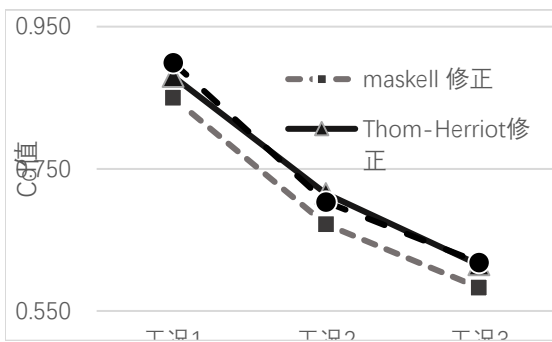


图 4 不同修正方法获得的结果与报告值对比

Fig.4 Comparison of results obtained by different correction methods with reported values

### 2.3 误差分析

闭式风洞的误差主要源自 3 个方面:固体阻塞、尾流阻塞和尾流变形部分产生的阻力增量<sup>[1-2,17]</sup>。早期汽车风洞(特别是闭式风洞)的修正方法大部分参考了航空航天风洞的修正方法,并逐步结合汽车空气动力学测试的特殊性不断改进。但风洞修正的基本前提仍是“流体的形态没有改变,也意味着流体压力分布、分离的位置和类型均与开放空间基本一致。也可以描述为流场在某些限制条件下是不变的”<sup>[1]</sup>。NRC 是专业的航空风洞,其修正方法也参考了航空航天通用的方法。但是,重卡牵引车及加载货箱状态均是非连续体,在驾驶室后围与货箱前端面存在间隙,且货箱由于载货需要体积最大化以长方体为主,且长度最多可以超过 12 m,故传统的风洞修正方法并不完全适用。

(1) 名义速度是试验的目标车速。如 1.2 节(1)中所述,由于阻塞比过大,NRC 风洞需要速度修正。但是从图 3 可见,重卡牵引车类似长方体,且存在离地间隙、后视镜等不规则形状,不满足基本的流线型形体,分离和压力分布与开放空间有较大差别,不能直接使用阻塞比进行换算,针对不同形体(如牵引车和牵引车加装货箱)的修正,也存在较大差异,传统的修正方法难以贴近物理实际。

(2) 固体阻塞修正系数  $\epsilon_s$  和尾流阻塞修正系数  $\epsilon_w$  均是由于固体壁面的影响,导致气流在风洞内的发展与开放空间有较大区别。重卡牵引车及加装货箱状态均为非连续体,导致固体阻塞和尾流阻塞的影响缺乏规律性。David Soderblom 和 Per Elofsson 对不同曲率 A 柱在类似 NRC 的计算域中进行数值模拟,根据不同修正方法进行了结果修正,并将结果

与开放路面结果进行对比,发现不同曲率对修正结果有较大影响,其模型见图 5,结果如表 1 所示<sup>[10]</sup>。但 A 柱曲率的改变不对修正因子造成影响。类似于 A 柱的形体差异还有重卡牵引车是否假装导流罩、货箱是否有圆角、牵引车与货箱的间隙、驾驶室顶盖与货箱顶部的高度差、货箱的姿态等,均不会影响修正因子,但都存在显著影响修正结果的风险。基于上述分析可知,难以通过传统修正方法提出针对不同驾驶室、导流罩等差异化形体的一致性修正方案。

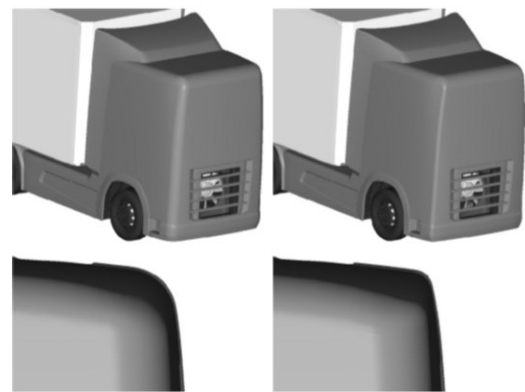


图 5 不同曲率 A 柱(左侧曲率为 200 mm,右侧曲率为 80 mm)  
Fig.5 A-pillar with different curvatures: the left is 200 mm and the right is 80 mm

(3) NRC 风洞的支撑和固定装置在试验结果中未有明确修正。因为支撑装置与车体连接,体积和形状等因素对测量结果均有较大影响,但基于 NRC 现有的试验设备和技术,无法对试验结果中的单独因素在试验中和试验后进行解耦,该部分的结果可以认为是无法通过试验结果进行修正的。

表 1 不同曲率 A 柱修正结果

Tab.1 Correction results of A-pillar with different curvatures

Correction method	$\Delta C_D-200\text{ mm}$	$\Delta C_D-80\text{ mm}$
Maskell	57	28
Maskell III	55	26
Mercker	44	18
Willemsen & Mercker	28	2
DNW-Maskell	17	-17
Thom & Herriot	18	-49
Modified Thom & Herriot	21	-6
Uncorrected data	117	98

\* $\Delta C_D=C_D(\text{blockage corrected})-C_D(\text{open road})$ 。

## 3 结论

Hucho 对风洞修正的定义是:“The correction to

compensate for the physical difference compared to the flow in free air.”<sup>[1]</sup>也就是说,风洞修正的目的是为了贴近车辆真实路面行驶的工况。重卡牵引车及载货状态属于“非连续体”(形体不连续),传统的修正方法不完全适用于该类形体的结果修正,需要使用道路试验和数值模拟相结合的方式深入研究。从本文对NRC风洞的试验结果修正研究和误差分析可以得出如下结论:

(1) 利用NRC提供的原始数据、试验报告及其他可参考的修正方法,使用Maskell与Thom-Herriot修正方法相结合的方法,推导出的修正公式与NRC的修正公式较为接近。经过公式处理的试验结果,与试验报告均有较高的吻合度。

(2) 基于重卡牵引车及牵引车加载货箱工况的非连续体形体特点,通过对试验误差的分析可以看出传统的修正方法不适合非连续体类车型的特点,需要进一步深入研究。

(3) 基于现有的试验手段和测量设备,难以在试验中和试验后进行全方位的测量和对结果的解耦。数值模拟和道路试验是值得尝试的工具,特别是在重卡类型的缺少风洞资源,且风洞难以对结果进行较好修正的限制下。

#### 参考文献:

- [1] HUCHO W H. Aerodynamics of road vehicles [M]. 4th ed. SAE book No.R-177, 1998.
- [2] THOMAS S. Aerodynamics of road vehicles [M]. 5th ed. SAE book No.R-430, 2016.
- [3] LAROSE G, TANGUAY B, VAN EVERY D, et al. The new boundary layer control system for NRC's 9 m×9 m Wind Tunnel [C]// AIAA Technical Paper, AIAA-2001-0455, 2001.
- [4] LEUSCHEN J, MÉBARKI Y. Examination of the maskell III blockage correction technique for full scale testing in the NRC 9-meter wind tunnel [J]. SAE Int J Commer Veh, 2012, 5 (2):640.
- [5] JASON L, YOUSSEF M. Examination of the maskell III blockage correction technique for full scale testing in the NRC 9-meter wind tunnel [C]// <https://doi.org/10.4271/2012-01-2047> <https://doi.org/10.4271/2012-01-2047>. SAE Technical Paper, 2012-01-2047.
- [6] OLSON L E, ZELL P T, SODERMAN P T, et al. Aerodynamic flow quality and acoustic characteristics of the 40-by 80-foot test section circuit of the national full-scale aerodynamic complex [C]// SAE International Powered Lift Conference and Exposition. SAE Technical Paper 872328, 1987.
- [7] SMITH J, MIHELIC R., GIFFORD, B, et al. Aerodynamic impact of tractor-trailer in drafting configuration [J]. SAE Int J Commer Veh, 2014, 7(2): 619.
- [8] VAN D, ROSS R. Aerodynamic and aeroacoustics design aspects, construction 1976—1980, design manufacturing calibration of the German-Dutch wind tunnel (DNW) [R]. Germany: DNW, 1992.
- [9] WILLEMSSEN E, MERCKER E. Empirical blockage correction for full-scale automotive testing on straight trucks in a wind tunnel [R]. Netherlands: German-Dutch wind tunnel DNW, NLR TR 83065 L, 1983.
- [10] SODERBLOM D, ELOFSSON P, HYVÄRINEN A. Numerical investigation of blockage effects on heavy trucks in full scale test conditions [C]// SAE 2016 World Congress and Exhibition. SAE Technical Paper, 2016-01-1607, 2016.
- [11] 武藤真理. 汽车空气动力学 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1989.
- [12] MARI Muto. Vehicle aerodynamics [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1989.
- [13] SAE International Surface Vehicle Recommended Practice. SAE wind tunnel test procedure for trucks and buses: SAE Standard J1252 [S]. [S.I.]; SAE, 2012.
- [14] WICKERN G. On the application of classical wind tunnel corrections for automotive bodies [C]// SAE 2001 World Congress. SAE Technical Paper 2001-01-0633, 2001. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0633>.
- [15] MERCKER E. A blockage correction for automotive testing in a wind tunnel with closed test section [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 22:149.
- [16] ORTEGA J, SALARI K, BROWN A. Aerodynamic drag reduction of class 8 heavy vehicles: a full-scale wind tunnel study: LLNL-TR-628153 [S]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2013.
- [17] HAFF J, JÖNSSON M, LOOSE S, et al. Reliability of engineering methods in heavy-vehicle aerodynamics [EB/OL]. SAE Technical Paper 2017-01-7001, 2017. <https://doi.org/10.4271/2017-01-7001>.
- [18] 庞加斌, 刘晓晖, 陈力, 等. 汽车风洞试验中的雷诺数、阻塞和边界层效应问题综述 [J]. 汽车工程, 2009, 31(7): 609.
- [19] PANG Jiabin, LIU Xiaohui, CHEN Li, et al. A review on reynolds number, blockage and boundary layer effect in automotive wind tunnel tests [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 609.