

# 基于 CiteSpace 的汽车空气动力特性研究

马帅威

(重庆交通大学机电与车辆工程学院,重庆 400074)

【欢迎引用】马帅威. 基于 CiteSpace 的汽车空气动力特性研究[J]. 汽车文摘, 2023(2): 20-28.

【Cite this paper】MA S W. Research on Automotive Aerodynamic Characteristics Based on CiteSpace[J]. Automotive Digest(Chinese), 2023(2): 20-28.

【摘要】汽车空气动力特性对汽车的动力性、经济性、操作稳定性和舒适性有着重要影响,为总结汽车空气动力特性的研究现状和发展趋势,通过使用 CiteSpace 可视化文献计量工具对汽车空气动力特性进行图谱分析。以 2000—2022 年中国知网(CNKI)数据库中收录的有关汽车空气动力特性的中文文献作为数据样本,对年份发文量、期刊来源类别、研究机构、学者以及关键词进行可视化分析,并生成相关的网络图谱。结果表明:以“汽车空气动力特性”为主题的研究持续受到学术界的关注,该领域的研究对相关重点实验室具有一定的依赖性,未来研究仍着眼于气动阻力、侧风稳定性和气动噪声方向,提出 3 种有重要研究意义的降低气动阻力方法,表明侧风稳定性的研究具有重要意义,主动控制方法及空气射流方法已经成为降低气动噪声值得探索的新途径。

关键词:空气动力特性 汽车 研究脉络 CiteSpace

中图分类号:U461.99 文献标识码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220176

## Research on Automotive Aerodynamic Characteristics Based on CiteSpace

Ma Shuaiwei

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

【Abstract】The aerodynamic characteristics of automobiles have important influences on the power, economy, operation stability and comforts of automobiles. In order to summarize the research status and development trends of automobile aerodynamic characteristics, the CiteSpace, a visualization bibliometrics tool, is applied to analyze the spectrums of automobile aerodynamic characteristics. The Chinese literatures on the aerodynamic characteristics of automobiles included in the China Knowledge Network (CNKI) database from 2000 to 2022 were utilized as data sample to visualize and analyze the chronological publication volumes, journal source categories, research institutions, scholars and key words to generate relevant network graphs. The results show that research on the topic of “Automotive Aerodynamics” has been continue to receive academic attention, research in this area has been depending on the relevant key laboratories, future research will be still focusing on aerodynamic drags, crosswind stabilities and aerodynamic noises. 3 important methods to reduce aerodynamic drag are proposed. It is shown that the importance of studying crosswind stability and active control method and air jet method are new ways, which are worth of exploring for reducing aerodynamic noises.

**Key words: Aerodynamic characteristic, Automobile, Research lineage, CiteSpace**

## 1 前言

汽车空气动力特性是汽车的重要性能,它是指汽车在流场所受到的以阻力为主的包括升力、侧向力的气动力和其相应的力矩作用而产生的车身外部、内部的气流特性、侧风稳定性以及气动噪声特性<sup>[1]</sup>。随着高等级公路的发展和汽车行驶速度的提高,对汽

车操作稳定性、安全性和舒适性提出了越来越高的要求。研发具有良好空气动力特性的汽车,可提高汽车的操作稳定性、动力性和经济性。降低汽车的气动噪声,可保障乘坐舒适性。

本文将基于汽车空气动力特性领域的文献数据,通过文献计量分析的方式对该领域现有的研究及其未来研究趋势进行分析总结。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究方法

由美国德雷克赛尔大学的陈超美教授开发研制的基于Java环境运行的科学文献计量自动化软件CiteSpace,是一个面向科研评价领域的常用可视化分析工具,是专门针对科研文献数据设计的可视化分析软件。此软件可以挖掘已有文献的内在联系和规律。通过对文献检索数据进行共现、被引频次、时区分布等一系列的分析,得出科学的、客观的评价<sup>[2-4]</sup>。本文是在Java 8的环境下使用CiteSpace(5.8.R3)软件中的CNKI分析模块对相关文献进行知识图谱分析。

### 2.2 数据来源

以中国知网(CNKI)中收录的期刊库检索结果来进行分析。检索条件为:高级检索;主题包括:汽车空气动力学特性、空气动力学、流场、气动、风振、气阻;检索时间设置为“2000年到不限”;来源类别选择如表1所示。检索时间为2022年7月1日。进行手工剔除无效期刊和经过CiteSpace软件的除重,最终得到668条检索结果。

表1 期刊来源类别

期刊来源类别	英文名称和缩写
科学引文索引	Science Citation Index, SCI
工程索引	Engineering Index, EI
中文社会科学引文索引	Chinese Social Sciences Citation Index, CSSCI
中国科学引文数据库	Chinese Science Citation Database, CSCD

本文首先从发文章量、期刊来源类别、研究机构和研究学者方面对研究现状进行统计分析,其次通过关键词频次及聚类分析网络对文献进行图谱分析,最后通过关键词突现展现汽车空气动力学特性领域研究热点。

## 3 文献统计分析

### 3.1 发文章量统计

根据期刊发文章量统计结果,可以得到每年的文献发表数量如图1所示。

由图1可知,汽车空气动力学特性研究的发文章量从整体来看呈现增长趋势。在2010年发文章量陡增是由于“21届道路和轨道车辆动力学国际研讨会”的举行。从2013—2017年有关研究的发文章量持续增加是由于2015年由中国汽车工程学会主办的“首届汽车空

气动力学研讨会”成功举办。由于本文仅统计了核心及以上期刊,相关研究的发文章量并没有显得那么多。但总体来看从2000—2022年间相关主题发文章量呈现上升趋势。说明以“汽车空气动力学特性”为主题的研究持续受到学术界的关注。

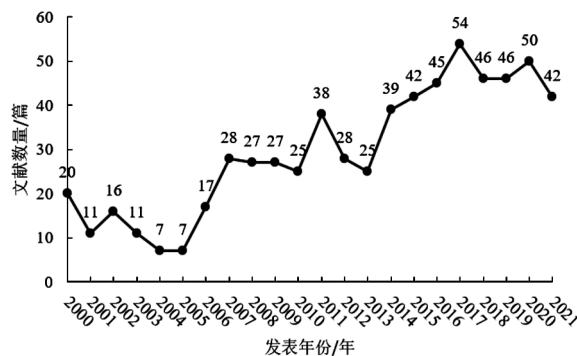


图1 汽车空气动力学特性研究发文章量趋势

### 3.2 期刊来源类别分布统计

利用CiteSpace软件对期刊来源分布进行整理分析,分别对检索的4类期刊来源所含期刊数量进行统计分析(按照最高等级来源类别),如表2所示。

表2 期刊来源类别分布

期刊来源类别	期刊数/种	占比/%
SCI	1	0.91
EI	39	35.45
CSCD	20	18.18
核心	50	45.45
合计	110	100.00

统计共有110种期刊,其中EI期刊有39种,核心期刊有50种。

期刊来源等级一定程度上反映了该领域文献的学术权威性,可通过文献的来源评价该文献的学术价值。将空气动力学的发文章量30篇及以上的期刊进行统计,如表3所示。

表3 期刊空气动力学发文章30篇及以上统计

期刊名称	类别	空气动力学发文章量/篇	出版文献量/篇	复合影响因子(2021)
汽车工程	EI	121	6 037	1.845
吉林大学学报(工学版)	EI	39	7 972	1.410
同济大学学报(自然科学版)	EI	33	9 443	1.442
汽车技术	核心	32	8 508	1.558
机械设计与制造	核心	30	22 065	0.796

从表3可以看出空气动力学的发文章量最多的期刊





图3 研究学者合作网络

“湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室”；其次，以杨志刚为首的科研团队其发布期刊多数署名机构为“同济大学上海地面交通工具风洞中心”；最后，以胡兴军为首的科研团队其发布期刊多数署名机构为“吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室”。由此可见，学术论文的先行者大多依托于国家级实验室进行研究。中介中心性大于0.1的学者有：谷正气、胡兴军、汪怡平，这表明这些学者与其他学者的合作较多，在学者的合作当中起到一定的桥梁作用。

表5 2000—2022年发文15篇以上的学者

序号	学者	年份/年	发文量/篇	中介中心性
1	谷正气	2000—2022	97	0.12
2	杨志刚	2010—2022	43	0.07
3	胡兴军	2003—2022	42	0.12
4	傅立敏	2000—2022	30	0.03
5	杨易	2008—2022	27	0.01
6	张英朝	2006—2022	24	0.03
7	王靖宇	2000—2022	22	0.01
8	汪怡平	2009—2022	19	0.12
9	何忆斌	2007—2022	16	0.01

#### 4 研究趋势与热点分析

作为文献主要内容代表的关键词具有重要意义，对得到的汽车空气动力学特性研究的文献数据，实行关键词频次、聚类、突现分析，可以更清晰地认识该领域。

##### 4.1 关键词频次分析

对文献数据进行关键词频次分析，得到相关的统

计数据。共得到473个关键词，出现频次20次以上的关键词如表6。

表6 2000—2022年关键词共现

序号	关键词	年份/年	频次/次	中介中心性
1	数值模拟	2000	163	0.25
2	汽车	2000	147	0.47
3	气动噪声	2003	91	0.23
4	风洞试验	2000	90	0.11
5	气动阻力	2000	58	0.33
6	侧风	2001	51	0.10
7	气动特性	2000	48	0.14
8	车辆工程	2003	48	0.17
9	CFD	2000	40	0.44
10	大涡模拟	2005	31	0.18
11	优化	2000	27	0.11
12	流场	2000	27	0.41
13	外流场	2000	23	0.12

若以出现的频次和中介中心性体现关键词的重要性，则可从表5看出，其中除了汽车与车辆工程等基础的关键词，还包括了汽车空气动力学特性的研究和试验方法的关键词：数值模拟、CFD、风洞试验等，以及研究内容的关键词：气动噪声、气动阻力、侧风、外流场等。

##### 4.2 关键词聚类分析

作为数据挖掘技术其中之一的聚类分析，可以对特定领域中的专有术语或背景分类进行标识与探析，将所收集到的数据通过一定的算法转变为多个结构化集群，突出相关知识领域的主题分布

与组织结构,从而直观地展现该领域研究的主题脉络<sup>[4]</sup>。

在图谱网络结构中,对于所生成的聚类网络的稳定度可以用模块值( $Q$ 值)来度量。一般认为 $Q$ 值大于0.3时,表示聚类结构显著,效果较好。聚类的清晰度,即聚类内部节点的相似程度,则是通过平均轮廓值( $S$ 值)来度量,一般认为 $S$ 值大于0.5时,表示聚类内部匹配程度高,聚类合理,而当 $S$ 值大于0.7时,则表示这是高效和令人信服的聚类结果<sup>[5]</sup>。

图4为以汽车空气动力特性研究为关键词的共现聚类图谱。图中较为明显的关键词与对应的聚类名称同质性最高。图4中 $Q$ 值为0.498,大于0.3,说明聚类结构显著。 $S$ 值为0.7607,大于0.7,说明这是一个高效和令人信服的聚类结果。

将图4转换成Timeline视图,图5所示为截取的一部分关键词聚类时间图谱。在图5中,最顶层为时间轴,时间递进为左到右;从上到下表示聚类规模由大到小,聚类规模越大说明越重要;每一条水平线放置着相同聚类,通过时间轴的演进可以看到某一聚类的研究和演进过程。图5中关键词的连线终点表示该关键词在某聚类中持续到了某一年。关键词出现次数越多,则其节点越大。

如图5所示的关键词聚类有10个集群,可看出是以汽车为研究对象,以数值模拟和风洞试验为主要研究手段,向气动阻力、侧风、气动噪声、优化、汽车造型、湍流模型多方向发展。下面以数据样本中有关气动阻力、侧风、气动噪声的文献来研究汽车空气动力特性的主题脉络。

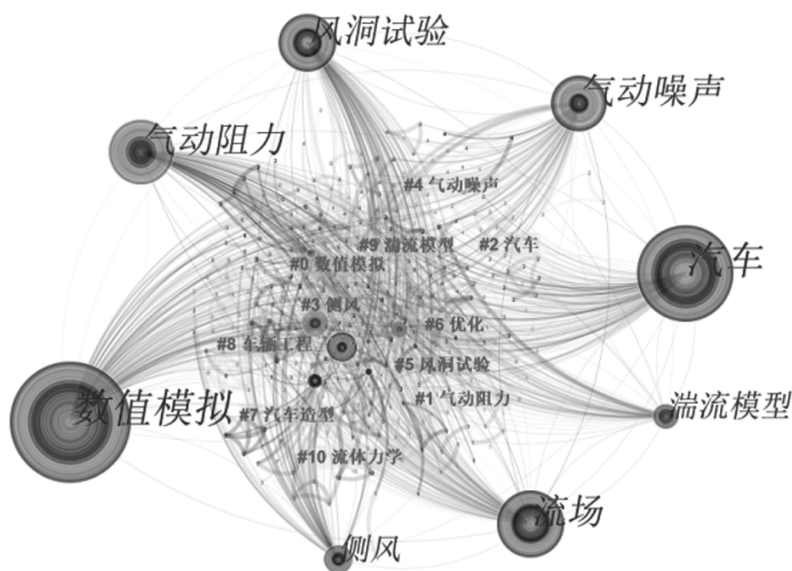


图4 关键词共现聚类

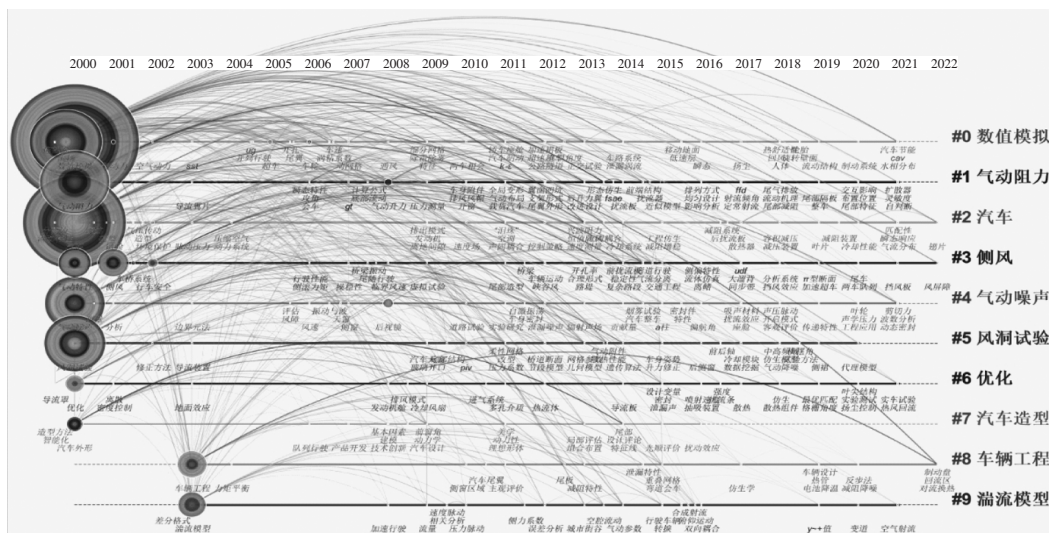


图5 关键词聚类时间线图

#### 4.2.1 气动阻力研究分析

在气动阻力领域中主要研究如何进行减阻。控制气动阻力的方法主要分为被动控制方法和主动控制方法。被动控制减阻的方法有:

(1)优化汽车部件方面:车轮辐板优化、车尾优化、非光滑表面等;

(2)加装气动附件:加装底部隔板、形态仿生的扰流板、导流板等。

主动控制减阻的方法有:加装可主动控制的涡流发生器、合成射流、加装可控的等离子激励器、设计可主动抽吸和喷射气体的装置。

被动控制减阻方法优点是结构简单易实现且应用广泛,缺点是控制效率较低而且在进行优化汽车部件和加装气动附件时,容易增加整体研发成本。其中在优化汽车部件方面,方健等<sup>[6]</sup>对车轮在不同工况下的气动特性进行CFD仿真与风洞试验分析,探讨了车轮转动时所引起的流场作用机理,提出车轮辐板开口封闭的减阻方案,结果表明可有效降低车轮的气动阻力。杨小龙等<sup>[7]</sup>对货车的尾部上翘角进行优化研究,发现10°的尾部上翘角可达到最好效果。周海超等<sup>[8]</sup>对不同形状的汽车尾部与其产生的流场结构和气动阻力进行研究,最后通过数值模拟发现具有圆角过渡的汽车尾部可达最高6.4%的减阻效果。在加装气动附件方面,胡兴军等<sup>[9]</sup>对货车的底部隔板进行研究,通过在货车简化模型上加装不同的底部隔板进行对比,分析了加装前后的气动阻力系数及流动特性。田丽梅等<sup>[10]</sup>基于车尾加装形态仿生的扰流板,并和在此基础上后窗和后备箱表面添加棱纹形态仿生功能表面进行研究比较,发现后一种方案的减阻效率更低。谢金法等<sup>[11]</sup>对汽车模型顶部布置3种不同排列方式的凹坑型非光滑表面进行分析,发现矩形排列方式的凹坑型非光滑表面减阻效果最好。

主动控制减阻方法在汽车上的应用较少,其优点是在可在极小或不改变汽车形状的情况下进行控制减阻,而且是实时的、动态的;缺点是需要外部能量的参与、技术结构复杂。应用主动控制减阻的方法有:杨易等<sup>[12]</sup>将喷射速度可变的主动控制涡流发生器与非光滑表面减阻的思想结合来改善尾涡结构,从而达到减阻的效果。崔文诗等<sup>[13]</sup>通过大涡模拟仿真方法研究合成射流激励频率对车辆气动阻力的影响,分析出合成射流激励的不同频率可以实现车辆减阻效果,而且不同激励频率下的频谱有不同的作用。胡兴军等<sup>[14]</sup>将介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge, DBD)等离

子体激励器放置在Ahmed汽车模型后进行风洞试验,得出通过降低模型的压差阻力,DBD可起到减阻效果,表明如果要在风速不断增加的情况下起到不错的减阻效果,需要更高强度的激励。袁志群等<sup>[15]</sup>设计了汽车底部抽吸控制槽及尾部气流喷射控制槽,研究得出抽吸速度和气流喷射的速度与角度有关,而且气动阻力得到降低,同时进行风洞试验验证了其准确性。王靖宇等<sup>[16]</sup>对表面介质阻挡放电(Surface Dielectric Barrier Discharge, SDBD)等离子体激励器与汽车模型车尾分离流动控制效果进行风洞试验,发现SDBD激励器在10 m/s的风速和17 kV的峰值电压下减阻效果最佳。

综上所述,在降低汽车气动阻力的措施中,车尾减阻、加装底部隔板减阻、主动射流减阻技术具有研究意义。首先,不同种类汽车的尾部气动力和流场差异明显,对车尾减阻的应用发出挑战<sup>[7]</sup>。其次,汽车高速行驶时,由于构造复杂的汽车底部引起的流场也较为复杂,从而影响着整车的气动阻力<sup>[5]</sup>,所以底部隔板减阻仍具有研究意义。最后,主动射流减阻技术对于降低汽车空气阻力来说是较新的研究领域,有待进一步提高。

#### 4.2.2 侧风研究分析

汽车行驶速度不断提高的情况下,外部的侧风因素对行驶的汽车具有巨大的影响。侧风不仅影响着汽车的动力性还对操作稳定性有较大影响,在操作稳定性失控的情况下极易发生安全事故造成人员伤亡。其中侧风分为自然侧风和环境侧风。

自然侧风中汽车行驶稳定性的研究有:江浩等<sup>[18]</sup>对侧风影响下集装箱半挂车易出现跑偏和折腰现象进行运动求解,并对行驶稳定性采用横摆角速度和折转角有关的评价标准,依此标准提出了增加行驶稳定性和安全的措施。傅立敏等<sup>[19]</sup>对不同的侧风角与车轮静止或转动进行数值模拟以研究车辆在侧风环境下对交通安全的影响,发现侧向力与侧风角呈正相关,车轮转动时的模拟情况精度较高。张甫仁等<sup>[20]</sup>研究了汽车5种前车窗倾角在侧风环境下的气流流动分离规律,其中汽车前车窗倾角在35°时的行驶稳定性最好。王德军等<sup>[21]</sup>设计了反步法控制器用来保证汽车在侧风环境下的稳定行驶,而且利用MATLAB软件进行验证,结果表明反步法控制器可以在侧风环境下逐步控制汽车的稳定性。

环境侧风中汽车行驶稳定性的研究有:庞加斌等<sup>[22]</sup>以4种典型车辆研究在强侧风环境下的汽车在桥面行驶的安全性问题,结合桥位风速相关资料与桥梁结构对桥面风速的影响提出概率评估方法,发现行车

安全的主要因素与车辆侧滑密不可分,而且侧风对大跨度桥塔影响最大。王桂花等<sup>[23]</sup>以3种类型的汽车为研究对象,使用CFD方法分析了风-车-桥耦合系统中的汽车气动特性,发现汽车在大跨斜拉桥干路面的速度高达80~100 km/h时,易发生倾覆的是大客车与半挂车,易发生侧滑的是小汽车。李菁等<sup>[24]</sup>研究了在峡谷大桥与隧道连接段行驶的集装箱货车易受到侧风带来的安全威胁,使用CFD分析了侧风对气动力的非稳态影响,并提出孔隙率为0.5、截面形状为矩形、挡板间隙为0.5 m、高度分别为3 m和4 m的风障方案。姜康等<sup>[25]</sup>分析大跨度桥梁行驶的轿车在侧风环境下的行车安全,依此建立车辆动力学仿真模型,将行车风险评价指标设为侧向偏移,并预测安全车速,结果表明该模型效果较好。陈丰等<sup>[26]</sup>构建了桥隧连接段驾驶模拟平台,招募30名驾驶员进行模拟驾驶货车与小汽车在6种侧风作用下进行行驶稳定性对比,并收集反应数据,结果表明易产生侧滑的是小汽车,而在持续侧风作用下厢式货车会出现严重的侧向偏移。

综上所述,高速汽车在受到侧风的作用时,会引起作用于汽车的气动力和力矩发生改变,从而影响汽车的侧风稳定性及安全性。因此,研究汽车在侧风环境下的操作稳定性,对提高汽车的主动安全性具有重大意义。

#### 4.2.3 气动噪声研究分析

汽车高速行驶时会产生气动噪声。长时间处于过高的气动噪声环境会使人感到疲惫,会分散驾驶员的注意力和影响乘员的乘坐舒适性。所以对汽车的气动噪声进行研究和降噪处理是极有必要的。被动控制与主动控制为汽车气动噪声的主要控制方法。在被动控制方法中,有5项应用研究。

##### (1)应用于后视镜气动噪声研究

陈鑫等<sup>[27]</sup>以DrivAer汽车模型的外后视镜罩为研究对象,研究其减阻降噪机理,将仿生非光滑结构应用于外后视镜罩的造型表面,结果表明可有效降低气动阻力和气动噪声;童高鹏等<sup>[28]</sup>为了找到对气动噪声的影响最小的后视镜全景影像镜头安装位置,研究了后视镜全景影像镜头分别安装在靠近车身处、后视镜中间处以及远离车身处3种方案所引起的气动噪声,最后进行实车风洞噪声试验对比。

##### (2)应用于A柱气动噪声研究

王俊等<sup>[29]</sup>为降低侧风下某车型的风噪,在A柱加装装饰件以达到效果;王毅刚等<sup>[30]</sup>为有效控制气动噪声,将流条加装在A柱的上沿侧风方向,其中加装16

个扰流条的方案可达到效果最佳。

##### (3)应用于冷却风扇气动噪声研究

肖红林等<sup>[31]</sup>研究大型车辆冷却风扇的风扇流量、转速和扇叶数对气动噪声的影响及关系;朱茂桃等<sup>[32]</sup>基于正交实验与RSM对车辆的冷却风扇进行参数优化,并取得良好效果。

##### (4)应用于天窗气动噪声研究

谷正气等<sup>[33]</sup>对气动噪声的CFD仿真归纳出建立模型、划分网格、进行求解、声学后处理4个步骤,并列出了将导流片安置在天窗的开口前缘、开启天窗到合适位置、将一根立柱置与开窗的中间等5种减噪方法;杨振东等<sup>[34]</sup>基于风洞试验对比有无开槽的天窗扰流器对降噪的效果,验证开槽的天窗扰流器效果更为明显。

##### (5)应用于侧窗气动噪声研究

吴海波等<sup>[35]</sup>对汽车后侧窗出现的风振现象,进行分析并进行优化,最后得到的效果较好且可使汽车的研发周期和后期风洞试验成本降低;谷正气等<sup>[36]</sup>引入一种空气射流方法对天窗和侧窗进行气动噪声的抑制,并对空气射流结构进行优化,对抑制气动噪声有明显效果。

对主动控制方法研究中,袁军等<sup>[37]</sup>提出一种基于主控制滤波器变步长以及次级通道在线和离线建模相互转换的主动噪声控制算法,与已有的算法相比可使降噪量更高;李启良等<sup>[38]</sup>建立主动射流模型并进行优化,将优化后的结构安装至汽车模型中并与原模型进行对比,发现位于后视镜区域的涡流强度降低,前侧窗的总声功率级降低。

综上所述,被动控制方法的应用较多,是目前降低汽车气动噪声的常用措施,主要用于解决后视镜、A柱、侧窗、天窗部件产生的气动噪声。其中谷正气等<sup>[36]</sup>提出的空气射流结构对汽车外形基本没有影响,而且设计和研究空间较大,其控制方式符合电气化和智能化发展趋势,有较高的市场可行性。相对而言,对气动噪声的主动控制方法研究较少,但其方法可有效降低汽车的低频气动噪声,因此可为汽车气动噪声优化提供了新途径。

## 4.3 研究热点

关键词突现即某关键词在某时间段内频次骤增,可体现当时的活跃话题。关键词突现的变化趋势可反映相关领域的研究动态及其发展趋势。

对相关文献进行关键词突现分析,得到关键词突现强度前25的关键词如图6所示。

从关键词突现的结果(图6)来看,关键词“湍流模型”的突现时间最长,因为在对汽车进行流场数值模拟分析时常常会用到湍流模型知识。从突现的强度来看,因为汽车空气动力特性本身就是围绕汽车来展开的,所以“汽车”的突现强度最高不足为奇。突现强度大于4的有数值模拟、气动噪声、湍流模型、后视镜、车辆工程和超车,其次大于3的有气动特性和优化。

Top 25 Keywords with the Strongest Citation Bursts

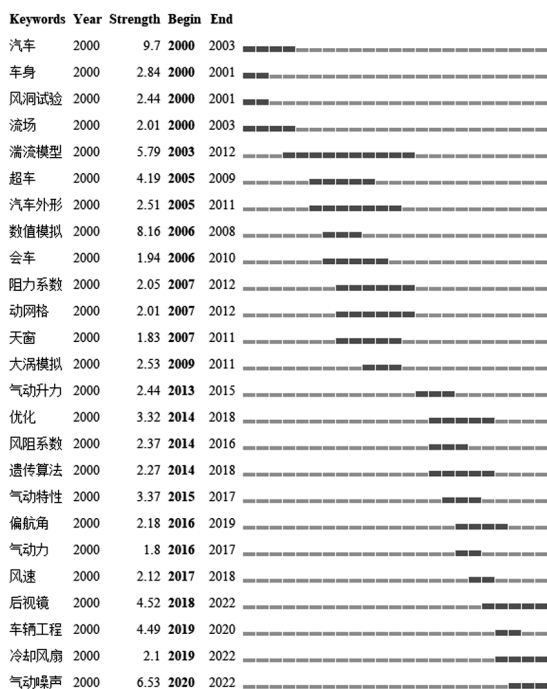


图6 突现强度前25的关键词

从时间上来看,在2000—2001年这2年中,车身、风洞试验和流场是当时的研究热点,其中研究流场的热度持续到2003年。研究湍流模型相关的热度一直持续了从2003持续到2012年。在这10年间,以超车、汽车外形、数值模拟、会车热点关键词不断被迭代或替换。在2013年到2022年这10年期间,又涌现出了气动升力、优化、风阻系数、遗传算法热点关键词。在近几年,汽车空气动力特性的研究热点有后视镜、冷却风扇和气动噪声方面。

(1)后视镜研究内容包括:优化其外型以降低气动阻力,还可研究由后视镜引起的气动噪声。

(2)对于发动机舱中的冷却风扇,通过研究冷却风扇的扇叶角度、弯曲度以及风扇罩的形状以达到更好的冷却效果或减少风扇噪声。

(3)气动噪声的突现强度高达6.53,是近年来关注度极高的研究热点,其研究内容有:分析由后视镜、A柱、车轮罩引起的气动噪声,以及基于不同的分析方

法对气动噪声进行优化。

## 5 总结与展望

本文以CNKI数据库中2000—2022年的汽车空气动力特性领域核心及其以上的中文期刊文献作为样本,使用CiteSpace软件对文献样本进行图谱网络分析。首先从发文量、期刊的来源种类、机构的合作网络、学者的合作网络方面进行分析,对国内汽车空气动力特性的研究进行了简单概括。最后通过关键词的频次分析、聚类分析、突现分析对该领域的研究趋势和热点话题进行分析。结论如下:

(1)从发文量统计来看,以“汽车空气动力特性”为主题的研究持续受到学术界的关注。从机构与学者的合作网络来看,目前大多数机构和学者对湖南大学及其相关国家重点实验室、吉林大学及其相关国家重点实验室等和同济大学及其相关重点实验室有较多的科研合作,那些发文量较多的学者大多数也是依赖与这3个机构,说明汽车空气动力特性领域的研究对实验室方面存在较强的依赖性。

(2)从研究趋势与热点来看,汽车空气动力特性研究的领域主要涵盖3个方面,分别是气动阻力、侧风稳定性、气动噪声。在研究降低气动阻力方面,认为车尾减阻、加装底部隔板减阻、主动射流减阻3种方法具有重大研究意义。在侧风稳定性方面,汽车的侧风稳定性关系到人身安全,所以在汽车空气动力特性研究领域一直极为重要。在气动噪声方面,认为主动控制措施将成为未来的一个新的研究途径,空气射流方法也将成为一种新的研究方向。

### 参 考 文 献

- [1] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [2] CHEN C M. Science Mapping: A Systematic Review of the Literature[J]. Journal of Data and Information Science, 2017, 2(2): 1-40.
- [3] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2017.
- [4] TIMOTHY O, OLAWU M, DANIEL W, et al. A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 183(5): 231-250.
- [5] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [6] 方健, 王夫亮. 旋转车轮气动效应的CFD仿真和风洞实验及减阻优化研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(9): 1006-1012.

- [7] 杨小龙, 胡凯耀. 一种厢式货车被动减阻技术研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 33-37.
- [8] 周海超, 陈青云, 李慧云, 等. 考虑车尾流动结构的被动减阻方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(4): 28-34.
- [9] 胡兴军, 杨博, 郭鹏, 等. 基于底部隔板的厢式货车的气动减阻[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(S2): 108-113.
- [10] 田丽梅, 商震, 胡国梁, 等. 基于形态仿生的轿车升阻特性的数值模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(5): 1283-1289.
- [11] 谢金法, 张靖龙. 凹坑型非光滑单元体排列方式对汽车气动阻力影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(5): 86-90.
- [12] 杨易, 郑萌, 黄剑锋, 等. 基于非光滑表面与涡流干扰的车身气动减阻方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 982-988.
- [13] 崔文诗, 杨志刚, 王国俊. 合成射流激励频率对车辆气动阻力的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1167-1173.
- [14] 胡兴军, 惠政, 郭鹏, 等. 基于等离子体流动控制的车辆减阻试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 10-15.
- [15] 袁志群, 杨明智, 张炳荣. 汽车底部复杂流场的主动和被动控制减阻方法研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(5): 537-544+555.
- [16] 王靖宇, 耿亚林, 惠政, 等. 基于等离子体流动控制的方背式汽车模型减阻研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(6): 753-758+770.
- [17] 郭鹏. 基于尾部流动结构的车辆气动减阻技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [18] 江浩, 余卓平. 集装箱半挂车在侧风作用下行驶稳定性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001(12): 1451-1455.
- [19] 傅立敏, 扶原放. 轿车外流场车轮转动时侧风效应的数值模拟研究[J]. 公路交通科技, 2006(2): 147-150.
- [20] 张甫仁, 张金龙, 屈贤, 等. 侧风中前窗角度对汽车稳定性影响的数值模拟[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(2): 145-149.
- [21] 王德军, 杨千慧, 曲阜, 等. 考虑侧风干扰的车辆稳定控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(3): 859-868.
- [22] 庞加斌, 王达磊, 陈艾荣, 等. 桥面侧风对行车安全性影响的概率评价方法[J]. 中国公路学报, 2006(4): 59-64.
- [23] 王桂花, 张青, 薛晓锋. 基于CFD的桥上车辆行车安全研究[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(2): 28-32.
- [24] 李菁, 史成荫, 汪怡平, 等. 风-桥-隧路况下集装箱货车受侧风影响的非稳态气动特性及防护设计[J]. 武汉理工大学学报, 2019, 41(11): 62-68.
- [25] 姜康, 尹宏程, 冯忠祥. 侧风对大跨度桥梁轿车行车安全影响的仿真分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 145-150.
- [26] 陈丰, 彭浩荣, 邵晓君, 等. 侧风作用下货车和小汽车行驶稳定性对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(9): 10-16.
- [27] 陈鑫, 阮新建, 汪硕, 等. 仿生非光滑车外后视镜罩气动减阻降噪机理研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2020, 47(4): 6-23.
- [28] 童高鹏, 甘伟, 李志伟, 等. 外后视镜全景镜头位置对汽车气动特性的影响研究[J]. 机械强度, 2018, 40(4): 1007-1011.
- [29] 王俊, 龚旭, 董国旭, 等. 侧风下某车型A柱风噪优化研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(10): 1237-1244.
- [30] 王毅刚, 黄晓胜, 危巍, 等. 涡声理论在汽车A柱气动噪声优化中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(2): 107-112.
- [31] 肖红林, 石月奎, 王海洋, 等. 大型车辆冷却风扇数值模拟的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(7): 636-640.
- [32] 朱茂桃, 唐杰, 李娜, 等. 采用正交试验与RSM的车辆冷却风扇降噪研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(4): 9-18.
- [33] 谷正气, 肖朕毅, 莫志姣. 汽车风振噪声的CFD仿真研究现状[J]. 噪声与振动控制, 2007(4): 65-68.
- [34] 杨振东, 谷正气, 谢超, 等. 汽车天窗开槽扰流器的降噪机理试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 26-34.
- [35] 吴海波, 周江彬, 陈蓓, 等. 汽车后侧窗风振问题的研究[J]. 汽车技术, 2016(3): 9-12+25.
- [36] 谷正气, 刘壮志, 杨振东, 等. 汽车风振噪声的空气射流结构优化[J]. 中国机械工程, 2021, 32(6): 681-688+733.
- [37] 袁军, 刘东旭, 吕韦喜, 等. 基于汽车风噪的主动噪声控制系统的研究与设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(10): 9-15.
- [38] 李启良, 杜文海, 王毅刚, 等. 基于主动射流的汽车后视镜区域气动噪声控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1195-1200.

## 【作者简介】

马帅威, 硕士, 重庆交通大学, 研究方向为现代车辆设计方法与理论。

E-mail: 622200990052@mails.cqjtu.edu.cn