

高速列车设计方法研究

GAOSU LIECHE SHEJI FANGFA YANJIU

张曙光 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高速列车设计方法研究

张曙光 编著

中国铁道出版社
2009年·北京

图书在版编目(CIP)数据

高速列车设计方法研究/张曙光编著. —北京:中国铁道出版社,2009. 1

ISBN 978-7-113-09129-3

I. 高… II. 张… III. 高速列车:客车—设计
IV. U271.910.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 017006 号

书 名:高速列车设计方法研究

作 者:张曙光 编著

责任编辑:薛 淳 韦和春 王风雨 王明容

封面设计:崔丽芳

责任校对:张玉华

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社 (100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京佳信达欣艺术印刷有限公司

版 次:2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

开 本:787 mm × 1 092 mm 1/16 印张:20.25 字数:440 千

书 号:ISBN 978-7-113-09129-3/U · 2313

定 价:80.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

自2007年4月18日铁路实施第六次大面积提速以来,在环渤海、长三角、珠三角3大区域和主要干线累计开行了160余组时速200公里及以上的“和谐号”国产高速列车,部分区段运行时速达到250公里;2008年8月1日,我国第一条时速350公里高速铁路——京津城际铁路建成通车,10组CRH2-300和CRH3型时速350公里国产高速列车投入运营,最高运营时速350公里,最高试验时速达到394.3公里,铁路既有线提速的成功实施和京津城际高速铁路的开通运营前后,为系统开展高速列车的科学研究提供了试验验证平台。

京津城际高速铁路由我国工程技术人员首次进行高速列车的系统调试与系统试验,历时181天,累计走行40余万公里,系统试验逐级提升至394.3公里,共进行了72项测试试验和系统评估,涵盖了牵引性能、速度控制、运行阻力、制动性能、动力学性能、车内外噪声等28个方面。在此基础上,重点开展了CRH2-300、CRH3型高速列车动力学性能比较、舒适度与平稳性指标、轮重减载率、线路变坡与车体垂向振动关系、空气动力学对轴重的影响、车间减振器和横向半主动减振器对动力学性能的影响、动车组车轮磨耗规律、噪声试验对比等分析研究,取得了大量试验数据和分析研究结果,为进一步优化高速列车的系统设计提供了丰富的技术资源。

高速列车的设计制造是一个复杂的系统工程,此项工作在我国尚处于起步和初级阶段,本书基于高速列车系统动力学理论所提出的系统设计思想及设计方法,是在实践中不断研究总结所形成的,也是阶段性的收获和体会,随着我国高速列车技术的不断发展,还将进一步丰富与完善。

本书主要参考了京津城际高速铁路的相关试验研究报告,以及轨道交通国家实验室(筹)所做的台架试验与分析计算报告。同时在本书的编著过程中,得到了中国铁道科学研究院、西南交通大学、北京交通大学、南车青岛四方机车车辆股份有限公司、北车集团唐山轨道客车有限责任公司和长春轨道客车股份有限公司等单位和相关人员的大力支持,在此表示感谢。

期望本书能对我国高速列车系统设计有所帮助,不妥之处望给予指正。

2008年12月于北京

1 绪 论	1
1.1 京沪高速铁路和面临的挑战	3
1.1.1 京沪高速铁路和新一代高速列车	3
1.1.2 京沪高速列车运行面临的挑战	4
1.2 高速列车系统动力学	10
1.2.1 高速列车系统动力学问题	10
1.2.2 高速列车系统的力学关系	13
1.2.3 高速列车系统动力学理论	14
1.2.4 高速列车系统(广义)动力学研究	20
2 京津高速列车试验分析	25
2.1 时速 300 ~ 350 km 动车组结构介绍	28
2.1.1 CRH2 - 300 型动车组	28
2.1.2 CRH3 型动车组	31
2.2 时速 300 ~ 350 km 动车组性能分析	34
2.2.1 基于高速列车系统动力学的试验方案和测试技术	34
2.2.2 高速列车系统各环节振动响应对比分析	35
2.2.3 高速列车振动传递关系分析	36
2.2.4 高速列车不同位置车辆振动状态分析	41
2.2.5 会车振动分析	42
2.2.6 运行阻力试验分析	44
2.2.7 车间耦合减振器试验分析	46
2.2.8 半主动控制试验分析	47
2.2.9 弓网试验分析	50
2.2.10 车轮磨耗跟踪试验分析	51
2.2.11 平稳性和舒适度的对比分析	53
2.2.12 线路状况对高速列车动力学性能的影响	55
2.2.13 不同线路条件的动力学性能对比分析	59
2.2.14 安全性分析	60
2.3 新一代高速列车的优化设计	62

2.3.1	基于试验结果的优化提升	62
2.3.2	基于运用需求的优化设计	64
2.3.3	基于高速列车系统动力学理论的优化设计	66
3	速度的设计	77
3.1	临界速度设计	79
3.1.1	影响临界速度的主要因素	79
3.1.2	临界速度设计方法	81
3.2	平稳性设计	83
3.2.1	影响平稳性的主要因素和减振措施	83
3.2.2	平稳性性能的评价	86
3.2.3	基于平稳性要求的悬挂系统设计	87
3.3	轮轨关系设计	94
3.3.1	轮轨关系评价	95
3.3.2	轮对及踏面设计	102
3.3.3	线路不平顺运用要求	108
3.4	弓网关系设计	113
3.4.1	弓网关系评价	113
3.4.2	接触网设计	115
3.4.3	高速受电弓设计	122
3.5	流固关系设计	136
3.5.1	流固关系评价	137
3.5.2	外形设计原则	141
3.5.3	列车流固耦合振动	142
3.6	牵引传动系统设计	150
3.6.1	系统设计思路	150
3.6.2	列车牵引功率设计	150
3.6.3	列车牵引特性设计	151
3.6.4	列车牵引传动系统容量设计	152
3.6.5	新一代高速动车组设计计算算例	153
3.7	制动系统设计	157
3.7.1	常用制动设计	157
3.7.2	紧急制动设计	161
4	舒适性设计	167
4.1	广义舒适度	169
4.1.1	广义舒适度的定义	169

4.1.2	广义舒适度的分类	169
4.2	舒适度因素的影响及控制	170
4.2.1	振动的影响及控制	170
4.2.2	压力的影响及控制	183
4.2.3	噪声的影响及控制	188
4.3	广义舒适度的评价	196
4.3.1	广义舒适度的研究现状	196
4.3.2	广义舒适度的评价方法	197
4.3.3	广义舒适度的研究平台	198
4.3.4	广义舒适度研究的后续工作	201
5	节能环保设计	203
5.1	低阻力设计	205
5.1.1	车体低阻力设计	205
5.1.2	受电弓的低阻力设计	209
5.2	车体轻量化设计	218
5.2.1	车体结构设计基本要求	218
5.2.2	结构轻量化设计的措施	219
5.2.3	车体的模态设计	220
5.2.4	轻量化铝合金车体的结构设计	222
5.3	噪 声	225
5.3.1	高速列车噪声来源及其产生机理	225
5.3.2	高速列车噪声水平、声源识别与控制	230
5.3.3	高速列车主动降噪设计	234
5.3.4	高速列车被动降噪设计	240
6	安全性可靠性设计	243
6.1	结构可靠性	245
6.1.1	不同运动方式的失效行为	245
6.1.2	轮轨摩擦磨损	246
6.1.3	弓网摩擦磨损	253
6.1.4	结构疲劳	258
6.2	载 荷 谱	269
6.2.1	高速动车组结构载荷与载荷谱	269
6.2.2	轴箱载荷测试与识别	271
6.2.3	测试数据处理	275
6.2.4	结构载荷谱统计	276

6.2.5	载荷谱损伤一致性校准	277
6.3	轨道谱	280
6.3.1	轨道不平顺谱计算方法	281
6.3.2	京津城际铁路轨道不平顺分布特征	282
6.3.3	京津城际铁路轨道不平顺特征分析	283
6.4	风载荷安全域	284
6.4.1	风载荷作用下的安全性分析	284
6.4.2	车速对气动力的影响	289
6.4.3	风载荷安全域确定	292
6.4.4	风载荷安全域确定方法的可靠性	294
7	高速列车系统服役性能设计	297
7.1	高速列车服役性能分析	299
7.1.1	踏面磨耗	299
7.1.2	轮对安装形位误差	301
7.1.3	偏 载	303
7.1.4	一系定位刚度	305
7.1.5	抗蛇行减振器	305
7.1.6	车间减振器	306
7.2	高速列车系统动力学研究体系	307
7.2.1	高速列车系统动力学研究体系	307
7.2.2	动力学仿真研究体系	309

1

绪

论



约1 318 km的京沪高速铁路将是世界上线路最长的高速铁路。

京沪高速列车是京沪高速铁路的核心技术装备。为全面支撑中国高速列车技术自主创新的重大战略需求,铁道部与科技部于2008年2月26日共同签署了《中国高速列车自主创新联合行动计划》。一场围绕高速列车的基础研究、关键技术、样机研制和产业化生产,由国内著名高校、科研院所和铁路工厂参加的京沪高速列车自主创新联合行动已经启动。京沪高速铁路运营的新一代中国高速列车具备如下特性和先进性:

(1) 速度最快

京沪高速列车的平均速度达到320 km/h,持续运营速度达到350 km/h、设计速度达到380 km/h、最高试验速度达到400 km/h以上。这一速度指标远远超过当今世界高速列车运营的平均速度240 km/h左右、最高运行速度320 km/h的国外最高水平。

(2) 密度最高

在京津城际铁路成功实现空地结合的CTCS-3D的基础上,京沪高速铁路将采用更加先进的、中国高速铁路独有的CTCS-3高速列车运行控制和网络化运营组织技术,实现高速列车以最小3 min的间隔追踪连发。

(3) 运量最大

宽车体、长编组、多定员、良好的启动和制动性能,在高速度、高密度和网络化运营组织条件下客运周转量达到世界第一。

(4) 环境友好

每小时人均牵引功率消耗不大于18 kW,运营过程实现污染物零排放,车内外噪声控制水平不低于国际先进水平。

(5) 良好的综合舒适性

低噪声、低振动、低冲动,适宜的车内空气质量,宽敞的车内乘坐空间、完备的车内服务设施,数字化的旅客服务系统,保证了良好的旅客乘坐舒适性。

(6) 高可靠性与安全性

安全相关设备具有足够的冗余度;对影响行车安全的关键部件,以及所有电气系统实施动态监控;高速列车防灾能力不低于国际先进水平;在风、雪、雨、雾、雷等恶劣气候条件下,仍能保证安全运行。

1.1.2 京沪高速列车运行面临的挑战

开篇提到的高速列车的生存原则告诉我们:需要有良好的社会、经济和科技基础,以保证高速铁路的施工、运行与维修需要,才能建设好高速铁路。这其中科技基础是最重要的,修路亦是,造车亦是。

对于高速列车而言,我们不仅要攻克高速转向架技术、轻量化车体技术、牵引传动技术、制动技术、网络技术、辅助供电技术等关键技术,更要从创新的源头——基础研究开始。为此在国家科技支撑计划项目“中国高速列车关键技术研究及装备研制”中,第一课题就是“共性基础及系统集成技术”,希望从基础研究开始,进行系统研究。那何谓共性基础?事实上,前面列举的关键技术的基础理论之核心是系统动力学。转向架技术实际



上就是反映动力学性能的技术,无论是运动稳定性、运行平稳性还是安全性,与其说是转向架设计,还不如说是动力学性能和参数的设计;车体技术,除了车体结构成形技术,其他在车体设计中相关的刚度、模态设计技术也是在动力学研究基础上形成的,而车体的外形设计技术更是建立在空气动力学的基础上;车体和转向架设计都要进行结构疲劳强度设计,但设计的依据是来自动力学仿真计算或试验结果的动载荷。牵引和制动的计算依据是列车的动能,故牵引制动计算是建立在列车纵向动力学基础上的,而牵引和制动过程中的纵向冲动和纵向加速度限制也是动力学性能所要求的;列车的运行控制,也是应该基于车辆特征、线路特征和供电系统特征的系统动力学理论。由此可以看到在高速列车设计中系统动力学的重要性和广泛性,为此,我们把系统动力学问题的研究列为共性基础研究。事实上,制约列车运行速度提高的内在因素和外部限制也都源于系统动力学问题。

1. 高速列车自身制约因素

铁路诞生至今将近有 200 个年头,但高速列车的诞生至今还不到 50 年。随着法国人一次又一次刷新高速列车的试验速度,到目前为止,已经达到不可思议的 574.8 km/h,比采用无接触的低温超导磁悬浮列车的最高试验速度仅仅低了 10 km/h。随着京津城际铁路的开行,列车最高速度达到了 350 km/h,人们对于我国发展高速列车,并进一步提高列车速度毫不怀疑。事实上,随着列车运行速度达到 350 km/h 以上,列车速度再进一步提高是相当困难的,因为它受到诸多限制。而且这些挑战,首先是来自于高速列车自身。

(1) 系统失稳

高速列车尽管复杂,但理论上它是一个确定的运行系统,在运动系统中,最大的挑战莫过于运动失稳。

高速列车采用复杂的动车组形式,采用先进的牵引、制动和网络控制,当我们抛开这些复杂的电气设备,仅仅考虑车辆机械系统本身,这时的车辆系统和老式的火车就没有本质的区别,都由轮对、转向架构架和车体这三个基本质量单元及一系和二系悬挂组成。这是一个典型的机械系统。一般的机械系统,当参数固定时,其振动特性取决于频响特性,当然,一般的机械系统都要避开共振区,以保证其运行的平稳性。对于铁路车辆来说,它不再是一般的机械系统,它的特殊性来自于轮轨接触。轮轨关系尽管在理论上是确定约束,但轮轨接触的几何特征和力学特征均具强非线性特征,而轮轨蠕滑力所扮演角色是对轮对运动进行导向,实现轮轨的对中,然而蠕滑力在铁路车辆的运行过程中也同时起着系统阻尼的作用,而这一阻尼参数会随着车辆运行速度的提高而降低,从而就有可能导致系统阻尼无法遏止车辆的系统振动,车辆系统从稳定系统变成不稳定系统。

一旦铁路车辆出现系统失稳,轮对就将出现蛇行运动,轮对在两根钢轨间大幅度地往复摆动,这不仅使得车辆系统的振动加剧,更可怕的是极容易导致脱轨事故,这对高速列车来说,问题就更加严重。因此,保证系统稳定是高速列车动力学性能的首要任务。

(2) 系统振动

车辆沿轨道运行时,由于线路等扰动,使车辆系统各部件产生振动。车体的振动影响乘坐舒适性,而构架、轮对等的振动主要影响各部件的结构可靠性。高速列车各部件长期暴露在随机载荷的环境中,其结构可靠性是高速列车安全运行的重要保障。振动的加剧



势必产生更大的载荷,对各部件产生疲劳破坏,结构可靠性降低。

车辆系统振动的激励源主要包括:轨道不平顺、轨道刚度和几何状态变化、弓网振动、车轮不圆和擦伤、高速列车和空气的动态作用。其中轨道不平顺引起机车车辆产生振动是公认的主要原因,尤其是高速列车,轨道不平顺对其振动的影响显著增大。在列车低速运行时被认为是很小的不平顺,例如幅值几个毫米的波长 40 m 以上的不平顺,在车速达到 300 km/h 以上时都会引起很大的振动^[2]。因此,在线路条件和车辆条件确定的情况下,限制振动,也就相当于限制了列车的运行速度。

(3) 列车脱轨

众所周知,脱轨是高速列车最严重的事故之一,列车脱轨事故的发生将给人们的生命和财产安全带来重大损失。国外曾经发生过多次高速列车脱轨事故,均造成了重大的人员伤亡,其中最惨烈的是发生在 1998 年的德国 ICE 高速列车脱轨事故,造成 100 多人死亡。

脱轨可以分四类:第一类是人为事故类脱轨,它包括铁路设施被破坏、行车组织失误等非正常条件下引起的脱轨。这类脱轨和列车的运行速度无直接关系;第二类是灾害类脱轨,它是由地震、风沙、滑坡和泥石流等自然灾害引起的脱轨。这类脱轨和列车的运行速度也无直接关系;第三类是失效类脱轨,它是由于机车车辆结构或接触表面失效所引起的脱轨。而失效往往和速度提高、振动加剧有关,因此,这类脱轨和列车的运行速度相关;第四类是固有特性类脱轨,该类脱轨是由高速列车动力学性能不好所导致的,如列车的运动失稳、轮重减载等,这类脱轨和列车的运行速度直接相关,列车运行速度越高,脱轨的可能性就越高,直接制约着列车运行速度的提高。

(4) 结构可靠性

尽管脱轨事故有四种,引发脱轨的程度却不同,其中结构失效引发的事故最多,这包括德国的 ICE 和法国的 TGV 的脱轨事故。结构疲劳和材料失效等可靠性问题同样制约着列车的运行速度。

结构和材料的失效问题是一个普遍存在的问题,在其他机械领域的研究中也倍受关注。但是,高速列车安全服役的失效有着它自身的特殊性。失效基本上都是由于振动或相对运动引起的,对于高速列车来说,相对运动的形式十分特殊,呈现出多样性,基本的相对运动有高速滚动(轮轨滚动副)、高速滑动(弓网和制动摩擦副)、紧配合微动(轮轴和螺纹连接)和结构振动(转向架和车体)四种形式。在振动条件下,不同的相对运动模式就有相应的失效形式,如高速轮轨滚动中的磨损和接触疲劳,高速弓网滑动中的摩擦磨损和电弧烧蚀,轮轴等紧配合中的微动疲劳和表面胶合,结构件的疲劳损伤等;但不管何种运动方法和失效类型,他们都和速度紧密相关。速度越高,振动越烈,失效就越快,高速列车可靠性就越低。可靠性成为列车提速和发展高速铁路的制约因素。

2. 外部制约因素

要满足高速运行要求,首先要求高速列车本身具有良好的品质,但由于高速列车是运行于铁路设施上的,因此制约列车运行速度的还有外部因素。

(1) 接触网波速



接触网为高速铁路提供能源,同时又参与高速列车系统的振动。接触网的振动会影响受流质量,从而影响列车的正常运行,同时会造成接触网和受电弓弓头的磨损,并引起噪声问题^[3]。

在动力学研究中,往往认为接触网的垂向刚度一致性和接触线不平顺是影响弓网受流的重要因素,但这些因素是可以通过结构和参数的优化来减小对弓网受流的影响,而真正制约列车运行速度提高的因素是接触网的波动速度。当车速远小于波动速度时,相当于接触线的变形与接触振动波形一致,运行情况良好;当车速接近波动速度时,接触网的变形受到波动的限制,接触线呈刚性状态,接触网被强行弯曲变形,并产生较大的接触力,这不仅增加接触线的疲劳破坏和摩擦磨损的进程,而且振动导致离线而无法正常受流。因此,接触网的波动速度是制约高速列车最高运行速度的重要条件之一。如果想继续提高列车的运行速度,必须提高接触网的综合张力和减小单位长度的质量,需要在保证导电质量的前提下,研制轻型和具有高抗拉强度的线材,以提高接触网的波动速度。

(2) 轨道波速

国外经验和研究表明,当列车速度达到或超过某种临界速度时,列车将引起轨道结构的强烈振动,主要表现为轨道下沉量的急剧增大,这将严重影响列车运行的安全性和舒适性,甚至引起列车脱轨。同时,通过轨道和路基的传播还将引起铁道线路周边建筑物的强烈振动和结构噪声。

由于轨道-路基系统的振动,并以体波(压缩波、剪切波)和表面波(瑞利波)的形式传播,这些波的波动速度就是轨道的临界速度,它是由轨道结构(含路基)和参数所决定的,是轨道的一种固有特征。根据轨道临界速度的计算方法^[4],轨道临界速度取决于钢轨和轨道的弹性模量,轨道的等效刚度和泊松比。在软土地基时轨道的临界速度约330 km/h,高速列车很容易接近或超过这一速度。当列车速度小于轨道临界速度时,轨道-路基变形传播是一个稳态过程;当列车运行速度接近或大于轨道临界速度时,轨道-路基变形传播将趋向或处于失稳状态。试验结果表明,超过轨道临界速度后,高速列车诱发轨道结构强烈振动的动力系数可高达正常情况下的10倍,这将导致轨道几何状态的恶化,引发行车安全问题,增加轨道维修工作量和费用。日本的新干线在修建过程中就出现过轨道临界速度较低而造成较大损失的情况。欧洲研究认为,要实现运营速度的目标,轨道临界速度必须达到1.5~2倍的运营速度。

从理论上来说,作为弹性地基梁,有砟轨道的“梁”,其质量是钢轨、轨枕和道床质量的和,而无砟轨道的质量仅包括钢轨和混凝土基础。无砟轨道的单位长度上的质量仅为有砟轨道的50%,从而在相同的路基基础情况下,轨道临界速度可提高1.4倍。因此,从提高轨道临界速度的角度,也应当积极采用无砟轨道^[5]。

对于特别松软的地基,应采取“以桥代路”的办法,增大基础刚度,提高轨道临界速度。由于京沪高速铁路是经过了七个省市,连接了华北平原、长江中下游平原,而华北平原的最大特点就是承载层是松软土,长江中下游平原也是松软土,以桥代路成为京沪高速铁路的最大特点,桥梁占到全线长度的80.5%。

(3) 噪声

噪声是结构振动产生的现象。随着列车速度的提高,轮轨相互作用、列车与空气相互作用、弓网振动都迅速加强,其噪声也更加严重。铁路噪声不仅降低了乘客的乘坐舒适性,而且会影响铁路沿线居民的生活。如何控制和减小铁路噪声,使其在乘客和环境的承受范围之内,是国内外高速列车面临的一个棘手问题。

轨道交通噪声是由各种不同类型的噪声组合而成的,通常按噪声产生的部位分类识别。按发生部位的不同,可分为轮轨噪声、空气动力噪声、机电系统噪声、结构物噪声和车内电气设备产生的噪声。由于各个国家具体情况不同,车辆噪声级也不尽相同,很难统一为一个标准^[6]。但不管采用什么样的噪声标准,其目的都是控制高速列车的噪声。在以人为本的现代社会,噪声标准已经成为强制性标准。因此,噪声控制不好就会影响到最终的高速列车运营速度。

(4) 能耗

高速铁路是交通运输体系中最具可持续性和环境友好性的运输模式。作为其核心技术装备,高速列车具有运能大、能耗低、污染小、安全舒适等优势,其单位能耗不到波音747型飞机的3%,不到小轿车的50%,不到磁悬浮列车的20%。在人类社会正面临资源与环境两大挑战的今天,大力发展高速列车技术对于优化运输结构,缓解能源供需矛盾,解决我国交通运输能力供给不足的矛盾,从而对支撑国民经济又好又快发展具有重要意义。

当然,减小能耗的主要途径是减少空气阻力,流线型外形设计,且使列车表面平滑是降低空气阻力的基本策略。但列车运行速度的提高总会带来巨大的空气阻力,往往与列车运行速度是几次方关系(如图1-2所示),当然这就需要巨大的能耗。因此,高速列车运行速度的设置必须考虑能耗的

合理性和经济性,以及由此带来的电气系统和机械系统实施的可能性。

3. 京沪铁路线路特点的影响因素

京沪高速铁路是世界上最长、运行速度最高、密度最大的高速铁路。就350 km/h以上的运行速度而言,京沪高速铁路的一些线路结构特点也会影响列车的高速运行。

(1) 隧道

京沪高速铁路虽然建在平原,但全线有22个隧道,其中最长的西渴马隧道全长达到2 812 m。

当高速列车通过隧道时,列车与隧道内空气间的相互作用也要引起一系列的空气动力学效应,包括隧道入口波、隧道压力波、出口微气压波,隧道会车压力波,列车在隧道内的气动耦合振动,长大隧道内的热环境等^[7]。由于受到隧道空间的限制,列车在隧道内

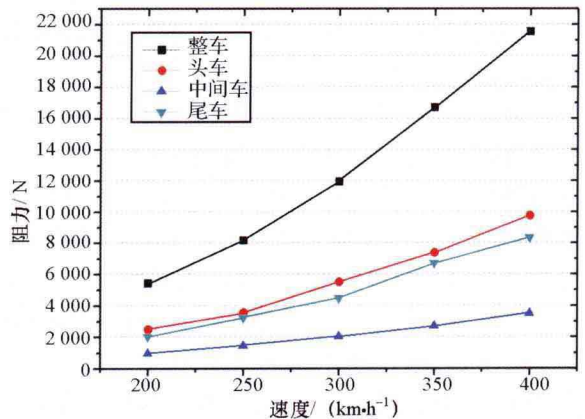


图1-2 不同速度下的空气阻力