

21世纪高等院校规划教材



NEIRANJI
GONGCHENGXUE JICHU

内燃机工程学基础

主编 ◆ 周 斌 董大伟 裴 转



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

西南交通大学重点教材建设基金资助

西南交通大学出版基金资助

21 世纪高等院校规划教材

内燃机工程学基础

主 编 周 斌 董大伟 苕 转

西南交通大学出版社

• 成 都 •

内 容 简 介

全书共分三篇,第一篇为绪论篇,主要介绍内燃机在国民经济中的地位及带来的主要问题、内燃机的基本结构与工作原理以及内燃机的发展等知识;第二篇为内燃机基础知识篇,围绕内燃机工程所涉及的基础理论,介绍内燃机的热力学基础、流体力学、传热学、内燃机的燃料与燃烧热化学、理论力学和材料力学、工程材料、电路电子与控制工程基础、内燃机测试技术、内燃机环境学等知识;第三篇为内燃机设计、制造及安全基础篇,主要介绍内燃机设计理论与方法、内燃机制造技术及机械安全等知识。

本书可作为热能与动力工程类、车辆工程类、交通运输类专业内燃机工程的入门教育用书,也可作为文科类、管理类、计算机类专业普及内燃发动机知识用书,还可作为相关科技人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机工程学基础 / 周斌, 董大伟, 苋转主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2009.9
21 世纪高等院校规划教材
ISBN 978-7-5643-0437-9

I. 内… II. ①周…②董…③苋… III. 内燃机—高等学校—教材 IV. TK4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第161281号

21 世纪高等院校规划教材

内燃机工程学基础

主编 周斌 董大伟 苋转

*

责任编辑 李芳芳

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 13.75

字数: 337 千字

2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-0437-9

定价: 23.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

内燃机的应用遍及国民经济各个领域,使得担负培养工程技术人才的机构需要一本系统地介绍内燃机基础理论的入门教材。本书系统地介绍了内燃机工程的架构,是普及内燃机工程基础知识、基本概念的教材,使学生对内燃机工程有全局的了解,起到开阔学生视野、拓宽专业面、提高学生工程应用能力的作用。

全书共分三篇,第一篇为绪论篇,主要介绍内燃机在国民经济中的地位及带来的主要问题、内燃机的基本结构与工作原理以及内燃机的发展等知识;第二篇为内燃机基础知识篇,围绕内燃机工程所涉及的基础理论,主要介绍内燃机的热力学基础、流体力学、传热学、内燃机的燃料与燃烧热化学、理论力学和材料力学、工程材料、电路电子与控制工程基础、内燃机测试技术、内燃机环境学等知识;第三篇为内燃机设计、制造及安全基础篇,主要介绍内燃机设计理论与方法、内燃机制造技术及机械安全等知识。

本教材在编写过程中,除注重知识性、科学性、科普性、实用性和趣味性外,还力求简单易懂。但因涉及的内容极其广泛,加之作者水平有限,在内容的选择和编排方面,难免会出现欠妥或不当之处,敬请读者批评指正。

本书由周斌(西南交通大学)负责统稿,由周斌、董大伟(西南交通大学)、茆转(沈阳理工大学)担任主编。编写过程中得到了西南交通大学机械工程学院热能与动力工程系许多老师的帮助,研究生邵晓杰、于超、王浩洁、支琪等做了大量的工作,在此谨表谢意。

感谢西南交通大学重点教材建设基金、西南交通大学出版基金的资助。

编 者

2009年6月

目 录

第一篇 绪 论

第 1 章 内燃机在国民经济中的地位及带来的主要问题.....	3
1.1 内燃机在国民经济中的地位	3
1.2 内燃机带来的主要问题	5
第 2 章 内燃机的基本结构与工作原理	10
2.1 内燃机的分类和基本结构.....	10
2.2 内燃机的常用术语.....	15
2.3 内燃机的基本工作原理.....	16
2.4 内燃机的主要性能指标.....	21
2.5 内燃机的型号编制.....	22
第 3 章 内燃机的过去、现在和未来.....	26
3.1 内燃机的孕育.....	26
3.2 内燃机及汽车的诞生.....	27
3.3 内燃机当前的发展水平.....	28
3.4 内燃机的未来.....	34

第二篇 内燃机基础知识篇

第 4 章 内燃机热力学基础	39
4.1 热力系统及气体的热力状态.....	39
4.2 功和热量.....	42
4.3 热力学第一定律.....	45
4.4 理想气体的基本热力过程.....	47
4.5 热力学第二定律.....	52
4.6 内燃机的理想循环.....	54

第 5 章 流体力学	58
5.1 流体力学的研究对象和任务	58
5.2 流体的主要物理性质	59
5.3 流体质点的概念	59
5.4 常用的流体力学模型	60
5.5 分析流体力学的理论基础	60
5.6 作用在流体上的力	61
第 6 章 传热学	62
6.1 传热学的研究对象和任务	62
6.2 热量传递的基本方式	62
6.3 总传热过程和传热系数	65
6.4 内燃机的热负荷故障	67
第 7 章 内燃机的燃料与燃烧热化学	69
7.1 液体燃料	69
7.2 气体燃料	73
7.3 代用燃料	74
7.4 燃料的热值	76
7.5 燃烧热化学	76
第 8 章 理论力学和材料力学	80
8.1 机械工程中的力学问题	80
8.2 理论力学的研究对象和研究方法	80
8.3 材料力学的研究对象和方法	81
8.4 材料力学和理论力学的关系	82
8.5 内燃机曲柄连杆机构的运动与受力	83
第 9 章 工程材料	84
9.1 工程材料的研究内容	84
9.2 工程材料的分类	84
9.3 工程材料的性能	85
9.4 金属材料	90
9.5 非金属材料	95
9.6 内燃机主要零部件的材料和毛坯	97
9.7 内燃机材料的发展趋势	99

第 10 章 电路电子与控制工程基础	100
10.1 电控技术对内燃机性能的影响	100
10.2 电路与电子技术基础	101
10.3 控制工程基础	106
10.4 汽车发动机电控技术概述	109
10.5 汽油机与柴油机电控技术的比较	114
第 11 章 内燃机测试技术	115
11.1 内燃机与测试技术	115
11.2 测试系统的组成	116
11.3 测试装置的常用术语	117
11.4 测试装置的基本特性	118
11.5 不失真测试装置的数学模型	120
11.6 测试中的干扰及正确接地	121
11.7 内燃机测试技术的发展	123
11.8 我国测试技术存在的问题及应对措施	126
第 12 章 内燃机环境保护	127
12.1 近代工业与环境问题	127
12.2 内燃机与环境污染	134
12.3 内燃机排放与控制	134
12.4 内燃机噪声与控制	141
12.5 内燃机振动与控制	145

第三篇 内燃机设计、制造及安全基础

第 13 章 内燃机设计理论与方法	151
13.1 内燃机的设计要求	151
13.2 内燃机类型的选择	152
13.3 内燃机主要结构参数的选择	155
13.4 内燃机总体布置	158
13.5 内燃机设计和试制的一般过程	158
13.6 内燃机的现代设计理论和方法	160

第 14 章 内燃机制造技术	163
14.1 机械零件制造方法的分类	163
14.2 机械制造过程与系统	164
14.3 生产纲领与生产类型	167
14.4 产品质量和加工精度	168
14.5 现代制造技术	170
14.6 内燃机典型零件的机械加工工艺	171
第 15 章 机械安全	175
15.1 机械的组成规律与机械的状态	175
15.2 机械产生的危险	178
15.3 实现机械安全的途径	182
15.4 内燃机的危险因素	202
15.5 内燃机试验安全	206
参考文献	209

第一篇

绪 论

第1章 内燃机在国民经济中的地位及带来的主要问题

1.1 内燃机在国民经济中的地位

内燃机是将燃料燃烧释放出来的热能转变成机械能的一种能量转换装置。在内燃机中,燃料与空气混合、燃烧,产生高温、高压的工作气体,直接推动活塞向下运动,通过连杆、曲轴向外输出机械功。由于这一能量转变过程完全是在发动机的气缸内部完成的,所以称为内燃机。自问世以来,内燃机经历了无数的改进和提高,现代内燃机无论是在结构方面还是在性能方面都已相当完善,成为当今用量最大、用途最广的热动力机械,在国民经济、国防建设以及人们的日常生活中起着举足轻重的作用。

1.1.1 内燃机是使用量最大、覆盖面最广的动力机械

内燃机作为一种动力机械,发出的总功率占全世界所有动力装备的50%以上,广泛应用于交通运输、工程机械、农业机械、矿山、石油、发电、船舶等国民经济重要部门和军事领域。据统计,2008年全球内燃机的总产量达到2亿台左右,中国内燃机的产量约为6000万台。内燃机虽历时百年,但仍在动力机械中占据主导地位,主要是因其独特的优势决定的。

① 内燃机是热效率最高的动力机械。各种常用动力机械的热效率如表1-1所示,可以看出,内燃机的热效率高于其他动力机械。

表 1-1 各种常用动力机械的热效率

动力机械名称	热效率范围
蒸汽机	4%~8%
中型汽轮机	14%~20%
大型汽轮机	18%~38%
燃气轮机	18%~32%
内燃机	20%~46%

② 转速范围宽,功率覆盖面广。内燃机的转速可以从低速船用柴油机的70 r/min变化到高速赛车汽油机的9000 r/min,单机功率可以从小于1 kW(汽油机)变化到 9.7×10^4 kW(船用柴油机),档次齐全,可以适应各种不同用途的需要,其他热机无法与之相比。

③ 结构紧凑,移动方便。内燃机的比质量(单位有效功率所占用的质量)为0.22~22 kg/kW,其实际大小随用途的不同而定,与相同功率的蒸汽机相比要小得多。

④ 启动迅速。内燃机正常启动只需几秒钟,并且很快能达到全负荷,而蒸汽机启动则需要相当长的时间。

⑤ 操作方便。现代的内燃机多采用自动控制装置,并设有多种安全保护,方便了用户的使用。

1.1.2 内燃机是现代汽车和军用车辆的最佳原动机

汽车是人类使用最早的内燃机交通工具,也是现代物质文明的重要标志。汽车工业的发展有力地带动了交通、能源、化工、制造、电子等相关产业的发展,因此,世界上许多国家都将汽车工业作为国民经济的支柱。截止到 2008 年,全世界汽车的保有量已超过 9 亿辆,中国汽车的保有量为 6 467 万辆。据预测,到 2020 年,世界汽车的保有量将达到 12 亿辆,中国汽车的保有量将超过 1.5 亿辆。作为汽车“心脏”的内燃机,将与汽车工业共同发展。目前,出于能源和环保的要求,虽然对电动汽车、太阳能汽车、混合动力汽车等进行了研制与开发,但是,受到技术、成本、实用性等多方面因素的制约,至 21 世纪中叶,内燃机在汽车动力中的主导地位不会有大的改变,仍是汽车的最佳原动机。

军用车辆,如装甲车、坦克、牵引车、移动式发电机组、军用运输车等几乎均采用内燃机作为其动力装置。尽管装甲车和坦克上也有使用燃气轮机的,但是为数极少。所以,内燃机也是军用车辆最重要的原动机。

1.1.3 内燃机是机车、船舶和舰艇的主要动力装备

在世界各国中,铁路是主要的交通干线,特别是内陆国家,铁路承担着最大的运输量。以柴油机为动力装置的内燃机车,自 20 世纪 20 年代问世以来,得到了迅速发展。自 2008 年起的未来 10 年,国际市场对机车车辆的年均需求量大约为:铁路机车 3 780 台,客车 11 200 辆,货车 133 000 辆,动车组 3 250 辆,城市轨道交通车辆 6 700 辆,其中以内燃机作为牵引动力的车辆仍占相当大的比例。2000—2007 年,中国机车保有量的变化如图 1-1 所示。

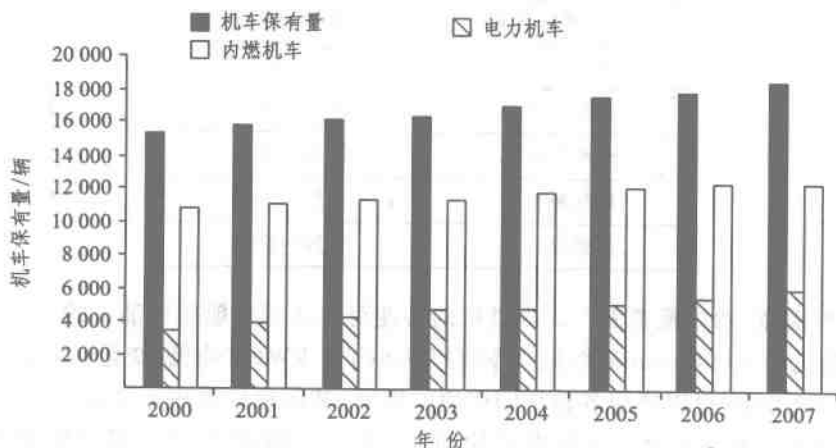


图 1-1 2000—2007 中国机车保有量的变化

从图中可以看出:内燃机车的年保有量增加比较缓慢,而电力机车的年保有量增加较快,这主要是由国家推动铁路电气化所致。到2010年,我国铁路的电气化率将达到34.6%,预计将承担全部客货运量的65%,但这并不意味着我国内燃机车的市场在萎缩,因为仍有相当规模的干线和次级干线需要内燃机车来牵引;支线铁路、专用线、地方铁路、工矿铁路、合资铁路以及全部调车仍要以内燃机作为动力;现有的老旧内燃机,也需要补充更新。所以,从长远来看,内燃机车仍有相当大的发展空间。

内河及海上运输也是交通运输的重要组成部分。由于柴油机不但热效率高,而且还可以燃用价格低廉的重油,甚至劣质油,所以,在船舶领域,柴油机作为主机和辅机占据了统治地位。内河及沿海的船舶全部以柴油机作为主机和辅机;远洋船舶中以柴油机作为主机的比例也与日俱增。目前,大约90 000艘100总吨位以上的国际商船中,97%的船舶的推进器采用柴油机驱动。尽管燃气轮机和核动力装置在少数船舶上使用,但其在动力性能和技术性能上远远不如柴油发动机;现在提倡的氢气燃料电池,在氢气的产生及储存技术方面还有待完善;与其他燃料混合的氢气发动机,存在充电设施兴建困难、制造成本高、连续行驶距离短等弊端。即使氢气发生器和液化氢储存罐在技术和舱容上达到了商业化的地步,作为船舶动力的柴油机,只需要进行简单的改装,即可使用氢气作燃料。德国慕尼黑大学与MAN B&W柴油发动机公司共同研究后认为,船用柴油发动机将永远生存于国际集装箱船舶,并且继续成为船用发动机的主力军。当然,船用柴油发动机也不能因此高枕无忧,而应该在科学技术水平上,尤其是在减少废气排放、降低振动噪声以及进一步改善船用发动机的动力性和经济性等方面获得更大的提高。

世界各国的海军都以常规装备为主,战舰也以常规动力为主,军用船舶更是如此。海军轻型水面舰艇,如猎潜艇、巡逻艇、炮艇、鱼雷快艇、导弹快艇、登陆舰及辅助舰等,绝大多数以柴油机作为动力装置;有些大型水面舰艇,如导弹护卫舰、驱逐舰以柴油机或柴油机与燃气轮机联合装置作为动力装置;至于常规潜艇,全部以柴油机作为动力装置。尽管巡洋舰、航空母舰多采用蒸汽轮机或核动力装置,但也常需要柴油机作为其应急装置或辅机。总之,柴油机是海军舰艇最主要的动力装备,在保卫我国海疆安全方面具有举足轻重的作用。

1.2 内燃机带来的主要问题

内燃机和内燃机工业的诞生与发展,为人类社会创造了巨大的物质文明,促进了人类社会的进步,因此,被誉为“改变世界的50项发明之一”。然而,在内燃机使用过程中,消耗了大量的石油资源,造成了石油资源的紧缺,而且内燃机工作时产生的振动、噪声和尾气排放也对周围的环境产生了恶劣的影响,前者是城市噪声的重要组成部分,后者是城市大气污染的主要来源。

1.2.1 石油资源紧缺问题

能源是人类社会赖以生存和发展的物质基础。随着世界经济的发展,人类对能源的消耗大幅度增加,而自然界矿物能源的储量有限,如果肆无忌惮地开采使用,很快会面临枯竭的一天,尤其是作为现代社会和工业“血液”的石油,其供应前景不容乐观。

表 1-2 列出了 2007 年中国与世界石油资源的储采及消耗情况。从表中可以看出:中国石油资源的探明储量在世界上排名 11,消耗量却排名第 2,再加上我国的石油储采比远小于世界的平均石油储采比,足以说明我国的石油资源少,而消耗量又大的现状。图 1-2 为 1990—2007 年中国石油的产量和消耗量。从图中可以看出:中国石油的供需缺口越来越大,接近 50%的石油要依赖进口,石油资源紧缺严重。相关资料显示,在没有重大探明储量增加的情况下,以目前的开采速度计算,全球的石油储量只供开采 41 年,而中国的石油储量将会在 20 年内开采耗尽。

表 1-2 2007 年中国与世界石油资源的储采及消耗情况

中国	探明储量/亿 t	68.31	储采比	25.19	消耗量/亿 t	3.66
世界		1 686	/%	41.60		39.53
中国所占的比例	4.05%		—		9.3%	
中国排名	第 11 位		—		第 2 位	



图 1-2 1990—2007 年中国石油的产量及消耗量

我国石油资源的严重紧缺,内燃机有不可推卸的责任。以汽车为例,其石油消耗量随着汽车保有量的不断增加而增加,预计 2020 年,汽车消耗的石油将占我国石油总消耗量的 57%,如图 1-3 所示,而内燃机消耗的比例更大,整个国家的石油需求只有在进口依赖程度超过 60%的情况下才能满足,这对于国家安全来说是难以承受的。所以,降低石油的消耗势在必行。



图 1-3 汽车消耗的石油比例

既然内燃机是造成我国石油资源短缺的主要原因,那么该问题的解决还应从内燃机着手。我国内燃机的技术水平与国外相比,大体上落后 15~20 年,就经济性能指标而言,比油耗一般高出 20~40 g/(kW·h)(约高 8%~15%),如果将其减少 10%,则每年可节约石油近千万吨,效果相当可观。所以,必须采取有效技术措施,提高内燃机的燃油经济性,发挥内燃机的节油潜能,以缓解我国石油资源紧缺的压力。

1.2.2 环境污染问题

环境污染是现代工业的消极因素,也是人类面临的四大社会问题(粮食、人口、环境、能源)之一,主要包括大气污染、噪声污染和水污染。自 20 世纪 80 年代以来,环境污染的程度越来越严重,不但制约了经济的发展,而且破坏了人类的生存环境,威胁到了人类的健康。由于城市人口密集,车辆使用频繁,所以城市环境污染尤为严重。内燃机对城市环境造成的污染主要包括大气污染和噪声污染。

1. 大气污染

内燃机的有害排放包括:一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)和颗粒(PM)等。国家环保总局的数据表明:我国城市大气污染中 80% 以上的 CO、30% 以上的 CO₂ 以及 40% 以上的 NO_x 来自机动车的排放,颗粒污染中有 20%~30% 来自机动车的排放。内燃机对城市大气污染的总体影响不但取决于单个内燃机的排放水平,还取决于城市内燃机的保有量。如果单位排放水平不变,那么随着内燃机保有量的增加,其总体排放水平必然会增加。在内燃机中,汽车的保有量最多且增长速度最快,所以其对城市大气污染的分担率最大。表 1-3 列出了我国部分城市汽车排放污染物中 CO 和 NO_x 的分担率。

表 1-3 我国部分城市汽车排放污染物中 CO 和 NO_x 的分担率

城市名称	汽车排放污染物分担率/%	
	CO	NO _x
北京	63.4	46.0
上海	76.0	44.0
广州	84.8	42.3
重庆	81.3	34.2
南京	84.0	58.0
济南	96.0	22.0
南昌	71.4	44.2
合肥	67.9	35.0

为了降低内燃机的排放,自 1968 年世界上第一个汽车排放法规在美国加州出台以来,美国、欧洲、日本等国相继制定了严格的排放法规,并每隔四到五年就要修订强化一次,使内燃机排放限值从低排放发展到超低排放,甚至出现了零排放。表 1-4 为美国、日本、欧洲现行的汽车排放法规。我国的内燃机排放控制始于 20 世纪 80 年代初,80 年代末,中国轻型汽车和重型柴油车的排放法规沿用了欧洲排放标准体系。表 1-5 为我国现在及未来实施的汽车排放法

规。与欧洲的排放法规相比,我国的排放法规起步晚,在排放限值方面还有很大的差距,但总的来说,内燃机的排放限值会越来越严格,使内燃机技术研发人员和生产厂家不得不从只重视内燃机的动力性和经济性,转变为经济性和排放性并重。

表 1-4 美国、欧洲、日本现行的汽车排放法规

国 家	标准/(g/km)	CO	HC	NO _x	颗 粒
美 国	轻型汽车(2004)	1.06	0.08 (NMOG)	0.124	0.05*
	重型柴油汽车(2004)	20.8	NMHC+NO _x =3.30		0.134
欧 洲	汽油机(2005 欧Ⅳ)	1.00	0.10	0.08	—
	柴油机(2005 欧Ⅳ)	0.50	—	0.25	0.025
日 本	汽油乘用车(2000)	1.27	0.17	0.17	—
	汽油载货车(2001)	3.36	0.17	0.25	—
	柴油载货车(2003)	0.63	0.12	0.49	0.06

注:“NMOG”表示非甲烷有机气体;“NMHC”表示非甲烷碳氢化合物;*表示柴油机。

表 1-5 中国现在及未来实施的汽车排放法规

实施时间	标准/(g/km)	CO	HC	NO _x	颗 粒
2007.7.1	汽油机(国Ⅲ)	2.3	0.20	0.15	—
	柴油机(国Ⅲ)	0.64	—	0.50	0.05
2010.7.1	汽油机(国Ⅳ)	1.00	0.10	0.08	—
	柴油机(国Ⅳ)	0.50	—	0.25	0.025

2. 噪声污染

20 世纪 50 年代,噪声已成为一种主要的环境污染,它不仅干扰了人们正常的工作、学习和生活,而且会损害人们的听觉,危害人们的身体和精神健康。内燃机因其热力过程的周期性及部分受力件的往复运动而产生噪声。据资料显示:各种机动车辐射的噪声能量占整个城市环境噪声能量的 75%,已成为城市噪声污染的主要来源。

内燃机产生的噪声主要包括:空气动力性噪声(主要指进、排气噪声和风扇噪声)、机械噪声和燃烧噪声。总噪声的大小与内燃机的类型、转速、功率、缸径以及保有量有关。

为了减少内燃机带来的城市噪声污染,自 20 世纪 60 年代末、70 年代初,发达国家纷纷以法规或标准的形式来限制内燃机的噪声水平。与排放法规相似,我国内燃机的噪声控制法规起步较晚,与欧盟相比(见表 1-6),大约落后了 15 年。尽管如此,由于国内的发动机大多数没有采取专门的降噪措施,其真实的噪声水平远不能满足法规的要求。因此,必须对内燃机采取有效的降噪措施,以减少内燃机产生的噪声,这不但是为了改善人类的生存环境,更是为了内燃机自身的存在和发展。

表 1-6 中国与欧盟车辆行驶噪声限值比较

汽车分类	国内 2002 年标准		欧盟标准	
	2005 年前 生产	2005 年后 生产	1990 年	1996 年
M_1	77	74	77	74
M_2 ($GVM \leq 3.5 \text{ t}$) 或 N_1 ($GVM \leq 3.5 \text{ t}$)				
$GVM \leq 2 \text{ t}$	78	76	78	76
$2 \text{ t} < GVM \leq 3.5 \text{ t}$	79	77	79	77
M_2 ($3.5 \text{ t} < GVM \leq 5 \text{ t}$) 或 M_3 ($GVM > 5 \text{ t}$)				
$P < 150 \text{ kW}$	82	80	80	78
$P \geq 150 \text{ kW}$	85	83	83	80
N_2 ($3.5 \text{ t} < GVM \leq 12 \text{ t}$) 或 N_3 ($GVM > 12 \text{ t}$)				
$P < 65 \text{ kW}$	83	81	81	77
$65 \text{ kW} \leq P < 150 \text{ kW}$	86	83	83	78
$P \geq 150 \text{ kW}$	89	84	84	80

注: M_1, M_2, M_3 表示载客汽车; N_1, N_2, N_3 表示载货汽车; GVM 表示最大总质量(t); $M_1 (S \leq 9), M_2 (S > 9), M_3 (S > 9), S$ 表示座位数。