

汽车空调系统市场现状及关于中国电动客车的案例研究

作者：毛世越、Hussein Basma和杨柳含子（国际清洁交通委员会）、王超前和任家宝（中汽数据有限公司）

简介及概况

政策背景

过去全球汽车空调(MAC)系统的制冷循环主要采用氯氟碳化物(CFC)作为制冷剂。使用的大多数CFC都是臭氧层消耗物质(ODS)，且具有极高的全球变暖潜能值(GWP)。高GWP制冷剂和ODS的问题在于，其从运行系统泄漏到大气中会导致严重的气候影响，尤其是破坏臭氧层等问题。一种典型的CFC制冷剂是二氯二氟甲烷(R-12)，其具有极高的消耗臭氧潜能值(ODP)。大多数发达国家在上世纪九十年代还在使用R-12，在签署《关于臭氧层消耗物质的蒙特利尔议定书》（简称为《蒙特利尔议定书》）后开始逐步退出市场；该议定书于1987年首次通过并于1989年生效（联合国，1987年）。

后来，汽车空调系统在全球范围内从R-12过渡到R-134a，因为R-134a不是臭氧层消耗物质，并且其对气候的影响比R-12要小。然而，R-134a的GWP仍然高达1430 (Myhre et al., 2013)。为此，欧盟(EU)于2006年批准了一项新指令2006/40/EC（也称为《氟化气体条例》），针对汽车使用的制冷剂设定了GWP限值。其规定：对于2011年及以后安装的空调装置，以及2017年之后在欧洲市场上销售的所有车辆上安装的空调装置，无论其车型年份如何，GWP限值均设置为150。

致谢：作者在此感谢能源基金会对本项工作的大力支持。本文所提及的观点仅代表作者的看法和立场，并不代表能源基金会的观点。作者还要感谢Felipe Rodriguez和何卉（国际清洁交通委员会）等内部审稿人，以及薛庆峰（中国第一汽车集团有限公司）、张少君（清华大学）、赵立金（中国汽车工程学会）和王佳（中国汽车技术研究中心有限公司政策研究中心）等外部审稿人提供的指导和意见。此外，作者还要感谢Gary Gardner, Jessica Chu和Valerie Sheckler对本文的审阅编辑和设计构思，同时感谢清华大学张翌晨（实习）对本文文字的校对工作。本文内容仅代表作者个人观点，内部评审及外部审稿人不对本文内容质量及观点负责。

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着他们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

www.theicct.org

communications@theicct.org

[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)

icct
国际清洁交通委员会

1994年之前，中国汽车行业普遍使用R-12作为空调制冷剂。R-12的ODP值为1。为了保护臭氧层，中国从2002年开始禁止汽车空调使用R-12制冷剂。迄今为止，中国国内销售的乘用车、货车和客车主要使用R-134a(ODP=0)作为R-12的环保替代制冷剂。由于电动客车冬季制热量需求大，部分采用热泵的电动客车也会使用R-407C和R-410A作为制冷剂。出口欧美的乘用车改用HFO-1234yf制冷剂，以满足当地对低GWP制冷剂的要求。

2016年发布的《蒙特利尔议定书基加利修正案》（以下称《基加利修正案》）也是遏制汽车空调制冷剂排放的一项全球性重要法规（联合国，2016年）。《基加利修正案》要求全球合作共同减少氢氟碳化物(HFC)的生产和使用。迄今为止，正在逐步淘汰的HFC已经取代了议定书最初列入管控清单的15%的ODS，而其余的ODS也已被非碳氟化合物替代制冷剂取代(Blumberg & Isenstadt, 2019)。随着过渡到低GWP制冷剂及其配套系统，制冷剂泄漏造成的潜在气候影响在未来可能会显著下降。

然而，随着汽车空调系统逐步转向使用低GWP制冷剂，以减少制冷剂泄漏对气候的影响，汽车空调系统运行所需的能量是温室气体排放的另一个主要来源。据估计，汽车空调系统的能耗占总能耗的约3%-7%，且存在很大的地理差异(Blumberg & Isenstadt, 2019; Mock, 2013;联合国环境规划署等，2005年)。此外相关研究还发现，汽车空调系统在湿热气候环境下的能耗占比可能达到20%左右(Papasavva et al., 2009)。

对于燃油车，燃料消耗产生了大量的直接温室气体排放；对于电动车，温室气体排放主要来自对电网和发电企业的电力需求。而另一方面，生产长续航里程的电池也会产生温室气体排放。电动车的间接温室气体排放与其消耗电力中非可再生能源所占的比例有关；这反过来也表明，如果使用更多可再生能源发电，电动车将更清洁。遗憾的是，因为到2020年约有66%的电力来自碳强度约为0.27 kg/kWh的化石燃料，中国的间接温室气体排放量高于欧盟和美国(Ritchie & Roser, 2020)。不过可喜的是，在全生命周期温室气体排放方面，中国的电动车与燃油车相比仍然具有减排优势。ICCT的一项研究表明，纯电动乘用车的全生命周期温室气体排放量比汽油乘用车降低了约34%-46%(Bieker, 2021)。

作为全球第二大温室气体排放国，中国正在大力推进实现节能减排目标。2020年，中国国家主席习近平宣布，中国将在2030年前实现碳达峰，到2060年力争实现碳中和，这无疑将在未来几十年内掀起一场大规模的碳减排和碳中和运动(Koty, 2021)。作为这一转型的一部分，提高汽车空调系统的能源效率以减少温室气体间接排放量将是至关重要的。

本研究的主要目的是分析汽车空调制冷剂的市场现状，并确定汽车空调系统降低能耗和温室气体排放的潜在技术。在本研究中，我们回顾了欧盟和美国的汽车空调技术和市场现状，并以电动客车为重点研究了中国汽车空调系统的现状。在中汽数据有限公司(CATARC-ADC)的协助下，我们开展了一系列调查和采访活动，以收集有关中国电动客车市场的第一手信息。我们分析了主流技术路径，并确定了中国汽车空调行业面临的主要问题。此外，我们还评估了先进替代制冷剂、余热回收和算法动态适应三种技术对温室气体排放的潜在改善效果。

技术背景：汽车空调技术

单冷型空调

单冷型空调仅具备制冷功能，仅适用于具备内燃机热源的燃油及混动汽车。单冷型空调为蒸气压缩制冷系统，主要由蒸发器、冷凝器、高压/低压管路、压缩机、贮液干燥器、膨胀阀及传感器构成。单冷型空调制冷循环包括以下四个步骤：

1. 压缩过程：压缩机将从蒸发器中吸入的低压、低温制冷剂蒸汽进行压缩，使其成为高压、高温的蒸汽并送入冷凝器。
2. 放热过程：高压、高温的气态制冷剂在冷凝器中冷凝，并与车外空气进行热交换（放热），转变成高温、高压液态制冷剂。
3. 节流过程：从冷凝器流出的高压液态制冷剂流经膨胀阀，节流变成低压、低温气液混合制冷剂后送入蒸发器。
4. 吸热过程：低压、低温的液态制冷剂在蒸发器中汽化，并与车内空气进行热交换（吸热），变成低压、低温气态制冷剂，在蒸发器中吸收了热量的制冷剂蒸汽被压缩机吸走，进入下一个工作循环。

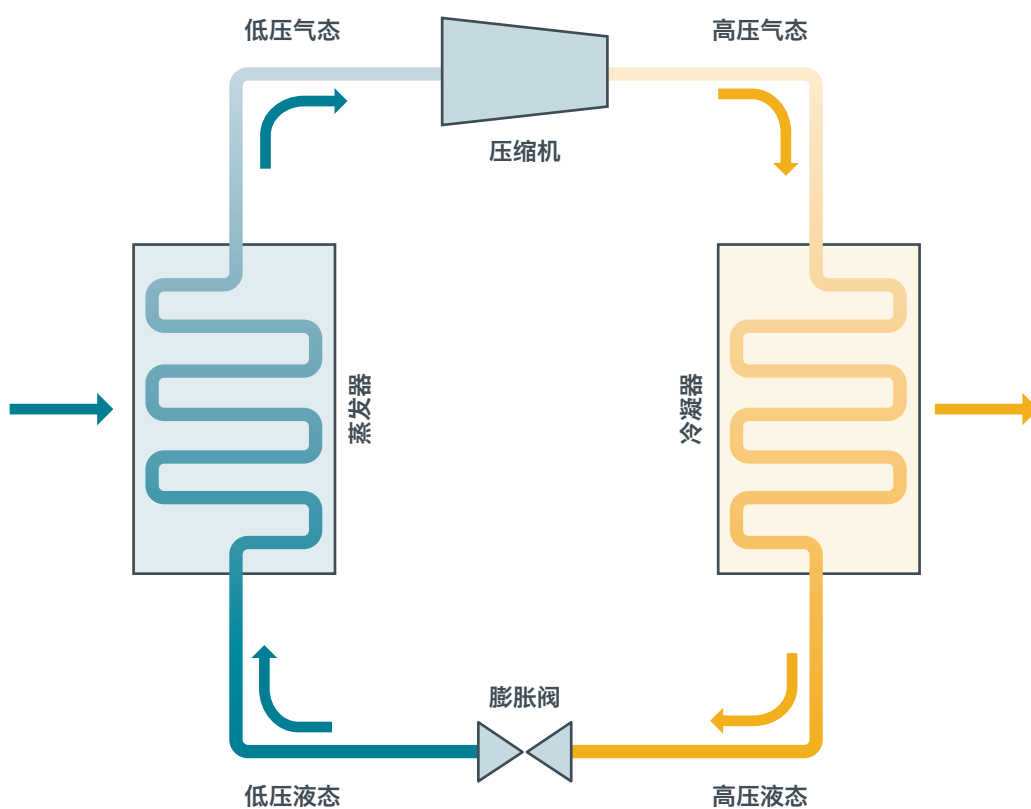
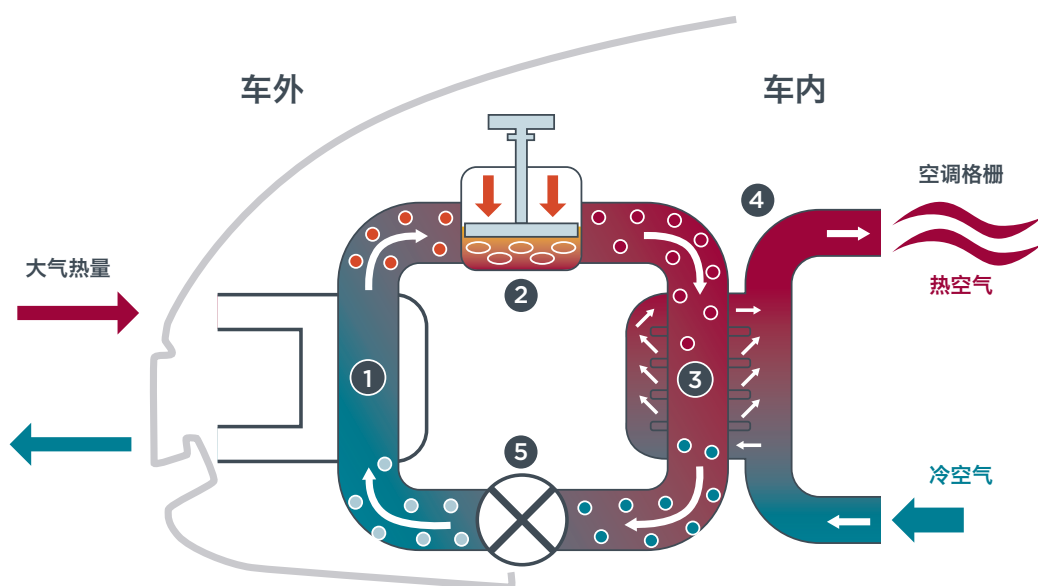


图1 典型制冷循环的工作机制 (LearnMetrics, 2020)

热泵空调

热泵空调可以在低温环境下提供热量，适用于没有发动机废热的纯电动汽车。与传统单冷型空调相比，热泵型空调具备制冷/制热两种模式，其结构形式相对于传统单冷型空调要复杂一些。热泵制冷循环与单冷型空调循环过程相同，热泵空调制热时通过四通阀等阀件使制冷剂反向运行，即高压高温的制冷剂从压缩机出来之后由四通阀接到空调箱内的换热器，鼓风机将低温空气吹过换热器后空气被加热，在此之后进入车厢使车厢内的温度提高，制冷剂从蒸发器出来之后经膨胀阀进

入冷凝器，在冷凝器中被膨胀的制冷剂与外部热源进行热交换，而后再次被吸入压缩机进行新一轮的工作循环。



- ① 从大气中吸收热量
- ② 热量压缩转化成供暖
- ③ 加热车舱内冷空气提高温度
- ④ 加热空气吹入车舱
- ⑤ 减压热量转化成低温热量

图2 热泵空调系统工作机制 (NISSAN MOTOR Co Ltd, n.d.)

正温度系数热敏电阻加热系统(PTC)

PTC系统通过电热转换产生热量，是目前应用最广泛的电加热技术。根据加热介质的特性，PTC系统可分为风暖驱动型PTC(APTC)和水暖驱动型PTC(WPTC)。PTC风暖加热器安装在空调箱内，直接加热乘员舱空气；PTC水暖加热器则安装在空调箱外，通过加热冷却液形式将热量传输至空调箱内的暖风芯体，通过暖风芯体加热乘员舱空气。水暖加热器具有无高压漏电风险和设计灵活性高等优点，同时无需对现有空调箱做任何改动，因此更受欢迎，车辆装配率更高。

燃油加热器

燃油加热器通过燃烧燃料为车舱供暖。与PTC系统相比，燃油加热器只需要低压电池供电，不需要高压供电。因此，燃油加热器不会影响车辆的续驶里程和电池寿命。但燃油加热器的能效约为70%，低于PTC和热泵系统。与此同时，燃油加热器还会产生大量的CO₂、NO_x及其他污染物排放。

技术背景：制冷剂

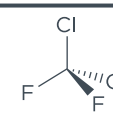
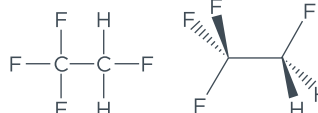
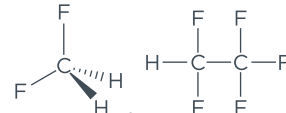
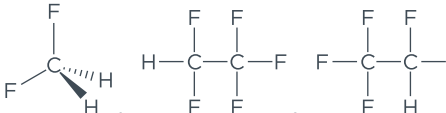
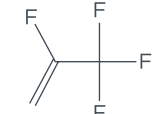
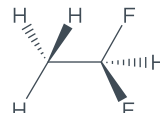
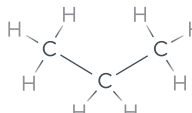
制冷剂正朝着更节能、更安全、对气候和臭氧层危害更小的方向发展。近年来，市场上出现了一些具有良好气候性能和应用前景的制冷剂，如HFO-1234yf。表1汇总了汽车使用的几种典型制冷剂的特性信息。

R-12是一种用于空调和冰箱的传统制冷剂。R-12（二氯二氟甲烷或氟利昂-12）是一种溶解度高、安全性高的化合物。于二十世纪被发明并广泛应用，但由于其对臭氧消耗的严重影响而被大多数国家禁止(A-GAS, n.d.)。

R-134a、R-410A和R-407C是目前常用的制冷剂，安全性高且不消耗臭氧，但是它们的GWP都高于1000。具体来说，R-410A和R-407C是由多种制冷剂按照特定比例混合而成的混合物，例如R-410A是由50%的 CH_2F_2 和50%的 CHF_2CF_3 混合而成；R-407C是由 CH_2F_2 (23%) + CF_3CHF_2 (25%) + $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ (52%)组成的化合物。

HFO-1234yf、HFC-152a、R-744和R-290是目前具有市场应用前景的几种替代制冷剂，在保护臭氧层和减缓全球变暖方面都有不错的表现。HFO-1234yf 在GWP (<1) 方面的表现优于其他制冷剂，但是受到专利限制，因此无法作为支撑中国整个汽车行业制冷剂换代的替代产品。HFC-152a是一种GWP低于150的有机氟化合物，它还被用作气溶胶喷雾剂和气体喷粉器产品的推进剂。R-290在GWP方面的表现不错，但高度易燃，因此在实际使用与储存时可能需要采取额外保护措施。

表1 几种典型制冷剂的特性信息

制冷剂	100年全球变暖潜能值 (GWP-100)	消耗臭氧潜能值 (ODP)	安全性	化学式	现状	结构	数据来源
R-12	2400	1	A1	CCl_2F_2	逐步淘汰		(NOAA, n.d.)
R-134a	1430	0	A1	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$	主流		(PubChem, n.d.)
R-410A	1975	0	A1	CH_2F_2 (50%) + CHF_2CF_3 (50%)	主流		(ChemEurope, n.d.)
R-407C	1700	0	A1	CH_2F_2 (23%) + CF_3CHF_2 (25%) + $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ (52%)	主流		(AGC Chemicals, n.d.)
HFO-1234yf	<1	0	A2L	$\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$	替代品		(Koban, 2009)
HFC-152a	138	0	A2	$\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$	替代品		(EPA, 2014)
R-744	1	0	A1	CO_2	替代品	$\text{O}=\text{C}=\text{O}$	(EPA, 2014)
R-290	3	0	A3	C_3H_8	替代品		(Darment, n.d.)

文献综述：欧美汽车空调技术现状

电动客车的续驶里程通常会受到极端条件的影响，因为动力传动系统将加大工作功率，同时为确保舱内热舒适性需要消耗更高能量。在极端炎热（即环境温度在40°C左右）且在乘客满员的情况下，电动客车的续驶里程可能会减少45%以上，这导致客车运营商在充电调度方面面临更复杂的情况(Basma et al., 2020)。此外，考虑到全球气候变化以及西欧和北美遭遇更频繁的热浪，公共交通工具（尤其是公交车）的汽车空调系统正在成为标准设计要求，而不再是可选设计选项。

汽车空调技术的选择对客车制造商和运营商来说非常重要，因为这直接影响到客车的总续驶里程、能源效率、运营成本和维护成本(Göhlich et al., 2015)。目前主要的汽车空调技术可分为燃料驱动技术和电力驱动技术。燃料驱动技术是指安装在内燃机汽车上的传统空调装置。电力驱动技术是指由电动机（直接从电池获取能量）驱动的空气调节装置，主要安装在电动客车上(Peng & Du, 2016; Suh et al., 2015)。电动客车上安装的电动空调系统分为两种类型：蒸气压缩循环（VCC）空调装置和热泵（HP）。这两种技术主要由电动压缩机驱动，但在制冷剂的物理特性方面存在一些技术差异。VCC空调装置和热泵之间的主要区别在于，后者也可用于制热，而前者不能。

过去五年，随着欧洲、北美和拉美市场电动客车销量的攀升，目前大多数新客车车型都将热泵作为主要空调技术(Haddad et al., 2019)。比亚迪集团为其K系列电动客车车型配备了法雷奥(Valeo)提供的各种车载空调技术(Valeo, 2017)。法雷奥提供多种VCC空调装置和热泵技术，并提供两种制冷剂选择：R-134a和R-407C。Irizar客车车型(Irizar, 2021)配备了Hispacold (Hispacold, 2021)提供的热泵，但是没有关于制冷剂相关的明确信息。梅赛德斯-奔驰的eCitaro电动客车配备了颇具应用前景的CO₂热泵技术(Mercedes-Benz, 2020)，即制冷剂为CO₂，也被称为R-744制冷剂，与Solaris Urbino 12电动客车类似(Solaris, 2021)。沃尔沃7900E客车车型主要配备了VCC空调装置，可选择在客车上额外安装一台热泵作为VCC空调装置的配套(Volvo, 2021)。VDL宣布其Citea电动客车车型(VDL, 2021)均配备美国冷王(Thermo King)提供的空调技术，这是一种主要使用R-407C制冷剂运行的VCC空调装置(Thermo King, 2021)。此外，阿尔斯通为其APTIS电动客车车型配备了热泵空调，但未披露关于制冷剂的更详细信息(Alstom, 2019)。

此外，多家汽车空调供应商已经宣布了他们在电动客车领域的新空调技术生产计划。中国的一家汽车空调设备制造商上海松芝(SONGZ)最近宣布，他们将为比亚迪在巴西运营的22米客车项目供应VCC空调装置(GetNews, 2021)。上海松芝供应多种类型的VCC空调装置，其中大部分技术采用R-134a制冷剂(SONGZ, 2021)。德国汽车空调制造商Eberspaecher正为在墨西哥和北美运营的电动客车(Sustainable Bus, 2021)供应使用R-134a制冷剂的VCC空调装置(EBERSPAECHER, 2021)。另一家汽车空调制造商Cooltek也在积极研发电动客车空调技术，他们提供多种使用R-410a制冷剂的热泵技术(Cooltek, 2021)。最后，德国制造商Konvekta正在大力投资研发用于电动客车的R-744热泵技术，进一步推动这项技术在电动客车上的应用(Konvetca, 2021)。表2汇总了上述所有汽车空调系统信息。

表2 欧盟和美国的客车空调供应商和技术信息汇总

车辆制造商	空调供应商	空调技术	制冷剂
比亚迪	法雷奥	VCC/HP	R-134a/R-407C
比亚迪	上海松芝	VCC	R-134a
Irizar	Hispacold	HP	无相关信息
梅赛德斯-奔驰	无相关信息	HP	R-744
沃尔沃	无相关信息	VCC + HP	无相关信息
VDL	Thermo King	VCC	R-407C
阿尔斯通	无相关信息	HP	无相关信息
多家制造商	Eberspaecher	VCC	R-134a
多家制造商	Cooltek	HP	R-410a
多家制造商	Konvekta	HP	R-744

欧盟、美国和拉美市场上各种汽车空调技术的技术参数展示了欧盟汽车制造商如何在电动客车上部署热泵技术，尤其是其R-744制冷剂作为重点关注对象。这主要是由欧洲关于空调系统制冷剂的法规导致的，例如欧盟的2006/40指令（欧盟委员会，2006年）。另一方面，由于拉美市场没有相关指令或法规，虽然R-134a具有很高的全球变暖潜能值，但是越来越多的客车仍然配备了使用R-134a制冷剂的VCC空调装置。

本研究的调研企业名单和主要研究问题

在本研究中，我们对多家中国汽车制造商和汽车空调供应商进行了调查研究，了解了最具代表性的几款车型和其空调系统的关键参数，分别列于表3和表4中。我们同时收集了乘用车和客车的相关信息，然后选出各类车型中的畅销产品，加以进一步的研究。

上汽、一汽和东风是2020年销量前三的乘用车制造商；蔚来是中国一家迅速崛起的新兴乘用车制造商，其只生产电动乘用车。另外，宇通、比亚迪、福田和东风是2020年商用车和电动客车领域的领军企业。对于汽车空调供应商，日本电装(DENSO)和上海松芝(SONGZ)是本次调研的受访对象。这两家公司分别是中国乘用车和电动客车的主要空调供应商之一。

针对选定的汽车制造商和汽车空调供应商，我们共访谈了10个关于制冷技术性能和发展前景的问题，如表4所示。对于汽车制造商，我们正在评估汽车制造商对制冷剂类型的偏好及其替代难度。对于汽车空调供应商，我们也着重了解了技术开发、成本差异和空调性能等方面存在的障碍。

表3 本次调查的受访企业名单

序号	类型	名称	备注	
1	汽车制造商/汽车集团	乘用车	上汽	2020年销量第一
2			一汽	2020年销量第二
3			东风	2020年销量第三
4			蔚来	2020年电动乘用车销量第一
5	汽车集团	客车	宇通	2020年电动客车销量第一
6			比亚迪	2020年电动客车销量第二
7			中国中车	2020年电动客车销量第三
8			福田	2020年商用车销量第二
9			东风	2020年商用车销量第三
10	汽车空调供应商	日本电装	全球著名的乘用车空调供应商	
11		上海松芝	中国最大的电动客车空调供应商	
12		法雷奥	全球著名的电动客车R-744空调系统供应商	

表4 本次调查的主要内容

序号	汽车制造商	汽车空调供应商
1	技术路径与份额	市场份额
2	不同技术的成本差异	不同技术的成本差异
3	不同技术的性能系数 ¹ 差异	不同技术的性能系数差异
4	使用的制冷剂类型及份额	制冷剂类型与份额
5	选择某种制冷剂的原因	选择某种制冷剂的原因
6	制冷剂消耗量和供应商	制冷剂消耗量和来源
7	制冷剂替代时间表和技术偏好	空调技术的研究计划
8	使用阶段制冷剂替代的主要障碍	制冷剂替代创新的主要障碍
9	HFO-1234yf价格下降对制冷剂替代的影响	制冷循环
10	维修保养问题	最大制冷量和功率

调查结果：汽车空调系统的技术现状、减碳潜在途径和面临的挑战

汽车空调系统的温室气体排放包括直接排放和间接排放，其中直接排放包括空调制冷剂加注泄漏、运行泄漏、维修和报废排放，间接排放与空调零部件的生产和回收以及空调系统运行中制冷/制热产生的能耗有关。根据汽车制造商和汽车空调供应商对调查问卷的回复，我们发现可以通过以下三种技术来提高电动客车空调系统的能源效率：先进的替代制冷剂、余热回收和算法动态适应。

¹ 性能系数，这是一项衡量汽车空调系统工作效率的指标。

先进的替代制冷剂

传统制冷剂在实际应用中可能会面临多方面的挑战，其中最大的挑战来自极端工作环境。因此市场上出现了多种耐低温的先进制冷剂。据我们调查，R-410A和R-407C热泵系统在中国的电动客车市场上占据主导地位，但这项技术受极端工作环境的影响很大。一般来说，这项技术在-5°C以下可能无法工作，除非配套安装PTC加热器，但这也会导致更高的能耗。不过，R-744和R-290等低GWP制冷剂在寒冷气候条件下具有良好的制热性能，可以显著降低电动客车的能耗。在寒冷地区开展的一项研究发现，相对于单冷型空调，使用低GWP制冷剂的热泵系统可以将电动客车的能耗降低50%以上(Göhlich et al., 2015)，这也意味着有必要继续开发工作温度范围更广的先进制冷剂。

目前已有几款电动客车车型安装了R-744和R-290系统。我们收集了中国14款在用电动客车车型上安装的使用不同制冷剂的空调系统的制冷（EER）和制热（COP）能效指标。表5比较了不同环境温度下制冷剂的能效比和性能系数。在所有制冷剂中，R-744热泵系统的性能系数范围为1.8-2.3，与PTC加热系统相比效率提高了两倍。然而，R-744热泵系统的能效比相对较低，这意味着其制冷性能较差。R-290系统在低温下表现良好，其性能系数范围为1.8-3.0。考虑到R-290的高易燃性，应特别注意其安全性。

表5 不同热泵系统蒸发温度下不同制冷剂的能效比和性能系数变化 (Choudhari & Sapali, 2017; Kalla et al., 2018)

温度	35°C	0°C	-10°C	-20°C
能效指标	EER (制冷)	COP (制热)		
R-410A	2.4	1.7	-	-
R-407C	2.3	1.7	-	-
R-290	2.3	3.0	2.5	1.8
R-744	1.8	2.5	2.1	2

余热回收

虽然电动汽车没有发动机余热，但其动力传动系统也会在运行过程中产生热量。因此，回收动力传动余热是提高汽车空调系统性能的一种有效方法。与传统热泵相比，如果车上还配备了热回收系统，那么制热能力和性能系数可分别提高15.8%和5.2%(Ahn et al., 2016)；此外，如果采用串联热回收系统，那么制热能力和性能系数可分别再提高5.1%和2.6%(Han et al., 2020)。通过本次调查我们发现，一些中国企业也在开发新的余热回收系统，借助于这些系统，性能系数可以提高10%左右甚至更多。然而，该技术的成本非常高。我们调查发现，这项技术的应用还需要系统改造和配备更多热交换器，因此总成本至少增加10%。

算法动态适应

两项研究表明，除了更新零部件外，空调系统还可以通过适应不同的工作条件和乘客人数将总能耗降低6% (He et al., 2018; Luo et al., 2018)。然而，这项技术也将导致空调系统的成本增加。R-410A和R-407C系统的价格在2.5万-6万元人民币之间。据我们调查，由于供应有限，R-744和R-290替代系统比现有系统要贵得多，例如，R-744系统比R-410A或R-407C系统贵3到5倍。

主要挑战

本次调查结果表明，中国汽车空调行业在制冷剂替代和空调能效提升方面仍面临巨大的挑战。我们再次简单归纳总结了中国汽车空调行业在未来几年将应对的挑战。

环境表现性能更好的替代技术供应短缺。虽然中国市场上已经有几种先进的制冷剂替代产品，但从技术上来讲，只有HFO-1234yf最符合燃油车辆的实际应用条件。R-744和R-290系统等一些有应用前景的技术仍在寻求大规模生产和进一步推广。

具有应用前景的制冷剂受专利门槛限制。HFO-1234yf已被证明是一种制冷性能好且GWP极低(< 1)的制冷剂。然而，HFO-1234yf的应用专利仍牢牢控制在霍尼韦尔和科慕等国际化工巨头手中，因此中国供应商不得不在采购制冷剂时支付更高的采购成本，这一专利付费门槛阻碍了其大规模应用。

支持制冷剂更新换代的标准体系不完善。汽车空调系统的生命周期排放受环境温度和工作条件的影响很大。但是，中国并没有建立起一套完整的汽车空调能耗测试和限值标准。虽然GB/T 37123-2018规定了几种特定工况下的制冷/制热能效性能要求，但无法反映车载空调的整体性能。

本研究采用的方法：LCCP改良模型

生命周期气候性能模型(LCCP)是一种评估制热、通风、空调和制冷系统在整个生命周期内的全球变暖性能(包括所有直接和间接排放)的方法。LCCP是评估温室气体排放量最全面的方法之一，在本研究中用于估算各种替代制冷剂和空调系统的温室气体减排量。

LCCP考虑了不同阶段的直接和间接排放，其中直接排放包括由于制冷剂泄漏而导致的各种形式的排放，间接排放包括系统制造、运行和报废过程中产生的排放。自1999年面世以来，LCCP已被纳入汽车空调生命周期分析模型GREEN-MAC-LCCP(Papasavva et al., 2010)中，并被国际汽车工程师学会推荐为最佳应用模型(SAE International, 2009)。然而，GREEN-MAC-LCCP模型并未考虑电动汽车。因此在本研究中，我们改进并建立了一个专门针对电动客车的LCCP改良模型，新增了车舱体积及面积、制热能效、制热运行时间、电力排放因子等参数。图3显示了本研究的模拟机制。

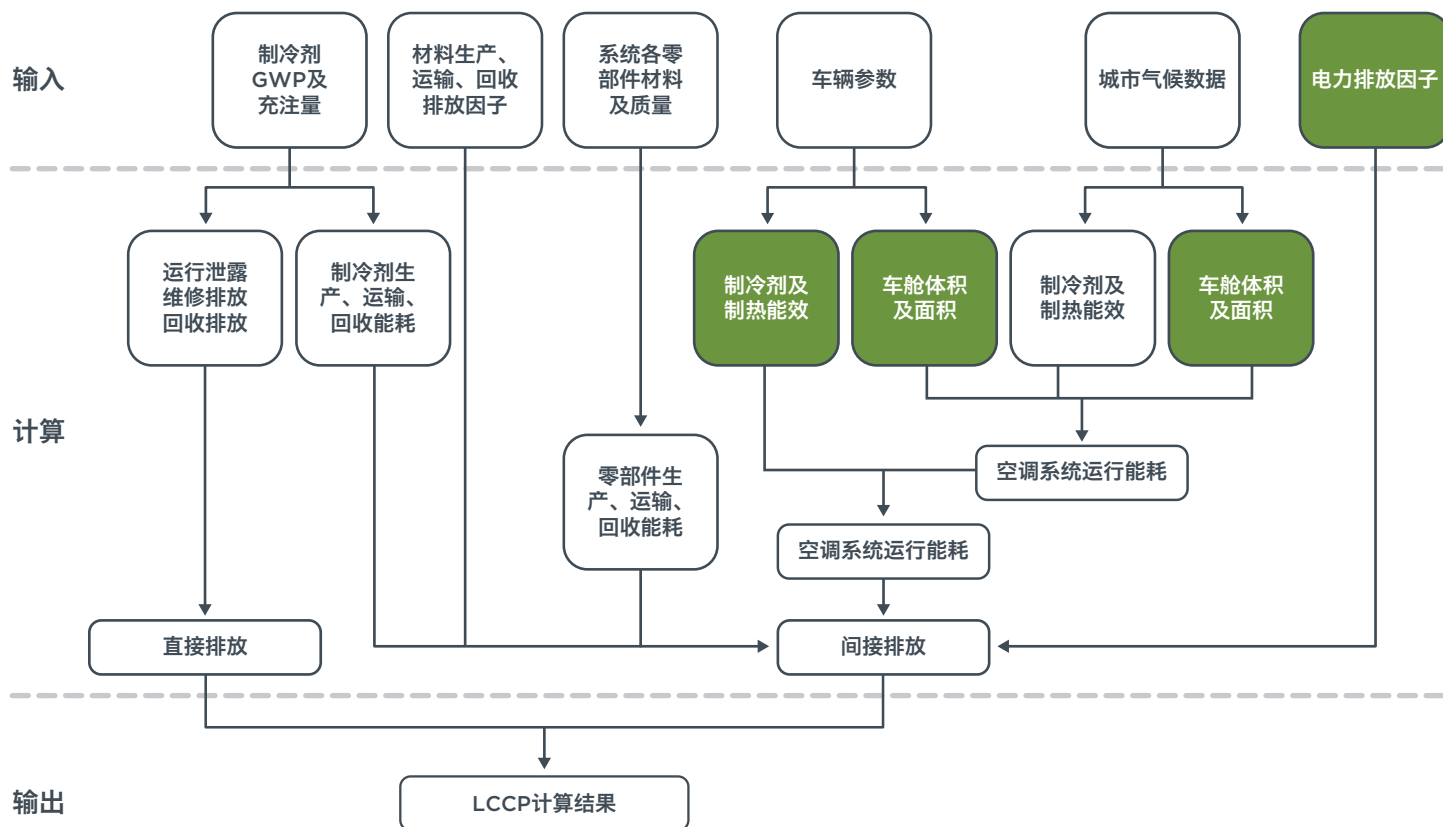


图3 本研究中LCCP改良模型流程图

模拟结果：电动客车空调系统温室气体减排潜力

为了准确评估电动客车的温室气体减排潜力，我们采用了LCCP改良模型来估算不同制冷剂和技术排放量。由于客车底盘设计对制冷剂充注量和制热能力影响很大，我们以一辆10米长车型为例来说明汽车空调系统产生的温室气体间接排放量。

表6 根据调查收集的车辆参数信息

车长(m)	6	8	10	12
车舱体积(m ³)	20-30	34-38	40-56	49-63
充注量(kg)	2-4	4-6	6-8	8-9

直接排放

表7汇总了用于模拟温室气体直接排放量的相关假设。我们假设一辆典型的电动客车在整个生命周期内会加注2次制冷剂；此外，一项研究(IPCC, 2019)表明，每次充注的平均泄漏率约为0.5%，因此我们也采用该数值作为基础模型假设。由于R-744系统通常在较高压力下运行，因此在使用过程中会导致更高的泄漏率(Meszler Engineering Services, 2004)。因此，我们假设R-744系统在整个生命周期中将会进行三次维修。由于HFO-1234yf当前在电动客车上的应用非常有限，所以模拟中未涵盖HFO-1234yf。

表7 采用热泵技术的电动客车空调系统直接排放量假设

假设参数	R-410A	R-407C	R-744	R-290
全球变暖潜能值(GWP)	2100	1700	1	3
初装充注量(kg) ²	6	6	3.8	1.5
整个生命周期内的维修次数	2	2	3	2
每次充注泄漏率(%)	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%
每次维修泄漏率(%)	100	100	100	100
报废泄漏率(%)	100	100	100	100

我们发现，采用R-744和R-290可以减少99.9%以上的直接排放量。虽然R-290具有较高的GWP，但是R-290系统的直接温室气体排放量低于R-744，这是因为R-290只需要较少的充注量即可。表8给出了各种制冷剂的直接温室气体排放量。

表8 采用热泵技术的电动客车空调系统直接排放量测算

		直接温室气体排放量 (kg CO ₂ 当量)			
		车长			
		6米	8米	10米	12米
制冷剂	R-410A	18,995	31,658	37,990	53,819
	R-407C	15,377	25,628	30,754	43,568
	R-744	8	13	15	22
	R-290	7	11	14	19

间接排放

车辆全生命周期的间接排放主要来自汽车空调系统的能耗和材料的生命周期排放。空调系统的能耗与工作环境和气候条件紧密相关。我们假设，当环境温度低于10°C时客舱开始制热，高于26°C时开始制冷。因此，在评估电动客车的能耗潜力时，也有必要因地制宜，即根据不同地区的气候条件进行分别计算。

在本研究中，我们选择了三个具有代表性的中国城市：哈尔滨（寒冷）、北京（温和）和广州（炎热）作为分析的目标城市。表9给出了每个城市采用的气候假设数据。

² 假设基于一辆10米的长电动客车。

表9 关于汽车空调系统和电动客车的工况假设

项目		哈尔滨	北京	广州
不同工作温度对 应的发生频率 ³	-30°C — -20°C	6.10%	-	-
	-20°C — -10°C	18.80%	0.40%	-
	-10°C — 0°C	13.20%	18.00%	-
	0°C — 10°C	16.60%	22.40%	4.50%
	10°C — 15°C	10.30%	11.10%	13.00%
	15°C — 25°C	30%	28.80%	43.20%
	25°C — 35°C	5%	19.40%	39.30%
年均行驶里程(km)		44,900	39,400	53,800
平均速度 ⁴ (km/h)		19.67	23.14	17.39
电网基准排放量 ⁵ (kgCO ₂ /kWh)		0.6634	0.6168	0.4512

通过采用上述假设数据模拟空调系统性能，图4显示了各种制冷剂和技术间接排放量。需要注意的是，图中的每个柱状图显示的是单个汽车空调系统的全生命周期排放量。哈尔滨是本研究中气候最寒冷的城市，制热是空调系统间接排放的主要来源。在能效表现方面，R-290和R-744系统比R-410A和R-407C系统高约50%。与目前制热常用的R-410A和R-407C系统相比，R-290空调系统减少了约42%的间接排放量，R-744空调系统减少了约38%（如图4所示）。此外，余热回收和动态适应技术将空调系统的间接排放量进一步分别减少了10%和6%。

然而，在制冷情况下，该情况发生了变化。我们发现，R-290系统的制冷效率与传统制冷剂相比没有显著优势，但R-744系统的制冷性能却不如R-410A和R-407C；模拟结果显示，在分别采用和不采用动态适应技术的情况下，R-744系统的排放量分别约为6.6吨二氧化碳当量和7.0吨二氧化碳当量。

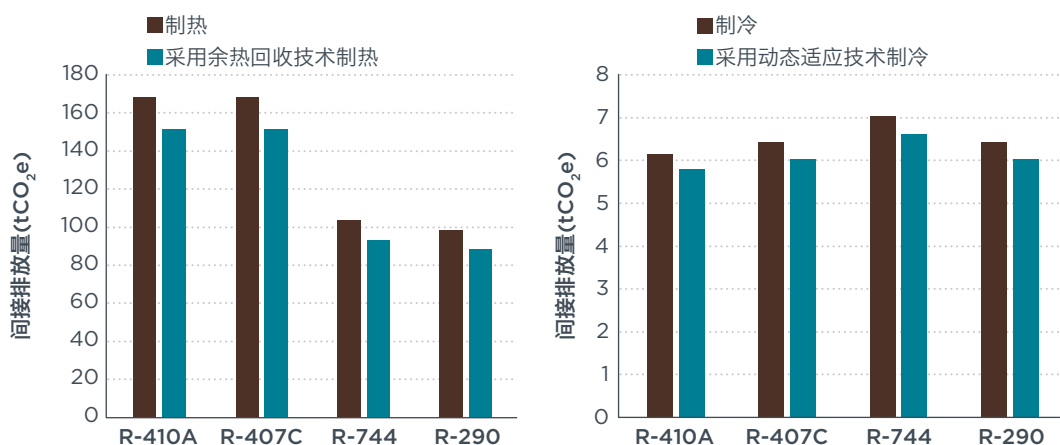


图4 哈尔滨（寒冷气候）各种制冷剂和技术间接排放的潜在改善效果

3 按各地区十年间每小时平均温度计算。

4 高德地图：2018年度中国主要城市交通分析报告，<https://finance.sina.com.cn/tech/2021-01-25/doc-ikftssap0417680.shtml>

5 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心(NCSC)，http://www.ncsc.org.cn/SY/tikhybg/202003/t20200323_770098.shtml

与哈尔滨不同的是，在北京制热和制冷都是电动客车空调系统的重要间接排放来源。如图5所示，与R-410A和R-407C系统相比，R-290系统可减少近55%的间接排放量，而R-744系统在制热方面可减少约45%的间接排放量。这也意味着，在制热方面替代系统在寒冷和温和气候地区的性能表现类似。另一方面，R-744系统在制冷方面的性能表现不如其他制冷剂，在未采用动态适应技术的情况下，R-744系统的排放量约为19吨二氧化碳当量。下图显示了不同技术和制冷剂之间的差异（图5）。

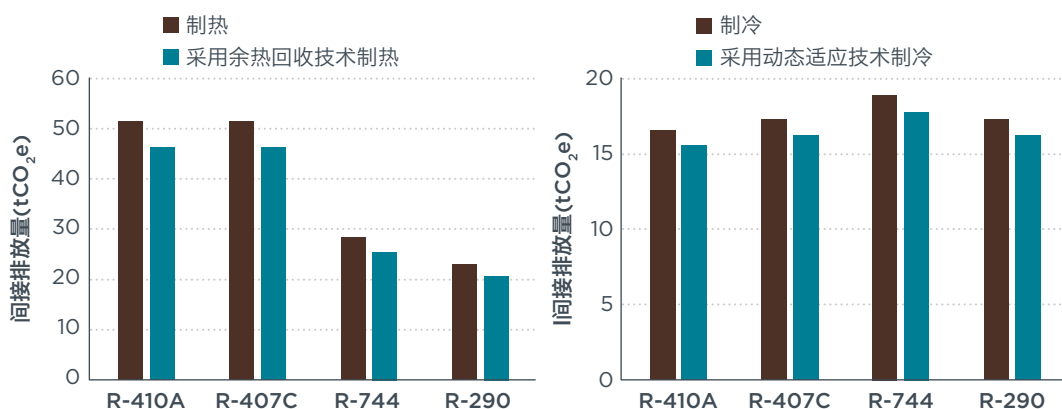


图5 北京（温和气候）各种制冷剂和技术间接排放的潜在改善效果

广州地处中国南方，气候温暖，因此制冷需求在汽车空调系统总能耗中占主导地位。同样，广州的空调制冷模式也表明，在本次调研的所有制冷剂中，R-744的间接排放量最高。R-744空调系统的间接排放量达到约51吨二氧化碳当量，比R-407C和R-410A系统分别高出10%和14%。

在制热方面，与寒冷地区相比，在炎热气候条件下替代制冷剂的潜在改进空间正在不断缩小。相较于现有的制冷剂，R-744和R-290空调系统的间接排放量减少了约10%。图6显示了各种制冷剂和技术模拟间接排放量。

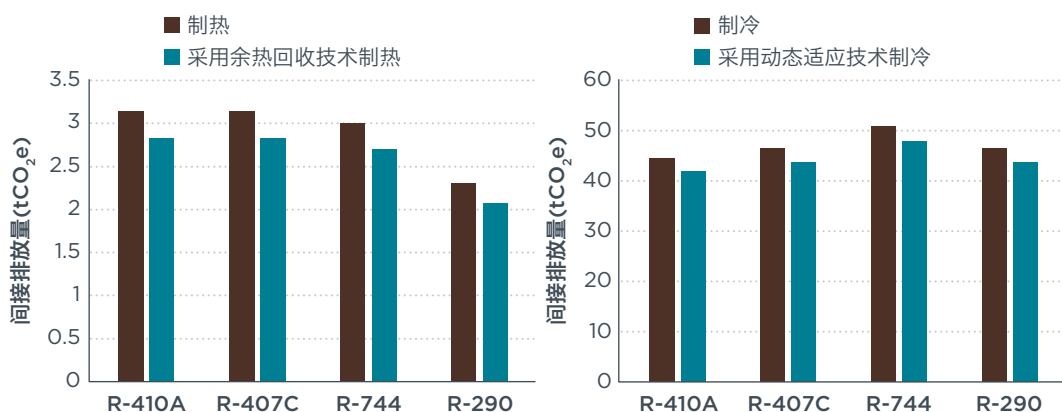


图6 广州（炎热气候）各种制冷剂和技术间接排放的潜在改善效果

总排放量及与现有系统对比

图7显示了不同空调系统在不同城市的生命周期排放量。我们发现，R-410A和R-407C空调系统的温室气体排放量约为45吨到249吨二氧化碳当量，其中直接排放量占总排放量的13%-53%。客车的车身越长，温室气体排放量越大。替代制冷剂R-744和R-290可以消除绝大部分直接排放，并可大幅减少北京和哈尔滨的间接

排放量。对于气候温暖的地区（如广州），替代制冷剂在减少间接排放量方面的表现不如传统制冷剂。

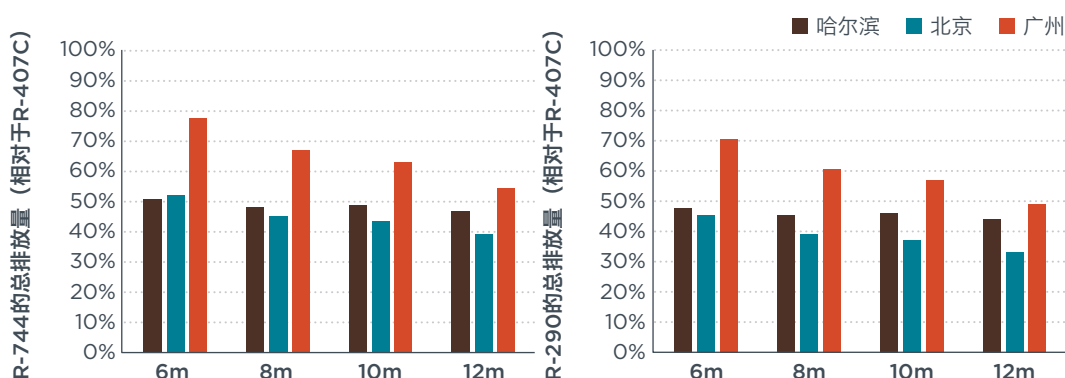


图7 哈尔滨、北京和广州地区的电动客车空调系统总排放量（相比于R-407C系统表现）

总结与本文主要观点

在本研究中，我们接触并采访了国内几家重要的汽车制造商和汽车空调系统供应商。我们也回顾了欧盟和美国市场汽车空调系统和制冷剂的进展情况，并且分析了中国汽车空调系统和技术的市场现状。我们还对电动客车空调系统脱碳的潜在技术途径展开了初步的调研和研究。在本研究中，我们评估了三种主要的温室气体减排技术，即采用先进的替代制冷剂、余热回收和动态适应，以上技术均可对电动客车空调系统的温室气体减排起到积极作用。我们针对替代制冷剂进行了重点的研究，主要方法及结果参见第三章；对于余热回收和动态适应技术，经过调研发现其工况表现较为复杂，本研究未开展深入研究。

我们模拟了主流汽车制造商使用的几种空调制冷剂和技术的生命周期温室气体排放量。基于LCCP改良模型，我们发现传统制冷剂（R-410A和R-407C）在一个空调系统的整个生命周期内的直接排放量超过15吨二氧化碳当量。另一方面，我们还考察了北京（温和）、广州（炎热）和哈尔滨（寒冷）三个城市的间接排放量。虽然各地区通过更换表现更佳的制冷剂都可以减少很大一部分温室气体排放量，但寒冷地区的城市在温室气体减排方面有着更大的提升空间。例如，哈尔滨和北京的汽车空调系统可减少30吨到127吨二氧化碳当量的总温室气体排放量，广州的汽车空调系统可减少14吨到47吨二氧化碳当量。

不过，本文仍有一些问题待解答。例如，能否找到一种减少汽车空调系统排放的高性价比方法？如何制定标准以更有效地控制汽车空调系统的排放？未来电动客车能耗工况中如何设定车载空调的测试规程，以更好地反应实际能耗？如果不深入调查中国的汽车空调系统市场，特别是各类车辆上空调系统的实际能效，就无法回答这些问题。在后续工作中，我们将继续尝试从技术和成本效益两方面分析汽车空调系统的减排潜力。同时，我们也将接下来的工作中尝试构建适用于中国不同地区的电动客车能耗工况测试规程，为相关法规的出台提供技术和政策的建议。

附件1: 调查问卷

	中文	对应英文
1	主要生产那种类型的汽车（动力类型及车型）？	What type of vehicles do you produce (by powertrain and category)?
2	主要采用哪种空调技术（空调系统+制冷剂），各类空调技术在企业内的占比大概多少？	What type of MAC technology (air conditioning system + refrigerant) do you use? What the share of each technology?
3	选择空调技术的主要因素有哪些？	What key rationale behind your decision on this MAC technology?
4	目前正在使用的空调技术的制冷/制热能效？	How efficient is your MAC system for heating and cooling?
5	R-134a、R-410A、HFO-1234yf等制冷剂主要的供货商有哪些，不同制冷剂的采购价格大概多少？	What's the main suppliers for refrigerants such as R-134a、R-410A、HFO-1234yf? What's the range of cost for procurement?
6	单车制冷剂的消费量大概多少？	How much refrigerant does a typical model consume for once filling?
7	是否有相应的替代制冷剂的偏好？	Is there any preferred substitute refrigerant?
8	汽车生命周期内需要加注几次制冷剂？	How many times of filling during the whole lifecycle of the vehicle?
9	是否要求下辖4s店回收维修过程中的制冷剂，实际回收率大概多少？	Are retailers required to recycle refrigerants? Recycling rate?
10	如何处置回收后的制冷剂？	How recycled refrigerants to be managed?
11	选择替代制冷剂主要考虑的因素有哪些？	What key rationale behind your decision on substitute refrigerant?
12	适用于电动车及传统燃油车的空调技术有哪些差异？	What difference of MAC technology between electric and internal combustion engine vehicles?
13	是否已经开始或者计划开始研发适用于替代制冷剂的空调系统，研发及应用的难点有哪些？	Is there any new MAC system under development? What's the bottleneck for application?
14	是否针对汽车空调开展能效提升技术的研究工作，能效提升效果怎么样？	Any study about improvement of energy efficiency for MAC technology?

附件2：本研究电动客车空调系统模拟总排放量

车长	城市	制冷剂	排放量 (吨CO ₂ 当量)			改进率 ⁶
			直接排放量	间接排放量	总排放量	
6米	哈尔滨	R-410A	18.99	100.98	119.97	/
		R-407C	15.38	101.25	116.62	/
		R-744	0.01	59.30	59.31	49.15%
		R-290	0.01	55.89	55.90	52.07%
	北京	R-410A	18.99	45.54	64.54	/
		R-407C	15.38	46.26	61.64	/
		R-744	0.01	32.16	32.17	47.82%
		R-290	0.01	27.94	27.95	54.66%
	广州	R-410A	18.99	46.34	65.34	/
		R-407C	15.38	48.28	63.66	/
		R-744	0.01	49.41	49.41	22.37%
		R-290	0.01	44.89	44.89	29.47%
8米	哈尔滨	R-410A	31.66	127.52	159.18	/
		R-407C	25.63	127.79	153.41	/
		R-744	0.01	74.05	74.06	51.73%
		R-290	0.01	69.84	69.85	54.47%
	北京	R-410A	31.66	53.66	85.32	/
		R-407C	25.63	54.38	80.01	/
		R-744	0.01	36.18	36.19	54.76%
		R-290	0.01	31.22	31.23	60.97%
	广州	R-410A	31.66	46.84	78.50	/
		R-407C	25.63	48.77	74.40	/
		R-744	0.01	49.83	49.85	33.01%
		R-290	0.01	45.21	45.23	39.22%
10米	哈尔滨	R-410A	37.99	174.48	212.47	/
		R-407C	30.75	174.75	205.50	/
		R-744	0.02	100.14	100.16	51.26%
		R-290	0.01	94.53	94.55	53.99%
	北京	R-410A	37.99	68.02	106.01	/
		R-407C	30.75	68.74	99.49	/
		R-744	0.02	43.30	43.31	56.46%
		R-290	0.01	37.01	37.03	62.78%
	广州	R-410A	37.99	47.71	85.70	/
		R-407C	30.75	49.65	80.40	/
		R-744	0.02	50.59	50.60	37.07%
		R-290	0.01	45.79	45.81	43.03%
12米	哈尔滨	R-410A	53.82	195.39	249.21	/
		R-407C	43.57	195.65	239.22	/
		R-744	0.02	111.76	111.78	53.27%
		R-290	0.02	105.52	105.54	55.88%
	北京	R-410A	53.82	74.41	128.23	/
		R-407C	43.57	75.13	118.70	/
		R-744	0.02	46.47	46.49	60.83%
		R-290	0.02	39.59	39.61	66.63%
	广州	R-410A	53.82	48.10	101.92	/
		R-407C	43.57	50.04	93.61	/
		R-744	0.02	50.92	50.94	45.58%
		R-290	0.02	46.05	46.07	50.79%

⁶ 相对于R-407C系统的改进率

参考资料

- AGC Chemicals. (n.d.). *R-407C | Products and Service Information | AGC Chemicals Company*. Retrieved October 9, 2021, from <https://www.agc-chemicals.com/jp/en/products/detail/index.html?pCode=JP-EN-G007>
- ChemEurope. (n.d.). *Difluoromethane*. Retrieved October 9, 2021, from <https://www.chemurope.com/en/encyclopedia/Difluoromethane.html>
- Darment. (n.d.). *R290 refrigerant (GWP 20) gains popularity*. Darment. Retrieved October 9, 2021, from <https://darment.eu/refrigerant/r290/>
- EPA. (2014). *Summary of Substitute Foam Blowing Agents Listed in SNAP Notice 25*.
- Koban, M. (2009). *HFO-1234yf Low GWP Refrigerant LCCP Analysis*. 2009-01-0179. <https://doi.org/10/b2rmtv>
- LearnMetrics. (2020, May 6). *How Do Portable Air Conditioners Work? (Easily Explained)*. LearnMetrics. <https://learnmetrics.com/how-do-portable-air-conditioners-work/>
- NISSAN MOTOR Co Ltd. (n.d.). *Heat-Pump Cabin Heater*. NISSAN | Technology. Retrieved November 29, 2021, from https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/heat_pump_cabin_heater.html
- NOAA. (n.d.). *NOAA Global Monitoring Laboratory—Halocarbons and other Atmospheric Trace Species*. Retrieved October 9, 2021, from <https://gml.noaa.gov/hats/combined/CFC12.html>
- PubChem. (n.d.). *1,1,1,2-Tetrafluoroethane*. Retrieved October 9, 2021, from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/13129>