

车用替代燃料能源消费和温室气体排放对比研究

申 威¹ 张阿玲² 韩为建³

(1.清华大学公共管理学院 2.清华大学核能与新能源技术研究院 3.美国福特汽车公司)

申威等.车用替代燃料能源消费和温室气体排放对比研究.天然气工业,2006,26(11):148-152.

摘 要 为了定量解释以天然气为原料的不同车用替代燃料的节能和温室气体减排潜力,使用国际流行的 Well-to-Wheel 研究方法,依靠来自石油天然气开采、处理和加工工业的大量一线数据,对中国目前正在使用和拟议开发的 4 种来自天然气的车用燃料与传统汽柴油燃料进行了对比研究。从全生命周期的角度来看,天然气制备的液体燃料——甲醇、二甲醚和天然气合成油在能源消耗量和温室气体排放量方面明显高于汽柴油,压缩天然气是唯一可以在上述两个方面与传统燃料竞争的天然气基车用燃料。天然气基车用燃料的一个优势是全生命周期的石油消耗远低于汽柴油,对短期石油安全问题有一定缓解作用。在目前技术水平下,在我国大规模推广以天然气为原料的合成液体燃料应该慎重。如果从节能和温室气体减排的角度来看,发展混合动力车,提高车辆的燃料经济性水平,则是更有吸引力的选择。

主题词 天然气 甲醇 二甲醚 天然气合成油 汽车 替代燃料 温室气体 能源消耗 对比

针对以天然气为原料的 4 种车用燃料:压缩天然气(CNG)、甲醇(MeOH)、二甲醚(DME)和天然气合成油(GTL)的开发、生产和使用过程中的温室气体排放进行研究,并同国内通用的以石油为原料的车用燃料进行了对比。

一、燃料生命周期评价的理论

从温室气体减排的角度考虑,如何选择一种最优的车用燃料,不仅需要考虑燃料在机动车使用过程中所导致的排放,还应该考虑与该种车用燃料生产相关的诸多环节的温室气体排放。因此,欧美科学家在这方面的最新研究成果普遍采用 Well-to-Wheel(“从井到轮”)分析法,它可被看作是一种特殊类型的生命周期评价(LCA,Life Cycle Analysis)研究——燃料循环生命周期研究^[1-3]。

如图 1 所示,在机动车—燃料系统中,Well-to-Wheel 分析主要研究燃料循环的能源使用和温室气体排放问题。它包括两个主要阶段:Well-to-Pump(“从井到泵”)和 Pump-to-Wheel(“从泵到轮”)。前者的研究对象是车用燃料的上游生产阶段,包括一次能源开采、一次能源运输、燃料生产、燃料运输、分配和储存,以及燃料加注过程。后者的研究对象是车用燃料的下游使用阶段,也就是机动车行驶中的

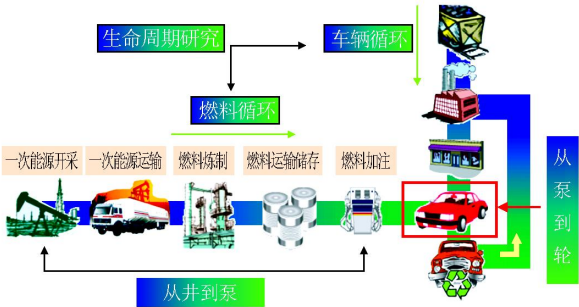


图 1 LCA 和 Well-to-Wheel 的研究框架图

燃料燃烧和排放。

二、评价对象、模型和假设

本课题的研究对象包括来自于石油和天然气的车用燃料:汽油、柴油、压缩天然气、甲醇、二甲醚和气制油。研究范围是燃料生命周期温室气体排放,包括“从油井到车轮”的燃料循环,不涉及车辆循环(机动车本身及其上游材料的生产、制造和回收过程)。

《京都议定书》采纳了联合国气候变化跨国工作组(IPCC,Intergovernmental Panel on Climate Change)规定的六种主要温室气体:二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)和六氟化硫(SF₆)。其

作者简介:申威,1975 年生,清华大学公共管理学院博士研究生。地址:(100084)北京市清华大学能源科学楼 C 座 308 房间。电话:(010)62773122,13520290075。E-mail:shen-w03@mails.tsinghua.edu.cn

中,前三者与车用燃料的生产和使用密切相关,笔者的研究焦点也集中在这三者之上。

在生命周期研究中,笔者引入“功能单位”的概念。这个概念使得被研究的不同对象可以被看作功能相当的系统,从而建立基准能流和物流,并且使针对不同对象的研究结果具有可比性^[4]。在 Well-to-Pump 阶段,本课题的功能单位设定为“在加注泵口,能值为 1 MJ 的燃料”。在 Pump-to-Wheel 阶段,功能单位设定为“机动车行驶 1 公里”。两者之间通过机动车的燃料经济性数据建立联系,公式如下:

机动车行驶 1 km 的温室气体排放量=机动车百公里燃料耗量/100×(单位燃料燃烧的温室气体排放+生产单位燃料所导致的温室气体排放)

本课题采用在燃料周期研究领域具有领先地位的美国阿冈国家实验室开发的 GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use of Transportation) 模型最新的 1.7 版本(2005 年 11 月发布),作为计算工具。

在计算时,一种必须考虑的现象是可能出现循环:比如开采石油的过程需要用到柴油,而柴油本身又需要开采石油并加以炼制来得到。GREET 模型具有循环计算功能,因此可以对全燃料周期的总能消费及导致的温室气体排放做出准确测算。

在计算二氧化碳排放因子时,GREET 模型采用碳平衡法,但没有考虑燃料的不充分氧化问题,笔者对此做了修正,采用 IPCC 推荐的公式进行计算^[5]:

二氧化碳排放因子=(能源消费量×能源含碳量-一固碳量)×燃料氧化率×44/12

三、数据采集和评估

1. 资源开采

笔者对于中石油和中石化所属的 14 个油气田的技术能耗数据进行了实地调查。天然气开采和处理方面,有 9 个油气田提供了 4 种天然气处理技术的能耗数据,其天然气产量占 2004 年全国总产量的 59%。在石油开采方面,从包括大庆、辽河、胜利在内的 13 个油田收集了举升、注水、集输、脱水、稳定五大系统的 46 种过程技术的能耗数据,这 13 个油田的原油产量达到 2004 年全国总产量的 75%。

在石油天然气开采中,不同类型的过程燃料会被使用。这些燃料的含碳量不同,因此燃烧产生温室气体的排放因子也不相同。笔者采用中国石油天然气开采业的终端能源平衡表和不同过程燃料的能值,计算过程燃料的使用比例。这中间可能包括了

少量生活区用能,但在无法得到关于“过程燃料比例”更准确的统计前,这是现有最可靠的数据。

由于车用燃料的生产、运输和分配过程中经常需要使用煤炭,因此笔者也利用 2004 年全国煤炭开采和洗选行业终端用能平衡表中提供的统计数据计算了煤炭开采和洗选过程中的能源消费量和温室气体排放量。

2. 资源和燃料的运输

截至 2003 年,我国天然气产量一直高于消费量,净进口量为 0。2004 年的国内天然气产量为 $408 \times 10^8 \text{ m}^3$, 国家统计局年报估计消费量为 $415 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而 BP 公司的《国际能源统计》认为消费量为 $390 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。笔者认为我国仅有 2% 以下的天然气依赖进口,主要是从澳大利亚和东南亚海运 LNG。

国内天然气的运输方式主要是管道运输,根据交通年鉴的统计,2004 年全国天然气的管道输送量为 $252.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全国天然气消费量的 61%, 平均转运距离是 469 km。根据中石油提供的数据,输送每 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 天然气的燃料消费为电力 0.8 kWh 和天然气 0.03 m^3 。

由于我国从 2004 年才开始建造 LNG 运输船,而且海洋天然气都是通过海底管道运输的,因此可以认为目前的天然气运输中水运的比例可以忽略。另一种天然气运输方式是液化以后通过铁路进行长途运输,交通年鉴中统计的运输距离约为 920 km。表 1 给出了中国铁路运输的一些基础数据,并计算出铁路运输天然气的能源强度。

表 1 2004 年中国铁路运输基本情况表

项 目	蒸气机车	内燃机车	电力机车
转运量所占比例	0%	61.3%	38.7%
万吨公里燃料消费量	煤 330.5 kg	柴油 25.0 kg	电 111.2 kWh
能源强度(kJ/t·km)	710.3	104.6	40.0

注:数据来源于《中国交通年鉴 2005》。

原油、成品油和煤炭运输中相关数据的计算与天然气运输过程相似,这里不再赘述。需要说明的是进口原油运输能耗的计算。

中国原油的进口情况如表 2 所示,2004 年进口原油的 90% 依赖远洋运输(也就是石油消费总量的 38% 需要海运),其中中东、西非和亚太(主要是东南亚)合计占了 77%, 占海运石油总量的 87%。因此,在考虑海运航程时用使用阿曼油港 Mina Al Fahal、

尼日利亚油港 Forcados 和东南亚的新加坡港作为运输起点计算进口原油海运的能源消费,油轮单程的燃料消费参考大连海事学院和中国远洋运输集团公司推荐的不同距离优选船型能耗^[6]。

表 2 2004 年中国原油进口情况表

项 目	中东	亚太	西非	北非	东南非	前苏联	欧洲	大洋洲	其他
进口量(Mt)	62.8	40	7.9	2.1	5.8	18.0	2.6	2.2	7.4
所占比例(%)	37.3	23.8	16.3	1.3	3.4	10.7	1.5	1.3	4.4

注:数据来源于《BP Statistical Review of World Energy 2005》。

3. 车用替代燃料的生产

(1) 压缩天然气

据对川渝地区的实地调查,国内压缩天然气的生产较简单,经净化处理的工业天然气通过管道输送到城市中的加注站后,在站内使用电力压缩至 20~25 MPa 后供汽车使用,电力消费为 2 kWh/m³。

(2) 甲醇

根据国家统计局的数据,2004 年全国甲醇生产能力 528×10⁴ t,总产量 440×10⁴ t,消费总量 573×10⁴ t,进口 136×10⁴ t。全国现有主要甲醇生产厂家 186 家,其中 20 家使用天然气作为原料,生产能力占全国产能的 23%。这些厂家生产规模普遍比较小,一般都是合成氨联产甲醇装置,其中甲醇产量超过 20×10⁴ t 的仅有 3 家。主要生产技术是蒸气甲烷重整(SMR),这也是世界各国普遍采用的甲醇生产技术。但是,目前国际甲醇生产在向大型化发展,国外共有甲醇生产装置 85 套,每套年平均生产能力超过 40×10⁴ t,年生产能力大于 90×10⁴ t 的装置有 10 套。因此,国外甲醇综合能耗低,每吨甲醇耗天然气为 810 m³,国内一般为 1100~1260 m³^[7]。

在计算甲醇生产的能耗及温室气体排放时,所采用的天然气、电力和蒸气投入量等数据来自对四川某大型天然气化工厂的调查。该厂引进国外技术改造后,每吨甲醇的原料和过程燃料消耗量低于上述的国内一般水平。

(3) 二甲醚

使用天然气为原料生产二甲醚,主要有两种技术:两步法和一步法。两步法是通过天然气合成气反应先生成甲醇,然后甲醇脱水得到二甲醚。目前在国外的二甲醚生产中已经广泛使用,国内的一些生产线也达到了国际先进的水平。一步法是使合成甲醇和甲醇脱水两个反应在一个反应器中进行。丹麦的托普索公司、美国的空气产品公司和日本的 NKK 公司都掌握的一步法工业技术。国内的大连物理化学所、山西煤化所、杭州大学、清华大学等单

位也都开发了一步法技术,并且进入小规模中试阶段^[8]。笔者的计算采用国内一条两步法万吨级天然气制二甲醚生产线的实际数据。

(4) 天然气合成油

所谓 GTL 是利用费托(F-T)合成技术,以天然气为原料生产液体燃料,产品包括柴油、石脑油、液化石油气和润滑基础油等。利用这种方法生产的柴油基本不含硫和芳香烃,其清洁程度是石油为原料的低硫柴油所无法达到,是非常理想的超低硫柴油调和组分。目前世界上一些大型能源公司大力在中东和西非地区推广。比较有代表性的技术包括 Shell 公司的 SMDS,已经被用于马来西亚 1993 年投产的 GTL 工厂中,日产 12500 桶产品。以及南非 Sasol 公司的 SSPD,被用在卡塔尔和尼日利亚在建的大型 GTL 工厂中,完工后每天消耗天然气 924×10⁴ m³,日产 24000 桶柴油和 9000 桶石脑油^[9]。

目前国内还没有类似的 GTL 项目规划,因为本研究中采用南非 Sasol 公司技术方案中的原料和燃料消耗数据,计算其温室气体排放量。

(5) 汽油和柴油

根据中石化研究院和中石油信息中心提供全国炼厂的统计数据,计算国产 90、93 和 97 号汽油、0 号柴油、工业用燃料油和液化石油气的炼制能耗及温室气体排放。其中考虑了汽油含氧添加剂 MTBE 的炼制能耗和排放。对于联产产品的能耗和排放分配,参照阿冈实验室的推荐^[10],使用更精确的“炼制过程级”分配方法。

4. 其他数据

在车用燃料的整个生命周期中,电的使用非常普遍。2004 年全国火力发电平均能耗为 376 kg/kWh,电力线路传输损失率为 7.55%^[2]。依据相关资料计算出的模型输入数据如表 3 所示。

本课题采用 IPCC 推荐的二氧化碳排放因子计算公式,因此涉及到燃料氧化率的取值问题。本课题按照《中国温室气体排放清单国别研究》的推荐

表3 2004年中国不同电力情况表

项目	燃煤	燃油	燃气	水力及 新能源	核能
供电比例(%)	79.3	3.1	0.3	15.0	2.3
供电效率(%)		32.8		99.5	34.0

注:数据来源于国家统计局、中国能源研究会。

值,对天然气采用0.990,液化石油气和各种成品油均采用0.980,而煤炭采用0.900。这也符合IPCC相关推荐值的取值范围。

为了对各种不同温室气体的排放进行统一评价,IPCC公布了它们的全球变暖潜力值(GWP, Global Warming Potential),单位为“克当量二氧化碳(g-eqCO₂)”。本课题按照《京都议定书》所采纳的标准进行计算,即在100年尺度内把各种温室气体的影响力折合为当量二氧化碳的影响力。甲烷和氧化亚氮的GWP分别取23、296 g-eqCO₂/g^[5]。

对于甲烷排放因子的计算,本文采用清华大学能源环境经济研究院的《2000年中国油气系统甲烷排放源与汇清单编制报告》中的数据作为计算依据。该报告由国家科技部支持,中石油和中石化的专家直接参与,对中国石油和天然气的开采、处理、运输和消费等十个方面的甲烷和气态烃排放进行了测算,是目前国内比较全面和权威的研究成果。

目前国内外的研究资料中,还见不到关于中国实际生产中各种设备和技术过程的氧化亚氮排放因子的实测或者估算数据。因此,笔者采用美国阿冈国家实验室提供的数据作为计算依据。

选择排气量为1.6 L的国产轿车作为标准车型,综合考虑12种具有代表性的国产品牌轿车,选择8.5 L/100km为中国大城市实际工况下的汽油轿车燃料消费量。CNG轿车、M85(含85%甲醇燃料)轿车、柴油轿车、DME轿车、GTL轿车和甲醇燃料电池车的百公里燃料消费量使用GREET模型内置的换算表计算。混合动力车(HEV)的百公里燃料消耗量定为5.2 L,数据来自对丰田公司与一汽集团合作生产的2004款Prius车型的测试。

四、结果评价

1. Well-to-Pump 过程分析

中国4种天然气基车用燃料的Well-to-Pump(上游生产)阶段能源消费和温室气体排放与目前在用的汽油和柴油相关指标的对比如图2所示,所针对的功能单位是“加注站中能值为1 MJ的燃料”。

天然气基替代燃料的具体能源消耗和温室气体排放如表4所示,表中列入93号汽油以便进行对比。

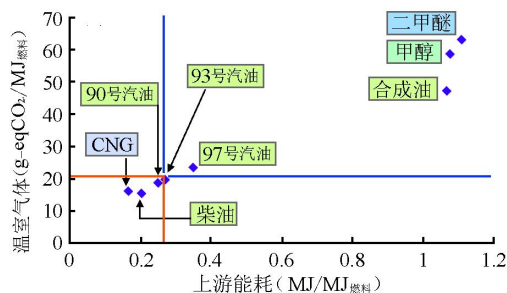


图2 以天然气和石油为原料的中国车用燃料图
Well-to-Pump阶段对比图

表4 天然气基车用燃料 Well-to-Pump 阶段石油消耗和
温室气体排放表

	93号 汽油	CNG	甲醇	二甲醚	GTL
石油消耗(MJ)	0.178	0.006	0.021	0.017	0.013
CO ₂ (g)	19.1	13.5	55.0	59.2	43.2
CH ₄ (g)	0.030	0.120	0.161	0.164	0.161
N ₂ O(mg)	0.24	0.17	0.62	0.62	0.61
GHCs(g-eqCO ₂)	19.9	16.3	58.9	63.1	47.1

综上得到以下结论:①如果以目前城市轿车通用的93号汽油为基准,那么图1中2条红线与坐标轴所形成的方框中的燃料在上游生产过程中的能源消费和温室气体排放均更优,以天然气为原料的替代燃料只有CNG处于这个区域;②以天然气为原料生产的甲醇、二甲醚和GTL合成油在上游生产阶段比汽油和柴油消耗更多的能源,同时也导致更多的温室气体排放,但是石油的使用量则明显下降了,仅在合成和运输过程中少量使用来自石油的工业燃料油和汽柴油;③从资源开发和燃料运输阶段来看,替代燃料与传统燃料差异不大。但是在生产阶段,国内生产天然气基替代燃料(除CNG外)的能源效率普遍在40%~60%,无法同炼油工业92%的炼厂效率相比,这是导致温室气体排放剧增的主要原因;④对于天然气基燃料来说,温室气体排放的主体与汽油一样,都是二氧化碳,但是甲烷排在天然气类燃料温室气体排放中所占的比例明显高于汽油。

如果考虑燃料的全生命周期,就可以得到Well-to-Wheel的完整分析结果,如表5所示。

所针对的功能单位是“汽车行驶1公里”。可以得到如下结论:①从全生命周期来看,以天然气为原料的替代燃料轿车中,只有单一燃料的CNG轿车在

能源消费和温室气体排放两方面优于传统的汽油车,M85、二甲醚和 GTL 作为车用替代燃料则没有能源与温室气体减排方面的优势;②从温室气体的排放分布来看,天然气为原料的甲醇、二甲醚和 GTL 的分布与汽油和柴油不同,车用阶段的比例下降,燃料生产运输阶段的比例升高;③从全生命周期节能和温室气体减排考虑,柴油轿车和汽油混合动力车明显优于汽油车,柴油轿车的表现是由于加工阶段能效较高,而且压燃式发动机效率更好,混合动力车的表现说明提高轿车燃料经济性水平仍然是目

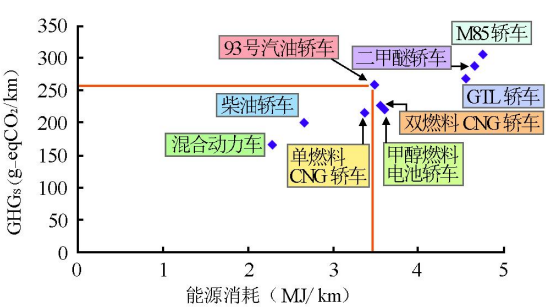


图 3 以天然气和石油为原料的中国车用燃料 Well-to-Wheel 阶段对比图

表 5 天然气和石油车用燃料全生命周期温室气体排放及分布表

项目	93 号汽油 轿车	0 号柴油 轿车	单燃料 CNG 轿车	双燃料 CNG 轿车	M85 甲醇 轿车	二甲醚 轿车	GTL 轿车	混合动力 轿车	甲醇燃料 电池轿车
GHGs (g-eqCO ₂ /km)	258.3	200.6	214.4	226.0	305.2	288.3	266.2	165.6	221.3
原料阶段(%)	8.3	8.6	13.0	13.0	6.8	6.3	6.8	8.0	6.4
燃料阶段(%)	12.8	8.4	8.9	8.9	33.9	42.1	32.3	15.8	39.7
车用阶段(%)	78.9	83.0	78.1	78.1	59.3	51.6	60.9	76.2	53.9

前最有效的节能和减排手段;④国外正在开发示范的车载甲醇制氢的燃料电池车在温室气体排放方面低于汽油车,能源消耗则略多,没有明显优势。

2.政策建议

从全生命周期能源消费和温室气体减排角度来看,在找到更高效率的合成技术路线之前,不宜大规模推广以天然气为原料的液体车用燃料。与之相比,柴油车和混合动力车更适合作为发展方向,而且在推广中不存在燃料基础设施投资改造问题。目前,交通部门对天然气的利用,仍然应该首先考虑压缩天然气。

对于我国天然气资源究竟如何利用应该慎重探讨,制定长期和全局战略。我国现有石油资源的储采比为 13.4,天然气资源储采比则高达 54.7。以天然气为原料制备车用燃料的一个优势是可以减少交通部门对进口石油的依赖。但是,天然气在 2004 年全国能源结构中仅占 2.5%,而国产石油占 12%。如果天然气使用量增加到石油的程度,则天然气资源相对丰富的现状就不复存在了,仍然需要依赖国外资源。

参 考 文 献

[1] 王庆一. 可持续能源发展财政和经济政策研究——2005 能源数据报告[R]. 北京: 中国能源研究会, 2005.
[2] NORMAN BRINKMAN, MICHAEL WANG, et al.

Well to wheel analysis of advanced fuel/Vehicle systems- A north american study of energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions [R]. Warren: GM Research and Development Center, 2005.
[3] CONCAWE, EUCAR. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context [R]. European Commission Directorate-General Joint Research Center, 2004.
[4] JEROEN B GUINEE, et al. Handbook on life cycle assessment: operational guide to ISO Standards [M]. Leiden: Kluwer Academic Publishers, 2001.
[5] IPCC. IPCC 国家温室气体清单优良作法指南和不确定性管理[R]. 东京: IGES, 2000.
[6] 谢新连, 滕亚辉, 高峰, 等. 进口原油运输船型经济性分析[J]. 中国航海, 2001(1): 77-81.
[7] 我国天然气化工发展战略与对策[R]. 北京: 中国化学工业协会, 2005.
[8] 张昊志, 倪维斗, 江华. 几种天然气制二甲醚方案用于解决国内天然气应用的探讨[J]. 天然气化工, 2004, 29(6): 28-33.
[9] 陈祖庇. 由气体生产液体的 GTL 技术应用前景[J]. 炼油技术与工程, 2004, 38(8): 1-5.
[10] MICHAEL WANG, HANJIE LEE, JOHN MOLLBURG. Allocation of energy use in petroleum refineries to petroleum products [J]. International Journal of LCA, 2004, 9(1): 34-44.

(修改回稿日期 2006-09-11 编辑 居维清)