

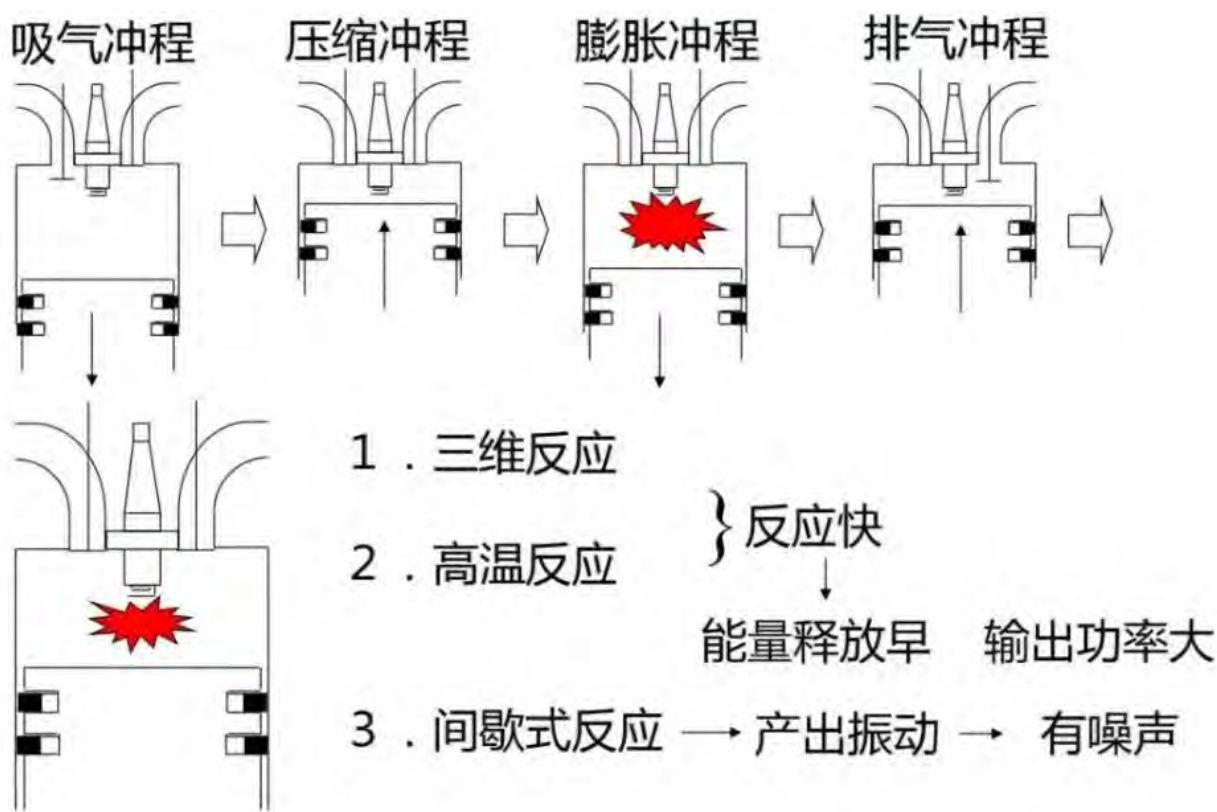
# 氢内燃机与氢燃料电池比较

文 | 帅石金 清华大学车辆与运载学院、智能绿色车辆与交通全国重点实验室教授 演讲实录

两者技术相通，路线不同，核心比  
拼的是效率问题。真正要解决氢内燃机

工业化的问题，首先技术路线图要把它  
包含进去，它也是新能源。

我算是做发动机的，但在碳中和、  
电动化的背景下，我也在五六年前涉足



内燃机构的工作原理

了燃料电池，不仅有氢燃料电池，还有固体燃料电池，借此机会分享一下内燃机和燃料电池是什么关系，谁会胜出，是怎样的未来。

还是先回到燃料问题，氢是我重点要讲的，但不光是氢，上游还有电，下游还来了很多与燃料相关的问题，这其中也涉及氢燃料发动机的燃料问题等。当然在此基础上，我相信很多人都知道燃料电池、内燃机，但是放在一块怎么看待？它们是有相通的地方或是非常多相同的地方。

我重点从燃料效率来分析。大家都说燃料电池效率高，高到什么程度？我们先探讨这个问题，在此基础上再讨论氢内燃机，如氢是不是内燃机的救命稻草；以及燃料电池如何用氢，围绕这两个话题，谈谈个人的认识，最后是总结和展望。

### 电 - 氢互联互通

2021 年疫情防控期间，我写了一篇内燃机综述的文章，讲碳中和下内燃机该怎么发展？是不是机遇？有没有挑战？当初把燃料的问题、涉及电的问题等都做了全产业链的分析。

当然这里涉及可再生发电的问题；涉及制氢、储氢、运氢的问题，燃料电池也面临同样的问题；涉及碳捕集的问题，如果我们采用的是 E-fuel( 电子燃料 ) 就会有碳捕集的问题；还有绿氨、甲醇合成燃料的发动机问题，当然也包括燃料电池的问题，它们共同形成了一个产业链。

如果从可再生角度来看，中国现在只有不到 20% 的可再生电，到 2065 年是 80% 以上的可再生电。所以一定是风能、太阳能、水能等，它是首先得

四种零碳动力技术的优点和缺点&四种零排放技术优缺点对比

	性能划分			
	高性能	中高性能	中低性能	低性能
	生物质/合成燃料	氢内燃机	氢燃料电池	动力电池
排放CO <sub>2</sub> 排放强度	CO <sub>2</sub> 排放强度取决于生物质/碳的来源	使用绿氢/蓝氢可实现零/最小CO <sub>2</sub> 排放	在使用绿氢/蓝氢时，实现零/最小CO <sub>2</sub> 排放	CO <sub>2</sub> 排放强度取决于混合电网：使用可再生能源可实现零CO <sub>2</sub> 排放
空气质量	NOx和颗粒物排放与柴油相似	使用SCR时，无显著NOx排放	零排放	零排放
效率(从油井到轮边)	约20%	约30% (使用可再生氢能)	约35% (使用可再生氢能)	75%-85%, 取决于传输和充电损耗
动力系统的资本支出	与现在的内燃机相同	氢发动机与柴油机的资本支出相似。但是需要氢气瓶	燃料电池和电池需要高资本支出，但比纯电动汽车更具扩展性	大型电池需要高资本支出(较小较轻的需要中等资本支出)
限制(空间、有效负荷)	尺寸和重量与现在的内燃机相同	发动机与现在的内燃机相同，但是需要氢气瓶	燃料电池和氢气瓶相比于内燃机需要更多的空间	比内燃机需要更大的重量；有效载荷约束限于工况
运行时间、补充燃料	<15分钟，取决于油箱大小	<15-30分钟，取决于气瓶大小	<15-30分钟，取决于气瓶大小	3小时以上，取决于快充能力
基础设施成本	可以使用现有基础设施	需要氢能分配和加氢站	需要氢能分配和加氢站	需要充电桩和电网升级

到电，所以绿电在第一个产业链是占优势的，我想碳中和也是呼应电动化。在内燃机早期，我们和电动车干过一仗，把它干掉了，电动车实际上比内燃机出现更早，现在它又来了，又要展开新的 PK，所以这个问题我们回避不了。总体来讲，碳中和时代，尤其在电池技术得到突破之后，确实给我们内燃机带来很大的压力，我们很多应用场景在收缩，这是不争的事实。从这里看得出来，碳中和又把绿电拿出来了，它在第一环节。

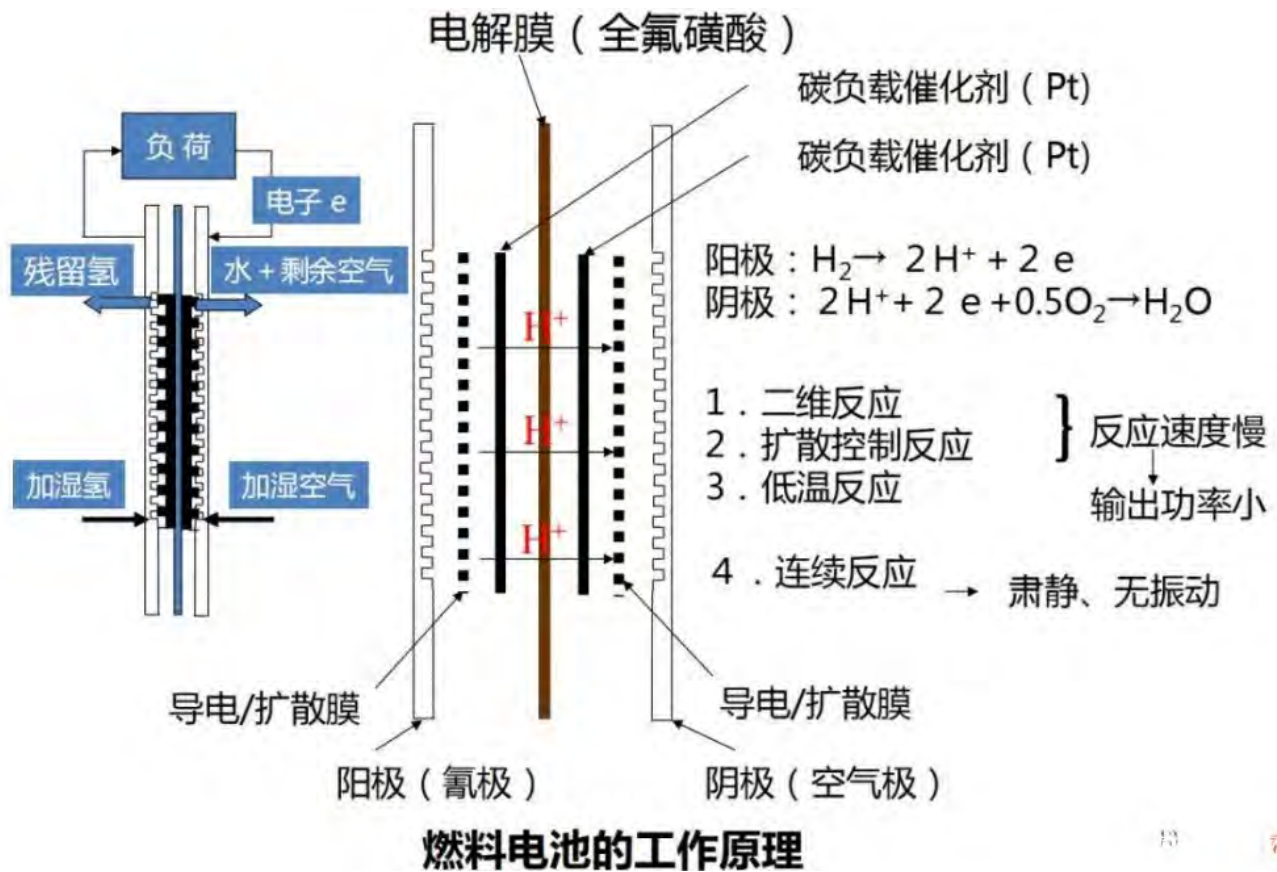
第二个环节就是氢气或者氢能源可能是我们未来实现碳中和不可缺少的，必须得有它。光有电，你会发现 80% 的碳中和可能很难实现，所以氢又被提出来了。当然氢可爱又可恨，可爱的是它是零碳，可恨的是它太轻了，体积能量密度太低了，既有安全问题，也有储运成本非常高的问题。

所以这里提出来了氨，有没有可能用液体的燃料？刚才说内燃机确实赢

在油箱上，赢在了液体燃料上。氨就是液体的，存储也没有大问题，是可以解决的。但关键是怎么去用？氨内燃机不好燃烧，不容易着火，不容易火焰传播。现在搞发动机的专家们在做这项研究，正在攻关，这是一条路。

重新定义新能源汽车。这个链上所有的技术路线都属于新能源路线，电也是，氢也是，包括 E-fuel 也是，希望大家形成这个观点。我希望我们的政策、技术路线也给我们新的机会，给 E-fuel 机会，这才是公平，因为最终都能实现零碳的目的。

有的人说既然氨不好用，有没有别的液体燃料？有。这就是我们讲的，如果把捕集到的二氧化碳再和绿氢混合，去合成，就得到了我们非常熟悉的各种 E-fuel。产业链里头，甲醇是第一个，它就是用捕集的二氧化碳和氢，可以通过一步，也可以两步来合成实现的。过去我们说甲醇是煤制，便宜，但是高碳，现在故事变了，因为碳中和液体燃料是



放在前面的，所以我把它排在第四。

但是这里问题出来了，本身目的是要零碳，结果把碳带来了。碳捕集，我们理解的是直接从空气进行碳捕集，这个故事是非常圆满的，从空气中捕集到碳，再排到空气中去，这是零碳。如果不是这样，你只是从烟囱中捕集到碳，再排出去，那就是换一个地方排放的概念了。碳交易实施之后，这个问题怎么弄，它一定要算到你身上的。它的好处是，常温常压的液体燃料甲醇，虽然能量密度比汽油低 50%，油箱大一倍，但实际应用没有大的问题，尤其在重卡上。

当然我们还讲，后面故事好多，我们是搞内燃机的，不希望用甲醇，用汽油就可以，甲醇合成汽油这个技术也非常成熟。所以现在的汽油机不用做任何改动，它（合成的）的高标号汽油，品质非常高，完全不输化石燃料汽油，但它是 E-fuel。当然这里还有其他选择，我们有合成气，我不用甲醇，用一氧化碳和氢气，我就得到费托工艺制成的柴油、煤油，都可以实现零碳。

如果纯粹讲零碳燃料，这个燃料不含碳就是氢、氨，如果含碳就是 E-fuel，这两个加起来实际上就是碳中和燃料。

我认为新能源车，现在我们可以重

新定义了，这个链上所有的技术路线都属于新能源路线，电也是，氢也是，包括 E-fuel 也是，希望大家形成这个观点。

过去为什么我们对电动车也有不同的认识，因为它不是真正的绿电，不是真正的新能源。我希望我们的政策、技术路线也给我们新的机会，给 E-fuel 机会，这才是公平，因为最终都能实现零碳的目的，只是产品不一样，场景不一样。

我觉得这非常重要，我们搞发动机，如果对燃料不认识清楚，你来谈效率提高一两个百分点，不解决问题。

回到电，我认为电是一个好东西，因为它太好了，它是人类不可或缺的“能量中转站”。它的来源广泛，包括热、光，因为电机的技术非常成熟，很容易得到电，存储也方便。当然它的问题也在这里，虽然方便但是成本高，存储它的电池体积能量密度不高。好处是传输快捷、容易转换成相关能源。还有一个很好的特点，它可以精确控制。但挑战是，它属于过程性能源。

为什么氢有机会？就是因为你有白天、晚上两种场景，有风、没风两种情况。电本身不是问题，就是它的存储昂贵，是电池的问题，加上体积能量密度的问题，和油箱没办法比，加上电网现阶段的覆盖情况，我们不能说随时可以拿到电，我想这是氢能的机会。

氢能是人类不可或缺的能源载体，也是人类不可或缺的化工原料，人类要靠氢实现碳中和。氢作为能源也是可以拿来应用的，它的来源很广，利用形式多，我既可以直接烧它，也可以电化学用它，非常干净，故事非常好听。它面临的挑战就是体积能量密度太低了，存储占空间，液化也好、高压也好，包括金属存储，在技术上都有很大的挑战，成本也非常高，以及提到氢时说到的安全问题，但某种程度上安全不是问题。

光有电不行，氢能也给我们带来了机会。未来实现碳中和理想的能源载体组合就是电-氢互联互通。原来解决方法说是不可能没有氢，现在是肯定有氢了，大家怎么把它用好？所以燃料电池要抓紧机会，我们搞内燃机的也想争这口气，也想和它PK。

我们有不同的碳中和燃料，当然会有不同的动力，你会发现多元化选择，我们和研究电的人不是一路人，但是现

在一条道路上。燃料电池、氢燃料发动机都面临和电的竞争，如果绿电成本很低，储能成本很低，能量密度高，那和电机肯定是完美结合，我们退出历史舞台没问题。假如电随时都能获得，使用场景都能满足，碳中和这条道上我们仍然认为是电动化唱主角，它的基础是在这儿，它是有底层逻辑在这里的。

但是绿电到不了的地方，氢是有的，那我们燃料电池可以来，固体氧化物燃料电池 (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) 也在争，所以你用氢也好，氨也可以烧，但是我知道，氢燃料发动机机会更多，氨可能要混烧，它是零碳的燃料，这个实现碳中和是没有任何问题的。

我们最希望是 E-fuel，液体的、液质的、直接碳捕集的，柴油、汽油、甲醇都有未来，挺好的，什么都不要动，照样实现碳中和。大家算过这个成本没有，这也是一条路线，我认为也值得探索。

另外，我们现在所谓的生物质柴油、汽油已经在用，部分实现碳中和，增加乙醇的比例，就是低碳，就是节能，我什么都不用变，以后纯汽油没有了，我用高比例的乙醇难道不是零碳、不是低碳吗？我想是。这是讲的交通能源的路线。

现在回到氢动力，重点讲氢动力在车、船、飞机上的应用。波音也好，空客也好，都在考虑氢，而且真正已经在做了。我个人认为氢动力没准最适合的是航空。因为它没有加氢站的问题，就是点到点，飞机体积大，越大它越不怕，氢的问题在航空里头非常有意思，所以航空可能是最合适的。

在其他交通领域，可能商用车机会

更多，乘用车有没有机会，也可能有，但纯电、插电已经是比较好的选择了，混合动力也是个选择，乙醇的、甲醇的、碳中和的燃料有了，基本就能满足各种需求了。现在氢动力在纯商用车里应该还有机会，当然这里还有燃料电池；船里头我认为氨、混合燃料可能机会更多一点。这是关于它的应用场景。

这是我前面给大家做的铺垫，我认为很重要。

### 效率孰高孰低

氢内燃机跟氢燃料电池类似，因为人口都是氢气，都是相关的碳氢燃料，出口就是机械能，所以内燃机等于燃料电池+电机，这个非常清楚。它们有很多的共同点，都是能量转换装置，化学能到机械能都是这样的，中间无非是内燃机有一个热能燃料电池是电能直接就过来了，学科也是相通的，燃烧化学、电化学都有热的问题效率上也差不多，不同点也有，往复、运动、旋转等等。

给学生上课，原来只讲发动机，现在不行，学生不干了，你必须得讲电机，必须讲电池，我也算半个懂这方面，没有办法，逼过来的，这么大年纪还在学习。内燃机的燃烧有效效率等于燃烧效率×循环热效率×机械效率，汽油机材料燃烧效率接近100%，非常高效，就是排出来一点颗粒物和一氧化碳。我们输在什么地方？就是循环热效率，但是这是卡诺循环决定的，因为你的热能最多只能排到环境温度，不可能排到-273℃，这是我们面临的问题。

同样想想，燃料电池，我们的主要竞争者，它的效率作为发动机来讲，入口、出口一样的，也是系统效率×电机效率，峰值95%以上，这个没有问题。

但是燃料电池的系统效率等于电堆效率 x 附件效率，附件效率一样有损失，当然电堆的理论效率，也是比较高的，80% 多，甚至 90% 以上。

燃料电池中，它的效率在什么地方？啥就是热值，关键是温度 x 熵变，就是它的热损失。燃料电池有热损失，内燃机也是一样，随着工作温度升高，效率是掉下来的。但是燃料电池是有氢的，氢的热效率还不是最高的，如果烧甲烷，比氢的热效率还高，所以理论上燃料电池是有一定优势的。但是，它的损失也是巨大的。在什么地方？有三个环节。

我们用氢，没有问题，但是你的极化损耗比较大。别看氢燃料电池不用像内燃机一样燃烧氢气，但是在 100 多摄氏度下发生化学反应，你得用贵金属，才有可能在温度比较低的时候进行电化学反应，所以这个活化能损失比较大，会一下子把电压拉下来。这中间还有欧姆极化，膜又贵，干也不行，湿也不行，也是有损失，再加上浓度分布不均匀，进气的时候传值也会有损失，掉得很厉害。

燃料电池，第一负荷时的效率是比较高的，60% 左右，中高负荷的时候效率也就是 40% 多，50% 多，但是内燃机，过去的效率不高，只有 20% 多，30% 多，现在为什么高了？是因为拥抱了电，电对内燃机是巨大的促进，内燃机拥抱了电，所以效率也

燃料电池也属于混合动力，它一样是电池，因为它启动满足不了动态响应，你也提到了 40%，甚至 50%。是混合动力，我也是混合动力，一比发现差不多，一样的系统。零碳动力、生物质燃料、纯乙醇、生物质柴油有很多好处，

但是量上不来，满足不了可再生。动力电池的优点是电极效率高，缺点就是存储问题，那我用油箱跟你 PK。

那么，内燃机和燃料电池都是一样的，燃料前端完全一样，我们要 PK 的是能量转换这一端，各有优势，你的故事很好听，但是我要抓的是你燃料电池的成本，你的可靠性。内燃机的产业链非常成熟，烧氢绝不是一个新生事物。我们在这个动力层面，在使用端来 PK，促进行业进步。

从效率角度讲，纯电高高在上，所以使用起来是便宜，就是电池贵，还有能量密度的问题，以及它带来的里程焦虑、充电焦虑，低温的时候东北不愿意用它，所以才有内燃机的机会，才有燃料电池的机会。这里讲得非常清楚，真正中高负荷差不多半斤八两，我们 PK 一下，我认为内燃机这些年进步很快。

### 有能力解决它的问题

我认为现在内燃机行业已经发力，但只要是内燃机就要被淘汰、被禁止，这是不公平的。演讲开始的第一张图我说得非常清楚，图中产业链上都是新能源，所以我们氢内燃机汽车也是新能源汽车。

说到氢内燃机，历史也非常悠久，我们原来为什么不愿意去谈这个话题？因为氢在当时没有可能，现在必须谈，因为和碳中和密切相关。氢内燃机实际上功率基本不会损失（只要是直喷的），它的混合机热值比较高，就是因为它的质量热值比较高；它的火焰传播快，点火非常容易；它还是零碳，真正没有碳排放（有氮氧化物排放）。但它的问题也有，早燃问题、回火问题等，有一些可靠的解决方法。其他喷射系统、氢脆、

润滑等方面的问题，我认为在技术层面都可以解决。另外，一定要用直喷，因为氢本身的体积能量密度是比较低的，但是直喷可以把动力提上来。

我认为现在内燃机行业已经发力，但只要是内燃机就要被淘汰、被禁止，这是不公平的。

我做过后处理，柴油机那么复杂都干掉了氮氧化物，那么颗粒物对氢内燃机来说就是小儿科了，国 7、欧 7 都可以满足，技术是成熟的。如果对氢的要求很高，我搞一个催化器、过滤器，技术都非常成熟，用在氢上面成本低得多，没有大问题。同时，直喷、高压、增压、阿特金森循环等，都是现在汽油机所拥有的技术，而且氢内燃机的效率可以比现在的汽油机还高。当然有一些要关注的产业化信息、关注的部件我也不讲了，重点是喷射系统。氢脆的问题不突出，润滑的问题石化企业也有了解决方案。真正想要把氢内燃机产业化需要解决几个问题：第一是把技术路线图包含进去，它也是新能源，解决认识问题，政府要认可，在座媒体要认可、宣传我们，不要禁燃；第二是制定氢燃料标准；第三是把氢内燃机排放标准纳入现有车船排放标准体系，同时要让市场接纳氢内燃动力、把氢内燃动力汽车纳入产品 3C 认证等。内燃机将来一定是混合动力的，没有纯内燃机了，一定是拥抱电才有未来，HEV 才是内燃机的未来，跟氢、氨、E-fuel 一起把成本降下来就是长命百岁。（孟为整理，略有删节）MFC