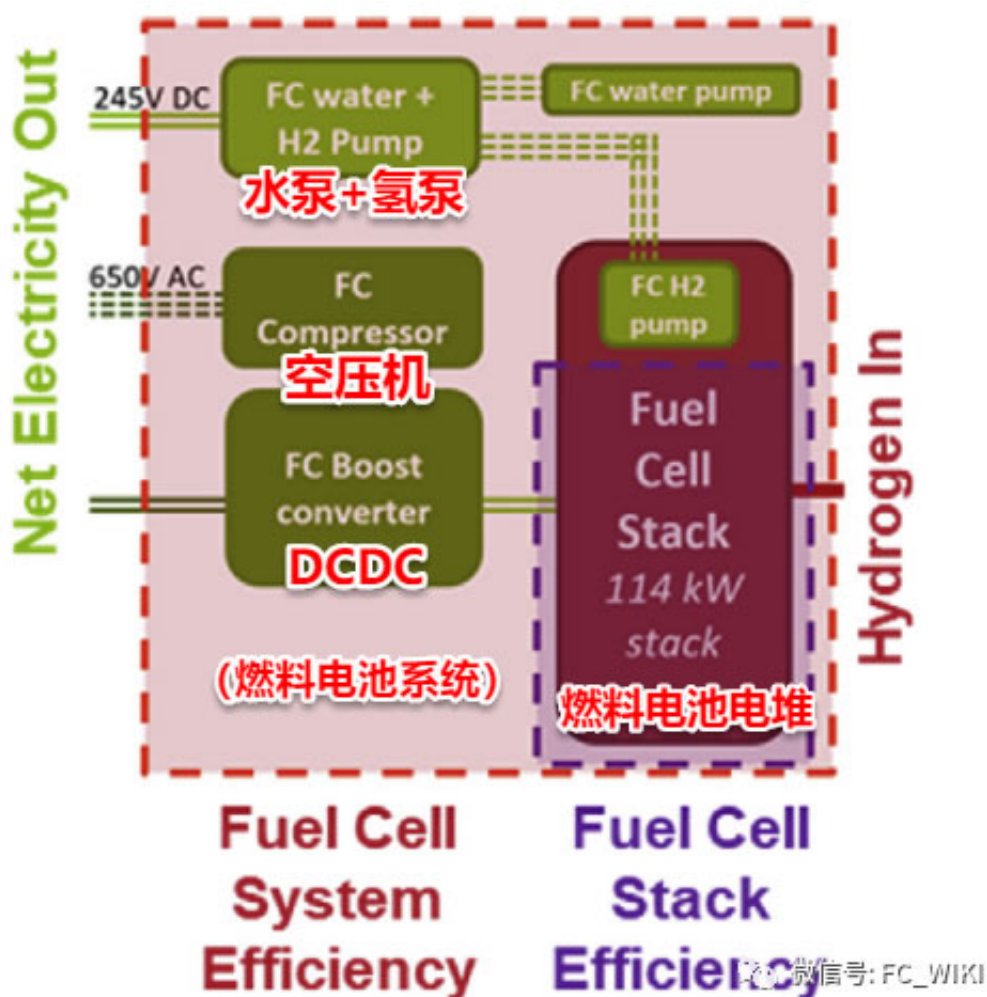


燃料电池车的典型效率及能耗

燃料电池的一大优势是高效率，能够更高效的利用能源。现在燃料电池车的研发已经持续了相当长一段时间（世界上第一辆燃料电池车为1966年通用的Electrovan），燃料电池车也迭代了许多，那么燃料电池车的效率、氢耗水平都怎么样呢？这里通过Argonne实验室在2019年底发表了一篇论文来总结一下燃料电池车的效率、能耗水平和氢耗。而丰田Mirai（2016款）作为典型产品，其数据可以作为燃料电池车效率和能耗水平的标杆来对比。

效率的定义

Argonne在燃料电池车的评价中定义了三个效率：燃料电池电堆效率，燃料电池系统效率，车辆效率。



电堆效率：如上图，电堆效率只考虑电堆本身。从计算区间的开始到结束产生的功率和（即电堆总输出能量）／期间消耗的氢气的总流量反应生成水后释放的能量（按低热值计算）。

$$\text{Efficiency}_{\text{FCstack}} = \frac{\int_{t_{\text{initial}}}^{t_{\text{final}}} V_{\text{FCstack}}(t) \times I_{\text{FCstack}}(t) dt}{\int_{t_{\text{initial}}}^{t_{\text{final}}} \text{MassFlow}_{\text{Hydrogen}}(t) \times \text{LHV} dt}$$

系统效率：如上图，系统效率考虑电堆及其相关辅件带来的功率消耗。电堆功率减去辅件功率在测量区间内的功率和（系统总输出能量）／期间消耗的氢气的总流量反应生成水后释放的能量（按低热值计算）。

$$\text{Efficiency}_{\text{FCsystem}} = \frac{\int_{t_{\text{initial}}}^{t_{\text{final}}} [V_{\text{BoostConv}}(t) \times I_{\text{BoostConv}}(t) - \text{Power}_{\text{FCcomp}}(t) - V_{\text{HVbattery}}(t) \times I_{\text{Water\&H}_2\text{Pump}}(t)] dt}{\int_{t_{\text{initial}}}^{t_{\text{final}}} \text{MassFlow}_{\text{Hydrogen}}(t) \times \text{LHVd} dt}$$

车辆效率是一个燃油车经常使用的概念，计算公式为：根据SAE J2951定义的正工况能量／期间消耗的氢气的总流量反应生成水后释放的能量（按低热值计算）。

$$\text{Efficiency}_{\text{Vehicle}} = \frac{\text{SAE J2951 Positive Cycle Energy}}{\int_{t_{\text{initial}}}^{t_{\text{final}}} \text{MassFlow}_{\text{Hydrogen}}(t) \times \text{LHV}_{\text{Hydrogen}} dt}$$

SAE INTERNATIONAL

J2951 Revised JAN2014

Page 6 of 27

3.15 CYCLE ENERGY (CE)

The net energy a vehicle must provide in order to drive a test cycle on a chassis dynamometer. Cycle energy is calculated by summing the engine work increments (w) over the test cycle. By definition, the engine work increments are always positive (since $F_{\text{ENG}} \geq 0$), so negative work is excluded from the cycle energy summation. The exclusion of negative work is appropriate since it is associated primarily with braking events and represents energy that is not recovered unless the vehicle is equipped with a regenerative braking system (alternative equations for the summation of work for vehicles equipped with regenerative braking may be considered in future revisions of this document).

Note that the engine work increment (w) may still be positive even during decelerations. This is because even though the inertial force is negative during decelerations, engine force (F_{ENG}) will still be positive if the magnitude of the road load force is greater than the magnitude of the inertial force. In this case the engine is still doing work, but the engine is insufficient to maintain the vehicle's speed.

5.1.13 Driven and Target Inertial Work (IW_D , IW_T)

The total work done by the engine against inertial loading. Only positive values of the inertial work increment ($w_{i,T}$) are considered since negative inertial work is not recovered by the engine (this assumption is not valid for vehicles with regenerative braking systems). Negative inertial work is taken to represent either: 1) energy dissipated by braking and thus not recovered by the vehicle or 2) energy that serves to reduce the road load work required of the engine during non-braking decelerations.

$$IW_D = \sum_{i=1}^N [w_{i,D}]^+ \quad (\text{Eq. 34})$$

$$IW_T = \sum_{i=1}^N [w_{i,T}]^+ \quad (\text{Eq. 35})$$

按照SAE J2951定义，由于正能量在燃料电池车上并没有在标准里定义，这里可以反过来看负能量。负能量即由于刹车或用于减少非制动减速期间发动机所需的道路负荷功导致的能量损失。那对于燃料电池车，小编理解，正能量应该包括燃料电池系统输出的能量及能量回收回收的能量。对纯电池车来说，由于分子为发出功率而非消耗功率，这个计算公式可能会算到超过100%，因此小编觉得用此公式来评估电动车并不完全合理。

燃料电池车典型工况综合效率和能耗

根据EPA（U.S. Environmental Protection Agency）的统计数据，近年来燃料电池车的典型工况综合效率和能耗水平如下图所示：

Model (model year)	重量	Vehicle Test Characteristics				能耗		车辆效率	
		Equivalent Test Weight [kg]	Target A Term [N]	Target B Term [N/(m/s)]	Target C Term [N/(m/s) ²]	Unadjusted Fuel Consumption		Calculated Vehicle Efficiency	
						FTP City [Wh/km]	HWFET High-way [Wh/km]	FTP Vehicle Efficiency [%]	HWFET Vehicle Efficiency [%]
Honda FCX Clarity (2011–2014)		1758	165.4	1.032	0.4236	254	248	54%	51%
Mercedes-Benz F-Cell (2011–2012)		1814	23.0	0.000	0.5039	284	275	40%	35%
Hyundai Tucson Fuel Cell (2015–2017)		2041	136.7	4.364	0.4721	311	294	51%	51%
Toyota Mirai (2016–2019)		1928	143.8	1.990	0.4072	220	220	65%	58%
Honda Clarity Fuel Cell (2018–2019)		2041	134.8	1.032	0.4367	218	220	67%	57%
Hyundai Nexi (2019)		2041	188.8	-0.182	0.6344	245	269	66%	58%
Hyundai Nexi Blue (2019)		1928	163.2	-0.101	0.6201	222	251	68%	59%

FTP: Federal Test Procedure

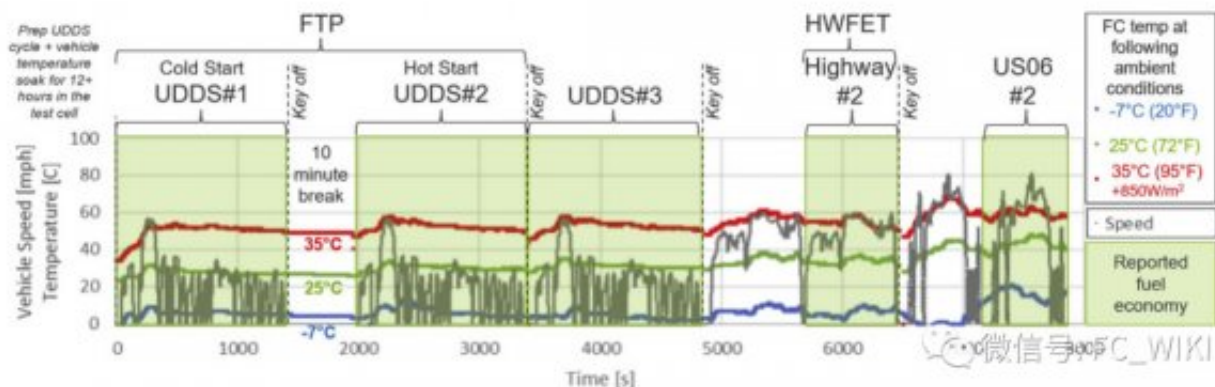
HWFET: Highway Fuel Economy Test

微信号: FC_WIKI

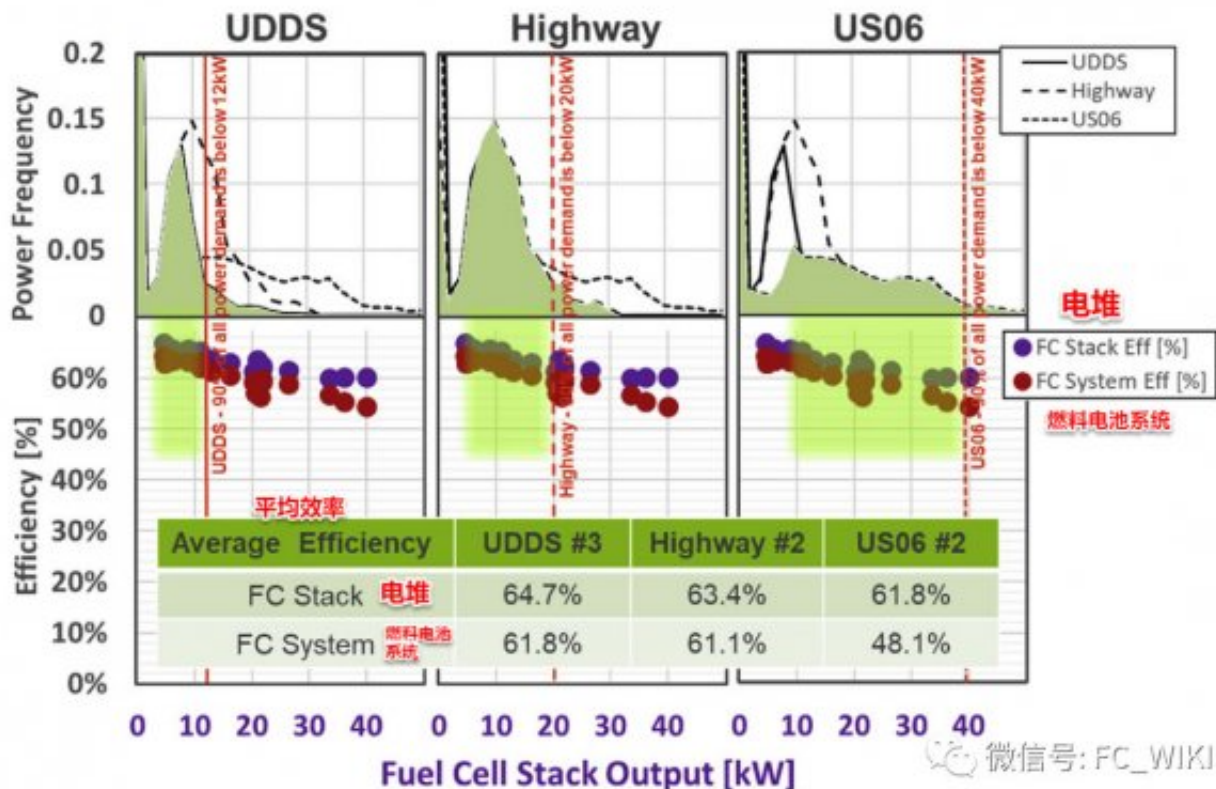
可以看到近10几年间，燃料电池车的车辆工况效率有了较大的提升。已本田为例，从早期的Honda FCX Clarity到后面的Honda Clarity Fuel Cell，FTP效率从54%提高到了67%，HWFET效率从51%提高到了57%。而本田、丰田、现代这几家燃料电池车领头羊，在这一代（2019年左右），车辆的效率都十分近似，大家水平都差不多。但是工况综合效率毕竟是统计全工况下的效率得出的，对燃料电池车开发和评估来说，我们还需要一个典型的在各个功率下的一个典型效率（即效率—功率曲线），或者说一个标杆作为我们的参照物来判断自己燃料电池车做的如何。

燃料电池车典型效率—功率曲线（以Mirai为标杆）

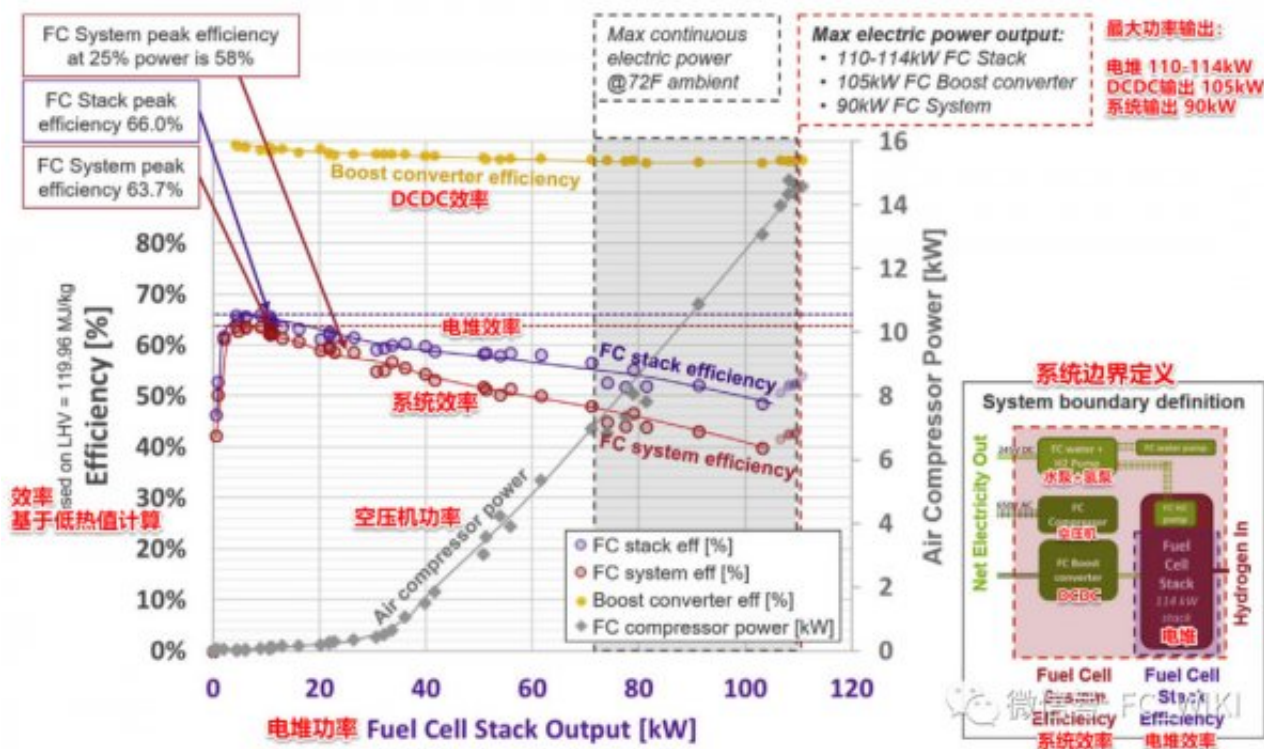
Argonne使用Mirai进行了如下的工况测试，测试首先包含三个FTP定义的UDDS（The Urban Dynamometer Driving Schedule）工况，这是一种较缓和的城市工况，可以从下图的车速就可以看出来。然后车辆会跑两个高速工况（HWFET）和两个US06工况。HWFET是一种美国高速工况燃油经济性的标准测试工况，而US06为一种车速较大的激烈工况。



测试结果如下图所示，可以看到，工况越缓和，燃料电池电堆和燃料电池系统的效率越高。工况对电堆效率的影响较小，而对系统效率影响较大。激烈的US06工况下，相比UDDS，燃料电池电堆的效率下降仅约3%。而工况的变化使燃料电池系统效率下降了近23%。



汇总了测试结果后，可以得出Mirai的效率-功率曲线。如下图所示，可以看到，功率越低，燃料电池系统效率与电堆效率越接近；功率越高，燃料电池系统效率与电堆效率相差越大。全功率区间内，电堆的最大效率为66%，而燃料电池系统最大效率为63.7%。在25%电堆功率时，系统效率为58%，电堆效率约61%。到峰值功率，电堆114kW时，电堆效率会下降到约49%，而系统效率则仅剩约40%。从空压机和DCDC效率曲线的变化可以看出，后面系统效率的降低，主要是因为DCDC的效率降低以及空压机的功耗迅速增加。当然水泵，氢泵这些也会增加一些消耗，但是这些零部件功耗较小故对系统效率的影响比较小。

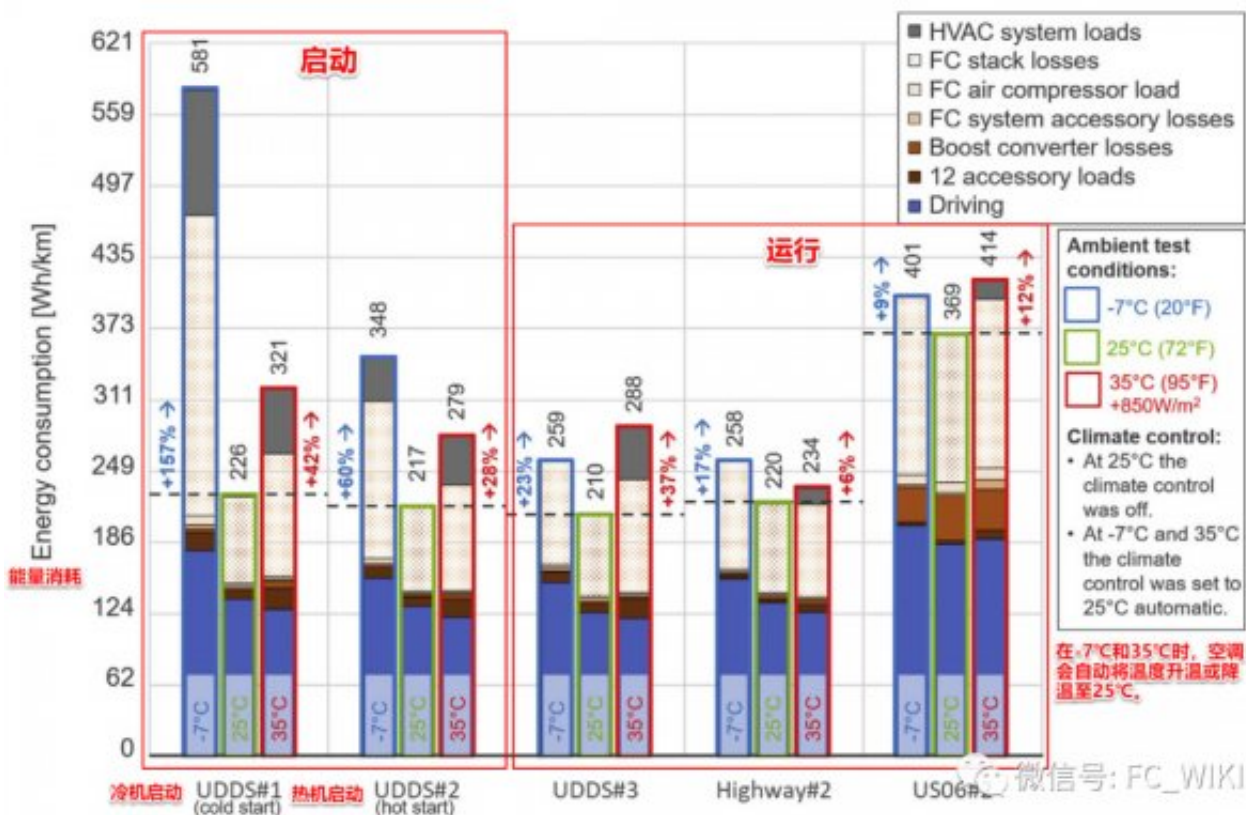


从图中可以大致可以读到几个参考点的效率：

电堆功率	电堆效率	燃料电池系统效率
25%	约61%	约58%
50%	约58%	约51%
75%	约51%	约44%
100%	约49%	约40%

微信号: FC_WIKI

温度对燃料电池车的能耗的影响



如上图，将不同工况及温度中的功率进行分解可以看到温度对燃料电池系统功耗的影响。在启动流程的功耗组成中，-7°C的功耗要大于25°C及35°C，增长的功耗主要来源于空调和空压机增长的功耗。而冷启动带来的功耗增长要远大于热启动，这主要是因为热启动时不需要那么多功耗去进行加热与空调（毕竟温度已经较高了）。在运行工况的功

耗组成中，可以看到不管是高温还是低温都会一定程度上增加燃料电池车的功耗。高温会导致DCDC效率的降低和空压机功耗的升高，另外高温时车内的空调也会造成额外的能耗，综合起来，导致燃料电池车的功耗变高（在UDDS和US06中）。而低温虽然不会导致DCDC效率降低，但是从数据上看，它会使车辆运行时车辆驱动所需的功耗增加，加上低温时开启的空调，导致低温时车辆的功耗也会较高于常温（25℃）。

与混动车、燃油车的效率及能耗对比

Table 3 – Vehicle efficiency* comparison across powertrain architectures.												
Powertrain Type	Fuel Cell Vehicle			Battery Electric Vehicle			Hybrid Electric Vehicle			Conventional Vehicle		
Representative Model	2016 Toyota Mirai			2017 Toyota Prius Prime in charge-depleting mode			2017 Toyota Prius Prime in charge-sustaining mode			2014 Mazda 3 (2.5-L i-ELOOP)		
	燃料电池			纯电模式			混动模式			燃油车		
Test Temperature	-7 °C (20 °F)	25 °C (72 °F)	35 °C (95 °F)	-7 °C (20 °F)	25 °C (72 °F)	35 °C (95 °F)	-7 °C (20 °F)	25 °C (72 °F)	35 °C (95 °F)	-7 °C (20 °F)	25 °C (72 °F)	35 °C (95 °F)
UDDS#1	24.6	62.8	24.6	52.4	109.8	81.8	32.4	48.6	33.6	14.1	18.7	17.2
UDDS#2	40.8	65.7	40.8	56.8	112.5	91.4	30.8	48.0	36.2	19.1	20.8	18.3
UDDS#3	54.9	67.7	54.9		113.4	91.3		49.9	40.0	19.4	20.8	17.8
Highway#2	55.7	57.6	55.7	54.0	82.2	77.0	33.0	39.1	35.8	26.5	28.7	28.1
US06#2	52.5	57.1	52.5	72.8	91.2	87.0	39.3	43.0	39.2	27.5	28.4	28.2
Average	45.7	62.2	45.7	59.0	101.8	85.7	33.9	45.7		23.5	23.5	21.9

*Vehicle efficiency in [%] based on positive cycle energy as defined by SAE J2951™

如上图，将Mirai作为燃料电池车的代表，与其他类型的车放在一起比较，可以看到不同动力系统车辆的效率区别（见前文，由于车辆效率计算公式的原因，把能量回收也算进来，故纯电车会有超过100%的情况）。与混动汽车（25℃下平均45.7%）和传统车辆（25℃下平均23.5%）相比，燃料电池车具有显著的车辆效率优势（25℃下平均62.2%，而混动45.7%，油车23.5%）。Mirai是一种小电池一大电堆燃料电池混动车，其车辆系统除去燃料电池的话，基本和纯电车一致（毕竟都是电驱动车嘛）。因此，燃料电池车辆效率是基于电动汽车效率的（即燃料电池系统看做一个发电的电池）。因此，与动力电池车辆相比，燃料电池车会具有较低的车辆效率。另外，值得一提的是，虽然效率低一些，燃料电池车效率对温度条件不像动力电池车那么敏感（如上图红框所示）。

Table A-2: Vehicle fuel consumption and energy consumption results for EPA 5 cycle label fuel economy calculations across powertrain architectures												
Powertrain Type	Fuel Cell Vehicle			Battery Electric Vehicle			Hybrid Electric Vehicle			Conventional Vehicle		
Representative Model	2016 Toyota Mirai			2017 Toyota Prius Prime in charge-depleting mode			2017 Toyota Prius Prime in charge-sustaining mode			2014 Mazda 3		
Vehicle Testing Characteristics	Equivalent Test Weight: 1928 kg (4250 lb) Target road load coefficients: A = 143.8 N B = 1.990 N/(m/s) C = 0.4072 N/(m/s) ²			Equivalent Test Weight: 1644 kg (3625 lb) Target road load coefficients: A = 83.7 N B = 3.850 N/(m/s) C = 0.2783 N/(m/s) ²			Equivalent Test Weight: 1559 kg (3438 lb) Target road load coefficients: A = 102.9 N B = 6.627 N/(m/s) C = 0.2472 N/(m/s) ²					
Test Temperature	-7 °C (20 °F)	25 °C (72 °F)	35 °C (95 °F)	-7 °C (20 °F)	25 °C (72 °F)	35 °C (95 °F)	-7 °C (20 °F)	25 °C (72 °F)	35 °C (95 °F)	-7 °C (20 °F)	25 °C (72 °F)	35 °C (95 °F)
	Fuel Economy [mi/kg]			Energy Consumption [AC Wh/mi]			Fuel Economy [mi/kg]			Fuel Economy [mi/kg]		
UDDS#1 Cold-start Phase 1	28.6	84.3		365	194		40.3	57.7		21.0	30.3	
UDDS#1 Cold-start Phase 2	46.3	99.4		356	150		81.5	126.2		26.7	31.9	
UDDS#2 Hot-start Phase 3	45.0	87.6		330	187		48.3	57.5		33.2	36.1	
UDDS#2 Hot-start Phase 4	84.8	103.7		335	149		61.5	130.1		31.0	33.3	
Highway#2		94.1			202			75.0			50.6	
US06#2 City		38.9			359			29.8			20.3	
US06#2 Highway		64.1			294			58.6			38.0	
SC03#2			63.1			177			54.5			29.2
City (5 cycle label) 城市	57.4 mi/kg			244 AC Wh/mi			56.9 mpg			35.6 mpg		
Highway (5 cycle label) 高速	60.5 mi/kg			306 AC Wh/mi			54.4 mpg			35.4 mpg		
Combined Label Fuel Economy 综合	58.7 mi/kg			272 AC Wh/mi			55.7 mpg			29.3 mpg		
Combined Label Fuel Consumption 综合能耗水平	2.044 MJ/mi			0.817 MJ/mi			2.102 MJ/mi			3.996 MJ/mi		

如上图的燃油经济性测试，从测试结果看，Mirai的能耗水平（2.044 MJ/英里）远远强于燃油车的马自达3（3.996 MJ/英里），稍强于混动的普锐斯（2.102 MJ/英里），但相比纯电普锐斯落后（0.817 MJ/英里）。

从这组数据中也能看到Mirai作为燃料电池车标杆产品，其综合氢耗水平约为（文中并未解释如何计算）：城市道路：1.08kg/100km

高速：1.02kg/100km综合：1.05kg/100km

总结

1.以Mirai为标杆，燃料电池电堆和系统的典型功耗大约为：

电堆功率	电堆效率	燃料电池系统效率
25%	约61%	约58%
50%	约58%	约51%
75%	约51%	约44%
100%	约49%	约40%

（功率—效率曲线见前文）

2.计算工况下的综合效率时，工况的变化对电堆效率的影响不大，但是对系统的效率影响较大。工况越激烈，车速越高，系统和电堆的综合效率越低，且两者的差距越大。

3.对于燃料电池车来说，低温主要会带来额外的冷启动功耗，以及增加空调和车辆运行本身消耗的能量。而高温主要会增加空压机功耗和DCDC的损耗，从而提高燃料电池车的功耗，降低效率。

4.温度对燃料电池车的效率影响没有纯电车那么严重。

5.燃料电池车的能耗和车辆效率表现均远优于混动车和燃油车，但是劣于纯电车。（但是由于车辆效率计算公式的局限性，小编认为此方法对电动车有局限性）

6.Mirai作为标杆产品，其综合氢耗水平约为：城市道路：1.08kg/100km

高速：1.02kg/100km综合：1.05kg/100km（文中并未解释如何计算，也未解释是否区分了温度，数据仅供参考）

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/156439.html>