

通气湿度对 NDIR LARK-1 CH4 读数的影响

NDIR 气体传感器的规格书一般都会给出湿度范围，用相对湿度%RH 来定义，指的是能够保证 NDIR 传感器正常工作的湿度范围。在不产生冷凝水的前提下，高湿度并不会损坏传感器，却会造成传感器的读数误差，以甲烷为例，湿度高的情况下，读数一般会偏高。为了研究通气湿度对 NDIR LARK-1 CH4 传感器读数的影响，我们用 LARK-1 CH4 传感器通入不同湿度的目标气体进行了湿度实验，并对实验数据进行了分析和总结。

1 NDIR LARK-1 介绍

NDIR 传感器基于非色散红外 Non-Dispersive InfraRed 原理，是一种由红外光源、光路、红外探测器、电路和软件算法组成的光学气体传感器。诺联芯出品的 LARK-1 气体传感器正是基于 NDIR 原理进行研发和生产的，目前可测 CH₄、CO、CO₂ 等气体的浓度，量程从 100ppm 至 100%VOL。除了传感器本体，诺联芯还开发了评估套件和标定软件供用户使用，本文正是基于这一整套平台进行湿度实验的。

2 湿度为何会影响 NDIR 甲烷传感器

NDIR 传感器基于非色散红外原理，即多原子分子在红外波段具有特定的吸收峰，在该特定吸收波段的吸收强度与气体浓度有关。甲烷的特征吸收峰目前多选择在 3.25~3.41um 处 (InfraTech 标准 CH₄ 滤光片)，而水蒸气在该波段也有一定的吸收，如图 2 所示。传感器将这部分吸收认为是甲烷气体，计算出的气体浓度便会偏高。

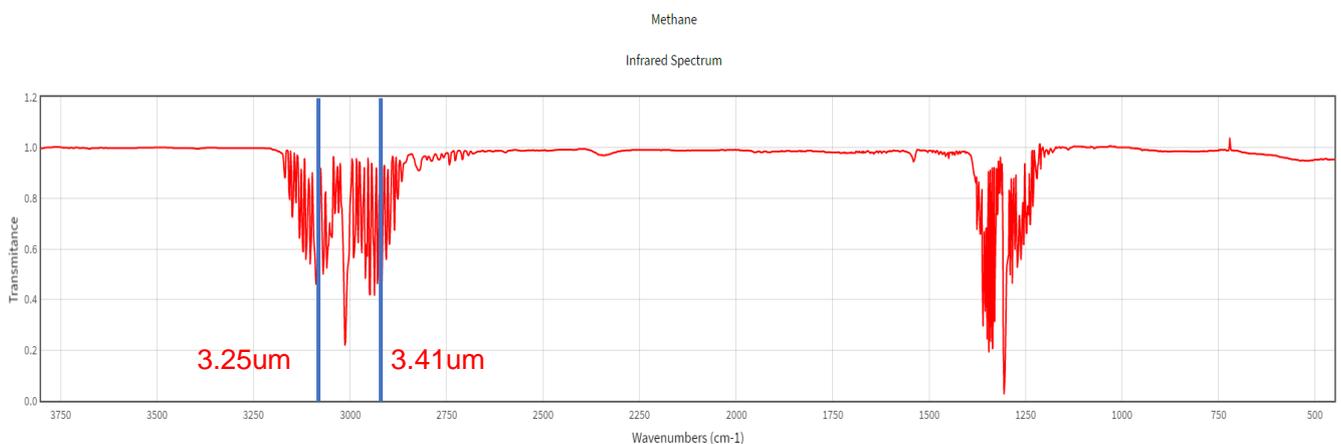


图 1. 甲烷的红外吸收谱

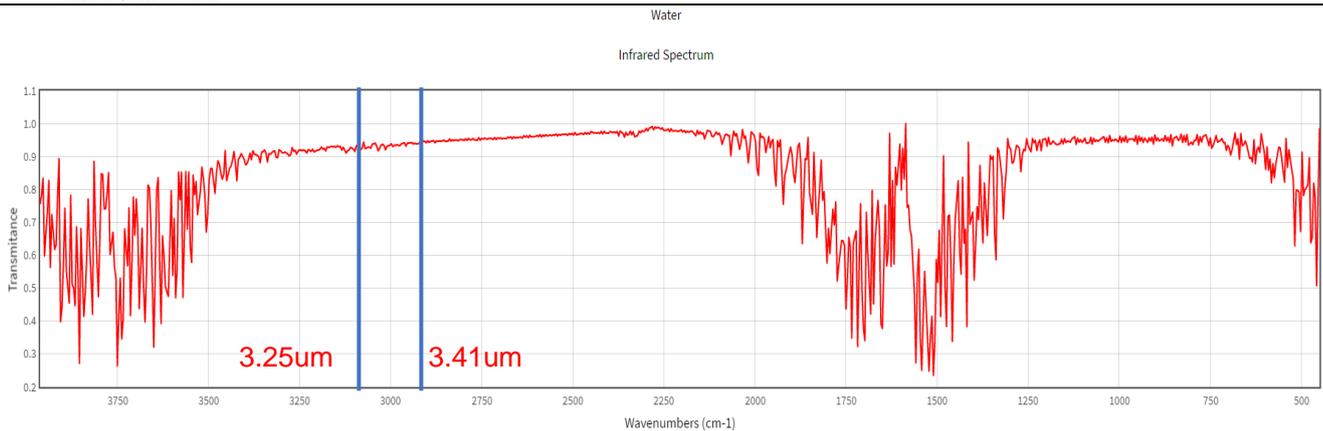


图 2. 水蒸气的红外吸收谱

3 实验设计

3.1. 实验环境的选择

取两只 LARK-1 CH4 置于高低温试验箱(THS-150)进行实验。

3.2. 目标气体的配置

本实验选择两组目标气体：500ppm、1000ppm CH₄，其中 500ppm CH₄ 为购置的标准钢瓶气(不确定度 3%)，而 1000ppm CH₄ 则是通过流量计 MFC 控制纯净 N₂(≥99.999%) 和 5000ppm 标准钢瓶 CH₄ (不确定度 3%)的相对流量比值 (4 : 1) 配置得到。

3.3. 不同湿度的实验气体配置方法

将目标气体和水按计算好的量充入 8 只气袋(P/N: HBI-2-10PT)配置成 8 组浓度相同湿度不同的气体，配置时先通过 MFC(500mL/min)将固定体积的标准气体通入气袋，再用微量进样器取液态水注射进气袋，等待液态水蒸发为水蒸气即可开始实验。

我们分别在 20°C、30°C、40°C 温度下进行了实验。以 20°C 为例，配置 8 组总体积均为 4L，相对湿度分别为：0%RH、10%RH、20%RH、30%RH、40%RH、50%RH、60%RH、80%RH 的实验气，下面是充入标准气和液态水体积的计算方法：

A. 根据相对湿度 RH(Relative Humidity)计算绝对湿度 AH(Absolute Humidity)：

$AH = RH * AH_MAX@20^{\circ}C$ ，其中 AH_MAX@20°C 指 20°C 温度下饱和绝对湿度，查饱和湿度表为 17.3g/m³，计算出绝对湿度分别为：0、1.73、3.46、5.19、6.92、8.65、10.38、13.84 g/m³；

B. 根据绝对湿度 AH 计算水蒸气的质量 m：

$m = AH * Volume$ ，其中 Volume = 4L = 4 / 1000 m³，计算出水蒸气的质量分别为：0、6.92、13.84、20.76、27.68、34.6、41.52、55.36mg；

C. 根据水蒸气的质量计算液态水的体积：

纯净的液态水密度为 1g/cm^3 ，用前面计算到的水蒸气质量除以密度 1g/cm^3 即可计算出液态水的体积分别为：0、6.92、13.84、20.76、27.68、34.6、41.52、55.36uL，微量进样器刻度分辨率有限，故取：0、7、14、21、28、35、42、55uL；

D. 根据注射的液态水质量计算挥发后的水蒸气体积：

先计算水的摩尔量 $n = m / M$ ，其中 M 为水的摩尔质量 18g/mol 。再计算 $20^\circ\text{C}(T=293\text{K})$ 下的气体摩尔体积 $V_m = 22.414 / 273 * T = 24.056 \text{ L/mol}$ (标准大气压)。用摩尔量乘以摩尔体积即可得到水蒸气的体积，分别为：0、9.36、18.71、28.07、37.42、46.78、56.13、73.5mL；

E. 计算注入的目标气体体积：

用总体积 4L 减去前面算出的水蒸气体积即可，分别为：4000、3991、3982、3972、3963、3954、3945、3926mL，本文选择 500ppm 和 1000ppm CH_4 为目标气分别进行湿度实验；

在 30°C 和 40°C 温度下，我们选择注入与 20°C 时相同的水量，即绝对湿度不发生变化，所以从步骤 A~C 无需重新计算，注入相同体积的液态水即可。但由于不同温度下的气体摩尔体积不同，因此注入相同体积的液态水生成的水蒸气体积却不同，所以需要充入的标准气体积需要重新计算，按照步骤 D~E 进行计算即可，计算出的相关数据见表 1。

表 1. 不同湿度的实验气体配置表

绝对湿度(g/m^3)		0	1.73	3.46	5.19	6.92	8.65	10.38	13.84
20°C	相对湿度(%RH)	0	10	20	30	40	50	60	80
	水蒸气体积比(mL/L)	0	2.31	4.62	6.94	9.25	11.56	13.87	18.50
	注水量(μL)	0	7	14	21	28	35	42	55
	标准气体积(mL)	4000	3991	3982	3972	3963	3954	3945	3926
30°C	相对湿度(%RH)	0	6	11	17	23	29	34	46
	水蒸气体积比(mL/L)	0	2.39	4.78	7.17	9.56	11.95	14.35	19.13
	注水量(μL)	0	7	14	21	28	35	42	55
	标准气体积(L)	4000	3990	3981	3971	3962	3952	3943	3923
40°C	相对湿度(%RH)	0	3	7	10	13	17	20	27
	水蒸气体积比(mL/L)	0	2.47	4.94	7.41	9.88	12.35	14.82	19.76
	注水量(μL)	0	7	14	21	28	35	42	55
	标准气体积(L)	4000	3990	3980	3970	3960	3951	3941	3921

4 数据分析

我们按照上述实验设计分别在 20°C 、 30°C 、 40°C 环境温度下，用 500ppm 和 1000ppm CH_4 标准气进行了湿度实验，下面分别给出 20°C 、 30°C 、 40°C 的实验数据及数据分析结论。

4.1.20°C数据

表 2. 20°C时不同湿度下的读数变化量

S/N			401000071704		401000211704	
标准气体			500ppm CH ₄	1000ppm CH ₄	500ppm CH ₄	1000ppm CH ₄
相对湿度 (RH)	绝对湿度 (g/m ³)	水蒸汽体积比 (mL/L)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)
0%	0	0	0	0	0	0
10%	1.73	2.31	19	27	21	19
20%	3.46	4.62	50	55	55	47
30%	5.19	6.94	74	65	83	68
40%	6.92	9.25	87	78	94	94
50%	8.65	11.56	111	95	120	101
60%	10.38	13.87	107	107	130	127
80%	13.84	18.5	149	145	163	169

注：本文中给出的读数变化量均是以通入 0g/m³(即干燥的实验气)时测得的读数为基准计算出的，比如 6.92g/m³ 湿度时，用通入该湿度实验气测得的读数减去通入干燥实验气测得的读数即得到读数变化量

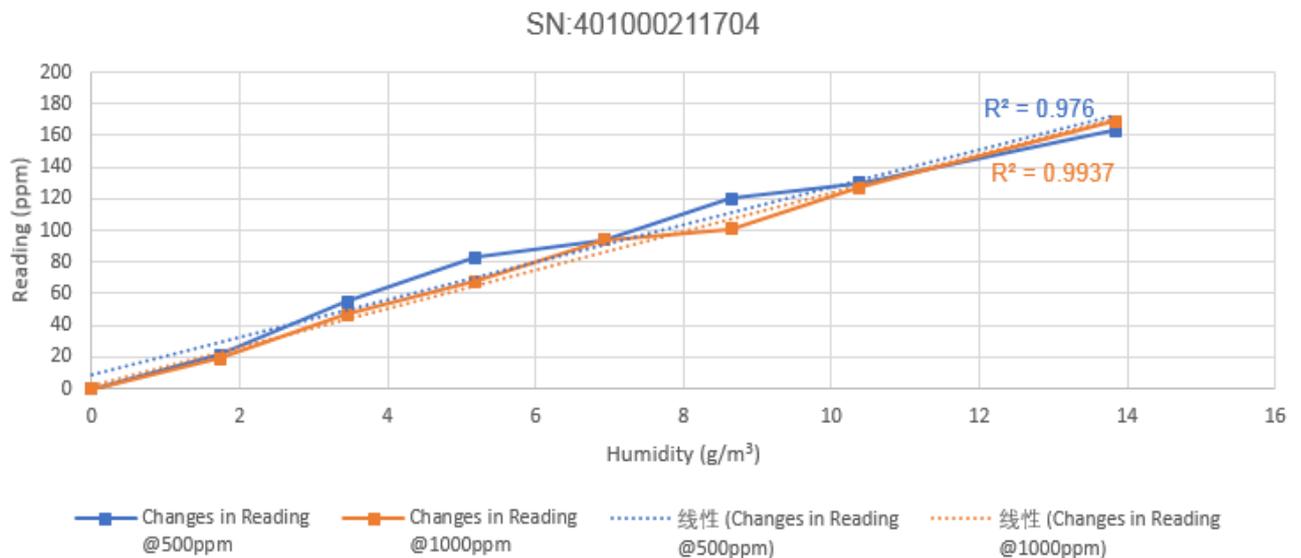
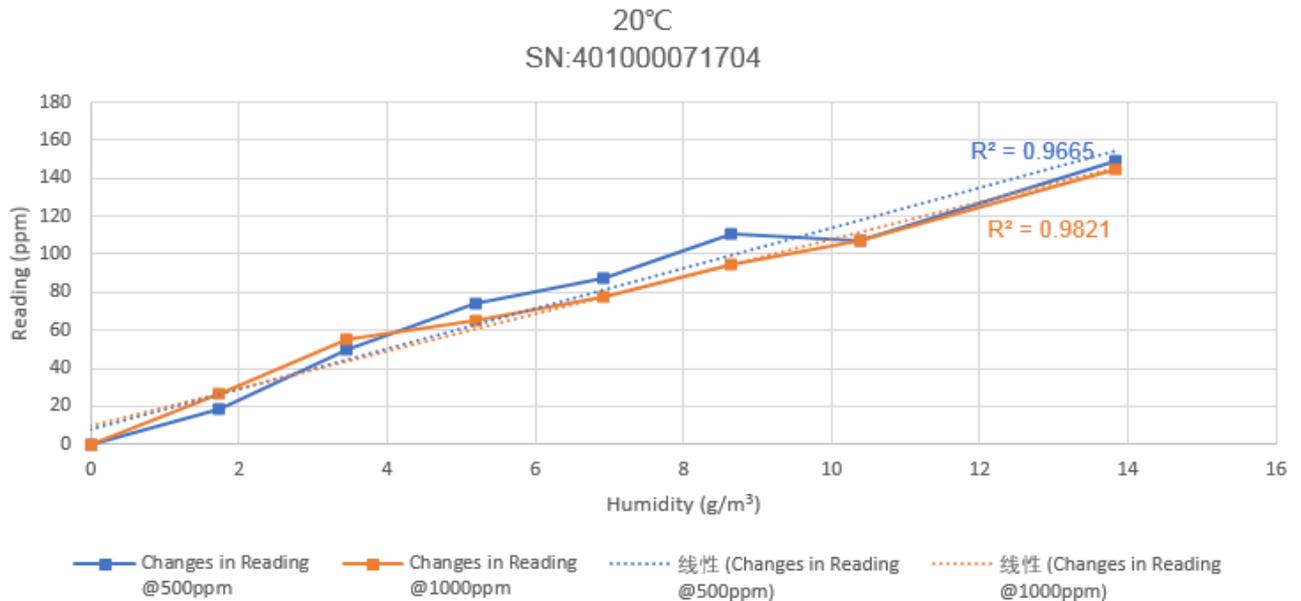


图 3. 20°C时湿度-读数变化量曲线

4.2. 30°C数据

表 3. 30°C时不同湿度下的读数变化量

S/N			401000071704		401000211704	
标准气体			500ppm CH ₄	1000ppm CH ₄	500ppm CH ₄	1000ppm CH ₄
相对湿度 (RH)	绝对湿度 (g/m ³)	水蒸汽体积比 (mL/L)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)
0%	0	0	0	0	0	0
6%	1.73	2.39	-5	35	17	43
11%	3.46	4.78	13	56	31	77
17%	5.19	7.17	22	52	56	83
23%	6.92	9.56	2	50	54	90
29%	8.65	11.95	39	77	66	80
34%	10.38	14.35	36	72	69	99
46%	13.84	19.13	50	82	92	117

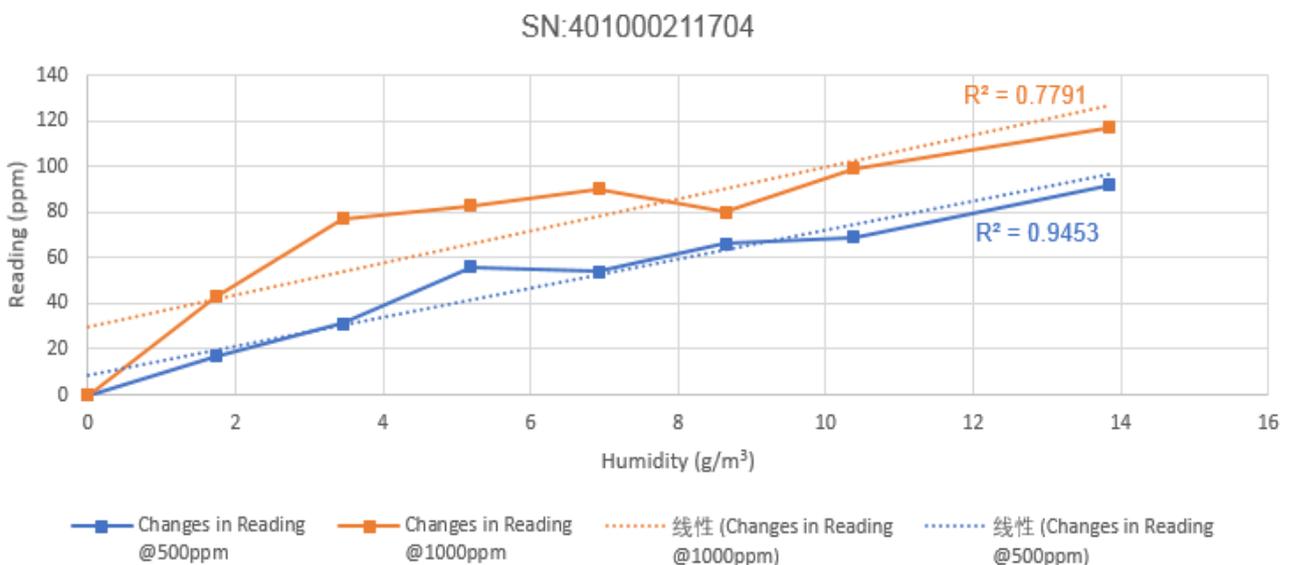
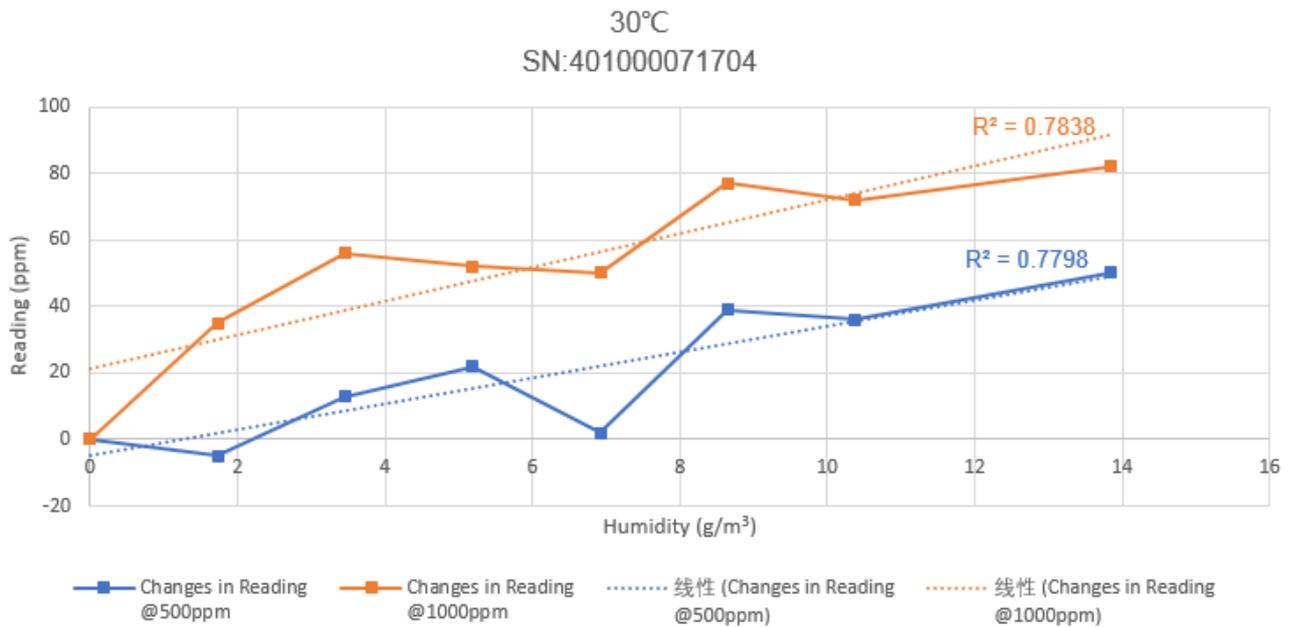


图 4. 30°C时湿度-读数变化量曲线

4.3.40°C数据

表 4. 40°C时不同湿度下的读数变化量

S/N			401000071704		401000211704	
标准气体			500ppm CH ₄	1000ppm CH ₄	500ppm CH ₄	1000ppm CH ₄
相对湿度 (RH)	绝对湿度 (g/m ³)	水蒸汽体积比 (mL/L)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)	变化量 (ppm)
0%	0	0	0	0	0	0
3%	1.73	2.47	15	34	25	26
7%	3.46	4.94	23	36	30	36
10%	5.19	7.41	5	54	38	41
13%	6.92	9.88	24	41	51	52
17%	8.65	12.35	20	56	55	74
20%	10.38	14.82	36	66	61	78
27%	13.84	19.76	48	85	77	81

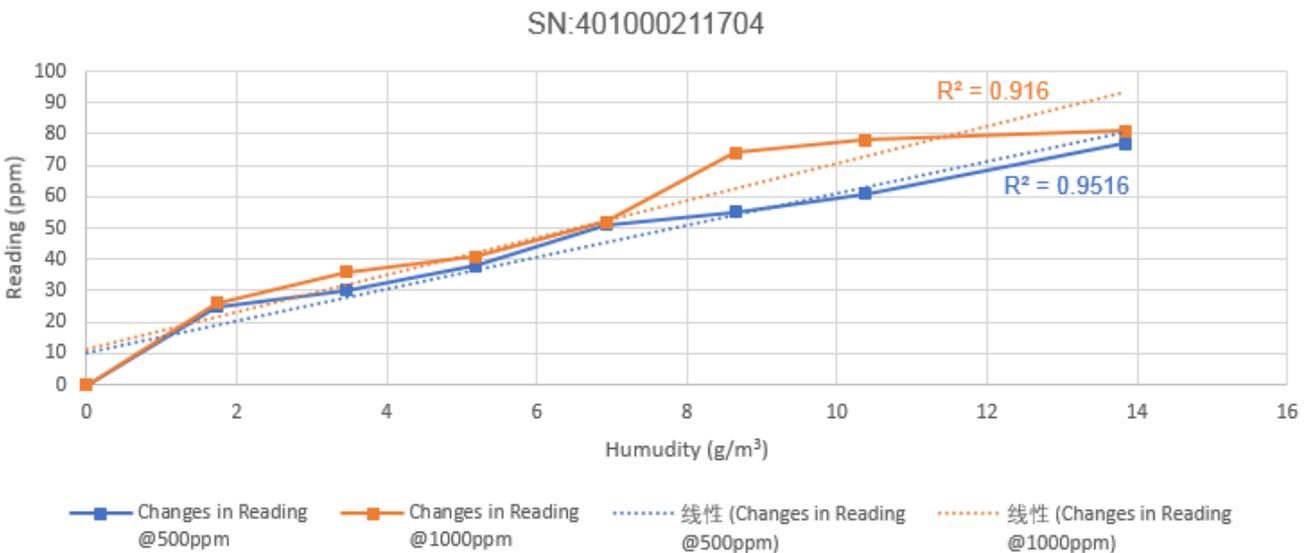
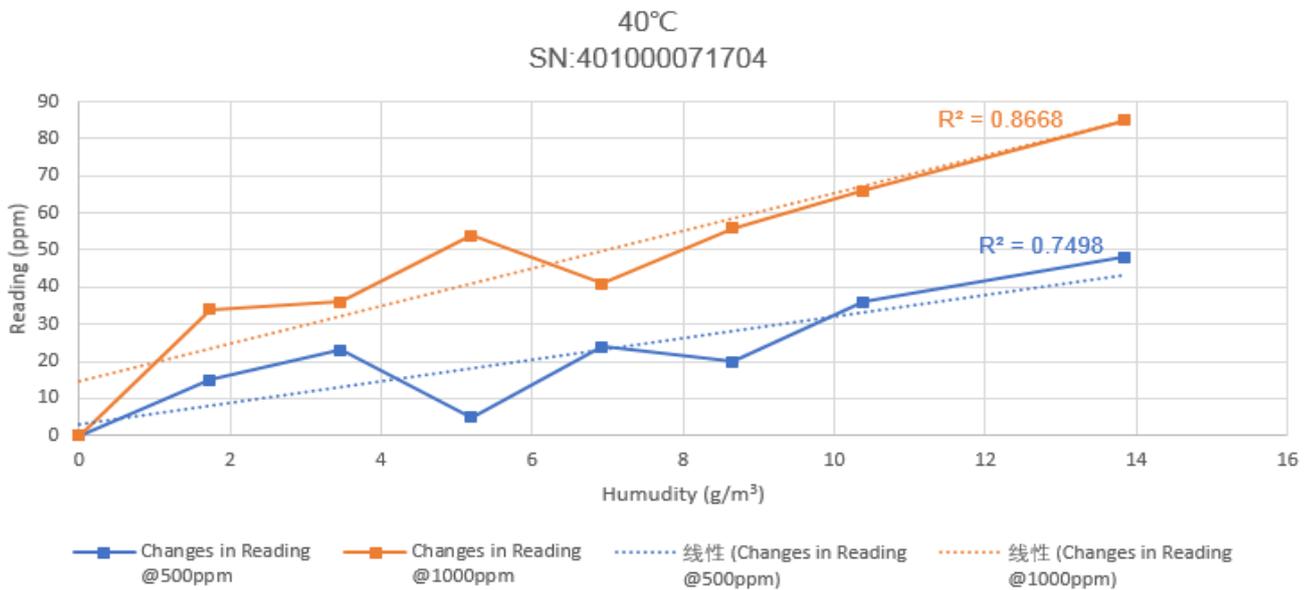


图 5. 40°C时湿度-读数变化量曲线

4.4. 数据分析

根据湿度-读数变化量曲线可发现当通入 CH₄ 浓度一定的情况下，测得的读数随通气湿度的增大而增大。我们对实验测得的数据进一步分析计算得到了下表，表 5 给出了不同湿度下读数改变量的平均值，并且据此计算出了每 1mL/L 以及 1g/m³ 的水蒸气含量造成的读数改变量。

表 5. 湿度实验数据分析总表

温度	绝对湿度 g/m ³	水蒸汽体 积比 mL/L	相对湿度 RH	平均改变量 ppm @500ppm	平均改变量 ppm @1000ppm	1mL/L 造成的 读数改变量 ppm	1g/m ³ 造成的 读数改变量 ppm
20°C	0	0.00	0	0	0	/	/
	1.73	2.31	10%	20	23	9	12
	3.46	4.62	20%	53	51	11	15
	5.19	6.94	30%	79	67	10	14
	6.92	9.25	40%	91	86	10	13
	8.65	11.56	50%	116	98	9	12
	10.38	13.87	60%	119	117	8	11
	13.84	18.50	80%	156	157	8	11
30°C	0	0.00	0%	0	0	/	/
	1.73	2.39	6%	6	39	9	13
	3.46	4.78	11%	22	67	9	13
	5.19	7.17	17%	39	68	7	10
	6.92	9.56	23%	28	70	5	7
	8.65	11.95	29%	53	79	5	8
	10.38	14.35	34%	53	86	5	7
	13.84	19.13	46%	71	100	4	6
40°C	0	0.00	0%	0	0	/	/
	1.73	2.47	3%	20	30	10	14
	3.46	4.94	7%	27	36	6	9
	5.19	7.41	10%	22	48	5	7
	6.92	9.88	13%	38	47	4	6
	8.65	12.35	17%	38	65	4	6
	10.38	14.82	20%	49	72	4	6
	13.84	19.76	27%	63	83	4	5

根据表 5 中 1mL/L 及 1g/m³ 水蒸气含量造成的读数改变量数据，可知在 20°C、30°C、40°C 三组环境温度下，通入 1L 的 500ppm 或 1000ppm CH₄ 气体中含有 1mL 水蒸气会造成 10ppm 以内的读数改变量，而 1m³ 的 500ppm 或 1000ppm CH₄ 气体中含有 1g 水蒸气会造成 15ppm 以内的读数改变量。

我们进一步计算了单位含量的水蒸气分别在 20°C、30°C、40°C 三个温度下造成的读数改变量平均值,如图 6 所示,不难看出湿度对读数的影响与温度存在一定的相关性:LARK-1 CH4 传感器通入的待测气中含有固定体积比的水蒸气,则温度越高,水蒸气对读数的影响越微弱,由于实验数据的限制,本文无法给出定量关系。

表 6. 湿度实验温度相关性数据

温度	20°C	30°C	40°C
1mL/L 水蒸气含量造成的 读数改变量平均值 (ppm)	10	7	5
1g/m ³ 水蒸气含量造成的 读数改变量平均值 (ppm)	13	9	8

注: 1 g/m³ 水蒸气在 20°C 下换算成浓度为 1335 ppm.

5 小结

我们用 LARK-1 CH4 传感器通入不同湿度的标准气体进行实验,研究分析了通气湿度对 LARK-1 CH4 传感器读数的影响,使用 LARK-1 CH4 气体传感器时可用湿度传感器测量待测气体的绝对湿度,并根据本文档<4.4. 数据分析>给出的数据修正 LARK-1 CH4 输出的读数。另外,本文附录给出了不同温度下的饱和绝对湿度查找表,若已知相对湿度为 RH,可查找当前温度下的绝对饱和湿度值,与相对湿度 RH 值相乘即得到当前绝对湿度,同样可根据<4.4. 数据分析>给出的数据修正 LARK-1 CH4 输出的读数。

本文分析了通气湿度对 NDIR 甲烷传感器读数发生影响的原因是由于水蒸气在 3.25~3.41um 波段存在一定程度的吸收,由于不同气体对应的红外吸收波段不同,水蒸气在这些波段的吸收差异也比较大,所以本文给出的数据和定量结论只适用于 LARK-1 CH4 传感器,而不能用于修正 LARK-1 CO、LARK-1 CO2 等其他气种的 NDIR LARK-1 传感器。

根据水蒸气在 3.25~3.41um 波段存在吸收这一理论基础,不难推断所有基于 NDIR 原理的甲烷传感器均会受到其影响,因此理论上对于所有 NDIR 甲烷传感器通气湿度均会造成读数的偏大,但是不同的 NDIR 甲烷传感器选用的探测器和算法均不相同,因此本文给出的数据和定量结论并不适用于其他公司的 NDIR 甲烷传感器。

6 附录：

表 7. 不同温度下饱和水汽的压强和绝对湿度

温度 (°C)	温度 (K)	压强 (mmHg)	饱和绝对湿度 (g/m ³)	摩尔体积 (L/mol)	浓度 (ppm)
-30	243.15	0.28	0.33	19.94	366
-29	244.15	0.31	0.37	20.022	412
-28	245.15	0.35	0.41	20.104	458
-27	246.15	0.38	0.46	20.186	516
-26	247.15	0.43	0.51	20.268	574
-25	248.15	0.47	0.55	20.350	622
-24	249.15	0.52	0.60	20.432	681
-23	250.15	0.58	0.66	20.514	752
-22	251.15	0.64	0.73	20.596	835
-21	252.15	0.70	0.80	20.678	919
-20	253.15	0.77	0.88	20.760	1015
-19	254.15	0.85	0.96	20.842	1112
-18	255.15	0.94	1.05	20.924	1221
-17	256.15	1.03	1.15	21.006	1342
-16	257.15	1.13	1.27	21.088	1488
-15	258.15	1.24	1.38	21.170	1623
-14	259.15	1.36	1.51	21.252	1783
-13	260.15	1.49	1.65	21.334	1956
-12	261.15	1.63	1.80	21.416	2142
-11	262.15	1.78	1.96	21.498	2341
-10	263.15	1.95	2.14	21.580	2566
-9	264.15	2.13	2.33	21.662	2804
-8	265.15	2.32	2.54	21.744	3068
-7	266.14	2.53	2.76	21.826	3347
-6	267.15	2.76	2.99	21.908	3639
-5	268.15	3.01	3.24	21.990	3958
-4	269.15	3.28	3.51	22.072	4304
-3	270.15	3.57	3.81	22.154	4689
-2	271.15	3.88	4.13	22.236	5102
-1	272.15	4.22	4.47	22.318	5542
0	273.15	4.58	4.84	22.400	6023
1	274.15	4.93	5.22	22.482	6520
2	275.15	5.29	5.60	22.564	7020
3	276.15	5.69	5.98	22.646	7524
4	277.15	6.10	6.4	22.728	8081
5	278.15	6.54	6.84	22.810	8668
6	279.15	7.01	7.3	22.892	9284
7	280.15	7.51	7.8	22.974	9955
8	281.15	8.05	8.3	23.056	10631
9	282.15	8.61	8.82	23.138	11338
10	283.15	9.21	9.4	23.220	12126
11	284.15	9.84	10	23.302	12946
12	285.15	10.52	10.7	23.384	13901
13	286.15	11.23	11.4	23.466	14862
14	287.15	11.99	12.1	23.548	15830
15	288.15	12.79	12.8	23.630	16804
16	289.15	13.63	13.6	23.712	17916
17	290.15	14.53	14.5	23.794	19167
18	291.15	15.48	15.4	23.876	20427
19	292.15	16.48	16.3	23.958	21695
20	293.15	17.54	17.3	24.040	23105

续表 7. 不同温度下饱和水蒸气的压强和绝对湿度

温度 (°C)	温度 (K)	压强 (mmHg)	饱和绝对湿度 (g/m ³)	摩尔体积 (L/mol)	浓度 (ppm)
21	294.15	18.65	18.3	24.122	24524
22	295.15	19.83	19.4	24.204	26087
23	296.15	21.07	20.6	24.286	27794
24	297.15	22.38	21.8	24.368	29513
25	298.15	23.76	23.0	24.450	31242
26	299.15	25.21	24.4	24.532	33255
27	300.15	26.74	25.8	24.614	35280
28	301.15	28.35	27.2	24.696	37319
29	302.15	30.04	28.7	24.778	39507
30	303.15	31.82	30.3	24.860	41848
31	304.15	33.70	32.1	24.942	44480
32	305.15	35.66	33.9	25.024	47129
33	306.15	37.73	35.7	25.106	49794
34	307.15	39.90	37.6	25.188	52615
35	308.15	42.18	39.6	25.270	55594
36	309.15	44.56	41.8	25.352	58873
37	310.15	47.07	44.0	25.434	62173
38	311.15	49.69	46.3	25.516	65633
39	312.15	52.44	48.7	25.598	69257
40	313.15	55.32	51.2	25.680	73046
45	318.15	71.88	65.4	26.090	94795
50	323.15	92.51	83.0	26.500	122196
55	328.15	118.04	104.3	26.910	155930
60	333.15	149.38	130	27.320	197314
65	338.15	187.54	161	27.730	248033
70	343.15	233.71	198	28.140	309545
75	348.15	289.13	242	28.550	383845
80	353.15	355.12	293	28.960	471413
85	358.15	433.62	354	29.371	577620
90	363.15	525.76	424	29.781	701498
95	368.15	633.90	505	30.191	847014
100	373.15	760.00	598	30.601	1016621