

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标准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、NO、SO₂、CS₂ 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。

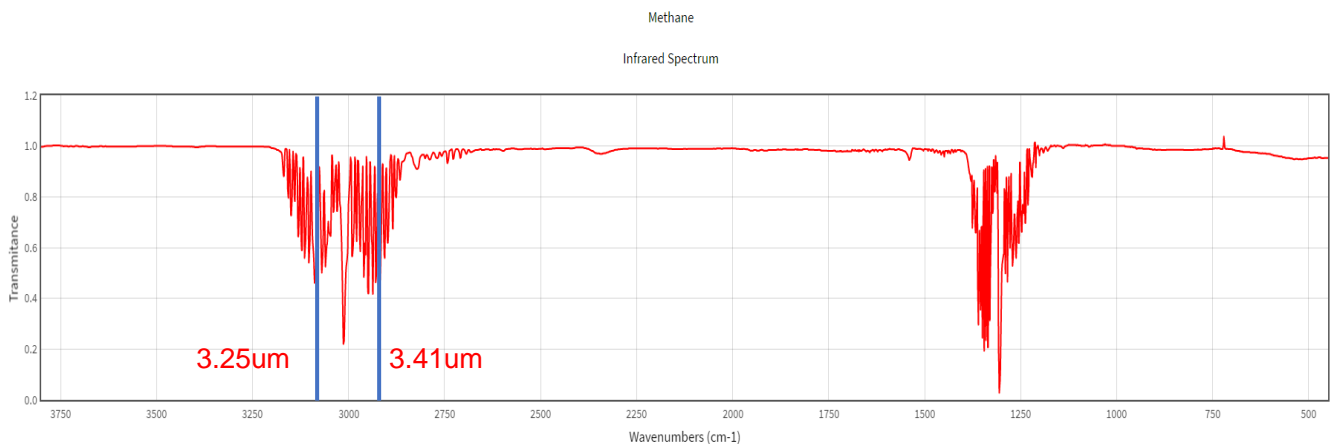


图 1. 甲烷的红外吸收谱

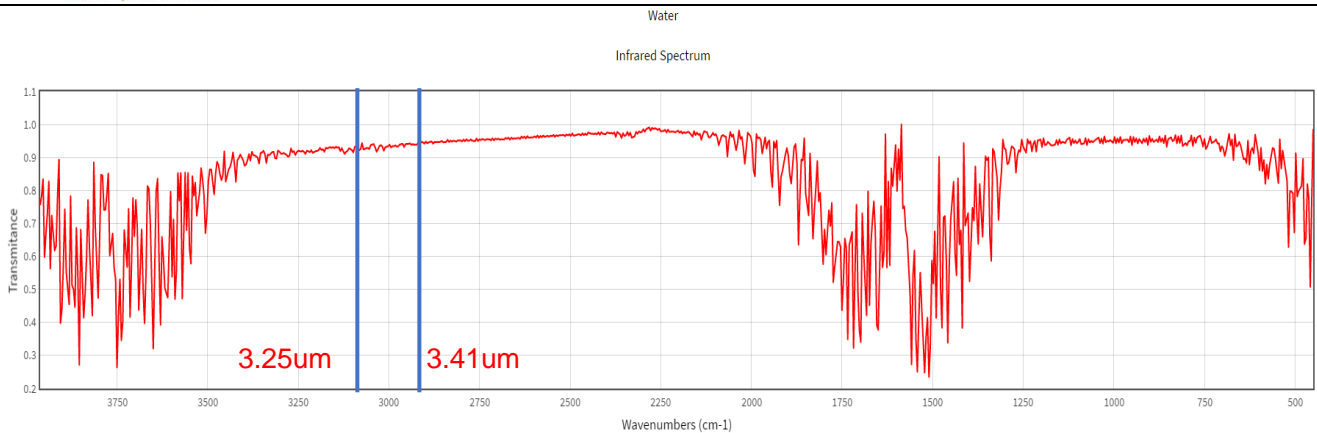


图 2. 水蒸气的红外吸收谱

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. 标准气体的配置

本实验选择两组标准气体：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 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

将标准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. 计算注入的标准气体体积：

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 为标准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

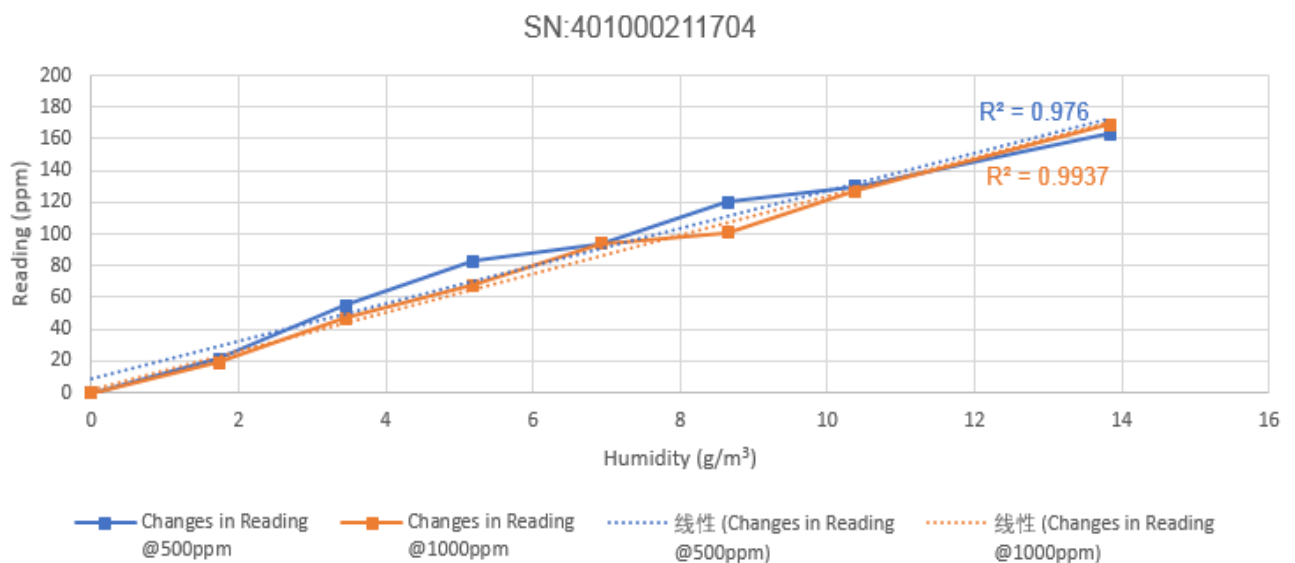
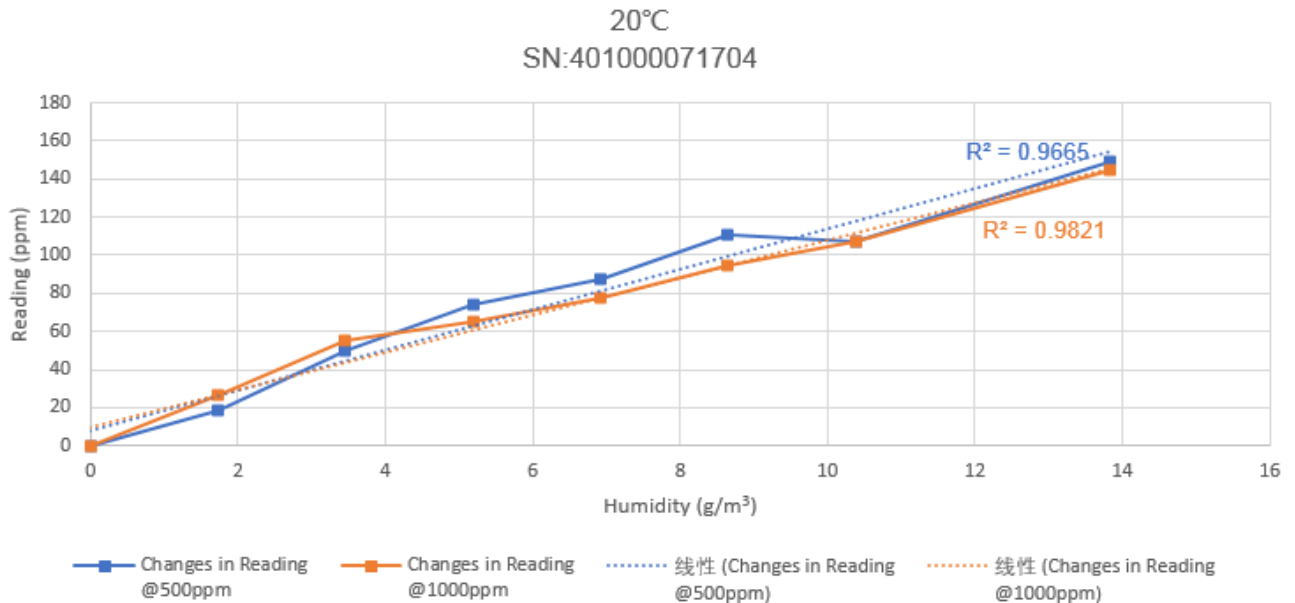


图 3. 20°C时湿度-读数变化量曲线

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 |

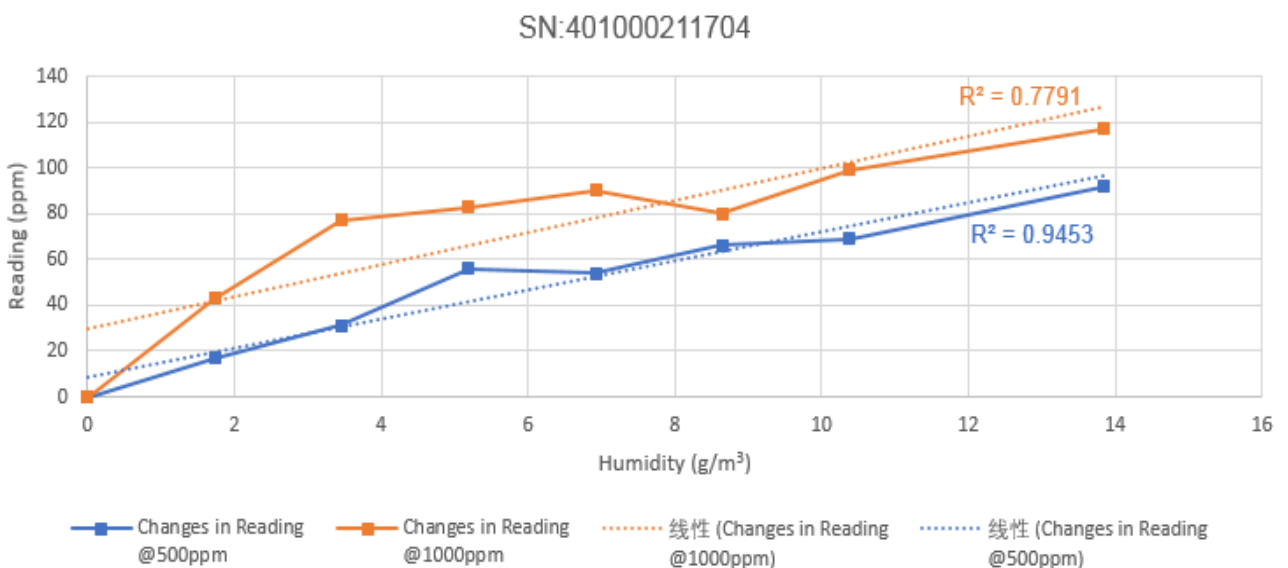
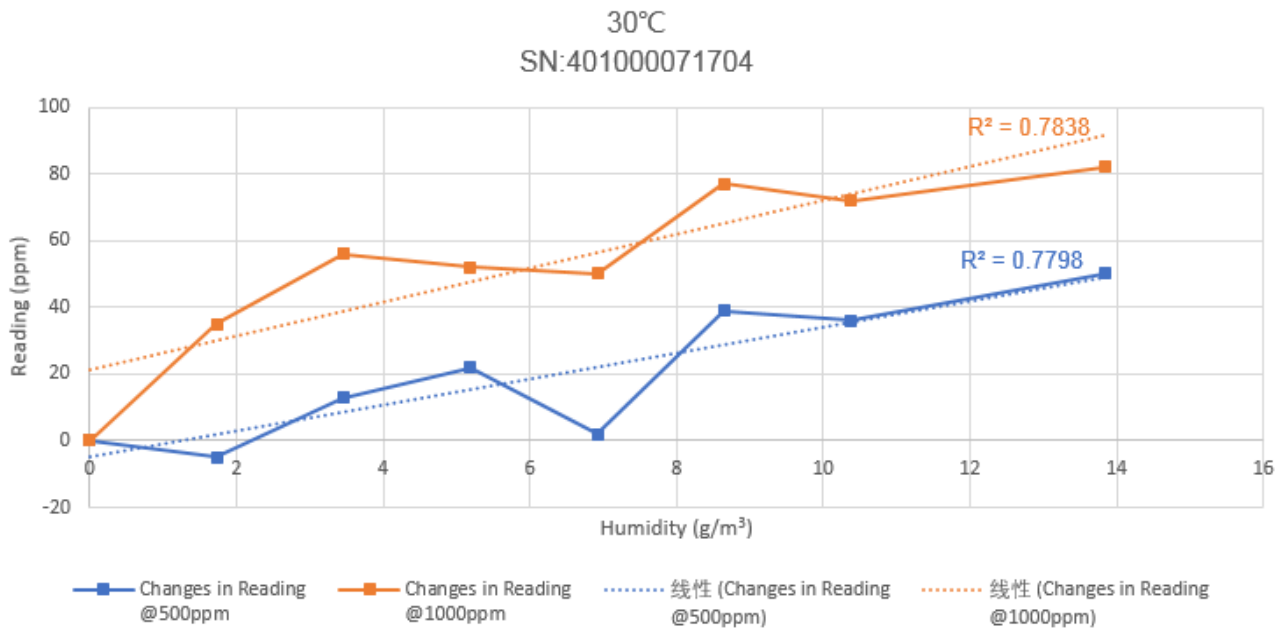


图 4. 30°C时湿度-读数变化量曲线

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 |

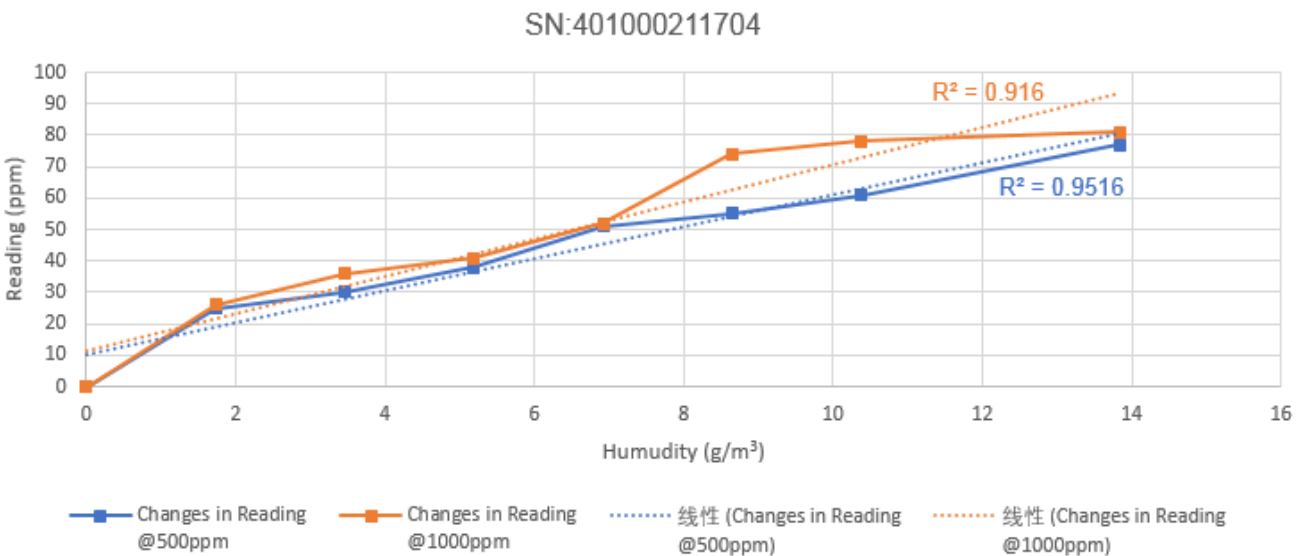
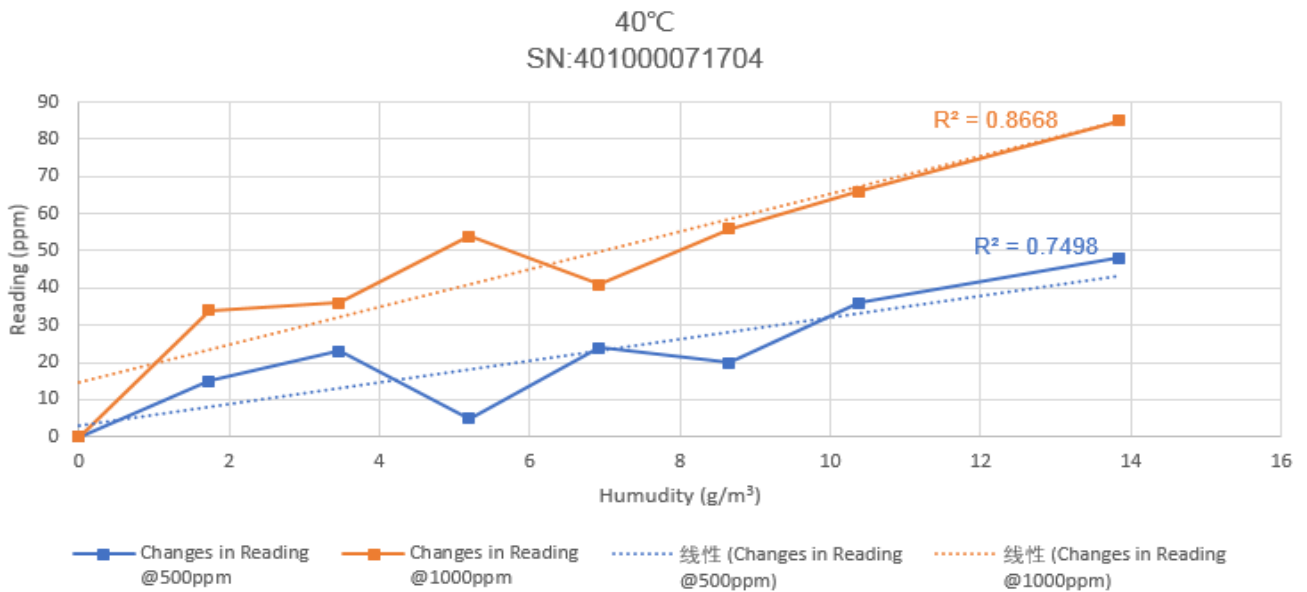


图 5. 40°C时湿度-读数变化量曲线

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 |

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 6. 不同温度下饱和水汽的压强和密度

| 温度 (°C) | 压强 (mmHg) | 水汽密度 (g/m ³) | 温度 (°C) | 压强 (mmHg) | 水汽密度 (g/m ³) |
|------------|--------------|-----------------------------|------------|--------------|-----------------------------|
| -30 | 0.28 | 0.33 | 12 | 10.52 | 10.7 |
| -29 | 0.31 | 0.37 | 13 | 11.23 | 11.4 |
| -28 | 0.35 | 0.41 | 14 | 11.99 | 12.1 |
| -27 | 0.38 | 0.46 | 15 | 12.79 | 12.8 |
| -26 | 0.43 | 0.51 | 16 | 13.63 | 13.6 |
| -25 | 0.47 | 0.55 | 17 | 14.53 | 14.5 |
| -24 | 0.52 | 0.60 | 18 | 15.48 | 15.4 |
| -23 | 0.58 | 0.66 | 19 | 16.48 | 16.3 |
| -22 | 0.64 | 0.73 | 20 | 17.54 | 17.3 |
| -21 | 0.70 | 0.80 | 21 | 18.65 | 18.3 |
| -20 | 0.77 | 0.88 | 22 | 19.83 | 19.4 |
| -19 | 0.85 | 0.96 | 23 | 21.07 | 20.6 |
| -18 | 0.94 | 1.05 | 24 | 22.38 | 21.8 |
| -17 | 1.03 | 1.15 | 25 | 23.76 | 23.0 |
| -16 | 1.13 | 1.27 | 26 | 25.21 | 24.4 |
| -15 | 1.24 | 1.38 | 27 | 26.74 | 25.8 |
| -14 | 1.36 | 1.51 | 28 | 28.35 | 27.2 |
| -13 | 1.49 | 1.65 | 29 | 30.04 | 28.7 |
| -12 | 1.63 | 1.80 | 30 | 31.82 | 30.3 |
| -11 | 1.78 | 1.96 | 31 | 33.70 | 32.1 |
| -10 | 1.95 | 2.14 | 32 | 35.66 | 33.9 |
| -9 | 2.13 | 2.33 | 33 | 37.73 | 35.7 |
| -8 | 2.32 | 2.54 | 34 | 39.90 | 37.6 |
| -7 | 2.53 | 2.76 | 35 | 42.18 | 39.6 |
| -6 | 2.76 | 2.99 | 36 | 44.56 | 41.8 |
| -5 | 3.01 | 3.24 | 37 | 47.07 | 44.0 |
| -4 | 3.28 | 3.51 | 38 | 49.69 | 46.3 |
| -3 | 3.57 | 3.81 | 39 | 52.44 | 48.7 |
| -2 | 3.88 | 4.13 | 40 | 55.32 | 51.2 |
| -1 | 4.22 | 4.47 | 45 | 71.88 | 65.4 |
| 0 | 4.58 | 4.84 | 50 | 92.51 | 83.0 |
| 1 | 4.93 | 5.22 | 55 | 118.04 | 104.3 |
| 2 | 5.29 | 5.60 | 60 | 149.38 | 130 |
| 3 | 5.69 | 5.98 | 65 | 187.54 | 161 |
| 4 | 6.10 | 6.4 | 70 | 233.71 | 198 |
| 5 | 6.54 | 6.84 | 75 | 289.13 | 242 |
| 6 | 7.01 | 7.3 | 80 | 355.12 | 293 |
| 7 | 7.51 | 7.8 | 85 | 433.62 | 354 |
| 8 | 8.05 | 8.3 | 90 | 525.76 | 424 |
| 9 | 8.61 | 8.8 | 95 | 633.90 | 505 |
| 10 | 9.21 | 9.4 | 100 | 760.00 | 598 |
| 11 | 9.84 | 10 | | | |