



研究与开发

基站设备断电节能凝露现象的研究

付吉祥, 张瑞艳, 张敏, 陶琳, 邓伟

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 5G 基站多收发通道数、宽带宽、高流量、高发射功率等特性, 导致其满载功耗较 4G 基站大幅增加。5G 发展初期, 现网基站可能存在长时间无用户的场景, 对无用户基站设备进行间隔断电起到节能的效果。间隔断电节能也会带来设备凝露, 引起器件、PCB 等腐蚀、烧毁, 造成基站设备失效。介绍了凝露的基本原理, 设计了凝露实验并对基站设备进行对比验证, 分析了基站设备产生凝露的原因, 最后给出了基站设备避免凝露的使用方案建议。

关键词: 5G; 基站设备; 凝露; 间隔断电; 深度休眠

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021057

Research on condensation phenomenon during energy-saving shutdown of base station

FU Jixiang, ZHANG Ruiyan, ZHANG Min, TAO Lin, DENG Wei

China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: 5G base station has a significant increase in its full-load power consumption compared to 4G base stations due to multiple transceiver channels, wide bandwidth, high traffic and high transmission power. In the early stage of 5G development, since there may be scenarios without users for a long time in the current network base stations, intermittent shutdown of the base stations can play a role in energy saving. However, the intermittent shutdown of the base station saves energy and condensation occurs inside the equipment, which will cause corrosion and burn down of devices and PCB, resulting in the failure of base station equipment. The basic principle of condensation was introduced, the condensation experiment was designed and the comparative verification was carried onto the base station equipment, the causes of condensation on the base station equipment were analyzed, and finally the suggestion for the use scheme of the base station equipment to avoid condensation was given.

Key words: 5G, base station equipment, condensation, intermittent shutdown, deep sleep

1 引言

一直以来, 通信设备的电费支出都是运营商

成本重要的一部分, 如何节能省电降成本自然成为运营商的重要课题^[1]。随着 5G 基站的快速建设, 其功耗较 4G 设备大幅提升的缺点日益严

峻,特别是在用户较少的初期阶段,更是一个显著痛点。

当前,对基站设备进行节能的方法主要是一步步关断设备中的子器件、子功能,甚至完全下电。然而直接断电固然可以大幅降低设备功耗,达到终极形态的节能效果,但由此可能带来的凝露问题却不容忽视。

凝露是一种自然界中广泛存在的自然现象,空气中的水汽会凝结在温度低于露点温度的物体表面,形成微观水膜甚至宏观上的水滴。凝露所造成的危害被广泛发现于各类户外设备中,学术界、产业界均对其进行了大量的研究。罗宣国等^[2-5]分析了电动汽车和小型户外电子设备凝露产生的原理和危害;韦生文等^[6-8]使用人工肺研究了雷达及电子设备的呼吸凝露,发现密封腔体的呼吸作用会使设备内部产生凝露,并解释了凝露对电子产品的危害;Ou-Qing等^[9]分析了电信设备机柜内部产生凝露的一种典型场景以及凝露对设备产生的危害;Zhang等^[10-12]分析了建筑内部的湿度变化规律以及高湿度空气甚至建筑表面凝露对建筑物带来的危害。

本文基于基站通信设备领域,对其凝露场景进行了分析,针对性地设计了等效凝露实验,从实践角度探究了基站设备完全下电的凝露风险,并进一步分析基站设备部分关断时的节能边界,给出了极限的节能功耗。

2 凝露的基本概念

凝露是一种普遍的自然现象,如清晨草叶上的露珠、冬天玻璃上形成的水雾等。凝露是温度变化导致的水分析出现象,当物体表面温度低于空气露点温度时,就会在物体表面形成凝露。凝露的水来自于空气,人们所接触的空气中都是含有水蒸气的,空气在不同温度下能含有的最大水汽质量 E (g/m^3)可以通过饱和湿度表查找,见表1。

表1 空气在不同温度下的饱和湿度

温度	饱和湿度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	温度	饱和湿度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	温度	饱和湿度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	温度	饱和湿度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
-30℃	0.33	-9℃	2.33	8℃	8.30	25℃	23.00
-25℃	0.55	-8℃	2.54	9℃	8.80	26℃	24.40
-24℃	0.60	-7℃	2.76	10℃	9.40	27℃	25.80
-23℃	0.66	-6℃	2.99	11℃	10.00	28℃	27.20
-22℃	0.73	-5℃	3.24	12℃	10.70	29℃	28.70
-21℃	0.80	-4℃	3.51	13℃	11.40	30℃	30.30
-20℃	0.88	-3℃	3.81	14℃	12.10	31℃	32.10
-19℃	0.96	-2℃	4.13	15℃	12.80	32℃	33.90
-18℃	1.05	-1℃	4.47	16℃	13.60	33℃	35.70
-17℃	1.15	0℃	4.84	17℃	14.50	34℃	37.60
-16℃	1.27	1℃	5.22	18℃	15.40	35℃	39.60
-15℃	1.38	2℃	5.60	19℃	16.30	36℃	41.80
-14℃	1.51	3℃	5.98	20℃	17.30	37℃	44.00
-13℃	1.65	4℃	6.40	21℃	18.30	38℃	46.30
-12℃	1.80	5℃	6.84	22℃	19.40	39℃	48.70
-11℃	1.96	6℃	7.30	23℃	20.60	40℃	51.20
-10℃	2.14	7℃	7.80	24℃	21.80	45℃	65.40

从表1可以看到,温度越高,单位体积空气中最大所能蕴含的水量越大,如25℃时,单位体积(m^3)空气可含有23 g水汽。当水汽质量达到表1中的值时,该温度下的空气湿度已经饱和,即相对湿度 $\text{RH}=100\%$ 。相对湿度的计算方式为 $\text{RH}=e/E\times 100\%$,其中 e 为实际的水汽质量(g/m^3), E 为表1中该温度条件下的饱和水汽质量(g/m^3)。

由于温度变化,当物体表面温度低于空气露点温度时,就会在物体表面形成凝露。不同相对湿度的空气要求的露点温度不同,相对湿度 RH 越高,露点温度与环境温度的差值越小。即当相对湿度较高时,物体表面温度比环境温度稍低一些就会产生凝露。不同温度湿度情况下的露点温度如图1所示,环境温度为25℃时,相对湿度为90%、80%、60%、40%时,物体表面温度分别为24℃、21℃、16℃、10℃即会产生凝露。

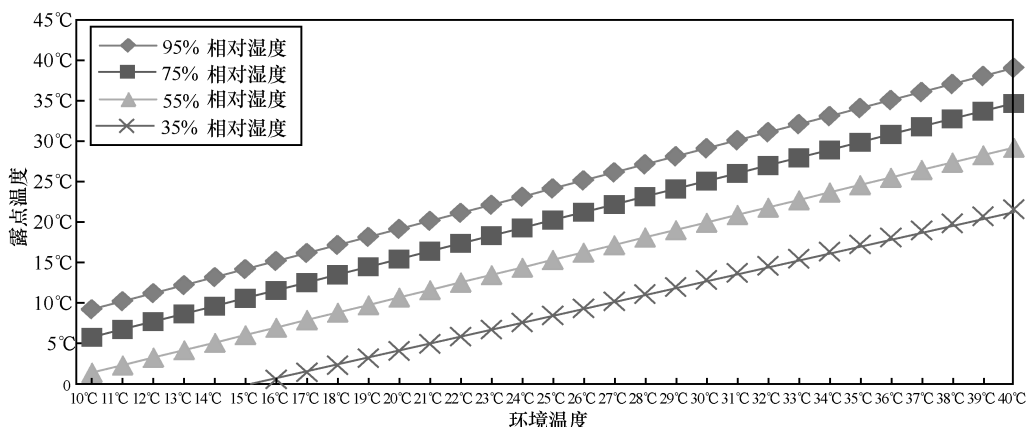


图1 不同温度、湿度情况下的露点温度

3 基站设备凝露实验

通过上述理论分析,当基站设备内 PCB 表面温度低于设备内空气露点温度时,就会在设备 PCB 及器件上形成凝露。基站设备断电时,不再保持发热的状态,外部高湿空气进入设备内,再经过温度变化,导致设备 PCB 温度低于空气中露点温度,形成凝露。本节通过理论假定分析和实验模拟的方式验证下电设备会存在凝露。

3.1 理论分析

通过对现网基站设备应用条件的分析,下电的室外基站设备主要在清晨日出和暴雨两个场景下较易产生凝露。下电的基站在这两种场景下产生凝露的过程不尽相同,凝露机理一致。理论示意过程忽略温湿度动态变化,以最终稳定方式计算凝露量。下电基站设备在清晨日出后凝露的产生过程如图2所示。

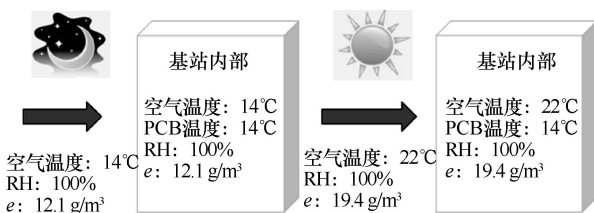


图2 清晨日出前后凝露的产生过程

清晨日出前基站处于下电状态:夜间空气中相对湿度较高,相对湿度达到100%,由于基站设

备呼吸作用^[5],基站内部的空气温度与相对湿度逐渐与外界环境相同。清晨温度随着太阳即将升起,温度逐渐升高,基于热力学基本定律:热量 $Q = C \times m \times \Delta T$, C 为比热容, m 为质量, ΔT 为温升。由于基站内部 PCB 表面为铜等金属材料,假定金属材料的质量是腔体空气的1000倍,空气比热容为1.005 J/(kg·°C),铜的比热容为0.39 J/(kg·°C),导致 PCB、器件等温度上升远远滞后于空气温度。此时,在温度相对较低的 PCB、器件等表面产生了凝露。图2中,通过理论计算清晨日出导致的凝露量理论值为7.3 g/m³。

下电基站设备夏日暴雨后凝露的产生过程如图3所示。

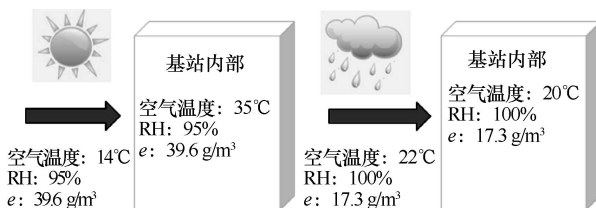


图3 夏日暴雨前后凝露的产生过程

炎热潮湿的夏日暴雨前基站设备下电状态:空气温度达到35°C,相对湿度达到95%。由于基站设备具有呼吸作用^[5],基站内部的空气温度与相对湿度逐渐与外界环境相同。基站设备内部空气中绝对含水量达到39.6 g/m³,降雨使基站设备温度和腔体空气温度快速降低,导致空气

中允许的水汽含量变低, 多余的水分凝结, 产生凝露。通过理论计算夏日暴雨导致的凝露量理论值为 22.3 g/m^3 。

3.2 实验验证

为快速验证下电和节能态的基站设备是否有凝露的产生, 基于第3.1节的理论分析, 采用下雨的方式进行实验室模拟验证。

3.2.1 实验设备要求及实验条件

为了模拟真实自然条件下的降雨, 实现在降雨过程中的等啥条件, 通过算法控制, 设计一款新型的高温淋雨设备, 实现模拟不同雨量、温度和湿度的三综合实验箱。为保证实验条件的有效性, 降雨参考全国累积降水量实况分布图, 选择的降雨等级为6个等级中的第4个等级: 暴雨。该等级的降雨量在全国大多数省(区市)均存在, 具有一定的典型意义。

5G基站设备AAU和RRU两种形态在三综合实验箱中模拟暴雨凝露验证, 每种形态的基站选取两台样本, 一台间隔断电, 一台节能不下电, 两台设备进行实验验证。被测设备实验前照片如图4所示。



图4 被测设备实验前照片

实验步骤如图5所示, 验证条件如下:

步骤1 实验前对所有设备PCB及器件上进行湿度检测试纸和凝露检测试纸布点;

步骤2 布点完成后产品正常进行组装, 保证设备组装与商用发货产品一致;

步骤3 设备抱杆安装置于实验箱内, 被测模块电源线, 光纤连接按照现网安装方法安装;

步骤4 确保上电模块硬件功能正常;

步骤5 温箱初始态保持 25°C , 50% RH, 稳定 20 min; 温度按照 1°C/min 升温到 55°C 后, 湿度在 30 min 内升至 95% RH, 并保持 60 h; 2号设备上电保持 3 h, 下电 1 h 后淋雨 0.5 h, 降雨量为 2 L/min , 淋雨完成后保持下电状态 0.5 h, 再上电;

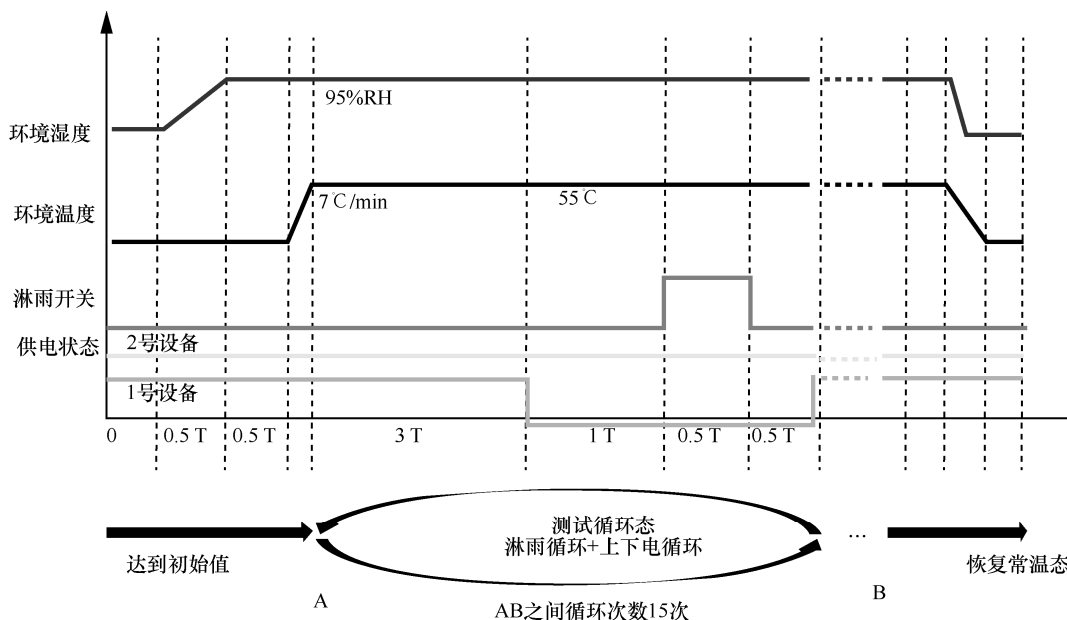


图5 实验步骤



步骤 6 重复步骤 5 进行淋雨下电操作，淋雨循环要求 ≥ 15 次；

步骤 7 1 号设备全过程正常工作；

步骤 8 淋雨结束先降温至 50% RH 以下(降温过程中打开干风吹扫系统)，并保持 5 h 左右，再降温至 25℃，保持 2 h 开箱。

3.2.2 实验判定依据及要求

设备在实验过程中完全模拟现网的工作状态，过程中不进行设备的拆装，通过“湿度”检测试纸和“凝露”检测试纸的颜色作为判定的依据。其中，“湿度”检测试纸可以检测环境的相对湿度，“凝露”检测试纸可以检测是否有液态水形成。两种试纸配合使用可以给出直接的实验结论。“湿度”检测试纸和“凝露”检测试纸的说明见表 2。

3.2.3 实验结果及分析

将测试的 AAU 和 RRU 两类共 4 件样品从温箱中取出进行开盖检测，观察湿度检测试纸和凝露检测试纸的颜色变化情况。

(1) AAU 产品不下电模块实验前后试纸的颜色变化情况如图 6 所示。

该不下电 AAU 模块中湿度检测试纸 50%变蓝，凝露检测试纸无变色。说明该样品部分区域相对湿度达到 RH85%以上，但 PCB 板卡无凝露出现。

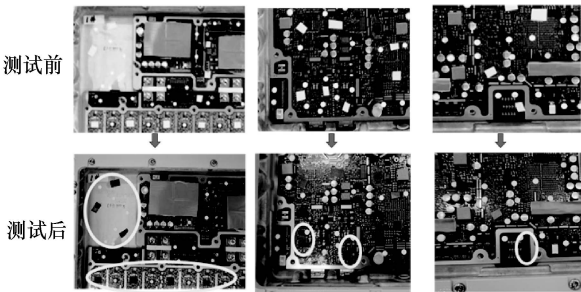


图 6 不下电 AAU 模块实验前后试纸颜色变化情况

(2) AAU 产品间隔断电模块实验前后试纸的颜色变化情况如图 7 所示。

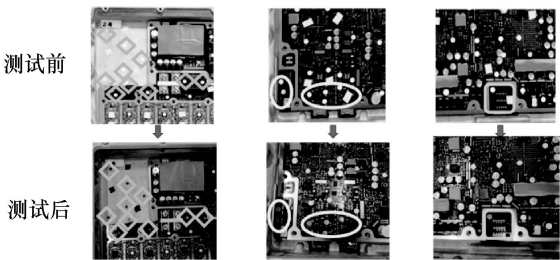


图 7 间隔断电 AAU 模块实验前后试纸颜色变化情况

该间隔断电 AAU 模块中湿度检测试纸 100%变蓝，凝露检测试纸 10%变色，说明该样品相对湿度达到 RH85%以上，且 PCB 板卡部分区域有凝露形成。

(3) RRU 产品不下电模块实验前后试纸的颜色变化情况如图 8 所示。

该不下电 RRU 模块中湿度检测试纸 28%变蓝，凝露检测试纸无变色。说明该样品部分区域

表 2 湿度检测试纸和凝露检测试纸的说明

湿度检测试纸		凝露检测试纸	
当湿度 $<60\%RH$ 颜色： RGB（红绿蓝）为 237:242:26		未凝露颜色： RGB（红绿蓝）为 255:251:255	
当湿度 $>75\%RH$ 颜色： RGB（红绿蓝）为 127:185:83		轻微凝露颜色： RGB（红绿蓝）为 197:149:161	
当湿度 $>85\%RH$ 颜色： RGB（红绿蓝）为 33:16:252		严重凝露颜色： RGB（红绿蓝）为 200:78:92	

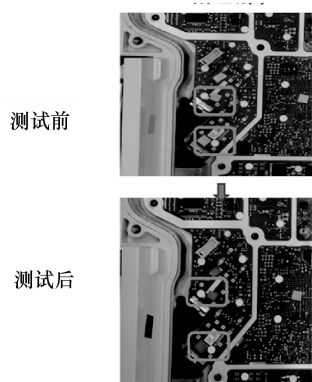


图8 不下电 RRU 模块实验前后试纸颜色变化情况

相对湿度达到 RH85%以上, 但 PCB 板卡无凝露出现。

(4) RRU 产品下电模块实验前后试纸的颜色变化情况如图 9 所示。

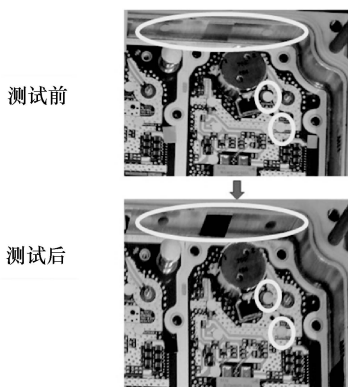


图9 间隔断电 RRU 模块实验前后试纸颜色变化情况

该间隔断电 RRU 模块中湿度检测试纸 100% 变蓝, 凝露检测试纸 4.1% 变色, 说明该样品相对湿度达到 RH85%以上, 且 PCB 板卡部分区域有凝露形成。

该实验模拟了夏日暴雨前后环境下, 基站设备间隔断电时凝露的形成情况。通过实验可以发现, 无论是 AAU 产品形态还是 RRU 产品形态、设备是否断电, 湿度检测试纸均有大量变色, 这是由于基站设备 IP65 防护标准设备内外部空气是可以自由流通的, 外部环境的高湿空气可以自由地进入设备内部, 同时设备工作时也可以通过空气的流通进行散热。

通过对比实验, 由于物理形态及功耗等方面的差别, AAU 产品与 RRU 产品凝露的位置及程度有所不同, 但无论是 AAU 产品形态还是 RRU 产品形态, 在该环境下如果设备刚好处于断电状态, 内部 PCB 板上均出现凝露。而设备一直上电保持工作状态时则没有出现凝露。该现象的主要原因是设备下电冷却后, PCB 板温度和外面环境温度相近, 而设备内空气的相对湿度很大, 此时降雨使得设备温度骤降, 达到凝露形成条件, 在设备内部的 PCB 板、天线板上都有凝露产生。设备在一直上电时, 有一定的功耗, 在 PCB 及器件上产生热量, 温度高于露点温度, 破坏了凝露的形成条件, 因此没有产生凝露。

4 避免凝露的基站设备节能的极限条件分析

综上可见, 基站设备现网应用过程中进行间隔断电时具有凝露的风险。需采用有效措施进行规避, 增加基站设备防护等级可以减缓外部潮湿空气的进入, 但也同时阻碍了设备自身的散热, 由此带来成本的增加及过温的问题。在 PCB 板卡表面涂覆聚氨酯材料可以在发生凝露时保护关键器件不发生损坏, 但由此也带来散热及屏蔽盖与单板接地的问題。

通过上文分析可见, 保持一定的功耗可以使得基站设备内部维持一定的温度, 从而避免凝露的产生。通过式 (1) [11] 可以根据模块内部空气温度及相对湿度计算得到当前状态下的露点温度。基站设备节能时只要保持基站内部 PCB 及器件温度在露点温度 T_d 以上便可以破坏凝露的产生条件, 避免凝露的形成。此时设备维持住该温度所需要的功耗便是节能的极限, 当继续降低功耗时便有形成凝露损伤设备的风险。

$$X = 0.66077 + \frac{7.5 \times T}{237.3 + T} + \lg RH - 2 \quad (1)$$

$$T_d = \left\lceil \frac{237.3 \times (0.66077 - X)}{X - 8.16077} \right\rceil$$



其中, T 为空气温度, RH 为相对湿度, T_d 为露点温度。

通过凝露计算式的分析理论, 借用第 3.2.1 节实验条件验证当前主流的 5G 设备节能态下不产生凝露的边界功耗值。应用 5G AAU 设备, 设备开启深度休眠功能, 此时设备功耗为 140 W。设备内部增加湿度传感器和板温传感器, 实时监测模块内部空气湿度、模块内部空气温度、PCB 温度, 并实时计算露点温度。在该功耗水平下, PCB 板温度传感器温度有 10 min 低于露点温度, 通过分析此时有凝露形成的风险, 实验结束检视凝露试纸, 发现试纸检测到凝露产生, 证实 140 W 功耗下 PCB 上有凝露产生。140 W 功耗时模块内部温度、湿度及露点变化曲线如图 10 所示。

通过热仿真计算不同功耗下模块 PCB 温升, 通过板温升高, 破坏凝露产生的过程, 实验选取节能下功耗为 170 W, 通过实验验证, 模块 PCB

板温度始终高于露点温度, 防止凝露产生。通过图 11 可见在整个实验过程中, 板温度始终高于露点温度, 模块内部没有凝露的产生。

基站设备应用时模块内部 PCB 及器件的温度受功耗、外界气象条件、使用环境等多种因素的影响, 为避免凝露带来危害, 节能状态下需要考虑产品的可靠性应用。

5 结束语

本文基于基站通信设备领域, 针对基站节能下凝露风险进行深入分析, 研究凝露在基站设备中产生的机理, 借助三综合设备模拟现实生活中暴雨后设备凝露风险, 佐证了基站设备间隔断电下凝露的必然发生。同时通过实验验证得到设备节能态下避免凝露的最低功耗边界值, 使设备内 PCB 及器件温度高于露点温度, 进而保障设备在节能下无凝露带来的设备损坏。

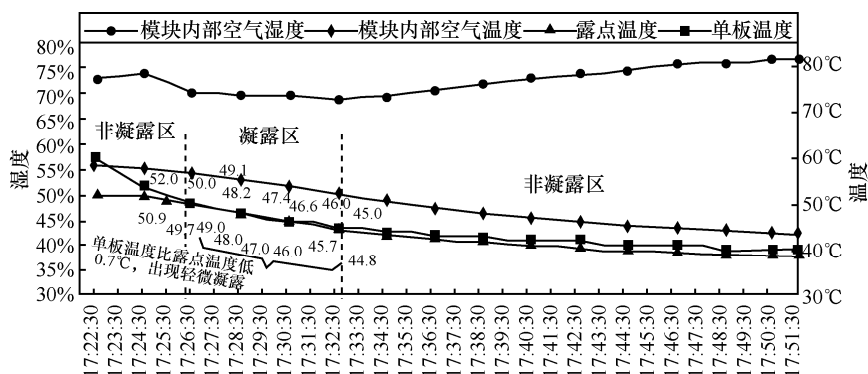


图 10 140 W 功耗时模块内部温度、湿度及露点变化曲线

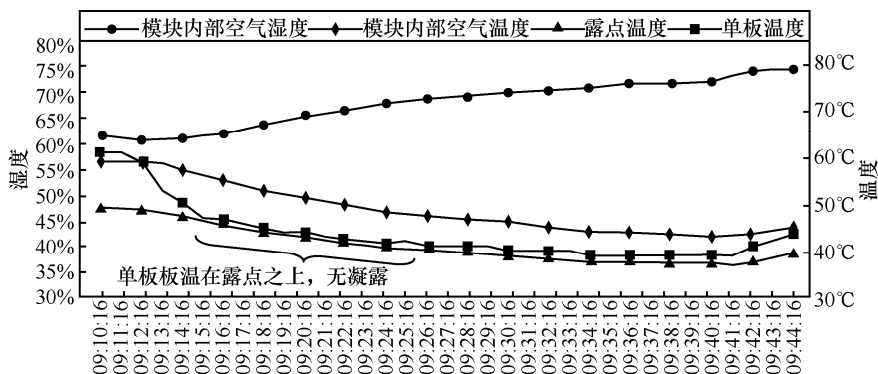


图 11 170 W 功耗时模块内部温度、湿度及露点变化曲线

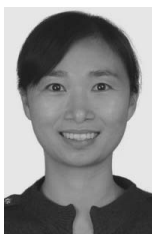
参考文献:

- [1] 胡煜华, 汤滢琪, 李贝. 5G 网络共建共享模式[J]. 电信科学, 2020, 36(9): 148-153.
HU Y H, TANG Y Q, LI B. 5G network co-construction and sharing mode[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(9): 148-153.
- [2] 罗宣国, 夏丽建. 电气设备的防凝露技术研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(4): 489-492.
LUO X G, XIA L J. Research on dewing prevention technology for electrical-equipment[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(4): 489-492.
- [3] 高庆勇, 房相成, 陈伟明, 等. 电动汽车充电设施防凝露设计研究[J]. 电气技术, 2018.
GAO Q Y, FANG X C, CHEN W M, et al. Study on anti condensation design of charging equipment for electric vehicles[J]. Electrical Engineering, 2018.
- [4] 李欧卿, 魏芑, 朱箭. 室外通讯机柜防结露研究[J]. 电子机械工程, 2011, 27(5): 1-4.
LI O Q, WEI P, ZHU J. Study on condensation prevention of outdoor telecom cabinet[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011, 27(5): 1-4.
- [5] 何建锋. 小型矩形电连接器防露性能的改进[J]. 机电元件, 2008(1): 15-16.
HE J F. Improving dew-proof performance of small rectangular connector[J]. Electromechanical Components, 2008(1): 15-16.
- [6] 韦生文. 雷达电子设备的呼吸凝露作用及其预防[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(6): 571-576, 582.
WEI S W. Respiration and condensation of radar electronic equipments and its prevention[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(6): 571-576, 582.
- [7] 龚光福. 呼吸效应研究[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(3): 236-239, 244.
GONG G F. The Research on respiration effect[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(3): 236-239, 244.
- [8] 徐红. 海用露天电子设备防凝露设计概述[J]. 电子机械工程, 2004, 20(3): 24-26.
XU H. Summary of the congealing dew resistance design for electronic equipment in the marine open air environment[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2004, 20(3): 24-26.
- [9] OU-QING L I, PENG W, JIAN Z. Study on condensation prevention of outdoor telecom cabinet[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011.
- [10] ZHANG L Z, ZHU D S, DENG X H, et al. Thermodynamic modeling of a novel air dehumidification system[J]. Energy & Buildings, 2005, 37(3): 279-286.
- [11] MAZZEI P, MINICHELLO F, PALMA D. HVAC dehumidification systems for thermal comfort: a critical review[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5-6): 677-707.
- [12] CHOU S K, CHUA K J, HO J C, et al. On the study of an energy-efficient greenhouse for heating, cooling and dehumidification applications[J]. Applied Energy, 2004.

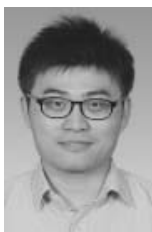
[作者简介]



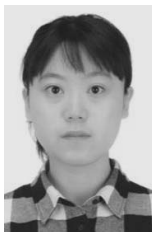
付吉祥(1987-), 男, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为基站设备架构及可靠性。



张瑞艳(1982-), 女, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为基站设备的站型、技术规范和测试规范制定。



张敏(1984-), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, 主要从事与基站站型规划、射频干扰分析相关的工作。



陶琳(1992-), 女, 博士, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为射频技术。



邓伟(1978-), 男, 中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所副所长、高级工程师, 主要研究方向为无线移动通信。