

辐射天花和新风系统技术（RCF）在公共建筑中的应用研究

燕通科技（香港）有限公司 严继光 潘雪丹

摘要：用辐射换热代替对流换热，达到更好的舒适度(空调)效果。对此欧洲同行做了多年的研究，但由于欧洲技术冷工况结露造成辐射强度低的问题始终没有找到解决的方法，辐射板技术没有得到发展和推广。基于我们对欧洲技术的研究，发现欧洲同行在研究辐射板系统时，将辐射板换热当作平板表面流体换热的形式去研究。没有用辐射传热的机理去理解和分析问题。欧洲相关测试标准和测试方法也只是依据热源对空气的影响，进而测试空气对辐射板的影响，没有测试到热源和辐射板之间的辐射换热强度。

本文作者对辐射天花技术进行了超过 10 年的研究和实验，开发出辐射和新风系统国际专利技术（Radiant Ceiling and Fresh Air System）简称 RCF 技术，该技术在实验楼超过六年的运行，不断地改进和完善，并收集了大量实验数据。首先在香港进行了推广。该技术的用户香港飞机工程有限公司（太古集团）行政大楼等建筑的测试数据证明，较改造前传统空调相比节电 40%，运行维修管理费用降低了 90%。RCF 技术的新风系统主要功能是除湿和满足室内环境的需要，新风机的热湿分析完全和传统空调类似，在此不再赘述。本文试图从另一个角度和读者一起来解析 RCF 技术的研究思路，期望得到同行的指正。

关键词：辐射传热 欧洲标准 人体舒适度 辐射板结露 能耗

1. 传热的微观机理

RCF 技术的运行能耗证明比传统对流空调减少 40%以上，该数据引起业内很多同行的怀疑。理由是 RCF 技术的运行能耗远远低于按照现行规范得出的“计算负荷”，作者认为，现行规范的计算负荷是依据对流传热的理论得出的。事实上，辐射板和室内各个表面和人体表面的传热主要是“辐射传热”，辐射板得到的是辐射热，现行空调工程热工计算方法并不适用于 RCF 技术。本文以下将论述相关问题。

1.1 导热和对流与傅里叶（Fourier J.）定理

导热是粒子或粒子结构运动或震动引起的热传递，对流是由于分子微团运动来达到传递热量的。这些粒子的运动或振动的宏观表现是物体（气体）“温度”的改变。从微观角度来计算导热和对流的热传递量是极其困难的，傅里叶通过实验和研究于 1822 年提出了热流量和温度梯度成正比，即傅里叶定律 [1]：

$$q = - \lambda \text{ grad } t \quad \text{W/m}^2$$

式中 λ 是实验得出的导热系数 公式中负号表示温度梯度和热流矢量的方向相反，即传热永远是顺着温度低的方向来进行。

由于导热和对流换热方式被大量成功应用，近百年诸多学者在这个领域进行了大量的研究和实验，导热系数 λ ，传热系数 K 越来越准确，边界层的各种流态的热质交换研究也在不断地获得进展。为空调技术的发展和进步提供了基础。

1.2 辐射传热和斯蒂芬-波兹曼定律

热辐射是一种由电磁粒子来传播热能的现象，它不仅有能量的转移，而且传热过程中伴随着能量形式的转化，即热能转变为电磁波，辐射出去的电磁波被物体吸收，又从电磁波转化为热能。辐射能的传播不需要空气传递或物体的直接接触。

辐射传热的微观机理十分复杂，宏观参数的变化和对流及导热完全不同，傅里叶定律显然不能应用在辐射传热领域。19 世纪斯蒂芬-玻尔兹曼（Stefan-Boltzmann）通过实验和研究，认为两个表面的辐射传热能力可以用宏观参数表面绝对温度、角系数和黑度来定律，这就是著名的斯蒂芬波兹曼 4 次方定律 [1]:

$$Q_{12} = C_{12} \Phi_{12} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ W/m}^2$$

式中， C_{12} 表示物体的黑度， Φ_{12} 是两个辐射传热面的角系数， F_1 表示物体 1 的表面积； T_1 、 T_2 分别为两物体的表面温度。

由定律可见辐射传热能力和两个传热表面的绝对温度有关外，还和传热面的黑度、角系数和发热面的面积有关。这个定律描述了辐射换热计算的数学模型，显然和傅里叶定律完全不同。作者在这篇文章论述的 RCF 技术是基于辐射换热理论，并通过以下的论述证明传统的空调热工计算方法并不适用于 RCF 技术。

室内的辐射传热和空间辐射传热不同，室内空气成分占 99.3% 的氮和氧在辐射换热过程中是被视作透明的，当然如果空气和壁面存在温差，空气可以通过对流的方式和壁面进行热交换，但其换热量和通过辐射直接交换的量相比是很小的。作者认为，RCF 的热工数据必须通过实验来取得，我们对此作了六年的各种维护结构、各季节和各种功能的热工实验，实验数据证明和斯蒂芬-波兹曼定律计算结果相差甚远。由于篇幅的关系，本文主要论述基本问题，实验结果和分析将另文发表。

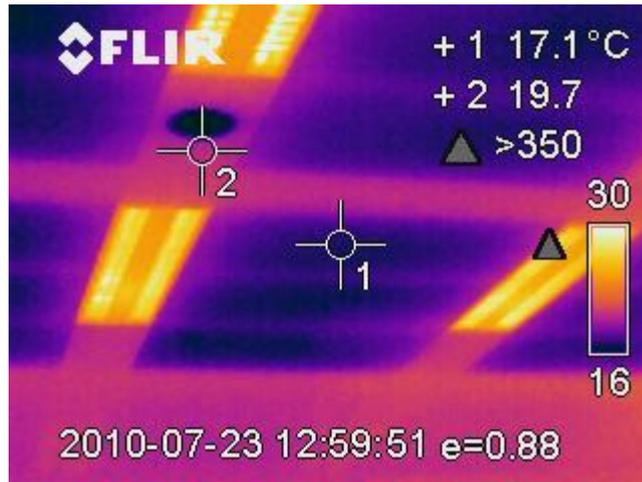
2. RCF 技术的热工分析

2.1 RCF 技术的测试分析

香港机场第一个 RCF 技术的应用引起香港业界关注，国泰航空请了著名的顾问公司 AEM 对该技术进行了测定，AEM 对系统的壁面温度场、室内空气参数、新风处理参数进行了测试。还连续三天对系统的关停启动做了参数运行记录。测试结果证明 RCF 技术在香港最热最湿的季节不存在结露问题。

RCF 技术的维护结构在夏季运行的内表面温度场和传统空调差异很大，图一是 AEM 公司在 2010 年 7 月 23 日中午对 RCF 技术维护结构做的红外成像 [4]。当时室外干球温度 33.4° C，室内干球温度 23° C，

相对湿度 60%。

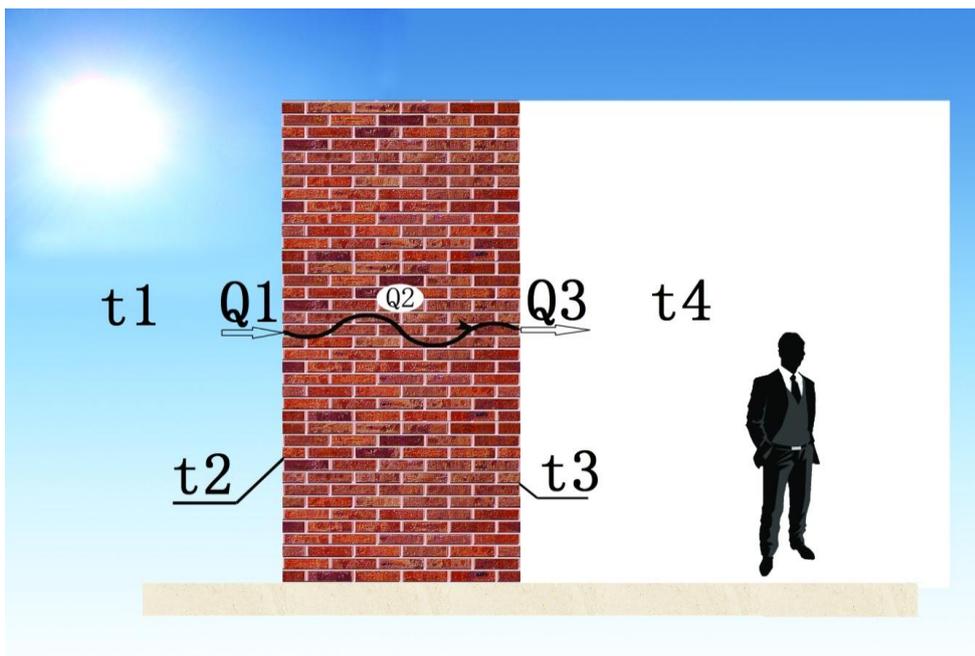


图一 REF 技术运行红外成像图

由红外成像可见，辐射板温度 17.1°C ，外墙内壁面温度 21°C ，RCF 技术的内维护结构表面温度低于室内空气温度！基于这个测试结果和燕通公司以往的实验和项目实践，我们不妨作如下讨论和分析。

2.2 用传统热工的计算分析

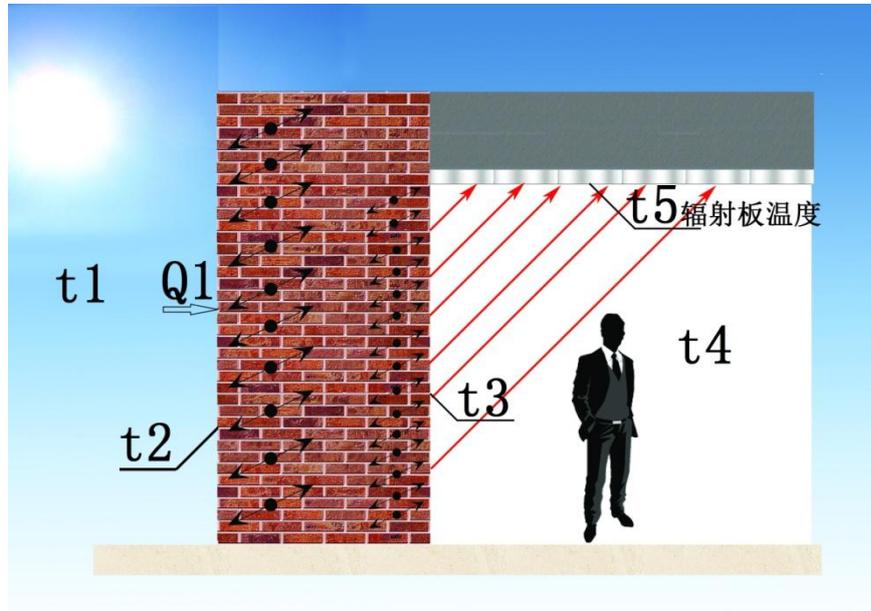
按照传统空调热工计算方法如图二，室外空气温度为 t_1 对外墙的热作用为 Q_1 ，外墙表面温度为 t_2 ，外墙向内墙表面的导热为 Q_2 ，内墙表面温度 t_3 ，内墙壁面通过对流向室内空气的散热为 Q_3 ，室内空气温度为 t_4 。依据连续性方程有 $Q_1 = Q_2 = Q_3$ 。根据傅里叶定律温度梯度是传热的基本条件，传热一定要满足 $t_1 > t_2 > t_3 > t_4$ 。这是我们常规热工计算的理论基础。



图二 维护结构对流换热示意图

2.3 用辐射传热的热工分析

为了分析辐射传热的特点，图一的红外照片可以简化成图三以利分析。由图三可见换热温度场呈现出 $t_1 > t_2 > t_3 < t_4$ ，由于辐射换热的面与面的直接作用，外墙的内表面对辐射板传出辐射热，外墙内表面温度一方面受外墙传热的影响，另一方面受辐射板的吸热影响。显然辐射传热的强度大大强于墙体的导热，这是形成外墙内表面温度 t_3 低于 t_4 的原因。



图三 辐射换热的示意图

室内空气由于在辐射传热过程中被视作“透明”的，辐射板并没有通过辐射换热的方式降低室内空气温度，所以形成了 $t_1 > t_2 > t_3 < t_4$ 现象。退一步即使内墙表面温度等于室内空气温度，也会造成 Q_3 等于 0 的结果。

2.4 辐射系统墙体传热的分析

按照传统传热理论，在外墙温度 t_2 不变的前提下，由于 RCF 系统内墙表面温度 t_3 低于传统空调系统的内墙温度，势必得出 RCF 系统的墙体负荷大于传统空调负荷，RCF 技术是否真正节能值得怀疑。

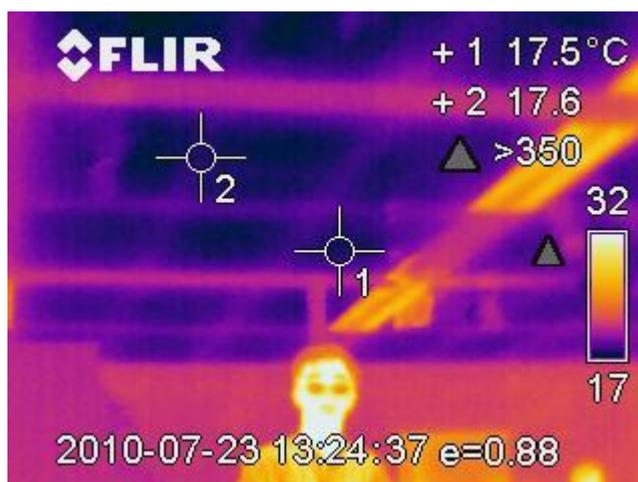
作者认为 RCF 技术的热工分析应在微观传热理论上进行，墙体外侧受太阳和高温空气的作用，墙体的分子框架发生振动（非金属材料），由于温度的升高动能增加。这种振动能量会向墙体内侧传递，宏观表现为使得内墙表面温度升高。而内墙表面的分子框架受到辐射板的冷作用，不断失去动能，当失去动能的量大于得到的动能量时，内墙表面的宏观表现为温度降低。如图三所示，墙体的热能是被辐射板通过辐射传热的方式吸收，由辐射板的制冷系统消除。

以上论述再次证明 RCF 技术的热工计算和传统空调的热工计算完全不同，需要大量的实验来总结。但显然 RCF 技术运行存在 $t_3 = t_4$ 或者 $t_3 < t_4$ 的工况存在，室内表面放热等于 0 或小于 0，基于连续性方程，外墙对内墙的导热也是 0，以傅里叶定律来分析又可以得出外墙负荷为 0 或小于 0 的结果。

这种现象显然不符合能量守恒的规则，实际上维护结构的负荷不可能为 0。内墙的热量通过辐射的方式传递给了辐射板，造成辐射板内的冷水温度升高。RCF 系统的传热和对流空调不同，作者通过以上分析希望进一步证明了 RCF 系统的热工计算不能使用传统的方法。辐射板的传热也和辐射板的结构及性能有关，RCF 技术的辐射板和其他厂家性能差距很大，作者认为，辐射板系统的热工计算方法，只能根据该类型的辐射板做针对性的实验取得，其实验参数只能应用于该类型的辐射板系统设计。

3.RCF 系统负荷和人体舒适度的研究

3.1 辐射房间人体舒适度及传热量的分析

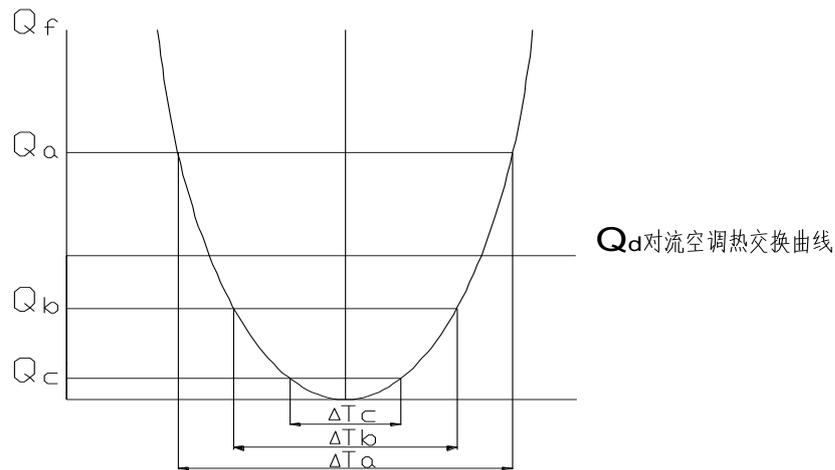


图四 RCF 系统房间和人体的热图像

由图四可见人体头部温度为 32° C，衣着部分为 28° C，除了灯管之外所有的表面温度都低于人体温度。人的头部和辐射天花板有 14.5° C 的温差，身体和天花有 10.5° C 的温差，处在强烈的辐射换热状态。人体具有很冷的温差感觉。从红外照片来看，人体是室内主要负荷，但显然人体的新陈代谢的发热量只有 100W 左右。是个很小的负荷，而发热量较大的灯光由于与辐射天花角系数为 0，几乎不能形成辐射板负荷。而室内各表面和辐射天花之间的温差只有大约 5° C，基于斯蒂芬波兹曼定律，室内各维护结构表面对辐射板的传热量很小。这个热图像也证明 RCF 系统在夏季最热工况运行的负荷很小。这是个实验工况，实际运行时辐射板的水侧的冷量统计也和红外热图像的显示相吻合。正常运行天花温度控制在 20° C 时已经满足青壮年的需求了。

作者据以上的实验和分析做出如下结论，在 RCF 系统人体和辐射板及维护结构存在着较大温差，不管人在室内如何移动，RCF 具有热追踪的特点，人体和环境的换热是充分的。和对流系统相比得到同样的舒适度时能耗降低很多。

3.2 RCF 系统的启动负荷曲线及分析



图五 RCF 系统启动运行曲线

图五是根据系统启动运行时天花板表面温度和维护结构表面平均温度变化和辐射板负荷变化绘制的相关曲线。a 工况是启动状态，此时天花板表面温度为 $293T$ ，维护结构表面平均温度为 $301T$ ， ΔT 为 $8T$ ，此时辐射板负荷为 Q_a ，系统启动后一段时间到达 b 状态，天花板表面温度仍然保持在 $293T$ ，但维护结构平均温度下降到 $298T$ ， ΔT 为 $5T$ ，此时测得辐射板负荷为 Q_b ，系统经过较长时间运行，维护结构温度越来越接近天花板温度时，是 c 状态，辐射板的负荷为 Q_c 。

由曲线可见系统运行初期 a 工况负荷很大，但是内各个维护结构表面温度较高，人体舒适度并不好。运行到 b 工况时，室内舒适度改善，但能耗较 a 工况降低，c 工况是正常运行阶段，由图四可见舒适度最好，辐射板能耗最低。从理论上在理想工况，运行时间无限长，热交换无限充分，将会形成 T_1 等于 T_2 ，此时舒适度最好，但辐射板负荷为 0。这种个实验的条件是室内无人员（静态工况），如果考虑人的因素，人员进入所造成的最大负荷也就是人体的新陈代谢产热量而已。

实验表明，RCF 系统启动负荷最大，在正常运行时负荷会降低很多，系统可以使得辐射板表面温度稳定在一个参数上，随着运行时间的推移，维护结构的表面温度会渐渐向辐射板表面温度靠近，实际运行冷量会越来越来少。选用制冷设备的时候要充分考虑设备的启动能力和分段调节性能。同样负荷的建筑如果启动时间不同，设备安装容量也差距很大。制冷设备的选用要保证低负荷时制冷机不能全部停机。

4. RCF 系统在珠海金湾航空规划馆项目的应用简介

4.1 建筑方案简介

珠海金湾航空城规划馆是珠海航空新城的标志性建筑，主要介绍和展出航空新城的规划、设计和区内的高新科技项目和绿色低碳的远景。建筑面积 6000 平米，建筑内还有近 1600 平米的写字楼。



图六 航空规划馆的正立面



图七 航空规划馆的背立面

图六和图七是建筑的立面图，该建筑外形体现了后现代主义建筑设计的主题思想，充满了现代建筑的立体感。但是由于建筑大量的外围护结构注定该建筑是个空调耗电的大户，给业主追求航空新城“节能低碳”园区的愿望增加了很大的困难。然而，RCF技术的应用使得这仪目标成为可能。

4.2 采用辐射天花和新风技术设计的设计参数

经过 RCF 技术计算该建筑实际制冷装机为 451.5KW，装机指标为 75W/m²！比原设计指标 165W/m² 降低了 55%的装机冷量。而且在该装机容量下可以达到美国 ASHRAE 55-2010 标准：

室内舒适温度（黑球温度）25° C 相对湿度 60% CO₂ 浓度低于 800PPM 以下。

4.3 主机安装参数

实际装机两台制冷量为 193.5KW（电功率 52.8KW），一台制冷量为 64.5KW（电功率 17.6KW）的风冷热泵，如图八。



图八 主机安装实景



图九，展厅前台



图十 高大空间展示厅



图十一 多媒体展厅



图十二 会议室

4.4 室内运行工况:

室内辐射板温度 17.5°C ，内墙温度 22°C ，相对湿度 $58\sim 65\%$ ，室内 CO_2 浓度 $500\sim 750\text{PPM}$ 之间，室内没有吹风感，没有空调噪声。图九到图十二是室内运行实景，该建筑正在申报中国绿色三星的认证。

5. RCF 技术应用总结

RCF 技术的核心是主要用辐射换热代替传统空调的对流换热来调节人体舒适度，利用新风除湿和排出 CO_2 保证空气品质。

研究成果证明采用不同的换热方式，达到同样舒适度的能源代价是不同的。

辐射板系统在欧洲已经应用多年，是个非常好的开始。但是，欧洲技术在热湿天气使用发生了冷辐射板结露的弊病，系统难以正常运行。针对结露的产生和消除，欧洲技术采用的是提高水温，但是提高水温后，使得辐射板辐射强度降低，达不到舒适度要求，不得不使用冷梁来补充。但仍然没有彻底解决冷板结露的问题。很多学者仍然使用对流换热的方法在研究辐射板技术，使得该技术没有取得突破性的发展。

作者历经超过十年的研究和实验，开发出板面温度场均匀，辐射强度高的辐射板及 RCF 系统。该技术在写字楼、商场、中西餐、机场、制药行业和展馆建筑都取得了成功。用户证明和传统空调相比节省 40% 以上的能耗。RCF 技术完全解决了冷工况凝露问题，为人类环境舒适度技术开创了一个新的领域。鉴于世界范围内的能源和污染问题，该研究无疑开始了一个新的和好的尝试。

热舒适系统辐射传热机理的研究几十年以来较少人涉及，希望我们同行对此技术开展讨论，使其更加完善。建筑舒适度技术及节能是个巨大的课题，我们应当承担起为人类创造舒适、和谐和安全的空气环境的社会责任，为节能减排做出贡献！

我们的使命是：用最少的能源，创造更好的舒适度。把地球资源留给我们的子孙后代！

严继光 男 暖通高级工程师 1949 年 8 月

潘雪丹 女 暖通高级工程师 1963 年 2 月地址：香港 科技园科技大道西 11 号生物科技中心二期 2 座 313~315

邮箱：master@yantong.cn

参 考 文 献：

- [1][2] 章熙民、任泽霏等编《传热学》，高等教育出版社，北京 1993
- [3] 吴强、郭光灿编，《光学》，中国科学技术大学出版社，合肥，1996，
- [4] *AEMCathay Pacific Airways Cargo Terminal H K Airport*