

面向电网削峰的商业楼宇空调负荷调控实证研究

叶剑斌, 黄堃, 刘琼, 李天阳

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏南京 210061)

摘要:伴随各类空调的广泛应用, 空调负荷快速增长, 已占夏季尖峰负荷的30%以上, 电网峰谷差进一步拉大, 加剧了电网高峰负荷供应缺口, 影响电网的安全稳定运行。基于商业楼宇空调负荷具有较大可控性, 开展了面向电网削峰的商业楼宇空调负荷调控实证研究, 验证商业楼宇空调负荷调控技术实现电网削峰的可行性及其效果, 为规模化推广空调负荷调控储备必要的技术和经验。

关键词: 电网削峰; 商业楼宇; 空调负荷调控

中图分类号: TM925

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0030-05

伴随国民生活水平的不断提高, 各类空调得到了广泛应用, 一些大中城市和经济发达省份的空调负荷已占到夏季尖峰负荷的30%以上, 某些地区甚至超过40%^[1], 且电网高峰负荷集中出现在夏季的数百小时内。受空调负荷影响, 各电网用电负荷迅速增长, 峰谷差进一步拉大。同时, 受电力需求持续快速增长、水电减发等因素的影响, 华东、华中及南方等大部分省市电力供应偏紧, 部分省份电力供应缺口达25%以上^[2], 极大影响电网的安全稳定运行。若单纯依靠增加装机容量^[3]和输配电装备, 需要付出巨大的投资, 且造成发电和输配电环节设备利用效率低下^[4], 资源浪费严重。据统计, 在夏季电网负荷高峰时段, 商业楼宇空调负荷约占电网总负荷的12%, 有效削减商业楼宇空调负荷能够发挥电网削峰作用。由于绝大部分商业楼宇空调在设计和选型时都是依据最大承受原则, 而实际应用过程中因为缺乏专业的空调运行管理知识和制度, 导致空调输出量远大于实际需求, 因此商业楼宇空调负荷具有较大的可控性。通过精细化控制, 商业楼宇空调负荷在高峰的短时间内(2 h)普遍可以取得削峰5%~10%的效果, 部分甚至可以达到10%~15%。文献[1, 3, 5, 6]基于空调及电网负荷特性提出了空调负荷调控的相关措施及建议, 但在商业楼宇空调负荷调控结合电网削峰的实证化研究方面, 还未见有相关文献报道。依托国家发展与改革委员会“关于委托开展居民和商业用户空调负荷调控课题研究”的文件, 国家电网公司2012年开展了科技项目“智能用电实证研究”, 旨在验证商业楼宇空调负荷调控技术实现电网削峰的可行性及其效果, 为今后规模化推广空调负荷调控储备必要的技术和经验。

1 实证楼宇选取

影响商业楼宇空调使用的主要因素包括:(1) 天

气状况;(2) 经济水平;(3) 地域气候习惯, 其中天气状况是最为紧密最为直接的因素。

我国华东、华中与华北区域电网由于其地域原因, 天气表征虽存在较大差别, 但在夏季天气炎热时期, 商业楼宇空调负荷占电网负荷比例大方面具有相同性, 从这三大区域分别选取实证楼宇具有很好的地域代表性, 便于将来研究成果的推广应用。有关统计表明, 第三产业经济水平也是影响商业楼宇空调使用的重要因素, 经济水平越高, 空调使用程度越高, 对地区电网高峰负荷的影响也就越大。这三大区域各自经济中心省级市的电网峰谷差明显, 从中选取实证楼宇更利于研究商业楼宇空调负荷调控对电网削峰的支撑效果。

空调负荷调控实证涉及智能用电、计算机、通信、暖通等多个领域, 依托国家电网公司先前试点建设的智能楼宇工程, 利用楼宇已有的硬件和软件基础, 能够快速经济地构建实证研究所需的软硬件环境。因此, 最终选取上述3个地域中不同类型的商业楼宇作为实证楼宇, 下文以重庆市电力公司新生产大楼为例进行具体介绍。

2 实证方案

2.1 软硬件建设

重庆市电力公司新生产大楼是国家电网公司智能楼宇试点之一, 大楼地面共9层, 为南北区对称结构, 采用风冷式中央空调系统, 有5台345 kW空调主机和5台37 kW循环水泵, 17台新风机组, 约750个风机盘管, 先期已建成智能楼宇能效管理系统, 实现了楼宇用能分项计量, 室外环境数据采集以及空调系统部分远程控制功能, 如新风机组、空调主机和循环水泵启停, 水泵变频, 空调主机出水温度调节等。由于大楼空调系统已经正式投入使用2年多, 从稳定运行需要出发, 兼顾空调负荷调控实证研究的环境需求, 设计如下建设方案。

(1) 硬件。包括:(a) 更换新风水阀执行器,铺设与新风机组直接数字控制(DDC)系统之间的交互电缆,实现新风水阀开度的远程平滑调节;(b) 增加新风机组回风温/湿度传感器以及与新风机组 DDC 系统的通信线缆,实现新风状态数据的实时监测,从而动态调节新风机组的运行参数,保证新风机组运行工况满足实际需要;(c) 在每楼层的南北区分别选取若干具有典型环境代表性的房间及走廊,安装 zigbee 通信方式的温度传感器,实现室内环境的实时动态跟踪;(d) 在大楼监控机房安装实证服务器、工作站、交换机及物理防火墙等,建设与智能楼宇能效管理系统前置服务器、zigbee 集中器的通信通道,开通互联网服务。整个实证环境的硬件架构如图 1 所示。

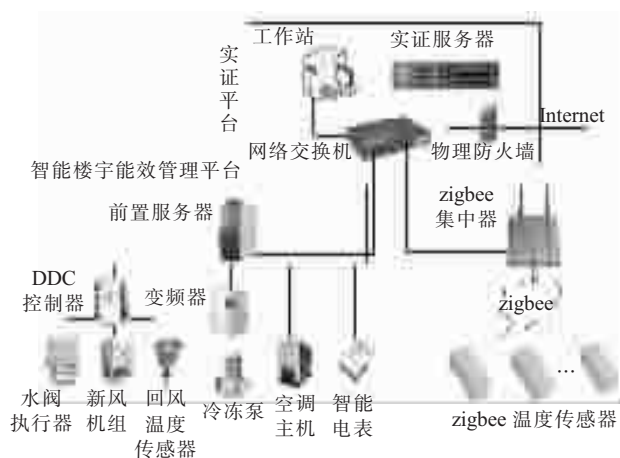


图 1 实证硬件架构

(2) 软件。研发商业楼宇空调负荷调控实证软件系统(后简称实证系统),并模块化配置到实证服务和工作站。设计 4 个服务功能模块:数据接口、智能用电、需求响应和效果评估,其中数据接口实现实证系统与智能楼宇能效管理系统、zigbee 集中器的信息交互;智能用电由用电监测、策略管理和数据分析等子模块构成,是需求响应服务的基础;需求响应包括策略生成和优化协调,是实证系统的核心,决定空调负荷调控执行效果的优劣;效果评估服务由数据统计、数据查询、基线负荷预测、削峰评价等组成,为空调负荷调控提供效果的后分析评估和展示发布。图 2 显示了实证系统的软件架构。

扩展智能楼宇能效管理系统功能,如新风水阀执行器控制、新风机组运行参数设置以及回风温/湿度传感器数据采集等,借助通信接口在实证系统间接实现这些功能。

2.2 调控策略

结合重庆当地电网负荷特性、天气特点、过去 3 年天气资料以及大楼的实际情况,拟定从 2012 年 7~9 月份选择 25 个气温炎热(气温要求在 32℃及以上)的工作日,在 13:00~15:00 电网负荷高峰时段开展空调

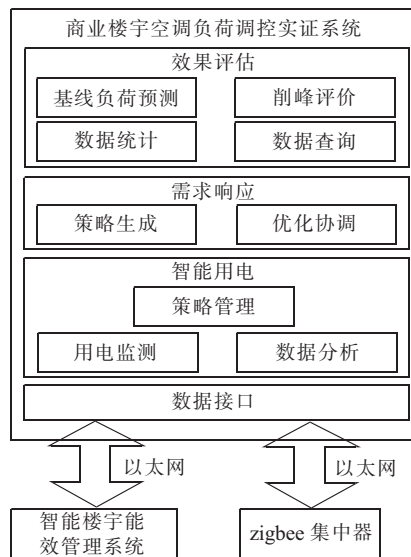


图 2 实证软件架构

负荷调控,具体策略计划见表 1。

表 1 实证策略计划

序号	策略	次数
1	全局温度控制	3
2	提前制冷	2
3	关停新风机组	1
4	关停风机盘管	1
5	调节水阀开度	2
6	调节空调主机出水温度	3
7	冷冻泵变频	3
8	减少运行空调主机数目	2
9	关停新风机组+冷冻泵变频	3
10	关停新风机组+减少运行空调主机数目	2
11	调节水阀开度+减少运行空调主机数目	3

2.3 调控效果评价体系

2.3.1 指标体系的框架设计

实证调控效果综合评价指标体系影响因素众多,不仅包括定性指标,而且包括定量指标。采用层次分析法对实证调控效果综合评估指标体系进行分级、分层次,进而形成有序的层次结构模型。对综合评价体系指标关键因素进行梳理,分析层次模型中状态因素、评判集和权重系数等关键参数,对实证策略调控效果形成合理、有效的综合评价。

实证调控效果包含电能信息指标、经济指标、管理指标和环境指标等诸多因素,根据上述评价指标体系构建方法,建立实证调控效果综合评估指标体系框架,如图 3 所示。

2.3.2 指标体系的量化评估

选用模糊综合评估来求解体系,其基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评

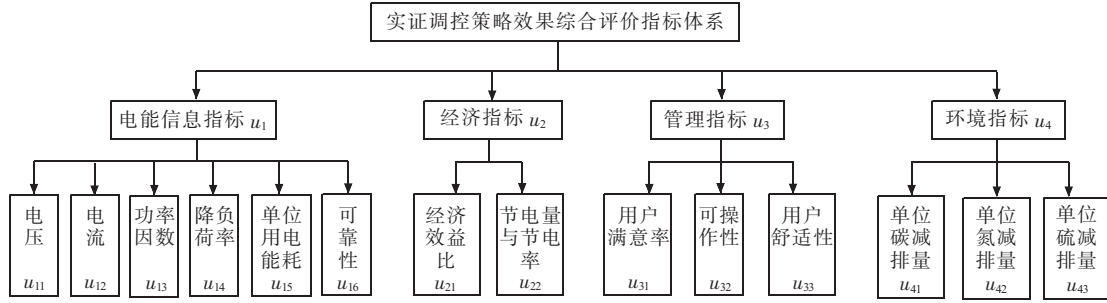


图3 实证调控效果综合评估指标体系框架

价目标相关的各个因素^[7]。先从最低级层次的各个因素进行综合评价,再依次向上,直到最高的目标层,进而得出最终评价结果,其基本步骤如图4所示。

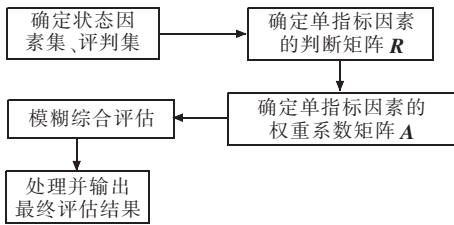


图4 调控效果评估流程

(1) 确定状态因素集。设 U 为包含所有评判因素的因素集,将 U 中的因素按照某一准则分组,性质相近的因素分在一组,设 U 中的因素分为 l 组,即其中: U 为高层因素集, $U_i (i=1, 2, \dots, l)$ 为低层因素集。

将调控效果评估指标体系分为2层,如图3所示,则综合评判因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$,最底层的单因素集分别为:

$$\begin{cases} U_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}\} \\ U_2 = \{u_{21}, u_{22}\} \\ U_3 = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}\} \\ U_4 = \{u_{41}, u_{42}, u_{43}\} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 设置评判集及权重系数。设 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 表示评判集,它对任一层、任一因素的评判都适用。另假设 $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$ 为 U_i 中各因素相对 V 的权重系数集,且满足 $a_{i1} + a_{i2} + \dots + a_{im} = 1, a_{im}$ 根据 U_i 中各因素的重要程度分配。同理,对于高层因素集,可设 $A = (a_1, a_2, \dots, a_l)$ 为 U 中各因素相对 V 的权重系数集,且满足 $a_1 + a_2 + \dots + a_l = 1, a_{l1}$ 根据 U 中各因素的重要程度分配。

将调控效果由高到低分为4级:红、橙、黄、蓝。各等级表示的状态情况大致如下。

(a) 红色。表示整体的调控水平很低,可实施的程度低。

(b) 橙色。表示整体调控水平低,可实施程度水平

中等。

(c) 黄色。表示整体的调控水平中等,可实施水平中等。

(d) 蓝色。表示整体调控水平良好,可实施水平较高,用户满意度高。

故评判集可表示为: {红,橙,黄,蓝}。

(3) 综合评判矩阵的求取。通过各单因素模糊评价获得模糊综合评判矩阵:

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{in} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{im1} & r_{im2} & \dots & r_{imn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: r_{ij} 表示对 u_i 的评价中,评判等级 $v_j (j=1, 2, \dots, m)$

所占份额,即 $r_{ij} = f_{ij} / \sum_{j=1}^n f_{ij}$,式中 f_{ij} 为第 i 个因素被评为第 j 个评判等级 v_j 的总次数。利用复合运算求出对子因素集 U_i 的综合评判结果:

$$\begin{cases} B_i = A_i \cdot R_i = [b_{i1} \ b_{i2} \ \dots \ b_{im}] \\ b_{ij} = \sum_{k=1}^n (a_{ik} r_{kj}) \quad 1 \leq j \leq m \end{cases} \quad (3)$$

下一步对高层因素集进行评判,即对评判空间 (U, V, R) 进行综合评判,对于因素集 U 的单因素评判矩阵 R 则由较低层次的综合评判输出 B_i 构成:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ \vdots \\ A_l \cdot R_l \end{bmatrix}_{l \times m} \quad (4)$$

对于因素集 U 的最后综合评判结果为:

$$B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (5)$$

以上是二级评判模型,更多层次评判模型的建立方法与二级模型类似。

(4) 评估指标敏感性分析。在调控效果综合指标评价下,某策略属于第 $l (1, \dots, 4)$ 类能效色的隶属度表示为:

$$a_l \left(\sum_{i=1}^i \sum_{k=1}^n a_{ik} r_{kl} \right) = a_l \left(\sum_{k=1}^n a_{1k} r_{kl} + \sum_{k=2}^n a_{2k} r_{kl} + \sum_{k=3}^n a_{3k} r_{kl} + \sum_{k=4}^n a_{4k} r_{kl} \right) \quad (k \in n) \quad (6)$$

若保持权重指标不变,调整 Δr_{kl} ,那么属于第 $l(1, \dots, 4)$ 类效果色的隶属度为:

$$a_l \left(\sum_{i=1}^i \sum_{k=1}^n a_{ik} r_{kl}' \right) = a_l \left(\sum_{k=1}^n a_{1k} r_{kl}' + \sum_{k=2}^n a_{2k} r_{kl}' + \sum_{k=3}^n a_{3k} r_{kl}' + \sum_{k=4}^n a_{4k} r_{kl}' \right) \quad (k \in n) \quad (7)$$

其敏感度为:

$$\partial u_{ij} = \frac{a_l' \left(\sum_{i=1}^i \sum_{k=1}^n a_{ik} r_{kl}' \right) - a_l \left(\sum_{i=1}^i \sum_{k=1}^n a_{ik} r_{kl} \right)}{\Delta r_{kl}} \quad (8)$$

结合实证策略的应用场景和能效指标体系,电能信息指标是最重要的调控指标,可以直观反映调控综合水平,但是若对用户影响较大,即使调控水平很高也不具备推广性和可行性,故管理指标也是整体调控效果的重要衡量指标,而经济指标和环境指标属于整体调控水平提升的附属效益。因此,4个二级指标的重要性排序依次为电能信息指标、管理指标、经济指标和环境指标。

3 实证实施

3.1 实证试验

夏季期间,大楼空调系统在电网高峰负荷时段正常运行状况为开启3台空调主机、3台循环水泵以及全部新风机组。实证共进行空调负荷调控试验26次,其中7月份8次,8月份12次,9月份6次,采用了11种调控策略,其中“关闭风机盘管”策略由人工操控风机盘管电源开关实现。同时,为实现调控效果的分析评估,实证系统不间断采集了7~9月份的所有相关数据,包括空调主机、循环水泵、新风机组等的负荷和运行状态,以及楼宇内外部环境。

另外,同步开展大楼用户的走访调查,了解调控对用户感觉的影响。结果显示,空调负荷调控对用户感觉基本没有什么影响,只出现过一次用户投诉反馈,当日调控策略是“关停风机盘管”。

3.2 实证分析

对大楼调控试验数据和用户走访调查进行综合分析,得出以下结论:

(1) 商业楼宇空调负荷调控削峰效果显著,基本不影响用户舒适度。在7~9月份调控时间段内,平均削减空调负荷255.19kW,占调控前空调总负荷21.68%。以2012年8月1日为例,当天实施了“全局温度控制”策略,在13:00~15:00时间段内,室内平均温度上升

约0.87℃(当时室外平均温度33.6℃),单个室内温度最高达到26.1℃,对人体舒适度基本没有影响,但是空调负荷削减比例达到34.38%,空调负荷与室内平均温度对比曲线如上图5所示。

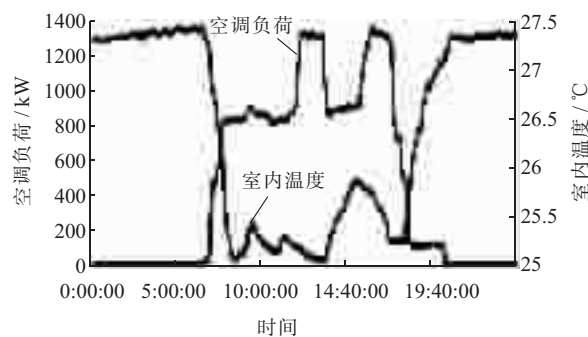


图5 2012年8月1日空调负荷与室内温度对比曲线

(2) 商业楼宇空调负荷调控技术手段多样,部分具有较好实用推广性。大楼共使用了包括控制空调主机、新风机组、循环水泵、风机盘管等11种调控策略,每种调控策略的调控效果不尽相同,效果如表2所示。

表2 空调负荷调控效果

序号	策略	次数	平均降负荷率/%	室内温度平均升高/℃	用户感觉
1	全局温度控制	3	36.13	0.83	基本无
2	提前制冷	2	31.65	0.67	基本无
3	关停新风机组	1	6.59	0.03	无
4	关停风机盘	1	8.42	1.23	有
5	调节水阀开度	2	6.20	0.07	无
6	调节空调主机出水温	3	7.73	0.32	基本无
7	冷冻泵变频	3	8.24	0.26	基本无
8	减少运行空调主机数目	2	24.04	0.77	基本无
9	关停新风机组+冷冻泵变频	3	13.69	0.27	基本无
10	关停新风机组+减少运行空调主机数目	3	25.31	0.77	基本无
11	调节水阀开度+减少运行空调主机数目	3	27.41	0.79	基本无

结合表中数据,依据负荷削减率和用户感觉,并根据调控效果综合评价指标体系对上述11种策略进行分析计算得出,全局温度控制、减少运行主机数量等调控策略的整体调控效果综合评价合格率均大于60%,具有良好的推广前景;关闭风机盘管策略调控评价合格率低,不适宜推广。

(a) 全局温度控制。该策略充分利用了空调系统各组成部分的性能,对水泵、新风机组、空调主机等执行组合控制,实现多元、多方位综合调节,能大幅降低空调负荷,同时利用量测体系,形成回馈机制,减少对室内环境温度的影响。该策略要求空调系统远程控制

手段较为全面,伴随空调系统自动控制技术的广泛普及应用,具有良好的推广前景。

(b) 减少运行主机数量及其相关策略。商业楼宇空调系统在设计和选型时普遍都留有较大的裕量,大部分时间都处于低载运行,即使这样,运行空调的输出量往往也远大于实际需要。在满足楼宇实际需求的前提下,可以短时间内关停其中部分运行主机,借助楼宇自身的保温体系,维持楼宇的冷负荷输出,从而有效降低空调负荷。因此该策略也具有很好的推广性。

(c) 关闭风机盘管。该策略阻断了室内冷负荷的输入通道,影响室内冷热负荷的有效交换,致使室内温度上升过快,用户感觉明显不适;同时在空调主机制冷量不变的情况下,单纯的关闭风机盘管,对主机制冷负荷的降低影响效果较小,同时还造成一定程度上的能源浪费。因此不具备推广价值。

4 结束语

通过对重庆市电力公司新生产大楼的空调负荷调控实证研究,验证了商业楼宇空调负荷调控在技术上的可行性,并且能够充分发挥对电网削峰的支撑作用,已具备规模化推广的基础技术条件。下一步需要针对区域性离散商业楼宇群的空调负荷调控进行深入研究,以实现电网的有序削峰。

参考文献:

- [1] 张志强. 基于电网侧的空调负荷特性分析及其调控措施研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
- [2] 赵建华. 煤价上涨过快,中国将进行临时价格干预. 中国新闻网,2011-11-30.<http://www.chinanews.com/ny/2011/11-30/3498776.shtml>.
- [3] 华 瑶,惠 璟,张炜炜. 夏季空调负荷分析及调控措施研究[J]. 工业技术经济,2009,28(10):121-123.
- [4] 李啸宇,谈金晶,王蓓蓓. 智能园区需求响应项目实施效益研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(4):20-23.
- [5] 吕迎春. 重庆地区夏季空调负荷分析及调控措施建议[J]. 科学咨询,2007(12):15-16.
- [6] 李东梅,李敬如,赵 静,等. 北京空调负荷结构及调控措施研究[J]. 电力技术经济,2005,17(6):30-32.
- [7] 吴剑飞,姚建刚,陈华林,等. 电力客户能效状态模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(13):94-98.

作者简介:

- 叶剑斌(1977),男,湖北红安人,硕士,高级工程师,从事智能用电方面的研究;
- 黄 堃(1986),男,江苏南京人,硕士,工程师,从事节能方面的研究;
- 刘 琼(1986),女,江苏连云港,助理工程师,从事节能方面的研究;
- 李天阳(1978),男,江苏南京人,工程师,从事智能用电方面的研究。

Empirical Study on Air-conditioning Load Regulation of Commercial Building for Power Grid Peak Clipping

YE Jianbin, HUANG Kun, LIU Qiong, LI Tianyang

(NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210061, China)

Abstract: With wide application of various types of air-conditioning, air-conditioning load has fast grown and up to more than 30% of the summer peak load. It contributes to peak valley difference of grid and aggravated supply gap in the period of peak load, which resulted in safety and stability issues to power grid's operation. In considering that air-conditioning load in commercial building is flexible and controllable, an empirical study on air-conditioning load regulation in commercial building for power grid peak clipping is carried out. The study results verifies that it is effective to employ air-conditioning load regulation to clip power grid peak load. Moreover the necessary technology and experience for large-scale promotion of air-conditioning load regulation is accumulated.

Key words: power grid peak clipping; commercial building; air-conditioning load regulation

广 告 索 引

江苏华电戚墅堰发电有限公司	封一	《江苏电机工程》协办单位	前插 4
远东电缆有限公司	封二	南京苏逸实业有限公司	(黑白) 文前
南京南瑞继保电气有限公司	前插 1	江苏南瑞帕威尔电气有限公司	封三
《江苏电机工程》协办单位	前插 2、3	南瑞科技股份有限公司	封四