

一、引言

智能楼宇最近频繁的出现人们交谈的词汇中。人类的能源消耗，楼宇占比 40%，而在香港等城市，楼宇所占能源消耗的比例更大。2014 年香港仅空调的电费就达 123 亿港元。如何节能减排是楼宇研究成为热点的初始原因。但是楼宇的意义不仅如此，人类 80%的工作和生活都在楼宇中度过，楼宇的智能化甚至时尚化对于提高人们的工作效率和生活舒适度有重要意义。智能楼宇也是智慧城市的重要组成部分，人们在楼宇中生活工作习惯会进而影响到城市的其他领域。楼宇又是大量先进工业产品的使用方，楼宇的智能化引领着工业产品的制造、运行、维护，关系着工业制造 2025。因此智能楼宇在这一波能源革命，城市社会生活变革和工业革命中占据重要地位。

智能楼宇有很多定义，有人用智能楼宇指代智能家居，属于广义的智能楼宇的一部分。但是本文更注重从整楼角度看待楼宇系统。有人则浪漫的认为未来智能楼宇是一个有机体，可以自发的学习、适应和服务。笔者认为新的计算机技术发展，和人们新的需求在短时间内大量碰撞，带来的楼宇能力在短时间内和上一代楼宇形成代差。而这种代差的感觉经常会使人们无法找到合适的描述词汇，就简单的用智能两字去和上一代做区分吧。

有鉴于此，本文分成两个部分，第一部分我们讨论智能楼宇中产生的新兴需求，包含节能减排，人类习惯、智慧城市和工业制造 2025。第二部分我们讨论计算机技术发展给智能楼宇带来的支持，以及智能楼宇对计算机技术的进一步发展提出的挑战。

二、智能楼宇的新兴需求

1. 节能减排

楼宇是一个复杂系统，楼宇能耗优化是一个长久的问题。近年来楼宇新功能大幅增加，太阳能板等新型微电力供给系统，电池、蓄水箱等新型电能存储系统，大幅提高了楼宇的灵活性，产生了一系列新的优化问题。随着智能电网的开展，越来越多的可再生能源的使用，使得电力供给方的稳定性大大下降，这使得楼宇作为重要的电力需求方应该能够有更大的适应功能。美国劳伦斯伯克利 2014 年的报告提到，美国所有新建的 10 万平方英尺以上的楼宇都需要有在规定的时间内改变能耗 15%的能力。不少研究者以智能电网为研究主体，在优化中对楼宇做一些简化假设，比如楼宇用电可以简单增减。但楼宇非常复杂，因此香港理工大学王盛卫教授提出可灵活面对智能电网的智能楼宇(Smart Grid Friendly Smart Building)的概念，以楼宇为研究主体，研究如何进行楼宇控制，更加灵活的面对智能电网电力供应的变化。

从电网角度看，楼宇是需求方；从人们活动角度看，楼宇则是供给方。人们的活动是楼宇的一个重大变量，因此对人类能耗的各层次建模成为重要问题。在较宏观层面，研究者们对一个空间区域建立了热力学模型，包含这块空间的隔绝材料性质、空间内外温度和使用空间的人数。随着传感器网络的出现，笔者等计算机研究者发现可以更加细粒度的获取时空的各种特性，来校准之前的热力学模型。人们在楼宇中使用电器的情况也是一个长久的研究领域。特别是从用电负荷的变化中无干扰的识别电器使用情况(non-intrusive load monitoring, NILM)。随着数据量的增加和机器学习的进展，计算机研究者们提出了一批更精准的算法。

2. 人类习惯与智慧城市

人和楼宇的关系远远不仅是能耗问题。作为楼宇管理人员，最在意的是为人们提供更优质的服务。楼宇资源优化也应该以此为基础，否则难以被采纳。以与能耗最相关的热舒适度为例，现代高端写字楼的温度都由楼宇主动控制，如何进行温度设置以满足人们需要是一个基础问题。从上世纪 70 年代开始，研究者希望计算一个“平均人”来代表人类，并用这个平均人的舒适度作为温度设置标准。研究者们从生理学和心理学两方面建立了大量的模型，从科学上解释了一系列影响人类舒适度的因素。如从生理学来说，Fanger 提出了热平衡模型，也即如果一个人的热产生小于他的热散失，他就会觉得冷，反之则会觉得热。研究者们以此为基础进而分别为热产生，热散失的各种因素建立模型。这些模型为楼宇温度设置提供了标准，但是这些模型复杂，温度设置恒定，在现代楼宇中越来越难以满足人们需求。2015 年哥伦比亚广播公司专门报道了楼宇管理员趋向于采用保守设置，浪费资源的同时也使很多人并不满意，尤其对现代女性工作者不利。计算机的发展使得建立个性化舒适度模型成为可能。笔者在 2014 年首次提出了结合生理学模型和数据矫正方法建立的热舒适度模型，并设计系统进行主动的温度调节，取得良好效果。产业化方面，Google 的 Nest 产品专注于学习区域温度需求，以此来减少保守设置带来的浪费。除了舒适度以外，大楼面临很多新的需求。如在安全方面，楼宇会期望更自动的识别人的身份；在时尚型功能上面，大楼期望灯光可以随着时空情景甚至人的心情的转变而自动调节。在竞争中，高端写字楼、酒店为了这些功能并不在惜资源和代价。

楼宇中人的行为可以进而影响城市的其他领域。笔者研究了楼宇中人的数量和楼宇附近道路的车速之间的关系，发现在上下班时段有很强的相关性。本质上，如果能够对人流有更早的把握，就可以对车流有更好的预测。我们建立了一个数据驱动的学习模型，使用香港国际贸易中心大楼的二氧化碳的数据来预测大楼里面的人数变化，进而对人数和大楼附近连接香港岛和九龙半岛的西区海底隧道的车速进行了数据融合。我们发现经过学习，仅用楼宇的数据，就可以准确的预测车速。加入楼宇可以使得长久研究的人的移动模型向三维扩展，让分钟级的移动模型更加准确，为城市中应用，如移动通信里面的信道的动态资源分配等提供基础。

3. 工业制造 2025

楼宇中大量使用工业设备，如何了解和优化这些设备的使用，是工业制造 2025 的关键一环。以维护为例，生产商会对自己的设备进行按时维护。维护的间隔根据设备磨损的先验模型或者先验知识进行。虽然这些先验模型可以在实验室中进行大量检验，但是设备是为人服务的，设备如何被使用在不同楼宇中各异，在生产阶段无法准确了解。如空调中的氟利昂的消耗和使用强度相关，先验模型一般设计保守，浪费巨大。再以运行为例，设备的实际运行和能达到的最优系统差距更远。比如中央空调系统一般由若干个离心冷水机组组成，中央空调在面对一个冷负荷(cooling load)需求时，以何种模式运行这些离心机组(chiller sequencing)，使得空调能够支持冷负荷需求并且最优化总电量是一个经典的问题。每个离心机在一定电量输入下可以产生一定的冷负荷，也即此离心机的性能。而每个离心机的性能和现场装配、老化程度和使用环境相关。笔者发现如果可以通过相互学习对每个离心机组做画像，则可以更准确的预测离心机的当前性能，进而大大优化中央空调的运行。

三、智能楼宇中的计算机研究

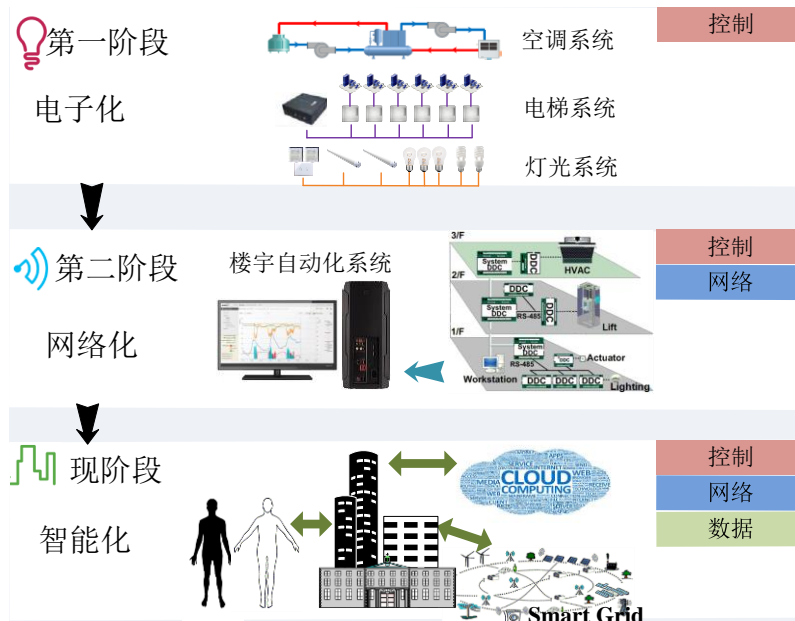


图 1

智能楼宇中有大量的优化问题可以研究，计算机研究者们也善于设计新的应用。笔者认为更紧迫问题为，下一代楼宇的信息架构并没有研究清楚，如谁来获取数据、计算、控制；如何获取数据、计算、控制。楼宇的架构历经两代转变（参见图 1）。在第一阶段，随着电子技术发展和楼宇设备复杂化，楼宇设备从机械手工控制向电子控制转变。不过这个时候楼宇中工业设备都是单独控制，如独立的空调系统和独立的电梯系统。在第二阶段，随着互联网技术发展和楼宇设备的协作，逐渐出现了专门的楼宇自动控制系统（Building Automation Systems）来管理不同公司的设备。这些系统已经广泛使用互联网技术和理念，如使用以太网进行设备的连接，规定标准协议（BACnet）。楼宇架构目前进入第三个阶段，随着物联网、云计算和数据学习的发展，和楼宇面对更多的应用需求，希望能够更方便的进行楼宇和人交互，不同楼宇的设备交互，楼宇和外界（如智能电网，交通系统）交互。现有的楼宇控制系统远远不能达到要求，美国国家标准技术研究所(NIST)统计美国楼宇产业因为标准不同进行转换所付出的代价每年达 158 亿美元。

1. 软件定义楼宇

对于单幢楼宇，伯克利提出软件定义楼宇概念，对楼宇数据和物理资源进行抽象，和楼宇应用进行分离。其中最早的工作 sMap 对不同设备的数据进行了统一的设计，并设计了数据查询方法。在 sMap 基础之上设计了楼宇操作系统 BOSS。BOSS 进一步统一了历史数据和实时数据，还通过事务处理设计了对设备并发访问的冲突处理机制，授权机制。最新的 Brick 对楼宇设备之间的层次等级进行了定义，还开发了楼宇设备的词库，包含了 90%的设备命名。当然，软件定义有很多层面，笔者认为对相同设备也有抽象的价值，比如软件定义空调系统。

2. 面向智能楼宇的新型网络系统与边缘计算

软件定义楼宇是从一个楼的视角来看待问题。如果从一个设备生产商的角度来看待问题进行智能运维，则需要把这个生产商把自己在不同的楼宇设备的数据传输到云进行运算。表面上楼宇中网络众多数据传输看似简单，实则不然。如果数据传输借用楼宇管理系统 BAS，或者楼宇中其他网络(如 Wi-Fi)，则需要此设备生产商和不同楼宇逐一谈判，来获得网络使用权。从单幢楼宇角度，楼宇管理员要面对几十个设备生产商，如果对每个设备生产商都给出权限，楼宇管

理员要背负很大责任。本质上，智能运维这张网应该和楼宇 BAS 这张网和楼宇中的 Wi-Fi 等网络是不同的网络。智能运维网络目前尚未存在。

网络运营商看到了这块的需求，提出了窄带物联网（NB-IoT），使用蜂窝网的资源，以较低的价格提供较小的流量较低的速率的服务。LoRa 作为新一代无线通信方式，则可以通过购买 LoRa 设备，以很低的速率免费通信。在这些基础设施之上，如何设计工业设备智能运维网目前并没有定论。笔者做了一些初始工作，我们发现，IoT 设备需求的异构性极大，而网络运营商不可能提供大量异构的 NB-IoT 选择。我们提出并设计了一个物联网信道共享架构 Sharing Tube (sTube)，可以大大降低通信费用。

当然工业智能运维是否需要把所有数据都传输到云上进行运算也无定论。比如楼宇设备的运行优化，比维护更加频繁需要数据，通信需求更大，但笔者发现其实不需要从所有设备上进行学习，就可取得不错的效果。如何结合目前正在兴起的边缘计算进行设计，应该是未来的研究方向。

3. 面向智能楼宇的感知系统

对人的精确的感知也是计算机可以在楼宇中大展身手的研究方向。如研究一个空间内是否有人，人的数量，进而人的行为，和人对环境和舒适度的喜好。楼宇中的特殊性体现在除经常使用的手机所携带的传感器进行感知外，还可以使用楼宇结构的特性进行感知。这个思想在数百年前日本“莺声地板”的设计就有体现。笔者游览京都二条城时，走在地板上会听到黄莺鸣叫般的声响。这声音来自地板下嵌入钉子和地板在人走动时的摩擦。当然这个设计最初目的其实是幕府统治者为了得知刺客进入的报警机关。随着传感器的发展，现在结构的微小震动都可以被感知，进而因为每个人走路产生的震动都不一样，做成签名，为一系列的安全问题提供解决方案。

四、结束语

楼宇沈沈智几重，形有尽而意无穷。智能楼宇既享受着计算机发展带来的新技术，又为计算机进一步发展提供新的场景。作为计算机研究者，我们愿意相信智能楼宇的发展和智能手表，智能汽车一样，计算机技术会在其中起关键性作用。有人说苹果手机的成功是因为和上一代诺基亚、摩托罗拉等手机设计有理念上的区别。上一代手机首先考虑的是电话功能，然后增加了一些记事本，音乐和游戏功能。而乔布斯先把苹果手机做成计算机平台，可以轻易的安装各种应用，然后再使这台计算机具备电话功能。那么智能楼宇未来是否会先被做成一个计算机，然后再在其中增加生活和工作的功能呢？