基于负荷能效评估的集群建筑协调控制方案研究

文/国网上海市电力公司市北供电公司　史媛　沈建忠　章辰铭　董培萌　潘怡琪

在集群建筑参与需求响应定额容量削减的模式下，基于建筑楼宇级、设备级能效评估指标，构建集群建筑综合能效评估体系，通过模糊综合评估方法进行建筑能效评估，提出基于建筑能效评估的削减容量分配方案，最后算例分析验证了该方法的可行性。

经济建设的发展带来了公共建筑能耗迅速增长，全球范围内的建筑能耗已占到能源总消耗量的1/3，我国大型公共建筑能耗达到国民能耗总值的30%以上，且新建建筑中大型建筑比例逐年升高，既有公建改造升级为大型建筑的数量增多，造成建筑能耗巨大。但同时，随着高级测量系统、需求响应系统和智能用电设备等技术的发展，为进行建筑节能提供了有力的技术支持，建筑节能潜力进一步提高。换言之，伴随着需求响应技术在我国的进一步发展，推进建筑节能正成为缓解我国电力供需矛盾的有效途径，集群建筑参与的需求响应协调控制可大幅提高建筑的用电效率，改善用电方式，缓解电力供应紧张时期的供需不平衡。

现阶段国外建筑参与需求响应的研究及实践主要是建立基于智能建筑的需求响应系统，然而针对我国智能建筑发展尚未普及，既有建筑进行智能化改造难度大、成本高的现状，以智能建筑为依托的需求响应参与模式并不能充分挖掘现有集群建筑的削减潜力。因此本文参考有序用电缺口分配的负荷控制方案，提出集群建筑参与需求响应定额容量削减的响应模式。

本文选取集群建筑中具有代表性的商场、写字楼、酒店以及大型居民建筑作为研究对象，建立包含楼宇级、设备级能效指标的多级能效评估体系，并基于集群建筑能效评估的结果，综合考虑能效评估大小、行业用电需求差异及需求响应执行能力三大因素，确定削减容量分配算法，制定集群建筑参与需求响应的协调控制方案。

建筑负荷能效评估综合指标

1. 建筑楼宇级负荷能效指标

建筑楼宇级负荷能效指标，主要包括由建筑负荷曲线反映出的负荷特性，确定评估用电能效的评估指标。为了使类型相同但规模不同的建筑拥有可以相互比较的度量，对各个指标采取归一化处理，即将用电数据折算到单位建筑面积的能耗量，又称建筑能耗密度（Energy Use Intensity，EUI），从而建立能效评估的归一化模型。

（1）月平均负荷密度

月平均负荷密度表征某建筑单位面积的月平均

日负荷大小，表达式为

$$\theta_i=\frac{\overline{P}_i}{S_i}\times 100\% \tag{1}$$

式中，$\overline{P}_i$ 为第 i 个建筑的月平均负荷；S_i 为第 i 个建筑的建筑面积。

（2）月最高负荷密度

日最高负荷密度表征某建筑单位面积的月最大负荷值，表达式为

$$\theta_{mi}=\frac{P_{mi}}{S_i}\times 100\% \tag{2}$$

式中，P_{mi} 为第 i 建筑的月最高负荷。

（3）月高峰负荷持续时间

月高峰负荷持续时间表征该月某建筑高峰负荷持续时间的占比。

以持续时间达 15 min 为一个时间间隔，将一天划分为 96 个时段，若该时段开始时负荷达到集群建筑平均负荷的 1.5 倍，则认为该时段属于高峰负荷时段，表达式为

$$N_{ki}=\begin{cases}1 & \text{if} \quad P(T_{ki}^{-})\geqslant 1.5\overline{P}_{0r}/96, k=1,2,\cdots,96\\ 0 & \text{if} \quad P(T_{ki}^{-})<1.5\overline{P}_{0r}/96, k=1,2,\cdots,96\end{cases} \tag{3}$$

$$\theta_{mti}=\frac{N_i}{96}\times 100\%=\left(\sum_{k=1}^{96}N_{ki}\right)/96\times 100\% \tag{4}$$

$$\overline{\theta}_{mti}=\left(\sum_{n=1}^{N}\theta_{mti}\right)/N \tag{5}$$

式中，N_{ki} 为一天内第 i 建筑 k 时段的高峰时段判断值，若负荷大小属于高峰负荷则值为 1，否则为 0；T_{ki}^{-} 为 k 时段的开始时刻；$P(T_{ki}^{-})$ 为 T_{ki}^{-} 时段负荷密度；$\overline{P}_{0r}$ 为集群建筑的日平均负荷密度；N_i 为第 i 建筑高峰负荷时段总数；N 为该月总天数；θ_{mti} 为一日内建筑的高峰负荷持续时间占比；$\overline{\theta}_{mti}$ 为占比的月平均值。

（4）负荷峰谷差平均值

日负荷峰谷差表征某建筑一天内最大负荷与最小负荷之差，峰谷差平均值表征某建筑在该月的平均负荷波动情况，表达式为

$$\theta_{ci}=\frac{P_{mi}-P_{mmi}}{P_{mi}}\times 100\% \tag{6}$$

$$\overline{\theta}_{ci}=\left(\sum_{n=1}^{N}\theta_{ci}\right)/N \tag{7}$$

式中，P_{mi} 为第 i 建筑的日最大负荷；P_{mmi} 为第 i 建筑的日最小负荷。

2. 建筑设备级负荷能效指标

楼宇级的能效评价是针对全楼宇用能情况，进行的粗略评估。通过对建筑内设备用能效率的评价，特别是对高能耗系统进行能效评估，可以掌握建筑具体的能耗特点，对挖掘节能潜力从而提高整体的能效水平具有重要意义。本文从建筑的空调和照明动力系统两大主要能耗系统出发，建立设备级的能效评估指标。

（1）空调系统能效指标

在进行空调能效评估的过程中，将集群建筑的单位面积耗冷量、空调能效比和空调运行时间等作为衡量对象，计算各个建筑的对应指标值。

1）单位面积月耗冷量。单位面积月耗冷量表征该月某建筑单位面积的空调能耗。空调能耗在建筑能耗中所占比重较大，但建筑面积与空调覆盖面积并不等价，在计算时应注意区分。

$$\theta_{ai}=P_{ai}/S_{ai} \tag{8}$$

式中，P_{ai} 为第 i 建筑的月空调能耗；S_{ai} 为第 i 建筑的实际空调面积。

2）空调能效比。空调能效比指标表征某建筑内空调系统能效比的平均值

$$\theta_{avi}=\sum_{l=1}^{L}\eta_{ail}/L \tag{9}$$

式中，η_{ail} 为第 i 建筑第 l 台空调的能效比；L 为空调数量。

3）空调月运行时间。空调月运行时间指标反映建筑内空调系统运行时间的大小，以持续时间达 15 min 为一个时间间隔，将一天划分为 96 个时段，判断该时段空调是否开启。

$$N_{aki}=\begin{cases}1 & \text{if} \quad P_a(T_{ki}^{-})>0, k=1,2,\cdots,96\\ 0 & \text{if} \quad P_a(T_{ki}^{-})=0, k=1,2,\cdots,96\end{cases} \tag{10}$$

$$\theta_{ati}=\frac{N_{ai}}{96}\times 100\%=\left(\sum_{k=1}^{96}N_{aki}\right)/96\times 100\% \tag{11}$$

$$\overline{\theta}_{ati}=\left(\sum_{n=1}^{N}\theta_{ati}\right)/N \tag{12}$$

式中，N_{aki} 为一天内第 i 建筑 k 时段的空调开启判

断值；T_{ki}^{-} 为 k 时段的开始时刻；P_a（T_{ki}^{-}）为 T_{ki}^{-} 时段空调负荷密度；N_{ai} 为第 i 建筑高峰负荷时段总数；θ_{ati} 为一日内该建筑的空调开启时间占比；$\bar{\theta}_{ati}$ 为该占比的月平均值。

4）空调月高峰运行时间。空调月高峰负荷持续时间表征该月某建筑空调在高峰负荷时段运行时间的占比，仍以持续时间达 15 min 为一个时间间隔进行计算

$$N_{amki}=\begin{cases}1 & \text{if} \quad P_a(T_{ki}^{-})>0, k\in\{N_{ki}=1\}\\ 0 & \text{if} \quad P_a(T_{ki}^{-})=0, k\in\{N_{ki}=1\}\end{cases} \tag{13}$$

$$\theta_{amti}=\frac{N_{ami}}{96}\times 100\%=\left(\sum_{k=1}^{96}N_{amki}\right)/96\times 100\% \tag{14}$$

$$\bar{\theta}_{amti}=\left(\sum_{n=1}^{N}\theta_{amti}\right)/N \tag{15}$$

式中，N_{amki} 为一天内第 i 建筑高峰时段的空调开启判断值；N_{ami} 为第 i 建筑高峰负荷时段空调开启总时间；θ_{amti} 为一日内该建筑高峰时段的空调开启时间占比；$\bar{\theta}_{amti}$ 为该占比的月平均值。

（2）照明和动力系统能效指标

照明系统在建筑整体能耗中所占比重很大，加之分项计量系统中将照明插座归为一项，对照明能耗的分析尤为重要。动力系统包括电梯和非空调用、非消防用风机和水泵。对于照明系统及动力系统的能耗评估，采取计算集群建筑系统平均用能数据作为基准，计算其偏差的方法来评估系统能效

1）月照明负荷密度偏差。月照明负荷密度偏差表征某建筑单位面积的月照明负荷与该区域单位面积照明负荷平均值的差值大小

$$\theta_{li}=\left(\frac{P_{li}-P_{l0}}{P_{l0}}+1\right)\times 100\% \tag{16}$$

式中，P_{l0} 为集群建筑单位面积的月照明负荷平均值；P_{li} 为第 i 建筑的单位面积月照明负荷。

2）月电梯负荷密度偏差。月电梯负荷密度偏差表征某建筑单位面积的月电梯负荷与该区域单位面积电梯负荷均值的差值大小

$$\theta_{di}=\left(\frac{P_{di}-P_{d0}}{P_{d0}}+1\right)\times 100\% \tag{17}$$

式中，P_{d0} 为集群建筑单位面积的月电梯负荷均值；P_{di} 为第 i 建筑的单位面积月电梯负荷。

3）月给水提升泵用负荷密度偏差。月给水提升泵负荷密度偏差表征某建筑单位面积的月给水提升泵负荷与该区域单位面积给水提升泵负荷均值的差值大小

$$\theta_{bi}=\left(\frac{P_{bi}-P_{b0}}{P_{b0}}+1\right)\times 100\% \tag{18}$$

式中，P_{b0} 为集群建筑单位面积的月给水提升泵负荷均值；P_{bi} 为第 i 建筑的单位面积月给水提升泵负荷。

实施方案

集群建筑参与需求响应协调控制，该过程主要是电网将削减容量下发至区域代理，然后由集群区域以月为单位将该月削减容量分配到该区域内各参与响应的用电用户。制定削减容量分配方案过程中，根据区域内建筑能效评估的结果，以建筑能效评分大小为主要分配原则，不仅充分体现建筑的可调度负荷弹性，同时也起到进一步提高建筑能效的双重作用。综合考虑不同建筑的行业系数及其需求响应执行能力来确定容量分配算法，使该分配方法更具公平性与科学性。

1. 集群建筑负荷能效评估

根据建立的多级能效评价体系，进行建筑负荷能效评估。评价过程中涉及一些复杂现象和多种因素的相互作用，尤其是指标权重的确定存在一定模糊性。因此，本文运用模糊综合评价法进行建筑的能效评估，并在单因素评价中引入属性度计算，避免常规专家评分法的主观性；在结果进行分析时，采用比最大隶属度原则更具科学性的加权平均原则。

在进行评估结果分析时，实际中最常用的最大隶属度原则在某些情况下使用会损失很多信息，甚至得出不合理的评价结果。采用加权平均求隶属等级的方法，将各个评语的隶属度加入计算，可以得到更全面的评估结果，具体计算过程见算例分析。

2. 基于能效评估的协调控制方案

由评估结果得到各个建筑的综合能效等级，共分为差、一般、良好和优四级，根据以下原则进行

需求响应削减容量的分配：

1）综合能效等级越高，削减容量越小。能效等级评分每提高 1 分，削减容量减小 20%。

2）行业系数越大，削减容量可相应减小。为充分考虑集群建筑的行业用电差异，以便更科学地进行容量分配，在以上基本能效评估的基础上引入行业系数，弥补在建筑能效评估时没有考虑不同行业用电需求差异的不足。

在各类大型建筑中，可综合分为四种类型用电用户：A 类为仅工作日白天用电，如办公楼、学校等；B 类为仅白天用电，如公共建筑、商场等；C 类为不间断集中用电，如酒店医院等；D 类为大型居民建筑。根据上述四种类型的用电用户用电需求大小确定其行业系数。C 类型用电需求最大，行业系数 $\alpha_C=0.9$，B 类其次 $\alpha_B=0.7$，A 为 $\alpha_A=0.5$，D 为 $\alpha_D=0.3$。

在进行容量分配时，以行业系数每提高 0.2、削减容量响应减小 5%的原则进行计算。

3）需求响应执行力高，削减容量可相应减小。若该建筑用户上月实际削减容量达到计划分配容量的 85%及以上，即其需求响应执行力 $\eta_i=1$ 表示上月削减能力达标，则该月的计划分配容量可相应减小 5%。将需求响应执行能力引入削减容量分配原则，可进一步鼓励用电用户优化用电结构，积极完成削减指标。

综合以上各原则，协调容量分配的方法如下图所示。

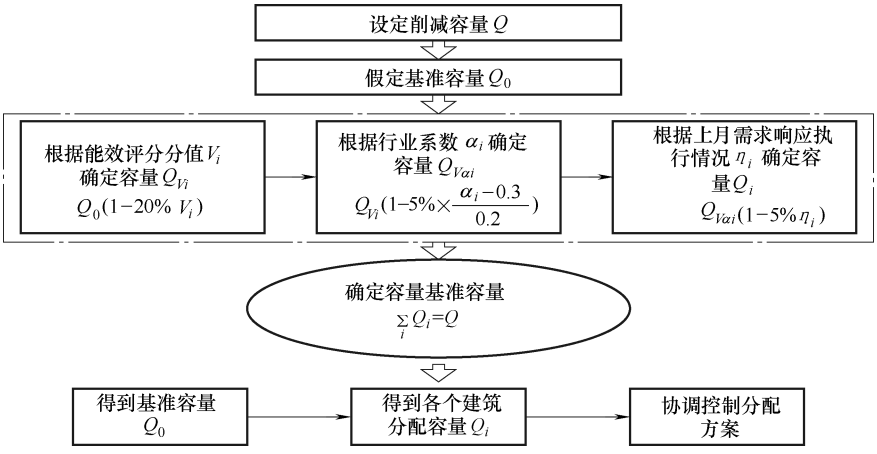

图　集群建筑参与需求响应容量削减分配方法

算例分析

1. 数据假设

假设某集群建筑区域内有六栋大型建筑参与需求响应协调控制，分别以 1～6 进行编号，其中 1、2 为办公楼，3、4 为商场，5 为酒店，6 为大型居民建筑。统计分析上个月各建筑及内部用电系统的用电数据，并进行能效评估，进而制定协调方案。六栋建筑各项指标数据见表 1，其中建筑 1 和 4 参与需求响应项目且削减量达标。

表 1　集群建筑的各项指标值

指标	建筑 1	建筑 2	建筑 3	建筑 4	建筑 5	建筑 6
x_1	13.06	16.25	21.6	21.16	39	2.66
x_2	0.78	1.4	1.41	1.033	2.333	0.187
x_3	24.16	22.7	29.2	28.9	35	16.5
x_4	87.33	83.4	85	81.76	72.5	32.48
x_5	8.33	10.156	9.72	9.26	17.44	0.888
x_6	3.4	3.0	3.2	3.0	3.2	2.8
x_7	33.61	30.56	58.33	54.17	87.5	33.33
x_8	9.167	9.167	20.83	20.83	20.83	16.67
x_9	68.03	79.41	126.5	120.4	190.4	15.2
x_{10}	54.2	67.36	156.7	183.4	181.8	8.29
x_{11}	63.07	65.33	139	136.2	188.2	8.04

2. 指标评估分析

以建筑 1 为例，评估其能效综合得分及能效等级。

（1）指标一致化

在 11 项综合指标中，x_6 为极大型指标，其余全部为极小型指标，根据极值差的无量纲化方计算公式

$$\text{极小型指标 } x'_{ij}=\frac{\max x_i-x_{ij}}{\max x_j-\min x_j}$$

极大型指标 $x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min_j}{\max_j-\min_j}$

经处理后的指标值见表 2。

表 2　建筑 1 的标准化指标值

指标 1	指标 2	指标 3	指标 4	指标 5	指标 6
0.713 8	0.723 7	0.586 0	0	0.550 4	1
指标 7	指标 8	指标 9	指标 10	指标 11	
0.946 4	1	0.698 4	0.737 8	0.694 5	

（2）评价等级量化

建筑能效按语义学标度分为 4 个评分等级：优、良好、一般和差。将各个等级量化并建立对应能效等级 E_1、E_2、E_3 和 E_4，各能效等级的评价值及评估分值见表 3。

表 3　评价定量分级标准

评价值	评语集	定级	对应评分
0.9	优	E_1	4
0.75	良	E_2	3
0.6	一般	E_3	2
0.4	差	E_4	1

（3）单因素评价

在确定隶属关系时，通常由专家或与评价问题相关的专业人员依据评判等级对评价对象进行打分，根据打分情况确定单因素评价结果。考虑到专家评分主观性较大，本文在计算标准化指标值的基础上，引入属性分类的属性测度计算方法来构造隶属度矩阵，得到单因素评价结果。

根据建筑 1 的各项指标值，其隶属度矩阵为

$$\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0.07 & 1 & 0.248 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0.241 & 0.176 & 0.93 & 0 & 0.752 & 0 & 0 & 0 & 0.344 & 0.081 & 0.37\\ 0.759 & 0.824 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.656 & 0.919 & 0.63\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

（4）指标权重确定

通过经验和专家打分结果确定各项能效指标的权重，见表 4。

表 4　各项指标权重

指标	1	2	3	4	5	6
综合权重	0.275	0.11	0.11	0.055	0.15	0.03
指标	7	8	9	10	11	
综合权重	0.06	0.06	0.06	0.045	0.045	

（5）综合评估结果

利用加权平均 M（·，⊕）模糊合成算子将权重 W 与单项隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$ 合成得到模糊综合评价结果向量 $\boldsymbol{B}$，最后根据各等级对应分值求出综合能效评分 V

$$b_i=\sum_{i=1}^{I}w_i r_{ij}=\min\left(1,\sum_{i=1}^{I}w_i r_{ij}\right),$$

$$j=1,2,\cdots,J$$

$$B_1=W\cdot\boldsymbol{R}_1=[0.100\quad 0.342\quad 0.408\quad 0.15]$$

$$V_1=0.10+2\times0.342+3\times0.408+4\times0.15=2.609$$

即建筑 1 的用电能效评分为 2.609，能效等级为 E_3。

同理进行其他建筑的能效评估，评估结果见表 5。

表 5　各个建筑的能效评估结果

建筑	建筑 1	建筑 2	建筑 3	建筑 4	建筑 5	建筑 6
能效评分	2.609	2.096	1.253	1.366	1.043	3.73
能效等级	E_3	E_3	E_4	E_4	E_4	E_2

不同类型的建筑中，居民建筑 6 能效等级最高，酒店 6 能效最低，而办公楼 1、2 能效水平高于商场 3、4；同类型建筑中，以办公楼为例，建筑 1 虽然用电量很大，但其建筑面积也大，同时其各项用电指标也普遍高于建筑 2，最终 1 的能效评分要优于建筑 2。

3. 协调方案分析

（1）综合协调方案计算

假定该区域计划本月削减容量为 80 MW。根据能效指标评估结果，综合各个建筑的行业系数及上月需求响应执行情况，可得到表 6 所示的各项综合参数，用以进行协调方案的确定。

假定能效评估结果为 0 的建筑，其削减量为 Q_0，即基准削减容量。根据削减容量的分配原则，不同建筑的削减容量为

$$\begin{cases} Q_i = Q_0 \times (1 - 20\% V_i) \times \left(1 - 5\% \times \dfrac{\alpha_i - 0.3}{0.2}\right) \times \\ \quad (1 - 5\% \eta_i) \\ \sum_{i=1}^{6} Q_i = 80 \end{cases}$$

表 6　各个建筑的用电情况综合参数表

建筑	建筑 1	建筑 2	建筑 3	建筑 4	建筑 5	建筑 6
能效评分 V_i	2.609	2.096	1.253	1.366	1.043	3.73
行业系数 α_i	0.5	0.5	0.7	0.7	0.9	0.3
需求响应执行情况 η_i	1	0	0	1	0	0

经计算，各个建筑的协调容量分配方案为

$Q_1 = 10.770$ MW　$Q_2 = 13.769$ MW

$Q_3 = 16.830$ MW　$Q_4 = 15.507$ MW

$Q_5 = 16.786$ MW　$Q_6 = 6.338$ MW

（2）不同原则下协调方案比较

计算以用电量大小为原则的分配方案以及仅考虑能效评估结果的分配方案，与以上综合分配方案进行比较，结果见表 7。

表 7　不同原则下的削减容量方案

方案	1	2	3	4	5	6
用电量大小	20.661	6.4	25.6	12.72	11.68	4
能效评估大小	10.684	12.977	16.744	16.239	17.682	5.675
能效及行业差异	11.144	13.535	16.544	16.046	16.501	6.231
综合分配原则	10.770	13.769	16.830	15.507	16.786	6.338

从表 7 中结果看，方案 1 仅考虑用电量大小，仅仅反映了建筑的使用面积、行业需求两方面的区别，而以能效评估结果大小为原则的方案将建筑的用能效率和资源利用率体现在分配方案上，以建筑 1 为例，其较大的建筑面积使得其用电量相对不高。但用电效率不高。方案 2 充分考虑了其能效评分结果，相比用电量分配的原则建筑 1 的削减容量降低了 48%。而方案 3 进一步考虑行业用电差异，以建筑 5 为例，由于酒店处在全天耗能模式中，其能效评分低于其他类型建筑，将行业系数代入分配算法，使其削减容量降低了 6.5%。而综合考虑需求响应执行力的分配原则，将起到激励各个参与用户积极完成计划削减的作用。

结束语

针对集群建筑耗能增长迅速、可调控潜力大的特点，本文在集群建筑参与需求响应削减定额分配的模式下，提出了基于建筑用电能效评估的削减容量分配方案。从楼宇级能效评估和设备级能效评估两方面，建立建筑能效评估体系，通过模糊综合评价方法确定不同建筑的能效评分结果及对应能效等级大小。以建筑能效评分大小为主要分配原则，不仅充分体现建筑的可调度负荷弹性，同时也起到进一步提高建筑能效的双重作用。分配原则中计入不同建筑的行业系数，弥补了在能效评估过程中没有充分考虑行业需求差异的不足，同时考虑需求响应执行情况的分配原则，将进一步激励参与响应的建筑用户积极完成计划削减容量。EA

ABB 将收购 ASTI 移动机器人

近日，ABB 宣布将收购 ASTI 移动机器人集团。ASTI 是全球领先的 AMR 制造商，拥有完整的产品组合，并提供配套软件，覆盖所有主要应用领域。此次收购将拓展 ABB 机器人和自动化产品组合，使其成为业界唯一能够提供面向下一代柔性自动化的完整产品组合的企业。

ABB 机器人与离散自动化事业部总裁安世铭表示：“凭借行业领先的产品组合、完整的软件配套和覆盖高增长领域的深度专业知识，ASTI 是我们为客户提供下一代柔性自动化支持的理想选择。通过此次收购，ABB 将成为唯一一家提供 AMR、机器人和机械自动化解决方案等完整自动化产品组合的公司，覆盖从生产到物流再到消费等众多领域。我们的客户正在面对个性化消费盛行趋势，并努力抓住消费者需求显著变化带来的机遇，因此这对我们的客户而言也是一个重要变革。”

AMR 将为生产、物流、内部物流和订单履行、零售和医疗健康等领域带来前所未有的灵活性，ABB 和 ASTI 的共同愿景是帮助客户用全柔性化的生产网络替换目前的线性生产线，在工厂、物流中心、实验室、商店和医院，用智能 AMR 在智能互联的工作站之间实现自主导航，运送物料、零部件和成品。（来源：ABB 公司）