

双馈风力发电机低电压穿越能力平台测试技术

双馈风电机组一般会配置不同型号的发电机，在某一型号双馈风电机组通过低电压穿越能力现场测试后，配置其他型号发电机的风电机组的低电压穿越特性需要研究。在分析发电机变化对双馈风电机组低电压穿越特性影响的基础上，提出了一种发电机平台测试技术，包括测试平台的构建、测试程序及测试内容。在某厂家搭建了1.5 MW双馈发电机测试平台，分别测试两种型号发电机与同一型号变流器运行的低电压穿越能力。案例测试验证了发电机平台测试技术的合理性，该技术可用于确定双馈发电机变化后的风电机组低电压穿越特性。

唐建芳¹ 余秀月² 李 庆¹ 张 利¹ 张元栋¹ 黄文英² 陈 峰²/1.中国电力科学研究院 2.国网福建省电力有限公司

0 引言

2015年，我国风电产业继续保持强劲发展势头，新增装机容量创造历史新高，全年风电新增装机容量3 297万kW，累计并网装机容量1.29亿kW，占全部发电装机容量的8.6%。2015年，风电发电量1 863亿kW·h，占全部发电量的3.3%^[1]。

随着风电装机容量在电网占比的不断增加，大规模风电接入对电网稳定运行的影响愈加明显。2011年我国大规模风机脱网事故相继发生，给电力系统稳定运行和可靠供电造成了不良影响。对事故进行分析，部分并网运行的风电机组不具备低电压穿越（Low Voltage Ride Through, LVRT）能力，是造成风机大规模脱网的主要原因之一^[2]。目前，国内外普遍采用现场检测的方式检验风电

机组的低电压穿越能力。截止2015年年底，我国已完成了200多项风电机组低电压穿越能力检测。双馈风电机组是当前的主流机型之一，具有变流器容量较小，有功和无功可独立解耦控制的特点^[3-4]。风电机组制造商一般基于控制特性、成本和分散风险等因素为同一型号变流器配置不同的发电机。发电机发生变化包括制造商、型号或等效电路参数发生变化。目前采用现场检测的方法检验发电机变化后与原变流器的运行能力，及电压跌落时的响应特性，而现场检测受自然风的限制，测试周期长、成本高，实验室地面测试是较为理想的方法。

目前，国内外已有大量文献对风电机组低电压穿越能力进行了研究。文献[5-7]深入探讨了双馈风电机组撬棒（Crowbar）保护电路取值、投切控制策略在发生短路故障后对风电机组动态性能的影响。文献[8]从理论定性和定量两个角度，全面分析并揭示了双馈风电机组在故障发生、切除全过程中的电磁暂态特性。文献[9]从理论分析、模型仿真两方面研究了风轮直径变化对风电机组低电压穿越性能的影响。从现有文献来看，在理论上对双馈风电机组低电压穿越特性研究和仿真的较多，尚未看到关于风电机组发电机变化后通过发电机测试平台判断其低电压穿越能力的相关报道。

本文在分析了双馈风电机组工作原理及发电机变化对双馈风电机组低电压



唐建芳/工程师

关键词/Keywords

双馈发电机 ·
风电机组 ·
低电压穿越 ·
平台测试 ·

国家电网公司科技项目（NY71-14-036）。

穿越特性影响的基础上,提出了一种发电机平台测试技术,用于确定发电机变化后的风电机组低电压穿越能力。为此,搭建了1.5 MW双馈发电机测试平台,分别测试两种型号发电机与同一型号变流器运行的低电压穿越能力。案例测试验证了发电机平台测试技术的合理性,此技术可用于确定双馈风力发电机变化后的风电机组低电压穿越特性。

1 理论分析

图1为双馈风力发电机组控制结构图。双馈异步发电机的定子绕组直接与电网相连,转子绕组通过背靠背变流器与电网连接,通过转子侧变流器控制发电机的励磁与转速,其中转子侧Crowbar电路用来旁路转子侧变流器,为电网故障下引发的转子过电流提供通路。网侧变流器维持直流母线电压恒定运行。

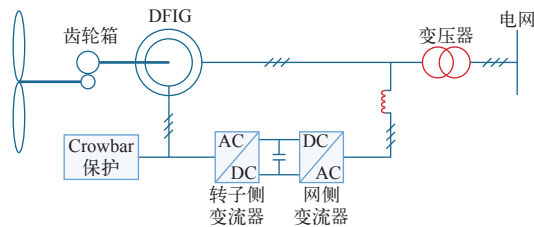


图1 双馈风力发电机组控制结构

1.1 双馈风电机组电磁暂态模型和功率解耦控制

静止坐标系下双馈发电机定转子电压、电流及磁链矢量之间的关系表达式为^[8, 13]

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega\Psi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (2)$$

式中, $L_s = L_{os} + L_m$ 为定子绕组全自感; $L_r = L_{or} + L_m$ 为转子绕组全自感; L_m 为定子、转子之间的互感; L_{os} 、 L_{or} 分别为定子漏电感和转子漏电感; R_s 、 R_r 分别为定子电阻和转子电阻; ω 为转子电角速度。

在定子电压定向条件下,发电机定子输出的有功功率和无功功率与转子电流相关的数学模型为^[10-11]

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3U_s L_m i_{rd}}{2L_s} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{U_s^2}{\omega_s L_s} + \frac{U_s L_m i_{rq}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中, i_{rd} 为转子电流 d 轴分量; i_{rq} 为转子电流 q 轴分量; ω_s 为电动机同步角速度。

由式(3)可得,通过控制转子电流 d 轴分量 i_{rd} 可以控制发电机定子有功功率 P_s , 控制转子电流 q 轴分量 i_{rq} 可以控制定子无功功率 Q_s , 从而实现对DFIG定子有功功率和无功功率的解耦控制。

为满足发电机励磁电流及转矩电流的要求,变流器根据发电机参数计算所需外加的输出电动势,从而有效地调节转子电流励磁分量和转矩分量。对于双馈发电机组,针对不同的发电机转子开口电压、转子漏感和转子电阻等参数,调整变流器的输出值在合适的范围内,从而实现双馈风电机组在一定转速范围内的稳定运行。

1.2 三相短路故障下DFIG的暂态分析

三相短路故障发生后,定子绕组和转子绕组的暂态电流随着时间的增加,分别以定子暂态时间常数 T_s 和转子暂态时间常数 T_r 衰减^[12-13]。 T_s 和 T_r 计算公式为

$$T_s = \frac{L'_s}{R_s} = \frac{L_{os} + \frac{L_{or} L_m}{L_{or} + L_m}}{R_s} \quad (4)$$

$$T_r = \frac{L'_r}{R_r} = \frac{L_{or} + \frac{L_{os} L_m}{L_{os} + L_m}}{R_r} \quad (5)$$

通常情况下,DFIG的励磁电感远大于漏电感,即 $L_m \gg L_{os}$ 、 $L_m \gg L_{or}$; 当接入Crowbar保护电路后,一般Crowbar电阻值远大于定、转子电阻值,因此可将定、转子电流在短路过程中的瞬时值表示为^[12]

$$i_s = -i_r = \frac{U_s}{j\omega_s L_{os} + R} e^{-t/T'_s} - \frac{1}{L_{or}} \Psi_{r0} e^{-t/T'_s} e^{-j\omega_r t} \quad (6)$$

式中, U_s 为定子电压; R 为Crowbar电阻; Ψ_{r0} 为发生三相短路故障时转子磁链暂态值; ω_s 为同步电角速度, ω_r 为转子电角速度; L_σ 为定、转子总漏电感, 即 $L_\sigma = L_{\sigma s} + L_{\sigma r}$; T'_s 、 T'_r 分别为定、转子衰减时间常数, $T'_s = \frac{R^2 + \omega_s^2 L_s L_\sigma}{\omega_s^2 (L_s - L_\sigma) R}$, $T'_r = \frac{L_\sigma}{R}$ 。

由式(6)可见, 在投入Crowbar保护电路后, 定子、转子衰减时间常数与Crowbar电阻值, 发电机定、转子漏电感和互感有关。在变流器Crowbar阻值不变的情况下, 若发电机的等效电路参数发生变化, 会影响暂态期间的最大电流及其衰减速度, 进而影响Crowbar电路耗能。由于变流器Crowbar电路的容量已确定, 当发电机的等效电路参数变化后, 需确认Crowbar电路是否需要重新设计。

由于发电机与变流器密切相关, 发电机参数变化对变流器的控制性能有影响, 为确保变流器参数整定的准确性和控制系统的稳定性, 需搭建发电机测试平台检验发电机与变流器的配合能力。

2 发电机测试平台的构建

2.1 测试平台的构建

双馈风力发电机低电压穿越能力测试平台原理图如图2所示。

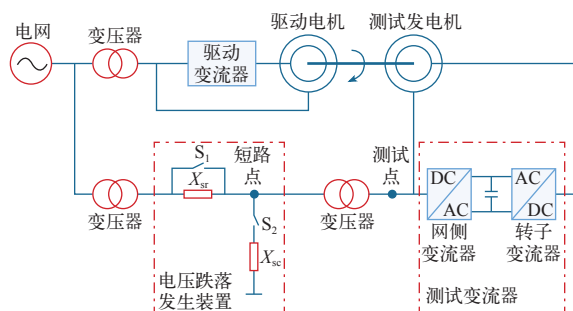


图2 发电机测试平台构建原理图

发电机测试平台由驱动电机、驱动变流器、测试电机、测试变流器、变压器、用来驱动联轴器的辅助电动机和电压跌落发生装置等组成。测试电机为双馈风电机组拟采用的新型号发电机;

平台测试变流器的参数、拓扑结构及控制策略与现场测试机组变流器保持一致。

驱动电机和测试电机采用双馈电机, 通过联轴器连接; 采用辅助电动机驱动联轴器, 由两台变流器分别对驱动电机和测试电机的转子进行控制, 使驱动电机处于电动运行, 测试电机处于发电运行; 在转速达到并网转速后进行并网, 待驱动电机和测试电机对拖稳定后, 停止辅助电动机运行; 调节驱动电机变流器来改变驱动电机转速, 调节测试电机变流器使测试电机输出功率达到该转速对应的功率值。

电压跌落发生装置串联接入测试电机升压变压器的高压侧, 利用阻抗分压原理在短路点产生测试要求的电压跌落。图2中, X_{sr} 为限流电抗, 用于限制短路电流对电网的冲击; X_{sc} 为短路电抗, 通过闭合短路开关 S_2 , 将短路电抗三相或两相连接, 在短路点产生测试要求的电压跌落。

2.2 测试程序及内容

为测试发电机变化后与同一型号变流器在电压跌落时的响应特性, 按照以下程序进行。

1) 空载测试。使发电机和变流器处于停机状态, 断开测试发电机变压器高压侧与电压跌落发生装置的连接开关, 控制电压跌落发生装置在短路点产生电压跌落, 使电压分别跌落至0.2(pu)和0.5(pu), 跌落持续时间分别为625 ms和1 214 ms。

2) 负载测试。负载测试在空载测试的电压跌落幅值及持续时间满足要求后进行。使测试发电机和变流器处于运行状态, 当测试发电机功率分别在大功率输出(大于额定功率的90%)和小功率输出(在额定功率的10%~30%之间)时, 进行三相电压跌落和两相电压跌落测试。控制电压跌落发生装置使短路点电压分别跌落至0.2(pu)和0.5(pu), 跌落持续时间分别为625 ms和1 214 ms。在测试点采集三相电压、三相电流, 采样频率至少为5 kHz。数据采集时长包括电压跌落前10 s至电压恢复正常后15 s。每个工况需连续两次通过负载测试。

测试过程中, 不能更换发电机、变流器等关

键部件。更换关键部件后已完成的测试项目视为无效,需重新进行测试。

3 试验结果与分析

某型号1.5 MW风电机组已通过现场低电压穿越能力检测,在原型号风电机组基础上拟采用新型号发电机。为确认发电机变化后与同一型号变流器在电压跌落时的响应特性,根据发电机测试平台构建原理,某厂家搭建了1.5 MW变速恒频双馈发电机测试平台,测试两种型号发电机与同一变流器连接的低电压穿越能力。列出两种发电机的等效电路参数如下表所示。

表 发电机等效电路参数

发电机	发电机A	发电机B
定子电阻/ Ω	0.003 2	0.005 227
定子漏感/mH	0.066 9	2.332
励磁电感/mH	3.503 2	8.675 4
转子电阻(折算到定子侧)/ Ω	0.002 9	0.006 881
转子漏感(折算到定子侧)/mH	0.130 6	0.278
转子开路电压/V	1 770	1830

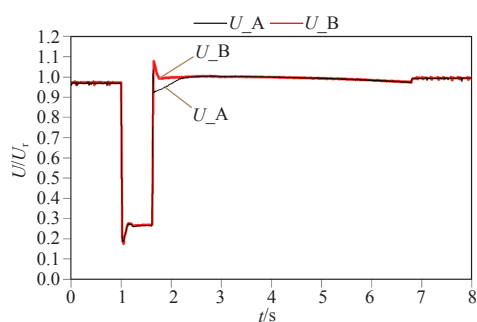
文中仅给出三相电压跌落至20%、大功率运行和小功率运行工况下的结果,包括发电机输出端的电压、无功电流、有功功率和无功功率基波正序波形。波形中各变量均为标么值,电压基准值为 $U_r=690$ V,功率基准值为 $P_r=1\,500$ kW。

3.1 大功率运行

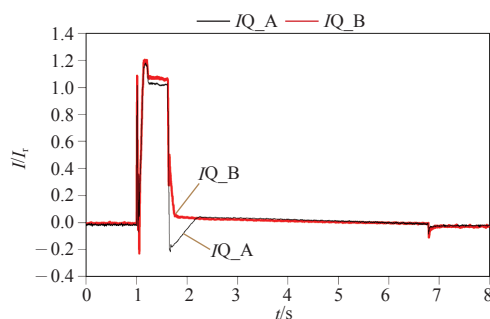
调节拖动电动机变流器来改变拖动电动机转速,使测试发电机输出功率大于额定功率的90%。设置电压跌落发生装置发生三相短路故障,使电网电压跌落至额定电压的20%,跌落持续时间为625 ms。电压跌落期间,由于发电机无功电流的注入,发电机输出端电压略高于额定电压的20%。两种发电机输出端各电气量如图3所示。

3.2 小功率运行

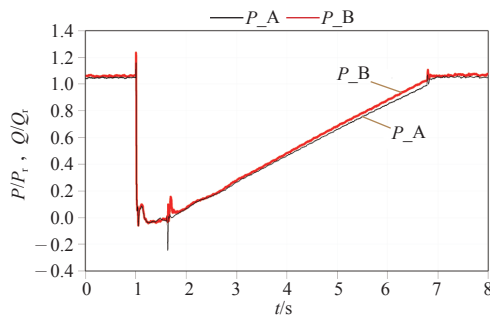
调节拖动电动机变流器来改变拖动电动机转速,使测试发电机输出功率在额定功率的10%~30%。设置电压跌落发生装置发生三相短路故障,使电网电压跌落深度和跌落持续时间与大



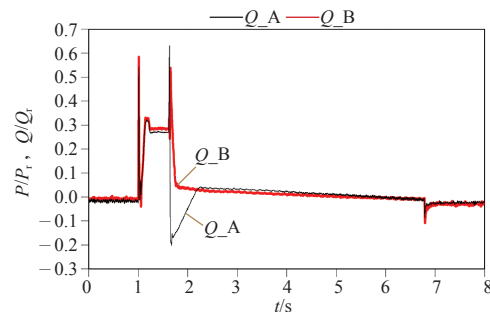
(a) 发电机输出端基波正序电压



(b) 发电机输出端基波正序无功电流



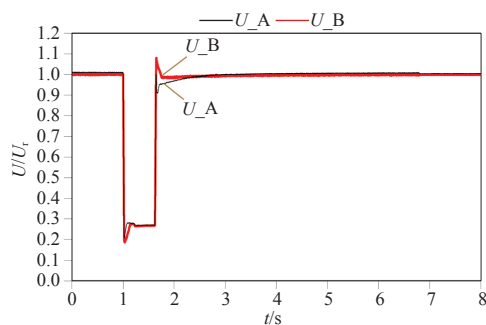
(c) 发电机输出端基波正序有功功率



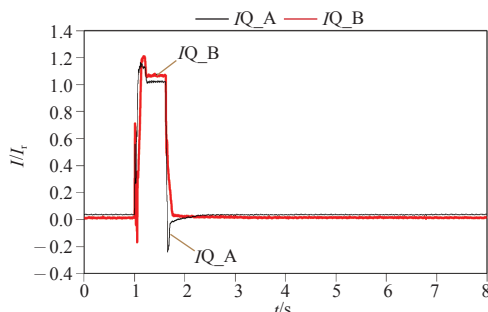
(d) 发电机输出端基波正序无功功率

图3 三相电压跌落, 20% U_n , 大功率运行测试结果

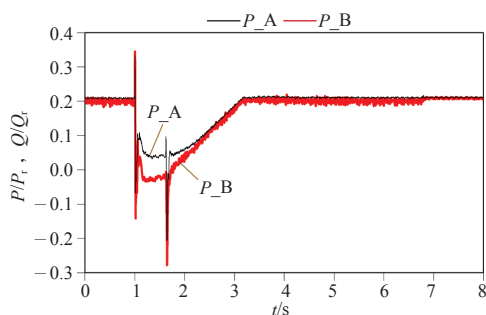
功率运行时相同。电压跌落期间,由于发电机无功电流的注入,发电机输出端电压略高于额定电压的20%。两种发电机输出端各电气量如图4所示。



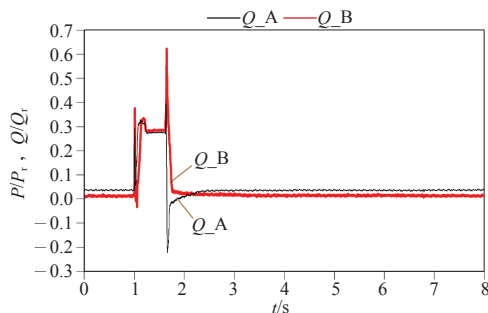
(a) 发电机输出端基波正序电压



(b) 发电机输出端基波正序无功电流



(c) 发电机输出端基波正序有功功率



(d) 发电机输出端基波正序无功功率

图4 三相电压跌落, 20% U_n , 小功率运行测试结果

3.3 试验结果分析

由图3和图4可得如下结论。

1) 测试发电机在测试过程中保持不脱网连续

运行;测试发电机的有功功率在电压恢复后快速恢复,自电压恢复时刻开始以至少10%额定功率每秒的功率变化率恢复至电压跌落前的值。由此,两种不同型号发电机与同一型号变流器连接的低电压穿越能力满足要求。

2) 由于两种型号发电机的等效电路参数不同,在电压跌落和恢复暂态过程中其响应特性差别较大。

4 结束语

本文在分析了双馈风电机组工作原理及发电机变化对双馈风电机组低电压穿越特性影响的基础上,提出了一种发电机平台测试技术,用于确定发电机变化后的风电机组低电压穿越特性。在某厂家搭建了发电机测试平台,进行了实际测试。主要结论如下:

1) 发电机参数变化后,风电机组在电压跌落和恢复暂态过程的响应特性会有差别;风电机组在电压跌落暂态期间的最大电流及其衰减速度会受到影响,需确认Crowbar电路是否需要重新设计。

2) 案例测试验证了发电机平台测试技术的合理性。

3) 实验室地面测试的实现摆脱了受自然风的限制,既缩短了测试周期,又节约了测试成本。

综上所述,发电机平台测试技术可用于确定双馈风力发电机变化后的风电机组低电压穿越特性。

由于发电机参数变化的大小有差异,发电机变化后是否都必须进行发电机平台测试可作为以后研究的方向。

参考文献

- [1] 能源局. 2015年全国风电产业继续保持强劲增长势头 [EB/OL]. [2016-02-04]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/04/c_135073627.htm.
- [2] 何世恩,董新洲.大规模风电机组脱网原因分析及对策[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):131-137.
- [3] 刘其辉,贺益康,张建华.并网型交流励磁变速

- 恒频风力发电系统控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (23): 109-114.
- [4] 李建林, 朱颖, 胡书举, 等. 风力发电系统中大功率变流器的应用 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (1): 169-175.
- [5] Shi L, Chen N, Lu Q. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through [J]. Energy Procedia, 2012 (16): 1526-1534.
- [6] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (22): 29-36.
- [7] 朱晓东, 石磊, 陈宁, 等. 考虑Crowbar阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (18): 84-89.
- [8] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (2): 26-31.
- [9] 贺敬, 李庆, 秦世耀, 等. 双馈风电机组叶片变化对低电压穿越性能的影响研究 [J]. 可再生能源, 2014, 32 (12): 1828-1836.
- [10] 李辉, 叶仁杰, 韩力, 等. 电网电压跌落下双馈风力发电机组暂态性能的比较分析 [J]. 太阳能学报, 2010, 31 (6): 775-781.
- [11] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (25): 25-31.
- [12] 吕志强, 许国东. 兆瓦级双馈风电机组电网故障时的暂态分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (23): 112-116.
- [13] 孔宪国, 刘宗歧. 基于主动式Crowbar的双馈风电机组LVRT性能优化分析 [J]. 现代电力, 2012, 29 (1): 77-81.

(收稿日期: 2016-01-15) EA

(上接第36页)

假设在房间冷负荷 L_x 下, 空调器以 q_x 的制冷能力运行; 计算日室内外温度保持恒定。

(3) 空调器的理论耗电量 E_k

空调器的理论耗电量 E_k 计算公式为

$$E_k = p_x T' \\ = (0.014 p_e t_{g,x} + 0.5 p_e) \frac{7300}{-0.013 q_e t_{g,x} + 1.45 q_e} T / 1000 \quad (9)$$

已知, 空调器额定制冷量 $q_x = 7300 \text{ W}$, 额定电功率 $p_e = 2370 \text{ W}$, 自然冷源运行时间为24 h。将数据带入式 (9) 可得空调器理论耗电量 $E_k = 42 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

3.3 节能量计算

自然冷源代替空调器的节电量 ΔE 计算公式为

$$\Delta E = E_f - E_k = 31 \text{ kW} \cdot \text{h} - 42 \text{ kW} \cdot \text{h} = -11 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

根据电力当量值 $0.1229 \text{ kgce}/(\text{kW} \cdot \text{h})^{[3]}$, 节电量折合吨标煤 1.35 kgce 。

4 结束语

节能量计算的关键在于准确地确定采用节能措施前后的能耗, 但是项目采用节能措施后,

无法复现未改造前项目运行状态, 而在项目改造前的能耗数据没有实测值的情况下, 改造前能耗只能通过模拟计算得到。本文首先通过模拟计算出一定室内冷负荷条件下, 空调器的理论运行功率, 其次考虑室外温度变化情况下空调器制冷能力的变化, 计算出空调器的理论运行时间, 从而求得空调器理论耗电量, 将其与实测自然冷源耗电量比较得到节能量, 该方法对于此类项目节能量计算具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 严瀚. 数据中心预冷节能方案研究 [J]. 暖通空调, 2015, 45 (5): 50-55.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 28750—2012 节能量测量和验证技术通则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [3] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2589—2008 综合能耗计算通则 [S]. 北京: 中国标准化出版社, 2008.

(收稿日期: 2015-08-10) EA