

热耗率

燃煤电厂热耗率改进方案（ I ）

即使不考虑监管上的要求，事实上每一家燃煤电厂都有充分的理由改进自己的热耗率。美国电力研究院（EPRI）研究过数十种用于改进热耗率的方法以及评估这些方法适用性和成本的方法。作为这篇分为 2 个部分的系列文章的第 1 部分，将解释热耗率改进的基本原理以及近期 EPRI 报告所调查过的可能方案的范围。

文 | Sam Korellis

燃煤电厂的热耗率代表着生产 1 kWh 电力所需要的热量，典型情况以英热单位 Btu 为单位。相应地，典型的热耗率单位即为 Btu/kWh。

热耗率为每单位电能输出所对应的热能输入量，或相应于具体电厂输出电力等级的燃料消耗率，热耗率还是电厂效率的倒数。从这个意义来说，它类似于高尔夫比赛得分：越低越好。

对于一家特定电厂，其热耗率取决于电厂的设计方案，其运行状况及其电力输出等级。理论上，3412 Btu 热能等于 1 kWh 的电力。就现有燃煤电厂而言，热耗率一般情况下处于 9000 ~ 11 000 Btu/kWh（1 Btu/kWh = 1.055 06 kJ/kWh）的范围内。对于美国行业 10 300 Btu/kWh 的平均热耗率约为综合电厂效率运行时的 33%（ $3412/0.33 = 10339$ ）。

本文及引用 EPRI 报告当中所讨论的全部热耗率都根据净发电量计算。工厂净发电量提供了电厂机械设备运行所需要的辅助耗电量。使用净电厂或机组

输出量作为分母有助于保持对工厂性能的整体式观点，并允许加入所有改造的效果，包括会改变辅助耗电量的排放物控制措施。净热耗率能够将使用蒸汽驱动型作为组成部分的电厂与那些采用电机驱动的电厂做出比较，因为用于驱动大型部件的蒸汽一般情况下比用电驱动成本更低，但是会耗用掉一部分的汽机生产能力。

降低热耗率的好处

煤的热含量在 8000 ~ 12 000 Btu/lb（1 Btu/lb = 2326 J/kg）范围内。煤的成本为 1.5 ~ 2 美元/MMBtu，或约 30 美元/t。典型燃煤电厂每天耗煤 6000 t。对于燃煤电厂，燃料远远领先其他成本，占据最昂贵的支出项，占总电厂支出的 55% ~ 75% 左右。降低电厂热耗率会显著降低燃料耗用量，并也因此降低其成本，直接给电力生产商及其客户带来效益（图 1）。例如，对于一家运行在 80% 容量系数并燃烧 2 美元/MMBtu 褐煤的典型 500 MW 电厂，

热耗率降低 1% 将节约 70 万美元左右的年度燃料成本。

热耗率改进也是减少 CO₂ 和所有其他排放物的第一项明确步骤。其效果已经在商业上得到证明，并且是降低 CO₂ 排放成本效益比最好和最立刻可用的控制过程。如上所述，1% 热耗率的减少还对应着 1% CO₂ 排放量的减少，约合 4 万 t/年，如果新法规允许 CO₂ 信用额交易或对 CO₂ 排放收费时，这会带来相当多的节省。

即使假设事实上实现了碳捕集和贮存技术，优化热耗率仍然可合理地作为 CO₂ 减排的第一项措施，并可以作为其他控制方案的补充措施。热耗率降低还将导致其他排放量的减少，诸如氮氧化物 NO_x、SO₂、颗粒物和汞，这样就可以帮助电厂满足其余的合规要求。即使对于以每百万 Btu 磅数为单位的恒定排放率来说，热耗率的改进将减少所燃烧掉的 Btu 量，并因此对于给定发生的污染物，所需总磅数也更少。在一些情况下，减少排放物的效益有可能超过燃料节省

的价值。

评估热耗率改进的范围和可适用性

最初在设计和建造燃煤电厂时都以达到机组具体的热耗率为目标。典型的燃煤电厂，如今厂龄已达 30 ~ 40 岁，运行热耗率可能明显不同于初始设计值了。电厂业主和运行人员对于现有发电设施可能的热耗率改进范围心中没底。

近年来，有多项 EPRI 项目仔细研究了热耗率改进的各个方面。一份最近的 EPRI 报告《热耗率改进范围和适用性》汇总了这些项目的发现成果，为热耗率改进的范围和适用性提供了信息。这篇分为 2 个部分的系列文章即以此报告为基础。

公用事业公司预算有限，并且想要知道通过实行动作或新技术能够获得多少补偿或改进。因为 EPRI 从整体的角度看待热耗率的缘故，我们能够在电厂层面上评估项目，而不是在组成部分层面上进行，并已经汇编了可能方案的详尽清单。

在 2008 ~ 2009 年间，EPRI 开发了一种评估燃煤电厂潜在维护改进成本和效益的方法，并对这种方法用于评估这些电厂潜在在资本改进净年度效益的评估进行了细化。这些评估方法随后应用于一座假设的 500 MW 电厂，用于计算其潜在效益，包括热耗率降低、辅助负荷减少、发电容量增加、等效强迫停运率 (EFOR) 改进以及排放量减少方面。

这些计算采用两张电子表格进行，一张用于资本项目，另一张用于维护项目。计算输入量可以根据电厂具体情况进行个性设置，从而使得各个电厂能够采用此方法展开范围界定研究。实际热耗率改进的数量级取决于具体现场，以及驱动系统和经济效益。

项目

本报告列出了 32 个资本项目。针对每个项目均由电子表格确定了估计资本

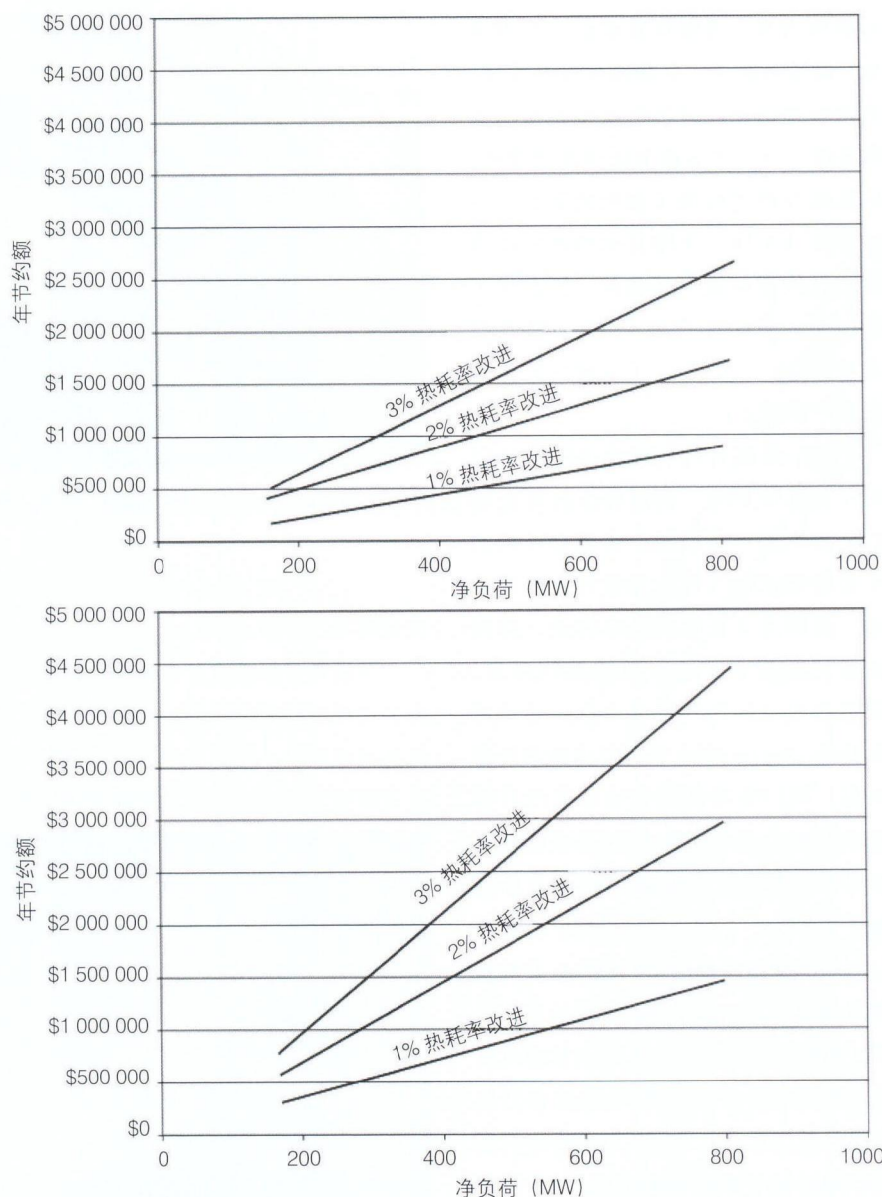


图1 改进电厂热耗率对电厂利润有着最直接的影响。上面图表所示为按 1.50 美元/MMBtu 计算的节省额；下面图表所示为按 2.50 美元/MMBtu 计算的节省额

成本、每年增加的运行维护成本、热耗率减少量（百分比和 Btu/kWh）、估计辅助负荷效益、资本增加量、EFOR 改进效益、热耗率效益、排放物效益、添加电力销售额效益，以及净年度效益。当本项目完成并编写了报告之时，排放物效益只与 NO_x 和 SO₂ 有关，但是其公式可以轻松改编以纳入 CO₂ 和汞。示例项目包括了汽机汽封升级、汽机部分更换（图 2）、智能吹灰系统、自动化锅炉排水、煤烘干系统、空气加热器以及燃烧优化。

本报告列出了 25 个维护项目和惯例。针对每个项目均用电子表格确定了

估计初始维护成本、每年增加的运行维护成本、热耗率减少量（百分比和 Btu/kWh）、估计辅助负荷效益、容量增加量、EFOR 改进效益、热耗率效益、排放物效益、增加电力销售额效益、维护年度效益 - 成本比、使用帮助和回报（年份）。示例项目包括更换给水泵汽机汽封、修理蒸汽和水泄漏、锅炉化学器清洗、修理锅炉空气内漏、清洁空气预热器盘管、修理凝结水泵以及更换流化床干燥器 (FGD) 系统。

本节 EPRI 《热耗率改进范围和适用性》报告描述了改进电厂热耗率的

问题和前景，包括恢复灵活运行期间电厂效率的损失、实施循环校准程序、采用远程监测、对汽机发电机做出实体升级、设计和实施热耗率改进程序，以及提升汽机性能工程师的效能。这些项目当中每一个项目的热耗率改进度的数值有可能不能叠加，因此有可能存在一些重叠之处，而且这些项目当中的每一个都集中于与现场具体对应的行动结果。

当作为综合性电厂性能改进计划的一部分使用时，循环校准计划能够以低成本提供高收益。实施循环校准计划能够让电厂性能提升计划快速启动，并带来显著的热耗率改进，因而达成燃料成本节约以及排放物减量。采用经改良的循环校准方法，通常可以获得 50 Btu/kWh 范围以内的热耗率改进。阀门存在问题的机组或没有保持循环校准记录的机组都有可能在这个计划实施后获得大幅度的一次性热耗率改进。

为了确保正确的循环校准，曾经使用过各种方法，但是方法应用的成功和成本根据所涉及的具体阀门和机组设计而不同。2011 年，一项 EPRI 项目评估了循环校准工作并确定了这些工作的成本和效益。这项研究阐明了一些实际使用的方法，这些方法可用于估算或测算流经泄漏阀门的泄漏率，并且使用了来自运行中电厂的多个实际事例说明了如何实施循环校准计划。

多年以来，远程监测中心（RMC）就用于追踪和改进设备可靠性，并且在许多情况下，这些远程监测中心都安装了用于监测热耗率的热力性能软件。找到和纠正可靠性问题的价值经常可以进行量化，但给热耗率监测标明价值并不容易。

2011 年，一项 EPRI 研究评估了使用远程监测系统以及人工监测与热耗率改进之间的具体相关性。项目团队访问了 3 家发电公司的远程监测中心。这些远程监测中心的主要优先任务是提升可靠性，但也在不同程度上监测着热耗率



图 2 升级一些汽机部件，诸如本图所示的高压汽机控制的部分，也是一种改进热耗率的方法

改进情况。

在设备可靠性之外，接受访问的所有公司均能够根据监测中心的工作验证热耗率的改进。在许多情况下，热耗率改进幅度较为明显，并且大幅超过了在可靠性监测以外增加热耗率监测所增加的成本。处于 2.5% ~ 4% 范围内的热耗率改进在报告中归功于根据这些远程监测中心的工作。这些和其他现场研究所得到的关键结论将在本系列文章的第 2 部分讨论。

过去 20 年来，已有更多的核电站和化石燃料电厂接受过改造，目的在于提升其功率额定值和改进选定机组的热耗率。这些改造工作当中的许多内容都来自于对汽机发电机的实体升级，以及对辅助部件的增强。

EPRI 开展过一项调查，汇编了各种性能升级工作的当前结果，并将其编入一份技术报告，对调查结果进行了汇总，通常所报道的汽机改造的热耗率改进幅度处于 2% ~ 4% 的范围内。但是，这些改造属于资金密集型项目，会耗费大量的时间和资源，并且使用寿命受限，而且不是 100% 成功。

热耗率改进计划指南

制订了性能或热耗率改进计划的电厂会比没有制订此类计划的电厂达到更好的性能。热耗率改进计划一般情况下

都会为及时维护行动、运行调整以及实体改造相关决策提供充足的信息。

对任何电厂组成部分，包括参数趋势变化在内的性能进行准确监测时，还能够描述出其他电厂组成部分的性能，提供了将电厂组成部分作为整体进行改进时所需要的深入洞察和信息。性能改进计划会形成一种以改进电厂性能为中心的企业文化。与全厂员工分享性能数据将加强员工对于每个人可做出贡献的理解，并最终通过团队努力实现热耗率改进。

一项 1983 年开展的涉及到 129 台化石燃料发电机组的公用事业公司调查得出这样的结论，通过实施有效的热耗率改进计划，现有电厂可以达到超过 4% 的平均热耗率改进。

一项 2012 年 EPRI 项目查找了可用于培训和应用的有关热耗率改进的单一来源文档。这一项目编制了《热耗率改进计划指南》。此指南结合了来自早期纲领性文件的信息编制了一份新报告，报告从组织形式上方便现场性能工程师使用，能够帮助工程师证明新热耗率改进计划的合理性，以及设计、实施和管理改进计划。

本系列文章的第 2 部分将主要讲述这个项目的常见主题和现成结论，以及热耗率研究和开发工作的后续步骤。[1][2]