

精益能效管理（TEM）

——能源数据价值的深度挖掘

文/北京大学环境学院、北京阳光能环教育科技有限公司 张 迪

精益能效管理（Total Energy Management, TEM）是在全面质量管理（TQM）、全员设备保全（TPM）和精益六西格玛等国际先进管理方法基础上所发展起来的，将能源作为一种重要生产要素，将精益管理方法与能源管理实际相结合，并以能源价值（单位能源产出/利润）为度量的管理方法。这一方法的提出，弥补了传统工业工程（IE）专注于对人、物料、设备和信息等要素的系统集成，而对能源要素未能有效覆盖的管理短板与方法盲区，是精益思想工具在能源领域的扩展应用，有助于对能源系统进行更为精准的管理与控制，实现能源价值。

精益能效管理追求能源零浪费、系统最小波动（精准控制）和工序/介质间灵活响应（柔性

生产）的管理目标，有效协同能源、生产、设备、财务和信息等各要素，实现能源生产力最优化（能源价值实现）。

精益能效管理强调自上而下的系统策划，同时注重自下而上的现场改善，有效结合节能专家、专业机构的智力资源，以及现场人员能效改善小组（ESGA）的主动性优势。综合运用提案改善、5S、设备可用性分析、停机损失分析、产线平衡分析和价值流分析（VSM）等精益六西格玛工具，以及工艺参数分析、能源平衡分析、消耗/产量分析（EP）和能效极限分析等能源流分析工具，不仅能够规范能源管理，深挖节能潜力，更可指导能源管控系统（EMS）等自动化系统构架，挖掘能源数据的本源价值，为管理决策

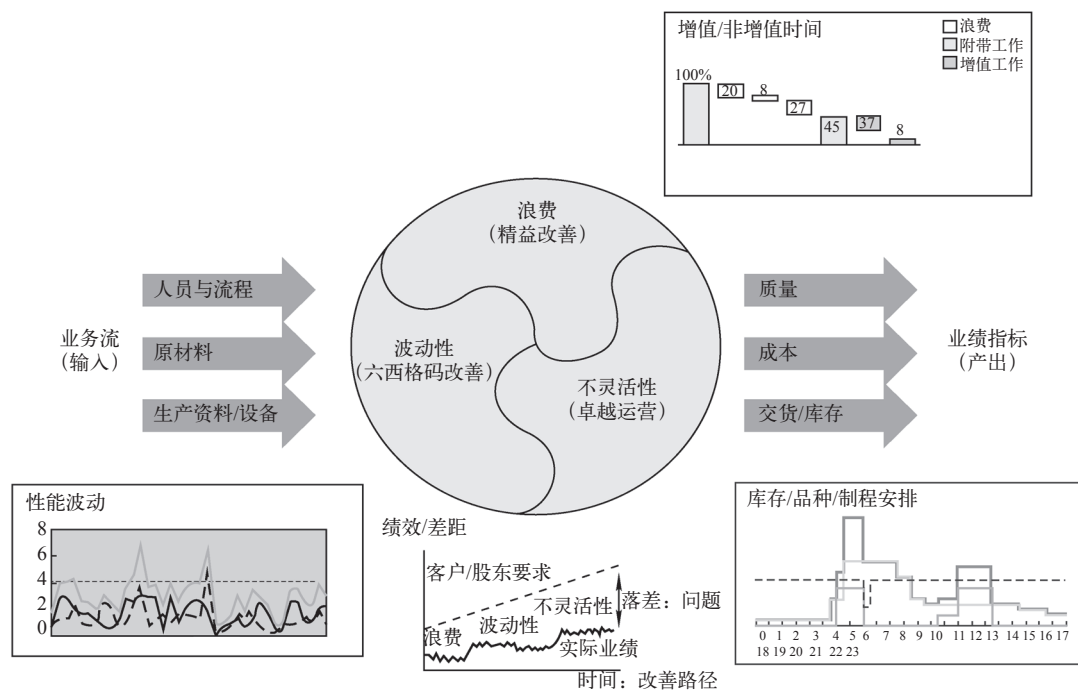


图1 损失来源：浪费、波动性和不灵活性

提供逆物料流向的数据支持,提高管理的透明度与精细度(颗粒度)。

三类损失分析

精益能效管理将能源相关损失分为:浪费(对应精益改善)、波动性(对应六西格玛改善)和不灵活性(对应约束理论)等三类,据此开发相应改进方法。如图1所示。

1. 七大能源浪费

与精益改善现场七大浪费相对应,也可将现场的各种能源浪费分为过量生产、等待、输送、过度加工、库存、返工和移动七大类,如图2所示。

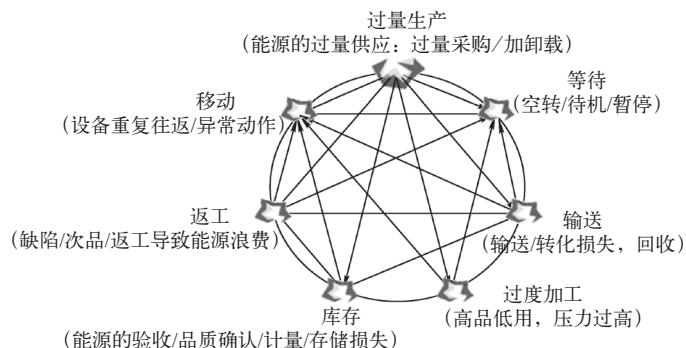


图2 七大能源浪费

上述分类实际上只涵盖了几种最常见的能源浪费现象,远未能涵盖能源浪费的全部情况,重要的是由此建立分析基础和方法导入,换个角度来看能源。

2. 能效带宽

2000年前后,美国先后进行了两次全国通用

设备能效普查,并将数据汇总分析,提出了“能效带宽”这一概念,所指用能设备在各种工况下其能源效率呈现连续移动的“带”状移动。带宽的中心曲线即为设备效率控制点,带的宽幅代表了控制准确度。如图3所示。

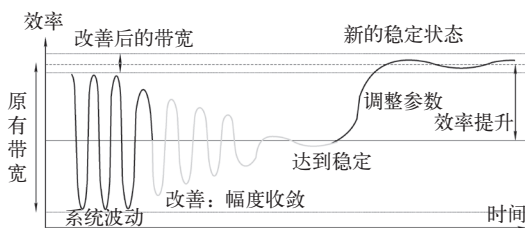


图3 波动与控制——能效带宽(合理用能/基准/参数)

用“能效带宽”衡量用能指标参数的波动特性,以此凸显设备能效的控制准确度与移动轨迹范围,便可应用精益六西格玛等方法,识别各影响因素并逐一解决、收敛,从“增效”和“降耗”双向进行改善。

示例说明:通过先进自动化专家优化系统(EO),将窑炉温度控制相关因素逐一收敛,使控制精度(能效带宽)从 $900 \pm 10^\circ\text{C}$ 优化到 $892 \pm 1^\circ\text{C}$,可实现对物料、燃料和炉温的三者协同:在保证质量和安全前提下,炉温可降低 8°C 。具体有两条线路:①燃料供应不变,则可增加给料,从247 t/h提高到249 t/h(产能增加,即“增效”);②若原料添加速度不变,则燃料消耗从14 t/h降低到13.68 t/h(能耗降低,即“节能”)。如图4所示。

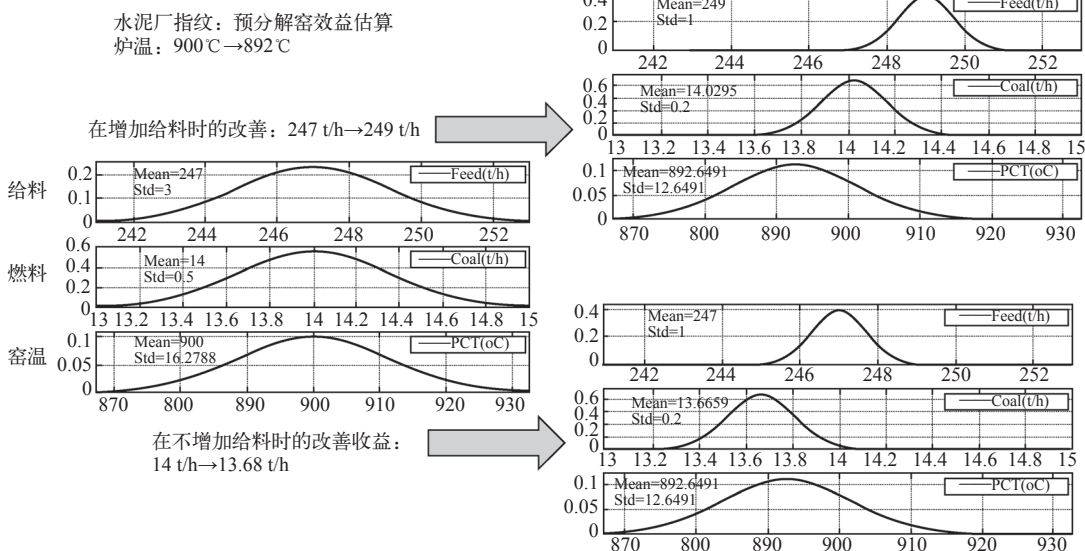


图4 “能效带宽”及应用

该系统广泛应用于国际领先水泥生产等企业，可实现设备在线率（连续生产）接近100%。

3. 系统协同

对因能源供应与使用（生产）系统间的不灵活所带来的损失，一方面应通过提高生产组织计划精准度来稳定生产、尽可能连续生产和均衡生产；另一方面，可通过架构基于精益管理的企业能源管控系统来协同改进，提高能源调度管理水平。

案例企业依托能源信息化系统进行数据关联，诊断出铸钢车间电炉和除尘器系统分别控制，而且距离较远，容易出现电炉关闭后除尘系统未及时关闭的情况，如图5a所示。利用信息平台发现问题后进行改造，实现了电炉和除尘器的联动，如图5b所示。电炉生产间断期间每小时减少电费支出170元。

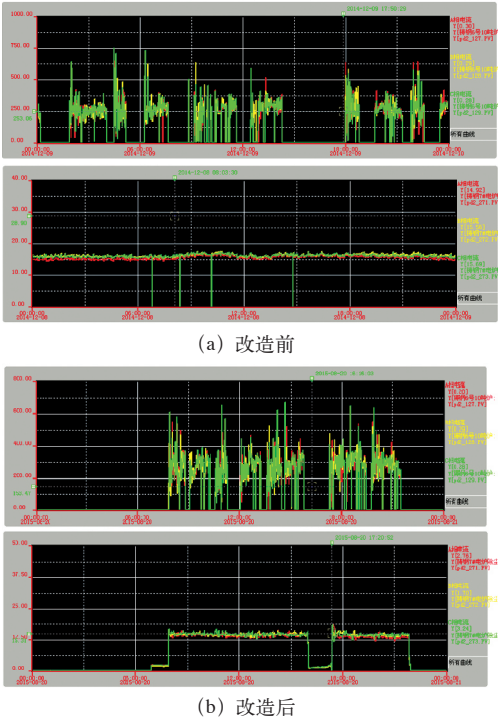


图5 改造前后电炉（上）和除尘器（下）电流曲线对比

归一化能源价值指标（精益能效的基本度量）

正如TPM以综合设备效能（OEE）及其分解的三个指标：时间利用率A、性能利用率P、以及产品合格率Q来标定价值时间、度量浪费，三者相乘放大了每个缺陷与瑕疵，有助于进行更精细化的管理。如图6所示。

指标转换：以时间为通量

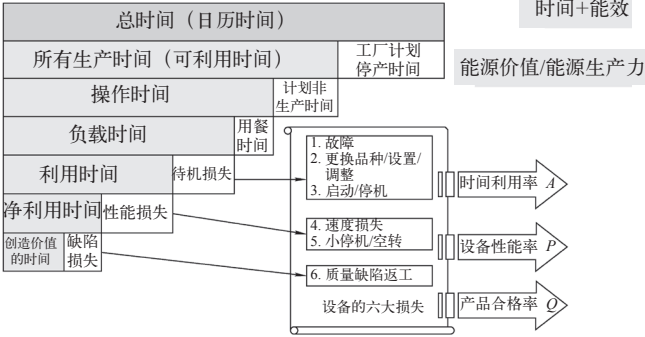


图6 OEE损失

TEM强调单位能源的产出价值，通过单位能源生产率、单位能源盈利率和单位停机能耗损失等指标来标定能源效率与损失浪费。这既是对单位产出能源消耗量（能源强度）这一传统指标的逆向分析，更是一种体现能源价值流的进取型、主动性思维方式，其目的在于勾连每一个生产指挥活动与能耗、能源成本之间的关联，便于达成跨专业能效共识，获得更广泛支持。见表1。

表1 能源管理指标和能源价值指标异同比较

级别	能源指标体系	能源价值指标体系	主要区别
第一级	耗能总量，吨钢综合能耗，自耗电总量，吨钢电耗等	能源总成本、吨钢能源成本，电力成本等	1. 分析对象不同：价值指标计算增加了非能源的因素成本，如设备、人员、税费等 2. 折标系数确定方法不同：价值指标中价格是不断变化的，而能源折算系数相对固定 3. 两者所用的原始数据是相同的，统计的口径也相同
第二级	工序能耗	工序能源成本	
第三级	工序能源介质单耗，能源回收率	工序能源介质成本，能源回收成本	
第四级	产线能耗重点用能设备能耗	产线能源成本，重点用能设备能源成本	
第五级	成本中心能介单耗	成本中心能介成本	

通过单位热值价格指数、工序能源成本、千元盈利能耗和单位能源销售额/利润等技术经济指标，为能源管理指标价值化铺路搭桥。既体现能源热值等物理性能，也能反映能源的财务性能，并通过“能源成本占比”“能效因子”（即各生产指令对能源成本的影响）等追踪性指标，勾连起每个指令所带来的能源成本，将其纳入运营决策，实现能源数据“主流化”。

由此，可将能源数据与采购、制造、设备和财务等管理信息系统相勾连，据此建立各层级分析模型、输出相关指标，共同构成能源价值管理信息系统的内在逻辑如图7所示。

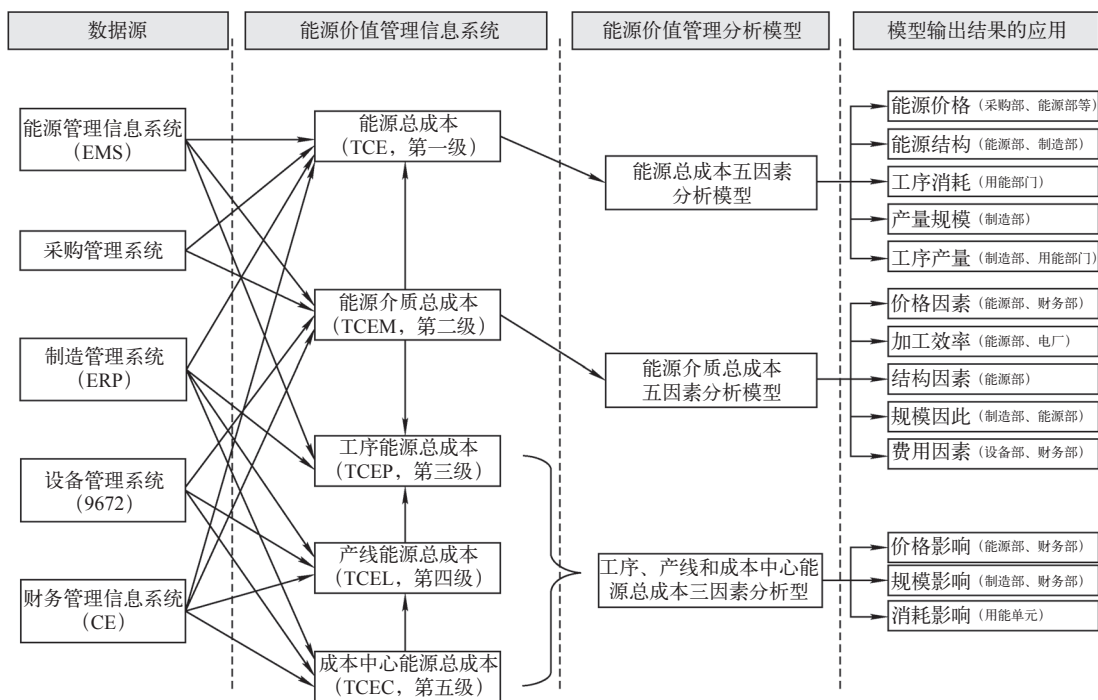


图7 能源价值管理信息系统的内在逻辑

企业以盈利为目的，不能体现成本的能源指标很难与运营管理的主流结合。一方面，专业化能源管理也造成财务等部门的沟通理解障碍；另一方面，能源管理与制造、成本和设备等专业管理未能形成合力，造成能源管理缺乏成本管理的数据支持，而成本等运营管理缺乏能源管理的专业支持。

传统的能源指标管理是将电、煤、油和汽等所有等能源介质折算成标准煤（tec），不能反映燃料等能源种类变化对能源成本的影响，以及能源外购、加工转换、系统损失、设备维修、项目投资及相关费用等全部能源成本因素。建立能源价值指标有助于打通能源流与价值流的“任督二脉”，共同为管理决策提供依据。

将价值流的成本管理工具方法与传统能源管理相结合，以能源价值最大为目标，分析能源管理对运营管理的影响和贡献，实现能源价值和能源数据价值，使能源管理精细化、显性化、程序化，克服传统能源管理的不足，拓宽能源管理的范围和深度，与企业的损益直接挂钩，从而得到非能源管理专业人员的认可和支持。

TEM企业应用

用能单位采用精益管理，对内要科学组织生产，优化流程，调整能源结构，提高设备管理和

运行维护水平，对外可采用能效对标等方式，与行业领跑者等最佳实践数据相对比，全面衡量内部结构、经营成果和持续发展等指标的控制水平，提升企业竞争力。

用能单位一方面可将能源精细化管理与TPM、5S和精益六西格玛等以制造流程为主的运营系统相结合；另一方面，同时提升工业工程（IE）人员的能源知识和能源管理人员的精益知识，构建专业互补的能效小活动小组，结合内外部专家资源，从问题诊断开始推进现场和管理系统的能效改善。特别应结合能源管理体系、能源指标管理、能效对标、能源审计和能源管控中心等相关活动，以点带面、系统化推进能效改善，逐步导入精益能效。

1. 鼓风机电耗基准和参数分析

案例企业通过建立“能耗源”和“能效/成本影响因子”的双向维度，系统识别各用能环节及其影响因素，并与能源成本和能源生产力（单位能源价格指标、千元盈利能耗）等运营指标相关联，实现了对能源的科学管理。

以高炉鼓风机电耗为例，经筛选得出主要影响因素为：大气温度、大气湿度、送风压力、高炉定修与临休次数，以及风机效率、阀门泄漏、空转时间、吸入阻损和辅助系统等。其中大气温度湿度等属于自然环境，可按季节特点做适应性分

析；送风压力与停炉次数由生产制造部门控制，可通过能效因子加以区分；而风机效率、泄漏、空转、阻损和辅助系统等因素则属于风机运行管理部门可控因素。如图8所示。

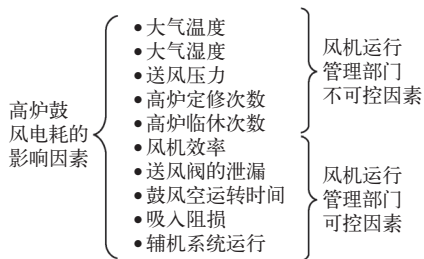


图8 高炉鼓风能效的主要影响因素

经测算，对各外部因素的影响回归如下：

- 1) 大气温度20℃，实际温度每增减1℃，电耗增减0.3%。
- 2) 湿度12 g/m³，实际湿度每增减1 g/m³，电耗增减0.038%。
- 3) 送风平均压力420 kPa，实际每增减10 kPa，电耗增减1.5%。
- 4) 大于2 h的休风次数1次/月，实际每增减一次，电量增减6万kW·h。
- 5) 小于2 h的临时休风次数1次/月，每增减一次，电耗增减5万kW·h。

确定高炉鼓风电耗基准值为：8.07万kW·h/Mm³。

实际分析：某月电耗8.47万kW·h/Mm³，与基准值相比上升4.83%，分析见表2。

表2 高炉鼓风电耗的影响因素分析

项目	基准值	实际值	影响电耗
送风压力/kPa	420	432	+1.80%
大气温度/℃	20	26	+1.80%
大气湿度/g/m ³	12	16	+0.15%
大于2 h休风次数/次	1	0	0
小于2 h休风次数/次	1	3	15万kW·h (0.15%)
合计			+3.90%

结论：外部因素合计贡献率为3.90%，其他内部因素影响上升0.93%，高炉鼓风工序全月比基准值多耗电93万kW·h。

由此可由生产制造、技术设备与动力供应等部门按照所分担的能效因子分配该电耗指标，做到合理评价、精准控制。

2. 某企业电耗异常分析

案例企业采用精益管理方法，将设备运

行、故障、成品率和小停机等异常情况折合成效率时间，进一步与单位产品能耗、电耗和水耗等指标挂钩，实现了较为精准的能效指标管理，把每分钟/每次停机或故障、异常所带来的电耗/能耗损失显现出来，实现了能效管理可视化，上述手段有力地促进了企业单位能源效率的提升。

3. 电力最大需量计划管理

在各种能源介质中，电能作为一种优质能源资源，除具有成本-效率等传统价值外，更是一种优质数据资源，也是进行智慧管理的要素组成。

契约负荷（MD）即“最大需量”（kW），是指企业在一个电费结算周期内，每单位时间用电平均负荷的最大值。契约负荷管理直接反映出企业用电管理水平，实际用电负荷与契约用电负荷的差距越大，用电的成本就越高。低于契约负荷就要多付多余部分的基本电费，而高于契约负荷，高出部分就要加倍付费。

案例企业根据电力需求侧管理系统数据，优化生产用能（特别是大功率设备）的错时规划，科学地确定周期性的契约用电负荷（最大需量，MD）计划，来降低原高估的基础电价费用。如图9所示。

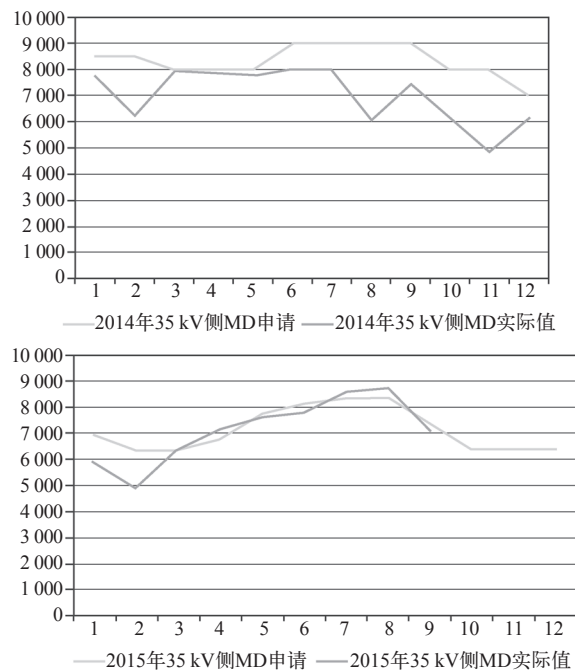


图9 2014与2015年35 kV侧MD申请与实际值情况对比

自管理系统平台上线运行以后，企业MD的预测结果与实际值愈来愈接近。年节电率达1.5%。EA