

某烟草薄片能源系统诊断与节能改造实践研究

潘瑞清

中国轻工业上海工程咨询有限公司 上海 200031

摘要：在“双碳”目标下，工厂节能就是省钱。本研究以一家烟草薄片工厂为案例，像给人体做“体检”一样，对其能源系统进行“诊断”。重点检查了工厂的“热能血管”（蒸汽管网）和“动力肺”（压缩空气系统）。本案例的方法和结论，可为同类制造工厂的节能改造提供一套清晰、可复制的“诊断-治疗”方案。

关键词：能源诊断；蒸汽管网；压缩空气系统；红外热成像；流量计；三相功率计

引言：对于许多制造企业来说，电费和蒸汽费是两项居高不下的成本，但能源具体浪费在哪里，常常是一笔“糊涂账”。据统计，工业蒸汽系统的能源损失可高达10%~30%，而压缩空气系统的泄漏、不当使用和控制失调更是造成了巨大的电能浪费。本研究的目的，就是通过一个真实工厂案例，展示如何用这些工具发现问题、量化损失，并给出经济可行的改造方案，为工厂节能降碳提供一个清晰路径。

1 研究对象与诊断方法

1.1 研究对象概况

本研究以某烟草薄片厂为例，该企业是国内主要的再造烟叶生产企业之一，其生产工艺对能源供应的稳定性和经济性要求极高。目前，企业已开展基础性能源管理系统建设，旨在实现能耗数据的实时监控，表明企业具备实施能效诊断的基础条件。

本研究聚焦于企业两个主要的公用工程系统

(1) 蒸汽管网系统：负责将锅炉产生的蒸汽输送到各个生产工段及用能点，用于加热和干燥。该系统管线长、分布广，通过架空和地沟相结合的方式输送，是热能损失的重点区域。

(2) 压缩空气系统：为全厂提供生产工艺、吹扫、物料输送和清洁的压缩空气，是电能消耗的主要公辅设备之一。目前，系统独立运行，缺乏联动控制。

1.2 诊断工具及技术原理

1.2.1 蒸汽管网诊断技术

■ **技术原理：**红外热成像诊断技术。该技术通过非接触式探测物体表面的红外辐射，将其转化为可视化

的温度分布图（热像图）。在蒸汽管网检测中，能够快速、直观地发现保温层破损、变薄、内部潮湿等，以及阀门、法兰等连接点蒸汽泄漏等。通过热成像图的温度数据，可以量化评估热损失程度。

■ **检测仪器：**H16pro红外热成像仪，测温范围-20℃~550℃。

1.2.2 压缩空气系统诊断技术

■ **技术原理：**在线能效测试。通过测量压缩空气系统在实际运行工况下的输入功率和产气量，计算能效指标—比功率（衡量空压机能耗的关键指标）。

■ 检测仪器

• **流量计：**用于测量压缩空气系统管道的瞬时流量和累计流量。

• **三相功率计：**用于测量压缩空气系统电机的三相电压、电流、有功功率、功率因数等。

2 现场测试与数据分析

2.1 蒸汽管网诊断结果与分析

红外热成像检测结果可以直观地暴露蒸汽管网的保温问题。现场检测时，发现多处蒸汽管道表面温度异常。通过现场检测，一处法兰连接部位的保温层破损，其表面最高温度达154℃，该处保温层已完全失效，直接向大气散热。这意味着，这个阀门本身变成了一个大型“暖气片”，在不断向车间散发热量。然而这些热量并没有用于生产。

通过对厂区蒸汽管网进行全面红外扫描，主要归纳如下：

表1 蒸汽管网红热成像异常点分析结果

异常类型	典型表面温度	红外图像特征	可能原因与分析
管道保温层破坏	120℃~150℃	管道表面出现大面积、不规则的高温区域	外部物理损坏或长期风化导致保温材料脱落，热量直接散失。
阀门保温缺失/失效	130℃~170℃	阀体呈现均匀的亮黄色或白色高温	阀门因需维护而未进行有效保温，或保温套件损坏，导致成为“散热器”。

续表:

异常类型	典型表面温度	红外图像特征	可能原因与分析
疏水阀泄漏	出口管道温度大于100℃	疏水阀后端管道出现与前端接近的高温	疏水阀卡死或损坏,导致高压蒸汽直接泄漏至冷凝水回收管路,造成“跑汽”。
法兰连接处泄漏	连接处边缘有高温蒸汽	可见明显的高温气体喷出状态	密封垫片老化或螺栓松动,导致蒸汽微泄漏。

以上异常点是蒸汽能在输送过程中最重要的散失途径。根据热力学公式和专业软件估算,仅这些可见的热损失,每日造成的能量浪费折合蒸汽量约12吨,约占总供气量的5%。

通过蒸汽计量系统,将锅炉房总管输出的流量 $Q_{\text{总}}$ 与所有用能车间支管测得的流量之和 $Q_{\text{支}}$ 进行比对。

计量数据:一周内,日均总管供气量 $Q_{\text{总}}=240$ 吨

各车间支管用量之和 $Q_{\text{支}}=204$ 吨

未计量损失: $Q_{\text{总}}-Q_{\text{支}}=36$ 吨/天

损失率: $36/240=15\%$

用“收入—支出”的方法算了一笔总账,锅炉房总共送出了240吨蒸汽,但各车间汇总后实际只收到204吨蒸汽。这意味着,有36吨蒸汽(约15%)在输送过程中“神秘消失”了。红外成像仪检测到了约5%的“明面”损失(保温破损),剩下10%的“暗亏”很可能来自地下管道泄漏等难以察觉的地方。这说明,节能必须“明暗结合”综合治理。保温破损不仅是老化问题,可能反映出预测性维护体系缺失(如无定期红外巡检制度)、保温维修责任不明确等。

在本案例中,可见保温损失约占蒸汽总损失的1/3,而不可见泄漏损失约占2/3。这提示我们,红外检测虽能快速定位问题,但必须结合流量计计量才能评估全貌。

2.2 压缩空气系统能效测试结果与分析

对压缩空气系统进行连续的在线性能测试,测试数据汇总如下。

表2 空压机测试数据表

日期	总用电量(kWh)	总用气量(m^3)	压缩空气单耗(kWh/m^3)	运行比功率($\text{kW}/(\text{m}^3/\text{min})$)
第一天	1495	9578	0.1561	6.73
第二天	1958	11523	0.1699	6.95
第三天	1828	11431	0.1599	6.86
第四天	1928	12835	0.1502	6.69
第五天	2138	13602	0.1572	6.77
第六天	2090	12563	0.1664	6.92
第七天	2069	12476	0.1658	6.85
合计	13506	84008	0.1608	6.82

通过测试数据,测试机组的平均单耗为 $0.1608\text{kWh}/\text{m}^3$ 、平均比功率为 $6.82\text{kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ 。根据国家标准GB 19153-2019《容积式空气压缩机能效限定值及能效等

级》,对于风冷式额定压力 0.8MPa 、功率 160kW 的空气压缩机,二级能效为 $6.5\text{kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ 、一级能效为 $6.0\text{kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ 。简单来说,空压机比最优水平多耗了将近12%的电能,这就是节能的空间。

3 能源诊断建议与效益预测

3.1 蒸汽管网改造建议

保温修复与升级。对所有红外检测发现的保温破损处进行修复。对所有外露的阀门、法兰安装可拆卸式保温套。对于关键长输管线,可考虑采用气凝胶等新型高效保温材料进行升级改造。

疏水阀综合治理。对所有疏水阀进行一次检查,更换所有确认堵塞和泄漏的疏水阀。建议采用性能更可靠、寿命更长的组合型或热动力型疏水阀,并建立定期(如每季度)检测维护制度和台账,确保其正常工作。

管网泄漏点排查与修复。对管网流量进行平衡分析,排查管网泄漏点,进行修复。

3.2 压缩空气系统能源诊断分析

该企业目前已有变频压缩空气机组,通过现场诊断,单纯更换某台设备机组无法解决系统性问题,必须从整体控制策略入手。

引入基于工业物联网的压缩空气智能联控系统。众多案例已证明,智能联控系统在压缩空气系统节能优化方面效果显著。该系统具备以下核心功能:

数据融合与需求预测。持续融合各机组功率、出口总流量、管网末端压力等参数。通过系统学习算法分析历史数据,建立用气模型,对短期内的用气需求进行预测。

寻优控制算法。实时预测瞬时流量趋势,提前预判工况变化,为调控策略做支撑。根据预测的用气需求,系统自动计算并执行最优的机组启停与负荷分配组合。核心控制策略为:最大化利用变频机组的调节能力,使其作为主力调节机,平稳应对负荷波动;让工频机尽可能运行在满载或近满载的高效区,最大限度减少其低效的加卸载运行。

压力带精细化控制。将供气压力设定在一个宽窄的浮动范围(例如从 $0.7\text{MPa}\sim 0.8\text{MPa}$ 降到 $0.7\sim 0.72\text{MPa}$)。众多案例研究表明,供气压力每降低 0.1MPa ,系统能耗可降低约6%左右。采用预测调压方法调节压缩空气机组运行状态与压缩空气压力设定值,达到空压站管网压力平衡调节。

智能联控系统：相当于给一群“单干户”空压机配上一个“总指挥”。这个“总指挥”（智能系统）能实时预测全厂用气需求，然后智能安排哪台机器启动、哪台变速运行、哪台休息，让整个团队始终保持最高效、最省电的状态。通过实施智能联控系统，预计可将压缩空气系统比功率实现一级能效水平 $6.0\text{kWh}/\text{m}^3$ ，节能率约12.1%。根据现有能源计量系统，空压站全年用电量约为90.5万kWh，节约量约为10.95万kWh。

余热回收：空压机运行时，超过70%的电机会变成热能，通常直接用风扇排掉。余热回收就是给空压机装一个“热水器”，把这些废热收集起来烧热水，用于生产或生活，变废为宝。实现了能源的梯级利用与二次循环，进一步提升系统整体经济性与稳定性，是工业节能降耗的重要技术手段。

3.3 改造项目效益预测

通过能源诊断分析，下表列出了各项改造的“投资账单”和“节能收益单”。可以看到，所有项目都在3年内回本，其中蒸汽管道保温修复甚至不到1年就能收回投资。

表3 蒸汽管网改造项目经济效益评估表

项目名称	预估投资 (万元)	年节约蒸汽 (吨)	年节约成本 (万元)	静态投资回收期 (年)
保温修复与升级	28	1548	32.508	0.86
疏水阀综合治理	72	3096	65.016	1.11
管网泄漏修复	50	2556	53.676	0.93
合计	150	7200	151.2	1.01

注：蒸汽成本单价按210元/吨计算。

表4 压缩空气系统节能改造项目经济效益评估表

项目名称	预估投资 (万元)	年节约用电量 (万kWh)	年节约成本 (万元)	静态投资回收期 (年)
系统泄漏治理	5	4.53	3.62	1.38
智能联控系统	25	10.95	8.76	2.85
余热回收	38	替代蒸汽	31.78	1.21
合计	68	15.48	44.16	1.54

注：电力平均单价按0.8元/kWh、蒸汽成本单价按210元/吨计算。

3.4 建立长效能源管理机制

以蒸汽管网、压缩空气系统为基础，构建覆盖全厂的能源管理系统，该系统应具备模块化架构，包括数据采集层、网络传输层、平台应用层和数据展示层等，并支持标准化的数据接口（如Modbus TCP等）以便未来扩展。

能源管理系统的建立，将使全厂的能源管理从“事后统计”转变为“实时监控、提前预警、持续优化”的智能化模式。系统可以自动生成能耗报表、进行能效对标、识别异常用能，为管理决策提供量化依据，实现节能降碳工作的制度化和长效化。

4 结论与展望

本次研究对某烟草薄片公司的能源诊断，通过综合运用红外热成像、流量计、三相功率计等诊断工具，成功地识别并量化了其蒸汽系统和压缩空气系统存在的关键能效问题。研究证实，蒸汽管网的热损失和疏水阀失效是主要的“隐形”能源浪费点，而压缩空气系统的固有运行模式是电能消耗的主要原因。结论如下：

4.1 方法有效性。采用专用工具的诊断方法能够克服单一技术的局限性，实现从“定性发现”到“定量评估”的跨越，为节能决策提供了坚实的科学依据。

4.2 节能潜力大。即使该企业已经具备一定能源管理基础，其公用工程系统中仍普遍存在10%~20%的能源浪费，显示了深度能源诊断的必要性和紧迫性。

4.3 经济可行性强。本研究提出的节能改造方案，无论是针对管网还是压缩空气系统，均具有显著的经济性，能够在短期内收回投资，并持续为企业创造价值。展望未来，本次“点状”诊断与改造建议的成功实践，可进一步延伸为工厂能源管理“面状”智能化升级的起点。具体而言，可以从以下层面持续进阶：

4.4 管理数字化：从“定期体检”到“实时监控”。将本次的离线测试仪表升级为永久安装的在线监测网络，构建覆盖全厂的能源数字孪生底座，实现能耗异常的自动预警与根源追溯，变被动维修为主动预防。

4.5 系统协同化：从“单兵作战”到“军团调度”。打破水、电、气、热等能源子系统间的壁垒。例如：探索利用空压机余热回收，或基于分时电价智能调度空压机等柔性负荷，实现跨系统的全局能效与成本最优。

4.6 决策智能化：从“经验驱动”到“AI寻优”。在积累足够运行数据后，引入机器学习算法，对空压机组合、锅炉负荷分配等复杂问题进行动态建模与实时优化，让系统具备“自学”能力，持续逼近最佳运行状态。

结语：综上所述，本研究提出的能源诊断框架、技术路径和方法论，不仅适用于烟草薄片行业，也对纺织、食品等所有依赖蒸汽和压缩空气的制造行业具有普遍的借鉴意义，将有力推动我国工业领域的节能降碳，为实现“双碳”目标贡献力量。

参考文献

- [1] 工业锅炉节能减排应用技术[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [2] GB 19153-2019, 容积式空气压缩机能效限定值及能效等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [3] GB/T 16665-2025, 空气压缩机组及供气系统节能监测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.