

汽车制造业冷站系统节能优化思路与实践路径

薛立威 夏雨

格兰富水泵（上海）有限公司

摘要：在“双碳”战略持续推进以及制造企业普遍面临电价上涨与降本压力的背景下，冷站系统已成为汽车制造能效优化的重要突破口。本文基于现场普遍存在的高能耗、设备老化与系统响应滞后的问题，提出一套“分阶段—分层级—系统化”的节能优化策略。通过典型项目案例，结合投资回报模型（PPR）与数字化管控平台，系统分析冷站系统节能路径的可行性与商业价值。研究结果表明，分阶段升级改造可实现综合能耗降低 25% 以上，投资回收期控制在 3 年以内，具备良好的推广价值和行业参考意义。

关键词：冷站系统；汽车制造；节能改造；系统优化；投资回报

0 前言

近年来，汽车制造业面临多重压力，能源价格上升、碳排指标趋严及设备更新缓慢等问题日益凸显。集中冷却系统（以下简称“冷站系统”）作为能源密集环节，其能效水平直接影响工厂的运营成本与碳排绩效，已成为智能制造体系中亟需优化的重要组成部分。工业制冷设备平均占制造设施总能耗的 15% ~ 35%，在汽车和食品加工等能源密集行业，这一比例在旺季可能超过 50%。

本文聚焦于冷站系统节能改造路径设计，基于多个成功项目实践，提出一套可复制、可量化、分阶段推进的优化框架。通过高效设备更新、系统联动控制、平台化运维等手段，实现从“设备节能”到“系统协同”再到“平台驱动”的节能闭环，为汽车制造企业在绿色低碳转型过程中提供技术路径与决策参考。

1 冷站系统节能现状与挑战

1.1 常见问题分析

中国工业制冷设备的发展历程可分为六个阶段，每个阶段都有其独特的技术需求和优化重点。到 2030 年，中国工业冷却站的总数（包括化工、电子和数据中心行业）将达到约 60000 个，年增长率约为 6%。中国约 90% 的制冷设备仍处于 1 ~ 3 阶段（CRAA 2023），需要分阶段升级以释放能源潜力，4 ~ 5 阶段为工业脱碳

领先水平，如图 1 所示。

阶段05 净零	2026-2030年	EER (> 7.0)	• 制冷设备：氢燃料电池驱动装置 • 冷却塔：相变蓄热复合系统 • 泵：磁悬浮无轴泵
阶段04 低碳	2021-2025年	EER (5.0-7.0)	• 制冷设备：空气轴承驱动装置 • 冷却塔：光伏驱动冷却塔 • 泵：数字孪生优化系统
阶段03 智能	2016-2020年	EER (4.0-5.0)	• 制冷设备：磁悬浮离心式制冷设备（部分负荷效率提高40%） • 冷却塔：变速驱动+动态补水系统 • 泵：智能泵组控制（温差/流量双反馈）
阶段02 标准	2011-2015年	EER (3.5-4.0)	• 制冷设备：变速螺杆装置（IPLV≥6.0） • 冷却塔：闭环蒸发冷却塔 • 泵：一次变频控制
阶段01 老旧	2010年之前	EER (<3.5)	• 制冷设备：往复式/螺杆式定速装置 • 冷却塔：开式横流冷却塔 • 泵：定速工业泵

图 1 中国工业制冷设备的发展历程可分为六个阶段

（注：能效比 $EER = \frac{\text{冷却能力 (RTon)}}{\text{功率输入 (W)}}$ ）

当前冷站系统普遍存在以下问题：设备老化、选型冗余，导致运行效率低；多为定频控制，无法根据负荷变化动态调节；缺乏能耗监测与调控机制，能耗数据碎片化；运维高度依赖人工，维护频繁、响应滞后。上述问题直接导致系统运行效率低下，形成大量“隐性能耗”，对工厂的综合能效管理构成挑战。

在汽车制造业中，约 55% 的现有制冷设备属于第 1 至第 2 阶段的系统，这些系统需要进行关键升级以达到现代能效标准。能源性能方面的差异尤为明显，第 1 阶段的制冷设备的能耗平均比第 3 阶段的先进系统高出 35% ~ 45%。第 2 阶段则相比第 3 阶段高出 15% ~ 25%。这些老旧设备往往受制于过时的技术和欠佳

的设计，这极大地影响了运营效率和成本竞争力。对这些系统进行升级对于实现节能以及满足可持续制造实践的行业标准而言至关重要。

1.2 汽车行业制冷设备的能源优化

根据联合国工业发展组织（UNIDO）的工业能源基准，制冷设备是汽车制造业中公用设施能耗最高的系统之一，在我国工厂的公用设施总能耗中占比达 18% ~ 25%。然而，该行业仍存在严重的低效问题，许多工厂还在使用老旧的系统，这些系统的性能系数（EER）仅为 2.9 ~ 3.5，而现代化系统的 EER 值能够达到 4.0 或更高。尽管先进技术已广泛普及，但仍有超过 60% 的工厂在使用定速离心式制冷设备，从而错失了 30% ~ 40% 的潜在节能机会，如图 2 所示。

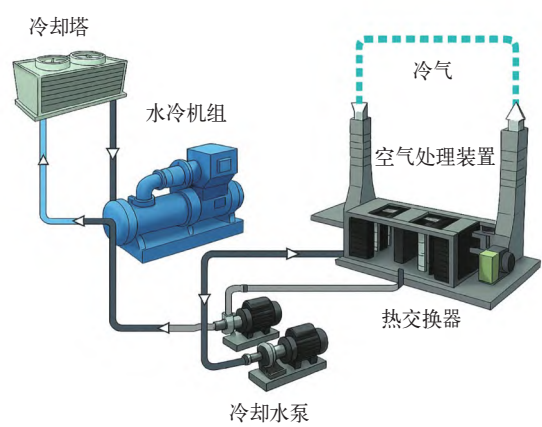


图 2 泵在制冷设备的发展进程中起着核心作用

泵在制冷设备的发展进程中发挥着核心作用。根据美国采暖、制冷与空调工程师学会（ASHRAE）最新的技术研究，针对制冷设备进行战略性的泵系统优化能够取得显著成果：通过部署先进的泵送解决方案，每降低 1℃ 的温差，设施的整体能效就能提高 2% ~ 3%。

2 冷站系统节能路径与应用框架

本文提出“三阶段节能路径”，以适配不同类型工厂的节能需求和实施能力，如图 3、图 4 所示。

阶段 1 ~ 2：设备级改造，以高效变频泵替代定频泵，降低基础能耗；

阶段 2 ~ 3：系统级联动，通过传感器与智能控制器实现协同优化运行；

阶段 3 ~ 5：智能水解决方案：部署智能水系统平台，利用大数据驱动策略优化与远程调控。

2.1 阶段 1 ~ 2：基础设备升级（高效泵改造）

目标：通过替换低效设备，实现能效“即刻可见”

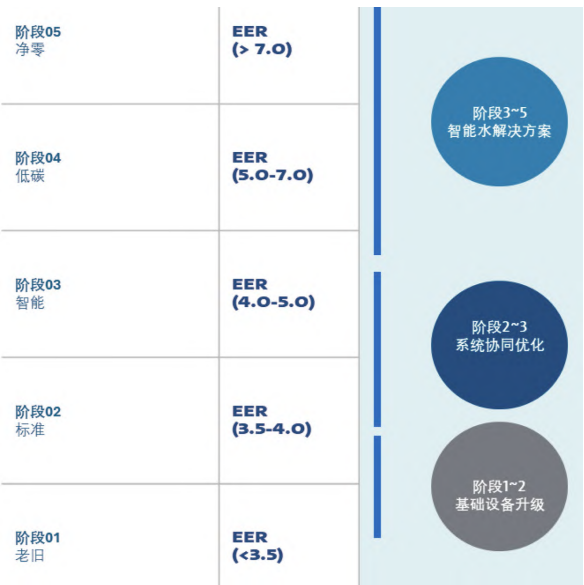


图 3 三阶段节能路径



图 4 从泵到 E-Solution 再到 iSolutions 的解决方案

提升。

改造内容：将原有定频泵更换为格兰富“E 泵（集成式智能变频水泵 IE5 电机标准，配套变频控制），具备更精准流量调节能力。

附加价值：

- （1）内置控制逻辑，自动调节压力 / 流量以应对负荷波动；
- （2）降低因超配导致的无效能耗，节能率可达 10% ~ 15%；
- （3）设备即插即用，改造周期短，适合起步阶段实施。

2.2 阶段 2 ~ 3：系统协同优化（泵 + 控制 + 传感器）

目标：实现水系统的动态调节，避免“局部节能、系统浪费”现象。

改造内容：

- （1）增设温度、压力、流量传感器；
- （2）引入格兰富 CU3 系列控制器进行泵组联动逻辑调节；
- （3）根据负荷智能调节冷冻泵、冷却泵与末端换

热装置配合。

附加价值：

(1) 系统可自动识别运行模式（昼夜 / 淡旺季）进行智能切换；

(2) 有效提升系统稳定性，降低故障频率；

(3) 实现冷站系统内不同泵组协同，提升整体 EER 10% 以上。

2.3 阶段 3 ~ 5：智能水解决方案（数字化能效平台）

目标：打造具备“预测能力 + 远程管理”的数字化冷站系统

改造内容：

(1) 接入格兰富 BuildingConnect 或 UtilityConnect 平台；

(2) 实现水系统全链路数字孪生、远程监控和 AI 算法优化运行参数；

(3) 支持能耗趋势预测、异常报警、能效 KPI 可视化。

附加价值：

(1) 运行工况持续调优，节能潜力可提升至 25% ~ 40%；

(2) 提供节能“看得见”的数据依据，支撑决策与后期扩展；

(3) 管理层可跨站点远程查看能效表现，助力集团级节能战略部署。

2.4 节能投资回报评估模型（PPR 模型）

格兰富提供涵盖产品、系统、平台的整套节能方案：包括 IE5 等级高效电机、多级变频泵、集成逻辑控制器与 iSOLUTIONS 能效管理平台。该方案已在多个制造场景验证，其分阶段投资回报周期短、节能成效明确，适用于大多数冷站系统优化需求。

格兰富通过建立节能潜力—投资回报—风险（PPR）评估模型，为用户提供系统性评估工具，见表。

2.5 冷站数字化运维趋势展望

随着工业 4.0 的推进，冷站系统逐步从“能耗黑箱”向“透明、可控及智能化”的方向发展。未来系统将呈现三大趋势。

表 节能投资回报评估模型

节能阶段	投资额	预期节能率	平均回本期	适配工厂场景
阶段 1 ~ 2 (设备升级)	低	10% ~ 15%	1 ~ 2 年	初步节能需求工厂
阶段 2 ~ 3 (系统协同)	中	15% ~ 25%	2 ~ 3 年	能耗较高、系统老旧
阶段 3 ~ 5 (智能优化)	中高	25% ~ 40%	3 ~ 4 年	多厂区 / 大型总装基地

(1) “边缘设备 + 云平台”协同，实现远程监控与预测性维护；

(2) 通过数据可视化辅助节能 KPI 管理，推动工厂智能决策；

(3) 多站点能效对标，支撑集团级降本增效战略落地。

3 成功案例

3.1 项目背景与问题诊断

位于班加罗尔的博世汽车电子印度公司生产电子控制单元，急需为电子元器件的开发持续寻求各种节能途径。

该工厂主要生产火花塞、发动机、交流发电机和燃油系统设备，服务于国内外的 OE 客户。其冷却系统能耗占比超 50%。原系统存在选型偏大、定速运行、效率低、维护频繁等问题，制约了运营成本控制与碳排放管理。

3.2 方案设计与实施

格兰富首先对其冷冻水系统进行了能源审计，以评估其能源消耗和能源效率。调查显示，泵的尺寸过大，导致运行和维护成本上升。

为了区分传统泵（IE2/IE3）和格兰富 E 泵的能源使用情况，格兰富还进行了进一步的模拟研究，然后提出了一种配备 IE5 (MGE) 电机的 CRE 泵，这是一种集成驱动装置的多级泵，可不断调整泵的性能以适应动态变化的需求，如图 5 所示。



图 5 格兰富水泵被安装在博世印度的水冷系统中

本次改造采用的是本文提及的“阶段 3 ~ 5”的方案：系统进行了智能优化。

设备替换与控制策略优化：把原有的水泵替换为格兰富 CRE 64-1-1 P-F-A-E-HQQE (IE5) 高效集成驱动泵，共计 6 台，用于冷冻水二次泵系统。保留原有第三方变频器（如 ABB），并增加格兰富控制逻辑与传感

器，实现了冷却水出水温度控制与冷冻水恒压差控制。

数字化平台集成：集成格兰富 GiS 智能云平台，实现泵系统的远程运维、预测性维护与能效优化。实时采集运行数据（流量、压力、温度和电流等），并进行分析与报告。

通过一系列的改造，格兰富成功实施了冷冻水循环系统的试点项目，使效率和可靠性提升了 45%。

3.3 实施效果

通过使用格兰富 E 泵，博世汽车电子印度公司的工厂系统能效提升约 45%，整体能耗下降 65%，年节约能源 188 MW · h/年，投资回报周期 9 个月，年减排二氧化碳 135 t。维护成本显著降低，实现了可持续发展目标。此外，博世汽车电子印度公司还获得了 CII 颁发的低成本自动化金奖。

4 结语

冷站系统作为高能耗环节，在节能改造中具备显著潜力与现实可行性。本文通过提出“设备 + 系统 + 平台”三阶段优化路径，结合典型项目实施与 PPR 投资回报模型，为汽车制造行业提供了技术 - 经济一体化的节能解决方案。建议行业主管部门与制造企业协同推进以下措施：建立冷站能效等级评估机制；鼓励采用平台化能效管理与远程调优技术；将节能改造纳入绿色工厂认证与碳达标指标体系。通过系统化、数据化手段提升冷站系统效率，将为实现制造业高质量发展与“双碳”目标提供坚实支撑。

参考文献

[1] 澳大利亚能源署. 冷水机组能效数据手册 (Chiller Efficiency Factsheet) [S/OL]. 堪培拉：澳大利亚

工业、科技与能源部，2021. <https://www.energy.gov.au/sites/default/files/2021-06/Chiller%20Efficiency%20Factsheet.pdf>.

[2] ABB 公司. 革新汽车涂装工艺：数字化节能路径 [EB/OL]. 苏黎世：ABB 集团官网，2022. <https://new.abb.com/automotive/revolutionizing-paint-shops>.

[3] ABB 公司. 实现 IE5 能效等级：无磁同步电机系统白皮书 [R]. 苏黎世：ABB，2023.

[4] 国际能源署 (IEA). “扭矩”背后的节能潜力：电机系统能效研究报告 (Walking the Torque) [R]. 巴黎：IEA，2024.

[5] 国际制冷学会 (IIR). 制冷行业在全球经济中的作用 (第 3 版) [R]. 巴黎：IIR，2025.

[6] 劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL). 冷水机组节能设计简报 (Design Brief – Chiller Plant Efficiency) [R]. 加州：LBNL，2017.

[7] 江森自控公司 (Johnson Controls). 中央冷站系统模型预测控制优化方案 [R]. 密尔沃基：江森自控，2020.

[8] DeepMind, Google. 利用机器学习降低数据中心能耗：Google 案例分析 [EB/OL]. 伦敦：DeepMind，2016. [2025-07-27]. <https://deepmind.google/technologies/data-centre-efficiency>.

[9] 金晓，赵颖，李源，等. 水冷式冷机在空调系统中的能效评估 [J]. 应用能源，2020，260：114210.

[10] 格兰富公司. iSOLUTIONS 助力博世印度冷站系统节能 65% 案例研究 [EB/OL]. 上海：格兰富中国官网，2024. [2025-07-27]. <https://www.grundfos.com/case-stories/bosch-india-chiller-energy-saving>.