



通威太阳能 质量白皮书

QUALITY WHITE PAPER

COPYRIGHT

版权声明

本白皮书的著作权为通威太阳能有限公司和德国莱茵TÜV集团所有，由双方共同负责发送和提供相关业务服务。

本白皮书无偿提供给限定客户，应限于客户内部使用，仅供客户在分析研究过程中参考，不得用于任何其他商业用途。

未经通威太阳能有限公司和德国莱茵TÜV集团书面许可，任何个人或组织，不得基于商业用途复制、传播本白皮书的任何文字、图片内容，在任何媒体上（包括互联网）公开发表或引用。否则，侵权方须承担由此产生的一切法律后果。通威太阳能有限公司与德国莱茵TÜV集团保留追究其法律责任的全部权利。

本白皮书所涉及的所有权利、条款及文字内容，其版权归通威太阳能有限公司与德国莱茵TÜV集团所有。其中，部分图表在标注有数据来源的情况下，版权归属原数据所有公司。

任何侵权行为，包括但不限于对版权、商标权、专利权及商业秘密的侵犯，侵权人必须立即停止侵权，并承担全部赔偿责任及法律后果。

CONTENTS

目录

序言	02
前言	04
第一章 通威太阳能质量文化与活动	
1.1 光伏市场发展与技术挑战	06
1.2 通威太阳能市场与质量表现	08
1.3 通威太阳能精益求精质量文化	10
第二章 通威太阳能质量管理方法论	
2.1 通威TOPCon电池工艺与质量	14
2.2 通威TOPCon电池未来技术优势	17
2.3 通威太阳能精益求精质量方法与工具	18
第三章 精益求精的质量管理	
3.1 全员质量管理：不同岗位所需的技能“三板斧”	25
3.2 全过程质量管理：不同类型问题解决的“三板斧”	35
3.3 全范围质量管理：客户旅程地图到供应链协同的生态质量	70
第四章 光伏质量的未来趋势与倡议	
4.1 数字化质量：智能与智慧	77
4.2 创新驱动未来	84
4.3 光伏行业质量倡议	85
附录	

序言

01

光耀时代 质引未来

当前全球光伏产业正处于能源革命与气候行动的历史激流之中。国际贸易壁垒与绿色新政的叠加形成了全新的竞争格局，全球光伏供应链也正加速区域化重构。与此同时，太阳能电池各类新技术规模化量产，推动转换效率持续突破，光伏产业正迈入一个以高质量发展为核心特征的新纪元。

在中国，新型电力系统建设全面铺开，“光伏+”多场景应用不断深化。行业正经历一场从“量的积累”到“质的跃升”的深刻变革。全生命周期度电成本优化、碳足迹精细化管理、产业链零碳协同，已成为衡量企业竞争力的黄金标尺。在这一进程中，质量管理的战略地位被提升至前所未有的高度——产品可靠性、工艺一致性与标准国际化，正成为企业穿越周期、赢得全球市场的关键支柱，更是面对绿色贸易壁垒时打开国际市场的“金钥匙”。

“诚、信、正、一”，是通威一以贯之的经营理念。通威太阳能始终将质量视为企业发展的永恒主题，是市场、效益的基础和前提。始终以客户价值最大化为目标规范全员意识和行为，以专业化、标准化、规模化水平严格管控产品质量形成的设计、制造、使用全过程。在全球竞争日趋激烈的背景下，我们更加笃定：唯有以质量为本，方能在红海中突破重围，于浪潮中行稳致远。质量管控，不仅是企业稳健运行的保障，更是驱动全价值链高效运转的中枢所在。

基于这一深刻认知与持续实践，通威太阳能以全球化视野与全产业链思维，凝练多年质量管理实践经验与创新成果，精心编撰《通威太阳能质量白皮书》。本书系统总结了光伏产业发展的机遇与挑战，全面呈现通威的质量文化、精益管理实践、质量方法论与创新实践，既是我们质量体系的全景展示，也是我们对行业、客户与社会的郑重承诺。

我们希望通过本书：

——让全体员工更加坚定“质量至上”的信念，把质量意识融入每一道工序、每一次改进、每一项创新；

——让客户切实感知通威对卓越品质的不懈追求与兑现能力；

——让行业伙伴共享通威的经验与思考，携手共促光伏质量管理的整体提升；

——让社会各界看到一家负责任的企业用行动诠释“以高质量发展立业、兴业”的坚守与担当。

未来，我们将继续以质量为基，以创新为帆，与全球伙伴携手并进，共筑信任与共识，书写光伏产业高质量、可持续发展的崭新篇章。

周华
通威太阳能有限公司

数质驱动 智致千里

尊敬的客户、合作伙伴及行业同仁：

在全球能源转型与可持续发展驱动的产业时代变革浪潮中，光伏行业已然成为推动可再生能源普及、助力全球“双碳”目标落地的核心力量。近年来，光伏产业技术飞速发展，应用场景不断拓展，市场覆盖范围逐步扩大，但高速发展的背后，也伴随着技术更新迭代加快、市场竞争加剧等挑战。作为全球光伏产业的领军者，中国光伏企业正迫切需要从“规模优先”转向“质量引领”——以卓越品质构建全球产品竞争力，真正扛起引领行业可持续发展的重任。

通威太阳能连续八年蝉联电池片出货量全球第一（出货排名来源InfoLink），这不仅是规模的成就，更是对质量不懈追求的成果。本白皮书系统呈现了通威太阳能独具特色的“精益求精”的质量文化，同时将“精细化生产+数字化工具”深度融合，形成了一套全面的质量管理模式，为全行业在质量战略制定、质量文化建设、质量人才发展、技术路线革新等方面，提供了全方位、可复制、可落地的优秀标杆范式。

值得一提的是，通威太阳能与德国莱茵TÜV集团的战略合作，是本次白皮书顺利成稿的重要基石。双方基于对质量价值的共同追求，自合作初期便确立了“客户导向、数据驱动、体系优化、文化塑造”的基本方向。在精益六西格玛项目的深度推进和实施过程中，我们共同见证了通威团队高效的执行力和对未来质量管理模式的前瞻性，探索出从目标设定到攻坚克难再到经验推广，最终实现财务收益的清晰路径，并深切感受到“精益求精”文化带来的价值与蜕变。这种“联合攻坚、知识传递、能力内化”的新合作模式，不仅助力通威构建了自我迭代的质量提升机制，更为光伏行业输出了全球领先的质量管理方法论。

尤为突出的是，通威率先在光伏行业搭建起数字化质量生态体系。依托单片追溯系统、AI质检预警等创新应用，成功实现了从“数据驱动”的理念探索，到“数字化质量管理”成熟实践的关键跨越。这一以数据为基石的质量管理模式，不仅显著提升了质量异常响应效率，更推动通威太阳能实现了从“发现和解决”到“预测和预防”的全流程升级。

本白皮书的价值，在于它超越了单一企业的经验总结，更以系统化的方法论梳理、详实的案例剖析以及前瞻性的趋势研判，探索了光伏行业的质量升级路线图，也为中国光伏企业在引领全球技术创新、参与国际质量标准构建提供了关键支撑。

展望未来，质量必将成为光伏企业穿越行业周期、赢得长期竞争的核心利器。期待本白皮书能进一步激发全球光伏行业对质量创新的深度探索，推动全行业共同迈向高质量、可持续的发展新征程。

谨致
敬礼！

莱茵技术监护（深圳）有限公司

光伏行业当前虽处于寒冬，但在全球能源转型和“双碳”目标的大趋势下，其长期发展前景依然被看好。相对于其他传统制造业，光伏行业很年轻，迭代发展也很快，其中就存在很多问题，比如规格公差的设计传递、某些过程控制的标准与策略等还没有达成行业共识，对产品问题的改善也缺少系统性的方法和工具。

通威作为行业龙头企业，质量被重视为核心竞争力，在寒冬中“修炼内功”，通威提出了“精益求精”的质量理念。结合光伏制造和数据量多的特点，不断探索，确定了“系统化+数据驱动”的双引擎，部署长期的战略规划并执行落实，获得了丰厚的财务回报。在此过程，首先提升人员素养与技能，将质量“由薄变厚”，再沉淀和归纳各种质量问题的解决方法论和部门的“三板斧”，将质量“厚积薄发”，让更多的人可以更高效地改善产品和流程，在本白皮书为大家呈现。

第一章节介绍通威太阳能“精益求精”的质量文化和质量活动，可以理解为其质量的“道”与“法”；第二章节结合TOPCon电池片的工艺与质量关注点，简介了通威太阳能在开展“精益求精”活动中常用的质量方法和质量工具，可以理解为其质量的“术”与“器”。这些是通威太阳能“精益求精”质量“由薄变厚”的长期战略的坚定执行。

第三章在质量文化进入成熟期时，思考如何“厚积薄发”。从三个维度展开：一是梳理每个部门的责任KPI，对应其需要的岗位专业技能、适用的质量工具、和未来发展的数字智能能力，以实现全员的普适性质量，并前瞻性地将人员的发展与企业发展相结合；二是对各种类型问题的改善进行总结，归纳逻辑链与工具链的系统性方法论，以实现同类改善的复制性，并通过质量实践的案例，显示其梳理的方法论还具有跨行业的复制性；三是展示从“客户需求为中心”到全域的多部门跨职能质量管理，再到供应链的协同改善，实现全方位质量管理。

第四章启动质量提升的第三引擎“智能化”，将过程质量延伸到设计质量、数字化质量。挖掘“数据金矿”，AI大模型助力智能制造，看到质量与技术的未来趋势。

实践证明，通威太阳能特色的“精益求精”，不仅为制造企业提供了从“规模扩张”向“质量效益”转型的实践样本，更验证了制造企业从“成本管控”向“价值创造”升维的可行性。希望本白皮书也能为整个光伏行业的质量健康发展提供借鉴与示范。

王海

德国莱茵TÜV集团
卓越绩效资深专家
六西格玛黑带大师

第一章 通威太阳能 质量文化与活动

1.1

光伏市场 发展与技术挑战

当前，全球光伏产业正经历结构性变革，贸易壁垒高筑、技术迭代加速、产能过剩加剧，行业竞争格局持续恶化。中国光伏企业作为全球供应链主导者，面临海外市场围堵、现金流承压、供应链韧性不足及地缘政治风险等多重考验，生存空间遭受空前挤压。

2025 年全球光伏组件产能预计突破 1TW，而需求仅约 580GW^[1]，供需严重失衡导致价格持续探底——电池片价格已跌破 0.30 元 / W，组件价格跌破 0.70 元 / W 临界点，全行业利润空间被极大程度压缩。与此同时，生产端的能耗管控、原材料波动及工艺稳定性问题进一步侵蚀企业盈利能力。

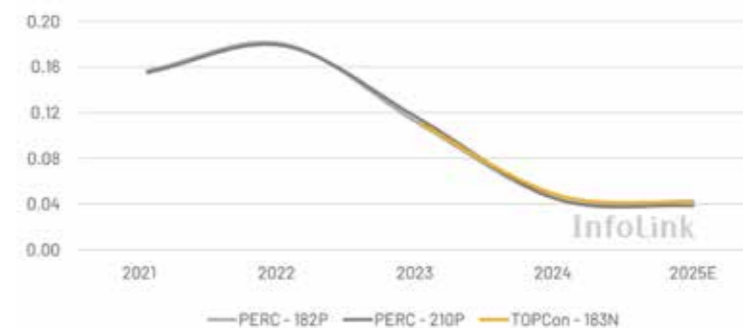


图1.1 2021-2025年中国电池片价格预测图 (单位:USD/W) ^[3]

根据 InfoLink 的调研，2024 年全球电池产能 1.130GW 左右，同比 2023 年下降约 5%。电池片环节的总产能增长率开始放缓^[2]，结束高速增长的趋势。

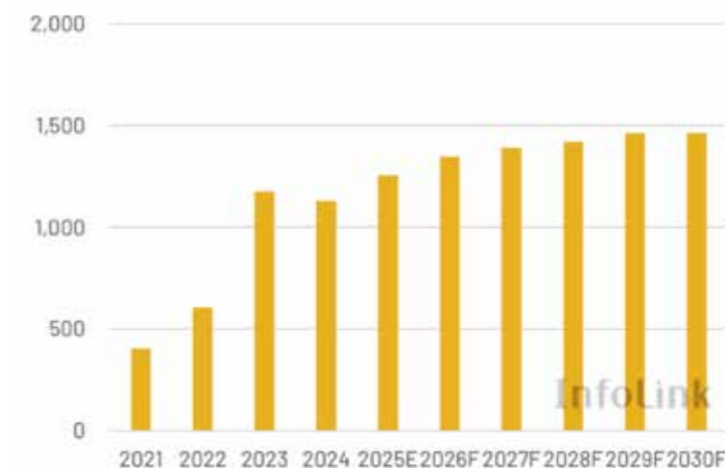


图1.2 2021-2030年全球电池片产能预测图 (单位:GW) ^[3]

注：图1.1 2021-2025年中国电池片价格预测图、图1.2 2021-2030年全球电池片产能预测图来源 InfoLink

技术与路线预测

电池片企业以提升光电转换效率作为主要发展目标，同时探索减少成本的方法，由此推动了电池技术的不断迭代。从多晶转换为单晶，从 P 型 PERC 技术转为 N 型 TOPCon、异质结 (HJT) 或背接触 (back contact, XBC)，以及钙钛矿叠层的新型太阳能电池片技术自主创新与突破，造就了中国光伏产业在全球的主导地位。

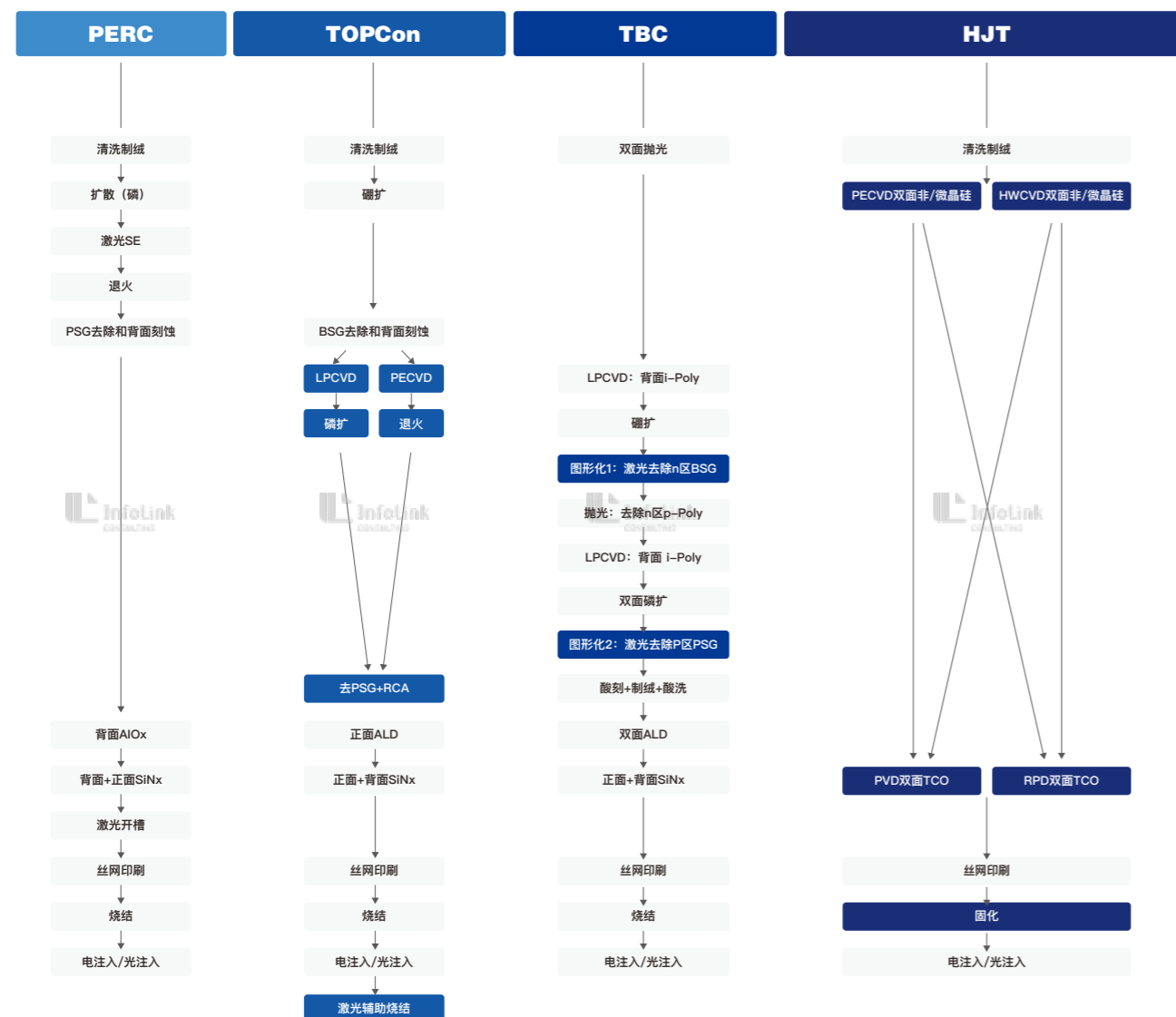


图1.3 电池片工艺比较 [1]

随着 PERC 产线陆续退市，TOPCon 将兼容原先的 PERC 产线，加上 TOPCon 具备效率与 HJT 相差不大，理论效率极限可达 28.7%，成本却低于 HJT 的特性，成为当今市场上极具竞争力的技术产品，适合应用于大型集中式项目。[4]

注：电池片工艺比较数据来源 InfoLink

2024 年，TOPCon 市占率已超过 70% 的水平 [6]。2025 上半年统计显示，TOPCon 电池片作为当前最普及的技术路线，出货占比则已达到 88.3%。TOPCon 组件已成为全球前十大供货商的一致主力产品，预期将持续稳坐未来数年内的主流技术位置 [5]。

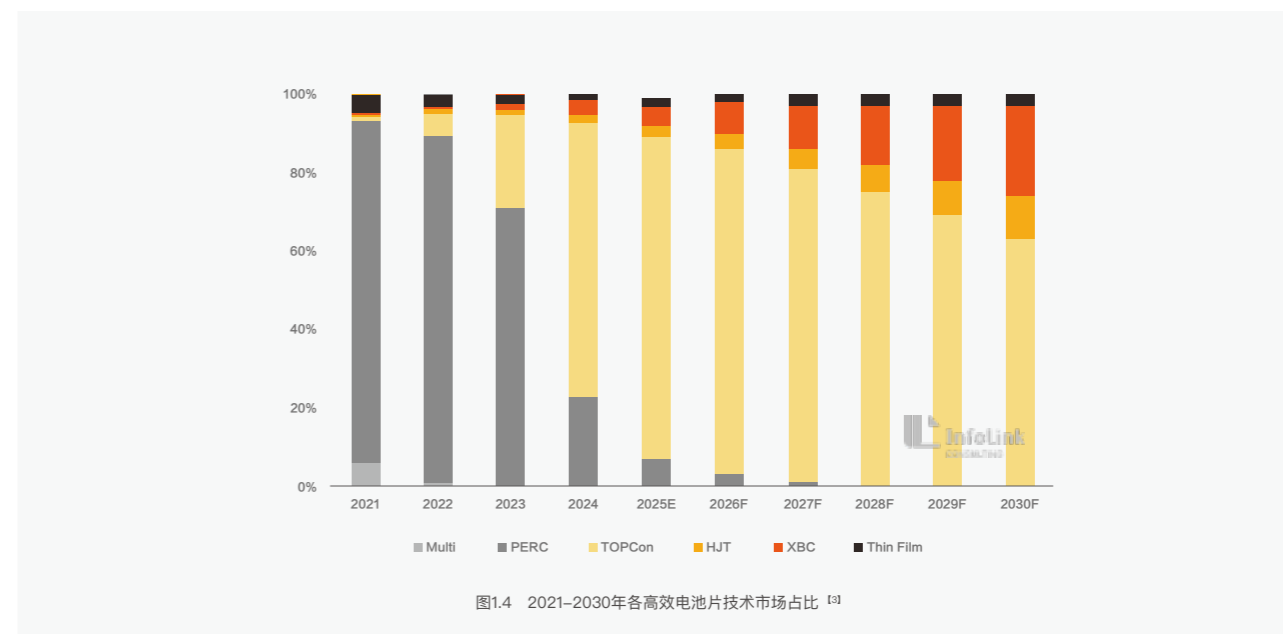


图1.4 2021-2030年各高效电池片技术市场占比 [3]

1.2 通威太阳能市场与质量表现

出货量全球第一

2025年上半年
通威太阳能电池片出货量
全球第一



太阳能电池出货量
连续八年蝉联
全球第一

200余条
智能制造生产线



现有太阳能电池产能
150GW+

全球首个
光伏5G运用基地



高级研发技术人员超
1200+

注：电池出货量排名数据来源 InfoLink

行业领先 效率卓越

在晶硅 N 型 TOPCon 电池制造方面，通威在行业规模和电池制造技术上处于行业领先地位。随着通威 TNC 电池技术不断创新，前沿的电池技术逐步导入产线，产业化 TOPCon 电池量产平均转换效率已达 25.7%。



2025 年 3 月 20 日，经国际权威认证机构 TÜV 测试，在 2382x1134mm 标准尺寸下，通威 TNC-G12R 组件正面功率达到 682.8 瓦，转换效率达 25.28%，较目前市场同版型量产主流功率提高约 60 瓦；

在 2384x1303mm 标准尺寸下，通威 TNC-G12 组件功率达到 778.5 瓦，转换效率达 25.06%，再次刷新了 TOPCon 两种主流版型的组件效率和功率纪录。^[7]

TNC-G12R 66版型组件

正面功率达
682.8W

转换效率突破
25.28%

TNC-G12 66版型组件

正面功率达
778.5W

转换效率突破
25.06%

1.3

通威太阳能 精益求精质量文化

通威股份质量方针

- 质量、市场、效益是公司发展的永恒主题，而质量是市场、效益的基础和前提。
- 准确识别客户本质需求，始终以客户价值最大化为目标规范全员意识和行为，以专业化、标准化、规模化水平严格管控产品质量形成的设计、制造、使用全过程。
- 持续改进质量管理体系，致力于打造效率领先、持续增值且不可替代的产业链，为社会提供安全稳定的产品，实现公司与客户共赢发展。

质量目标

通威采用并实施 ISO9001 质量管理、ISO37301 合规管理及各类专项管理体系，遵守国家法律法规，严格控制产品质量。

- 实现产品出厂 **100%** 合格
- 质量安全事故 **0** 发生
- 用户投诉处理率 **100%**

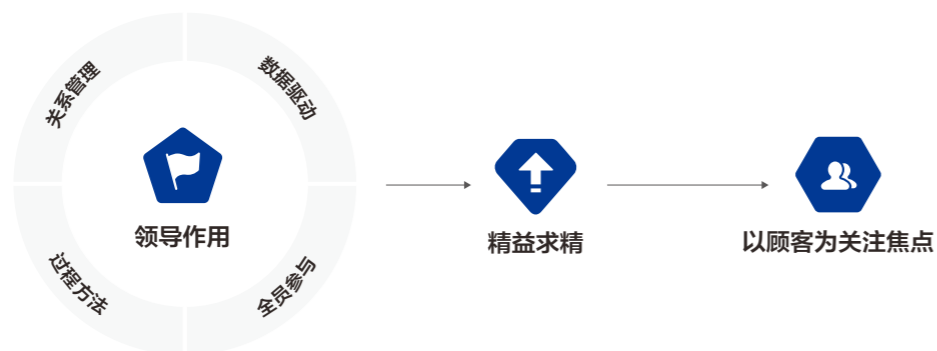


市场回暖尚需时间，行业竞争却不曾停歇。通威太阳能构建系统化的质量优化方法论，凭借其特色的“精益求精”的核心质量优势，成为光伏企业破局的关键杠杆。

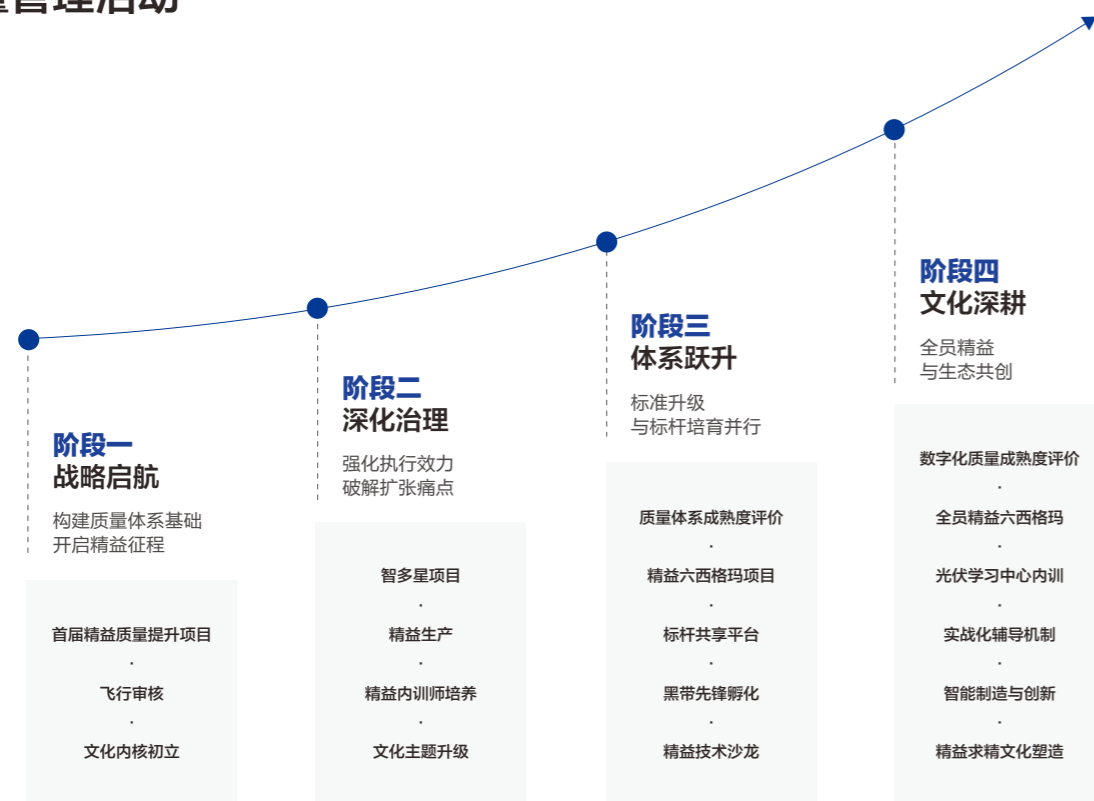
本白皮书从通威太阳能特色的“精益求精”质量文化与推行、质量方法论与工具的运用、质量实践未来趋势等，逐层展示，并聚焦质量提升、成本优化、工艺改进及产品提效等核心维度，结合行业最佳实践，提供可落地可复制的解决方案，助力在行业洗牌中构建可持续竞争优势。

通威太阳能精益求精的质量管理文化

构建通威太阳能特色“精益求精”的质量管理系统化模型，实现从战略（管理层）到执行（员工），从内部（过程）到外部（顾客、供应商），从静态（当前质量）到动态（持续改进）的全方位管理。对产品质量和 workflows、不满足现状、不断突破、追求完美执行与创新，提升客户满意度，夯实全球龙头地位。



通威太阳能精益求精的质量管理活动



通威太阳能立足战略高度，深耕“精益求精”特色文化，系统推进质量管理变革。通过构建“监督审核 + 精益项目 + 标杆引领”三位一体的驱动机制，历经“筑基（2022年）→ 攻坚（2023年）→ 立标（2024年）→ 共创（2025年）”四个阶段的持续跃迁，成功塑造了以“标准引领”与“智能驱动”为内核的“精益求精”质量生态，实现了从基础体系建设向行业生态共建的跨越式发展。

通威太阳能自推行具有特色的“精益求精”质量管理战略以来，始终着眼长远、稳扎稳打，逐步深化探索：

- 筑基阶段：**前期聚焦体系搭建与人才培育，为精益管理奠定坚实基础；
- 攻坚阶段：**发展过程中，通过精准施策与创新驱动，有效突破制约发展的瓶颈与难题；
- 深化阶段：**伴随实践深入，持续推进管理标准升级、流程优化与技术革新，实现精益管理体系的迭代升级推动质量水平持续提升。



- 合理化提案
金点子活动
- 质量月活动
- 全面质量管理
(TQM)
- QC 小组活动
- 质量大讲堂
- 精益六西格玛管理
- 质量专刊
- 质量意识培养
- 质量之星评比
- 全员生产维护
(TPM)
- 数字化质量
成熟度评价
- 精益文化沙龙

第二章 通威太阳能 质量管理方法论

2.1

通威TOPCon电池 工艺与质量

传统 TOPCon 电池制造主要使用 LPCVD 工艺，通威自 2020 年开始 TNC 电池研发，拥有行业首条大尺寸 PECVD Poly 沉积技术路线，为中国电池制造管式 PE-Poly 技术填补了行业空白，在 TOPCon 电池制造技术环节实现了创新突破与领先。^[8]

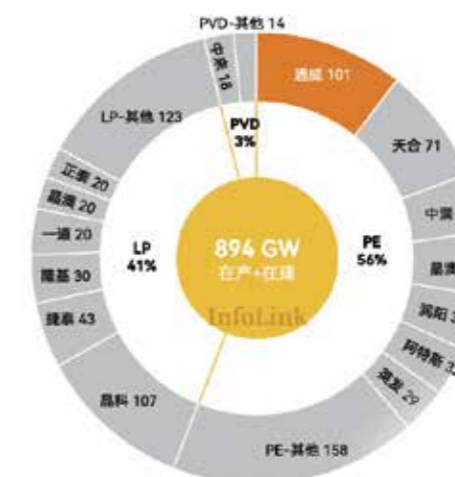


传统TOPCon电池
制造工艺流程

PECVD	LPCVD + 磷扩散	LPCVD 原位掺杂
制绒	制绒	制绒
硼扩散	硼扩散	硼扩散
刻蚀: 去BSG + 碱抛	酸抛或碱抛	酸抛或碱抛
PECVD 沉积和原位掺杂多晶硅	LPCVD 沉积本征多晶硅	LPCVD 沉积和原位掺杂多晶硅
退火	磷扩散	退火
去PSG + RCA清洗	去PSG + RCA清洗	RCA清洗
ALD、PECVD正面镀膜	ALD、PECVD正面镀膜	ALD、PECVD正面镀膜
PECVD背面镀膜	PECVD背面镀膜	PECVD背面镀膜
丝网印刷 + 烧结	丝网印刷 + 烧结	丝网印刷 + 烧结

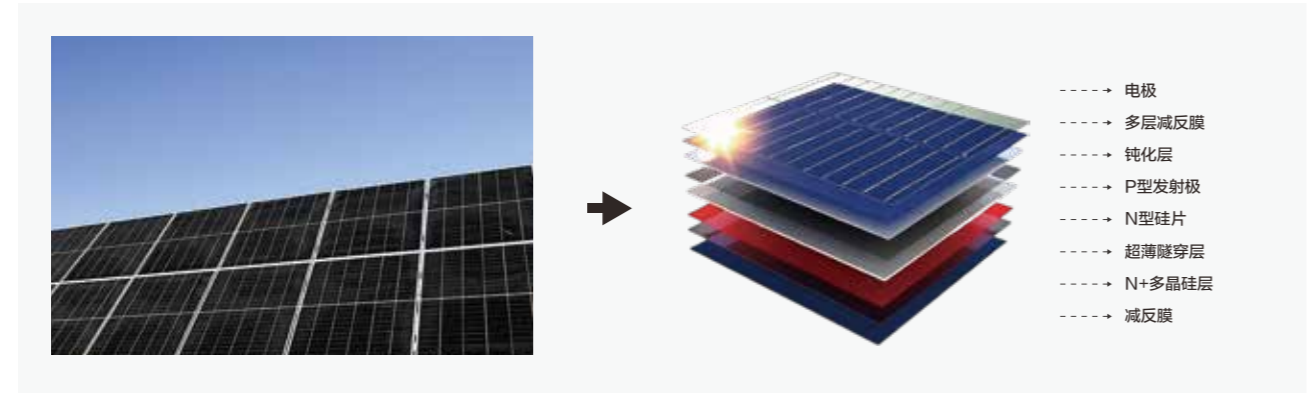
通威主导 PECVD 技术路线开发，在 InfoLink 统计中，PE-Poly 路线占比 56%，成为 TOPCon 量产主流技术。

背面 Poly 沉积产能占比, Unit: Gw ; %



注: 技术趋势调研来源 InfoLink

TOPCon电池工艺流程简介 以及质量关注点



■ Wafer
 ■ BSG
 ■ P+
 ■ SiOx
 ■ SiNx
 ■ AlOx
 ■ n+ -Poly
 ■ PSG

工艺功能说明	电池片膜层结构	质量关注点	
		关键过程特性CTP	关键质量特性CTQ
去除硅片杂质，在N型硅片表面形成绒面结构，减少表面反射率，增加光吸收	制绒	制绒槽 溶液配比	减重 反射率
在N型硅片正面掺杂硼元素，形成P+层，建立PN结，并在表面形成超薄氧化层，作为钝化层的基础	硼扩	通源步流量 推结步温度 石英舟使用次数	方块电阻 方阻均匀性
对背面进行抛光，去除边缘及背面BSG，保留正面BSG，为碱抛做准备	碱蚀蚀	去BSG槽电导率 碱抛槽溶液配比	减重 反射率 外观
形成钝化接触结构	SiO2/n+-Poly/SiOx	隧穿氧化层 非晶硅层气体流量 沉积时间	膜厚 膜厚均匀性 外观
掺杂物质激活	退火	退火	方块电阻 方阻不均匀性
去除正面PSG和边缘n+-Poly层，再去除正面BSG和背面PSG	去PSG+RCA	去PSG槽电导率 碱抛槽初配和补液	减重 外观
1. 采用原子沉积生成 AlOx 膜层，对电池场效应钝化，抑制电子复合 2. 正面沉积氮化硅，如 SiNx、SiOxNy、SiOx 叠层，具有减少光反射、提高光吸收及钝化作用	正AlOx/SiNx	腔体温度 TMA流量 脉冲时间 循环圈数	氧化铝厚度 SiNx膜厚
背面沉积氮化硅SiNx，降低寄生吸收，提升双面率、防止氧化	背膜SiNx	硅烷、氨气流量 底层膜硅氮比 沉积温度	SiNx膜厚 折射率 外观
1. 双面金属化，通过印刷主、细栅，形成正反面电极 2. 高温烧结形成欧姆接触，实现载流子收集与传输 3. 使用光照控制氢进行钝化处理 4. 激光辅助烧结增强金属与电池之间接触 5. 外观分选、缺陷测试、电性能分选	金属化 (丝网印刷、烧结、光注入、激光辅助烧结)	印刷压力 印刷高度偏移 烘干炉温度	湿重 印刷图形精度 栅线高宽比 EL、效率、外观缺陷

TOPCon电池 检验技术

硅片自动分选

可兼容156~230mm全规格硅片检验，集成尺寸、外观、电阻率、PL、色差等检测模组，支持自动数据分析统计。

量子效率QE测试

实现全光谱太阳光模拟（300-2500nm），可全面分析电池光谱响应度、内外部量子效率、反射率、表面均匀度等。

电池EPL检验

创新引入“EL动态预判+PL二次成像”的双系统协同机制，PL复检与比分析算法，为电池EL检测提供“双保险”判级模式，有效破解单次成像误判瓶颈。

网版AOI检验

图纸导入，自动解析生成检验策略，兼容多种版型。支持缺陷检测和图形对比，一键自动检测时间 < 5min。

离线&在线方阻测试

搭配自动化 Load / Unload 系统，实现全自动测量，具备图谱软件，厚度、边缘和温度补偿功能。检测数据自动接入 SPC 系统，动态监控产品关键特性。

电池&组件可靠性测试

拥有完备的电池及组件全套可靠性测试能力，严格对标 IEC 国际标准与客户要求，执行系统性、前瞻性的验证方案，为产品极致可靠性与长寿命提供坚实保障。

电池片AOI 缺陷检验及核心技术

缺陷类型	检测原理	技术方法
隐裂 / 微裂纹	光致发光 (PL) 隐裂区域晶体结构破坏 载流子复合特性改变 PL图像中呈现暗纹或亮纹异常	PL成像 + AI分类
崩边 / 缺损	轮廓几何偏差 像素对比异常	边缘检测 + 模板匹配
色差 / 脏污	HSV空间色度分布不均 局部灰度突变	分块扫描 + 差分运算
断栅	栅线连续性中断	形态学分析 + 连通域检测
漏浆	环形LED反射红光，浆料反光率高于硅基体，在异常区域呈现高亮	多光源融合比对

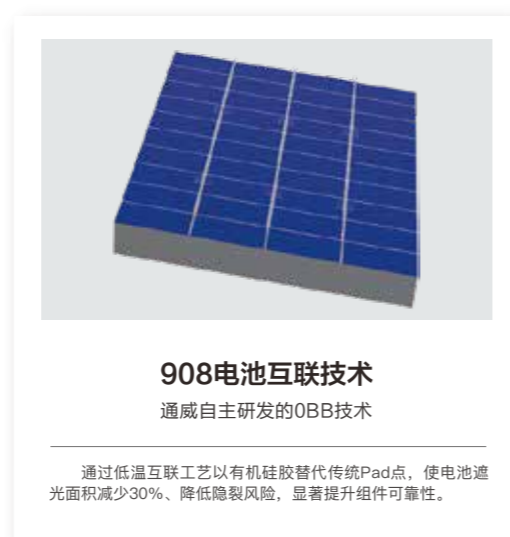
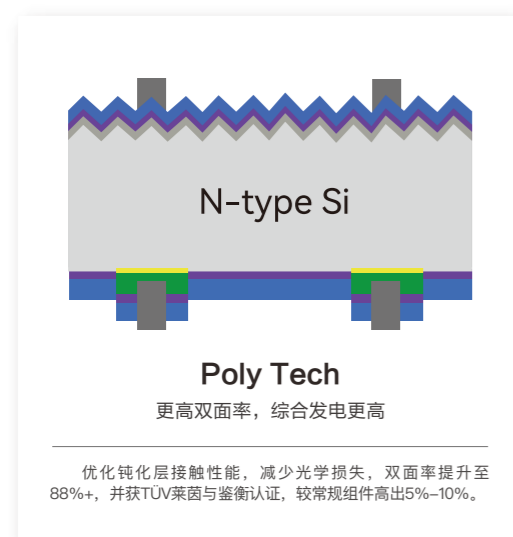
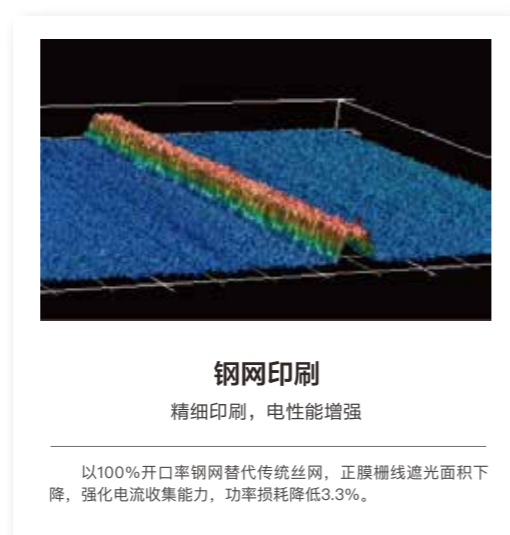
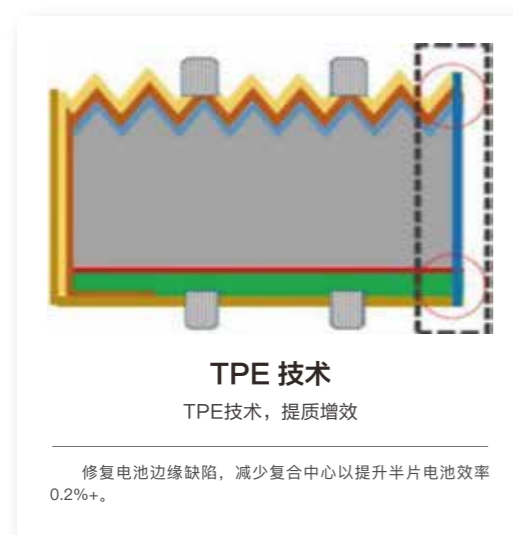
2.2

通威TOPCon电池 未来技术优势^[9]

通威的 TNC1.0 与 TNC2.0 电池在技术上实现了重大突破。二者均采用自主研发、行业领先的 PECVD 多晶硅沉积技术路线，这一先进技术为电池的高性能奠定了坚实基础。同时，叠加高效的二次烧结技术，在不损害非接触区域钝化层的情况下，成功实现了高质量的金属接触，有效提升了电池的电学性能。

经德国 TÜV Rheinland 认证，通威全球创新研发中心最新技术突破，基于 TOPCon 技术的电池双面率突破 94.3%，TNC2.0 组件双面率在技术研发层面达 88%+，这些数据意味着在同等光照条件下，较市场常规 TOPCon 组件双面率高出 5-10 个百分点，有效提升整体发电量，拥有更出色的发电表现。

在技术结构上 通威 TNC 2.0 融合了四大关键工艺



2.3

通威太阳能 精益求精质量方法与工具

在当今竞争白热化的市场环境下，企业要实现可持续发展，卓越的质量管理是关键。通威太阳能将各种质量管理方法灵活深度融入公司质量管理和企业战略规划，构建“CTQ（关键质量特性）- 财务收益”双维联动机制，确保质量管控与经营效益协同优化。以下介绍通威太阳能特色的“精益求精”质量管理里常用到方法与工具：

PDCA循环

又称戴明环，是将质量管理分为四个阶段，即 Plan（计划）、Do（执行）、Check（检查）和 Act（处理）。

8D问题解决工具

包括8个步骤，再加上一个准备步骤，这些步骤被用来客观地识别、定义以及解决问题，并且防止类似的问题再次发生。

QC七大手法

查检集数据，分层找差异；鱼骨追根因，帕累抓重点；直方观分布，散布看相关；管制稳流程，七器筑质量。

精益六西格玛到数字化六西格玛

六西格玛 源于统计原理，旨在通过系统化、结构化的业务改进与创新方法，运用严谨流程与科学手段，以数据驱动决策，以事实为依据，减少变异、提升质量与效率，最终提高顾客及利益相关方的满意度。

其具体实施模式为：界定（Define）、测量（Measure）、分析（Analyze）、改进（Improve）、控制（Control）五个阶段，简称 DMAIC。

精益 通过持续改进，识别和消除产品、服务和流程中的浪费/非增值作业的理念和方法。

精益六西格玛 是“做得更快（精益）”和“做得更好（六西格玛）”的结合。

定义阶段 Define Phase D	测量阶段 Measure Phase M	分析阶段 Analyze Phase A	改进阶段 Improve Phase I	控制阶段 Control Phase C
当前的主要问题是什么？	现况如何？潜在原因是？	原因验证	需要采取哪些改进措施？	我们如何保持业绩？
<ul style="list-style-type: none"> - 确定Y - 设定目标 - 财务收益预估 - 界定流程范围 - 成立项目团队 	<ul style="list-style-type: none"> - 关键输出的测量系统分析 - 关键输出的当前表现 - 初步寻找原因并识别快赢机会 	<ul style="list-style-type: none"> - 初步分析原因 - 验证根本原因 - X的现况分析 	<ul style="list-style-type: none"> - 产生候选方案 - 评估候选方案 - 验证候选方案 	<ul style="list-style-type: none"> - 监控Y和X - 标准化

通威太阳能全流程六西格玛模型

- 导入期（第1-2年）：培养黄带、绿带团队，聚焦高收益项目（如质量、能耗、提效、银浆降本）。
- 扩展期（第3年）：培养黑带团队，覆盖设计、供应链，建立自主改善文化。
- 成熟期（第4年）：与数字化工具结合，形成“数据-分析-决策”闭环。

DFSS六西格玛设计

设计质量决定了产品的固有质量，只有在设计阶段就赋予产品很高的固有质量，才有可能实现六西格玛的质量目标。

通过此严谨的流程和科学的方法，面向顾客或利益相关方的需求，在产品、服务和流程的开发源头进行消除缺陷和减少浪费的稳健性设计，实现高质量的产品和服务的过程。

典型六西格玛设计流程 (IDDOV)

阶段	识别 Identify I	界定 Define D	设计 Develop D	优化 Optimize O	验证 Verify V
主要工作内容	寻找市场机会，识别顾客需求，进行项目论证。	顾客需求的确定和展开，产品方案论证和设计。	全尺寸样机（试样）的设计、制造过程设计、保障资源设计。	产品和过程设计参数的优化，正样的设计。	样机的研制，产品设计方案的正确性和达到质量水平的验证。
主要技术方法	<ul style="list-style-type: none"> · QFD · 卡诺模型 · 新QC七种工具 · 风险分析 	<ul style="list-style-type: none"> · QFD · 系统设计 · DFX · 功能FMEA · 新QC七种工具 · 风险分析 · LCC分析 	<ul style="list-style-type: none"> · 系统设计 · QFD · DFX · DOE · 参数设计 · 容差设计 · CAD/CAM · 研发试验 · FRACAS · LCC分析 · DFSS计分卡 	<ul style="list-style-type: none"> · DOE · 参数设计 · 容差设计 · DFX · FMEA · LCC分析 · CAD/CAM · 仿真 · 优化试验 · FRACAS · DFSS计分卡 	<ul style="list-style-type: none"> · 仿真试验 · V&V试验 · 可靠性试验 · 寿命试验 · 鉴定试验 · 小子样SPC ATP · FRACAS · MTBF · S/N比 · DFSS计分卡
主要设计输出	<ol style="list-style-type: none"> 1. 项目可行性研究报告 2. DFSS 项目特许任务书 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 产品设计方案 2. 技术规范 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 样机生产用图纸和工艺文件 2. 产品规范（试行稿） 3. 售后保障体系设计方案初稿 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 产品生产图纸和工艺文件 2. 产品规范 3. 售后保障体系设计方案 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 设计验证试验报告 2. 设计鉴定报告 3. 过程能力分析报告 4. DFSS 项目绩效报告

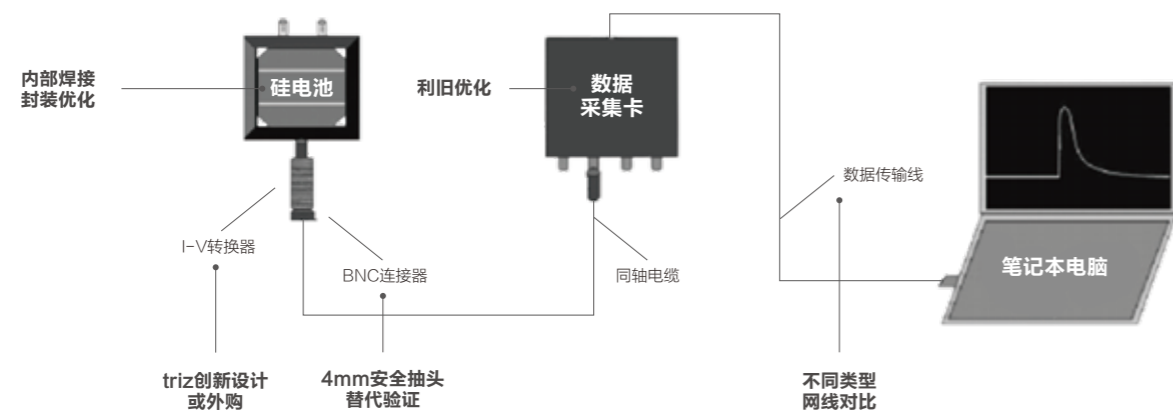


图2.1 太阳模拟器检测系统设计

QFD质量功能展开

注意：本单元的项目案例中数据皆为脱敏数据

一种以顾客为导向、系统化的产品规划与开发方法。其核心思想是从产品的设计阶段开始，将顾客（或市场）的需求转化为产品设计、零部件特性、工艺要求和生产控制的多层次演绎分析方法。QFD 通过四个首尾相连的“质量屋”（HOQ），形成一条精准、层层分解的控制链：顾客需求（VOC）→ 关键性能指标（CTQs）→ 关键设计参数（CDPs）→ 关键过程参数（CPPs）→ 关键过程控制（CPCs）。

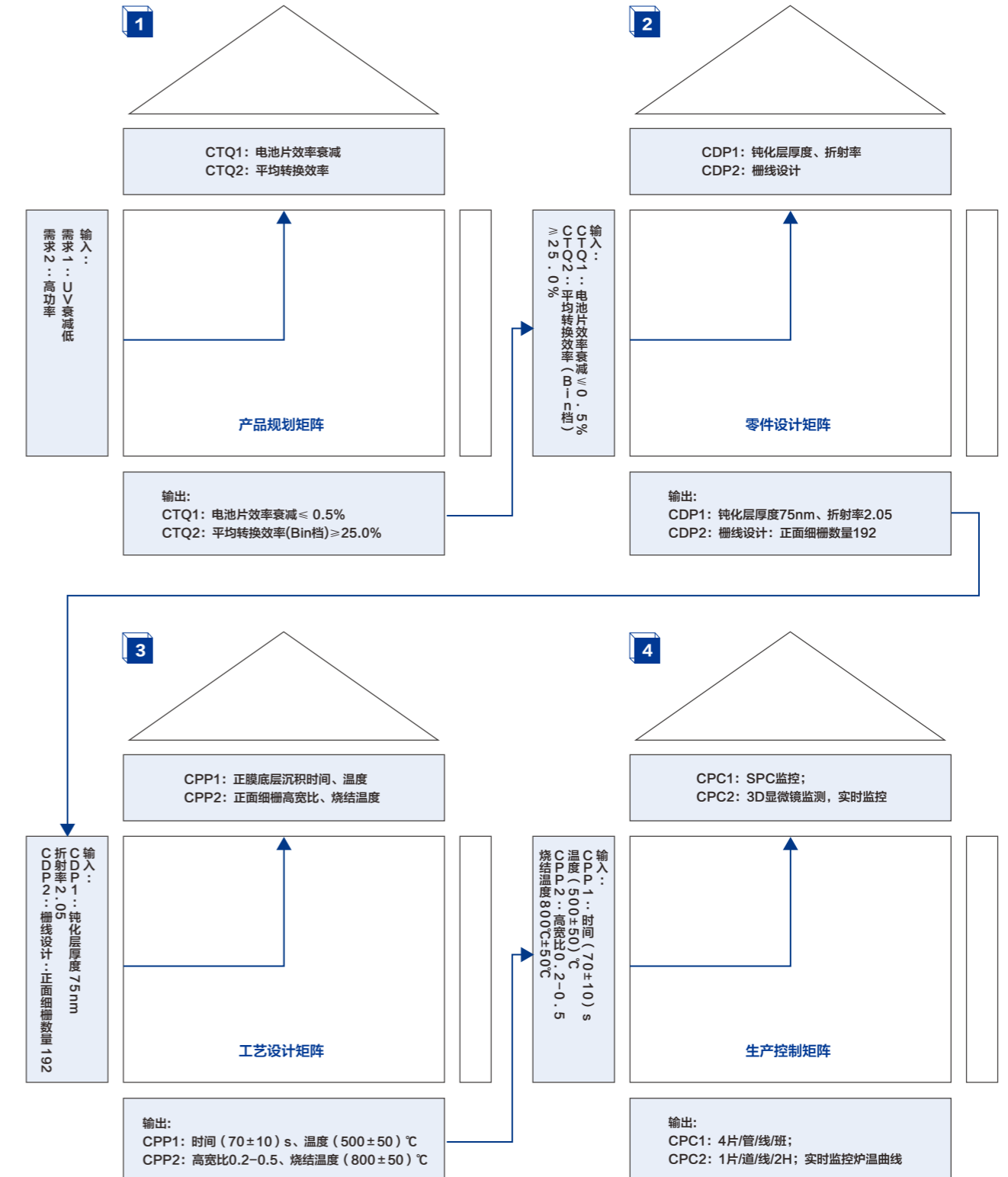


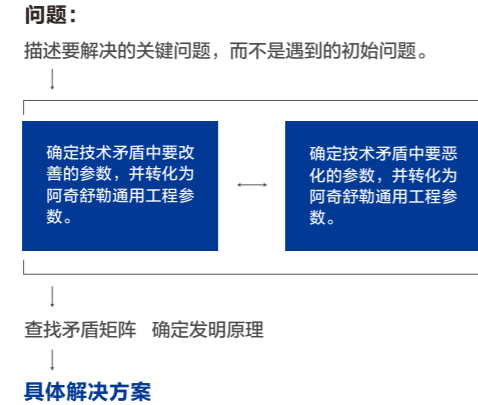
图2.1 TOPCon某产品4个质量屋的QFD案例

TRIZ发明问题解决理论

人们在解决发明问题中，面临的基本问题是相同的，其所需要解决的矛盾，从本质上说也是相同的。同样的技术创新原理和相应的解决问题的方案，也会在后来的发明中复用。Theory of Inventive Problem Solving — TRIZ 发明问题解决理论和方法体系普遍适用于新出现的发明问题，协助快速有效的获得这些发明问题的解。

TRIZ 解决技术矛盾的方法是“40 个发明原理”。首先找到改善的参数和恶化的参数，然后查矛盾引导表（矛盾矩阵），根据提示的发明原理寻找可能的解决方案。

技术矛盾一般解决步骤



实际问题应用

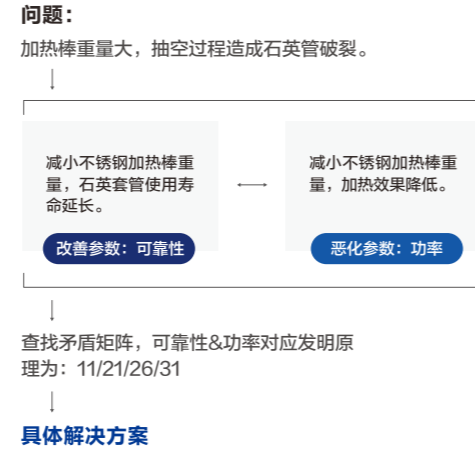


图2.2 利用TRIZ工具对上辅热加热棒偏重问题做优化创新改善

		恶化的参数									
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	
改善的参数	矛盾矩阵						物质或事物的数量				
		功率	能量损失	物质损失	信息损失	时间损失	可靠性				
	23	物质损失	28,27 18,38	35,27 2,31			15,18 35,10	6,3 10,24	10,29 39,35	16,34 31,28	35,10 24,31
	24	信息损失	1,019	1,910			24,26 28,32	24,28 35	10,28 23		
	25	时间损失	35,20 10,6	10,5 18,32	35,18 10,39	24,26 28,32		35,38 18,16	10,30 4	24,34 28,32	24,26 28,18
	26	物质或事物的数量	35	7,18 25	6,3 10,24	24,28 35	35,38 18,16		18,3 28,40	13,2 28	33,30
	27	可靠性	21,11 26,31	10,11 35	10,35 29,39	1,028	10,30 4	21,28 40,3		32,3 11,23	11,32 1
	28	测量精度	3,6 32	26,32 27	10,16 31,28		24,34 28,32	26,32	5,11 1,23		
	29	制造精度	322	13,32 2	35,31 10,24		32,26 28,18	3,230	11,32 1		

发明原理

序号	发明原理	指导原则
11	事先防范	采用事先准备好的应急措施补偿物体相对较低可靠性
21	快速通过	将危险或有损的流程或步骤在高速下进行
26	复制	1. 用简单、廉价的复制品代替复杂、昂贵、不方便、易损、不易获得的物体。 2. 用光学复制品（图像）代替实物或实物系统，可以按一定比例放大或缩小图像。 3. 如果已使用了可见光复制品，用红外光或紫外光复制品代替。
31	多孔材料	使物体变为多孔或加入多孔物体

图2.3 通过查找矛盾矩阵，得到建议的创新发明原理

本案例采用发明原理26.1

确定改善方案：将上辅热不锈钢加热棒改为短波红外加热丝

改善效果：改善后加热效果与改善前相当，降低上辅热石英套管抽坏频次80%以上。

5WHY

5WHY分析法：是一种结构化的、迭代式的根本原因分析工具。其核心在于通过连续追问“为什么”，对已识别出的问题或故障进行层层深入探究问题表象背后的根本原因。



图2.4 冰山模型 / 5WHY问题分析及解决思路

DOE实验设计

试验设计法 (DOE)：是一种科学的方法，通过计划并执行试验产生出关键 X 与感兴趣的 Y 变量之间真实因果的关系。DOE 允许试验者研究大量同时影响产品或者过程的输入变量的效应，也可能是交互效应（例如协同效应），许多试验的最终结果描述成一个数学公式。

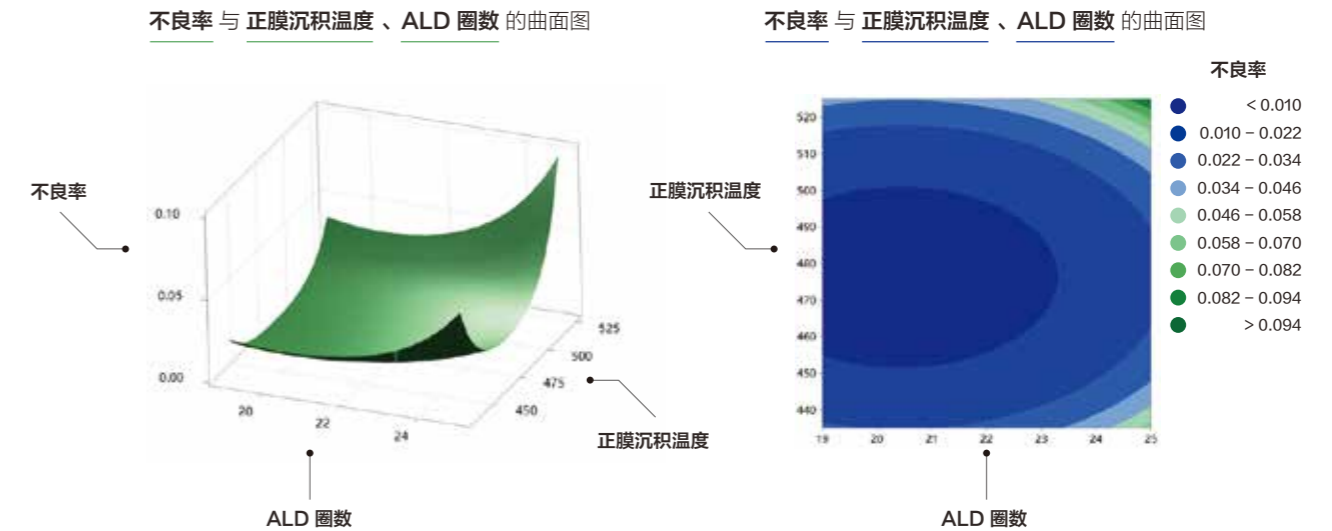


图2.5 不良率Y与正膜沉积温度X1、ALD圈数X2的模型

正交试验设计 (Orthogonal experimental design) 是研究多因素多水平的一种设计方法，它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验，这些有代表性的点具备了“均匀分散，齐整可比”的特点，正交试验设计是分式析因设计的主要方法，是一种高效率、快速、经济的实验设计方法。

人才培养

通威太阳能通过三期项目培养黄带培训合格1863人、注册绿带119人、注册黑带12人，形成内部“改善专家池”，独创“传帮带”机制，通过项目繁殖实现知识转移。



组织变革

通威太阳能历经四年实践验证，通过精益方法工具融合应用，不仅实现单点问题突破，更成功构建了“数据驱动、持续改进”的企业级战略引擎。其特色精益范式为制造业提供了从“规模扩张”向“质量效益”转型的实践样本，同时验证了“成本管控”向“价值创造”升维的可行性。

在智能制造加速演进背景下，深度融合 AI 与工业互联网的数字化六西格玛，正成为光伏行业突破质量瓶颈、成本困局与技术迭代三重挑战的战略级方法论，驱动企业可持续发展形成新质生产力。

第三章 精益求精的 质量管理

3.1

全员质量管理： 不同岗位所需的技能“三板斧”

通威太阳能开展全员质量管理不是短期项目，而是将“精益求精”的意识融入组织 DNA。全员参与是通威追求卓越的基因，是质量文化成功的关键，因为它将质量从“控制”转变为“共建”，从“被动执行”升级为“主动改进”。

通威技术人员 能力素质模型

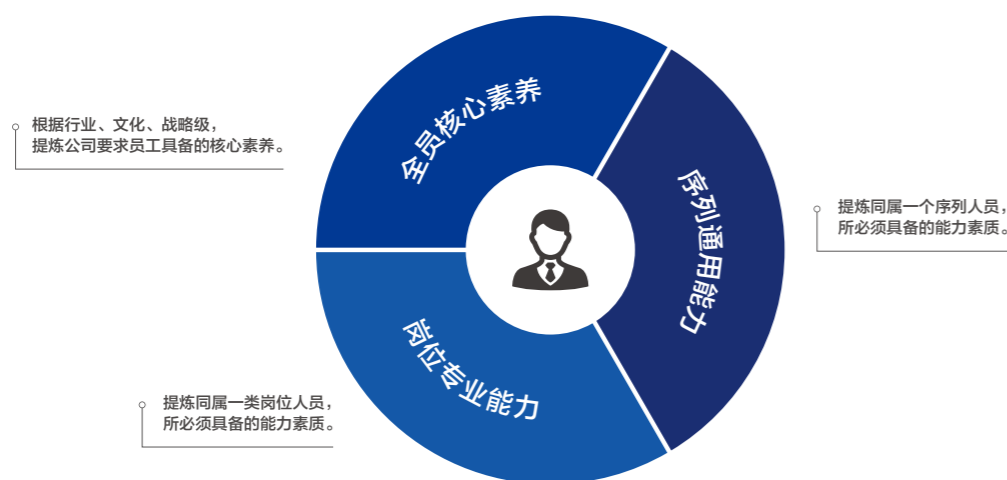
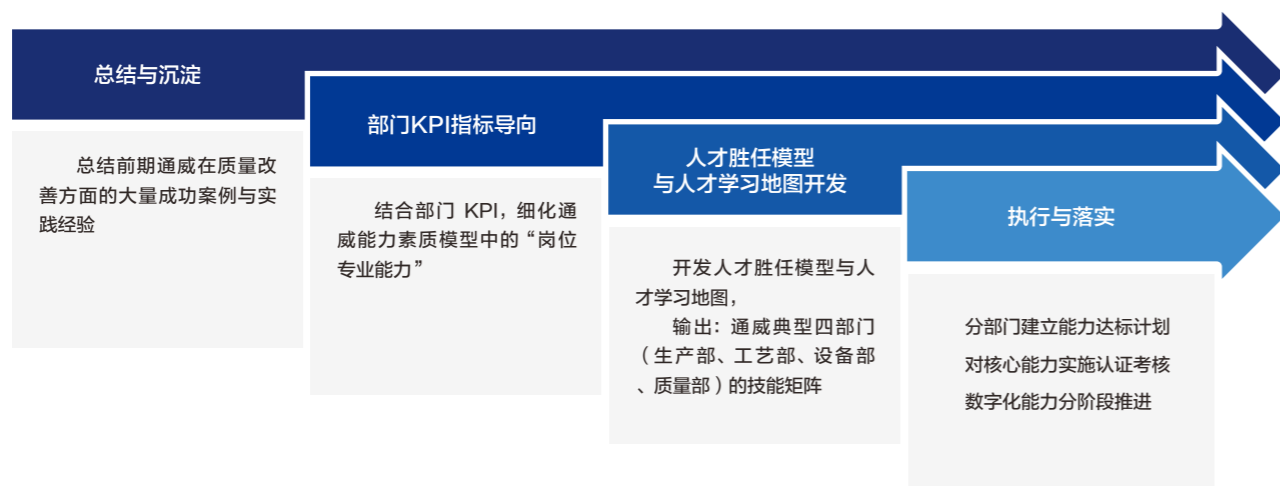


图3.1 通威技术人员能力素质模型

通过赋能员工、打破部门墙、塑造“精益求精”的文化，组织能够实现持续优化，最终在成本、效率和客户满意度上获得竞争优势。具体操作是：



通威精益求精质量的 人员技能矩阵介绍与说明

技能矩阵由 KPI 和 能力 两部分构成：
满足 KPI 对应所需的能力，拆解为三个部分：专业技能、质量工具和数字智能。

- 专业技能** (Professional Skills): 明确通威技术员工须具备的岗位专业能力 (Clarify the professional capabilities that Tongwei technical staff must possess for their positions).
- 质量工具** (Quality Tools): 细化通威员工在问题解决和持续改进领域需掌握的质量工具 (Refine the quality tools that Tongwei employees need to master in problem-solving and continuous improvement areas).
- 数字智能** (Digital Intelligence): 规划通威员工的岗位未来成长路径和学习地图 (Plan the future growth path and learning map for Tongwei employees' positions).

以下以技术序列工程师为例，展示典型四部门（生产部、工艺部、设备部、质量部）的技能矩阵运用：

符号	级别	释义
	了解	接触过理论
	掌握	理解理论，并能进行实践应用
	精通	理解理论与熟练运用，并能带教他人

通威精益求精质量的技能矩阵

生产部

能力	KPI	断栅	虚印	脏污	漏浆	网版寿命	湿重	OEE	产能
专业技能	生产原理	●	●	●	●	●	●	●	●
	快速换型 (SMED)	●	●	●	●	●	●	●	●
	异常响应机制 (Andon系统)	●	●	●	●	●	●	●	●
	瓶颈工序优化 (TOC理论)	●	●	●	●	●	●	●	●
	现场6S管理	●	●	●	●	●	●	●	●
	生产计划排程与报表分析 (产能/工时)	●	●	●	●	●	●	●	●
质量工具	QC	●	●	●	●	●	●	●	●
	5WHY	●	●	●	●	●	●	●	●
	VSM	●	●	●	●	●	●	●	●
	网络图	●	●	●	●	●	●	●	●
	流程图	●	●	●	●	●	●	●	●
	IE七大手法	●	●	●	●	●	●	●	●
	彩虹图	●	●	●	●	●	●	●	●
数字智能	数字化生产 (灯塔工厂)	●	●	●	●	●	●	●	●
	智能化设备预测性维护 (AI+IoT)	●	●	●	●	●	●	●	●
	能源效率优化	●	●	●	●	●	●	●	●

生产部

主要负责执行生产计划，现场管理，人员与资源调度，安全生产，并进行基础质量控制，确保交付效率和产能最大化。

能力



主要KPI指标



矩阵解析 问题的分析与改进



通威精益求精质量的技能矩阵

工艺部

能力	KPI	效率	EL脏污	黑斑, 麻点	绕镀	石墨舟印、花篮印、卡点印等	明暗	电池可靠性	非硅降耗 (网版寿命、湿重、化学品、气体等)
专业技能	光伏电池工艺基础知识、电池结构原理	●	●	●	●	●	●	●	●
	标准化文件编写 (工艺参数规范、SOP等)	●	●	●	●	●	●	●	●
	数据统计与分析	●	●	●	●	●	●	●	●
	缺陷根因分析与改善	●	●	●	●	●	●	●	●
	实验设计能力	●	●	●	●	●	●	●	●
	工艺参数优化	●	●	●	●	●	●	●	●
	新型电池技术开发	●	●	●	●	●	●	●	●
质量工具	QC	●	●	●	●	●	●	●	●
	5WHY	●	●	●	●	●	●	●	●
	FMEA	●	●	●	●	●	●	●	●
	微观流程图	●	●	●	●	●	●	●	●
	SOV 变异源分析	●	●	●	●	●	●	●	●
	相关与回归	●	●	●	●	●	●	●	●
	假设检验	●	●	●	●	●	●	●	●
	DOE	●	●	●	●	●	●	●	●
	彩虹图	●	●	●	●	●	●	●	●
	防错	●	●	●	●	●	●	●	●
数字智能	自动化工艺整合 (MES / APC)	●	●	●	●	●	●	●	●
	数据可视化 (BI)	●	●	●	●	●	●	●	●
	数字孪生工艺仿真 (ANSYS / COMSOL)	●	●	●	●	●	●	●	●
	工艺参数预测模型 (AI)	●	●	●	●	●	●	●	●

工艺部

主要负责工艺开发与验证, 参数标准化, 问题解决, 技术升级与成本优化, 提升产品性能与良率。



主要KPI指标



矩阵解析



通威精益求精质量的技能矩阵

设备部

能力	KPI	碎片、隐裂	CD级率	EL划伤	设备故障 (MTTR, MTTF, MTBF, 维保)	OEE	备品备件	电耗
专业技能	设备机械 / 电气原理 TOPCon 专用设备操作	●	●	●	●	●	●	●
	自动化系统调试 (机械手 / 传送带等)	●	●	●	●	●	●	●
	故障代码解读 (设备PLC日志分析)	●	●	●	●	●	●	●
	设备故障快速诊断	●	●	●	●	●	●	●
	预防性维护 (PM) 计划制定、备件管理 (MTTR / MTBF)	●	●	●	●	●	●	●
	设备改造与精度校准	●	●	●	●	●	●	●
	新设备选型 与验收标准制定	●	●	●	●	●	●	●
质量工具	QC	●	●	●	●	●	●	●
	5WHY	●	●	●	●	●	●	●
	边界图	●	●	●	●	●	●	●
	热力图	●	●	●	●	●	●	●
	防错	●	●	●	●	●	●	●
	FTA	●	●	●	●	●	●	●
	VSM	●	●	●	●	●	●	●
	桑基图	●	●	●	●	●	●	●
	微观流程图	●	●	●	●	●	●	●
	能源效率优化	●	●	●	●	●	●	●
数字智能	设备数据 接入 SCADA 系统	●	●	●	●	●	●	●
	智能化设备预测性 维护 (AI + IoT)	●	●	●	●	●	●	●
	数字孪生	●	●	●	●	●	●	●
		●	●	●	●	●	●	●

设备部

主要负责设备预防性和预测性维护、改造, 备件管理与自动化推进, 同时进行能源管理, 保障设备稳定运行, 支持产能和工艺需求。

能力



主要KPI指标



矩阵解析



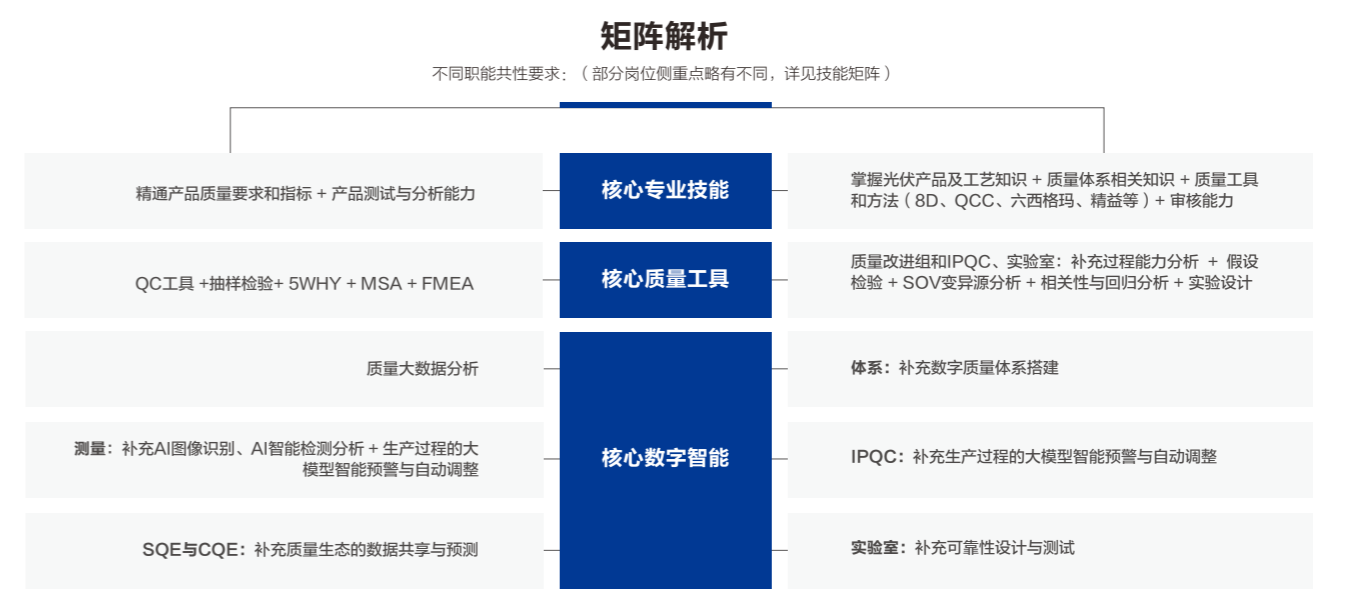
通威精益求精质量的技能矩阵

质量部

能力	职能	能力									
		体系+QM	计量	测量	SQE	IQC	IPQC	FQC	OQC	CQE	实验室
专业技能	光伏产品及工艺知识	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	质量体系相关知识	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	产品质量要求和指标	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	质量工具和方法 (8D、QCC、六西格玛、精益等)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	质量文件编制	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	审核能力	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	产品测试与分析能力	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	供应链质量管理	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
质量工具	QC工具	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	抽样检验	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	5WHY	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	MSA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	FMEA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	过程能力分析	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	假设检验	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	SOV变异源分析	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	相关性与回归分析	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	实验设计	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	稳健参数设计	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	容差设计	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
数字智能	数字质量体系搭建	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	可靠性设计与测试	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	质量大数据分析	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	AI图像识别 AI智能检测分析	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	生产过程的大模型智能预警与自动调整	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
质量生态的数据共享与预测	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

质量部 主要负责确保产品符合客户及行业标准

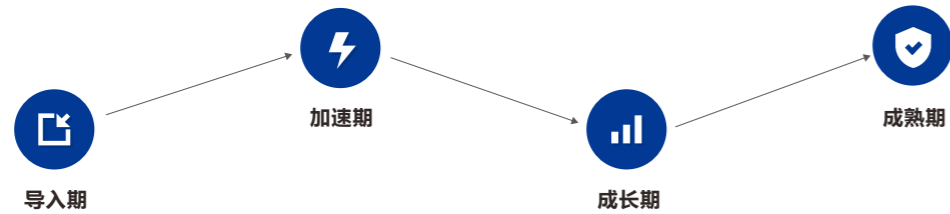
- 质量管理 QM** | 建立和维护质量管理体系 组织持续改进活动
- 质量保证 QA** | 处理客户投诉、主导问题原因分析 标准执行与监督，数据监控 统计缺陷类型（如碎片、PID 衰减） 推动相关部门改进
- 质量控制 QC** | 来料检验，过程检验 成品全检或抽检



3.2

全过程质量管理： 不同类型问题解决的“三板斧”

通威太阳能以“精益求精”为长期战略指导，在战术层面规划了逐步推进的四个发展阶段：导入期、加速期、成长期与成熟期。



当进入成熟期，着重考虑质量改进的“厚积薄发”：

- 侧重问题分析与改进的灵活性，质量工具的适用性，方法论逻辑性；
- 注重项目的实际现场验证和可复制性，效益实现最大化；

对以往各个质量改进活动里的优秀案例进行总结，梳理解决方案的逻辑链与工具链，沉淀不同类型问题的系统性方法论，实现同类改善的复制性。

展示部分典型问题的质量改进方法论，从“道”“法”“术”“器”4个维度展开：



道 提高电池效率类

提高电池效率类是光伏电池的核心课题，提升效率类改进的方式也是多种多样。

概括下来，主要有四个维度：

- 1、设计端的结构与材料优化
- 2、工艺端技术优化与创新
- 3、制造端的过程参数调优与稳定
- 4、供应链的协同优化

本例从制造端的维度来讨论如何提升效率，同时需注意UV可靠性和湿重的等指标影响。

解决逻辑：

- 1、爆炸电池结构
- 2、对应效率因子
- 3、锁定改善工序范围和过程因素
- 4、验证效率影响

核心工具建议：爆炸图 + 微观流程图 + SOV变异源分析 + 假设检验 + DOE实验设计

法	术	器	示例
D	Y效率的定义与分解		$Y \text{ 转化效率} = \frac{\text{电池片功率}}{\text{电池片面积} \times \text{光照幅度}} = \frac{\text{开路电压} \times \text{短路电流} \times \text{填充因子}}{\text{电池片面积} \times \text{光照幅度}}$ <p>注：电池片面积，单位面积光照幅度为固定值</p>
M	<p>分析 Y 效率相关的制备结构</p> <p>分析影响 Y1 Uoc (开压) 主要结构</p> <p>分析影响 Y2 Isc (短流) 主要结构</p> <p>分析影响 Y3 FF (填充) 主要结构</p> <p>根据影响效率的制备结构，去锁定相关的制造工序，排序优先级作为项目范围。</p>	爆炸图	
		流程图	

<p>A</p>	<p>对各段工艺结合工艺原理，从专业角度查找效率影响因子Xs</p>	<p>系统图</p>	<p>扩散</p> <ul style="list-style-type: none"> 抽真空 <ul style="list-style-type: none"> 抽真空速度: 抽速过慢影响工艺时间 低压压力值: 压力大小影响分子自由程对沉积速率及均匀性影响较大 检漏 <ul style="list-style-type: none"> 炉管、炉门是否漏气: 漏气导致气体纯度及浓度降低 升温 <ul style="list-style-type: none"> 升温时间及速率: 温度过低影响磷沉积速率 前氧化 <ul style="list-style-type: none"> 通气方式: 进气管断裂或针孔影响气流方向 氧化步时间: 氧化步时间越短，氧化层越厚对沉积阻碍作用越大 氧化步温度: 氧化步温度越高，氧化层越厚对沉积阻碍作用越大 氧化步流量: 氧化流量越大，氧化层越厚对沉积阻碍作用越大 氧化步压力: 压力越高，管内氧气密度越大生成氧化层越厚
<p>I</p>	<p>筛选和确定主要因子Xi</p>	<p>SOV 变异源分析 假设检验</p>	
<p>C</p>	<p>响应优化 寻找最优参数搭配</p>	<p>回归DOE 实验设计等</p>	<p>效率与四道栅线数、二道栅线数的等值线图</p> <p>效率</p> <ul style="list-style-type: none"> < 25.85 25.85 - 25.86 25.86 - 25.87 25.87 - 25.88 25.88 - 25.89 25.89 - 25.90 25.90 - 25.91 > 25.91

道 降低CD级类

降低CD级类问题是一种需持续改进类项目，重点在能够细化缺陷信息，将离散型指标转换为连续型信息，从而挖掘其背后关联过程因素。建议由产品缺陷率指标，挖掘缺陷点位，将产品缺陷与过程因素对应关联，从而定位缺陷发生的准确原因。

解决逻辑：

- 1、统计产品点位缺陷比例分布
- 2、梳理过程中潜在变量
- 3、产品缺陷与过程因素对应关联
- 4、对定位的过程因素进行分析和改进

核心工具建议：热力图 + 微观流程图 + CE矩阵 + 5WHY

法	术	器	示例
	<p>统计产品点位缺陷比例分布 识别筛选重点需要改进的缺陷位置；</p>	<p>热力图 柏拉图</p>	
<p>P</p>	<p>对制程进行微观分析 识别所有可能影响电池片CD级的过程点</p>	<p>微观流程图</p>	

D	关联： 产品点位缺陷*过程因素	CE矩阵	<p>1 过程接触点</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">工序</th> <th rowspan="2">缺陷位置 接触因子</th> <th rowspan="2">接触点 名称</th> <th colspan="6">2 产品点位缺陷</th> <th rowspan="2">总分</th> <th rowspan="2">4 排序 关键因子</th> </tr> <tr> <th>A01 **%</th> <th>B01 **%</th> <th>A10 **%</th> <th>A11 **%</th> <th>A12 **%</th> <th>...</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td rowspan="8">正背镀膜</td><td>X07</td><td>花篮整片气缸</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>3.1%</td><td></td></tr> <tr><td>X08</td><td>校正轮</td><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td>8.1%</td><td></td></tr> <tr><td>X09</td><td>缓存</td><td></td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8.5%</td><td></td></tr> <tr><td>X10</td><td>变截距</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>3.1%</td><td></td></tr> <tr><td>X11</td><td>皮带限位块</td><td></td><td></td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>15.0%</td><td></td></tr> <tr><td>X12</td><td>干花篮</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>11.1%</td><td></td></tr> <tr><td>X13</td><td>变截距 推片气缸</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>5.4%</td><td></td></tr> <tr><td>X14</td><td>PE吸盘</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>10.1%</td><td></td></tr> <tr><td>X15</td><td>石墨舟卡点</td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td>56.3%</td><td></td></tr> <tr><td rowspan="2">印刷</td><td>X16</td><td>花篮整片气缸</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>9.2%</td><td></td></tr> <tr><td>X17</td><td>激光机台面</td><td></td><td></td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>37.4%</td><td></td></tr> <tr><td>...</td><td>...</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>...</td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>3 关联：产品点位缺陷*过程因素</p>	工序	缺陷位置 接触因子	接触点 名称	2 产品点位缺陷						总分	4 排序 关键因子	A01 **%	B01 **%	A10 **%	A11 **%	A12 **%	...	正背镀膜	X07	花篮整片气缸							3.1%		X08	校正轮				1			8.1%		X09	缓存		3					8.5%		X10	变截距							3.1%		X11	皮带限位块			1	1			15.0%		X12	干花篮							11.1%		X13	变截距 推片气缸							5.4%		X14	PE吸盘							10.1%		X15	石墨舟卡点			1				56.3%		印刷	X16	花篮整片气缸							9.2%		X17	激光机台面			3	3			37.4%		
工序	缺陷位置 接触因子	接触点 名称	2 产品点位缺陷						总分	4 排序 关键因子																																																																																																																																				
			A01 **%	B01 **%	A10 **%	A11 **%	A12 **%	...																																																																																																																																						
正背镀膜	X07	花篮整片气缸							3.1%																																																																																																																																					
	X08	校正轮				1			8.1%																																																																																																																																					
	X09	缓存		3					8.5%																																																																																																																																					
	X10	变截距							3.1%																																																																																																																																					
	X11	皮带限位块			1	1			15.0%																																																																																																																																					
	X12	干花篮							11.1%																																																																																																																																					
	X13	变截距 推片气缸							5.4%																																																																																																																																					
	X14	PE吸盘							10.1%																																																																																																																																					
X15	石墨舟卡点			1				56.3%																																																																																																																																						
印刷	X16	花篮整片气缸							9.2%																																																																																																																																					
	X17	激光机台面			3	3			37.4%																																																																																																																																					
...																																																																																																																																						
C	对定位的过程因素 进行分析到底层因子	5WHY	<p>问题：同步轮走片划伤电池片</p> <p>为什么：为什么同步轮走片？ 原因：因为有流片卡碎、撞碎</p> <p>为什么：为什么有流片卡碎、撞碎？ 原因：因为烘干槽堵片</p> <p>为什么：为什么烘干槽堵片？ 原因：因为风力不平衡</p> <p>为什么：为什么风力不平衡？ 根源：因为风刀高度不匹配</p> <p>解决：调整风刀功率和方向 硅片稳定运行</p>																																																																																																																																											
A	对定位的底层因素 进行改进	防错等																																																																																																																																												

参考案例：2023Q1 眉山公司《210产品CD级缺口类改善》，2023Q2 眉山公司《S1车间210产品前道返工率改善》，2024Q4 金堂公司《提升TOPCon流通合格率》。（内部文件，经授权使用）

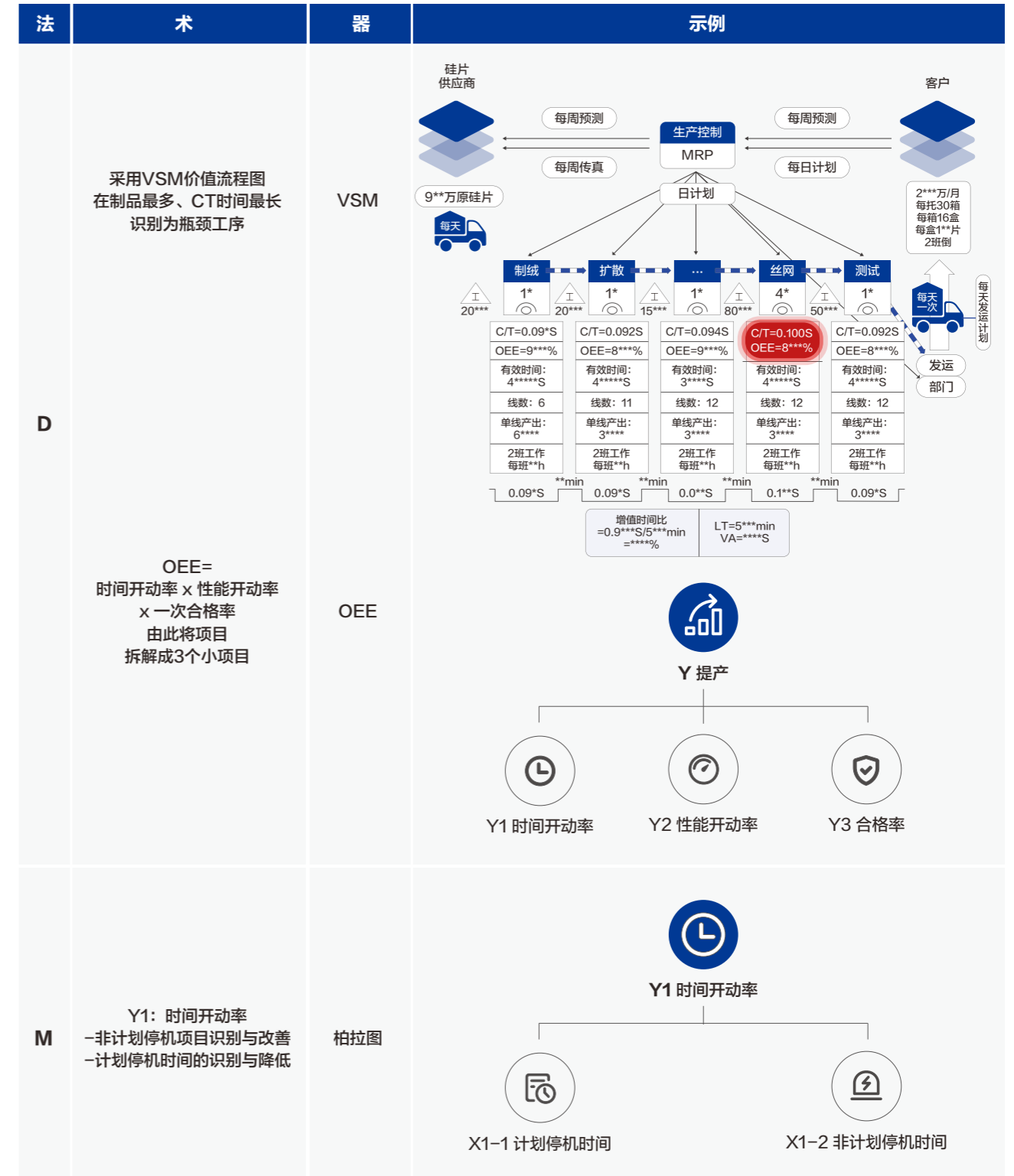
道 提产类

提产类本质是提升OEE，通过研究实际产量与理论产量的差异，可以从时间开动率、性能开动率、合格率三个维度全面寻找改善点。

解决逻辑：

- 1、识别瓶颈工序
- 2、分析和改善时间开动率
- 3、分析和改善性能开动率
- 4、分析和改善合格率

核心工具建议：VSM + OEE + 柏拉图



<p>A</p>	<p>Y2: 性能开动率 -CT提速: 按流程图对工步动作 细化拆解</p> <p>流程图分析 做动作与时间的研究 寻找提速机会</p> <p>结合ECRS思路改善</p>	<p>动作 时间分析 ECRS</p>	
<p>I</p>	<p>Y3: 一次合格率改善: 柏拉图二八原则 识别出主要不良项目改善</p>	<p>柏拉图 QC</p>	
<p>C</p>	<p>对提速后相关因子 作质量和效率的风险评估</p>	<p>假设检验 DOE等</p>	

参考案例：2023Q4 成都公司《S6镀膜工序产能提升》，2024Q3 金堂公司《提升S3丝网A级产量》，2025Q1 彭山公司《彭山S1车间A级单线产能提升突破》。（内部文件，经授权使用）

道 降低节拍类

降低节拍类问题是提升产能类项目的一个子项目，致力于缩短节拍时间，解决瓶颈工序。此类型项目应该尽量消除不增值的动作，同时尽量避免调整对产品质量或效率有直接影响的工艺参数。提升节拍的同时，注意质量指标的财务平衡。

解决逻辑：

- 1、识别瓶颈工序
- 2、识别不增值环节
- 3、消除浪费
- 4、验证质量影响

核心工具建议：网络图 + 流程图分析 + ECRS

法	术	器	示例
<p>D</p>	<p>通过生产线平衡分析 识别瓶颈工序</p>	<p>VSM</p>	
<p>M</p>	<p>识别瓶颈工序的关键路径 和不增值环节</p>	<p>网络图</p>	

A

通过动作时间研究
寻找合适改善机会

对动作类型
(增值Vs.非增值)

对节拍时间
(实际节拍 Vs.目标节拍)

流程
程序分析



E Eliminate 消除 C Combine 组合 R Rearrangement 重排 S Simplify 简化

步骤	关键路径	维保项目	维保目的	需时 (min)	改善思路				改善维度	
					E取消	C合并	R排列	S优化	降低维保时间	延长维保周期
1		X1-4: 坦克链线路、气管磁开线路检查	降低故障率	60					拆分到日常换液	/
2		X1-5: 更换上料料盒耐磨胶带	崩缺管控	60					拆分到日常换液	/
3		X1-6: 机械臂、慢提拉、滑块轨道润滑打油	防止卡顿	80					拆分到日常换液	/
4	★	X1-7: 洗槽+泡槽	脏污管控	260					取消泡槽	/
5		X1-8: 上下料自动化龙门架、滚珠丝杆及气缸润滑	防止卡顿	80					拆分到日常换液	/
6		X1-9: 1号臂挂板结晶清理; 清理排风碱结晶	防止排风堵塞	220					拆分后并行优化	/
7		X1-10: 吸盘垫及双片传感器检查	防止堵片及双片流出						拆分到日常换液	/
8		X1-11: 上下料自动化型材、电机同步带检查	降低故障率	80					更改空蓝一段电机安装方式及固定方式	/

I 消除浪费, 优化节拍 ECRS

C 同时验证质量影响


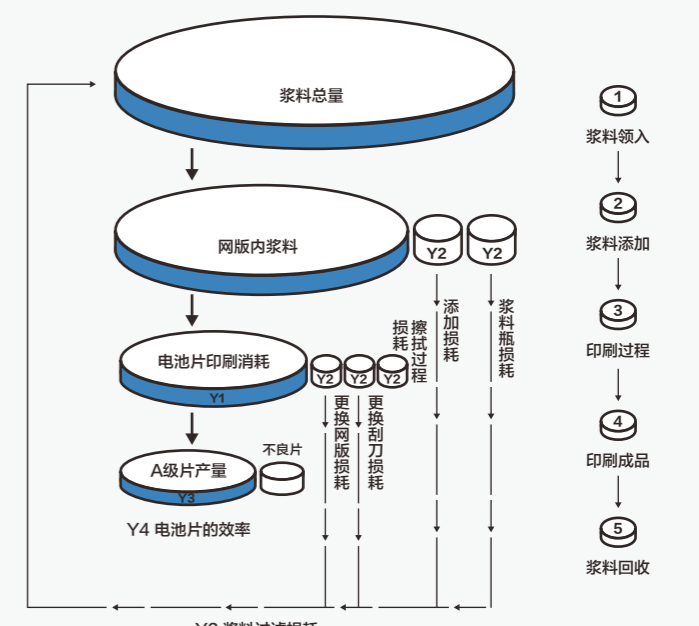
道 降低银浆单耗类

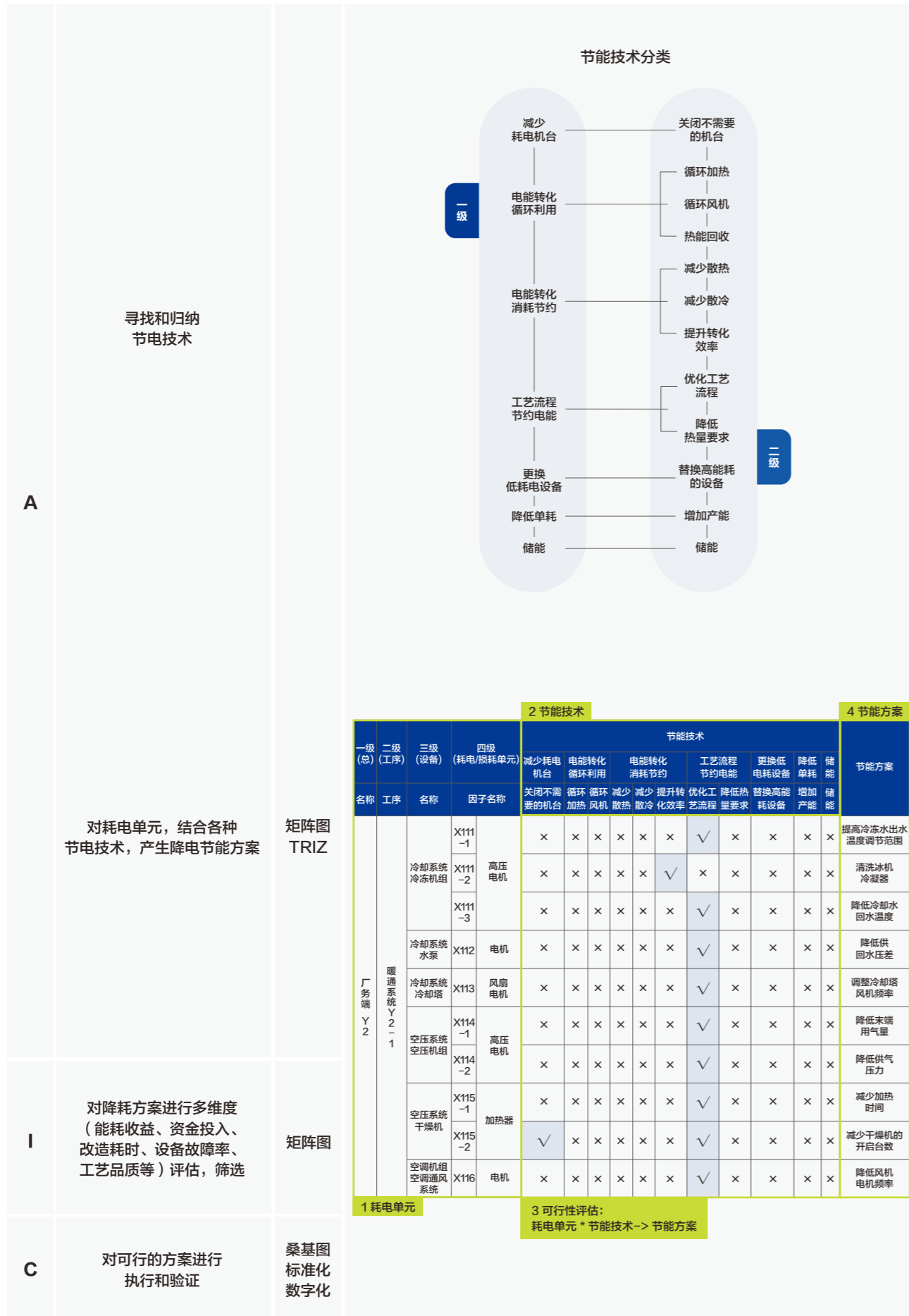
降低银浆单耗类问题是电池降本增效的核心课题。银浆单耗，不是一个简单的湿重用量的概念，而是一个“性价比”的综合考量指标，即不仅需要降低银浆的耗量，同时还同时需要保证电池的效率和品质。

解决逻辑:

- 1、定义银浆单耗
- 2、将浆料消耗的详细的流向进行识别
- 3、损耗过程(浪费): 消除和减少
- 4、消耗过程(湿重): 降低和监控

核心工具建议: 微观流程图 + QC + DOE + SPC

法	术	器	示例
D	<p>定义Y银浆单耗 量化银浆损耗类型</p> <p>分解为y1-y4四大指标 并分类设定改善目标</p>	趋势图	 <p>Y1 印刷过程消耗 即湿重</p> <p>Y2 印刷过程损耗</p> <p>Y3 A级片产量</p> <p>Y4 A级片效率</p> $Y = \frac{Y1 + Y2}{Y3 * Y4 * \text{面积}}$
M	<p>过程微观分析 识别浆料的详细的流经 建立耗损流向模型</p> <p>对Y2印刷过程损耗 (指标望小) 包括浆料添加损耗 浆料瓶损耗、擦拭网版损耗 更换网版损耗、更换刮刀损耗等 进行分析改善</p>	<p>银浆流经 全景图</p> <p>QC</p>	 <p>① 浆料领入</p> <p>② 浆料添加</p> <p>③ 印刷过程</p> <p>④ 印刷成品</p> <p>⑤ 浆料回收</p>



道 降低备品备件成本类

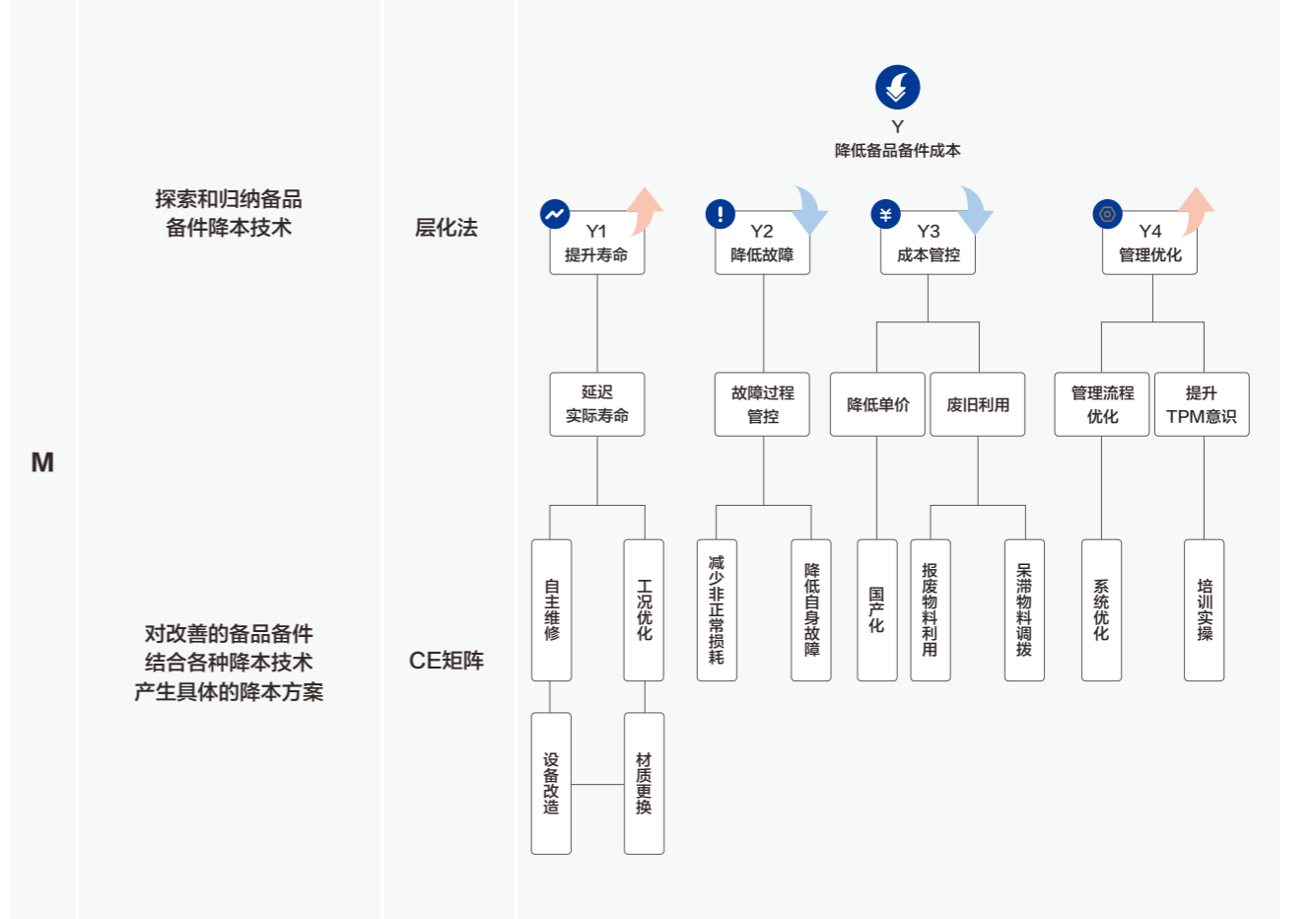
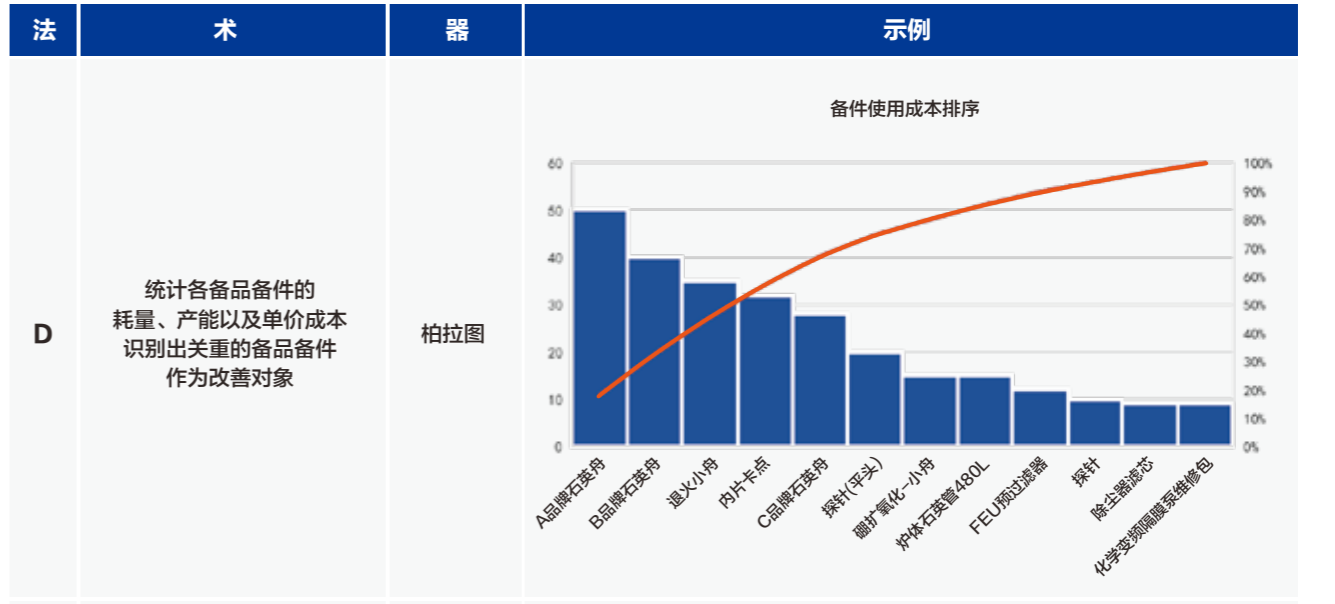
降低备品备件成本类问题是一种提升企业成本竞争力，减轻产能扩张与库存管理影响的重要举措。

寻求此类项目系统化解决方案，快速识别重点可改善备件以及方法，总结备品备件降本方法论，让项目具有高复制性。同时此类项目还要求数据标准化，和管理流程的优化。

解决逻辑：

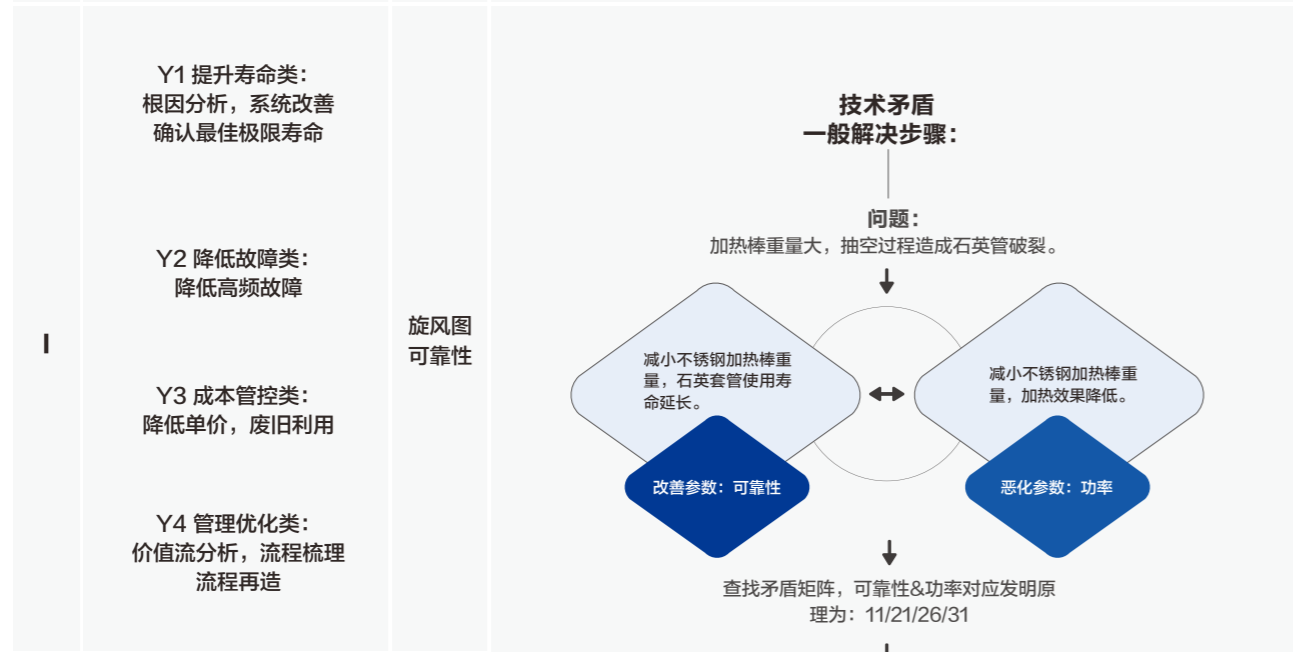
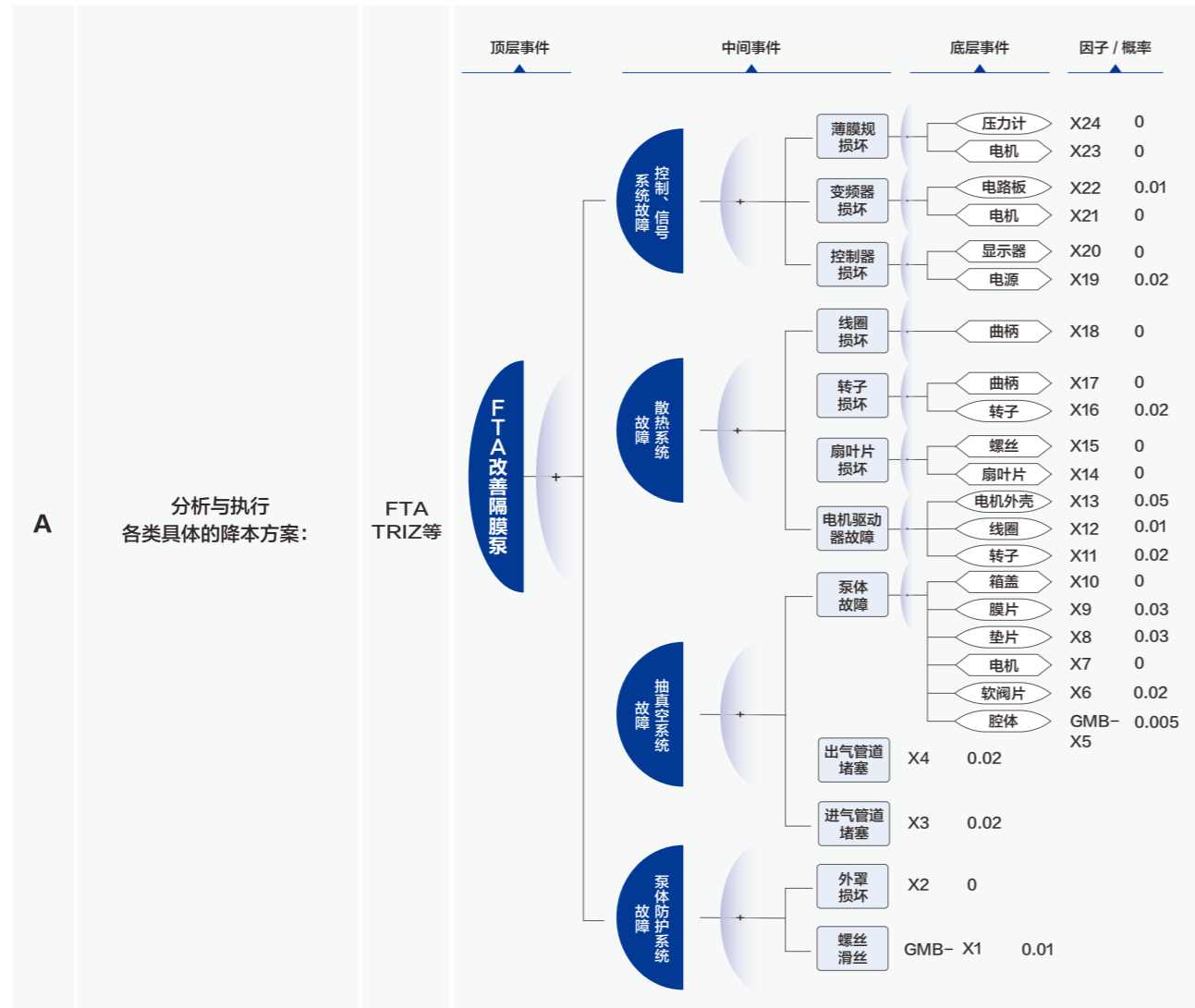
- 1、备品备件改善机会
- 2、归纳备品备件降本技术
- 3、制定降本方案
- 4、执行的节能方案与管理流程优化

核心工具建议：柏拉图 + 矩阵图 + QC / 可靠性 + 标准化



参考案例：2023Q4 眉山公司《生产端设备电耗降低精益项目》，2024Q1 成都公司《电池六厂厂务联动电耗降本》，2024Q4 彭山公司《降低彭山电量单耗》，2024Q4 眉山公司《电机提效改善》。(内部文件，经授权使用)

注意：本单元的项目案例中数据皆为脱敏数据



Y1 提升寿命类： 根因分析，系统改善 确认最佳极限寿命

Y2 降低故障类： 降低高频故障

Y3 成本管控类： 降低单价，废旧利用

Y4 管理优化类： 价值流分析，流程梳理 流程再造

供应链优化 智能采购 精益管理

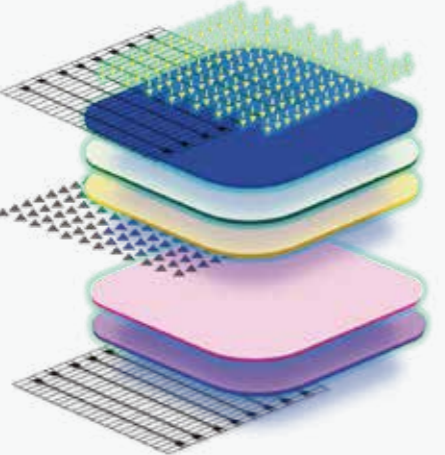
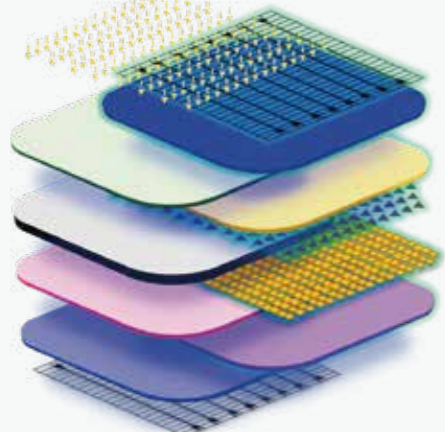

质量实践 案例展示

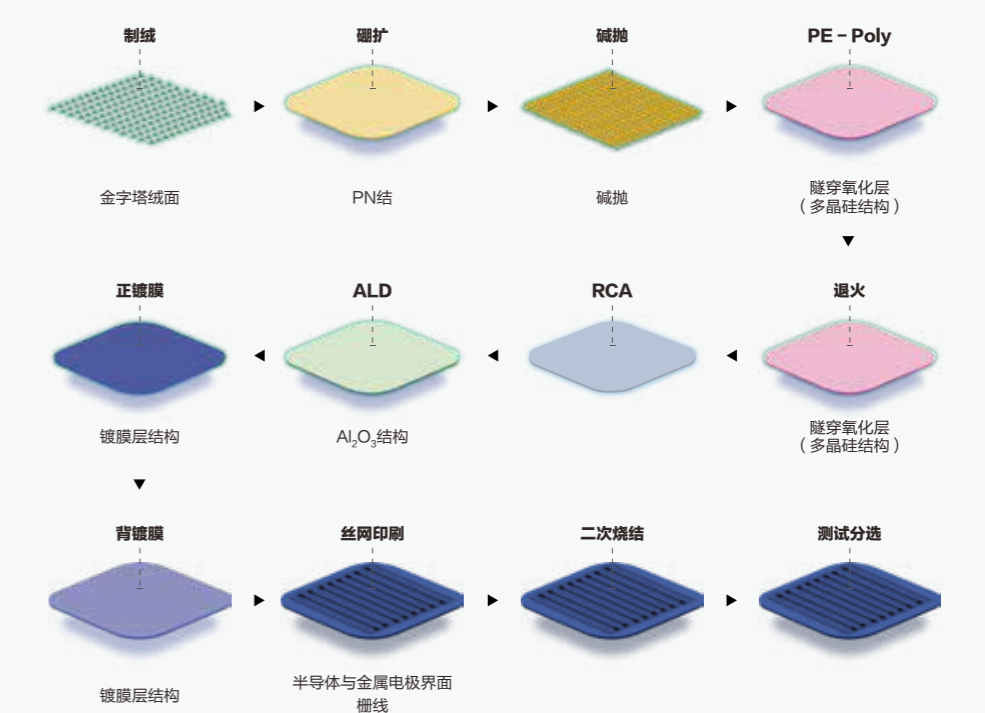
项目案例 1： 提高电池效率类

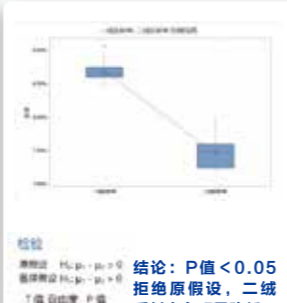
项目课题 《A厂 TOPCon 电池提效项目》

项目阶段 / 定义 Define	1.1 背景：光伏电池的效率即效益，提效对提升市场竞争力至关重要。双面 TOPCon 电池理论效率达 28.7%，头部企业加速工艺迭代，新技术量产尚需突破，现有产线制造端的提效仍是关键。在电池提效的四大维度里，本案例展示制造端的提效逻辑与工具运用。
D	<p>1.2 现状及目标设定：Y的定义与拆解</p> $Y \text{ 转化效率} = \frac{\text{电池片功率}}{\text{电池片面积} \times \text{光照幅度}} = \frac{\text{开路电压} \times \text{短路电流} \times \text{填充因子}}{\text{电池片面积} \times \text{光照幅度}}$ <p>Y Eta效率的分解：y1 Voc开路电压、y2 Isc短路电流、y3 FF填充因子</p> <p>注：210R电池片（面积0.038184m²），单位面积光照幅度1000W/m²为固定值</p>
项目阶段 / 测量 Measure	2.1 测量系统分析：对分析过程涉及的 IV 测试、反射率测试仪、EL 测试、AOI 测试等做 MSA 分析，确保测量误差在可接受的范围内。
M	<p>2.2 Y效率的制备结构分析：</p> <p>质量工具：爆炸图</p>

参考案例：2024Q3 彭山公司《降低彭山备品备件成本》，2025Q2 眉山公司《S1车间备品备件降本改善》。（内部文件，经授权使用）

项目阶段 二 / 测量 Measure	2.2 分析影响 y_i 的主要结构:	
M	<p>Y1</p> <p style="text-align: center;">U_{oc} (开压) 主要影响结构</p>  <p>正面镀膜层</p> <p>多晶硅层</p>	<p>功能描述</p> <p>主要通过 H 原子钝化硅表面的缺陷态, 降低载流子复合。</p>
	<p>Y2</p> <p style="text-align: center;">I_{sc} (短流) 主要影响结构</p>  <p>正面栅线</p> <p>正面镀膜层</p> <p>金字塔绒面</p> <p>多晶硅层</p>	<p>功能描述</p> <p>遮光面积、串联电阻和电流收集效率这几个方面来影响电池的 I_{sc}。</p> <p>沉积多层钝化膜和减反射层; 减反射层 (SiN_x) 降低反射率, 提高光吸收提升 I_{sc}。</p> <p>金字塔绒面利用陷光原理增加硅片对太阳光的吸收, 提高 I_{sc}。</p> <p>通过改善界面钝化效果、载流子传输特性和光学特性提升 I_{sc}。</p>
	<p>Y3</p> <p style="text-align: center;">FF (填充) 主要影响结构</p>  <p>正面栅线</p> <p>多晶硅层</p>	<p>功能描述</p> <p>栅线用于收集电流, 若栅线的型形、材料电导率不理想, 会导致栅线电阻增大, 进而影响填充因子。</p>

项目阶段 二 / 测量 Measure	2.3 确定项目范围: 根据影响效率的制备结构, 去锁定相关的制造工序, 排序优先级作为项目范围。																											
M	<p>质量工具: 流程图</p> 																											
	<p>2.4 寻找潜在的原因 X_i: 对锁定的工艺段, 结合工艺原理, 从专业角度, 查找效率影响因子 X_s。</p>																											
	<p>质量工具: 系统图</p> <p>示例: 扩散工序的系统分析, 寻找潜在过程变量 X_i。其余工序依次展开。</p>  <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>工序</th> <th>工步</th> <th>工作要素</th> <th>失效影响</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="14">扩散</td> <td rowspan="2">抽真空</td> <td>抽真空速度</td> <td>抽速过慢影响工艺时间</td> </tr> <tr> <td>低压压力值</td> <td>压力大小影响分子自由程对沉积速率及均匀性影响较大</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">检漏</td> <td>炉管、炉门是否漏气</td> <td>漏气导致气体纯度及浓度降低</td> </tr> <tr> <td>升温</td> <td>升温时间及速率</td> <td>温度过低影响磷沉积速率</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">前氧化</td> <td>通气方式</td> <td>进气管断裂或针孔影响气流方向</td> </tr> <tr> <td>氧化步时间</td> <td>氧化步时间越长, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大</td> </tr> <tr> <td>氧化步温度</td> <td>氧化步温度越高, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大</td> </tr> <tr> <td>氧化步流量</td> <td>氧化步流量越大, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大</td> </tr> <tr> <td>氧化步压力</td> <td>压力越高, 管内氧气密度越大生成氧化层越厚</td> </tr> </tbody> </table>		工序	工步	工作要素	失效影响	扩散	抽真空	抽真空速度	抽速过慢影响工艺时间	低压压力值	压力大小影响分子自由程对沉积速率及均匀性影响较大	检漏	炉管、炉门是否漏气	漏气导致气体纯度及浓度降低	升温	升温时间及速率	温度过低影响磷沉积速率	前氧化	通气方式	进气管断裂或针孔影响气流方向	氧化步时间	氧化步时间越长, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大	氧化步温度	氧化步温度越高, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大	氧化步流量	氧化步流量越大, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大	氧化步压力
工序	工步	工作要素	失效影响																									
扩散	抽真空	抽真空速度	抽速过慢影响工艺时间																									
		低压压力值	压力大小影响分子自由程对沉积速率及均匀性影响较大																									
	检漏	炉管、炉门是否漏气	漏气导致气体纯度及浓度降低																									
		升温	升温时间及速率	温度过低影响磷沉积速率																								
	前氧化	通气方式	进气管断裂或针孔影响气流方向																									
		氧化步时间	氧化步时间越长, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大																									
		氧化步温度	氧化步温度越高, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大																									
		氧化步流量	氧化步流量越大, 氧化层越厚对沉积阻碍作用越大																									
		氧化步压力	压力越高, 管内氧气密度越大生成氧化层越厚																									

项目阶段 二 / 测量 Measure	2.5 制备结构效率因子筛选：筛选出重要的影响因子 Xi																																																																																													
<div style="font-size: 48px; opacity: 0.1; text-align: center;">M</div>	<p>质量工具：CE矩阵图</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">Rating of importance</th> <th colspan="3">评分标准：0（无影响） 1（弱影响） 3（中影响） 9（高影响）</th> <th rowspan="2">得分</th> </tr> <tr> <th>7</th> <th>7</th> <th>7</th> </tr> <tr> <th>影响电性能的制备结构</th> <th>影响因子</th> <th>VOC</th> <th>ISC</th> <th>FF</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">金字塔绒面</td> <td>X26 制绒添加剂类别</td> <td>9</td> <td>9</td> <td>3</td> <td>147</td> </tr> <tr> <td>X27 制绒温度</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>X28 制绒时间</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>63</td> </tr> <tr> <td>X29 制绒循环鼓泡</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>X30 制绒NaOH浓度</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>63</td> </tr> <tr> <td>X31 硅片表面状态</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">碱抛</td> <td>X32 碱抛添加剂类别</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>X33 碱抛时间</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>X34 碱抛温度</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>X35 碱抛循环鼓泡</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>X36 碱抛NaOH浓度</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">正面栅线</td> <td>X37 四道网版线宽</td> <td>3</td> <td>9</td> <td>9</td> <td>147</td> </tr> <tr> <td>X38 四道网版膜厚</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>49</td> </tr> <tr> <td>X39 四道网版线径</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>9</td> <td>105</td> </tr> <tr> <td>X40 刮刀角度</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>14</td> </tr> </tbody> </table> <p>注：设定“0（无影响）、1（弱影响）、3（中影响）、9（高影响）”四级评分标准，由专业人员基于历史实验数据，判断每个因子对 VOC、ISC、FF 的影响程度并赋值。</p>	Rating of importance		评分标准：0（无影响） 1（弱影响） 3（中影响） 9（高影响）			得分	7	7	7	影响电性能的制备结构	影响因子	VOC	ISC	FF		金字塔绒面	X26 制绒添加剂类别	9	9	3	147	X27 制绒温度	1	3	1	35	X28 制绒时间	3	3	3	63	X29 制绒循环鼓泡	0	1	0	7	X30 制绒NaOH浓度	3	3	3	63	X31 硅片表面状态	0	1	0	7	碱抛	X32 碱抛添加剂类别	1	3	1	35	X33 碱抛时间	1	3	1	35	X34 碱抛温度	1	3	1	35	X35 碱抛循环鼓泡	0	1	0	7	X36 碱抛NaOH浓度	1	3	1	35	正面栅线	X37 四道网版线宽	3	9	9	147	X38 四道网版膜厚	1	3	3	49	X39 四道网版线径	3	3	9	105	X40 刮刀角度	0	1	1	14
	Rating of importance			评分标准：0（无影响） 1（弱影响） 3（中影响） 9（高影响）				得分																																																																																						
7			7	7																																																																																										
影响电性能的制备结构	影响因子	VOC	ISC	FF																																																																																										
金字塔绒面	X26 制绒添加剂类别	9	9	3	147																																																																																									
	X27 制绒温度	1	3	1	35																																																																																									
	X28 制绒时间	3	3	3	63																																																																																									
	X29 制绒循环鼓泡	0	1	0	7																																																																																									
	X30 制绒NaOH浓度	3	3	3	63																																																																																									
	X31 硅片表面状态	0	1	0	7																																																																																									
碱抛	X32 碱抛添加剂类别	1	3	1	35																																																																																									
	X33 碱抛时间	1	3	1	35																																																																																									
	X34 碱抛温度	1	3	1	35																																																																																									
	X35 碱抛循环鼓泡	0	1	0	7																																																																																									
	X36 碱抛NaOH浓度	1	3	1	35																																																																																									
正面栅线	X37 四道网版线宽	3	9	9	147																																																																																									
	X38 四道网版膜厚	1	3	3	49																																																																																									
	X39 四道网版线径	3	3	9	105																																																																																									
	X40 刮刀角度	0	1	1	14																																																																																									
	<p>2.6 分类影响因子的改善：从改善空间、改善周期等方面评价，对影响因子Xi分类为快赢改善和系统分析改善。</p> <p>2.7 执行快赢改善类Xi：</p> <p>示例：从改善前后绒面效果、反射率、效率三方面对改善效果评价。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>绒面对比</p>  <p>分布优化制绒</p> <p>注：图片来源于网络</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>反射率对比</p>  <p>结论：P值<0.05 拒绝原假设，二绒反射率有明显降低</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>效率对比</p>  <p>结论：P值<0.05 拒绝原假设，二绒效率有明显提升</p> </div> </div> <p>结论：分布优化制绒工艺导入后，效率较之前有明显提升，平均提升约 **%，达到 26.**%左右。</p>																																																																																													

项目阶段 三 / 分析 Analysis	3 系统分析：验证系统性影响因子 Xi 对效率的显著性，确定根本原因。																																																																											
<div style="font-size: 48px; opacity: 0.1; text-align: center;">A</div>	<p>质量工具：假设检验，SOV 变异源分析</p> <p>验证原理：Poly时间主要影响非晶硅厚度，通过调整非晶硅厚度验证是否提升接触电阻和场钝化能力，达到提效目的。</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>工艺参数范围</th> <th>对照组（低水平）</th> <th>实验组（高水平）</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3**~5**s</td> <td>3**s</td> <td>4**s</td> </tr> </tbody> </table> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>正态性检验</p>  <p>P < 0.05 效率分布非正态</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>箱线图</p>  <p>Poly层工艺时间</p> <p>■ Poly层工艺时间**</p> <p>■ Poly层工艺时间**</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Mann - Whitney</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 8px;"> <thead> <tr> <th colspan="2">描述性统计量</th> <th colspan="2">描述性统计量</th> </tr> <tr> <th>样本</th> <th>N</th> <th>中位数</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Poly层工艺时间**</td> <td>**</td> <td>**</td> <td>**</td> </tr> <tr> <td>Poly层工艺时间**</td> <td>**</td> <td>**</td> <td>**</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 8px;"> <thead> <tr> <th>差值</th> <th>差值的置信区间</th> <th>取得的置信度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-0.0172045</td> <td>(-0.0245048, -0.0099083)</td> <td>95.00%</td> </tr> </tbody> </table> <p>检验</p> <p>原假设 H0: μ1 = μ2 备择假设 H1: μ1 ≠ μ2</p> <p>W 值 P 值 1362513.00 0.000</p> <p>P < 0.05 Poly层工艺时间对效率有显著影响</p> </div> </div> <p>结论：Poly层工艺时间为显著因子，减Poly层工艺时间有助于效率提升。</p>	工艺参数范围	对照组（低水平）	实验组（高水平）	3**~5**s	3**s	4**s	描述性统计量		描述性统计量		样本	N	中位数		Poly层工艺时间**	**	**	**	Poly层工艺时间**	**	**	**	差值	差值的置信区间	取得的置信度	-0.0172045	(-0.0245048, -0.0099083)	95.00%																																															
	工艺参数范围	对照组（低水平）	实验组（高水平）																																																																									
3**~5**s	3**s	4**s																																																																										
描述性统计量		描述性统计量																																																																										
样本	N	中位数																																																																										
Poly层工艺时间**	**	**	**																																																																									
Poly层工艺时间**	**	**	**																																																																									
差值	差值的置信区间	取得的置信度																																																																										
-0.0172045	(-0.0245048, -0.0099083)	95.00%																																																																										
项目阶段 四 / 改进 Improve	<p>4.1 策划改进方案：依据变量 Xi 和响应 Y 的数据类型，制定合适的改善方案。</p> <p>示例：</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>序号</th> <th>效率制备结构</th> <th>X</th> <th>数据类型</th> <th>Y</th> <th>数据类型</th> <th>改善方案</th> <th>责任人</th> <th>计划完成时间</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td rowspan="2">PN结</td> <td>X4 氧化温度</td> <td>计量型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> <td rowspan="2">低温氧化工艺研究 回归分析寻找最优参数搭配</td> <td rowspan="2">许** 杨*</td> <td rowspan="2">202*/4/2*</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>X5 氧化时间</td> <td>计量型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td rowspan="3">正面栅线</td> <td>X37 线宽</td> <td>计数型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> <td rowspan="3">正交实验</td> <td rowspan="3">许** 姚*</td> <td rowspan="3">202*/5/1*</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>X38 膜厚</td> <td>计数型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>X39 线径</td> <td>计数型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td rowspan="4">隧穿氧化层 (多晶硅结构)</td> <td>X9 Poly层工艺时间</td> <td>计量型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> <td rowspan="4">DOE实验设计 响应优化寻找最优参数搭配</td> <td rowspan="4">许** 邹**</td> <td rowspan="4">202*/5/2*</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>X10 Poly层磷烷流量</td> <td>计量型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>X11 Poly层硅烷流量</td> <td>计量型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>X12 Poly层氢气流量</td> <td>计量型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td></td> <td>X13 Poly层功率</td> <td>计量型</td> <td>效率</td> <td>计量型</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	序号	效率制备结构	X	数据类型	Y	数据类型	改善方案	责任人	计划完成时间	1	PN结	X4 氧化温度	计量型	效率	计量型	低温氧化工艺研究 回归分析寻找最优参数搭配	许** 杨*	202*/4/2*	2	X5 氧化时间	计量型	效率	计量型	3	正面栅线	X37 线宽	计数型	效率	计量型	正交实验	许** 姚*	202*/5/1*	4	X38 膜厚	计数型	效率	计量型	5	X39 线径	计数型	效率	计量型	6	隧穿氧化层 (多晶硅结构)	X9 Poly层工艺时间	计量型	效率	计量型	DOE实验设计 响应优化寻找最优参数搭配	许** 邹**	202*/5/2*	7	X10 Poly层磷烷流量	计量型	效率	计量型	8	X11 Poly层硅烷流量	计量型	效率	计量型	9	X12 Poly层氢气流量	计量型	效率	计量型	10		X13 Poly层功率	计量型	效率	计量型			
序号	效率制备结构	X	数据类型	Y	数据类型	改善方案	责任人	计划完成时间																																																																				
1	PN结	X4 氧化温度	计量型	效率	计量型	低温氧化工艺研究 回归分析寻找最优参数搭配	许** 杨*	202*/4/2*																																																																				
2		X5 氧化时间	计量型	效率	计量型																																																																							
3	正面栅线	X37 线宽	计数型	效率	计量型	正交实验	许** 姚*	202*/5/1*																																																																				
4		X38 膜厚	计数型	效率	计量型																																																																							
5		X39 线径	计数型	效率	计量型																																																																							
6	隧穿氧化层 (多晶硅结构)	X9 Poly层工艺时间	计量型	效率	计量型	DOE实验设计 响应优化寻找最优参数搭配	许** 邹**	202*/5/2*																																																																				
7		X10 Poly层磷烷流量	计量型	效率	计量型																																																																							
8		X11 Poly层硅烷流量	计量型	效率	计量型																																																																							
9		X12 Poly层氢气流量	计量型	效率	计量型																																																																							
10		X13 Poly层功率	计量型	效率	计量型																																																																							

<p>项目阶段 / 改进 四 / Improve</p>	<p>4.2 执行改进措施：综合考虑多变量的水平搭配，使得效率最优化。</p>
	<p>质量工具：回归分析，DOE正交实验设计等 示例：</p> <p>效率-1与Poly层氢气流量，Poly层硅烷流量的等值线图</p> <p>保持值 Poly层工艺时间 Poly层磷烷流量 Poly层功率</p>
<p>项目阶段 / 控制 五 / Control</p>	<p>5.1 效果确认：追踪项目指标，是否达成目标。</p>
	<p>提升方案 二次制绒 ↑ 0.05% 制绒工艺参数优化 ↑ 0.05%</p> <p>提升方案 硼扩低氧 ↑ 0.08% 退火温度、时间优化 ↑ 0.07% 烧结温度优化 ↑ 0.06%</p> <p>提升方案 DOE试验改善 ↑ 0.03% 正面网版线宽+膜厚+ 线径组合优化 ↑ 0.02% 硼扩低氧优化 ↑ 0.02%</p> <p>2025 / 3 — 2025 / 4 初 2025 / 4 — 2025 / 5 初 2025 / 5 — 2025 / 6</p> <p>5.2 措施标准化：对改善措施的固化与经验积累。 5.3 财务收益核算：通过本项目提效0.33%，预估年收益3500万元。</p>

质量实践 案例展示

项目案例 2： 降低 CD 级类

项目课题 《210 产品 CD 级缺口类改善》

<p>项目阶段 / 计划 一 / Plan</p>	<p>1、明确问题 1.1 背景：太阳能电池片质量是生存之本，减少电池片降级比例可以直接增加收益。其中 CD 级中缺口类占比 80% 以上，所以本次项目主要也是针对 CD 级缺口类的改善。</p>											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>类别</th> <th>缺陷类型</th> <th>检验标准</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">C 级缺口类</td> <td>C 级隐裂</td> <td>EL 判定为隐裂</td> </tr> <tr> <td>C 级缺口</td> <td>小于三根细栅的范围</td> </tr> <tr> <td>D 级缺口类</td> <td>D 级缺口</td> <td>缺口大小大于三根细栅，小于三根主栅的范围，判定为 D 级</td> </tr> </tbody> </table> <p>1.3 项目现状 Vs. 目标：0.3% Vs. 0.1%</p>	类别	缺陷类型	检验标准	C 级缺口类	C 级隐裂	EL 判定为隐裂	C 级缺口	小于三根细栅的范围	D 级缺口类	D 级缺口	缺口大小大于三根细栅，小于三根主栅的范围，判定为 D 级
类别	缺陷类型	检验标准										
C 级缺口类	C 级隐裂	EL 判定为隐裂										
	C 级缺口	小于三根细栅的范围										
D 级缺口类	D 级缺口	缺口大小大于三根细栅，小于三根主栅的范围，判定为 D 级										
	<p>2、原因分析 2.1 识别产生机理：CD 级中缺口类产生的原理主要为：机械接触及碰撞，导致电池片受力不均，产生损伤； 2.2 锁定项目范围：制绒、碱抛：为槽式设备，对于成品端 CD 级的影响较小；扩退及后续工序：为造成 CD 级缺口的的主要工序。</p>											

项目阶段 / 计划 Plan

2.3 明确接触点位：根据产生机理，制作电池片的模型，模拟生产，对各影响工序——识别出接触的工序点位和机构。

质量工具：微观流程图

开始 > 上料 > 推片 > 上料 > 矫正

硅片从花篮内上料 > 整片气缸规整花篮内硅片 > 开始上料 > 在轨道上矫正

规整 < 传输 < 阻挡 < 传输 < 缓存

气缸规整变节距内硅片 < 变截距升起 < 加入位置由限位块阻挡 < 硅片进入变节距 < 进料不及时缓存上升

取片 > 插片 > 结束

机械手抓取硅片 > 把硅片放在石墨舟内

示例：通过 PECVD 工序，微观流程图识别，影响 CD 级缺口类的 9 个因子。其余各工序依次展开。

质量工具：热力图

示例：PECVD 工序的 9 因子点位图示。其余各工序依次展开。

2.4 各工序接触因子 Xs 汇总：共计梳理出 31 个影响 CD 级的接触因子。

项目阶段 / 计划 Plan

2.5 电池片缺陷位：将离散型指标（缺陷率）转换为连续性指标（缺陷点位）
将 210 电池片按照 1cm 的间距，划分为每边 21 个缺陷位，对 CD 级缺口类电池片按照缺陷位位置进行数据收集。

质量工具：热力图

各缺陷位置热力图 (2.15N - 2.17N)

各缺陷位置柏拉图

2.6 关联与排序：产品缺陷点位 Vs. 过程要素：
将电池片上高频发生缺口类不良的（产品）缺陷位置与识别到的与电池片接触的（过程）点位和机构相互关联依据 CE 矩阵分数，排序不良权重高的过程接触要素 Xi，作为后续重点分析对象。

质量工具：矩阵图

工序	缺陷位置	接触点位名称	A01	B01	A10	A11	A02	B02	A06	B04	A19	A04	A09	A18	D20	A12	A13	A17	总分		
扩散+退火	X01	花篮顶齿	4.91%	3.99%	3.89%	3.78%			1		1	1		1				1	13.4%		
	X02	花篮整形			1								3						1	11.6%	
	X03	吸盘							1	1		1		1					1	13.7%	
	X04	舟顶齿							3										1	11.6%	
	X05	舟整形			1	1												1	1	12.5%	
	X06	石英舟	1								1				3					14.4%	
正背镀膜	X07	花篮整片气缸							1											3.1%	
	X08	校正轮								1		1							1	8.1%	
	X09	缓存							1	1									1	8.5%	
	X10	变截距							1											3.1%	
	X11	皮带限位块			1	1							1			1			1	15.0%	
	X12	干花篮							1	1		1							1	11.1%	
印刷	X13	变截距推片气缸							1										1	5.4%	
	X14	PE吸盘								1									3	10.1%	
	X15	石墨舟卡点			1				1	3	1	3	3	3				3	3	56.3%	
	X16	花篮整片气缸							3											9.2%	
	X17	激光机台面			3	3										3	3			37.4%	
	X18	校正轮							1	1		1								8.8%	
分选 FQC	X19	吸盘			1	1			1					1						13.3%	
	X20	缓存			1	1										1	1			12.5%	
	X21	翻转机构											3					3		14.7%	
	X22	烧结炉带	1	1					1	1		1	1			1	3	1		32.1%	
	X23	电注入料盒					3	3	3	3	3	3		3	3				3	76.1%	
	X24	料盒归正			3				3				3					3	3	42.6%	
	X25	吸盘																		0.0%	
	X26	校正轮										1	1			1	1	1		12.4%	
	X27	EL料盒																			0.0%
	X28	分选料盒	3	3			1	1							1						35.6%
	X29	归纳盒	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	49.3%
	X30	外观检台面	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	49.3%
	X31	放行桌面	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	49.3%

分类：依据 CD 级缺口类不良产生的因素进行分类：
- 制程碎：在 FQC 之前的产线发生的 CD 级定义为制程碎；
- 检验碎：在 FQC 由于人为原因造成的 CD 级定义为检验碎。

项目阶段
一 / 计划
Plan

2.7 确认根因：采用 5WHY 分析法识别出根因，使用假设检验等工具确认是否为显著性因子。

质量工具：5WHY+假设检验

一次因	二次因	三次因	判断依据	要因判定	结论
X22: 烧结炉带	X22-1 炉带速度与进出料速度不匹配	X22-1-1 调试匹配不好	炉带速度与进出料速度保持一致	通过假设检验分析	/
	X22-2 炉带接驳水平异常	X22-2-1 开线调试的缺陷	炉带与接驳皮带保持相对水平	现场经过全部检查确认未发现此类问题	非要因
	X22-3 炉带跑偏	X22-3-1 炉带张紧度存在问题	《A2烧结炉（迈为）设备维护保养规程》	现场经过查看确认存在此类问题	要因
	X22-4 炉带运行不平稳	X22-4-1 石英棒磨损，轴承卡顿链条跳动等	《A2烧结炉（迈为）设备维护保养规程》	正常情况下石英棒处于摩擦状态，存在磨损	要因

◀ X22-1-1初步原因分析：
进出烧结炉带速度不匹配

◀ 动作：
2月20日调整进出烧结炉速度参数，使其速度匹配，电池片在炉带上无滑动

◀ 数据收集：
调整前后分别跟踪验证，查看CD级比例

调整前			调整后		
总数	CD级	比例	总数	CD级	比例
19800	38	0.191%	22000	27	0.123%

双比率检验和置信区间

方法	描述性统计	参数的估计值	检验	方法	之值	P值
p ₁ = 样本 1 = 事件的比率	样本	N	事件	样本 p ₁	期望	观察的 95% 下限
p ₂ = 样本 2 = 事件的比率	样本 1	19800	38	0.001919	0.0006919	0.000050
差值 p ₁ - p ₂	样本 2	22000	27	0.001227	基于正态分布的 CI	基于正态分布的检验使用合并的比率估计值 (0.00155562)

结论：P值 < 0.05，拒绝原假设，改善有效果。X22-1-1进出烧结炉速度参数是**要因**。

示例：原因 Xi 的分析，其余各 Xi 依次展开。

3、制定对策：根据显著性因子，制定改善措施。

通过现场查看，对接触点位进行统计梳理出 **31个** 机械接触点位

通过热力图分析，确定占比前50%的缺口位置，确定 **16个** 重点位置

通过矩阵分析，确定占比前70%的点位，确定 **9个** 重点点位

根因分析识别 **23个** 底层因子，确定 **3个** 快赢项，**20个** 可疑因子

通过对 **20个** 因子逐步筛选确定 **11个** 要因

项目阶段
二 / 实施
Do

4、对策实施：寻找最优改善措施，验证措施效果。

原因：
破真空延时太短

改善措施：
参数从1**±10ms 调整为2**±10ms

改善前：
吸盘放片存在带片风险

▲ 更改前放片延时为 **1**±10ms**

改善后：
吸盘放片更平稳

▲ 更改后放片延时为 **2**±10ms**

示例：原因Xi的改善。其余各Xi依次展开。

项目阶段
三 / 检查
Check

5、目标确认：通过以上改善，目前 CD 级比例下降至 0.08%，仍在持续下降中。

5.1 改善确认：确认改善后影响 CD 级缺口类不良的重要缺陷位置，之前占比较高的破损位置基本排在前 60% 之外，为进一步改善准备。

质量工具：热力图

不同点位CD级占比 累计CD级占比

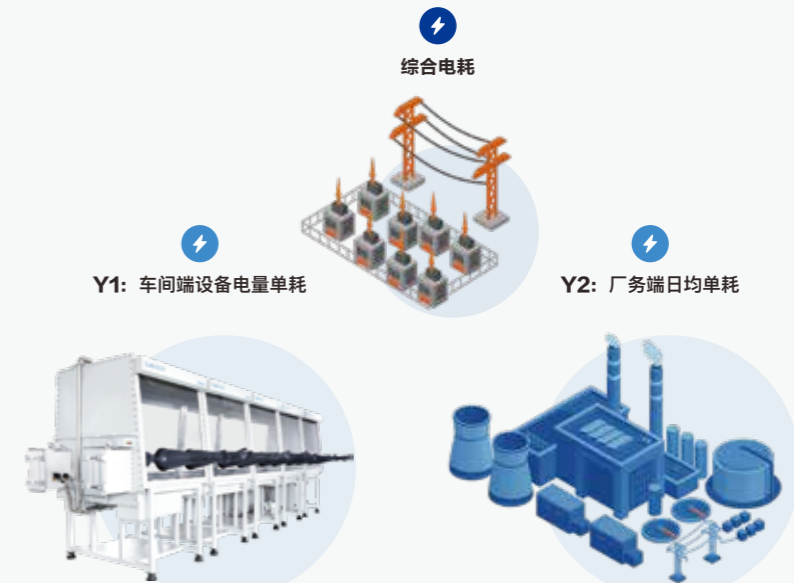
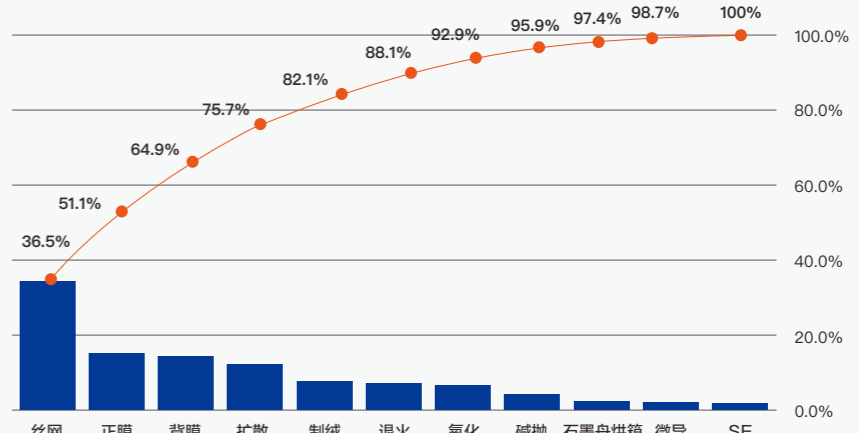
5.2 确认收益：经过财务核算，按照目前的下降比例，减去改善支出成本，全年收益约为600万元。

项目阶段 / 处置 四 / Action	6.1 标准化：将改善过程的措施进行固化，部分 Xi 示例：			
一次因	X15: 石墨舟卡点	X17: 激光机台面	X22: 烧结炉带	
二次因	X15-1 更换新型卡点 改善翘片、翘片	X17-1 激光台面震动	X22-3 炉带跑偏	X22-4 炉带运行不平稳
三次因	X15-1-1 旧卡点易产生翘片、 碎片等	X17-1-1 台面转动电机刚性 设定参数设置不合理	X22-3-1 炉带张紧度存在问题	X22-4-1 石英棒磨损，轴承卡顿 链条跳齿等
相关措施	更换新型卡点	优化激光台面刚性参数 全线检查确认是否存在 此类问题	维保时检查确认 跑偏问题加入维保清单	新增烧结炉带运行状态 日常点检项，出现问题 能够及时发现并排查
相关佐证				
责任人	陈*	陈*	王**	王**
完成日期	3月26日	3月11日	3月23日	3月23日
<p>6.2 总结：总结与展望</p> <p>6.2.1 将离散型的指标（缺陷率），转为连续型（缺陷点位），从而获得更多的信息，定位到问题发生对应的过程要素，问题原因指向清晰。</p> <p>6.2.2 运用简单的质量工具与数据分析，对离散的问题信息挖掘，变得系统化。为划伤类、碎片类问题改善，梳理出一条简洁高效的、可复制的逻辑链与工具链。</p>				

质量实践 案例展示

项目案例 3： 降低电耗类

项目课题 《A厂电耗降低项目》

项目阶段 / 定义 一 / Define	<p>1.1 背景：光伏行业竞争日益激烈，为响应国家绿色发展战略，公司设定于2022年至2025年间达成碳足迹目标，并同步成立降耗专项项目。</p> <p>1.2 现状及目标设定：综合电耗分为 Y1：车间端设备电量单耗 和 Y2：厂务端日均电耗。</p>																								
	<div style="text-align: center;">  </div>																								
	<p>1.2.1 现状及目标设定： Y1：车间端设备电量单耗（生产端指标关联产量，不具有周期性特征）。 现状 Vs. 目标：现状 2.480 万度 / MW Vs. 基础目标：2.450 万度 / MW Vs. 挑战目标：2.400 万度 / MW。 锁定项目范围：Y1 车间端：丝网、正膜、背膜、扩散、制绒、退火、氧化、碱抛、石墨舟烘箱。</p>																								
	<p>质量工具：柏拉图</p> <p>车间各工序日均电耗分布</p>  <table border="1"> <caption>车间各工序日均电耗分布数据</caption> <thead> <tr> <th>工序</th> <th>电耗占比</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>丝网</td><td>36.5%</td></tr> <tr><td>正膜</td><td>51.1%</td></tr> <tr><td>背膜</td><td>64.9%</td></tr> <tr><td>扩散</td><td>75.7%</td></tr> <tr><td>制绒</td><td>82.1%</td></tr> <tr><td>退火</td><td>88.1%</td></tr> <tr><td>氧化</td><td>92.9%</td></tr> <tr><td>碱抛</td><td>95.9%</td></tr> <tr><td>石墨舟烘箱</td><td>97.4%</td></tr> <tr><td>微导</td><td>98.7%</td></tr> <tr><td>SE</td><td>100.0%</td></tr> </tbody> </table>	工序	电耗占比	丝网	36.5%	正膜	51.1%	背膜	64.9%	扩散	75.7%	制绒	82.1%	退火	88.1%	氧化	92.9%	碱抛	95.9%	石墨舟烘箱	97.4%	微导	98.7%	SE	100.0%
工序	电耗占比																								
丝网	36.5%																								
正膜	51.1%																								
背膜	64.9%																								
扩散	75.7%																								
制绒	82.1%																								
退火	88.1%																								
氧化	92.9%																								
碱抛	95.9%																								
石墨舟烘箱	97.4%																								
微导	98.7%																								
SE	100.0%																								

项目阶段
一 / 定义
Define

1.2.2 现状及目标设定: Y2: 厂务端设备电量单耗

锁定项目范围: Y2: 厂务端4大系统, 11个模块。

现状 Vs. 目标: 厂务端指标, 部分模块具有周期性特征, 需识别。
质量工具: 堆积条形图

厂务端系统拆分: Y21非季节影响系统和Y22受季节影响系统;

Y21 非季节影响系统:
废水系统、纯水系统、空分站、尾气、空压机组、空调机组;

Y22 受季节影响系统:
水泵冷却塔 / 冷冻机组;

注: 空调机组冷冻水由冷冻机组供给, 其受季节影响部分由冷冻机组分摊, 因此空调机组未划分在受季节影响模块。

Y21 厂务端日均电耗 — 非季节影响系统:
现状 Vs. 目标:
现状190000千瓦时/天 Vs. 基础目标: 170000千瓦时/天;
挑战目标: 160000千瓦时/天。

Y22 厂务端日均电耗 — 受季节影响系统:
采用同比目标或者历史同工况进行目标设定。

项目阶段
二 / 测量
Measure

2.1 测量系统分析: 1、确认电表数量与测量点分布, 确认后续数据的颗粒度; 2、确认表显示与实物的一致性; 3、评估总表与各分表之和的偏差进行分析, 确保偏差在可控范围内。
2.2 线间差异分析: 找出异常耗点, 实施快赢改善。

结论: 碱抛 — 热水机7线数据明显偏高, 原因为溢流信号与配槽信号接反, 需进行改善; 15线数据明显偏低, 15线为新机台, 其加热效果较老线体好, 用电量低, 属于正常波动。

快赢改善:

工序	问题点	原因分析	改善方案	责任人	完成时间
碱抛	热水机7线溢流信号与配槽信号接反	热水机溢流信号与配槽信号接反	溢流信号与配槽信号对换	饶**	2024/3/**

改善前

改善前 #187 与 #189 接反

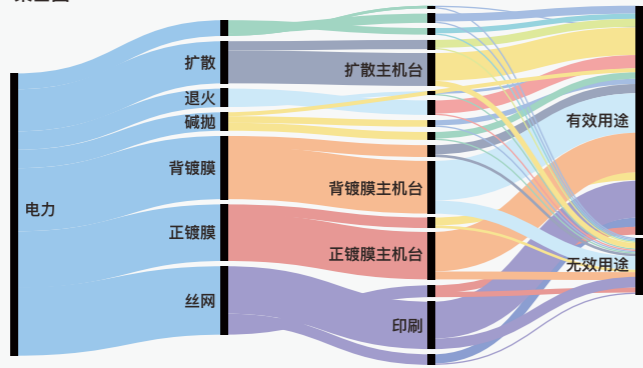
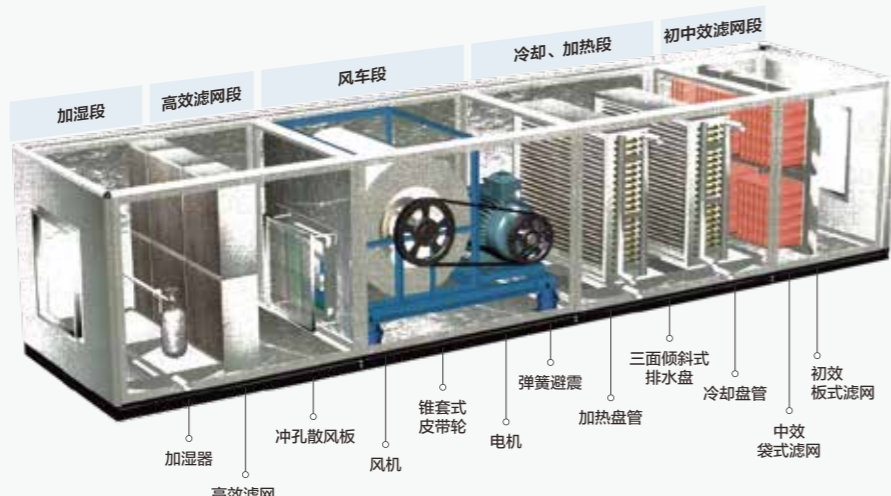
改善后

改善后 #187 与 #189 对换

效果确认
对接接反的线束

改善后日均节能 **73kwh**

示例: 碱抛 — 热水机电耗组件差异分析与快赢改善, 其余各工序依次展开。

<p>项目阶段 二 / 测量 Measure</p>	<p>2.3 电能利用分析: 电能利用可视化分析, 分为有效用途和无效用途。</p>																																																							
<p>M</p>	<p>质量工具: 桑基图</p> 																																																							
<p>项目阶段 三 / 分析 Analysis</p>	<p>3.1 识别耗电单元: 对主要耗电设备, 进行结构爆炸, 逐步拆解到具体的耗电单元作为改善因子。</p>																																																							
<p>A</p>	<p>质量工具: 爆炸图</p>  <p>注: 空调系统示意图来源网络</p> <table border="1" data-bbox="453 1481 1300 1864"> <thead> <tr> <th>编号</th> <th>部件名称</th> <th>功能作用</th> <th>是否耗电单元</th> <th>耗电等级</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>初中效过滤器</td> <td>过滤新风粉尘</td> <td>是</td> <td>◇</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>冷盘</td> <td>制冷、除湿</td> <td>否</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>综合盘管</td> <td>夏季制冷(除湿)、冬季制热</td> <td>否</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>热盘</td> <td>制热</td> <td>否</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>电机</td> <td>驱动风机</td> <td>是</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>风机</td> <td>提供车间正压</td> <td>是</td> <td>◇</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>冲孔散风板</td> <td>保证送风温湿度、露点</td> <td>否</td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>高效滤网</td> <td>过滤外气中硫化氢气体</td> <td>否</td> <td></td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>FFU</td> <td>提供循环风量</td> <td>是</td> <td>◇</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>DCC</td> <td>制冷</td> <td>是</td> <td>◇</td> </tr> </tbody> </table>	编号	部件名称	功能作用	是否耗电单元	耗电等级	1	初中效过滤器	过滤新风粉尘	是	◇	2	冷盘	制冷、除湿	否		3	综合盘管	夏季制冷(除湿)、冬季制热	否		4	热盘	制热	否		5	电机	驱动风机	是	○	6	风机	提供车间正压	是	◇	7	冲孔散风板	保证送风温湿度、露点	否		8	高效滤网	过滤外气中硫化氢气体	否		9	FFU	提供循环风量	是	◇	10	DCC	制冷	是	◇
编号	部件名称	功能作用	是否耗电单元	耗电等级																																																				
1	初中效过滤器	过滤新风粉尘	是	◇																																																				
2	冷盘	制冷、除湿	否																																																					
3	综合盘管	夏季制冷(除湿)、冬季制热	否																																																					
4	热盘	制热	否																																																					
5	电机	驱动风机	是	○																																																				
6	风机	提供车间正压	是	◇																																																				
7	冲孔散风板	保证送风温湿度、露点	否																																																					
8	高效滤网	过滤外气中硫化氢气体	否																																																					
9	FFU	提供循环风量	是	◇																																																				
10	DCC	制冷	是	◇																																																				

<p>项目阶段 三 / 分析 Analysis</p>	<p>3.2 节电技术: 寻找和归纳节电技术。</p>																																																																																																																																																																																																		
<p>A</p>	<p>质量工具: 层化</p> <p>节能技术分类:</p> <table border="1" data-bbox="1965 466 2827 621"> <thead> <tr> <th>一级</th> <th>减少耗电电机</th> <th colspan="2">电能转化循环利用</th> <th colspan="3">电能转化消耗节约</th> <th colspan="2">工艺流程节约电能</th> <th>更换低耗电设备</th> <th>降低单耗</th> <th>储能</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>二级</td> <td>关闭不需要的机台</td> <td>循环加热</td> <td>循环风机</td> <td>热能回收</td> <td>减少散热</td> <td>减少散冷</td> <td>提升转化效率</td> <td>优化工艺流程</td> <td>降低热量要求</td> <td>替换高能耗设备</td> <td>增加产能</td> <td>储能</td> </tr> </tbody> </table>	一级	减少耗电电机	电能转化循环利用		电能转化消耗节约			工艺流程节约电能		更换低耗电设备	降低单耗	储能	二级	关闭不需要的机台	循环加热	循环风机	热能回收	减少散热	减少散冷	提升转化效率	优化工艺流程	降低热量要求	替换高能耗设备	增加产能	储能																																																																																																																																																																									
一级	减少耗电电机	电能转化循环利用		电能转化消耗节约			工艺流程节约电能		更换低耗电设备	降低单耗	储能																																																																																																																																																																																								
二级	关闭不需要的机台	循环加热	循环风机	热能回收	减少散热	减少散冷	提升转化效率	优化工艺流程	降低热量要求	替换高能耗设备	增加产能	储能																																																																																																																																																																																							
<p></p>	<p>3.3 识别节能方案: 对耗电单元, 结合各种节电技术, 产生降电节能方案。</p>																																																																																																																																																																																																		
<p>A</p>	<p>质量工具: 矩阵图</p> <table border="1" data-bbox="1965 1036 2827 1699"> <thead> <tr> <th rowspan="2">一级 (总)</th> <th rowspan="2">二级 (工序)</th> <th rowspan="2">三级 (设备)</th> <th rowspan="2">四级 (耗电/损耗单元)</th> <th colspan="10">节能技术</th> <th rowspan="2">节能方案</th> </tr> <tr> <th>减少耗电 机台</th> <th>电能转化 循环利用</th> <th>电能转化 消耗节约</th> <th>工艺流程 节约电能</th> <th>更换低 耗电设备</th> <th>降低 单耗</th> <th>储能</th> <th>减少 散热</th> <th>减少 散冷</th> <th>提升转 化效率</th> <th>优化工 艺流程</th> <th>降低热 量要求</th> <th>替换高 能耗设备</th> <th>增加 产能</th> <th>储能</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="10">厂务 Y2</td> <td rowspan="10">暖通系统 Y2-1</td> <td rowspan="3">冷却系统 冷冻机组</td> <td>X111-1</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>提高冷冻水出水温度调节范围</td> </tr> <tr> <td>X111-2</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>清洗冰机冷凝器</td> </tr> <tr> <td>X111-3</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>降低冷却水回水温度</td> </tr> <tr> <td>冷却系统 水泵</td> <td>X112</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>降低供水压差</td> </tr> <tr> <td>冷却系统 冷却塔</td> <td>X113</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>调整冷却塔风机频率</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">空压系统 空压机组</td> <td>X114-1</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>降低末端用气量</td> </tr> <tr> <td>X114-2</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>降低供气压力</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">空压系统 干燥机</td> <td>X115-1</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>减少加热时间</td> </tr> <tr> <td>X115-2</td> <td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>减少干燥机的开启台数</td> </tr> <tr> <td>空调机组 空调通风系统</td> <td>X116</td> <td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>√</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>×</td><td>降低风机电机频率</td> </tr> </tbody> </table>	一级 (总)	二级 (工序)	三级 (设备)	四级 (耗电/损耗单元)	节能技术										节能方案	减少耗电 机台	电能转化 循环利用	电能转化 消耗节约	工艺流程 节约电能	更换低 耗电设备	降低 单耗	储能	减少 散热	减少 散冷	提升转 化效率	优化工 艺流程	降低热 量要求	替换高 能耗设备	增加 产能	储能	厂务 Y2	暖通系统 Y2-1	冷却系统 冷冻机组	X111-1	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	提高冷冻水出水温度调节范围	X111-2	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	清洗冰机冷凝器	X111-3	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	降低冷却水回水温度	冷却系统 水泵	X112	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	降低供水压差	冷却系统 冷却塔	X113	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	调整冷却塔风机频率	空压系统 空压机组	X114-1	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	降低末端用气量	X114-2	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	降低供气压力	空压系统 干燥机	X115-1	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	减少加热时间	X115-2	√	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	减少干燥机的开启台数	空调机组 空调通风系统	X116	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	降低风机电机频率
一级 (总)	二级 (工序)					三级 (设备)	四级 (耗电/损耗单元)	节能技术										节能方案																																																																																																																																																																																	
		减少耗电 机台	电能转化 循环利用	电能转化 消耗节约	工艺流程 节约电能			更换低 耗电设备	降低 单耗	储能	减少 散热	减少 散冷	提升转 化效率	优化工 艺流程	降低热 量要求	替换高 能耗设备	增加 产能		储能																																																																																																																																																																																
厂务 Y2	暖通系统 Y2-1	冷却系统 冷冻机组	X111-1	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	提高冷冻水出水温度调节范围																																																																																																																																																																																		
			X111-2	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	清洗冰机冷凝器																																																																																																																																																																																		
			X111-3	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	降低冷却水回水温度																																																																																																																																																																																	
		冷却系统 水泵	X112	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	降低供水压差																																																																																																																																																																																		
		冷却系统 冷却塔	X113	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	调整冷却塔风机频率																																																																																																																																																																																		
		空压系统 空压机组	X114-1	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	降低末端用气量																																																																																																																																																																																	
			X114-2	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	降低供气压力																																																																																																																																																																																	
		空压系统 干燥机	X115-1	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	减少加热时间																																																																																																																																																																																	
			X115-2	√	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	减少干燥机的开启台数																																																																																																																																																																																	
		空调机组 空调通风系统	X116	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	降低风机电机频率																																																																																																																																																																																	

项目阶段 三 / 分析 Analysis

3.4 筛选可行的节能方案：对降耗方案进行多维度（能耗收益、资金投入、改造耗时、设备故障率、工艺品质等）评估，筛选出可行的节能方案。

质量工具：矩阵图

节能收益

改善成本

改造周期

设备故障率

安全风险

质量风险

Rating of importance					1151	-274	-186	-1239	-4934	-2215	
序号	工序	设备	Xs	节能技术	节能收益	改善成本	改造周期	设备故障率	安全风险	质量风险	总分
X90	丝网	上料机	更换低功率步进电机	替换高能耗的设备	1	3	3	0	0	0	-229
X91	丝网	激光机	优化打标路径打标提速	增加产能	1	0	0	0	0	0	1151
X93	丝网	印刷机	更换低功率步进电机	替换高能耗的设备	1	3	3	0	0	0	-229
X94	丝网	印刷机	两面共用一台冷水机	关闭不需要的机台	9	0	1	1	0	0	8934
X95	丝网	烘箱	烘箱、烧结炉出口加装保温材料	减少散热	3	0	0	0	0	0	3453
X96-1	丝网	烘箱	更换低功率炉带电机	替换高能耗的设备	1	3	3	1	0	0	-1468
X96-2	丝网	烘箱	加热设备变频	减少散热	9	3	3	0	0	0	8979
X97-1	丝网	烧结炉	燃烧塔降温	降低热量要求	9	0	0	0	1	0	5425
X97-2	丝网	烧结炉	烧结炉热回收	热能回收	9	9	3	0	0	0	7335
X98	丝网	烧结炉	更换分段加热灯管	替换高能耗的设备	9	1	1	0	0	0	9899

A

项目阶段 四 / 改进 Improve

4.1 执行改进方案：对可行的节能方案进行执行和风险评估。

示例：执行Xi：降低溢流温度（制绒）的改善

改善方向：

一级节能——工艺流程节约电能		二级节能——优化工艺流程	
工序/系统	制绒	耗电单元	加热器
责任人&完成时间	陈**/曾* 2024/3/**		

机理说明：
清洗热水机主要由加热器升温，降低热水机溢流温度，可减少用电量。

改善前

溢流温度 7*°C

改善后

溢流温度 6*°C

效果确认

日均节能 **265kwh / 线**

风险评估：
降低热水机溢流温度后可能会导致**贴片带液增多**。

4.2 评估和验证其他影响：评估和验证该方案对产品质量等是否有负面影响，分析出降耗的底线。

示例：执行Xi：降低溢流温度（制绒）的风险阈值探底

编号	溢流温度	验证线别	验证日期	验证数量	贴片带液不良	电耗	验证结论	分析工具
1	75	1#	2024/3/20	88654	8	851	OK	回归分析 卡方检验 双P
2	70	1#	2024/3/21	92235	12	782	OK	
3	65	1#	2024/3/22	89625	14	672	OK	
4	60	1#	2024/3/23	91245	16	511	OK	
5	55	1#	2024/3/24	88654	45	470	NG	

▲ 回归分析显示
温度越高电耗越高

▲ P<0.05
说明不同温度对贴片带液不良有显著影响

▲ P<0.05
说明55°C溢流温度贴片带液不良数量明显增多



3.3

全范围质量管理： 客户旅程地图到供应链协同的生态质量

基于QFD与APQP协同的 客户需求闭环管理系统

在光伏产品核心性能维度，通威太阳能始终以行业前沿标准为准，深度适配不同客户的差异化需求，提供兼具长期稳定性与场景适配性的高品质产品。围绕 CTM、功率、双面率等关键指标管控，搭建“客户声音挖掘 - 需求转化 - 体验优化”全流程体系，依托全链路工具链整合与数据驱动分析，实现客户画像精细化、需求标准化、生产动态调控及全生命周期体验升级，最终形成“需求 - 设计 - 交付 - 反馈”的客户需求增强闭环，确保性能精准匹配应用场景，为客户创造稳定的长期价值。

通过构建客户旅程地图，将 QFD 需求矩阵与 APQP 阶段评审的联动应用、嵌入用户情绪指标的实时监测体系、将售后服务数据反哺产品设计创新机制实现产品缺陷率下降，迭代周期缩短与客户满意度提升的全面优化。

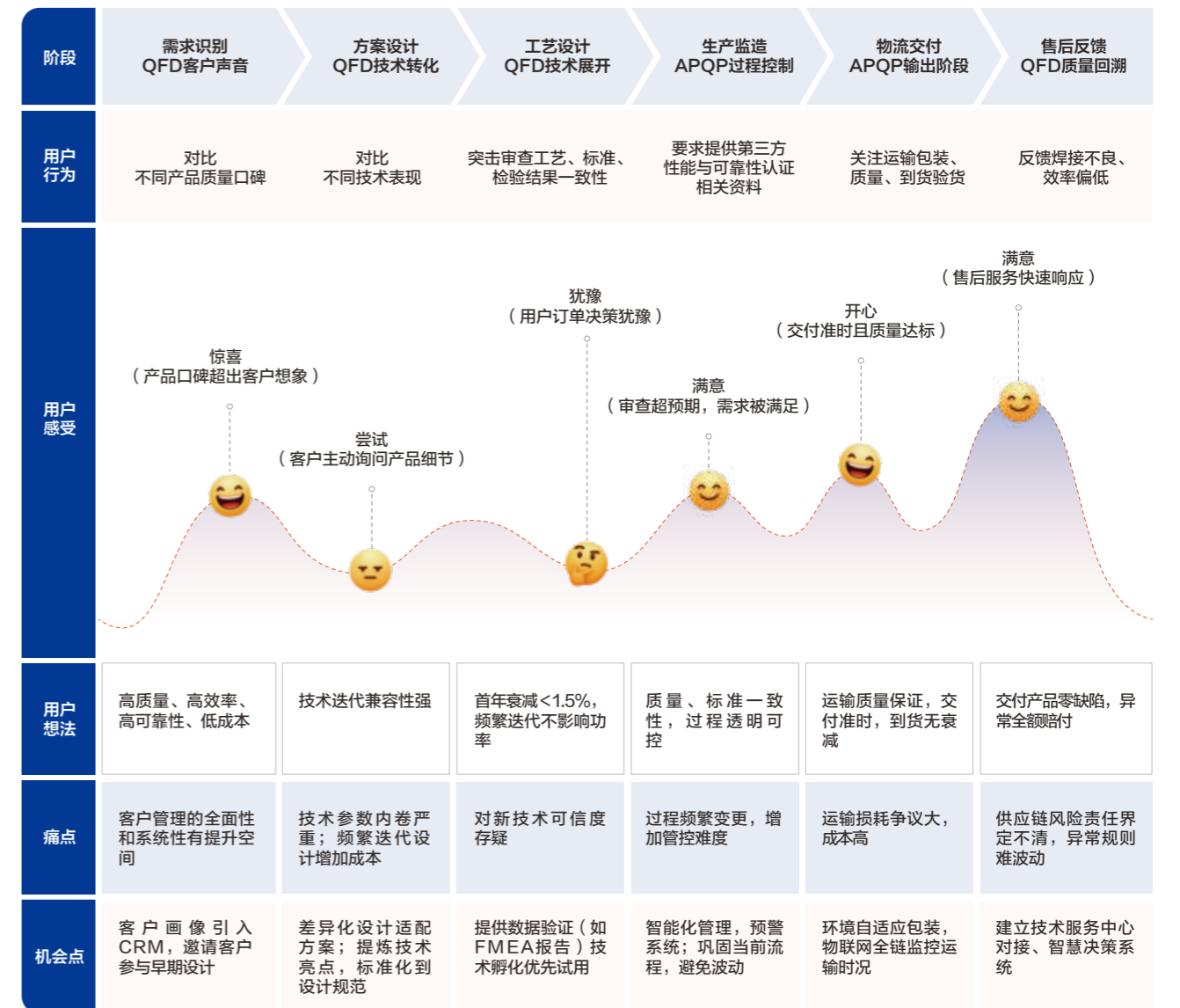


图3.1 通威太阳能客户旅程地图示例

01 第一阶段：客户需求分析

注意：本单元的项目案例中数据皆为脱敏数据

- 收集客户需求：如功率、可靠性、成本等，明确客户的核心需求和潜在需求
- 分析市场需求和竞争对手
- 对客户需求进行优先级排序
- 建立客户需求与技术特性的关系矩阵
- 识别技术特性：根据客户需求，识别出影响产品质量的技术特性（如转换效率、抗 PID 性能、焊接强度等）
- 确定技术特性的目标值：为每个技术特性设定目标值（如转换效率 $\geq 26.5\%$ ），明确改进方向

02 第二阶段：技术特性展开

- 将客户需求转化为电池片设计特性：（如电池片效率、厚度、抗 PID 性能等）
- 确定设计参数的重要性
- 确定关键设计参数，并评估其技术可行性
- 建立设计参数与零部件特性的关系矩阵
- 通过仿真和实验优化设计方案
- 确定零部件特性的目标值，为每个零部件特性设定目标值（如栅线宽度 $\leq 25\mu\text{m}$ ），明确改进方向

03 第三阶段：工艺优化与过程控制

- 将设计特性转化为生产工艺参数要求：根据设计特性，确定生产工艺参数（如扩散温度、镀膜厚度、退火时间等），确保工艺参数能够实现设计特性
- 制定工艺流程图和关键工艺参数
- 优化生产工艺：确保工艺参数在最佳范围内（如扩散温度、镀膜厚度、退火时间等）以提高产品质量和一致性
- 制定过程控制计划：明确关键工艺参数的监控方法和控制限，监控关键工艺参数，确保生产过程的稳定性和一致性
- 建立工艺参数与生产操作的关系矩阵
- 确定生产操作参数的目标值：如镀膜温度控制在 $490 \pm 15^\circ\text{C}$ ，明确改进方向

04 第四阶段：质量控制与持续改进

- 将生产操作参数转化为生产控制参数
- 建立生产控制参数与质量控制点的关系矩阵
- 确定质量控制点的目标值
- 制定质量控制计划，明确质量控制点和检测方法
- 实施生产控制及时发现和解决质量问题
- 分析客户反馈和生产数据，制定持续改进措施

从订单到计划分解、生产过程管理，到客户交付的跨职能集控管理模式

通威太阳能致力于构建跨部门及部门内数据管理机制，以 QFD 与 APQP 协同的客户需求闭环管理系统为出发点，引入覆盖订单业务交付的全生产流程管理模式，通过 ERP 系统、MES 系统、SRM 系统、WMS 系统、全产线监控中心、BI 系统等的数据集成及 IT 与 OT 的集成，实现各环节的业务流程自动化，对质量数据采集、管理、处理、分析、应用等全过程管理，建设跨部门及部门内数据管理机制，促进质量数据在业务活动间高效率交换共享。

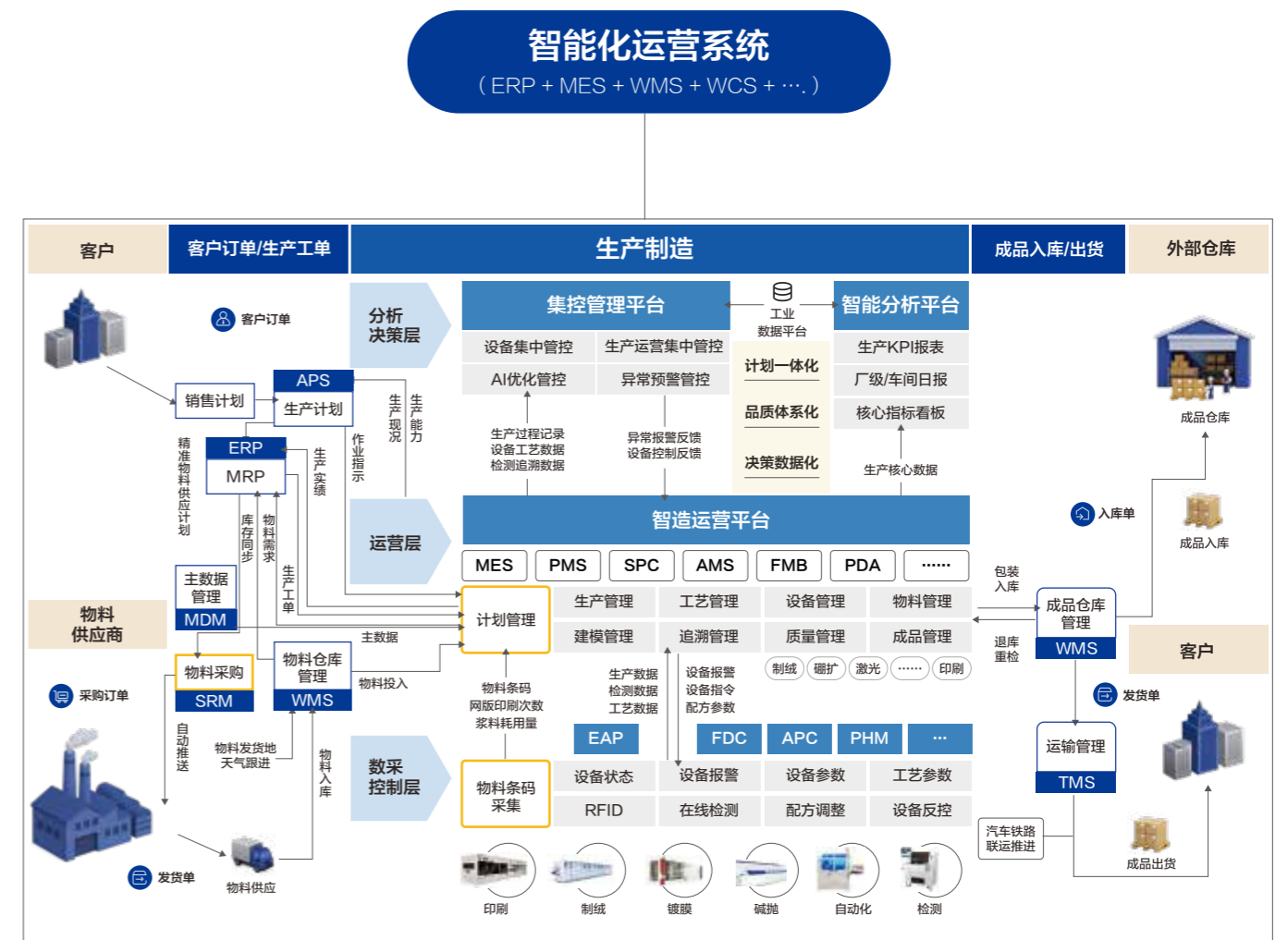


图3.2 通威太阳能智能化平台

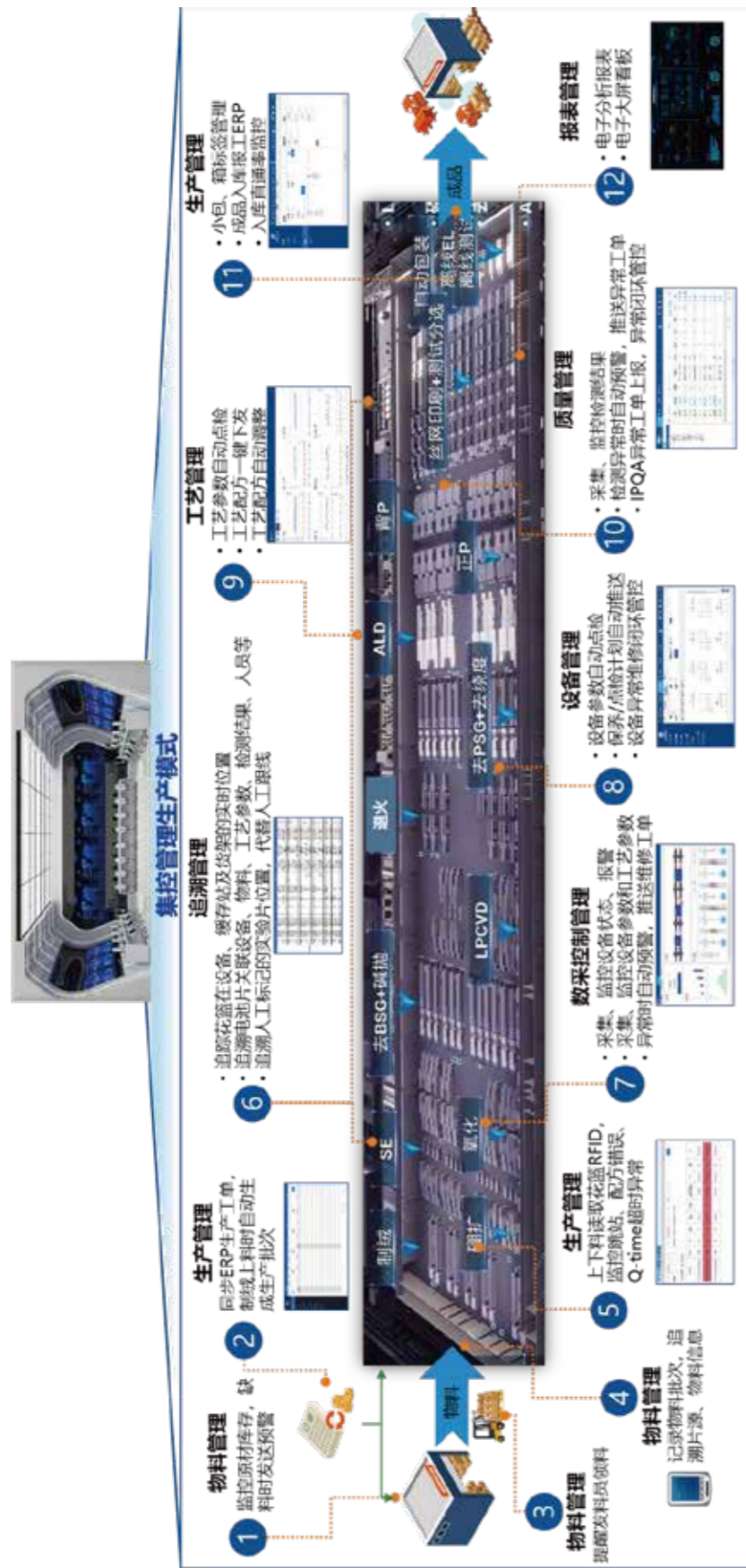


图3.3 通威太阳能MES智能制造系统

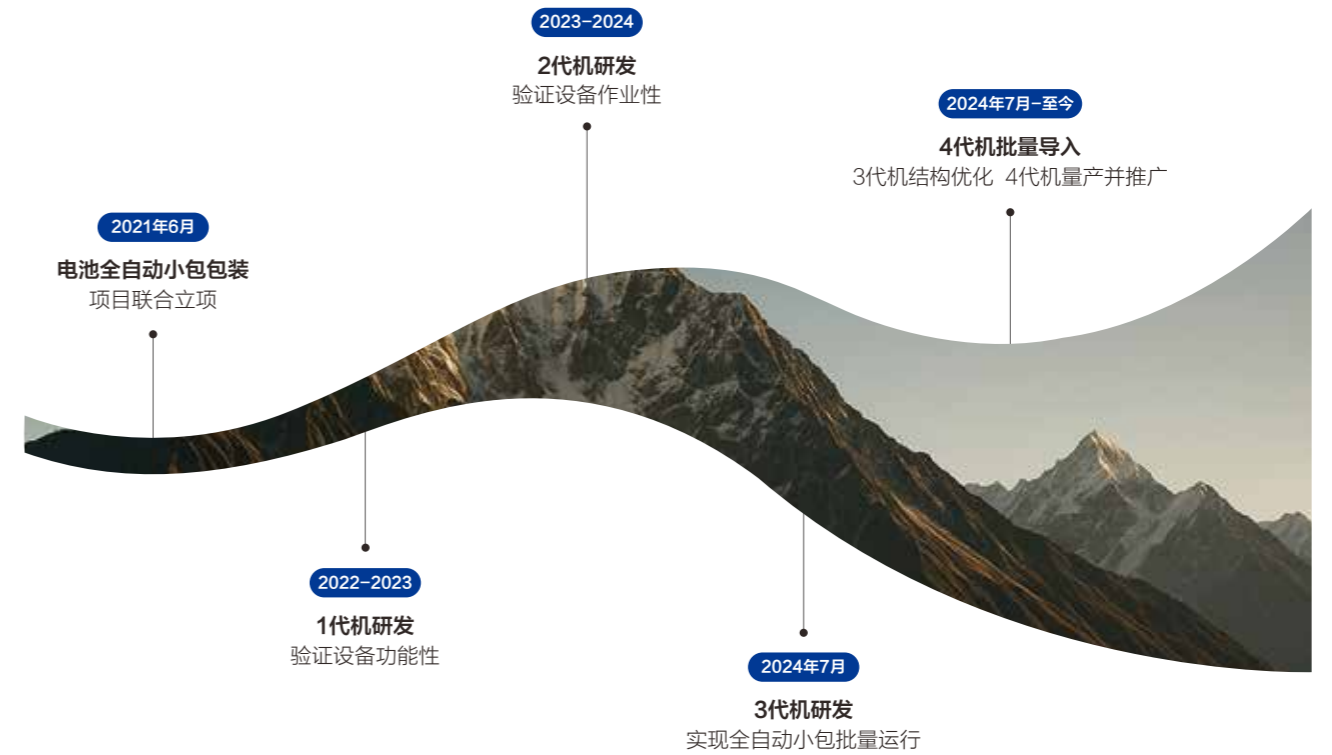
供应链协同

通威太阳能与供应链伙伴深度紧密的合作关系，共同推进供应链协同模式与流程优化。从供应链的韧性与可持续性方面提升企业的核心竞争力，以实现企业在价值链中的成本优化、质量升级和技术创新，如：

从组件功率与电池 QE 曲线研究，传递到电池材料、结构和工艺的优化；协同设备供应商创新优化，小包装设备开发、铝舟改造、炉体升级、石墨舟减重、建立供应商管理库存（VMI）系统等。

以增强供应链核心竞争力，减少生产异常及设备故障，年收益超千万，实现双赢，并且最终促进整个太阳能产业链高效发展，让公司在行业动态变化中保持竞争优势。

示例 1： 电池片全自动小包包装设备联合开发



通威太阳能联合行业供应商，历经 4 年持续攻坚，成功突破技术瓶颈，研发出全球领先的电池片全自动小包包装设备。通过 4 代技术迭代，深度整合机械设计、智能控制、视觉检测等多领域技术，攻克了高精度定位、高速动态包装、多环节协同控制等核心难题，单机单班自动包装产能突破 50 万片，开创电池规整、检测、贴标、包装的全流程智能化生产纪元，最终实现设备性能的跨越式提升。

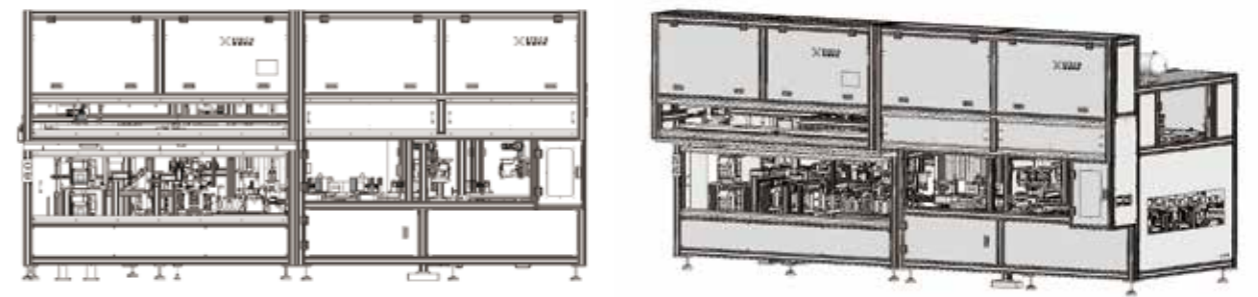


图3.4 通威太阳能联合设备供应商研发的全自动小包包装设备

在通威太阳能，我们正开发和部署基于数据的质量控制和质量决策模型，提高质量响应和处理的及时性，更加有效的质量预防和改进。基于大数据的全过程、全生命周期、全价值链质量分析、控制与改进，推进数据模型驱动的产业供应链质量协同，深入挖掘质量数据价值，及时洞察质量风险和机遇。

示例 2: 铝舟底座改造

通威太阳能联合工装夹具供应商，设计和改造铝舟底齿的结构，铝舟 U 型底齿改 V 型底齿，有效降低 Al_2O_3 绕镀发生率。

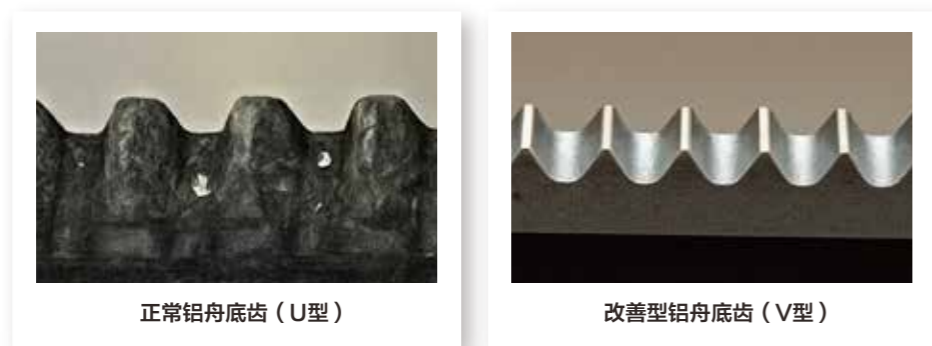


图3.5 通威太阳能联合供应商电池绕镀改善

示例 3: 炉体（绝缘块）改造

通威太阳能联合设备供应商，设计炉体陶瓷块结构，改造退火炉体内陶瓷阻隔块的分布，来缩小小支撑点之间的间距，优化炉丝布局与支撑结构，减少热应力集中，延长备件使用寿命，换相 N / L1 后损耗量降低 85%。

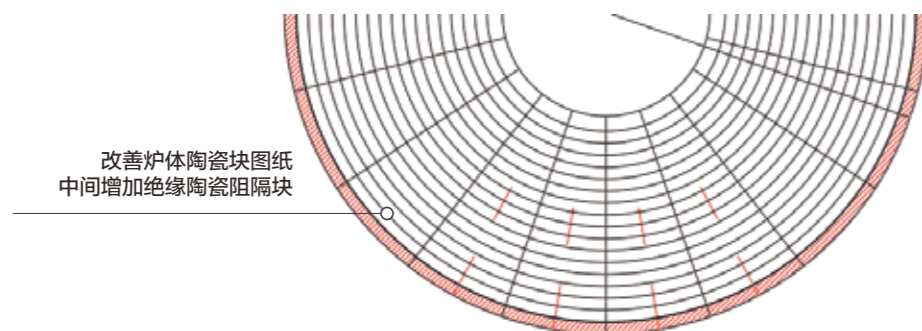


图3.6: 通威太阳能联合供应商备件降本改善

示例 4: 石墨舟减重

通威太阳能联合设备供应商，通过修改石墨舟的陶瓷管外径，使石墨舟减重 7.4kg，降低电机功耗。且石墨舟主要起到承载硅片的作用，载具的关键尺寸（齿间距，花篮高度，花篮宽度）均为未改变，不会对质量产生影响。

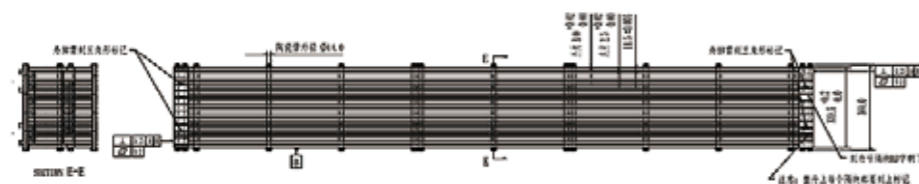


图3.7: 通威太阳能联合供应商电机降耗改善

第四章 光伏质量的 未来趋势与倡议

4.1

数字化质量： 智能与智慧

工业4.0智慧园区数字化生产车间



200+
智能制造线



3000+
智能运输机器人



工业4.0
高效自动化电池生产线



全球领先
光伏行业5G应用基地



5G专有频段
稳定性高达99.999%

数字化智能工厂整体架构 “1+1+3+3” 战略

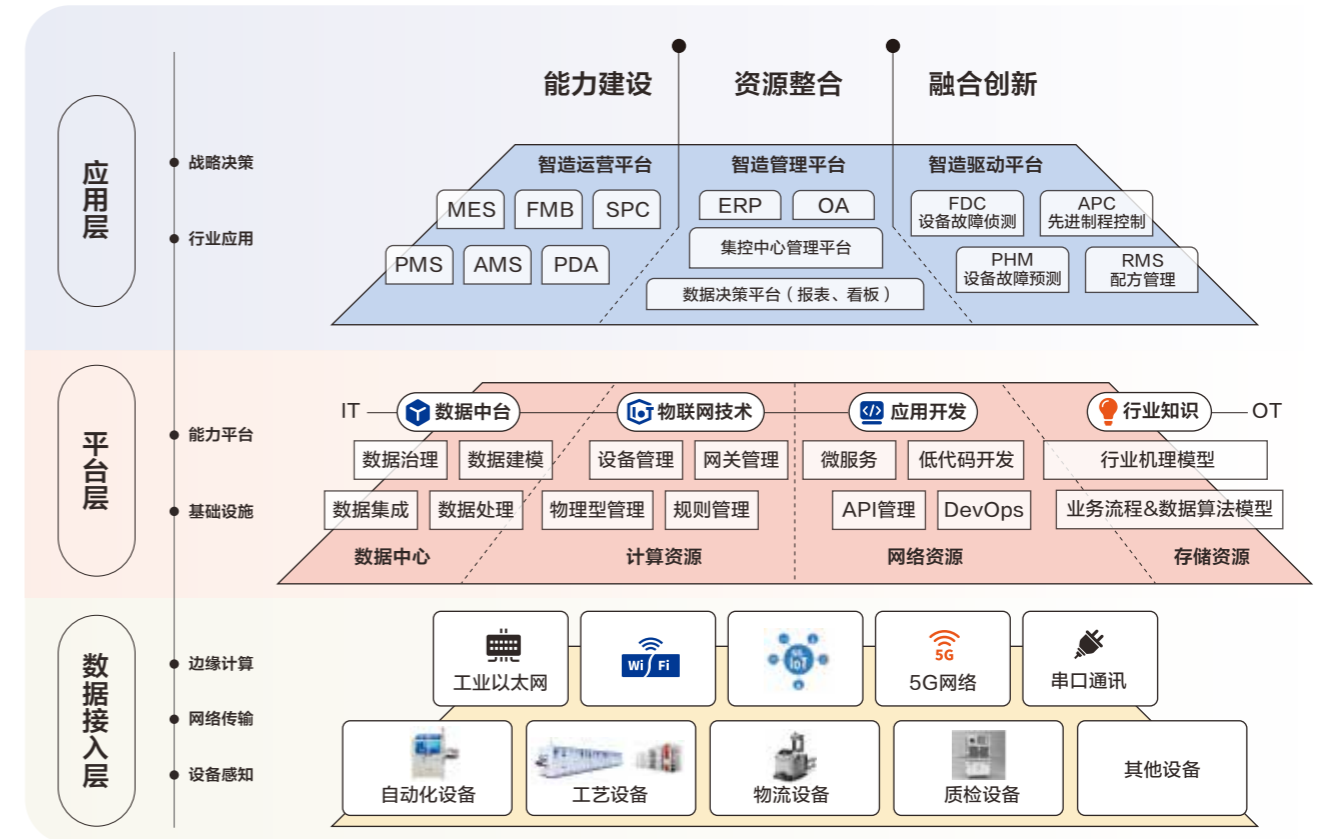


图4.1 通威太阳能数字化智能工厂整体架构

“1”个基础平台

建立涵盖基础设施、数据中台、物联网技术、应用开发及融合行业知识的**工业互联网**基础平台，实现信息化基础、核心平台和协同集成建设三个重要提升目标，支撑工业应用的高效开发与运维。

“1”个接入体系

通过EAP系统和设备数字化改造，**统一设备接入标准规范**，实现数据采集和片级追溯；构建工业控制网络，实现自动化设备、工艺设备、检测设备及其他设备的快速接入与互联互通。

“3”个提升阶段

整个数字化转型过程需经历**能力建设、资源整合、融合创新**三个提升阶段，并伴随企业组织优化变革。

“3”个智造应用平台

以**数字化基础能力**提升为起点，以**工业互联网平台**为基础，通过既有系统集成与新工业应用开发形成**智造运营、管理、驱动**三大应用板块，推动企业智能制造转型升级。

数字化用例全景

降低成本	效率提升	质量控制	设备	供应链
<ul style="list-style-type: none"> 基于运筹学模型的全工序多目标智能排产 基于AOI图像识别和AGV联动的柔性返工处理 管式设备自动闭环调优 	<ul style="list-style-type: none"> 十亿级大数据模型驱动的端到端电池效率优化 基于智能分析的闭环效率管控 高价值物料使用优化的深度学习模型 	<ul style="list-style-type: none"> 基于CNN/DNN镀膜厚度的智能检测及大数据赋能的优化控制 基于硅片级追踪的质量问题闭环管理 基于全流程来料质量的监控系统 	<ul style="list-style-type: none"> 基于高阶分析的数字化能源管理系统 基于GenAI专家系统的设备OEE管理 基于设备主动报警的诊断 	<ul style="list-style-type: none"> 电池产品智能组托 IGV小车工序物料转移 室外5G无人叉车
<ul style="list-style-type: none"> 车间机械表自动点检系统 石墨舟自动搬运系统 石英舟自动搬运系统 	<ul style="list-style-type: none"> 高价值耗材寿命预测的智能化 基于数据采集完成电池片级Wafer ID追溯 	<ul style="list-style-type: none"> 高阶过程异常诊断 全流程图像综合诊断 大数据EL智能分图 	<ul style="list-style-type: none"> 机台健康度评估及故障预防性维护建议 报警功能手环推送 电子流程工单 	<ul style="list-style-type: none"> 智慧园区管理 智能仓储管理 智慧财务管理 数字化ERP4.0
<ul style="list-style-type: none"> 自动化拆包机 FQC成品自动收料机 镀膜真空泵尾排自动控制 台面纸自制 清洗设备氢气含量自动检测控制系统 	<ul style="list-style-type: none"> 关键工艺的数字化监控和自动化实施 智能化工艺参数点检 方阻模型预测 SMBB测试改造项目 	<ul style="list-style-type: none"> EL智能复判 网版自动化检验 方阻自动测试分析 减重自动测试分析 	<ul style="list-style-type: none"> 厂务安环 厂务智能运维系统 EHS安全平台 报警信息及时推送 能源管理系统 水平衡体系 制冷系统提效 耗材寄售管理系统 	<ul style="list-style-type: none"> 智能办公 光伏云盘 光伏学习中心 i通威 创意中心 FBC流程中心

凭借在智能制造领域的卓越实践和出色的企业管理水平，打造工业4.0数字化智能工厂，构建数据驱动，智能运营的“数字通威”、“智慧通威”。

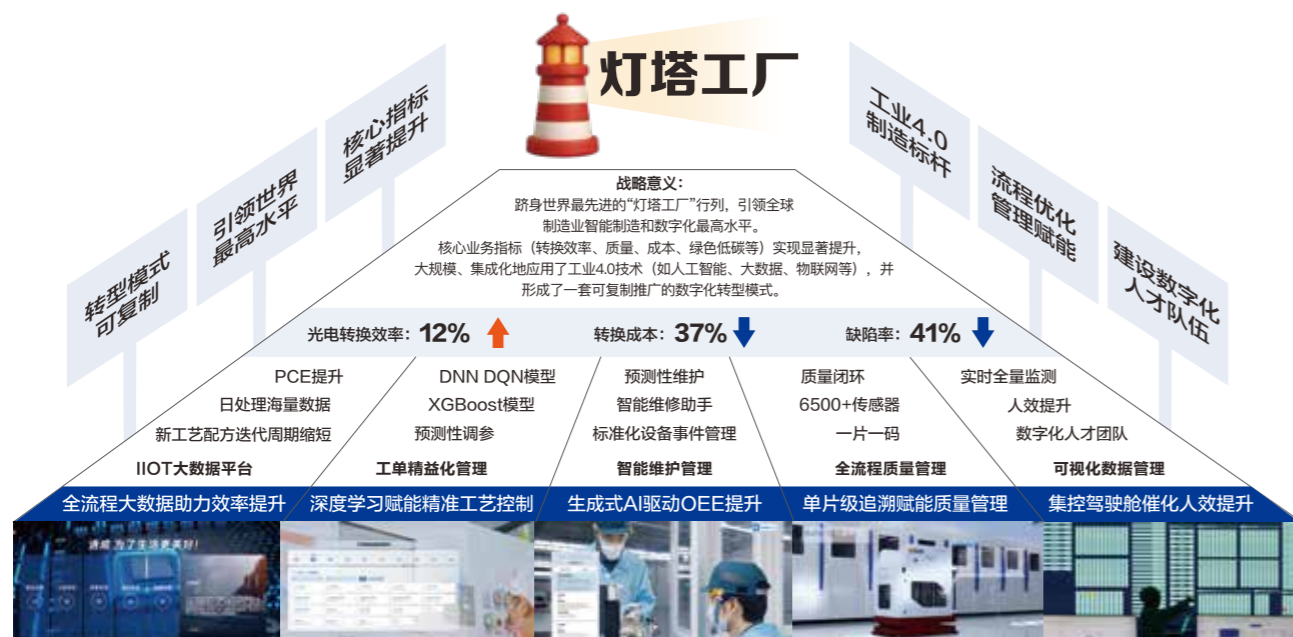


图4.2 通威太阳能灯塔工厂智能制造系统图

案例1: 单片追溯管理系统

传统电池片追溯按批次和花篮进行追溯，数据颗粒度太粗，无法精准定位。异常分析排查需要人工反查所需时间长，无法快速进行溯因分析。通威太阳能开发电池片单片追溯管理系统，通过 EAP 和设备实时交互，MES 根据规则对每张电池片生成虚拟 ID，记录电池片实物与虚拟 ID 的位置变化，形成每张电池片的生产履历。



图4.3 通威太阳能单片追溯管理系统

实现电池单片级的信息追溯，能定位到具体炉管、舟，厂内测试分选前电池片全生产数据打通：

1. 现场通过使用单片追溯系统快速定位异常片位置，快速响应，根因定位平均耗时 < 30s，且极大提升不良追踪的准确率，及时排查异常和处理异常，减少定位期间不良品的持续产出。
2. 系统持续收集“产品特性-过程特性”相关联的大数据，为建立模型、训练AI提供了高质量的数据支撑，驱动工艺、生产模型的不断优化，助力企业降本增效进程。

案例2: AI质检与预警

传统产线质量的人工巡检, 存在以下痛点:

- 异常容易漏处理,
- 无法实时监控报警,
- 无闭环反馈措施,
- 异常数据反馈信息离散, 难以统计分析,
- 人员流动会导致经验断层, 难以有效解决问题。

改善方向: 从传统改善思路转向“AI 驱动预防性质量控制”的底层逻辑。



1、基于测试机台检测数据, 建立预警规则, 通过 MES 系统向移动端推送预警信息, 将抽样检查变为全面监控, 提升异常发现与反馈的及时性, 支持实时监控报警。异常问题纳入闭环反馈流程, 自动生成并保存台账, 将经验库、AI 模型、生产设备串联成为完整闭环系统。

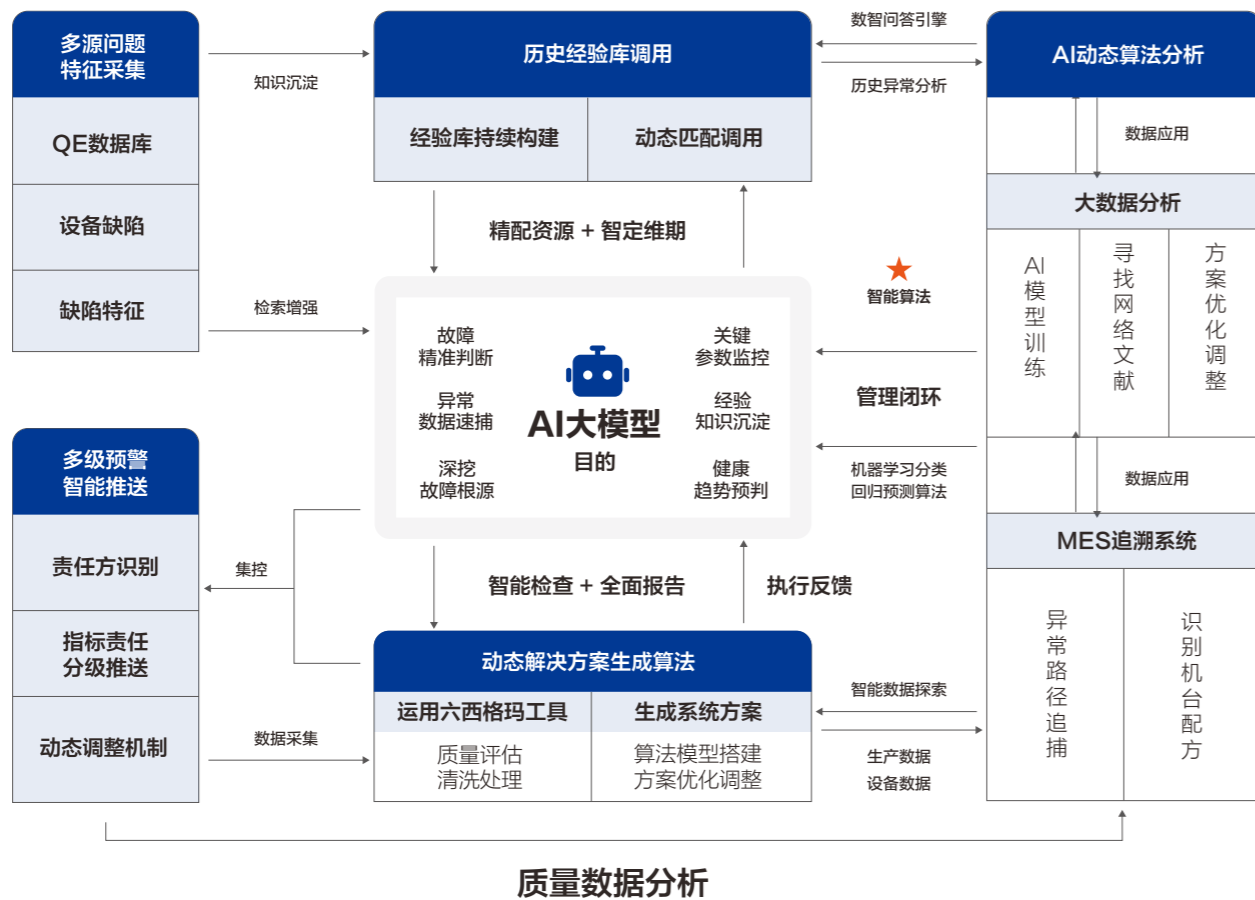


图4.4 通威太阳能智能AI接取指标分析推送系统

2、收集工程师经验库, 部署本地 AI 并强化训练模型。实现“数据采集 - 分析 - 执行 - 反馈”的全链路智能化, 利用 AI 的数据分析、预测、自动化能力, 弥补员工在处理复杂系统时的局限性; 最终实现 A 级率的持续提升和生产体系的柔性化升级。

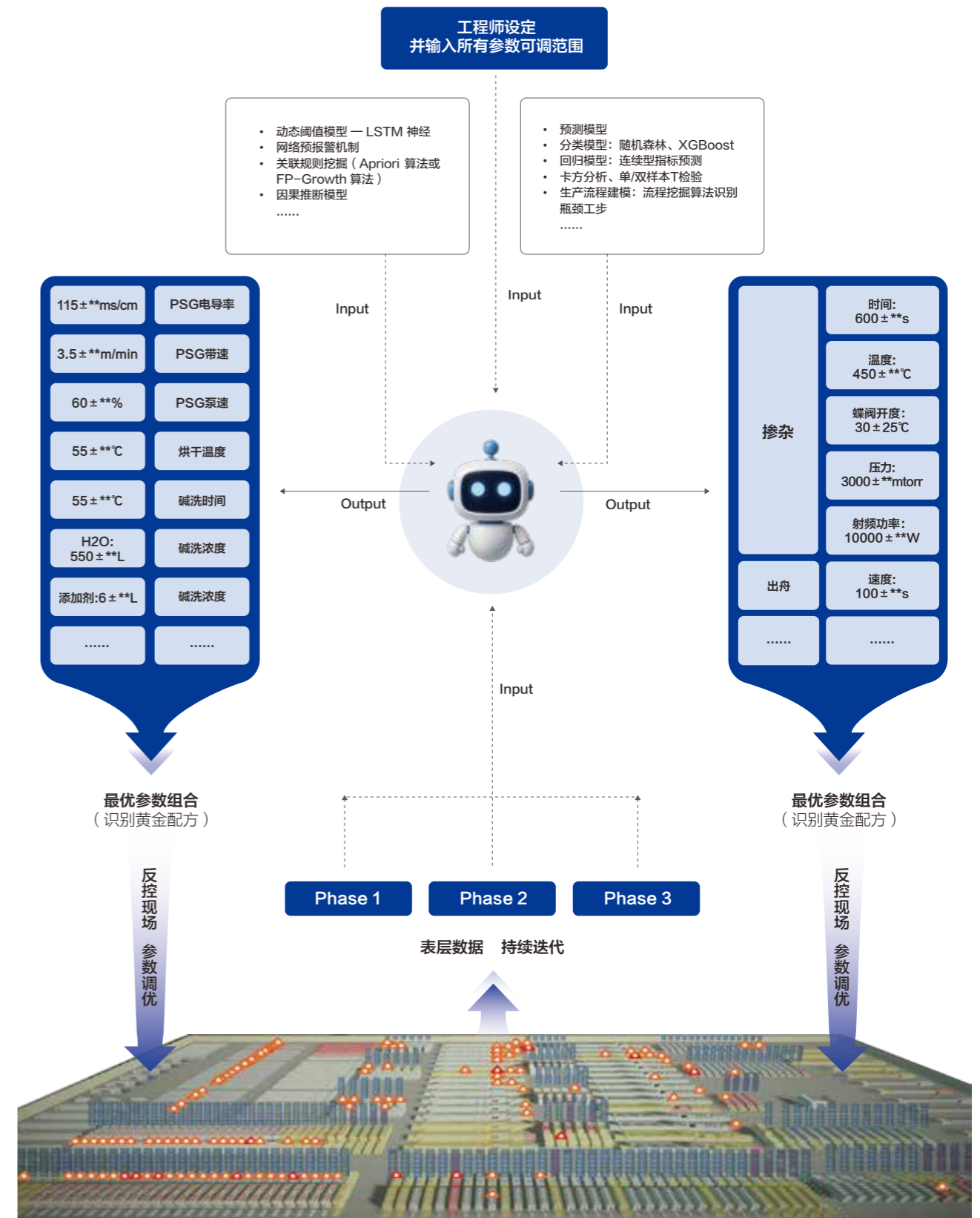


图4.5 通威太阳能智能AI反向控制系统

案例3: MRP与BOM联动

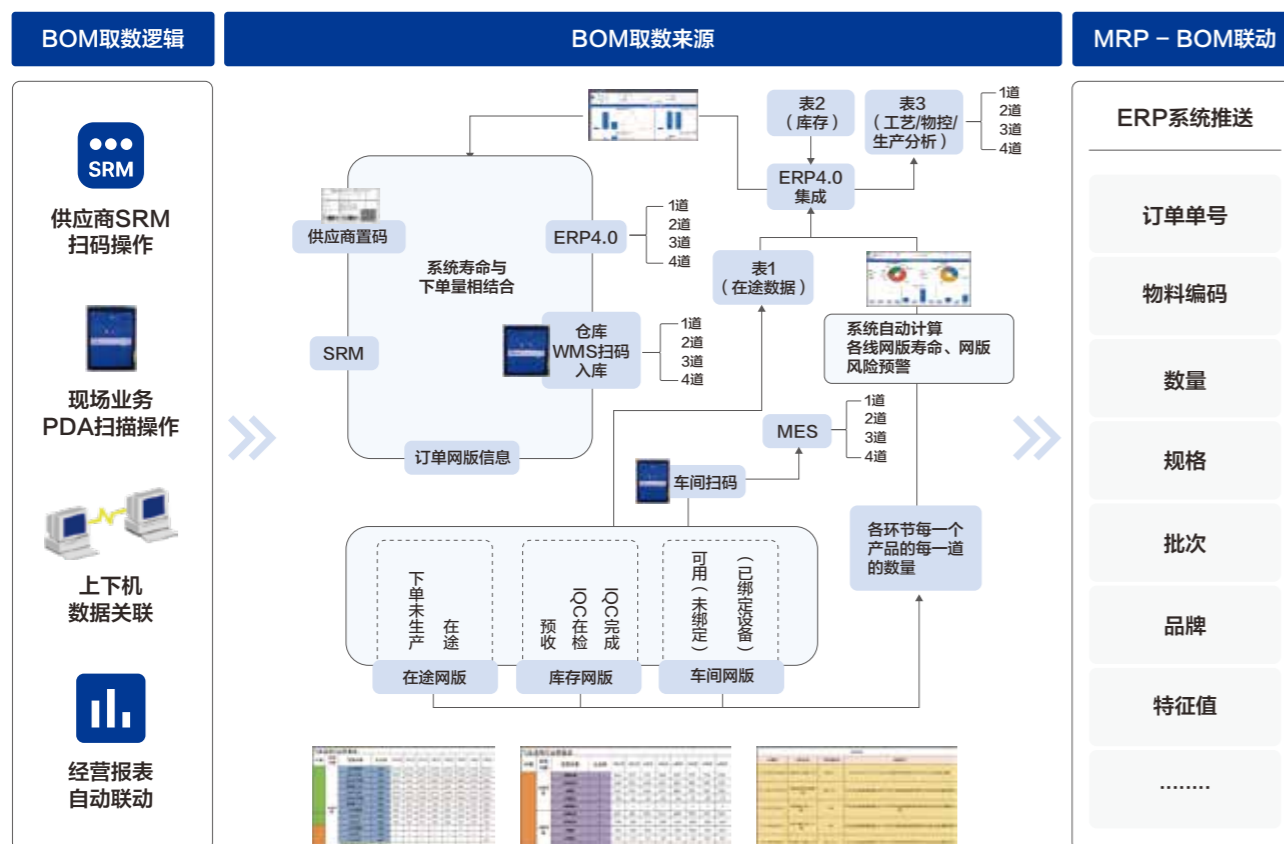
通威太阳能在电池片行业首创全物料管控 BOM，并实现 BOM 数据与 APS 联动，自动生成 MRP 物料需求，支撑物料全生命周期数据跟踪与精准管控。

3项
行业突破:

- 引入BOM
- 引入MRP
- 引入全流程扫码

2项
创新实践:

- BOM数据联动经营数据周期性更新，突破BOM原有规则；
- MRP下推数据与物料状态数据匹配，状态实时。



4.6 通威太阳能MRP-BOM联动系统

BOM数据1:

硅片、网版、浆料均采用全流程扫码上线，实现数据的全流程追踪，数据可视化100%。

BOM数据2:

化学品、添加剂、气体、包材采用经营数据，自动联动取数。

通过 BOM 数据，APS 排产自动匹配生成 MRP 物料需求信息下推。

4.2

创新驱动未来

通威始终坚持以技术立身发展，以创新驱动前行。目前，通威已建立行业最先进、完备的研发平台，全面布局行业主流的 TOPCon、HJT、XBC、钙钛矿 / 晶硅叠层电池及组件技术的研发，推动行业技术发展。凭借通威全球创新研发中心持续注入的强大研发动能，通威不断深入光伏技术研发创新之路，行稳致远，为中国乃至全球可持续发展事业贡献通威力量。^[7]

通威THC+THL Tongwei HJT+THL

行业HJT电池及组件标杆
完美的双面电池，适合高温双面发电

The industry benchmark of HJT cells and modules
Perfect bifacial cells, suitable for high-temperature bifacial power generation.

研发最高批次效率 **26.2%**
Highest cell efficiency on R&D line: 26.2%

通威TNC Tongwei TOPCon

通威自研PE-poly技术路线
具有性价比优势，全场景应用

PE-poly approach independently developed by Tongwei
cost-effective, all-scenario applicable

量产电池效率 **26.33%**
Mass production cell efficiency of 26.33%

通威TBC Tongwei BC

行业最先进水平行列
最高效率，最佳单面应用

The most advanced in the industry
Highest efficiency, best single-sided application

量产电池效率 **26.8%**
Mass production cell efficiency of 26.8%

钙钛矿硅叠层技术 Perovskite-silicon Tandem Technology

超越晶硅单结电池29.56%效率极限
下一代电池技术研究热点

Exceeds the 29.56% efficiency limit of crystalline silicon single-junction cells
Research frontier for next-generation cell technology

实验室电池效率 **34.78%**
Laboratory Cell Efficiency: 34.78%

4.3

光伏行业质量倡议

当前，随着市场规模扩张与地域格局重构，全球光伏产业正经历结构性变革。而中国光伏行业发展迅猛，已实现全环节绝对优势，在全球占据主导地位，同时也面临产能过剩与技术迭代的双重压力。

在光伏行业的快速发展中，还有许多问题亟待达成行业共识与统一，例如均匀性指标的定义、过程 SPC 的控制策略、FMEA 的评级标准，供应链的追溯性管理等，通威太阳能期待与业界同仁共同探讨精益求精的管理在制造业转型升级中的更多实践应用。

通威太阳能以价值创造为核心，支持产业链的整合与资源优化，携手行业伙伴共同推动光伏产业高质量发展。

光伏行业各产业链分布图 — 硅料

内蒙古

- 内蒙古京运通新材料科技有限公司
- 包头晶澳太阳能科技有限公司
- 弘元新材料（包头）有限公司
- 内蒙古通威高纯晶硅有限公司
- 内蒙古鄂尔多斯高科技硅材料有限公司
- 内蒙古鑫元硅材料科技有限公司
- 内蒙古大全新能源有限公司
- 内蒙古新特硅材料有限公司
- 内蒙古中环晶体材料有限公司

青海

- 亚洲硅业(青海)股份有限公司
- 青海丽豪清洁能源股份有限公司
- 青海亚洲硅业半导体有限公司
- 青海亚洲硅业硅材料有限公司

四川

- 四川晶科能源有限公司
- 乐山市京运通半导体材料有限公司
- 四川永祥新能源有限公司
- 四川永祥多晶硅有限公司

云南

- 曲靖隆基硅材料有限公司
- 曲靖晶澳太阳能科技有限公司
- 丽江隆基硅材料有限公司
- 云南通威高纯晶硅有限公司

光伏行业各产业链分布图 — 银浆

陕西

- 西安创联光电新材料有限公司

湖南

- 湖南利德电子浆料股份有限公司

河南

- 河南浩丰铝业科技发展有限公司

四川

- 四川帝科电子材料有限公司

陕西

- 陕西有色天宏瑞科硅材料有限责任公司

北京

- 北京京运通科技股份有限公司
- 晶澳太阳能科技股份有限公司

天津

- 中环新能源科技股份有限公司

江西

- 晶科能源股份有限公司

江苏

- 江苏协鑫硅材料科技发展有限公司
- 江苏美科太阳能科技股份有限公司
- 江苏中能硅业科技发展有限公司

宁夏

- 宁夏润阳硅材料科技有限公司

江苏

- 澳利能源技术有限公司
- 江苏绿能电力有限公司
- 江苏太阳科技股份有限公司
- 江苏中润光能科技股份有限公司
- 苏州晶银新材料股份有限公司
- 无锡帝科电子材料科技有限公司
- 常州聚和新材料股份有限公司
- 无锡帝科电子材料股份有限公司
- 江苏日御光伏新材料股份有限公司

上海

- 善仁新材料科技有限公司
- 上海先丰能源科技有限公司

浙江

- 浙江光达电子科技有限公司
- 中希集团有限公司

广东

- 广东羚光新材料股份有限公司
- 广州市儒兴科技股份有限公司
- 广州市银标贸易有限公司

光伏行业各产业链分布图 — 硅片

新疆

- 新疆大全新能源股份有限公司
- 东方希望集团
- 新特能源股份有限公司

山西

- 山西路安太阳能科技有限责任公司

陕西

- 西安隆基硅科技股份有限公司
- 陕西有色光电科技有限公司
- 隆基绿能科技股份有限公司

青海

- 亚洲硅业（青海）股份有限公司

四川

- 四川永祥股份有限公司
- 协鑫集团控股有限公司
- 通合新能源(金堂)有限公司
- 乐山市京运通新材料科技有限公司
- 乐山市京运通硅片有限公司
- 四川永祥光伏科技有限公司
- 四川高景太阳能科技有限公司
- 中威新能源（成都）有限公司

河南

- 洛阳中硅高科技有限公司
- 河南恒星科技股份有限公司

河北

- 英利绿色能源控股有限公司
- 晶澳太阳能科技股份有限公司

内蒙古

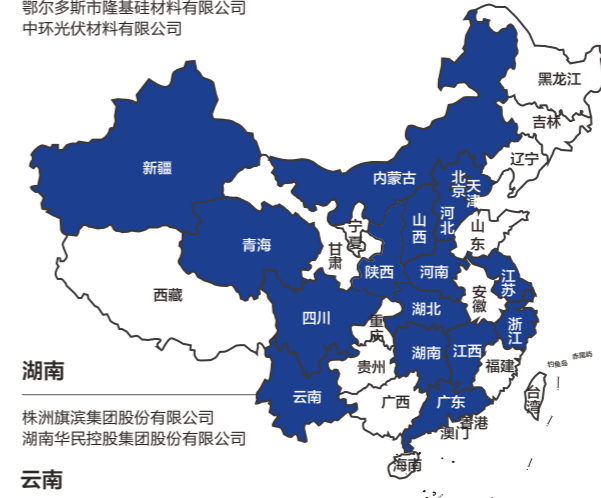
- 内蒙古东立光伏电子有限公司
- 鄂尔多斯、晶澳科技、内蒙弘元、包头美科
- 内蒙豪安、阿特斯、山晟新能源
- 利晶硅新材料(内蒙古)有限公司
- 内蒙古通威高纯晶硅有限公司
- 恒利晶硅新材料(内蒙古)有限公司
- 弘元新能源（包头）有限公司
- 华耀光电科技股份有限公司
- 鄂尔多斯市隆基硅材料有限公司
- 中环光伏材料有限公司

浙江

- 宁波矽源达新能源有限公司
- 亿晶光电科技股份有限公司
- 阿特斯阳光电力有限公司
- 慈溪市宏宇电器有限公司
- 衢州市东宇石英制品有限公司
- 浙江东硕新能源有限公司
- 浙江矽盛电子有限公司
- 浙江向日葵聚辉新能源科技有限公司
- 浙江芯能光伏科技股份有限公司

江苏

- 江苏中能硅业科技发展有限公司
- 一保利协鑫（HK3800）
- 阿特斯阳光电力有限公司
- 江苏聚能硅业有限公司
- 无锡中硅新材料有限公司
- 润海光伏科技股份有限公司
- 江苏华盛天龙光电设备股份有限公司
- 澳利能源技术有限公司
- 南京大全新能源有限公司
- 福能科技江苏有限公司
- 江苏顺丰光电科技有限公司
- 江苏中润光能科技发展有限公司
- 连云港飞冠石英制品有限公司
- 苏州晶耀光电科技股份有限公司
- 江苏新湖光伏科技发展有限公司
- 扬州伟业创新科技有限公司
- 镇江荣德新能源科技有限公司
- 无锡荣能半导体材料有限公司
- 协鑫科技（苏州）有限公司
- 无锡京运通科技有限公司
- 弘元新材料（徐州）有限公司
- 常州华耀光电科技有限公司



湖南

- 株洲旗滨集团股份有限公司
- 湖南华民控股集团股份有限公司

云南

- 楚雄隆基硅材料有限公司
- 晶科能源（楚雄）有限公司
- 楚雄宇泽供应链有限公司
- 云南宇泽新能源股份有限公司

天津

- TCL中环新能源科技股份有限公司
- 天津市兆益晶鼎科技有限公司
- 天津中环光伏太阳能有限公司
- 天津环欧国际硅材料有限公司

湖北

- 宜昌南玻硅材料有限公司

北京

- 北京京运通科技股份有限公司
- 中电科电子装备集团有限公司
- 锦州佑华硅材料有限公司

广东

- 深圳莱美斯硅业有限公司
- 深圳南玻光伏能源有限公司
- 深圳市捷佳伟创新能源装备股份有限公司
- 深圳市拓日新能源科技股份有限公司
- 一腾新材料科技有限公司
- 广东金湾高景太阳能科技有限公司
- 高景太阳能股份有限公司

上海

- 上海航天汽车机电股份有限公司
- 上海卡姆丹克太阳能科技有限公司
- 上海申和热磁电子有限公司（FTS）

江西

- 江西赛维LDK太阳能高科技有限公司
- 宜春宇泽新能源有限公司
- 晶科能源股份有限公司

光伏行业各产业链分布图 — 光伏电池

新疆

- 大全新能源股份有限公司

陕西

- 隆基绿能科技股份有限公司

广东

- 爱旭科技有限公司
- 拓日新能源科技股份有限公司
- 拓为能源科技有限公司
- 拓普新能源有限公司
- 国富光伏科技有限公司
- 立鑫集团有限公司

山东

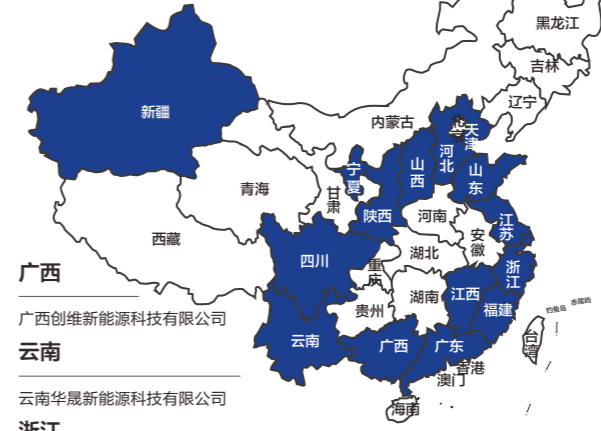
- 润洋新能源科技有限公司
- 力诺光伏高科技有限公司
- 润马光能科技有限公司
- 昂立天晟光伏科技有限公司

四川

- 通威太阳能有限公司
- 四川英发睿能科技股份有限公司
- 光同程光伏科技（宜宾）有限公司
- 横店集团东磁股份有限公司

宁夏

- 宁夏隆基绿能新能源有限公司



广西

- 广西创维新能源科技有限公司

云南

- 云南华晟新能源科技有限公司

浙江

- 东方日升新能源股份有限公司
- 亿晶光电科技股份有限公司
- 锦浪科技股份有限公司
- 尤利卡太阳能股份有限公司
- 正泰太阳能科技有限公司
- 欧达光电有限公司
- 一道新能源科技股份有限公司

福建

- 福建省金石能源股份有限公司

江西

- 晶科能源股份有限公司
- 江西展宇光伏科技有限公司

山西

- 山西路安太阳能科技有限公司

天津

- 天津中环半导体股份有限公司

江苏

- 天合光能股份有限公司
- 中利集团股份有限公司
- 中来光伏新材股份有限公司
- 江苏润阳悦达光科技有限公司
- 淮安捷泰新能源科技有限公司
- 阿特斯阳光电力集团股份有限公司
- 江苏中宇光伏科技有限公司
- 上能电气股份有限公司
- 固德威技术股份有限公司
- 亚玛顿股份有限公司
- 中信博新能源科技股份有限公司
- 江苏中润光能科技股份有限公司

上海

- 协鑫集成科技股份有限公司
- 上海晶科绿能企业管理有限公司
- 先韦能源科技有限公司
- 上海爱旭新能源股份有限公司

河北

- 晶澳太阳能科技有限公司

注：来源银创智库及通威太阳能合作供应商

注：来源银创智库及通威太阳能合作供应商

附录

- 【1】 中国光伏行业协会CPIA《中国光伏产业发展路线图（2023-2024）》
- 【2】 Infolink发布：2024全年电池片出货排名 2025年02月17日
<https://www.infolink-group.com/energy-article/cn/solar-topic-cell-shipment-ranking-2024-top5-yoy-decline>
- 【3】 Infolink《2030光储能源转型白皮书》P30
- 【4】 中国光伏行业协会CPIA《2024-2025年中国光伏产业发展路线图》P33
- 【5】 Infolink发布：2025上半年电池片出货排名 2025年08月08日
<https://www.infolink-group.com/energy-article/cn/solar-top-ic-infolink-1h25-pv-cell-shipment-ranking-top-five-manufacturers-up-13-yoy>
- 【6】 Infolink《2024年光伏技术供需报告》
- 【7】 通威发布：25.28%！通威TNC高效组件效率再破纪录！2025年03月21日
<https://www.tongwei.cn/news/11673.html>
- 【8】 《通威组件白皮书》P8
- 【9】 《通威TNC2.0产品白皮书》P7

策划单位：通威太阳能有限公司 莱茵技术监护（深圳）有限公司

总策划：周华

顾问：宋泉 王耀颐 罗晓云 郭宽新 顾峰 姚骞 徐涛

主编：庞三凤

执行主编：王海（莱茵）

编辑：吴汉臣 李永强 黄水华 谢介 韩贝贝 孔令国 朱家有 戴林辰 李伟
杜婷 杨洋 高艺轩 全芳 苏瑶 莫琪凡 邹林川 周维燕 邹祥
陈阳 周雨情 宋毅 刘洋 刘乾巧 宋尉 秦燕华 郑茂菲 李杰
胡席瑞 秦浩 何建峰 李富琼 徐杨 吴倩 刘瑶

名词释义

PERC	Passivated Emitter and Rear Contact 发射极钝化和背面接触
BC	Back Contact 背接触电池技术
TOPCon	Tunnel Oxide Passivated Contact 隧穿氧化层钝化接触
HJT	Heterojunction Technology 异质结技术
TNC	Tongwei N-type passivated Contact Technology 通威 N 型钝化接触技术
OEE	Overall Equipment Effectiveness 设备综合效率
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis 失效模式和影响分析
SPC	Statistical Process Control 统计过程控制
TQM	Total Quality Management 全面质量管理
QCC	Quality Control Circles 品质控制圈
TPM	Total Productive Maintenance 全员生产维护
DOE	Design of Experiment 实验设计
QFD	Quality Function Deployment 质量功能展开
VSM	Value Stream Mapping 价值流程图
CTQ	Critical-To-Quality 关键质量特性