

---

# 《高压气态加氢站系统设计与成套装备关键技术及应用》摘要

同济大学

燃料电池复合电源研究所

二零二一年四月二十日

项目联系人：吕洪 副教授 13818941812

---

## 高压气态加氢站系统设计与成套装备关键技术及应用

中国燃料电池汽车行业正处于核心技术从全面跟跑到总体并跑、局部领跑的新发展阶段，提高产品品质、提升产品核心竞争力成为核心主题。高压气态加氢站作为燃料电池汽车产业的重要基础设施与商业化推广的核心环节，是氢能领域核心技术的竞争制高点之一。超高压加氢站用氢气压缩/储存技术与装备、高压氢气快速加注技术与装备、高压加氢站安全风险量化评价与设计集成技术则是高压气态加氢站研制的前沿技术难题。本项目聚焦上述问题的“设计集成难”与“加工制造难”的技术要害，自主攻克了高压气态加氢站系统设计与成套装备关键技术，**总体技术国际先进，部分国际首创**，实现了核心技术自主掌控、有力应对国际竞争挑战的巨大成效。

### 创新成果 1：超高压加氢站用氢气压缩、储存技术与装备

通过纳米强化与晶界调控技术创新性地研制出高强抗氢脆、抗高温蠕变的奥氏体合金膜片，并提出临氢高压部件的异质多层结构设计方法，结合膜腔曲面优化有效解决了超高压氢压机膜片和缸盖易失稳开裂的设计制造难题。建立了基于多工况氢致开裂与裂纹扩展评价的抗氢脆钢材筛选方法，在国际上首次采用 4130X 热轧无缝钢管，突破长寿命大容量超高压钢制储氢瓶式容器设计与制造技术，并创新性地研制出 45MPa 大容量站用储氢瓶（容器）和 92MPa 的碳纤维全缠绕钢制内胆的储氢瓶式容器。成果填补多项国际和国内空白。**所属学科（氢能利用，代码：2902380）。获得授权发明专利 10 项、实用新型专利 28 项，公开发明专利 2 项，主持制订国家标准 3 项、行业标准 3 项、企业标准 2 项、规范 1 项。**

#### （1）高可靠超高压隔膜氢气压缩机设计与集成

在氢隔膜压缩机中，高压高温临氢环境工作的膜片与缸盖易于塑性失稳和氢致开裂，严重影响压缩机的可靠性与安全性，是氢压机面临的主要难点。针对超高压隔膜压缩机膜片材料易于氢至失效难题，本项目通过纳米强化和晶界调控技术创新性地研制出与基体共格的 $\gamma' - Ni_3(Ti, Al)$ 相增强的 J75 Fe-Ni 基高强抗氢脆奥氏体合金改性技术，解决了氢压机高压临氢膜片易塑性失稳和氢致开裂失效难题，并创新性地开发出耦合抗氢脆、耐疲劳以及安全保护功能于一体的三层组合膜片设计方法，结合膜腔曲面优化技术有效解决了超高压氢隔膜压缩机膜片塑性失稳和氢致开裂难题，使得膜片最长寿命达到 8000h 以上，达到国际先进水平。

针对压缩机缸盖易氢至开裂难题，本项目创新性地提出双层复合材料缸盖结构设计思路，缸盖临氢侧内层采用高抗氢至失效的奥氏体钢，而在缸盖外层采用低成本高强度的马氏体钢，有效解决了缸盖开裂失效与低成本制备难题。发明了无配油盘缸体结构以减少油腔体积，有效缓解了润滑油在高压下的可压缩性难题，并通过在油腔通道中增设微通道油槽，解决了润滑油的脱气难的问题，显著提高了压缩机的压缩效率。自主开发了多重压力保护预警的自主安防系统，实现压缩机运行安全性保障。研发出我国第一台 22MPa 氢气隔膜压缩机，第一台 45MPa 氢气隔膜压缩机，第一台 90MPa 氢气隔膜压缩机，最高排气压力达到 100MPa 以上、最大排气量达到 1000Nm<sup>3</sup>/h 以上，膜片寿命达到 8000 小时以上，总体技术指标达到国际先进水平。项目成果被广泛应用于国内 50 余座加氢站的建设和多项军事工程项目中。自主开发的氢隔膜压缩机至今没有发生一例安全事故，无缸盖开裂失效现象，优于国际隔膜压缩机领军企业美国 PDC 公司。

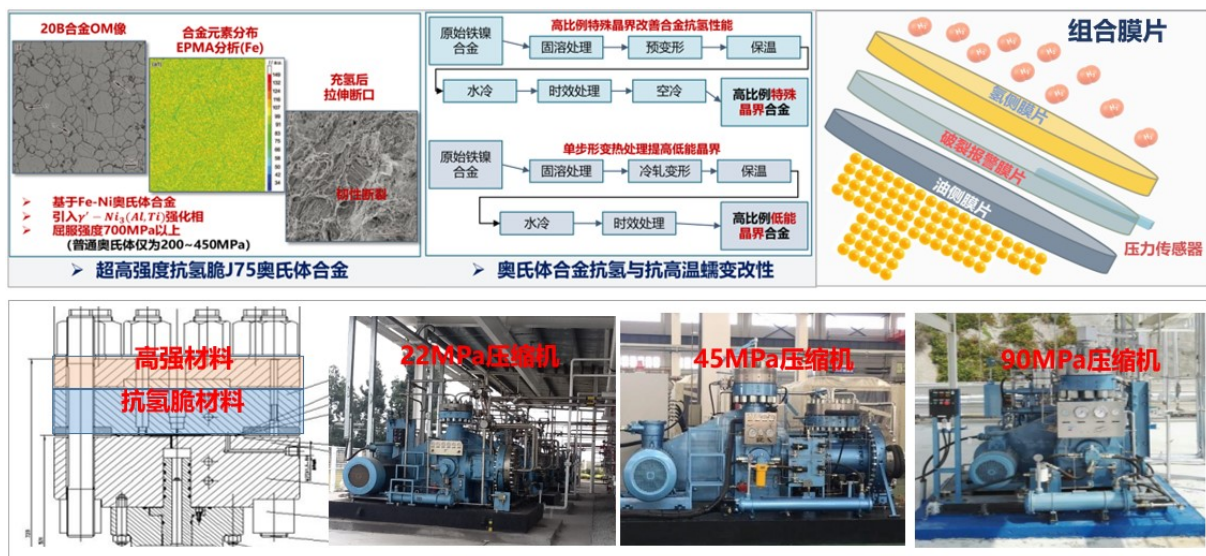


图 1 超高压氢气隔膜压缩机关键技术与装备

## (2) 45MPa 大容积储氢瓶（容器）设计与制造

由于钢制储氢瓶（容器）在高压下使用存在发生氢至失效的可能性，所以对制备 45MPa 的钢制储氢瓶（容器）对材料的选取非常重要。本项目以低硫/磷杂质钢材为基础，兼顾热处理性能与可加工性，创新性地建立了基于多工况氢致开裂与裂纹扩展评价的高温高压条件下抗氢脆钢材筛选方法，研究表明以热轧 4130X 铬钼钢材质钢管完全可以满足 45MPa 储氢瓶(容器)耐氢脆要求,为此与钢材生产单位合作研制出 4130X 铬钼钢热轧无缝钢管，填补国内该类产品空白，并在国际上首次选取 4130X 铬钼钢热轧成型无缝钢管作为基材，通过优化结构设计、热处理与旋压收口多工艺参数，创新性地

开发出无残余应力与应力集中区域的 45MPa 大容量钢制储氢瓶（容器）设计与制造技术，填补国家标准和产品空白，并且项目技术成果还被成功应用于其它类型高压储氢装备的产品开发，支撑石家庄安瑞科气体机械有限公司始终引领国内高压储氢瓶与管束装备产品发展，创造国内多个“第一”，对推动我国超高压储氢装备技术进步做出重要贡献，达到国际领先水平。

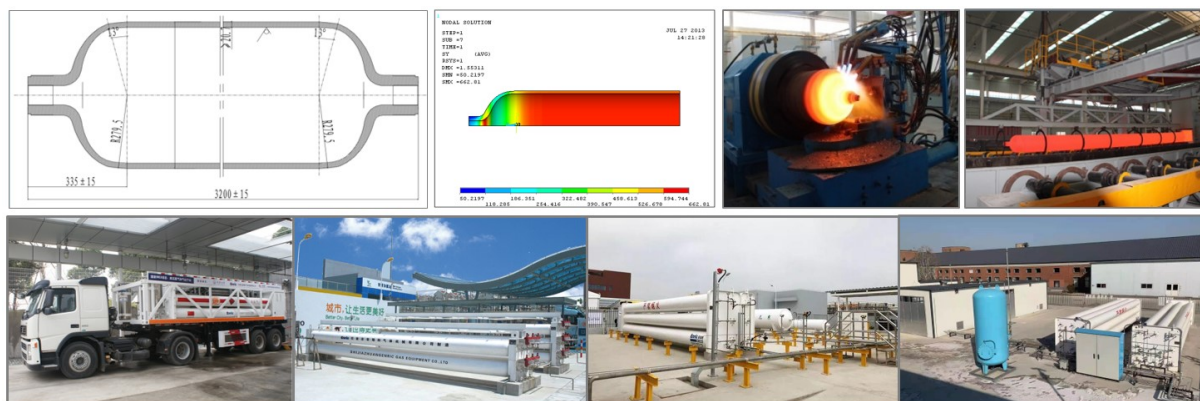


图 2 45MPa 大容积站用储氢瓶（容器）设计制造及应用

### (3) 92MPa 碳纤维全缠绕钢制内胆瓶式储氢容器设计与制造

随着车载储氢压力逐渐向 70MPa 方向发展，对 70MPa 加氢站的需求日趋紧迫，为了满足 70MPa 加氢站对更高储存压力和低成本高安全需求，本项目在前期成功研制出 45MPa 站用大容积钢制储氢容器的基础上，在国际上首次提出开发超高压碳纤维全缠绕钢制内胆储氢容器技术方案，为验证钢制内胆的抗氢脆性能，自主设计研发出耐 92MPa 的氢至损伤试验系统，并获得特检机构认可。经过长时间多维度试验，综合结果表明该容器盛装 92MPa 氢气不会发生氢致开裂和裂纹扩展现象；创新地提出了分段制作强力碳纤维复合层-碳纤维外表面制作玻璃纤维保护层-交接部位增设补强层的复合材料外壳制造工艺，并经缠绕工艺参数优化，显著提高了储氢瓶的承载能力与抗冲击能力，成功研发出满足各项设计指标的 92MPa 高压钢制内胆碳纤维全缠绕复合储氢容器。该储氢容器设计压力 92MPa，水容积 580L，爆破压力 256MPa（高于设计压力 92MPa 的 2.5 倍），技术指标达到国际领先水平，并且项目部分技术成果还被成功应用于缠绕气瓶长管拖车/管束式集装箱产品开发，支撑石家庄安瑞科气体机械有限公司在缠绕气瓶长管拖车/管束式集装箱/国内市场占有率超过 90% 以上。

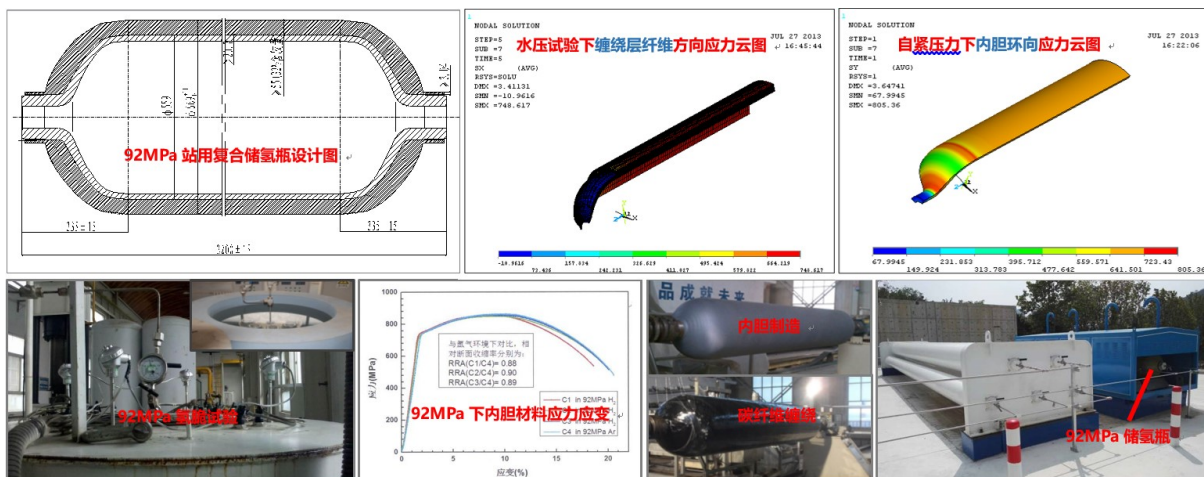


图 3 92MPa 站用碳纤维缠绕复合储氢瓶设计与制造

## 创新成果 2：高压氢气快速加注技术与装备

本项目在深入研究高压氢气快速加注过程中储氢瓶内温度场分布机理的基础上，创新性地提出以速率比值为判据的顺序取气与等梯级温升控制策略，率先自主开发了基于红外实时通讯的高压氢气快速预冷加注技术，突破加氢机防爆安全设计技术与高精度计量技术，实现加注速率、温升控制及计量精度等核心指标都达到国际先进水平，建立了我国高压氢气快速加注技术方案的标准，填补国内多项技术空白。所属学科(氢能利用，代码：2902380)。获得授权发明专利 6 项、实用新型专利 12 项、软件著作权 13 项，主持制订国家标准 4 项、行业标准 1 项。

### (1) 基于升温控制策略的高压氢气快速加注技术与装备

由于高压氢气加注过程中的焦-汤效应，加注过程中受气瓶内温度会快速升高，且加注速度越快温度升高越显著，同时车载储氢瓶安全使用要求其温度不超过 85℃，所以控制高压氢气加注过程中目标受气瓶组内温度是高压氢气快速加注技术的核心难点。本项目在深入研究车载储氢瓶加注过程中温升特性机理的基础上，创新性地提出以速率比值（氢气瞬时流速与氢气初始流速的比值）为判据的顺序取气程序与等梯级温升加注控制策略，在氢气无需预冷条件下实现了 35MPa 氢气快速加注的同时（最大加注速率 2.1kg/min），实现加氢站取气率 70%以上，并显著降低加注能耗。率先提出基于温度补偿的高精度加注及计量方法，有效提升了氢气快速加注过程中的计量精度（±1.0%），突破加氢机防爆安全电气设计与控制技术，填补国内空白。研制出我国第一套 35MPa 移动车载氢气加注系统（2008）、第一台 35MPa 固定站用加氢机（2010），项目成果为我国加氢机技术方案的确定和加氢机标准的建立奠定重要基础，建立的方法已被国内行业普

遍使用，被广泛应用于我国加氢机的设计与制造中。

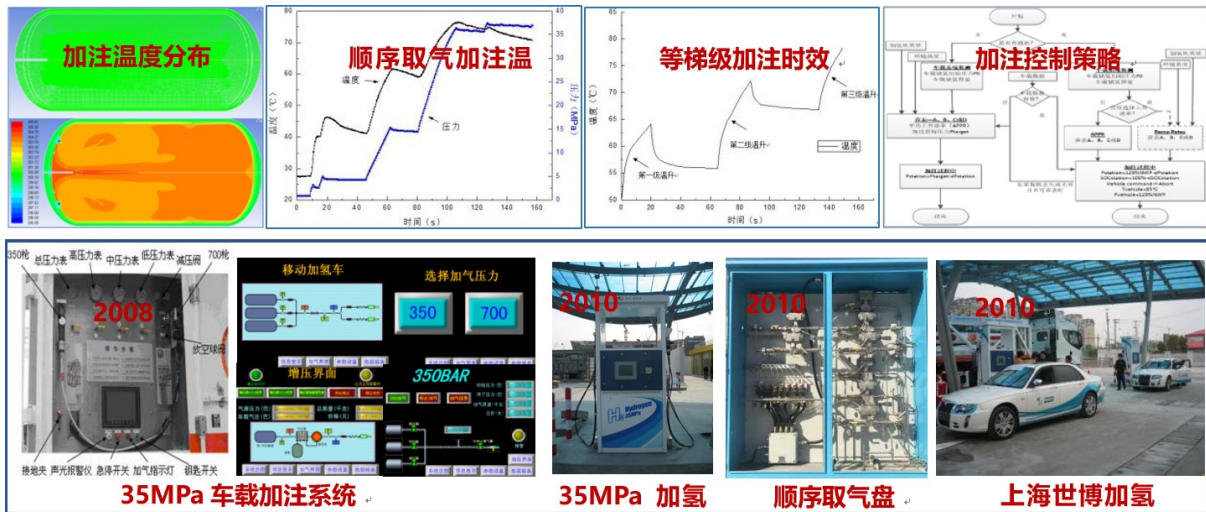


图 4 基于顺序取气控制策略的高压氢气快速加注技术与装备

## (2) 70MPa 氢气快速预冷加注技术与装备

相比较 35MPa 氢气的快速加注, 70MPa 氢气的快速加注过程受气瓶温升更为严重, 单纯依靠顺序取气等加注策略已不能满足快速加注要求, 加注过程中储氢瓶内的温度分布差异更大, 为此本项目通过建立高精高压氢气流体状态方程及仿真模型, 结合试验实测修正, 准确掌握了 70MPa 加注过程中储氢瓶内温度分布特征, 并发现通过改变氢气入射偏转角可显著改善瓶内温度分布均匀性, 系统研究了储氢瓶温升对气源温度的敏感性, 创新性地开发出基于高压氢气温度补偿的高效快速换热技术, 显著提升高压氢气的预冷效率。率先自主开发出基于 PROFIBUS 协议的站车实时红外通讯技术, 实现快速加注过程中加氢机与被加储氢系统实时状态信息交换, 为加注策略的动态修正奠定重要技术基础。系统掌握了 70MPa 加氢机的设计与集成技术, 研制出我国第一台 70MPa 加氢机, 最大加注速率突破 3.5 kg/min, 在预冷系统出口温度低于 -40℃ 条件下, 受气储氢瓶最高温度不超过 50℃, 各项指标达到国际先进水平。项目成果成功应用于大连同新加氢站、上海金山化工园加氢站等项目中。

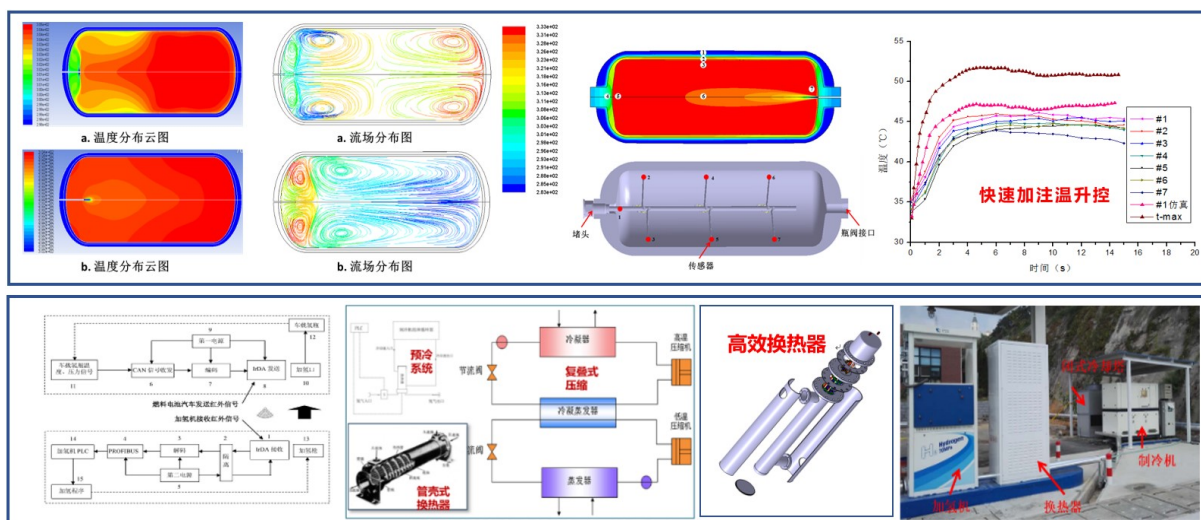


图 5 70MPa 氢气快速预冷加注技术与装备

### 创新成果 3: 高压加氢站安全风险量化评价与设计集成技术

自主开发了基于加氢站事故概率和后果分析的加氢站安全风险量化评价方法，开创性地提出非电驱动高压氢气增压加注系统和储输一体化高压氢气加氢站系统设计方法，并突破了多项加氢站设计与集成核心技术，建立了我国移动加氢站、外供氢型加氢站系统技术方案标准，并研制出我国第一座电解水站制氢型加氢站，为《加氢站技术规范》（GB50516-2010）2021 版的修订奠定技术基础。所属学科（氢能利用，代码：2902380），授权发明专利 2 项、实用新型专利 9 项，公开发明专利 5 项，主持制订国家标准 7 项，参与制修订国家标准 4 项，主持制订上海地方标准和汽车行业标准各 1 项，发表 SCE/EI 等论文 8 篇。

#### (1) 加氢站安全风险量化评价技术

加氢站的安全性不仅是加氢站技术开发首要考虑的先决条件，更是制定加氢站相关技术标准与推广应用的核心问题。在实验研究无法验证的客观条件下，本项目在深入分析加氢站系统可能失效环节的基础上，率先自主开发了基于加氢站事故概率与后果分析的加氢站安全风险量化评价技术，系统构建了加氢站风险量化评价方法，对冲击波超压、火焰热辐射和氢气云团窒息等氢气危害事故进行了定量研究，为加氢站设计优化、标准制修订及工程建设方案优化提供了有力技术支撑。相关成果应用于上海安亭加氢站（2006）、上海世博加氢站（2010）、大连同新加氢站（2016）、上海金山化工园区加氢站（2019）等多个标志性加氢站的设计与评价，为《加氢站技术规范》（GB50516-2021）容量等级、安全距离等核心内容的修订提供理论依据。

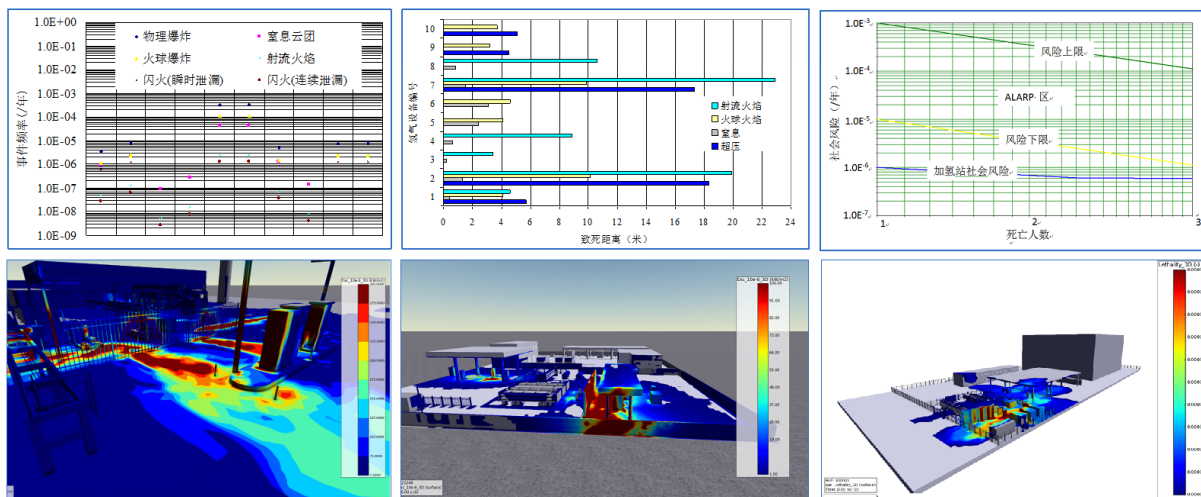


图 6 加氢站安全风险量化评价

## (2) 高压加氢站系统设计与集成技术

由于氢气密度低、易泄漏、易燃易爆等本征特性，给高压加氢站的设计与集成带来很大挑战。在我国没有任何加氢站技术、标准和规范等可借鉴的情况下，为支撑我国燃料电池汽车研发和示范项目的顺利推进，本项目开创性地提出非电驱动高压氢气增压加注系统和储输一体化高压加氢站系统设计方法；为降低高压压缩机故障率、提高运行效率，创新性地提出加氢站用多台套压缩机系统集成方案，开发出基于可靠性与能效优化的压缩机系统运行控制策略；自主开发了耦合安防监控功能的加氢站一体化远程站控系统，率先编制了加氢站运行管理规范，填补国内空白。研制出我国第一辆高机动性移动加氢车（2004）、第一座具备自增压功能的加氢站子站（2009），自主开发出我国第一座储输一体化的外供氢型加氢站（2007）、第一座 70MPa 加氢站（2017）、第一座电解水站制氢型加氢站（2017）。项目成果支撑了 2010 上海世博加氢网络的构建，并成功支撑 173 辆燃料电池汽车为期半年的商业化示范运行，项目团队获得党中央、国务院嘉奖；项目成果为我国加氢站技术方案的确定和加氢站标准体系的建立奠定重要基础，并被广泛应用于我国 100 多座加氢站的建设。



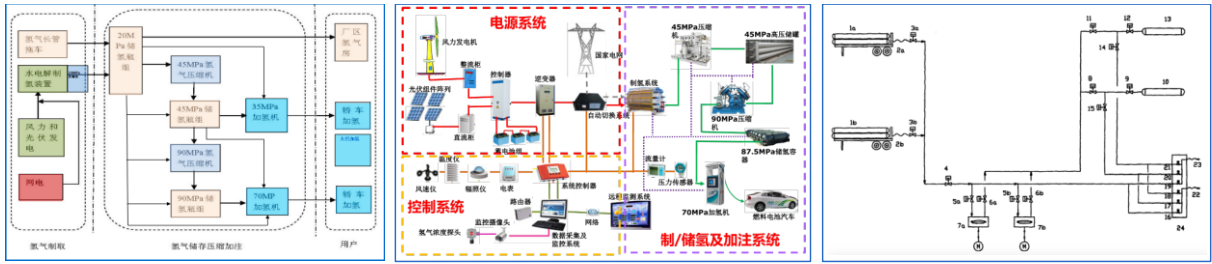


图 7 加氢站系统设计、集成与应用