



Cases of CNC Machinery Equipment

“数控一代”案例集

(塑性工程卷)

中国机械工程学会
塑性工程分会

编著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

Cases of CNC
Machinery
Equipment

“数控一代”案例集

(塑性工程卷)

中国机械工程学会
塑性工程分会



中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

“数控一代”案例集. 塑性工程卷 / 中国机械工程学会, 塑性工程分会编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5046-7213-1

I. ①数… II. ①中… ②塑… III. ①工程力学—塑性力学—技术革新—案例—中国 IV. ①F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 221830 号

策划编辑	赵 晖 郭秋霞
责任编辑	郭秋霞 赵 晖
版式设计	中文天地
责任校对	杨京华
责任印制	张建农

出 版	中国科学技术出版社
发 行	科学普及出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62173865
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	370千字
印 张	18
版 次	2016年10月第1版
印 次	2016年10月第1次印刷
印 刷	北京市凯鑫彩色印刷有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7213-1/F · 821
定 价	126.00元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

总 序

实施“中国制造2025”，加快我们国家从制造大国迈向制造强国，要以科技创新为主要驱动力，以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向。

智能制造——数字化网络化智能化制造是新一轮工业革命的核心技术，是世界各国全力争夺的技术制高点，为中国制造业结构优化和转变发展方式提供了历史性机遇，成为中国制造业“创新驱动、由大到强”的主攻方向。

制造业创新发展的内涵包括三个层面：一是产品创新；二是生产技术创新；三是产业模式创新。在这三个层面上，智能制造——数字化网络化智能化制造都是制造业创新发展的主要途径：第一，数字化网络化智能化是实现机械产品创新的共性使能技术，使机械产品向“数控一代”和“智能一代”发展，从根本上提高产品功能、性能和市场竞争力；第二，数字化网络化智能化也是生产技术创新的共性使能技术，将革命性地提升制造业的设计、生产和管理水平；第三，数字化网络化智能化还是产业模式创新的共性使能技术，将大大促进服务型制造业和生产性服务业的发展，深刻地变革制造业的生产模式和产业形态。

机械产品的数控化和智能化创新具有鲜明的特征、本质的规律，这种颠覆性共性使能技术可以普遍运用于各种机械产品创新，引起机械产品的全面升级换代，这也是“数控一代”和“智能一代”机械产品这样一个概念产生的缘由和根据。

2011年年初，18位院士联名提出了关于实施数控一代机械产品创新工程（简称“数控一代”）的建议，中央领导同志高度重视、亲切关怀，科技部、工业和信

息化部、中国工程院联合启动了数控一代机械产品创新应用示范工程，其战略目标是：在机械行业全面推广应用数控技术，在 10 年时间内，实现各行各业各类各种机械产品的全面创新，使中国的机械产品总体升级为“数控一代”，同时也为中国机械产品进一步升级为“智能一代”奠定基础。

4 年来，全国工业战线的同志们团结奋斗，用产学研政协同创新，数控一代机械产品创新应用示范工程进步巨大、成就卓著，在全面推进智能制造这个主攻方向上取得了重大突破。

中国机械工程学会是实施数控一代机械产品创新应用示范工程的一支重要推动力量。4 年来，学会发挥人才优势和组织优势，动员和组织学会系统包括各省区市机械工程学会和各专业分会的同志们广泛参与，着重于推动数控一代工程在各行各业各区域各企业的立地和落实，为企业产品创新助力、为产业技术进步服务。在这个过程中，学会重视发现典型、总结经验，形成了《“数控一代”案例集》。

《“数控一代”案例集》总结了典型机械产品数控化创新的丰硕成果，展示了各行业各区域各企业实施创新驱动发展战略的宝贵经验，覆盖面广、代表性强，对于实现中国机械产品的全面创新升级有着重要的借鉴与促进作用。

衷心祝愿《“数控一代”案例集》持续推出、越办越好，助百花齐放、引万马奔腾，为数控一代机械产品创新应用示范工程的成功、为“中国制造 2025”的胜利、为实现中国制造由大变强的历史跨越做出重要贡献。

周济

2015 年 4 月

前言

机械制造是制造业最重要、最基本的组成部分。实现由制造大国向制造强国的历史性转变，机械制造必须要先行，必须从模仿走向创新、从跟踪走向引领，必须科学前瞻、登高望远、规划长远发展。

塑性成形是机械工程学科制造学科领域的一个分支。塑性成形是利用材料的塑性，一般通过模具施加作用力，使材料产生塑性变形，在少切削或无切削的条件下，加工出所要求的具有一定尺寸与形状的零件毛坯或零件成品的制造方法。由于塑性成形不但能够制造出各种不同尺寸不同形状的工件，而且通过塑性变形使材料组织改善性能提高，即具有“成形与改性”的双重作用，因而成为生产零件毛坯或零件成品的主要技术手段之一。

随着我国经济的高速发展，GDP 总量持续扩大，金属塑性成形行业快速发展壮大，金属塑性成形技术也相应持续发展进步，锻压件总产量达到 4 千万吨以上，总产值达到 6000 亿元，无论技术与产业规模总体上都达到了国际制造大国的阶段，但还不是制造强国。

通过几个五年计划我国大锻件行业呈现出强劲发展态势。在大锻件装备方面，国内主要重机企业基本完成了大规模现代化技术改造，进入了世界前列。基本掌握了大型钢锭材料精确控制技术及大锻件材料组织缺陷控制技术。核电 AP1000 核岛锻件、常规岛电机转子、汽轮机高压和低压转子全部研制成功，被称为核电站“大动脉”的整体锻造主管道首次实现国产化。自主开发了大型船用低速大马力柴油机 6 拐组合曲轴锻件，曲轴总长 8030mm，

净重 71t, 标志着我国船用曲轴产品制造能力打破国外垄断, 达到了真正意义的自主化。可以预计, 未来 20 年, 我国制造业仍将保持强劲发展的势头, 将更加注重提高基础、关键、核心技术的自主创新能力, 提高重大装备集成创新能力, 提高产品和服务的质量、效益和水平, 进一步优化产业结构, 转变发展方式, 提升全球竞争力, 基本实现由制造大国向制造强国的历史性转变。

此次, 为了将 2012 年国家组织实施“数控一代机械产品创新应用示范工程”已取得的成果总结推广, 助力塑性工程产业转型升级, 中国机械工程学会与其塑性工程分会共同组织相关高等院校、科研院所与生产企业积极参与, 总结塑性工程行业数字化技术创新与示范案例, 编撰了《“数控一代”案例集(塑性工程卷)》。本卷共收录了 35 个案例, 主要涵盖了板材管材成形、锻造、轧制、特种成形、设备等诸多领域、特色显著的“数控一代”产品的示范应用, 体现了塑性工程行业在迈向数字化、网络化、智能化方向的创新发展。从一个侧面反映了自动化、数字化、智能化技术在机械制造业领域实际应用与发展现状及未来发展的趋势。

我们相信, 在从“数控一代”迈向“智能一代”的过程中, 通过不断总结和推广塑性工程领域“数控一代”案例, 推动全行业制造技术升级, 进而为我国在“中国制造+互联网”上尽快取得突破, 为实现中国制造迈向中高端起到积极的推动作用。

《“数控一代”案例集(塑性工程卷)》编写委员会
2016 年 6 月

目录

CONTENTS

板材管材成形篇

- | | | |
|------|-----------------------|------|
| 案例 1 | 内高压成形技术与数控装备 | / 1 |
| 案例 2 | 数控精冲机及成套生产线技术 | / 13 |
| 案例 3 | 板式换热器翅片成形自动化生产线 | / 21 |
| 案例 4 | 全自动精冲生产线装备及精冲成套技术 | / 27 |
| 案例 5 | 基于工业机器人的金属板材柔性冲折加工生产线 | / 31 |
| 案例 6 | 乘用车覆盖件全自动柔性冲压生产线 | / 39 |
| 案例 7 | 高档数控超大型船用卷板机 | / 47 |
| 案例 8 | 多模数控蛇形弯管生产线 | / 55 |

锻造篇

- 案例 9** 基于现场总线的热模锻压力机锻造自动化生产线 / 61
- 案例 10** 汽车转向节锻造自动化生产工艺及装备 / 67
- 案例 11** 3.6 万 t 黑色金属垂直挤压机组 / 73
- 案例 12** 数字化多工位精锻成形装备 / 81
- 案例 13** 巨型重载数控锻造操作机 / 91
- 案例 14** 基于精确控温的高效短流程挤压加工技术及装备 / 99
- 案例 15** 3000 t 全自动校直机 / 107
- 案例 16** 汽车关键零件智能化精密热模锻成套技术与装备 / 113

轧制篇

- 案例 17** 大型数控径 - 轴向辗环机 / 121

- 案例 18** 数控精密轧环装备及自动化生产线技术 / 129
- 案例 19** 精密铜管铸轧加工自动化与质量控制系统 / 137
- 案例 20** 铝合金车轮旋转辗锻机 / 147
- 案例 21** 铝合金车轮强力旋压机 / 155

特种成形篇

- 案例 22** 三维曲面件多点数字化成形技术与装备 / 163
- 案例 23** 板料数控柔性渐进成形工艺与装备 / 175
- 案例 24** LFT-D 复合材料在线模压成形生产线和数字化联线技术 / 183
- 案例 25** 化工及空分规整填料自动化生产线 / 193
- 案例 26** 汽车玻璃托架成形模自动化生产线 / 199
- 案例 27** 总线控制超强钢热成型成套技术装备 / 205
- 案例 28** 大幅面绝缘纸板热压机组 / 215

设备篇

-  **案例 29** SP 型高性能数控伺服转塔冲床 / 219
-  **案例 30** 新型交流伺服机械压力机 / 229
-  **案例 31** 汽车车身高速冲压装备 / 237
-  **案例 32** 汽车大型覆盖件液压机柔性冲压生产线 / 243
-  **案例 33** 高精度模具研配液压机 / 251
-  **案例 34** 板材高速精密数控冲床 / 257
-  **案例 35** 全生命周期设计数控液压机 / 265

案例

1

内高压成形技术与数控装备

哈尔滨工业大学液力成形工程研究中心

内高压成形技术从 20 世纪 90 年代中期开始在汽车工业大批量应用，目前欧美年产均达 5000 余万件，新型轿车 50% 结构件为内高压成形件，主要应用范围包括底盘、车身及排气管件。哈尔滨工业大学液力成形工程研究中心通过 10 余年的系统研究，取得重大突破，在内高压成形基础理论、工艺、模具及大型数控装备研制等方面取得重大突破，研制出具有自主知识产权的系列化大型内高压成形装备，并在汽车、航天、航空等领域关键结构件批量生产中得到应用。

一、导语

结构轻量化是运输工具节约燃料和减少废气排放的主要手段之一。对于轿车，减重 10%，油耗降低 6% ~ 8%；卡车减重会提高载货量；质量轻，惯性力小，利于提高汽车碰撞安全性。在航空航天领域，减轻质量可提高有效载荷和飞行距离。对于承受弯扭载荷为主的结构，采用空心变截面构件，既可减轻质量又可充分利用材料强度。内高压成形技术可实现空心替代实心、变截面代替等截面、封闭截面代替焊接截面，主要优点包括：比冲焊件减轻 15% ~ 30%、大幅提高刚度和疲劳强度、零件和模具数量少、材料利用率 90% 以上、成本降低 30% 以上。

内高压成形技术从 20 世纪 90 年代中期开始在汽车工业大批量应用，目前欧美年产均达 5000 余万件，新型轿车 50% 结构件为内高压成形件，主要应用范围包括底盘、车身及排气管件。国外生产内高压装备的厂商主要有德国 Schuler 公司和瑞典 AP&T 公司。用于轿车零件生产的内高压成形设备合模力多为 5000 t，最高内压 400 MPa，可实现 32 轴的数控。生产节拍 26 ~ 32 秒 / 件，可年产 25 万个内高压件。

哈尔滨工业大学液力成形工程研究中心通过 10 余年的系统研究，取得了重大突破，在内高压成形基础理论、工艺、模具及大型数控装备研制等方面取得重大突破，研制出具有自主知识产权的系列化大型内高压成形装备，并在汽车、航天、航空等领域关键结构件批量生产中得到了广泛应用。

二、主要研究内容

1. 内高压成形原理

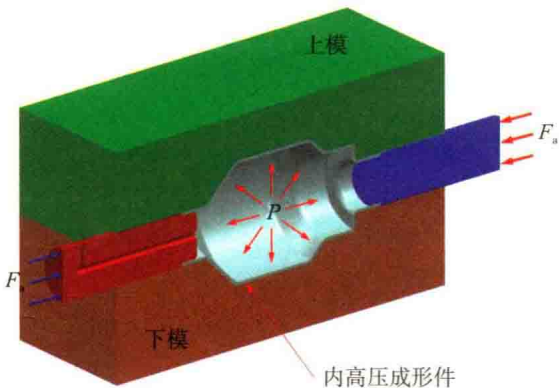


图 1 内高压成形原理

内高压成形是制造复杂形状空心轻量化结构的一种先进成形制造技术，其原理是以液体介质作为均布的传力介质代替刚性凸模使管材成形为所需形状的零件。从截面形状看，可以把管材圆截面变为矩形、梯形、椭圆形或其他异形截面，如图 1 所示。对于弯曲轴线的零件，需要把管材轴线预先弯曲到要求的形状，对于复杂截面形状，还需要预成形工序合理分配材料及确保管材顺利放入

模具型腔，工业生产上典型的工序包括弯曲、预成形和内高压成形，如图 2 所示。

2. 内高压成形基础理论

内高压成形时管材在高压液体与轴向进给耦合下发生变形，其力学本质是复杂应力状态下的塑性变形，塑性应力应变状态和摩擦行为等理论问题十分复杂。

系统地研究了内高压成形变形规律和弹塑性失稳机理，揭示了内高压成形应力应变状态与壁厚变化规律，建立了内高压成形起皱临界应力模型，揭示了加载路径影响以及内高压成形缺陷形成机理。

3. 内高压成形工艺与模具

内高压成形模具承受高内压和大吨位合模力引起的高应力及变形，对模具寿命和成形零件精度影响较大。模具在确保超高压下管端移动密封的同时，还需要同步液压冲孔，导致模具结构十分复杂。

发明了复杂截面形状构件以推代胀低压成形方法，可以降低成形压力 50% 以上。发明了异型截面密封冲头结构，解决了 400 MPa 超高压管端移动密封，实现各种截面管端快速稳定密封，管端只需普通锯床下料，材料利用率提高到 95%。

研发了多孔同步液压冲孔模具技术，利用高压液体作为支撑凹模，成形后同步冲孔，实现高效率短流程制造（图 3）。提出合模力随内压可变技术，降低成形时模具受力，减小模具弹性变形，延长模具寿命，提高零件尺寸精度。

4. 数控内高压成形装备

内高压成形装备需要在 30 s 内完成合模、充液、密封、增压、冲孔和卸载等动作，因此完成的动作复杂、精度高、自动化要求高。研究了超高压介质的建立与传输技术，超高压与多轴位移闭环伺服控制技术与数控系统与控制软件技术，研制出全自动化内高压成形机，为内高压成形工艺在工业生产的应用奠定了基础。

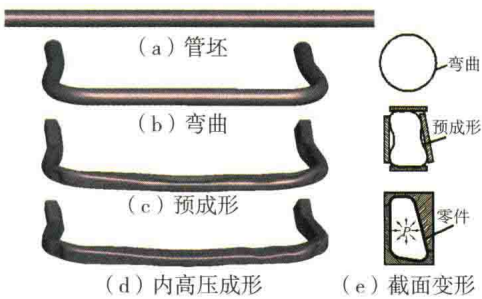


图 2 弯曲轴线构件内高压成形

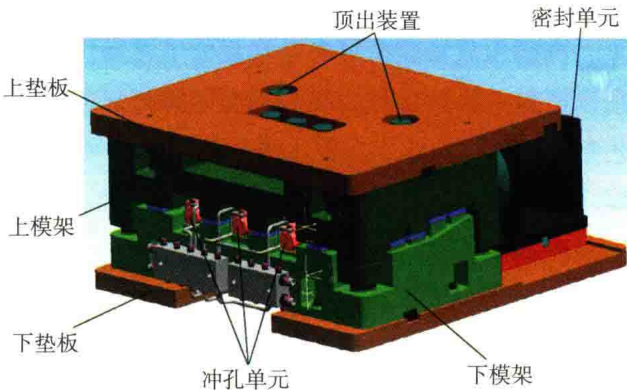


图 3 批产内高压成形模具结构图

内高压成形装备由合模压力机和内高压成形系统两大部分组成,如图4所示。合模压力机为一台立式液压机,其特殊要求是可以在下死点合模保压一段时间;内高压成形系统包括水平伺服缸、高压源(增压器)、液压系统、水压系统和计算机控制系统5个分系统。

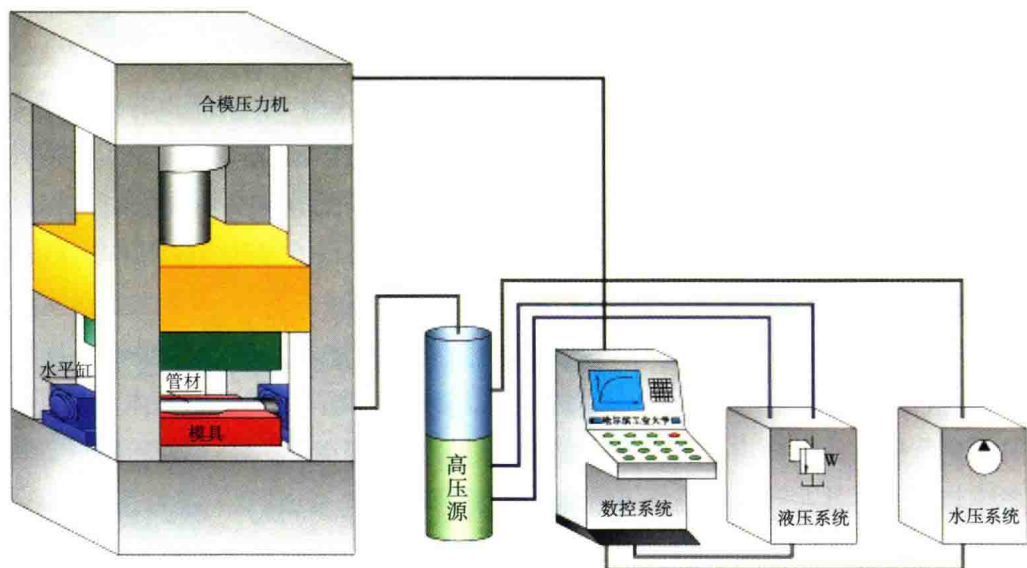


图4 内高压成形装备组成

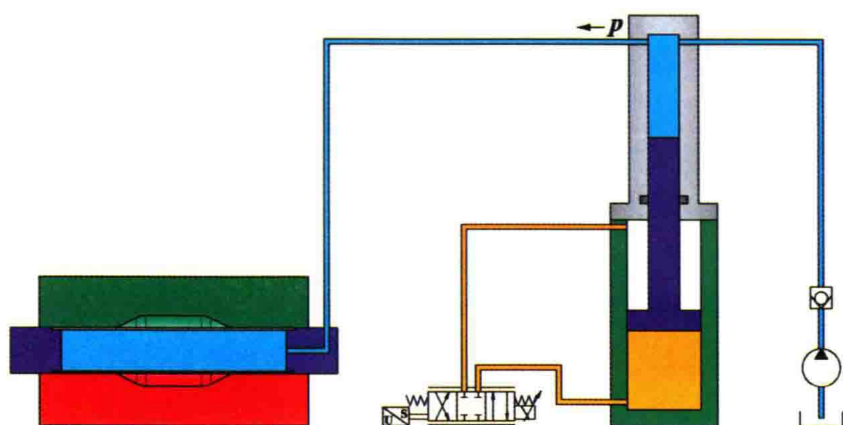
内高压成形装备可自动实现的工艺动作:合模→施加合模力→水介质填充与循环→判断高压密封→执行加载曲线→同步卸除内压/合模力→退冲头→开模。可执行数字化加载的工艺参数包括:内压、左侧水平缸位移、右侧水平缸位移和合模力。

(1) 超高压介质的建立与传输技术。

内高压成形需要的压力往往高达300~400 MPa或更高的压力,需要采用增压器作为高压源。增压器采用乳化液作为加压介质,既克服了液压油压缩量大的缺点,又具有防锈作用。

内高压成形时10 s左右完成一个升压、卸载的工作循环,每天16~20 h长期工作,高压密封需要承受频繁加载,要求长寿命;同时,对压力的精确控制需要高压缸体变形小,高压端柱塞缸的动静摩擦力相差较小,以便于提高控制精度。

通过优化高压缸体承载结构,减小加载时缸体弹性变形,给出了符合超高压柱塞缸要求的密封结构以及满足耐磨性与变形要求的密封材料配比。实现了长寿命、动静摩擦力小的增压器密封结构,可以满足内高压成形对增压器的技术要求,增压器原理图与实物分别如图5所示。



(a) 超高压增压器结构



(b) 增压器

图 5 超高压介质增压器结构与外形

(2) 超高压与多轴位移闭环伺服控制技术。

内高压成形时必须实现内压与轴向位移的精确匹配，避免失效形式，才能够顺利成形。执行加载曲线时两个位移轴与一个内压轴共同作用于成形管件上，与常见刚体伺服控制有很大不同。

水平缸的轴向进给会引起管材体积减小，密封工作体积减小，从而使管材内压快速升高，影响内压控制精度。高压下液体体积压缩量较大，也会影响压力控制精度。同时，内压反力作用在水平缸上水平缸受到外力的强干扰，对位移控制系统的响应和刚度要求很高，水平油缸在快进和快退阶段速度要求快，而在工进阶段要求系统有良好的位移控制精度，为保证管材端部密封工进时只能前进而不能后退。

针对内压与轴向位移耦合干扰的问题，采取了鲁棒控制算法解决内高压成形过程不同阶段系统对速度与精度的不同要求，以系统稳定性和可靠性作为首要目标来设计系统目标函数，对控制系统进行离线辨识，从而获得系统的鲁棒 PID 控制器。在系统离线辨识的基础上，引入加速度反馈提高系统的阻尼比，利用滞后 - 超前配置控制器来保证系统的鲁棒性。采用静态前馈补偿控制策略进行解耦控制，解决内压与轴向位移间互相耦合影响干扰的问题。

控制系统实现了如下技术指标：轴向位移控制精度：0.01 mm；轴向位移速度范围：0 ~ 15 mm/s；内压控制精度：0.5 MPa；内压增压控制速度：0.1 ~ 50 MPa/s。内高压成形加载曲线阶段时间为 5 ~ 10 s，大幅提高了生产效率。

(3) 数控系统与控制软件技术。

进口内高压成形机多采用多轴数控运动控制卡，如西门子 840 D 系统，完成内压与位移多轴伺服控制，但该种类型运动控制卡编程规则不适用内高压成形智能控制策略，无法完成

特殊要求的设定。因此，基于 PLC 开发了控制系统与控制软件，该系统的特点：①位移内压曲线加载精度高。控制系统采用多次样条曲线进行插值处理，并提取其中变化量比较大的特征值作为二次特征点进行控制，较好地解决了系统成形工艺曲线的跟踪快速性和准确性之间的矛盾，使成形时间和控制精度达到了国际先进水平；②生产效率高。对成形过程状态监控，实现了内高压成形过程的全自动化生产过程，同时结合不同的成形管件体积留有工艺优化参数设置界面，可进一步提高生产效率；③系统具有高安全性与可靠性：系统采取了多种超限保护措施及安全设计保证设备及操作人员安全性，对所有关键元件采取反馈式设计实时监测工作状态。报警措施根据安全性进行分级控制，在保证系统安全的前提下，又保证了设备的正常工作。

开发的内高压成形机控制系统操作界面（图 6），可以实时监控数据，故障诊断，模式监控，系统的可维护性显著提高，现场操作人员可以解决约 80% 故障，其余故障可通过远程技术人员根据报警号迅速锁定故障点，显著减少维修时间。

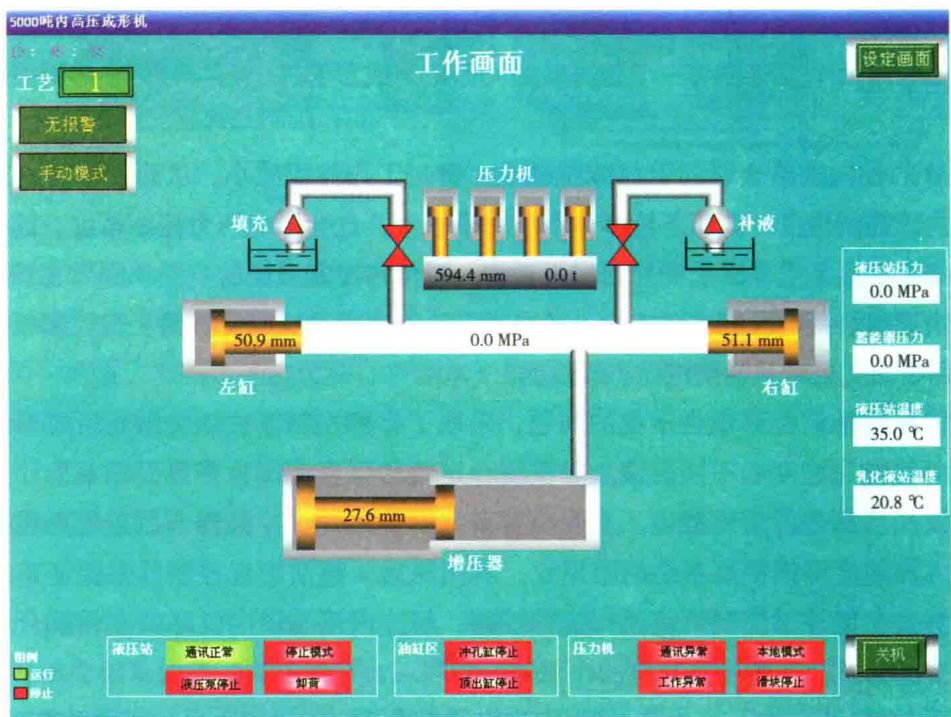


图 6 控制系统操作界面

5. 数控内高压成形装备的特点

哈尔滨工业大学液力成形工程研究中心 2000 年研制出国内首台内高压成形机，至今已发展至第三代数控内高压成形装备，达到国际同类产品的先进水平，具有以下特点：①合模