

# 新型反应堆整体主螺栓拉伸机设计

王用超 苏志勇 文小军 张雨 宋明亮  
(中国核动力研究设计院 四川 成都 610213)

**摘要:** 本文基于普通整体式与分体式主螺栓拉伸机优缺点的分析,结合新型反应堆现场特点,提出了一套低成本、高效率、高精度的整体式螺栓拉伸机设计方案。该方案采用多种优化策略,在保证单设备稳定性的基础上降低了成本,增加了设备稳定性及独立可调性,解决了液压波动大造成的供油压力不均问题,解决了主螺栓间隙工作空间不足问题,还解决了人工旋转精度差、人员受照射剂量大的问题。

**关键词:** 反应堆主螺栓;整体主螺栓拉伸机;承压平面转移;螺母旋转结构

## 0 引言

反应堆压力容器主螺栓拉伸装置是主螺栓预紧的重要关键设备,主要工作原理是采用液压拉伸技术实现主螺栓的拉伸预紧。目前,核电厂压力容器主要采用整体式和两组对称式拉伸机。多年来,行业专家通过实践,给出螺栓拉伸机不同的改进、优化建议,朱成军结合 AP1000 具体工程特点,在综合分析整体式螺栓拉伸机优缺点的基础上,建议采用整体式螺栓拉伸机;崔逊波等人结合整体螺栓拉伸机在福清核电的工程实践,对使用过程的控制进行了研究,降低了故障风险;王强结合整体螺栓拉伸机,在红沿河项目部 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 机组的应用,分析了整体螺栓机性能影响因素,对规范化使用给出优化建议;徐洪福等人对一种新型全自动螺栓拉伸机进行了介绍,改进了拉伸组件,增加了液压缸夹紧机构。

目前,国内自主研发整体拉伸机处于起步阶段,中广核及中核集团开始加强自主化整体螺栓机研究,也成功应用于防城港 2<sup>#</sup> 机组的首次装料关盖及华龙一号反应堆装堆工作。国外原装进口机虽然性能较稳定,但存在成本高、技术受限等问题,国内自主研发不仅成本较高,设备性能也存在较大不稳定性。因此,有必要加强对全新结构的低成本、高稳定性、高适用性的螺栓拉伸机的研究,以促进螺栓拉伸机自主研发进程。

## 1 螺栓拉伸机工作原理

螺栓拉伸机基本原理源于空心活塞千斤顶原理,主要由拉伸油缸、拉杆、螺母拧紧旋松装置等主要部分组成,结构如图 1 所示。人工操作将拉伸机的拉杆与螺栓顶部的拉伸螺纹连接,启动液压泵,活塞管向上移动产生向上拉力,带动拉杆向上移动,达到预设压力值后拉伸机保压,拧紧螺母产生预紧力。基本操作流程为:螺

母通过扳手与螺杆旋紧——拉长螺杆,在螺杆保持拉长状态下旋紧螺母——去除拉伸力,螺杆伸长而产生的拉力通过螺杆和螺母之间的螺纹牙全部作用在螺母上——完成预紧工作。拉伸预紧流程原理如图 2 所示。

## 2 新型整体螺栓拉伸机设计方案

### 2.1 螺栓组合方式

单组螺栓组合由螺杆、主螺帽、上下垫片、小螺帽组成,螺杆与压力容器法兰螺纹孔相连接,主螺帽、上下垫片通过螺杆拉长的预紧力压紧压力容器顶盖。40 组螺栓组合在顶盖上均匀布置在圆上,相邻每组螺栓相对压力容器轴线为 9° 均布,具体螺栓组合方式如图 3 所示。

### 2.2 整体设计思路

采用标准螺栓拉伸器作为主要部件,在解决了设备稳定的基础上降低了生产成本;配置两台备用加压泵,在简化系统的基础上通过快速接头,实现单台拉伸器压力调整;采用逐级并联供油方式,解决了完全并联的油路布局及完全串联的油压分布不均问题;增加压力调节器(调节阀及压力调整单元),对每个拉伸器进行微量拉伸力调节;采用工作平面转移的方式,解决螺栓间隙较小问题;单拉伸器进口均配置远传压力表,实时计算各单拉伸器供油误差值;各拉伸器顶端配置激光测距仪,测量主螺栓总伸长量;增加远传力矩系统及过力矩保护系统;整体拉伸机采用整体起吊对中安装的工作方式。

### 2.3 工作平面转移设计

根据主螺栓拉伸机的工作原理,拉伸器的最下端需具有容纳主螺母并传递压力的拉伸器支架,该支架需承受上百吨压力而不发生明显变形及损坏。传统主螺栓拉伸工艺因借助压力容器端面为拉伸器支架,满足了受力及变形要求。现场主螺帽之间小间距约为 20mm,根据

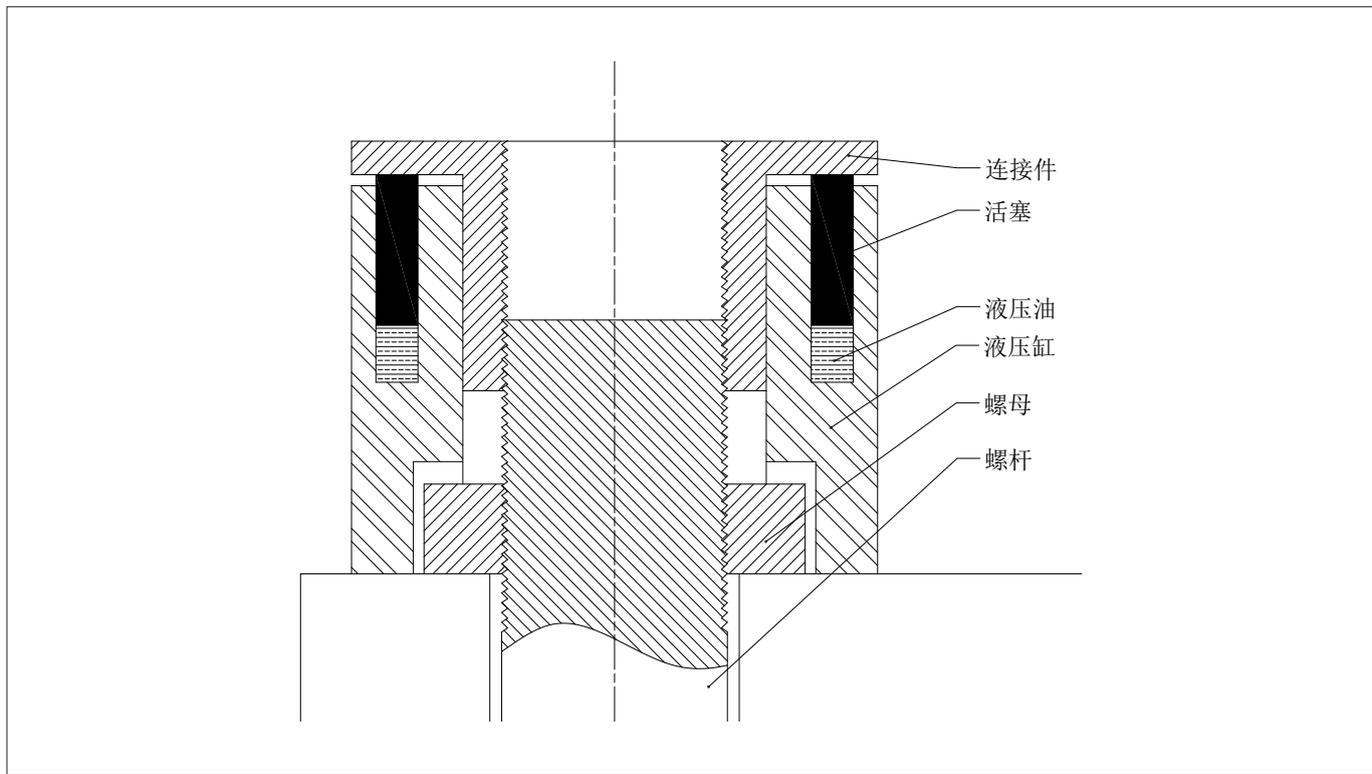


图1 螺栓拉伸机原理示意图

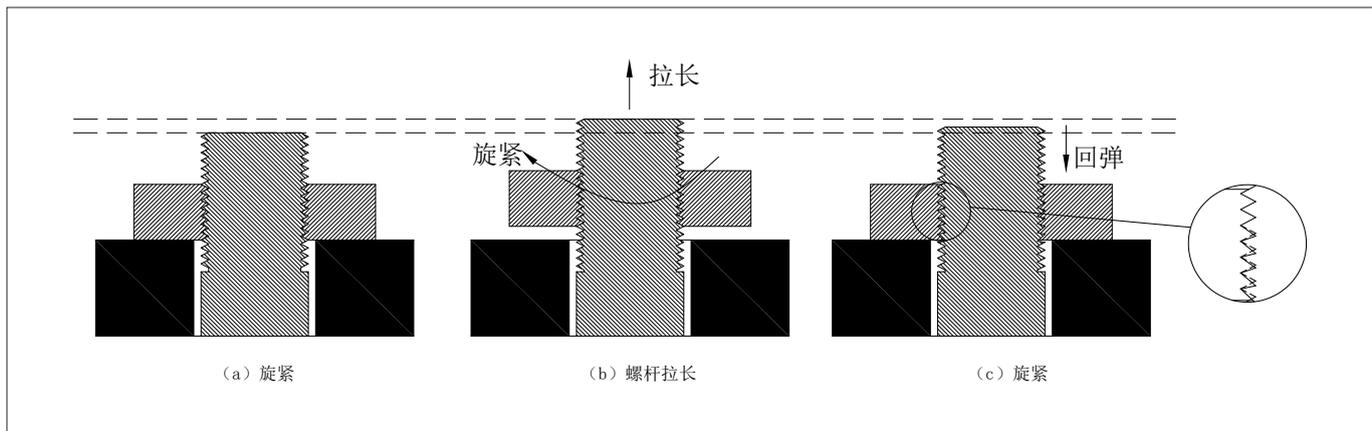


图2 螺栓拉伸机拉伸预紧原理

现有单台拉伸器型号规格，无法并列同时在两主螺栓之间安放2台拉伸器。

经过反应堆现场核对，主螺帽之间的距离仅有20mm，但主螺帽之上的螺杆之间的距离约为100mm。采用抬高顶盖基准面的方法，避开主螺母小间距区间，转移工作平面的技术方案，具体实施方案如图4所示。

#### 2.4 螺母旋转结构设计

标准型液压拉伸器螺母松动结构设置在底部桥架上，穿过桥架侧面预留的方孔，利用拨杆搬动六角筒旋转螺母。根据仿手工搬动原理，将标准型拉伸器安装在新工作平面上，设计专用旋转设备实现螺母的松动及拧紧，具体工作形式如图5所示。

该螺母旋转装置主要包括扳帽、惰轮和主动轮等传

动结构。扳帽内圈为与主螺帽相配合的六方孔，外圈为传动转动力的齿轮，实现将外部力矩转换为主螺帽转动力的力矩，实现松动或者预紧的旋转动作；中间惰轮解决传动线过长问题，实现将外部转动力矩传递到下方传动部件的作用；主动齿轮实现风扳机与可调扭矩电动扳手连接，为整个传动线的动力输入部分。

#### 2.5 螺栓拉伸机整体安装设计

螺母旋转机构布置完成后，增加上垫环提升受力基准面，上垫环有40个方孔，功能与标准拉伸器的方孔相同，上下垫环空腔为中间惰轮和主动齿轮提供转动空间，具体布置如图6所示。

#### 2.6 控制系统原理设计

控制单元主要由人机操作界面、电控系统、就地显

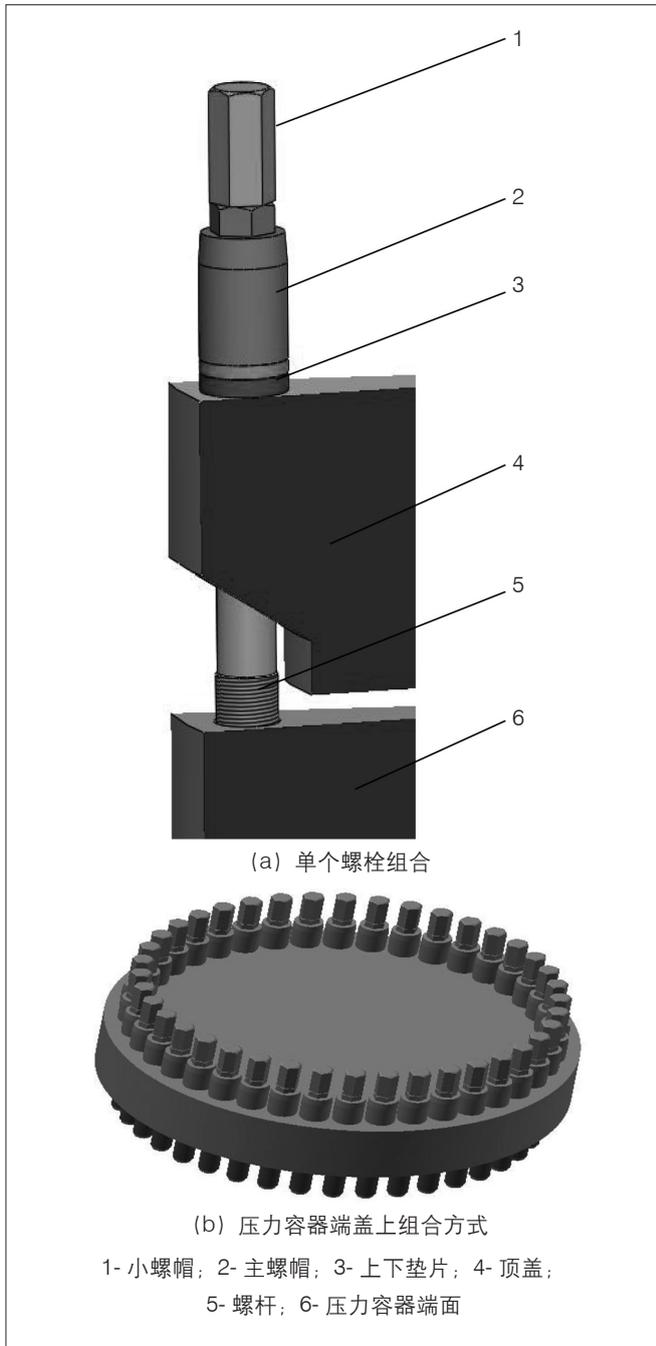


图3 反应堆螺栓组合方式

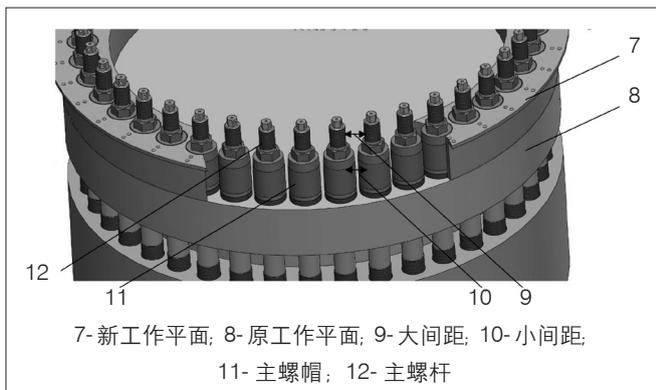


图4 工作面转移方案

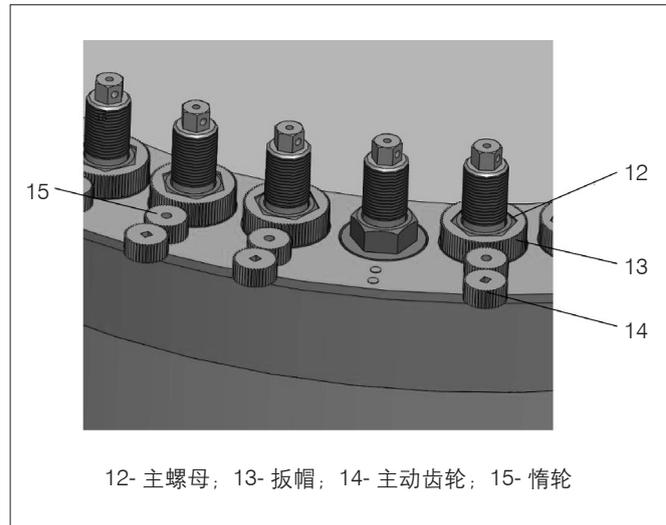


图5 螺母旋转结构设计

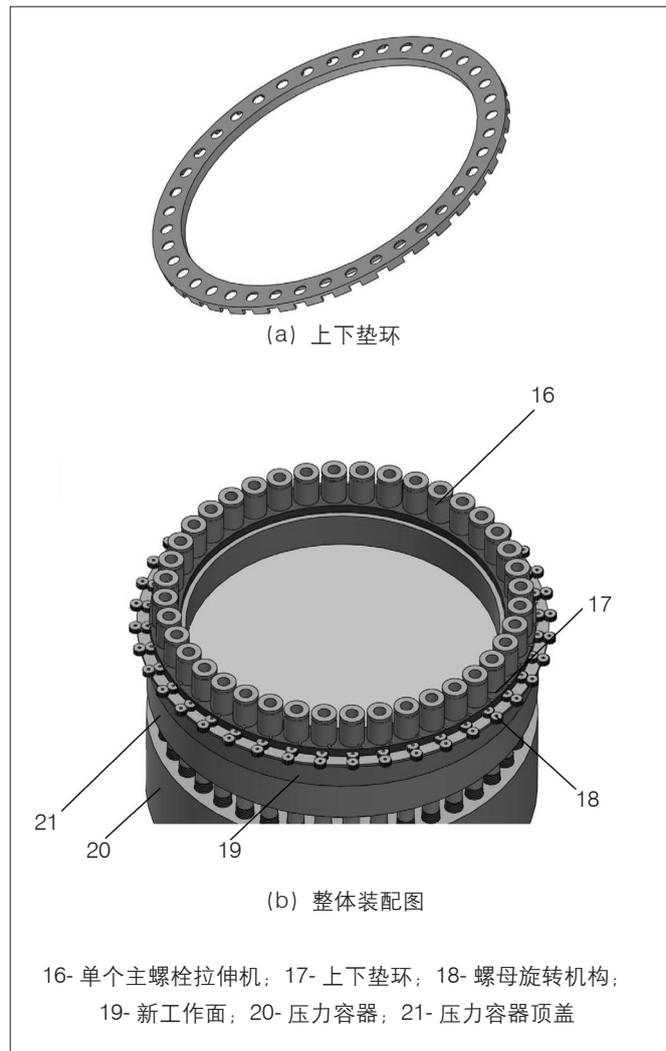


图6 拉伸器总体布局

示和远传仪表组成; 通过人机操作界面对液压系统进行压力预设、升压/降压程序设置、系统启停、故障检测及报警等功能。电控系统主要依据实际压力值和设定值,

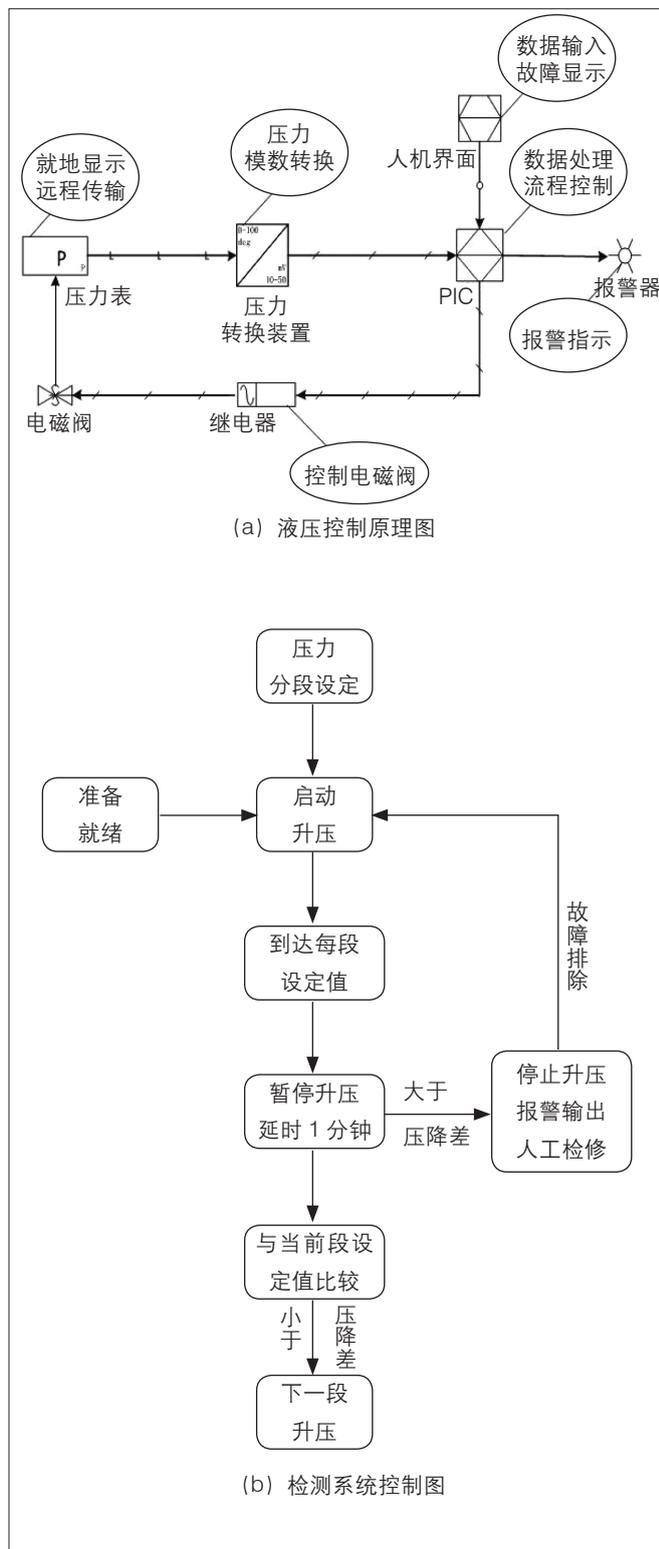


图7 控制系统原理图

PLC 控制截止阀开关状态。借助人机操作界面实现液压系统的总压力预设、分段压力预设和暂停时间预设、压降差设定等功能。

压力设定值后,关闭电磁阀系统暂停升压,2min 后,远传压力表数值与预设值进行比较,待压降差在允许范围内后,继续进行下一段升压过程。若压降差超过预设值,系统停止升压并报警输出,确认编号为 1 ~ 40 的压力表具体故障,待故障消除后,继续升压工作,具体控制图如图 7 所示。

### 3 结语

本文提出了一套 40 个独立拉伸器多级并联的液压系统,通过油压控制单元满足了 40 个接口油压均布的要求;通过压力调节器及备用二次加压泵,解决了单个拉伸器独立调节的要求;采用激光测距仪等测量仪器,保证了拉伸精度的问题;采用整体悬吊对中安装的方式,解决了对工作空间受限的要求;通过工作平面转移结构设计,解决了螺栓间隙较小无法多台拉伸器同时工作的问题;通过螺母旋转装置安装及应用,解决了人工旋转精度差、人员受照射剂量大的问题。该套设备较现有整体拉伸机具有低成本、高效率、高工作质量的优点,可增减独立拉伸器满足不同核电站的使用要求。

### 参考文献:

- [1] 胡大芬,刘刚,王春发.CPR1000 反应堆压力容器主螺栓预紧过程分析[J].压力容器,2015,32(11):6-11.
- [2] 崔逊波,陈卓,刘石桥.整体螺栓拉伸机在反应堆压力容器密封作业中的使用控制[J].压力容器,2014,31(10):69-74.
- [3] 朱成军.整体主螺栓拉伸机在 AP1000 应用的可行性分析[J].设备管理与维修,2016(09):80-81.
- [4] 王强.整体螺栓拉伸机性能影响因素分析[J].中国科技信息,2017(18):89-91.
- [5] 徐洪福,孙永刚.一种新型的全自动螺栓拉伸机[J].科技创新与应用,2013(27):68-69.
- [6] 李文霏.整体螺栓拉伸机的系统设计与研究[D].厦门:厦门大学,2017.

作者简介:王用超(1984-),男,硕士研究生,工程师,研究方向:反应堆及一回路系统检修管理。