研究论文

DOI：10.11949/0438−1157.20260149

高能同步辐射光源超导腔低温系统降温过程的动态模拟及自动控制方法

朱柯宇，常正则，李梅，桑民敬，马长城，姜永诚，叶瑞，韩瑞雄，赵同宪，李少鹏，张卓，张志航，周健荣，刘枭，张沛，葛锐

（中国科学院高能物理研究所，北京 100049）

摘要： 高能同步辐射光源（HEPS）一期使用7台超导腔作为主加速结构，在运行前要求低温系统按照严格的降温要求将超导腔的温度从室温缓慢降低至液氦温区，整个过程耗时约10 d，传统降温方式需要运行人员在此期间持续不断地执行调节动作。为了提高降温效率和安全性，同时减少人力成本，设计了一种结合半开环和闭环反馈的全局降温控制策略，并在自研的一维动态数值模型上取得了较好的模拟控制效果。最终在2025年7月HEPS超导腔低温系统第一次降温中完成了实际部署和测试。测试结果表明，这种新型自动降温策略可以实现长距离多超导腔同时降温，同时可以严格控制降温过程参数符合降温要求。

关键词： 高能同步辐射光源；降温策略；自动控制

中图分类号： TP 29　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438−1157（2026）08−4493−11

Simulation and control strategy for cooldown of superconducting cavity cryogenic systems in high−energy photon source

ZHU Keyu, CHANG Zhengze, LI Mei, SANG Minjing, MA Changcheng, JIANG Yongcheng, YE Rui, HAN Ruixiong, ZHAO Tongxian, LI Shaopeng, ZHANG Zhuo, ZHANG Zhihang, ZHOU Jianrong, LIU Xiao, ZHANG Pei, GE Rui

(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The first phase of the high−energy photon source(HEPS) uses seven superconducting cavities as the main accelerating structure. Before operation, the cryogenic system requires the temperature of the superconducting cavities to be slowly reduced from room temperature to the liquid helium temperature range according to strict cooling requirements. The entire process takes about 10 d. Traditional cooling methods require continuous adjustment by operators during this period. To enhance efficiency, safety, and reduce manpower, a novel global control strategy combining semi−open−loop and closed−loop feedback was developed. Simulations with a proprietary 1D dynamic model showed promising results, leading to its successful deployment and testing during the inaugural cooldown of the HEPS cryogenic system in July 2025. The tests confirmed that this automated strategy

收稿日期： 2026−01−30　　**修回日期：** 2026−04−07

通信作者： 葛锐（1975—），男，博士，正高级工程师，gerui@ihep.ac.cn

第一作者： 朱柯宇（1996—），男，博士，工程师，zhukeyu@ihep.ac.cn

基金项目： 国家自然科学基金项目（12175250）

引用本文： 朱柯宇, 常正则, 李梅, 桑民敬, 马长城, 姜永诚, 叶瑞, 韩瑞雄, 赵同宪, 李少鹏, 张卓, 张志航, 周健荣, 刘枭, 张沛, 葛锐. 高能同步辐射光源超导腔低温系统降温过程的动态模拟及自动控制方法[J]. 化工学报, 2026, 77(8): 4493−4503

Citation: ZHU Keyu, CHANG Zhengze, LI Mei, SANG Minjing, MA Changcheng, JIANG Yongcheng, YE Rui, HAN Ruixiong, ZHAO Tongxian, LI Shaopeng, ZHANG Zhuo, ZHANG Zhihang, ZHOU Jianrong, LIU Xiao, ZHANG Pei, GE Rui. Simulation and control strategy for cooldown of superconducting cavity cryogenic systems in high−energy photon source[J]. CIESC Journal, 2026, 77(8): 4493−4503

can effectively and simultaneously cool multiple cavities over long distances while rigorously adhering to all cooldown requirements.

Keywords: high-energy photon source (HEPS); cooldown strategy; automatic control

引 言

高能同步辐射光源(high-energy photon source, HEPS)是国家重大科技基础设施建设“十三五”规划确定建设的十个重大科技基础设施之一,主要由加速器、光束线和实验站等部分组成,是基础科学和工程科学等领域原创性、突破性创新研究的重要支撑平台[1]。加速器采用166.6 MHz和499.8 MHz超导腔对束流进行加速。由于金属材料Nb和NbTi等的热容在温度300 K左右较大并为束流提供同步辐射损失的能量[2],设计采用4.2 K饱和液氦浸泡方式进行冷却。

超导腔在运行时,需要将其温度从室温逐渐降低至超导温区,根据不同腔型结构的降温要求,这一过程从数十小时到数十日不等。比如散裂中子源China Spallation Neutron Source将要采用的双Spoke型超导腔,在水平测试中其模组降温过程持续了114000 s(31.7 h),经历了慢速降温、快速降温、转2 K等过程,从300 K降温至2 K[3];中国科学院高能物理研究所研制的1.3 GHz超导腔模组,其水平测试的降温过程持续了110000 s(30.5 h),同样经历了慢速降温、快速降温、转2 K等过程,从300 K降温至2 K[4]。以上这两个模组都需要避免氢中毒效应,因此需要在150~40 K温区内进行极快速的降温,也就是前述的快速降温阶段,从而缩短降温总时间。LCLS-Ⅱ的1.3 GHz超导腔模组降温过程中没有进行快速降温,其降温过程持续了约5 d,降温速率约为3 K/h,从300 K降温至4 K[5]。日本KEK在8个9cell超导腔模组的水平测试中,由于整个模组规模较大,降温过程持续了近2周时间,从300 K降温至2 K[6]。CERN在对其超导磁体的降温测试过程中对其超导铁Stander Cell进行降温,降温过程持续了约11 d,从300 K温区降温至4 K温区[7]。

氦低温系统在过程工业中是一个较为细分的领域,在这一领域里正向建模、反向建模以及先进控制相关的研究开展得并不多。近年来,研究者们在超导加速器领域内开始尝试使用一些非传统的自动控制算法实现超导腔的降温过程。例如Chang等[8]和Li等[9]使用模型预测控制(model predict control,MPC)方法对长管路和超导腔恒温器进行降温过程的自动控制,针对长管路和超导腔系统的大迟滞、强耦合、非线性特点提出了一种时域滚动优化模型进行预测控制,控制效果较好,完成了长管路和超导腔恒温器300 K到150 K慢速降温过程的自动控制。在中国科学院高能物理研究所后续的1.3 GHz的水平测试降温过程中也用到类似的控制方案,完成了降温过程的控制[4]。CERN基于模型预测控制方法对LHC建立了一套虚拟系统,用于对实际系统的实时控制、模拟仿真以及故障预测等功能[10],该虚拟系统已经应用于LHC的小型低温系统,实现动态仿真模型的实时在线运行。

与上述研究中涉及的超导腔低温系统相比,HEPS超导腔低温系统的一个显著特点是传输距离长,需要在200 m的传输距离内同时为7台不同结构形式的超导腔进行同步降温。长距离管道在降温时会引入较大的迟滞性,而多台超导腔加工工艺存在偶然误差,也有可能导致其温度分布和降温表现在降温过程中出现差别。另外一个特点是166.6 MHz超导腔降温要求较为严苛,为了尽量减少由热应力导致的泄漏风险,高频系统要求在降温过程中整个超导腔上的最大温差不能超过某一限定值。上述约束条件均对HEPS超导腔低温系统降温过程的自动控制方法带来了较大挑战。

本研究首先介绍HEPS超导腔低温系统的基本几何结构和降温约束条件,对超导腔降温过程进行局部三维数值模拟,并对计算结果展开分析。然后结合计算结果分析设计具体的降温逻辑和自动控制算法,同时给出全局一维动态模拟方法,用于离线验证自动控制方法的合理性。最后分析模拟获得的降温曲线,并将其与实际测试结果进行对比,提出下一步修正的方向。

1 三维模拟方法与结果分析

1.1 几何结构与约束条件

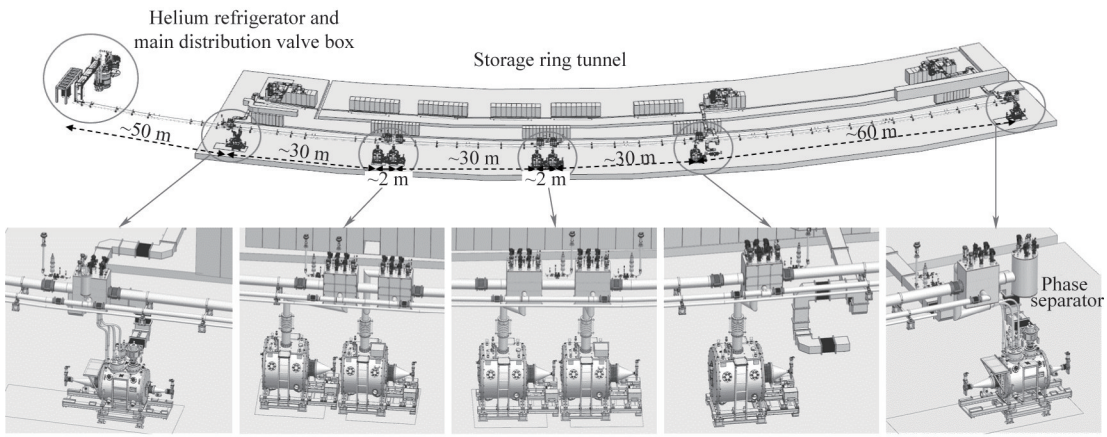
HEPS超导腔低温系统的主要任务是为储存环中的7台超导模组提供冷量。其三维布局如图1(a)所示,从主分配阀箱开始,距离第一台499.9 MHz超

导腔距离约为 50 m，之后 6 台超导腔的间距分别为 30、2、30、2、30、60 m。第一台和最后一台超导模组为 499.8 MHz 型，编号为 1#和 10#；中间为 5 台 166.6 MHz 超导模组，编号为 2#~6#。在 10#超导模组旁边设置了一个小型相分离器，在降温时可以起到旁通的作用。流程如图 1(b)、(c)所示，降温过程中主要使用四通道低温管线中的 LHe 管(蓝线)作为供应管，GHe 管作为回气管。调节 MDVB 中的 CV4105(300 K)和 CV4103(40 K)两个阀门的开度，即可获得 40~300 K 范围内任意温度的冷氦气。499.8 MHz 超导模组本地阀箱内的 CV6101 阀门负责控制本地流量，166.6 MHz 超导模组则由 CV6103 阀门控制降温过程中的本地流量。

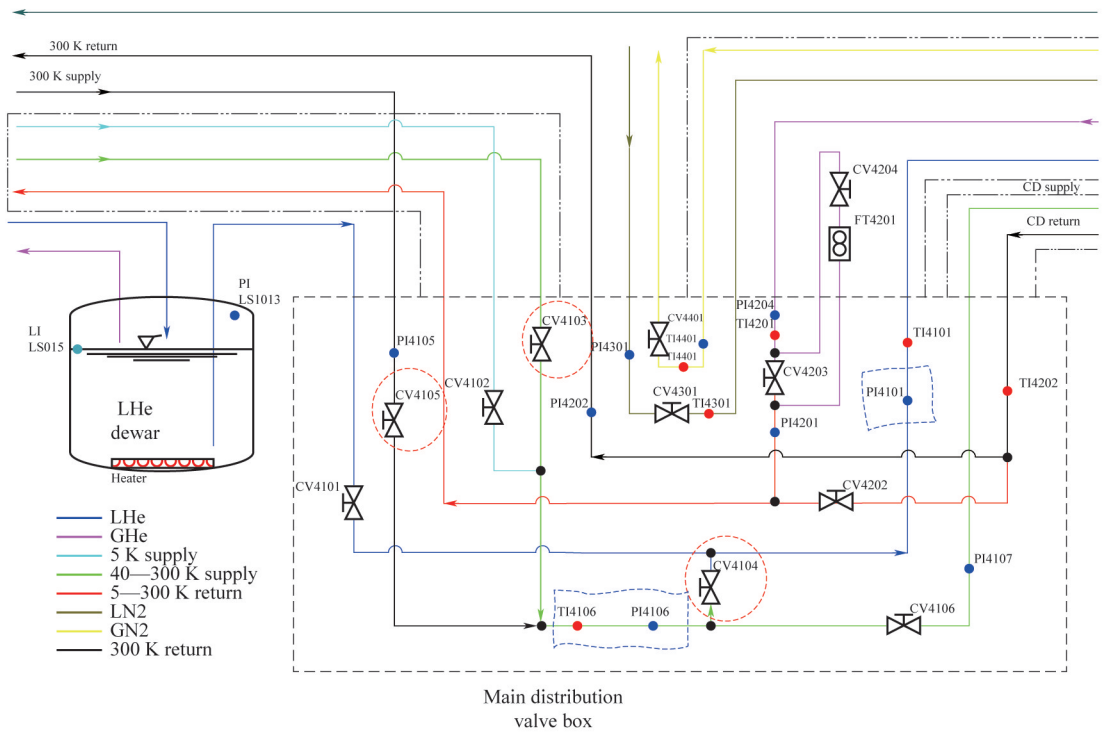
降温过程中涉及的主要管道均为 316 L 不锈钢，具体尺寸见表 1。

166.6 MHz 超导腔氦槽较为紧凑，无法直接在其超导腔表面布置温度传感器，因此使用 10 支安装在氦槽外表面的 Cernox cu 1050 温度传感器实时监测降温时的温差，具体位置如图 2 所示。

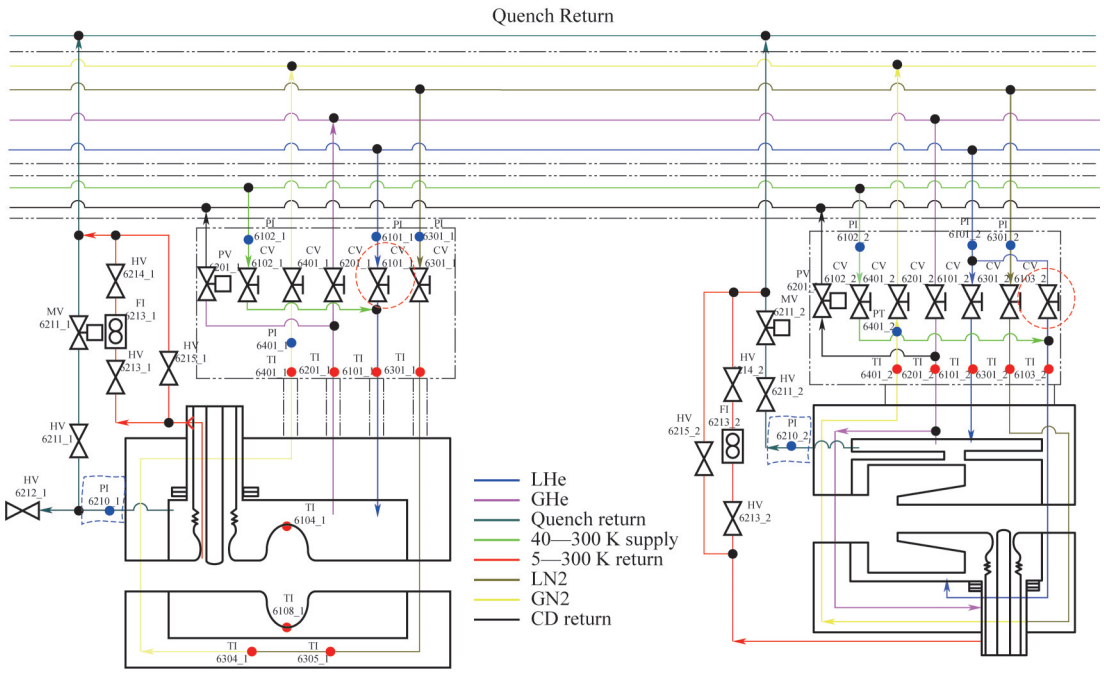
与 166.6 MHz 超导腔相比，499.8 MHz 超导腔是



(a) 三维布局图



(b) 主分配阀箱流程图



(c) 本地阀箱流程图

图 1 HEPS 低温系统全局结构

Fig.1 HEPS global structure of cryogenic system

表 1 管道尺寸

Table 1 Pipeline size

管道类型	公称直径	外径/mm	内径/mm
液氦四通道管线	DN32	42.7	39.4
液氦四通道管线	DN50	60.3	57.0
本地阀箱供液管线	DN10	17.2	13.9
本地阀箱回气管线	DN20	26.7	23.4

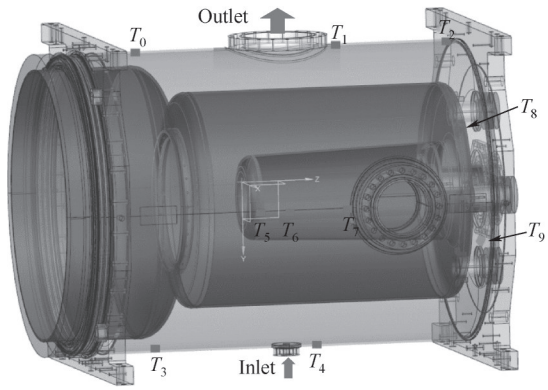


图 2 166 MHz 超导腔及其氦槽

Fig.2 166 MHz superconducting cavity and its helium vessel

一种已经在 BEPCII 项目中得到长期在线验证的成熟腔型，因此其冷却结构保持了原有设计。在整个降温过程中仅需监测超导腔顶部和底部的两个温度传感器的温差。499.8 MHz 超导腔氦槽结构如图 3 所示。

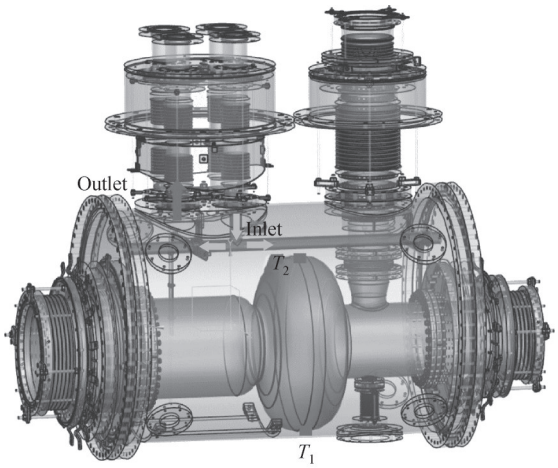


图 3 499.8 MHz 超导腔及其氦槽

Fig.3 499.8 MHz superconducting cavity and its helium vessel

为了避免降温过程中在超导腔上产生较大的热应力，需要谨慎控制超导腔表面的温差。由 SRF 部门提出的超导腔降温过程要求见表 2。

表 2 降温要求汇总

Table 2 Cooling requirements

超导腔/MHz	腔上最大温差/K	超导腔降温速率/(K/h)	氦槽压力/bar
166.6	20	<5	<1.2
499.8	10	<5	<1.2

注：1 bar=10^5 Pa。

通过图2和图3可以看出，由于实际测量点数量有限，尤其是166.6 MHz超导腔甚至无法直接测量其表面温度，首先需要通过数值模拟方法探索实际可测量的温差与超导腔表面实际温差之间的关系。

1.2 三维模拟方法

为了便于网格离散和数值计算，针对166.6 MHz超导腔/氦槽和499.8MHz超导腔/氦槽进行了简化。重点考虑与降温相关的流场以及固体域，简化掉与降温关系不大的螺栓、波纹管、螺孔等细小设备，主要确保整体冷质量基本不变。最终简化后的几何结构如图4所示。

具体的动态三维模拟方法及结果可以参考本团队之前发表的论文[9]，此处不再重复描述。

2 自动控制算法与一维动态仿真方法

2.1 降温逻辑与自动控制算法

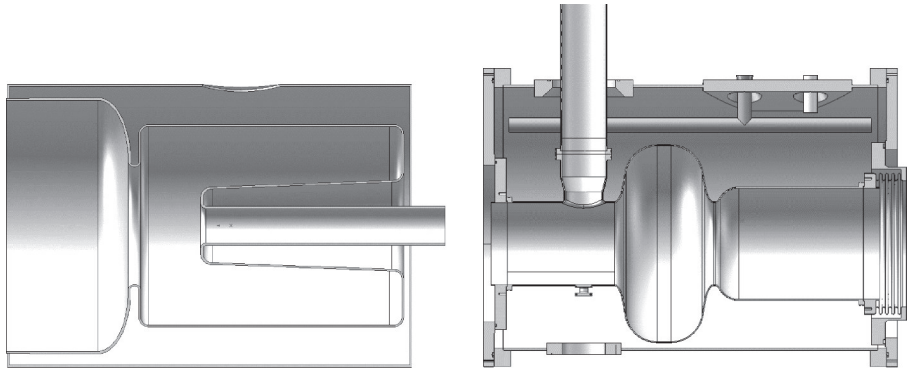
整个降温积液过程分为3个阶段：第一阶段为300~40 K阶段；第二阶段为40~4.5 K阶段；第三阶段为积液阶段，指降温到位后超导腔氦槽从无液氦加注液氦至要求液位的过程，其整体过程温度均为4.2 K。第一阶段使用主阀箱内的CV4105(300 K)和CV4103(40 K)两支等百分比低温控制角阀(TOKO VALEX)调节不同温区氦气的流量进行混合兑温。由于金属材料Nb和NbTi等的热容在300 K左右较大，而热导率相对较小，第一阶段是整个降温过程中耗时最久也最不容易控制温差的阶段，是重点研究的降温阶段。

传统手段是以手动兑温方式逐步下调入口氦气的温度，同时不断监测各超导腔的温度分布，通过操作员的判断不断调整多个阀门，进而实现降温。这种方式非常耗费人力，而且不够稳定。现在使用混合MPC和PID的整体控制方法执行自动控制。MPC方法中的model主要用于调节入口氦气的总流量和温度，每隔一段时间会使用数学模型计算入口阀门CV4105和CV4103的开度。PID方法主要用于其他本地阀门的快速反馈控制。降温阶段的简化流程如图5所示，为了便于后续描述，将实际系统中涉及自动控制的阀门和测量点编号进行了简化，例如将CV4105简化为Valve_300。

参与降温自动控制的主要执行器为CV阀门，其中主阀箱3个、本地阀箱7个、相分离器1个，总计11个阀门。参与控制的反馈信号包括9个压力信号和56个温度信号。其中没有考虑制冷机源头的温度和压力信号，制冷机提供的温度和压力可能不是常数，例如40 K路提供的冷氦气不一定恰好是40 K或13 bar，可能是29 K@11.8 bar，但通常这些值在一轮降温中不会发生太大变化，因此使用初始测量值作为边界条件，后续降温控制时不再更新源头测量信号。

显然，这是一个典型的多输入多输出系统，同时兼具大迟滞性、强耦合性的特点，需要对其进行解耦处理。为这一系统设计的阶段性自动控制算法流程如图6所示，图中最大测量温差 $\Delta T = \max_{i=0}^{9} T_i - \min_{i=0}^{9} T_i$。

降温过程由MPC和PID两个层级的自动控制逻辑控制，MPC逻辑为半开环控制、反馈间隔为30 min，PID为闭环控制、反馈间隔为0.5 s。开始降温前，确保Valve_300和Valve_40关闭，其他下游阀门全部打开至上限，超导恒温器隔热真空正常。开始



(a) 166.6 MHz超导腔　　(b) 499.9 MHz超导腔

图4 简化后用于数值模拟的几何结构

Fig.4 Simplified geometries

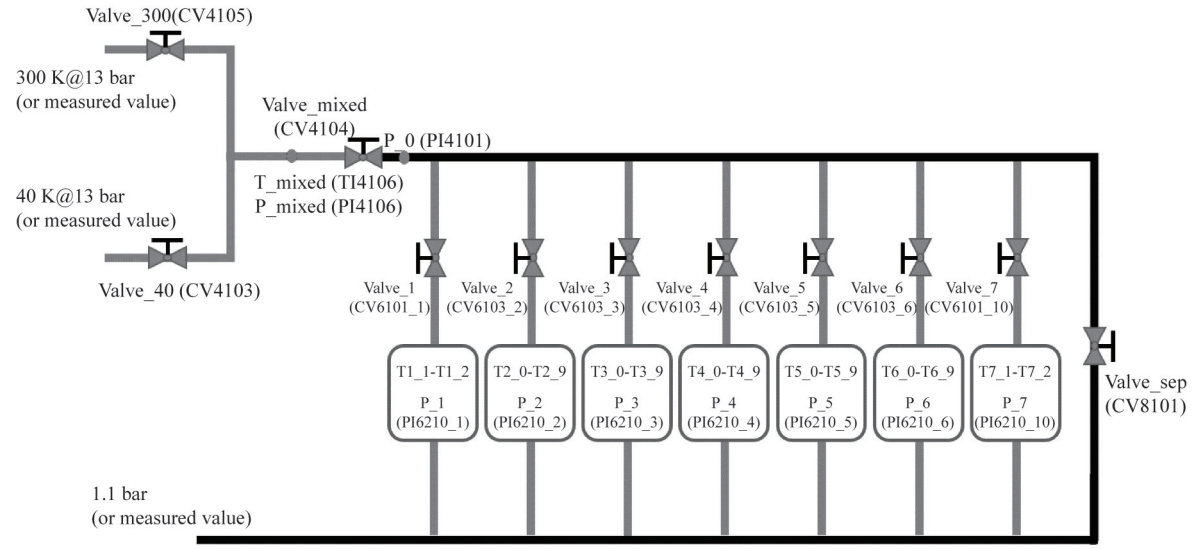


图5 简化后的降温流程图

Fig.5 Simplified cooldown flow diagram

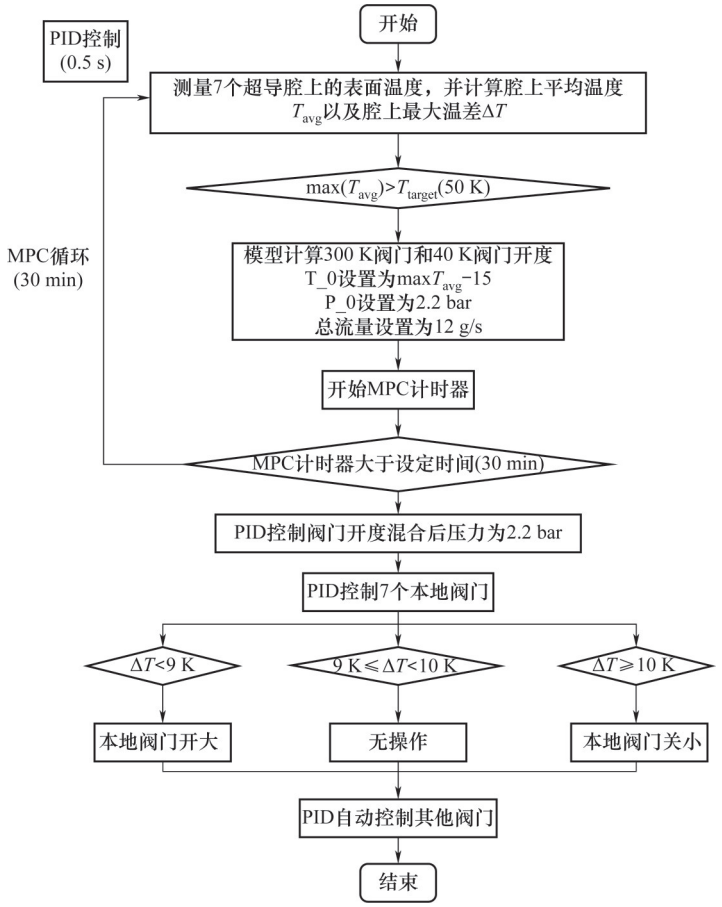


图6 300~40 K区间的自动降温逻辑

Fig.6 Automatic cooldown logic for 300—40 K interval

降温的同时，打开液氮供应阀门，同步为氮屏降温。

兑温阀门开度与阀门系数(CV)之间的关系如图7所示。

使用式(1)由阀门开度计算通过流量，阀门由TOKO VALEX公司提供。

$$m_g = \frac{\mathrm{CV} \times \rho_n}{3529\sqrt{\dfrac{\rho_n T_{in}}{p_{in}^2 - p_{out}^2}}} \tag{1}$$

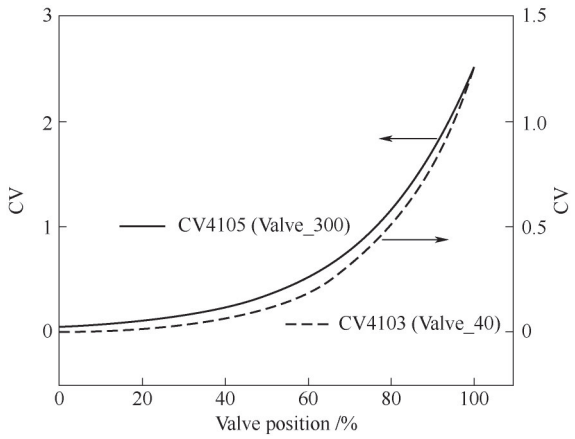


图7 主要兑温阀门的开度曲线

Fig.7 Opening characteristic curves of main temperature mixing valves

式中，ρ_n为气体密度(273.15 K@101325 Pa)，kg/m^3；T_{in}为阀门前温度，K。可以看出，在阀门入口条件不变的情况下，如果背压变化不大，则可以认为阀门开度和阀门通过流量是一一映射的关系，因此式(1)同样可以通过流量计算阀门开度。

兑温完成后的阀门Valve_mixed使用PID方法控制兑温后的压力P_mixed，目标是尽量保持兑温阀后压力稳定，即式(1)中的p_{out}，它的设定压力为2.2 bar，随压力增加加大开度。

通过CFD计算以及前期的水平测试发现腔上温差受流量影响较大，并且反馈较快，因此直接使用PID方法控制本地阀箱里的节流阀Valve_1~Valve_7，被控量即各自超导腔表面最大温差ΔT。当ΔT<9 K时，直接打开入口节流阀至上限(90%)。当9 K≤ΔT<10 K时，设定目标温差为9.5 K，使用PID算法动态调节入口阀门的开度，随温差增加减小开度。当ΔT≥10 K时，将入口阀门设置为下限(15%)，同时发出警报，提醒运行人员注意。

每个超导腔的静态漏热、入口压力、回气压力等参数不可避免地存在一些偏差，所以在降温过程中存在一些偏差是很正常的。但如果某腔的温差较大，当前的PID控制逻辑会导致其入口流量变小，进而导致其降温速度更慢。因此使用max T_{avg}−15作为全局入口温度，这是一种保护机制，防止出现各个超导腔之间的降温速率不一致，导致腔温越拉越大形成恶性循环。

相分离器中的阀门Valve_seq作为旁通阀，主要起到防止主阀箱憋压的作用，其控制压力为P_0，随压力增加加大开度。大多数时候压力达不到设定值(2.0 bar)，因此阀门在设定范围的下限(15%)连续运行。

第一阶段降温通常需要花费数天之久。在完成耗时最久的第一阶段后，使用同样的降温逻辑完成40~4.5 K的第二阶段兑温降温，只是将300 K兑温阀门Valve_300(CV4105)更换为液氦注入阀门CV4101，这一阶段约需要1 d。当平均腔温降低至20 K左右时，关闭Valve_40，开始转入注液阶段。这一阶段不再关注温差，因此切换入口阀门Valve_1~Valve_7的PID参数，将控制目标设置为液位值。数小时后各超导腔液位达到目标设定值，完成整个降温过程。

2.2 一维动态模拟方法(代理模型)

对于HEPS低温系统这种庞大复杂且昂贵的运行系统，其在控制方面存在的最大难点便是耦合性高和迟滞性大，难以采用传统的解耦方式进行控制。阀门动作与腔压之间的关系不是一一对应的，调整一个超导腔氦槽的入口阀门不仅会影响本氦槽的压力，还会对另外6个氦槽的压力产生影响，甚至倘若调节幅度过大还会对主流的来流压力产生影响，另外上游的操作对下游的影响很可能需要较长时间(15 min以上)才能有所体现，故而难以使用解析方法进行分析。基于以上原因，最终采用模型预测控制(MPC)方法进行控制策略的制定。此外，由于HEPS涉及超导腔、超导耦合器等精密仪器，为了确保安全有效，自动降温控制逻辑在设计完成后首先在一维动态流程模拟系统上进行了验证。

一维动态流程模型涉及低温管线、阀门、超导腔氦槽这3个主要部件。低温管线相关的数学模型已在之前的论文中详细描述过[8]。降温流程涉及的阀门均为Toko阀门，其数学模型为式(1)。

一般的一维或零维模型无法计算出超导腔或其氦槽上的温差，因此这里使用数据驱动的代理模型进行降阶建模，其方法详见文献[11]。通过三维数值模拟数据对166.6 MHz超导腔氦槽上的高温点和低温点分别进行训练和拟合，如图8所示。

利用CFD方法计算数据集时，初始设定整个计算域温度为300 K，入口流速为1.5 g/s，入口温度分别为280、270、260、250、240 K。由于两个650 MHz超导2-cell腔体所需最大流量为3 g/s，在保证腔体内部压力不超过1.2 bar的条件下不考虑变质量流量工况。这是因为当源供给质量流率过高时超导

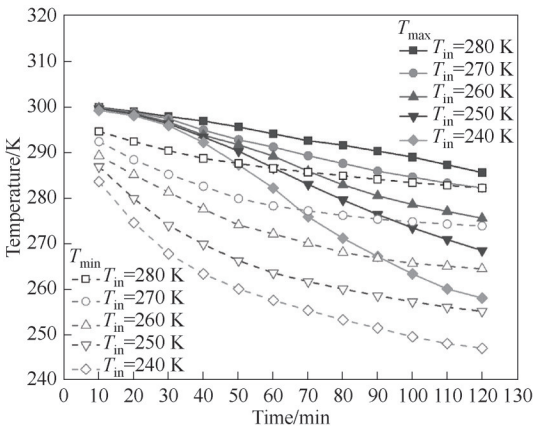


图8 用于训练的拟合数据集(部分)

Fig.8 Fitting data set for training (part)

腔内压力升高,而过高的压力会导致腔体变形,因此对于单个超导腔的质量流率合理设置为1.5 g/s。

对于低温点拟合方式不变,仍然是用一个零维tank模型进行替代,tank模型的参数使用进化学习方法获得。对于高温点拟合方式稍加改动,在原有的一维pipe模型(拟合迟滞性)+零维tank模型的基础上新增导热扩散项,如式(2)所示。

$$\Delta T_{cond} = (T_{high}^{\tau-1} - T_{low}^{\tau-1}) \times dt \times \phi(T) \tag{2}$$

新增的导热扩散项使用上一个时间步计算获得的高温点与低温点之间的温差计算,用于模拟高温点在无流量或小流量条件下仍然能随时间逐渐降低的导热效应,系数ϕ是平均温度T的拟合函数。经过水平测试中6次停止降温实验,计算获得的导热扩散项系数与温度的关系可以拟合为式(3)的函数关系。

$$\phi(T) = 9.7 \times 10^{-5}T - 0.0857 \tag{3}$$

采用这样的方法可以使高温点与低温点之间的温差对流量敏感,一旦流量下降,则导热扩散项就会发挥作用,持续令温差缩小,这一点与实际情况也是相符合的。

为防止时间步dt较长导致的非物理解,给出完整计算公式:

$$T_{high}^{\tau} = \max\left(T_{low}^{\tau}, \widehat{T_{high}^{\tau}} - \Delta T_{cond}\right) \tag{4}$$

式中,$\widehat{T_{high}^{\tau}}$表示未增加导热扩散项时计算获得的高温点温度;max函数用于确保高温点温度永远不低于低温点。

遗传算法是解决这类问题的流行优化技术之一。遗传算法使用包括变异、交叉和选择在内的生物启发算子,经常用于产生优化和搜索问题的高质量解决方案[12]。使用遗传算法对两组待定系数进行优化,表3显示了每个系数的可行域。

表3 系数可行域

Table 3 Feasible domains of coefficient

系数	范围
L_{max}, L_{min}	10~1000
D_{max}, D_{min}	10~100
δ_{max}, δ_{min}	0~10

使用联立方程法进行全局求解,同时使用PID和MPC混合控制方法自动调整各个阀门,即可获得各个腔的降温曲线和温差曲线。

在训练完成后,对代理模型进行泛化能力验证。本代理模型对于训练集R值为98.6%,对于测试的数据集R值为95.7%,证明本代理模型具有优秀的泛化能力。

3 结果与讨论

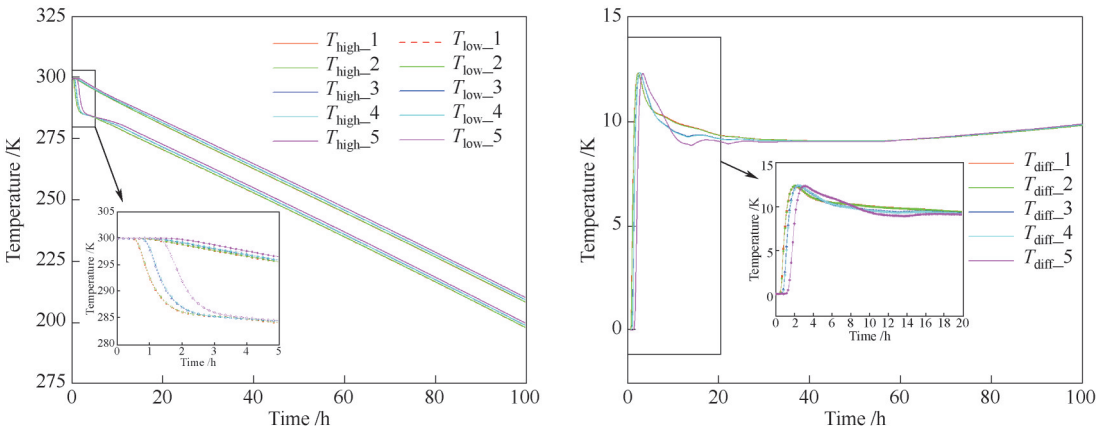
3.1 模拟降温结果

综合三维算法和一维算法,模拟了160 h的降温过程,各腔初始温度均为300 K。首先固定各超导腔的本地入口阀门开度为90%,仅每隔30 min调节入口温度。在每个腔的入口阀门处设置了PID控制器,目标温差9.5 K,利用温差实时调整各腔入口流量,重新计算后获得的降温过程曲线如图9所示。图9(a)展示各腔高温点和低温点的变化,图9(b)展示最大温差的变化。由于499.8 MHz超导腔的降温温差较小,始终在1 K以内,为了令图像简洁,图中仅展示5个166.6 MHz腔的模拟数据。

由图9可以看出,各腔整体降温速率下降至0.9 K/h,但是最大温差控制得较好,仅在降温初期有一个较高的温差峰值,为12.4 K,当PID控制器开始生效后各腔的温差都能稳定在9.5 K左右,至100 h的模拟时间结束,尽管仍然存在轻微的“残余温差”累积现象,但各腔的最大温差都没有超过10 K。

3.2 实际降温结果

从2025年7月22日08:00开始为HEPS超导加速器的7台低温恒温器执行降温操作,为了确保降温过程的安全性,在降温初期使用手动方式。至7月26日12:00,平均腔温降低至170 K左右,开始切换至自动模式。自动模式共执行了3 d左右,平均温度从166.82 K降低至102.32 K,平均降温64.5 K,降温速率为0.896 K/h。之后由于低温系统外的其



(a) 166.6 MHz超导腔在降温过程中的高温点和低温点　(b) 166.6 MHz超导腔在降温过程中的最大温差

图9　使用PID控制各腔流量时的降温过程

Fig.9　Cooldown process with PID control of individual cavity flow rates

他系统中途有其他操作，需要进行计划外的额外操作，而原定的降温控制逻辑与该计划外操作同时动作无法百分之百保证安全，加之发现部分低温传感器在温度100 K以下的准确性存在较大误差，可能影响自动降温程序的进一步执行，因此出于系统安全运行考虑，重新切换至手动方式，直至注液阶段。整个降温过程的超导腔温度曲线如图10所示，超导腔上的最大温差变化如图11所示。

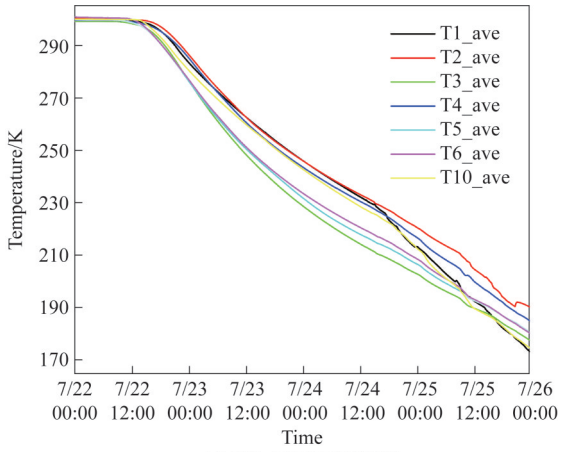
对于降温过程中的温度变化，从图10(a)中可以看出，在初始4 d的降温过程中，超导腔降温比较平稳，这是由于降温初期手动降温策略比较保守，但也仍能看出一些手动调整导致的温度波动。从图10(b)看出，在自动降温过程中超导腔温度平稳下降，除了3号腔温度由于冷屏调整导致降温速度较快外，其他超导腔降温都非常平稳，温差也均控制在较高水平，没有超过限制，在保证了降温速率的条件下也同时满足了安全上的要求。也比较符合之前模拟降温的结果，降温平稳，每隔1 h温度下降1.5 K，由于延迟温度先是缓慢下降，之后便迅速下降后保持平稳，每个腔由于其具体结构略有差异，在降温过程中温度变化也略有差异。从图10(c)看出，在降温后期温度调整比较频繁，降温曲线波动较大。

对于降温过程中的温差变化，在图11(a)中，温差先增大后趋于平缓，但在开始调整后温差发生了剧烈的变化。在图11(b)中，由于腔型不同，499.9 MHz超导腔(1号腔和10号腔)在降温过程中腔上温差均较低，平均温差为1.83 K；而166.6 MHz超导腔(2~6号腔)平均温差相对较高，在7.8 K左右，尤其是4号腔，其温差大部分时间在8.5 K以上，后期更是在9.5 K左右，由于7个腔是串联关系，几个166.6 MHz超导腔的温差变化趋势基本一致，而两个499.9 MHz超导腔由于距离相差较远，温差变化不甚相似。在图11(c)中，166.6 MHz超导腔的温差也是维持在较高的水平，随后随温度降低腔上氦槽上温度趋于一致，之后温差降低到稳定且较低的水平。

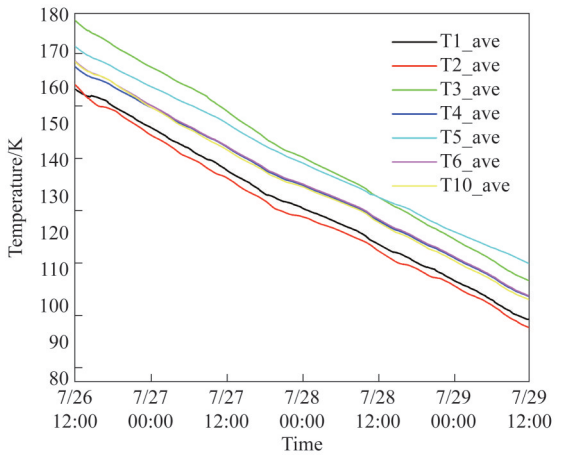
使用模拟降温过程与实际降温过程进行对比，如图12所示。可以看出模拟降温过程与实际降温过程整体趋势吻合较好，模拟降温的降温速率略快于实际降温速率，约快7.8%，这可能是由于在仿真系统中低估了实际系统的复杂程度，各种其他部件带来了更大的热负荷，导致实际降温速率偏慢。降温过程中最大温差与仿真过程比较接近，最大差距约3.2%，随温差增大降温速率增大，因此这两者是相互制约的关系，想要提高降温速率就不得不提高腔上的最大温差，这也是限制进一步提高降温速率的主要因素。

虽然自动降温程序的实际运行时间仅为3 d左右，但在这3 d的运行中整体降温过程安全、平稳，控制精确，能够满足前述提出的降温需求，这足以证明本研究采用的控制逻辑思路及具体的执行方法是可行的，能够在诸多条件(腔上温差、降温速率等)限制下安全、稳定地完成从300~40 K的降温过程。

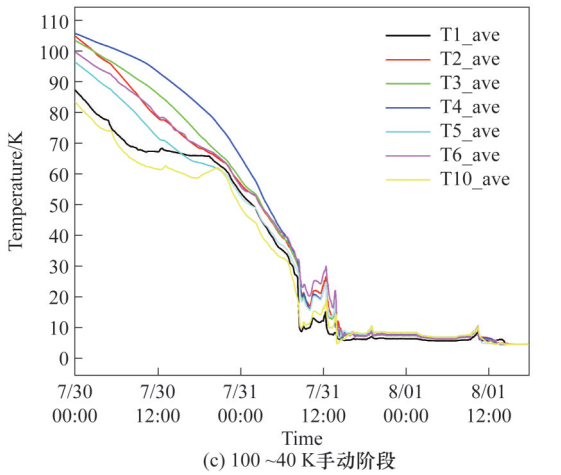
相比之下，手动操作则显得十分烦琐，需要值班人员时刻同时观察7个腔的温差并对7个入口阀进行实时调整，或者需要根据经验预测温差变化趋势提前进行预判调整。无论是哪种情况，都需要每个腔每小时十余次的阀门操作，这会极大



(a) 300~170 K手动阶段



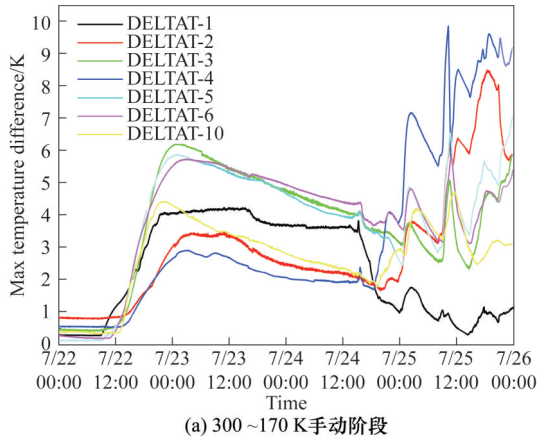
(b) 170~100 K自动阶段



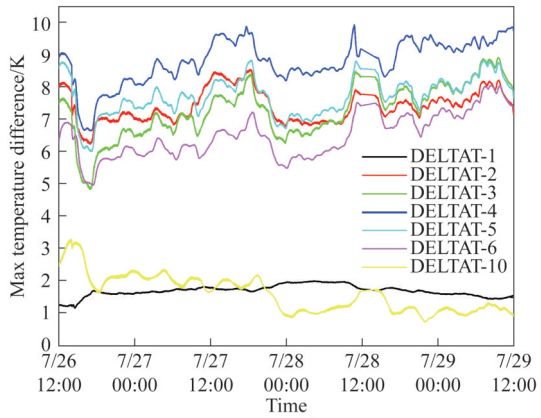
(c) 100 ~40 K手动阶段

图10 各降温阶段的超导腔温度变化情况

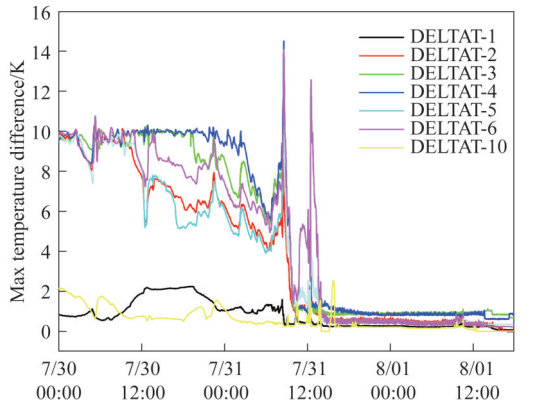
Fig.10 Temperature changes of superconducting cavities during different cooldown stages



(a) 300 ~170 K手动阶段



(b) 170~100 K自动阶段



(c) 100 ~40 K手动阶段

图11 各降温阶段的超导腔最大温差变化情况

Fig.11 Changes in maximum temperature difference of superconducting cavities during different cooldown stages

消耗值班人员的精力，而且同时还需要关注压缩机、制冷机、回收系统等系统，这也会进一步提高值班人员的工作强度。而在自动情况下，这些频繁的阀门操作均由系统自动控制完成，而且控制效果更佳。

4 结 论

在HEPS第一轮全超导模组降温过程中验证了动态数值仿真模型的精确度以及自动降温逻辑的有效性，实际完成了170~100 K区间的自动降温操作，结论如下。

(1)利用三维数值模拟数据构建的代理模型可

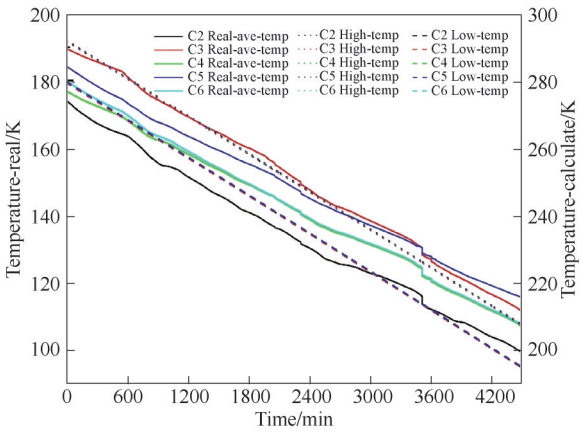


图12 实际降温与模拟计算对比

Fig.12 Comparison between simulated and real cooldown

以较好地模拟降温过程中超导腔上的高温点和低温点，这令一维流程仿真方法可以在一定程度上模拟复杂三维物理场。

（2）混合MPC和PID方法的自动降温逻辑可以处理多输入多输出的复杂情况，实现长距离上多个超导腔的同步降温。

（3）限制降温速率的主要因素是166.6 MHz超导腔上的温差，局部流场不均匀导致温差较高，进而导致整体降温速率受限。这方面可以通过增加入口流量的方式缓解，但无法完全根治。

计算分析证明，大型低温系统多股流系统耦合性、迟滞性高，难以采用常规的PID解耦控制方法进行控制，需要采取能更有效地处理强耦合性和强迟滞性的方法构建控制策略。此外，模型预测控制方法（MPC）需要上位机反复计算得到结果，计算时间较长，在精度允许的条件下可以采用相对简单的模型，以提高计算速度，匹配控制对计算速度的要求。后续将结合本轮实验结果从算法和设备层面开展进一步改进，预计在2026年HEPS夏季检修停机期间完成部署，并进行第二轮自动降温测试。

参考文献

[1] Jiao Y, Xu G, Cui X H, et al. The HEPS project[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2018, **25**(6): 1611-1618.

[2] Jiao Y, Duan Z, Guo Y Y, et al. Progress in the design and related studies on the high energy photon source[J]. Physics Procedia, 2016, **84**: 40-46.

[3] Li M, Ge R, Xu M F, et al. Comparative thermodynamic analysis of China Spallation Neutron Source second phase (CSNSII) SRF system cooling scheme[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, **230**: 120767.

[4] Liu Z, Li M, Li S P, et al. Comprehensive dynamic numerical simulation of cooling process for a 1.3 GHz 9-cell superconducting cavity based on different structures[J]. Physica C: Superconductivity and Its Applications, 2023, **613**: 1354350.

[5] Shrishrimal S, Fauve E, Keenan M, et al. LCLS-Ⅱ LINAC cooldown and fast cooldown[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2025, **1327**(1): 012004.

[6] Shishido T, Hara K, Kako E, et al. Assembly and cool-down tests of STF2 cryomodule at KEK[C]// Proceedings of SRF2015. Whistler, BC, Canada, 2015: TUPB109.

[7] Liu L. Update of a cooldown and warmup study for the large hadron collider[J]. AIP Conference Proceedings, 2002, **613**(1): 76-83.

[8] Chang Z Z, Li M, Zhu K Y, et al. Model predictive control of long transfer-line cooling process based on back-propagation neural network[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, **207**: 118178.

[9] Li M, Chang Z Z, Zhu K Y, et al. Unsteady numerical simulation and optimization of 499.8 MHz superconducting cavity cooling process at the High Energy Photon Source (HEPS)[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, **26**: 101100.

[10] Gayet Ph, Blanco Viñuela E, Bradu B, et al. Online analysis for anticipated failure diagnostics of the CERN cryogenic systems[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems. Spain, 2017.

[11] Li M, Chang Z Z, Zhu K Y, et al. Automation of superconducting cavity cooldown process using two-layer surrogate model and model predictive control method[J]. Cryogenics, 2024, **139**: 103824.

[12] Mahmoudabadbozchelou M, Larijani M A, Afshin H. An economic approach to study and optimize helium liquefier[J]. Cryogenics, 2020, **110**: 103147.