

上海光源工艺冷却水系统加热器设计

张 琴 张 耀 李文静 袁平钧 方国平 赵蓉芳 陆 佼

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 介绍了上海光源(SSRF)工艺冷却水系统加热器的选择和设计方法,加热器发热量的计算和加热器变压器的连接方式选择。说明了控制电加热的方法和电加热使用后对系统稳定的作用。

关键词 加热器,冷却水,温度控制,上海光源

中图分类号 TM92

上海光源装置(SSRF)主要由 150 MeV 电子直线加速器、低能输运线、3.5 GeV 增强器、高能输运线、3.5 GeV 储存环、同步辐射光束线和用户实验站等组成。

SSRF 运行过程中,各种工艺设备所消耗的电能大多转化为热能,这些设备需用冷却水将热量带走,以保证其正常运行^[1]。另外,光源装置设备中,很多磁铁通过线圈通电获得磁场,这些线圈须由冷却水直接冷却,而冷却水温度变化会引起磁铁间隙位置的变化,对稳定度造成很大影响,不但无法获得束流监控的精确数据,严重时还会影响装置的寿命。例如,精确控制束流轨道是 SSRF 运行的关键,须尽可能地控制冷却水温度变化导致的束流轨道变化和 BPM (光束位置探测器)的漂移;又如整个储存环环体内的温度变化,会引起磁铁水平位置整体移

动,导致整个储存环环体的有效周长变化。因此,须用恒温水对设备的工作环境温度加以调节控制,以保证工艺设备在严格的恒温条件下工作。

1 工艺冷却水系统流程

工艺冷却水系统采用三回路循环冷却方式,按组成可分为一次水回路、二次水回路和冷冻水回路(图 1)。其中一次水回路为封闭式回路,为防止水路中产生结垢或水路堵塞现象且与设备绝缘,一次水采用低电导率循环水作为传热介质与冷却对象直接接触,带走设备的热功耗,并通过板式换热器将热量传递给二次水。二次水回路为敞开式回路,二次水经冷却塔将热量散发于外界大气中。冷冻水回路也为封闭式回路,当冷却塔散热量不足时,可以通过冷冻机产生的冷冻水带走部分热量。

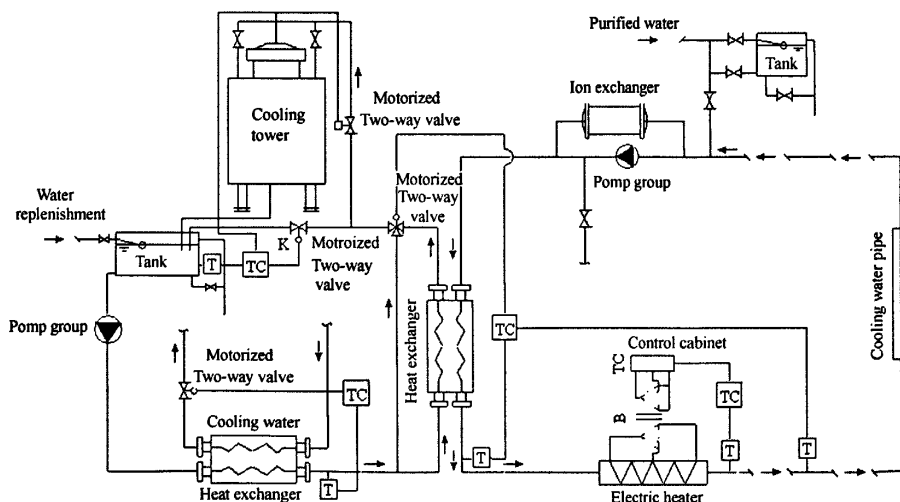


图 1 工艺冷却水流程图
Fig.1 Schematics of the cooling water system.

一次水系统中宜加入电加热是出于如下原因：
(1)工艺冷却水系统重新开机时，使加速器尽快进入设定温度恒温运行；(2)由于风机和冷冻机的投入或退出，二次水温会波动，加速器设备负载变化也会引起一次水的出水温度波动。我们的一次水系统设计有电加热，用以弥补外部因素对水温精度的影响。

2 加热器的设计

2.1 管道式电加热

工艺冷却水系统的加热方式通常有三种：(1)设一个水箱通过绝缘电阻丝加热水。(2)由锅炉热水通过板式换热器给一次水加热。(3)管道式加热器，加热不锈钢管道外壁，使其将热量传到管道内的水。我们选用管道式电加热，其优点为：(1)装置简单，直接加热不锈钢管道；(2)耐高水压，加热管的材质和耐压程度与主管道相同；(3)可靠性高，加热器采用低电压大电流加热管壁，发热体面积大、升温均匀、使用寿命长；(4)便于控制，热式加热法，温度相应快，便于自动控制；(5)投资少，只需变压器、控制柜和加热管；(6)设计灵活，根据加热量大小，可设计成三相电加热和单相电加热。

2.2 电加热发热量计算

工艺冷却水系统电加热发热量的设计，得考虑环境原因引起的进水温降补偿，还要求电加热能满足三通阀关闭时泄流量所产生的一次水温降。电加热功率应略大于上述两项之和，且能再提供系统

~0.5℃的温升。
(1)以储存环磁铁(30±0.2)℃为例，由文献[1]知圆管壁单位面积热量损失(W·m⁻²)为：

$$Q = (T_0 - T_a) / [(D_1 / 2\lambda) \ln(D_1 / D_0) + 1 / \alpha_s] \tag{1}$$

式中，T₀为介质温度(取水温为 30℃)；T_a为环境温度(冬季室温取 5℃)；D₁为管道外径(273 mm)；D₀为保温层外径(保温层厚 50 mm，外径 373 mm)；λ为保温导热系数(W·m⁻¹·K⁻¹)。α_s为表面放热系数(W·m⁻²·K⁻¹)。

我们使用的保温材料为美国欧文斯克宁公司的玻璃棉，该公司提供的公式：

$$\lambda = 0.03 + 0.3002 \times (T_a + T_0) / 2 + 1.25 \times 10^{-7} \times (T_a + T_0)^2 / 4$$

代入温度值得 λ=0.030264 W·m⁻¹·K⁻¹。
该公司提供的经验公式：α_s=1.163×(10+6V^{0.5})，设风速 V=0.5 m/s，则 α_s=16.56419 W·m⁻²·K⁻¹。

经计算，单位面积热量损失为 12.7236 W/m²。管道最不利管长~500 m，管段总温降为 0.0255℃。

(2)以储存环磁铁(30±0.2)℃为例，三通阀的泄流量~5%，一次水总流量为 251.89 t/h，二次水总流量为 254.3 t/h。二次水进入板式换热器的额定温度为 26℃，设出水水温 30℃(同一次水设定温度)，由能量守恒可得三通阀泄流造成一次水 0.2℃的温降。

假设系统升温 0.47℃，则电加热需要产生 0.7℃温升，换算成功率 为 205 kW/h。我们设计使用三个额定功率为 70 kW 的电加热。

各系统电加热计算见表 1 所示。

表 1 电加热计算表
Table 1 Specifications of the heating apparatus.

系统 Systems		流量 Flow rate /t·h ⁻¹	设计 温升 ΔT/℃	功率 需求 Power need	变压器 Transformer 功率 Power/kW 数目 Sets		加热管 Heating pipes 根数 Pcs. 外径 OD /mm 壁厚 Wall /mm 流速 Flow rate /m·s ⁻¹ 截面积 Cross section /mm ² 电阻 Resist /mΩ					
直线 加速器 Linac	(35±0.5)℃	16.18	0.5	20	25	1	3	38	3.0	1.86	329.70	8.74
	(45±0.5)℃	5.25	0.5	15	25	1	3	26	3.0	1.63	211.95	13.59
	(45±0.1)℃	15.33	1.5	70	90	1	3	45	3.0	1.19	395.64	7.28
增强器 Booster	磁铁 Magnet	26.62	1	35	45	1	3	57	3.5	1.26	587.97	4.90
	磁铁电源 Magnet power supply	12	1	20	25	1	3	38	3.0	1.38	329.70	8.74
	高频腔 RF cavity	51.15	1	50	65	1	3	76	3.5	1.27	796.78	3.61
储存环 Storage Ring	磁铁 Magnet	251.89	0.7	70	90	3	9	89	4.0	1.51	1067.60	2.70
	磁铁电源 Magnet Power supply	65.4	1	70	90	1	3	76	3.5	1.62	796.78	3.61
	真空盒 Vacuum chamber	58.44	1	35	45	1	3	76	3.5	1.45	796.78	3.61
	高频机 RF	137.88	1	70	90	2	6	76	3.5	1.71	796.78	3.61
实验线站	Beamlines	120	1	35	45	2	6	76	3.5	1.49	796.78	3.61

以储存环磁铁(30±0.2)℃为例,系统流量为251.89 t/h,一次水需要加热器产生 210 kW 的热量。由于所需能量过大,故采用三台三相电加热并联使用,每台电加热流量为 83.96 t/h,额定功率为 70 kW。每相电加热管电阻 $R=\rho L/S$ (ρ 为电阻率, L 为电阻的长度, S 为电阻的横截面积),取管道内水流速为 1.0~1.5 m/s,加热器管道外径 89 mm,壁厚 4 mm。设加热管有效长度为 4 m,得中心线横截面积 1067.6 mm²。不锈钢的电阻率为 0.72×10^{-6} ,可得 4 m 的不锈钢管电阻为 $2.70\times10^{-3}\ \Omega$ 。根据公式

$W=\sqrt{3}\ U^2/R$ (W 为功率, U 为电压, R 为电阻)计算出两端电压选 8 V。

变压器的选择以储存环磁铁(30±0.2)℃为例,该系统需要三台额定功率为 70 kW 的加热器。设定变压器损耗为 5%,而负载工作点为 85%,选择变压器额定功率为 90 kW,变压器的次级额定电压按表 2 选定为 8 V。由表 2 看出,每个设备实测得出的电流略小于变压器的额定电流,完全符合我们的设计标准。

表 2 变压器计算表(变压器二次侧接成 D 型)
Table 2 Specifications of the transformer(D-type output).

系统 Systems		功率/kW Power	次级电压/V Voltage	次级电流/A Current	负载容量/kW Dynamics	设计电阻/mΩ Resistance	实测负载电流/A Measured current
直线 加速器 Linac	(35±0.5)℃	25	8	1804	20	7.28	1200
	(45±0.5)℃	25	8	1804	15	11.32	1000
	(45±0.1)℃	90	10	5196	70	6.07	3000
增强器 Booster	磁铁 Magnet	45	8	3248	35	4.08	2000
	磁铁电源 Magnet power supply	25	8	1804	20	7.28	1200
	高频腔 RF Cavity	65	8	4691	50	3.01	3000
储存环 Storage Ring	磁铁 Magnet	90	10	5196	70	2.25	2600
	磁铁电源 Magnet power supply	90	10	5196	70	3.01	3000
	真空盒 Vacuum chamber	90	10	5196	70	3.01	2000
	高频机 RF	45	8	3248	35	3.01	3000
	实验线站 Beamlines	90	10	5196	70	3.01	2000

2.3 电加热变压器和负载的接线方式

弯管制造过程会使加热管的阻值发生微小变化,而交流电的感抗很难确定。为此,不同系统均以实测电阻确定变压器和负载的接线方式。三相电加热器变压器和负载的接线方法主要有 D/D、D/Y、Y/Y、Y/D 四种,可根据实际情况选择不同的连接方式。

(1)当电加热管的阻值小于设计值,根据负载需要发热量 $Q=I^2R$ (负载所需的发热量是个额定值),为不改变发热量,可采取降低电压改变输出电流,把变压器二次侧接成 D,使其负载输出电压 $U_X=n(U_X$ 变压器两次侧线电压, n 为电压输出值),以满足负载所需的发热量。

(2)当电加热管的阻值大于设计值,为了不改变发热量,须把变压器二次侧接成 Y,负载输入电压 $U_X=\sqrt{3}\ n$,来满足负载所需的发热量。

(3)电加热管阻值小于设计值的 30%,变压器接成 D 不变,负载由 Y 改为 D 接线,来满足负载所需的发热量。

(4)电加热管阻值大于设计值的 30%,负载接成 Y 不变,变压器由 D 改为 Y 接线,来满足负载所需

的发热量。

SSRF 工艺冷却水系统电加热变压器接成 D,负载接成 Y。

由此说明,根据阻值大小,遵照低电压大电流原则,通过改变变压器的接线方式(改变了输出电压来改变输出电流)及负载侧的接线方式,能更好实现设备所需的发热量,但须满足输出电流不能超过变压器的额定电流,通过改变二者间的接线方式,达到我们的需求,体现了接线的灵活性。

同理,变压器输出电压不变,通过改变负载阻值来达到同一要求发热量。

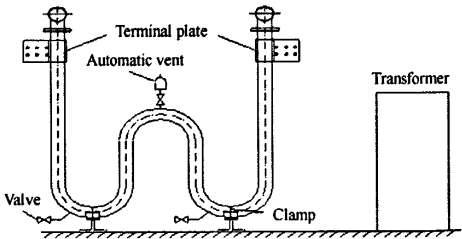


图 2 电加热器外型图
Fig.2 Design of the heating apparatus.

图 2 为最终选定的加热器外形图，加热管由三条支管组成，分别接入三相电流，加热管的两端由铜牌连接电缆。为节省空间，各个支管均做成 W 型，弯管顶部和底部分别安装放气阀和放空阀。

2.4 加热器的控制流程

二次水系统通过控制风机的启停和旁通阀调节进入冷却塔的水流量确保二次水的水箱水温在设定范围之内。当冷却塔散热量不足时，可通过冷冻机产生的冷冻水带走部分热量将二次水温控制在设定范围之内。然后三通阀调节通过板式换热器的二次水流量使一次水温控制在设定值或略低于设定值的范围内。当板式换热器出口一次水温略低于设定值时便可通过控制电加热的加热量使电加热的出水水

温恒定在允许范围之内直至进入设备^[2]。

2.5 运行数据分析

以储存环磁铁(30±0.2)℃工艺冷却水系统作为被控对象，当末端设备产生的温升发生变化时，由于三通阀调节具有一定滞后性，我们经常通过调节电加热的投入和退出将出水温度控制在设定范围之中。温度控制曲线如图 3 所示，图 3 中上线为设备回水温度，下线为电加热后出水温度。

调试结果表明，采用电加热辅助调温可减小由于末端设备发热量变化或二次水水温变化对一次冷却水系统控制温度的影响。从而进一步确保被控温度的恒定。

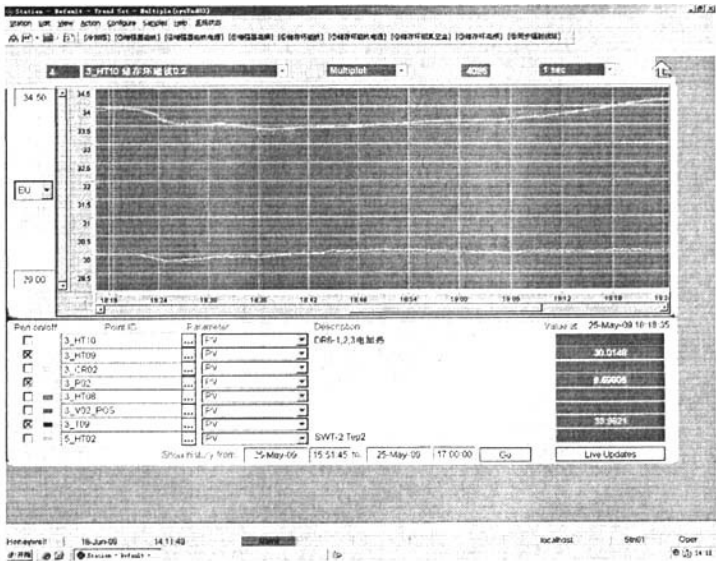


图 3 储存环磁铁系统出水温度趋势图
Fig.3 Cooling water temperatures for the storage ring magnets.

3 结论

由于电加热具有快速控温特点，在调试中我们尝试当系统设备正常运行且负载稳定时将电加热退出，仅由电动三通阀调节通过板式换热器的二次水量来恒定控制一次水的水温。在达到设计参数的前提下节约了大量的电能，达到节约运行成本的目的。上海光源工艺冷却水系统已配合加速器调试运行两年多，通过不断完善整个系统的设计参数，优化系统的运行状态，已达到设计指标。

参考文献

1 杨世铭，陶文铨，编著. 传热学. 北京：高等教育出版社，1998
YANG Shiming, TAO Wenshuan, Heat transfer, Beijing: Higher Education Press, 1998
2 寿炜炜，张伟程，编. 暖通空调，2008，38(6): 71-75
SHOU Weiwei, ZHANG Weicheng. Heat Vent Air Cond, 2008, 38(6): 71-75

Heating apparatus of cooling water system at SSRF

ZHANG Qin ZHANG Yao LI Wenjing YUAN Pingjun
FANG Guoping ZHAO Rongfang LU Jiao

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In this paper we report the design of an electric heating apparatus for the cooling water system at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). Our choice for the pipe-heating technique is reasoned, too. Specifications of the heating apparatus and conditions for different connection types of the transformers are given. The heating apparatus has working perfectly for the SSRF cooling water system.

Key words Heating apparatus, Cooling water, Temperature control, SSRF

CLC TM92