

基于 EAST 装置上液态调配器系统的研究

王磊, 赵燕平

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 液态调配器是用于离子回旋共振加热系统以代替传统活塞式调配器的一种新型阻抗匹配装置。通过对液态调配器工作原理的研究, 设计了液态调配器的油路系统, 采用计算机和可编程控制器对系统进行控制。同时, 对液态调配器各支节匹配高度的计算方法进行了研究, 提出了计算公式, 并利用实验中测得的数据对计算公式进行了验证。经过两轮 EAST 实验使用证实, 该系统完全满足设计要求。

关键词: 液态调配器; 可编程控制器; 阻抗匹配

中图分类号: TM924.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)08-0760-05

Research on Liquid Stub Tuner System of EAST

WANG Lei, ZHAO Yan-ping

(*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: The liquid stub tuner is a new-style impedance matching system used on the ion cyclotron resonance heating system in order to supersede the conventional piston stub tuner. Based on the research of the working theory of the liquid stub tuner, the oil loop system of the liquid stub tuner was designed, and computer and programmable logic controller were adopted to control the system. The method of calculating the height of each branch of the liquid stub tuner was studied, and calculating formulas were put forward and confirmed by the data of the experiment. The system has been employed for the EAST experiment for two times and is proved that it meets the requirement of the design.

Key words: liquid stub tuner; programmable logic controller; impedance matching

离子回旋共振加热是 EAST 超导托卡马克核聚变实验装置上加热等离子体的重要手段。在加热过程中, 阻抗匹配是必须考虑的重要问题。阻抗匹配是使微波电路或系统无反射、载行波或尽量接近行波状态的技术措施。负载阻抗匹配的方法是在天线负载与传输线之间接入 1 台阻抗匹配装置, 即调配器, 使其输入

阻抗等于传输线的特性阻抗。传统的活塞式调配器采用机械结构, 无法在高功率、高频率下进行操作。新型的液态调配器是在同轴线的内外导体之间充入一些具有低介电常数的液体(硅油), 充分利用电磁波在空气和硅油这两种不同媒质中传播速度的不同, 以改变支节的特性阻抗, 使得传输线与天线的阻抗达到匹配^[1]。这

收稿日期: 2007-04-10; 修回日期: 2007-06-19

作者简介: 王磊(1978—), 男, 安徽合肥人, 工程师, 微波加热实验与工程专业

种调配方式和效果比传统的活塞式调配器更加快速、高效、精确、便捷、安全。

本工作分析研究液态调配器的油路组成及控制系统。液态调配器由3个在结构和控制方面完全相同的支节并联组成,因此,仅就1个支节的控制系统进行研究,并在此基础上进行扩展,可构成3支节液态调配器的控制系统。最后,分析3支节液态调配器各支节在阻抗匹配时的液面高度计算,并给出具体计算公式。

1 油路系统的构成

单支油路系统由油箱、支节、油泵、过滤器、电动球阀、手动阀、差压变送器等组成,油路系统示意图示于图1。

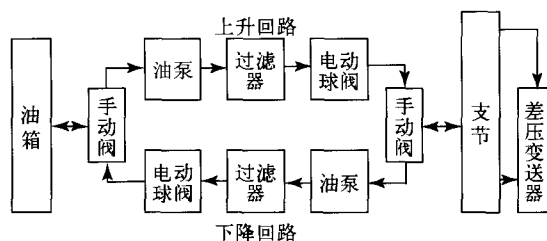


图1 油路系统示意图

Fig. 1 Scheme of oil loop system

电动球阀由意大利 OMAL 公司生产的 116 型气动黄铜法兰球阀和 AM 调节型电动执行器配合组成。电动执行器的输入控制信号为 4~20 mA 的电流信号,当电流不大于 4 mA 时,电动执行器停止运转,球阀的阀门完全关闭;当电流为 20 mA 时,阀门完全打开。电动球阀内置阀位变送器,可反馈送出 4~20 mA 电流信号,表征当前的阀门开度大小。

油泵选用荷兰格兰富公司生产的 CRI-3 型离心泵,其 LiqTec 技术能自动监测泵中的液体存在与否,可消除由于干转引起的故障危险。

2 控制系统的设计

2.1 控制系统

液态调配器控制系统是将油泵、电动球阀、差压变送器等作为控制对象,通过由上位机监控系统、可编程控制器(PLC)控制系统、差压变送器及其信号处理电路等所组成的控制装置对油路系统进行控制,从而达到控制液面高度上

升与下降的目的,实现支节特性阻抗的改变。

运行时,由上位机监控系统向 PLC 控制系统发出上升、下降、停止、上升回路球阀控制信号和下降回路球阀控制信号等指令,通过控制油泵的运行和停止以及电动球阀开度的大小来改变液面高度和液面运动速度。上位机同时采集差压变送器的输出信号、上限位、下限位、上升回路球阀输出信号和下降回路球阀输出信号。考虑到如采用普通的电磁式中间继电器,其线包吸合时会产生很强的电磁干扰,干扰控制系统的其他电路,因此,油泵的开关控制采用三相交流固体继电器。

2.2 PLC 控制系统^[2]

液态调配器安装在 HT-7 超导托卡马克装置实验大厅,控制系统的运行环境较为恶劣,易导入干扰。在确定控制系统方案时,必须兼顾系统的抗干扰能力和易用性。PLC 专为在工业环境下应用而设计,具有很强的抗电磁干扰能力,可靠性高;同时又易于扩展功能,为将来的进一步完善控制系统预留下空间。通过对单支油路控制系统控制量的研究,根据系统控制的要求,对各种 PLC 的性能参数进行比较,选定了 LS 公司生产的 MASTER-K120S 系列的 K7M-DR30U 型 PLC。将输入信号和输出控制量连接至 PLC 上,系统控制示意图示于图 2。

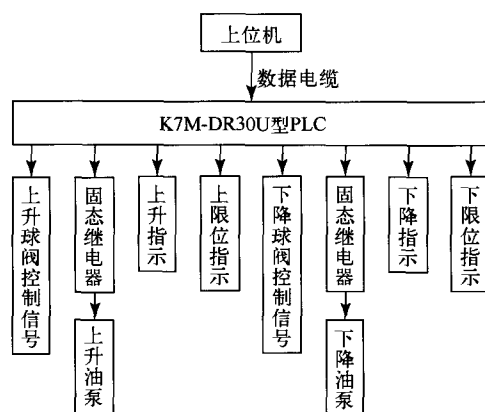


图2 PLC 系统控制示意图

Fig. 2 Scheme of control system based on PLC

根据控制系统运行过程,综合考虑各种情况下需要的指令,绘制出 PLC 逻辑控制流程图(图 3)。利用 LS 公司提供的 KLG_WIN 编程软件,根据框图编写 PLC 梯形图。

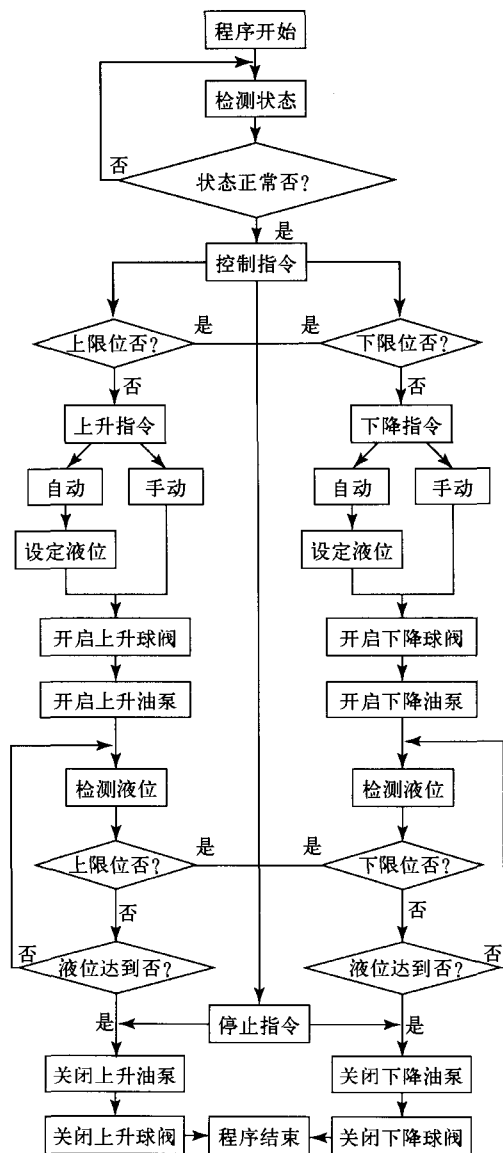


图3 PLC逻辑控制流程图

Fig. 3 Flow chart of PLC

程序开始运行后,首先对系统各部分状态是否正常进行检测。系统正常后,下达控制指令,对支节液位高度进行判断,如果处于上限位,则控制系统将禁止执行上升指令而只能执行下降指令或停止指令;若处于下限位,则禁止执行下降指令,只能执行上升指令或停止指令。判断完成后,对系统下达所需指令,现以上升指令为例(下降指令同理)。下达上升指令时,可选择自动和手动方式,选择自动后,需要在上位机监控界面输入所需达到的高度;手动则由操作者随时控制液位高度。指令下达后,控制系统开启上升球阀,采集球阀的输出信号,等确认

球阀打开后,开启上升油泵。在液位上升过程中,系统会随时将采集到的高度信号与上限位高度和预设高度进行比较,当液位高度与其中1个相同时,控制系统关闭上升泵和上升球阀,液位停止运动,程序结束。

2.3 差压变送器及其信号处理电路

差压变送器是一种通过测量上、下液位的压力差来得到液位高度的仪器。根据液态调配器的实际情况,选用美国 HONEYWELL 公司生产的 STD 924 型差压变送器,其表征液位高度的输出信号为 4~20 mA 电流。信号处理电路包括差分电路,上、下限位比较电路和驱动电路 3 部分。由于支节高度为 5.38 m,为使显示高度的数值能直观表示实际高度,将表征液位高度的电流信号首先经差分电路转化为 0~6 V 电压信号,液位高度 $h(0\sim 6\text{ m})$ 与电压信号 $U(0\sim 6\text{ V})$ 之间便为一一对应关系。转化后的高度信号再送至上、下限位比较电路和驱动电路,当液位达到上限位或下限位时,电路直接向 PLC 发出停止指令;同时,高度信号和上、下限位信号送至上位机监控系统,对其进行采集、分析、处理和显示。

2.4 上位机监控系统设计

上位机监控系统由计算机、数据采集卡、模拟输出卡和驱动电路组成。数据采集卡选用美国 National Instruments 公司生产的 PCI 6014 数据采集卡。液态调配器现场采集到的各种数据由数据电缆传送到采集卡,供上位机分析处理。采集球阀的输出信号是为了观察电动球阀开启的大小,同时防止油泵在球阀未开启的情况下空转。

模拟输出卡选用凌华公司生产的 ADLINK PCI 6208V。模拟输出卡的各路输出信号没有很强的带载能力,无法直接驱动控制系统中的相应单元,故需通过驱动电路后才能通过数据电缆与系统的各控制单元相连接。上位机控制部分示意图如图 4 所示。

2.5 上位机监控程序

液态调配器和控制室分别处在两个实验大厅,为操作方便,在液态调配器处设计了简单的人机界面控制系统运行。对每个支节采用上升按钮、下降按钮、停止按钮、上升指示灯、下降指示灯、上限位指示灯、下限位指示灯、球阀控制

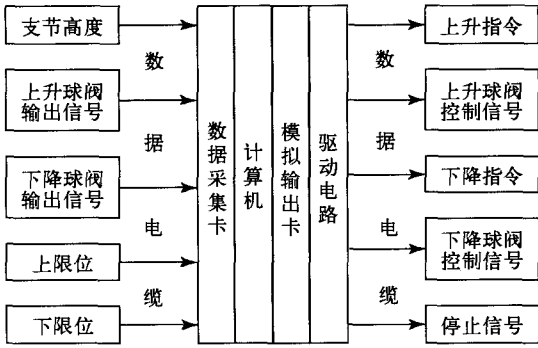


图4 上位机控制系统示意图

Fig. 4 Scheme of control system based on PC

电位器和显示高度的电压表。

控制室的上位机监控程序采用图形化编程语言 LabVIEW 编写,可在监控界面上直观显示系统各部分的工作状态和各种指示;系统的整个控制过程也可在人机界面直接进行可视操作,对系统各个参数进行设置、修改及保存。软件上采取了一些避免操作人员误操作的措施,如对各种参数设定范围,对指令按钮增加联锁保护等。

3 液态调配器支节匹配高度的计算^[3]

进行阻抗匹配时,需事先对调配器各支节的匹配高度进行理论计算。图 5 为 EAST 装置上使用的 3 支节液态调配器的阻抗计算示意图。其中,天线负载与 a 点之间的距离为 d_3 , ab 之间的距离为 d_2 , bc 之间的距离为 d_1 ,支节 1 中的液面高度为 l_1 ,支节 2 中的液面高度为 l_2 ,支节 3 中的液面高度为 l_3 。

天线负载的归一化导纳 Y_L 为:

$$Y_L = d_A + jd_B = \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{R_m + jX_m} \quad (1)$$

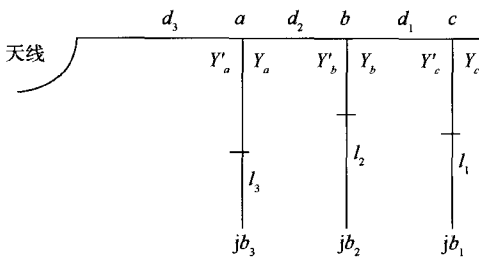


图5 液态调配器阻抗计算示意图

Fig. 5 Scheme of impedance calculation of liquid stub tuner

式中: d_A, d_B 为常数; $R_m = Z_R/50, X_m = Z_X/50$ (Z_R 为天线阻抗的实部, Z_X 为天线阻抗的虚部,均由测量探针电压获得)。

从而得到 $d_A = R_m / (R_m^2 + X_m^2), d_B = -X_m / (R_m^2 + X_m^2)$ 。令 $m_1 = \text{tg}(\beta d_1), m_2 = \text{tg}(\beta d_2), m_3 = \text{tg}(\beta d_3)$ ($\beta = 2\pi f/c, f$ 为波的频率, c 为光速),则从 a 点向天线看去的归一化输入导纳 Y'_a 为:

$$Y'_a = Y_R + jY_X = \frac{Y_L + jm_3}{1 + jY_L m_3} =$$

$$\frac{[d_A + j(m_3 + d_B)](1 - d_B m_3 - jd_A m_3)}{(1 - d_B m_3)^2 + (d_A m_3)^2} \quad (2)$$

式中: Y_R 为 Y'_a 的实部; Y_X 为 Y'_a 的虚部。

$$\text{解得 } Y_R = \frac{d_A(1 + m_3^2)}{(1 - d_B m_3)^2 + (d_A m_3)^2}, Y_X =$$

$$\frac{d_B(1 - m_3^2) + m_3(1 - d_A^2 - d_B^2)}{(1 - d_B m_3)^2 + (d_A m_3)^2},$$

经过第 3 支节匹配后, a 点的归一化输入导纳 Y_a 为:

$$Y_a = Y'_a + jb_3 = Y_R + j(Y_X + b_3) \quad (3)$$

经过传输段 d_2 后, b 点的归一化输入导纳 Y'_b 为:

$$Y'_b = \frac{Y_a + jm_2}{1 + jY_a m_2} = \frac{Y_R + j(Y_X + b_3 + m_2)}{1 - (Y_X + b_3)m_2 + jY_R m_2} \quad (4)$$

经过第 2 节匹配后, b 点的归一化输入导纳 Y_b 为:

$$Y_b = Y'_b + jb_2 \quad (5)$$

由支节调配器匹配的原理可知,当系统达到匹配时,从 c 点向天线负载看去,有: $Y_c = 1$, c 点反向经过 jb_1 的归一化输入导纳 Y'_c 为:

$$Y'_c = Y_c - jb_1 = 1 - jb_1 \quad (6)$$

b 点反向经过传输段 d_1 的归一化输入导纳 Y_b 为:

$$Y_b = \frac{Y'_c - jm_1}{1 - jY'_c m_1} = \frac{1 - j(b_1 + m_1)}{1 - b_1 m_1 - jm_1} \quad (7)$$

由式(5)与式(7)得:

$$Y_b = \frac{1 - j(b_1 + m_1)}{1 - b_1 m_1 - jm_1} = \frac{Y_R + j(Y_X + b_3 + m_2)}{1 - (Y_X + b_3)m_2 + jY_R m_2} + jb_2 \quad (8)$$

式(8)即为 3 支节液态调配器各支节匹配高度计算的公式。在进行阻抗匹配时,可选择任意 1 根支节进行液面高度的调节。假设首先改变第 2 根支节的液面高度,令 $\beta = 2\pi f/c, \beta_1 =$

$2\pi f\sqrt{\epsilon}/c$, 则支节 b 点处的输入导纳为:

$$j b_2 = -j \frac{Z_0 - Z_{01} \operatorname{tg}(\beta_1 l_2) \operatorname{tg}(\beta(h_2 - l_2))}{Z_{01} \operatorname{tg}(\beta_1 l_2) + Z_0 \operatorname{tg}(\beta(h_2 - l_2))} \quad (9)$$

式中: Z_0 为同轴线的特性阻抗; Z_{01} 为液体段同轴线的特性阻抗, $Z_0/Z_{01} = \lambda_0/\lambda_{01} = \sqrt{\epsilon}$; ϵ 为硅油的介电常数; h_2 为第 2 支节的总高度。

从而得到:

$$b_2 = \frac{\operatorname{tg}(\beta_1 l_2) \operatorname{tg}(\beta(h_2 - l_2)) - \sqrt{\epsilon}}{\operatorname{tg}(\beta_1 l_2) + \sqrt{\epsilon} \operatorname{tg}(\beta(h_2 - l_2))} \quad (10)$$

将 b_2 代入式(8), 可解得 b_1 和 b_3 的 1 组有效解。求得 b_1 和 b_3 后, 即可求得第 1 支节和第 3 支节的硅油高度。

4 实验结果

在超导托卡马克物理实验中, 对上述液态调配器的支节匹配高度的计算方法进行验证。

根据实验装置的实际情况, 只选用了液态调配器的 1 号和 2 号支节进行天线阻抗匹配, 将 3 号支节从传输线回路中隔离开, 计算时的推导方法和公式无变化。实际测量时, 支节的匹配高度通过网络分析仪在满足传输线驻波比为 1 时测定; 天线的阻抗参数通过传输线上的测量探针测定。

空载时, $f=29.9$ MHz, 测得支节高度 $l_1=1.44$ m, $l_2=0.68$ m, 天线阻抗 $Z_R=0.47 \Omega$, $Z_X=14.45 \Omega$ 。负载时, $f=30$ MHz, 测得支节高度 $l_1=1.90$ m, $l_2=1.96$ m, 天线阻抗 $Z_R=2.7 \Omega$, $Z_X=13.8 \Omega$ 。

利用推导的公式计算所得的各支节导纳值列于表 1。从表 1 可看出, 由天线负载计算出的支节导纳值与由实测的支节液面高度所计算出的导纳值基本相符。

表 1 计算所得的支节导纳值

Table 1 Admittance of branches for liquid stub tuner

计算方式	空载		负载	
	b_1	b_2	b_1	b_2
由天线负载阻抗推导出导纳值	-1.075 618 544	-1.738 707 994	-0.325 133 933	-0.160 013 422
由实测的 l_1, l_2 推导出导纳值	-0.803 402 556	-1.711 233 847	-0.299 275 239	-0.253 334 487

5 结论和讨论

液态调配器是高功率、高频率下的阻抗调配装置的发展方向。本工作所研究的液态调配器及其控制系统已在 EAST 超导托卡马克核聚变实验装置的离子回旋加热系统上投入使用。经过两轮实验的运行, 该系统匹配准确、工作稳定, 完全满足实验要求。

参考文献:

[1] KUMAZAWA R, MUTOH T, SEKI T, et al. Liquid stub tuner for ion cyclotron heating[J].

Rev Sci Instrum, 1999, 70(6): 2 666-2 672.

[2] 关中俊, 黄永红. 可编程控制器原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[3] 潘亚平, 赵燕平, 秦成明. 关于液态调配器的阻抗匹配算法的研究[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(4): 93-95.

PAN Yaping, ZHAO Yanping, QIN Chengming. The research for impedance matching algorithm of liquid stub tuner[J]. Computer Applications and Software, 2005, 22(4): 93-95 (in Chinese).