

# 基于 Qt4 的 LHCD 相位控制软件的设计

尚家宇,杨 永,单家方,吴则革,朱 梁  
(中国科学院等离子体物理研究所,安徽 合肥 230000)

**摘 要:**低杂波相位控制软件是实现低杂波相位自动控制的重要组成部分,它可以完成对低杂波相位检测电路的输出数据进行读取和处理,并通过相位反馈来驱动移相器以达到调节低杂波天线上主波导之间的相位差和控制波谱分布的目的。基于 Qt 的 LHCD 相位控制软件使用 C++ 应用程序框架 Qt 作为开发工具,利用信号与槽机制,多线程机制,Qt 定时器以及 Qt 绘图工具等软件技术进行编写。相位控制软件在模拟实验中已经实现了其主要功能,期望在实际应用中得到进一步验证。

**关键词:**Qt;数据处理;反馈计算;驱动移相器

中图分类号:TP399

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)02-0160-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.02.037

## Design of Phase Control Software for LHCD System Based on Qt4

SHANG Jia-yu, YANG Yong, SHAN Jia-fang, WU Ze-ge, ZHU Liang  
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230000, China)

**Abstract:** The software of Lower Hybrid Current Drive (LHCD) phase control is an important part of realizing the LHCD phase control, which is applied to raw data acquisition and processing from the hardware circuit of LHCD system, and it can drive the phase shifter by phase feedback calculation to reach the purpose of changing the phase difference between the adjacent main-waveguides of the antenna and controlling the spectrum distribution. This software uses C++ application framework Qt as the development tool and a lot of software technology such as signals and slots mechanism, multithreading, QTimer and Qt drawing tool is applied to it. The software can be satisfied for the most of requirements of the LHCD system, and will be tested in the physics experiments.

**Key words:** Qt; data processing; feedback calculation; phase shifter driving

## 0 引言

低杂波电流驱动(LHCD)是核聚变实验装置托卡马克上一种重要的非感应电流驱动手段。在 EAST 装置上,2.45 GHz/2 MW 的低杂波电流驱动系统已经于 2008 年建成并多次投入物理实验运行,之后又升级成为 2.45 GHz/4 MW 的 LHCD 系统,目前的 4.6 GHz/6 MW LHCD 系统是一个全新的系统,其核心器件是 24 只美国 CPI 公司研制的 4.6 GHz/250 kW 连续波运行的 VKC-7849A 型速调管放大器,脉冲长度为 1 000 s<sup>[1-2]</sup>。在 LHCD 系统中,相位测控部分通过调节低杂波天线上主波导之间的相位差来改变波的辐射功率谱和波在等离子体中的沉积位置,从而改变等离子体电流的分布以改善约束,获得高性能的等离子体。

低杂波相位控制系统的软件设计需要与低杂波相位控制的硬件电路配套,从而实现对硬件电路的正确

操作,确保低杂波相位控制系统的正常工作。EAST 2.45 GHz 相位测控系统软件运行在 QNX 实时操作系统上,软件的设计工具主要是 QNX 系统自带的应用程序集成开发环境(IDE)和图形用户界面(GUI)开发工具 PhAB。Qt 是一个跨平台的 C++ 图形用户界面工具包,使开发者能以漂亮的界面,快速而有效地开发软件。笔者在 Windows 平台下,基于 Qt 的低杂波相位控制软件的设计思想,实现了相位控制系统的智能化控制。

## 1 应用背景

低杂波电流驱动通过天线辐射不对称谱的微波能量,使入射的低杂波在环向传播的动量具有单向性并通过朗道阻尼与等离子体中的共振电子发生有效的相互作用,将微波能量传递给电子,从而形成一个由高能

收稿日期:2014-03-19

修回日期:2014-06-25

网络出版时间:2014-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(A050603)

作者简介:尚家宇(1988-),女,硕士研究生,研究方向为软件控制;单家方,研究员,研究方向为受控核聚变低杂波电流驱动系统技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141227.1347.039.html>

电子携带的等离子体电流<sup>[3]</sup>。在具体的物理实验中,往往需要低杂波相位测控系统将天线波导的相位差设定在一个或几个数值平台上,以寻找最佳的耦合和驱动条件<sup>[4]</sup>。

低杂波相位控制系统的硬件核心是用于完成鉴相功能的低功率微波电路和对信号进行采集和传输的通信电路。与之相对应,就需要设计一种控制软件对硬件电路的输出数据进行读取和处理,并完成相位的反馈计算以及驱动移相器的工作。

2 总体设计

2.1 低杂波相位控制系统总体架构

低杂波相位控制系统的整体结构如图 1 所示。天线主波导的微波入射能量通过双定向耦合器耦合提取其功率和相位信息后输入至鉴相仪。鉴相仪的主要工作分为两部分:一部分是利用正交算法将接收到的 4.6 GHz 被测微波信号和参考信号之间的相位差转换为模拟电压信号;另一部分是将已经转换为模拟电压信号的相位差进一步转化为数字信号。现场工控机使用 PXI 数据采集卡采集数字电压信号并进行处理与计算后得出移相器所需要移动的相位值,最后根据移相器驱动电路的结构与特质将移相值转换为特定的数字输出结构驱动移相器,从而达到改变天线相位的目的。

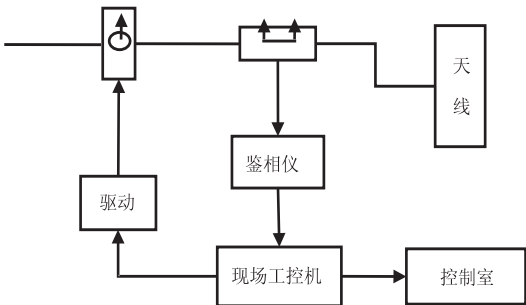


图 1 低杂波相位控制系统框架

2.2 低杂波相位控制软件结构

低杂波相位控制软件的设计与低杂波相位控制硬件系统结构紧密结合,其核心是用于 EAST 托卡马克大型物理实验的反馈调相程序。该程序包括了对 PIX 数据采集卡的控制,使数据采集卡按要求对数据进行采集,将采集到的相位电压信号通过运算转换为 0° ~ 360° 的当前相位差信号,获取实验人员预定天线相位差值并将其与当前实际相位差信号进行比较,计算最终的出移相值并驱动移相器。为了实现系统的可靠性与安全性,相位控制软件的另一重要部分是用于测试鉴相仪、移相器等硬件设备的性能与其是否正常工作

的功能测试程序组,功能测试程序组可为系统调试与正式的物理实验期间出现的问题提供线索和答案。对于托卡马克放电期间计算机所采集并计算得到的波导

天线相位数据必须进行保存,且需要一个相位数据的读取与显示界面以方便科学家进行查看与分析。

低杂波相位控制软件结构图如图 2 所示。

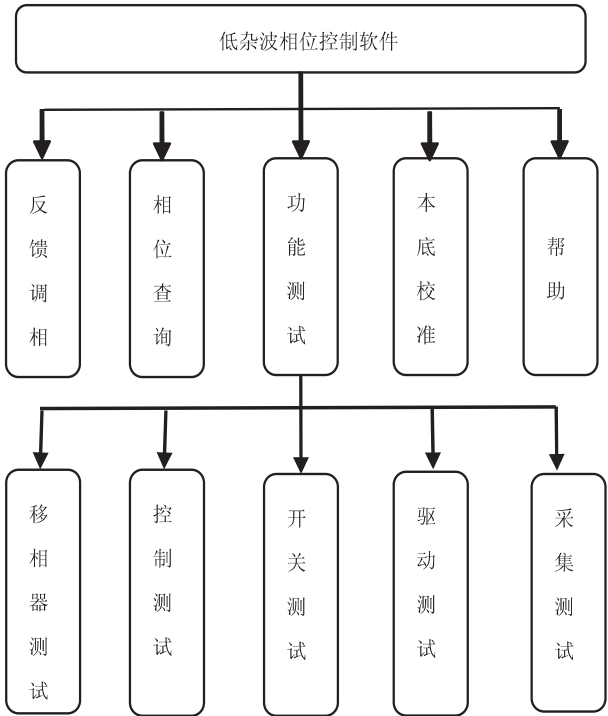


图 2 低杂波相位控制软件结构图

3 软件开发工具及关键技术

3.1 软件开发工具 Qt

4.6 GHz/6 MW 低杂波相位控制软件选择由奇趣科技开发的跨平台 C++ 图形用户界面应用程序开发框架 Qt。它提供给应用程序开发者建立艺术级的图形用户界面所需的所有功能。Qt 完全面向对象,很容易扩张,并且允许真正的组件编程。与 Java 的“一次编译,到处运行”跨平台不同的是,Qt 是源代码级的跨平台,一次编写,随处编译<sup>[5]</sup>。由于 Qt 是基于 C++ 的架构,提高了程序执行的速度,所编写的大部分类有很好的灵活性。其应用程序的执行过程就是对事件的处理过程。

3.2 关键编程技术

(1) 信号与槽机制。

信号和槽机制是 Qt 的核心机制,是一种高级接口,应用于对象之间的通信,它不仅是 Qt 的核心特性,也是 Qt 区别于其他工具包的重要地方。在 Qt 中信号与槽机制是一种可以替代回调的技术。回调指的是一个函数的指针,如果希望一个处理函数通知一些事件,则可以把另一个函数(回调)的指针传递给处理函数。处理函数在适当的时候会调用回调。回调技术有两个主要缺点:首先它们不是类型安全的,程序从来都不能确定处理函数是否使用了正确的参数来调用回调;其

次回调和处理函数是强有力地联系在一起的,因为处理函数必须知道要调用哪个回调,这给程序设计带来了附加的任务与麻烦。Qt 的信号与槽机制完美地解决了回调技术的上述缺点,Qt 中一个信号的签名必须与它的接收槽的签名相匹配,因为签名是一致的,编译器就可以帮助检测类型是否匹配,因此它是类型安全的。而信号与槽之间并不需要知道对方的具体内容,只是当一个特定事件发生的时候,一个信号就会被发射进而去执行与该信号相连接的槽函数。Qt 的窗口部件有很多预定义的信号,但是用户总是可以通过继承来加入自己的信号,槽就是一个可以被调用来处理特定信号的函数。使用信号与槽的基本格式为:

```
connect ( sender, SIGNAL ( signal ), receiver, SLOT ( slot ) )
```

这里的 sender 和 receiver 是指向 QObject 的指针,而 signal 和 slot 是无参数名的函数信号。sender 指针指向的一事件,当其内部特征发生改变即发出信号 signal,与之相连的 slot 函数会被立即调用执行。

#### (2) 多线程。

在一个 Qt 应用程序中,同一时间可能需要完成多个操作或事件处理,如果程序中只有一个主线程,那么在遇到计算密集型操作或者存在大量 I/O 操作的时候,GUI 就会发生冻结现象,并且会无法响应,原因是 GUI 作为主线程,如果采用单一线程的方案,那只能等待事件执行完之后 GUI 才能进行响应。因此,对于多操作多任务应用程序来说,多线程会是一个极佳的选择。在 Qt 应用程序中,多线程的操作通过 QThread 来实现,QThread 的使用非常简单:只需要子类化 QThread,将需要执行的程序编写至它的 run() 函数最后调用即可。

#### (3) 定时器。

Qt 中使用定时器有两种方法:一种是使用 QTimer 类;另一种是使用 QObject 类。定时器的精确度依赖于操作系统和硬件,大多数平台支持 20 ms 的精确度。下面只对在低杂波相位控制软件中使用到的 QTimer 类进行介绍。

定时器类 QTimer 提供当定时器触发的时候发射一个信号的定时器,QTimer 提供只触发一次的超时事件。通常的使用方法如下:

创建定时器:

```
QTimer * timer = new QTimer( this )
```

将定时器超时信号与槽(功能函数)连接起来:

```
connect ( timer, SIGNAL ( timeout ( ) ), this, SLOT ( update ( ) ) )
```

开始运行定时器,定时时间间隔为 1 000 ms:

```
timer->start(1 000)
```

timer 定时器被作为这个窗口部件的子类,这样当这个窗口部件被删除时,定时器也会被删除。QTimer 还提供了一个简单的只有一次定时的函数 singleShot。一个定时器在指定时间后触发处理函数并且只触发一次。

#### (4) Qt 绘图。

Qt 的二维图形引擎是基于 QPainter 类的。它既可以绘制几何形状也可以绘制像素映射、图像和文字。在绘图设备(一般式窗口部件)上绘图,只需要创建一个 QPainter,再将指针传递到绘图设备中去。使用 QPainter 的 draw...() 函数,可以绘制各种各样的图形,例如可以绘制数据点和数据曲线的 drawpoint() 函数和 drawline() 函数。绘制的效果取决于对 QPainter 的设置。这些设置一些是从设备中取得的,另外一些被初始化成默认值。有三个主要的绘制是画笔、画刷以及字体。画笔用来划线和边缘;画刷用来填充几何形状的图案;字体用来绘制文字<sup>[6-7]</sup>。

## 4 低杂波相位控制软件的实现

### 4.1 反馈调相

反馈调相作为低杂波相位控制软件的核心,需要根据物理实验要求实现对 24 个移相器的循环采集控制,从而按照实验人员设定的目标相位差值调节 24 路低杂波天线上主波导天线的相位。

#### (1) 低杂波天线相位的获取。

低杂波天线相位的获取是低杂波相位反馈控制的前提和基础,反馈控制是以此相位为基础与实验人员预设相位差比较求得所需移相值,以实现准确的相位反馈控制的<sup>[8-9]</sup>。已知由 PXI 数据采集卡采集至计算机的信号是相位电压信号,那么计算机该如何将这些电压数据转化成为实际的天线相位数据呢?经鉴相仪检测并最终由数据采集卡采集的相位电压数据与实际天线相位数据的关系需要以下的推导过程:

假定由双定向耦合器进入参考混频器的射频信号频率和相位分别为  $\omega_{RF}$  和  $\Phi_{REF}$ ,本振信号的频率和相位分别为  $\omega_{LO}$  和  $\Phi_{LR}$ 。在不考虑幅度的情况下有:

$$\begin{aligned} & \cos(\omega_{RF} * t + \Phi_{REF}) * \cos(\omega_{LO} * t + \Phi_{LR}) = \\ & 1/2 \cos((\omega_{RF} + \omega_{LO})t + \Phi_{REF} + \Phi_{LR}) + \\ & 1/2 \cos((\omega_{RF} - \omega_{LO})t + \Phi_{REF} - \Phi_{LR}) \end{aligned} \quad (1)$$

低通滤波后,混频器的输出为  $1/2 \cos((\omega_{RF} - \omega_{LO})t + \Phi_{REF} - \Phi_{LR})$ ,也就是一个频率和相位分别为  $\omega_{IF} = (\omega_{RF} - \omega_{LO})$  和  $(\Phi_{REF} - \Phi_{LR})$  的信号。

同理,假定进入第  $i$  路信号混频器的射频信号和中频信号的相位分别为  $\Phi_i$  和  $\Phi_{Li}$ ,则混频器输出一个频率和相位分别为  $\omega_{IF}$  和  $(\Phi_i - \Phi_{Li})$  的信号。

由参考混频器和信号混频器输出的两个中频信号

进入鉴频鉴相器,鉴频鉴相器的输入输出可表示为:

$$V_{\text{diff}}=k(\Phi_i-\Phi_{\text{REF}}+\Phi_{\text{LR}}-\Phi_{\text{Li}})$$
 (2)

其中, $k$ 为系数,由实测数据拟合后得到(数据拟合后得到 $k=1/180$ )。

当 $\Phi_i=\Phi_{\text{REF}}$ 时,有:

$$V_{\text{diff}}=k(\Phi_{\text{LR}}-\Phi_{\text{Li}})=V_{\text{Li}}$$
 (3)

因此,可以得到:

$$V_{\text{diff}}=k(\Phi_i-\Phi_{\text{REF}})+V_{\text{Li}}$$
 (4)

这便是鉴频鉴相器的输出电压差(即鉴相仪输出的0~3.3 V的相位电压差)与天线信号相位之间的线性比例关系。

$V_{\text{diff}}$ 与 $V_{\text{Li}}$ 均由数据采集卡的两个采集通道采集到一个浮点数数组 data[ $i$ ]。因此第 $i$ 通道当前低杂波相位的计算公式为:

$$\Phi_i'=180(V_{\text{diff}}-V_{\text{Li}})=180(\text{data}[i][1]-\text{data}[i][2])$$
 (5)

(2)移相值计算。

成功获取当前低杂波相位 $\Phi'$ 后,接下来要进行的是移相值的计算,也就是说需要将 $\Phi'$ 和实验人员预设相位进行比较计算。

设 $\Phi_{\text{diff}}$ 是实验人员设定天线相邻主波导(水平方向)的相位差,此相位差是图3左边的主波导相位减去右边的主波导相位的差值。在垂直方向上,同一列主波导的相位目标值是相同的<sup>[8-9]</sup>。

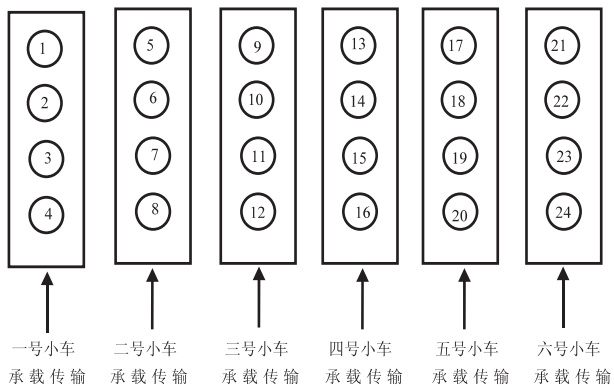


图3 主波导天线传输线排列图

因此,已知预设主波导天线相位差值和波导天线的排列分布,可以得出第 $i$ 通道的目标值计算公式为:

$$\Phi_i=(5*\Phi_{\text{diff}})-(\text{floor}(i/4)*\Phi_{\text{diff}})$$
 (6)

最后得出移相值 $\Phi_{\text{mi}}$ 为:

$$\Phi_{\text{mi}}=\text{fabs}(\Phi_i'-\Phi_i)$$
 (7)

(3)驱动移相器。

在4.6 GHz/6 MW低杂波相位测控系统中,移相器的驱动选择用三块64通道隔离数字量输出板卡 cPCI7434 来完成。表1是 cPCI7434 的通道地址表。

由表1可知,64个数字输出通道每8个通道共用一个基地址,这可以将所有通道分为8组,考虑到移相

器使用的是6位数字移相器,使用享有同一基地址通道的前6个数字通道(0~5)来驱动移相器,移相器精度为:

$$360^{\circ}\div2^6=5.6^{\circ}$$
 (8)

表1 cPCI7434 通道地址表

	7		5		3		2		0
	6		4				1		
Base+0	IDO _7	IDO _6	IDO _5	IDO _4	IDO _3	IDO _2	IDO _1	IDO _0	
Base+1	IDO _15	IDO _14	IDO _13	IDO _12	IDO _11	IDO _10	IDO _9	IDO _8	
Base+2	IDO _23	IDO _22	IDO _21	IDO _20	IDO _19	IDO _18	IDO _17	IDO _16	
Base+3	IDO _31	IDO _30	IDO _29	IDO _28	IDO _27	IDO _26	IDO _25	IDO _24	
Base+4	IDO _39	IDO _38	IDO _37	IDO _36	IDO _35	IDO _34	IDO _33	IDO _32	
Base+5	IDO _47	IDO _46	IDO _45	IDO _44	IDO _43	IDO _42	IDO _41	IDO _40	
Base+6	IDO _55	IDO _54	IDO _53	IDO _52	IDO _51	IDO _50	IDO _49	IDO _48	
Base+7	IDO _63	IDO _62	IDO _61	IDO _60	IDO _59	IDO _58	IDO _57	IDO _56	

所以一张板卡一共可以驱动8个移相器,24个移相器则需要三张板卡。板卡制造商同时提供了一些C语言语句来实现对板卡的控制操作。其中对板卡进行写操作的语句为:

DO\_WritePort ( U16 CardNumber, U16 Port, U32 Value)

其中,CardNumber是板卡在计算机上的注册号;Port有两个值PORT\_DO\_LOW和PORT\_DO\_HIGH,PORT\_DO\_LOW是对前32通道写值,PORT\_DO\_HIGH对后32通道写值。

以波导天线通道10为例,移相器的驱动实现过程为:首先将第10个移相器所需移相值映射为6位二进制数,且需满足就近原则。因板卡制造公司提供的对CPCI7434进行写操作的函数,每次写操作都会对板卡的低32位或高32位,也就是前四个波导天线通道或后四个波导天线通道同时写数据,为避免通道间相互影响,需将32位数据分存于 $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $v_4$ 四个全局变量中。第十个移相器所需移相值数据应写在第二张板卡(注册号为1)的第二组基地址公用通道的前六个通道中,也就是要将该值赋给 $v_2$ ,而 $v_1$ 、 $v_3$ 、 $v_4$ 的值不需要改变。

4.2 功能测试

功能测试由驱动输出测试、数据采集测试、360°控制测试和360°移相器测试四个测试单元构成。其中



驱动输出测试可完成对 24 个主波导天线对应移相器的全部清零、置位、随机置位以及任意移相器的清零、置位,按指定时间间隔递增置位和按指定值置位,从而测试 cPCI7434 板卡是否正确工作;数据采集测试可对 24 个主波导天线中的任一主波导天线,指定采集速率和采集点数进行一次数据采集,将采集到的数据信息文件保存到指定路径,该测试单纯进行数据采集可以检测数据采集卡的工作是否正常;360°移相器完成的功能是从 0°到 360°按照所给步进值直接驱动移相器,该测试没有包括当前相位的采集和反馈调相环节,是专门针对移相器的一个检测程序;360°控制测试与反馈调相的核心步骤完全一致,不同的是,360°控制测试是从 0°到 360°按照所给步进相位差值对天线相位进行控制,当所给步进值为 5.6°(最小步进值)时,程序可以实现对 6 位移相器以及反馈控制算法的最精细的检测。

#### 4.3 相位查询

在反馈调相的过程中,已经将每次采集到的天线相位的数据保存在了指定的文件里。为了方便实验人员和科学家对相位数据进行读取和分析,低杂波相位控制软件有一个专门的相位数据查询程序。如需查询某放电炮号对应的相位数据曲线,在炮号一栏输入所要查询的相位数据所在炮号即可在相位查询界面中显示相应的数据曲线,相位查询界面可一次性显示 24 路主波导天线相位数据,也可以查看其中一路的相位数据并能放大查看。

绘制相位数据曲线的功能在一个控件 Data Curve 中实现<sup>[10-14]</sup>,它提供了一些公有槽函数可以从主应用程序获取需要绘制的数据以及其他相关信息,如数据大小、炮号、采集通道等。

## 5 结束语

软件测试平台由 24 路低杂波相位控制硬件系统组成,对 24 路相位进行反馈控制。低杂波相位控制软件在完成与本系统硬件的调试与测试后还与前级功率控制系统进行了联调测试,联调测试主要分为 2 种方法:相位触发先于功率触发,由此来观察前级功率变化对相位的影响;功率触发先于相位触发,由此来观察相位变化对前级输出功率的影响。这 2 种类型的测试,都能够观察相位控制的正确与否。测试将相位的控制目标设定在 90°和 180°,以第 12 路作为参考信号的输入,前级功率检波电压控制目标为 1 V。结果表明:前级功率变化对相位的稳定性有较大影响;相位变化对前级功率输出的影响很小;相位控制符合预期目的。在 Windows 平台下,完成了基于 Qt 的低杂波相位测控

软件的设计,初步的实验结果达到了预期的要求,可以满足低杂波系统的基本功能要求,为将来在 EAST 托卡马克上开展物理实验奠定了基础。低杂波相位控制作为一个系统工程,其功能和性能只有在实践中不断地改进与提高才能得到更好的完善,就软件部分而言,目前还有需要优化之处,例如可将采集数据进行实时显示,方便实验人员随时了解天线相位改变情况、美化界面等。

#### 参考文献:

- [1] 杨永. EAST 低杂波相位测控系统的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2010.
- [2] Ma Wendong, Hu Huaichuan, Shan Jiafang, et al. High power continuous wave microwave test bench at 4.6 GHz for experimental advanced superconducting tokamak[J]. Review of Scientific Instrument, 2013, 84(1): 013503.
- [3] Wu Zege, Shan Jiafang, Xu Handong. A new real time data acquisition system for low hybrid current drive system[C]//Proceedings of the 2012 international conference on communication, electronics and automation engineering. [s. l.]: [s. n.], 2013: 299-303.
- [4] Yang Yong, Shan Jiafang, Wang Dongxia, et al. The Design of LHCD phase control system based on QNX operating system [C]//Proceedings of the 2009 IEEE international conference on computational intelligence and software engineering. [s. l.]: IEEE, 2009.
- [5] Shan Jiafang, Yang Yong, Liu Fukun, et al. A new 4MW LH-CD system for EAST[C]//Proc of 23rd IAEA fusion energy conference. [s. l.]: [s. n.], 2010.
- [6] 王冬霞. EAST 低杂波分布式监控系统的设计与实现[D]. 合肥:中国科学院合肥物质研究院, 2009.
- [7] Blanchette J, Summerfield M. C++ GUI Qt4 编程[M]. 第 2 版. 北京:电子工业出版社, 2008: 59-63.
- [8] 贾华. EAST 低杂波电流驱动相控多结波导天线研究与设计[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2009.
- [9] 刘强. LHCD 微波反馈控制的相位计算与读出系统研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008.
- [10] 汪思静,程志强,熊 蓓. 基于 Qt 的虚拟示波器的软面板设计[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(7): 222-225.
- [11] 蒋业军,叶 艳,吴 敏. 基于 Qt 的计算机辅助英语系统的考试作答系统的设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(12): 196-197.
- [12] 朱吉佳,蔡家麟. 基于 Qt 的业务监控系统界面设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(3): 236-239.
- [13] 周恕义,徐晓亮. Qt 构建北京市精品课程平台文件上传系统[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(5): 202-205.
- [14] 栾佳雨,王海瑞. 基于 Qt 的捣固车自动引导系统图形界面研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(11): 167-169.

基于Qt4的LHCD相位控制软件的设计

作者:

[尚家宇](#), [杨永](#), [单家方](#), [吴则革](#), [朱梁](#), [SHANG Jia-yu](#), [YANG Yong](#), [SHAN Jia-fang](#), [WU Ze-ge](#), [ZHU Liang](#)

作者单位:

[中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥, 230000](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

[2015 \(2\)](#)

引用本文格式: [尚家宇](#). [杨永](#). [单家方](#). [吴则革](#). [朱梁](#). [SHANG Jia-yu](#). [YANG Yong](#). [SHAN Jia-fang](#). [WU Ze-ge](#). [ZHU](#)

[Liang](#) [基于Qt4的LHCD相位控制软件的设计](#) [期刊论文] - [计算机技术与发展](#) 2015 (2)