

文章编号: 1000-8349(2006)01-0073-08



氢钟智能温度控制及 CAT 控制电压 自动补偿系统设计与分析

鲁华雨

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 针对当前氢钟温度控制系统所存在的不足, 提出了全新的设计思路: 综合三路温度控制在一个系统中, 缩小控制电路的体积, 同时提高温度控制系统的可操作性。考虑到氢钟腔体自动调谐的变容二极管电压存在漂移甚至超出正常控制范围, 这将直接影响氢钟频率稳定性和频率漂移率性能指标。结合温度控制系统, 设计了 Vdio 自动补偿系统。系统硬件设计以 32 位 ARM 处理器为核心, 由于处理器芯片本身是个片上系统, 所以不仅功能较强, 还大大简化了系统的板级设计, 软件设计引入了实时操作系统内核 UCOS-II。系统软硬件相结合, 能很好地实现监控任务。

关键词: 天文观测设备与技术; 氢钟; CAT; 温度控制; ARM; UCOS-II

中图分类号: P127.1⁺2; TH714.1 **文献标识码:** A

1 引 言

氢钟相应部件, 特别是谐振腔的温度环境稳定与否, 将直接影响氢钟的频率准确度和频率稳定度。为此我们设计了一个精密的温度控制系统, 它主要控制真空罩、外层、颈部、隔离器、微波混频器部分。为了克服被控系统较大的热惯性, 及由于热传导所致的腔体温度波动和温度梯度大等因素, 我们将钟罩分为底部、筒部及顶部 3 个单元, 每个单元都有它自己的温度检测电阻 R_t 、温度控制器和加热炉体。而外层、颈部控温系统实际上均是使钟罩部分有一个较小的环境温度波动, 从而提高钟罩的控温精度。

氢钟原有的温度控制器由温度检测电阻 R_t 、温度监测电桥、微伏放大器、功率放大器、加热炉体等模拟电路组成。这种控制电路成形于上世纪 70 年代末, 虽然能满足基本的控温要求, 但也存在一些不足, 如: 控温精度不够高、升温过程慢、温度稳定时间长以及体积大不利于智能监控等。随着科学技术的发展, 利用新的技术方法对原有的控温电路进行改进, 可以达

收稿日期: 2005-06-28; 修回日期: 2005-07-21

到更好的控制效果。

氢钟腔体自动调谐 (Cavity Auto Tuning, CAT) 的变容二极管电压 (Voltage of Diode, V_{dio}) 存在着漂移 (由氢钟谐振腔频率变化引起), 有时甚至超出正常控制范围, 这将会直接影响氢钟频率稳定性和频率漂移率性能指标。为此我们结合温度控制器, 研究和设计了 V_{dio} 自动补偿系统, 以期消除这种影响, 同时力求避免系统本身可能产生的对温度环境的影响。

2 控制器结构设计

氢钟温度系统为一阶带延迟系统。大量的应用实践表明, 采用传统的 PID (比例 - 积分 - 微分) 控制, 可以得到较好的稳态响应特性, 但难以得到满意的动态响应特性。而控制领域里另外一种控制方法 —— 模糊控制, 可以弥补 PID 控制的不足, 它的优点是能够得到较好的动态响应特性, 并且无需知道被控对象的准确数学模型, 适应性强, 鲁棒性好, 在控制器设计中, 可以将 PID 控制和模糊控制相结合。另外, 多模态分段控制算法综合比例、模糊和比例积分控制的长处, 使系统具有较快的响应速度和抗参数变化的鲁棒性, 而且可以对系统实现高精度的 P-Fuzzy-PID 控制^[1]。P-Fuzzy-PID 控制器的结构如图 1 所示, 其实现方法是: 为温度偏差 e 设定 3 个阈值, 根据 e 的大小对系统的控制模态进行切换。 e 较大时采用比例控制和模糊控制, 以加快响应速度; 当 e 进入稳态过程后, 程序切换到 PID 控制模态, 以消除静差, 提高控制精度。由于这 3 种控制方式在系统工作过程中分段切换使用, 不会同时出现而相互影响, 所以三者可以分别进行设计和调试。但是切换阈值的设定是个关键。从比例模态向模糊控制切换的阈值要选择恰当, 如果太大, 就会过早进入模糊状态而影响系统的响应速度, 但这样有利于减小系统的超调。反之太小的话, 在非常接近目标的时候切换, 就可能出现较大的超调。所以要找一个相对最优点, 或者根据系统的特点要求选取切换阈值。在从模糊态向 PID 模态切换时, 一般都选在误差语言变量的语言值为零时。

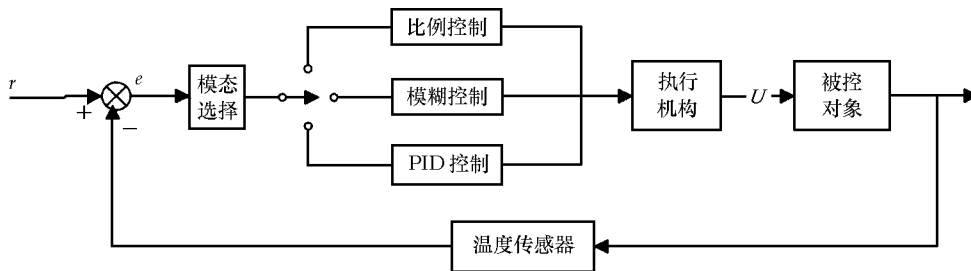


图 1 P-Fuzzy-PID 控制器的结构框图^[2]

2.1 模糊控制的设计

模糊控制选择 e 和偏差变化率 ec 作为控制器的输入, 同时选择控制量 u 的变化量作为控制器的输出。所以这里是二维模糊控制问题, 即

$$U = (E \times EC) \cdot R, \quad (1)$$

式中, U 、 E 和 EC 分别为 u 、 e 和 ec 的模糊子集, R 则为模糊控制的规则库。有

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\},$$

$$E = \{\text{低温, 中低温, 中高温, 高温}\},$$

$$EC = \{\text{正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}\}.$$

其中, $u_1 \sim u_6$ 对应于 100%~0 的不同加热功率。

确定了控制器的输入、输出之后, 需要建立模糊控制规则。理论上说, 对于语言变量取更多的语言值, 可以提高模糊控制器的精度和跟踪性能, 但这样做的缺点是规则数和系统的计算量被大大增加。由于考虑在微控制单元上实现模糊控制算法, 所以我们适当简化了输入语言变量的取值。

2.2 PID 控制器的设计 [2]

对于这个温控系统来说, 稳态指标比动态指标更加重要。因为最终要求温度值稳定在一个很小的范围之内, 这个范围也就是温控系统所能达到的控温精度, 这个范围越小, 也就说明控温精度越高。如果说前面的模糊控制是为了改善系统的动态特性, 那么接下来的 PID 控制器设计则是针对系统的稳态特性。

当温度偏差 e 小于一定范围 (0.5°C) 时, 可采用参数可变的 PID 控制。即根据当前系统所处的状态, 调整 PID 参数。具体做法是: 先将基本的 PID 参数存储于控制器中, 控制时, 按当前状态对基本的 PID 参数进行适当调整, 有

$$k_i = \alpha_i \times k_i^c, \quad i = P, I, D. \quad (2)$$

式中, k_P^c 、 k_I^c 、 k_D^c 分别为基本比例、积分、微分系数, α_P 、 α_I 、 α_D 分别为当前调整状态下的比例、积分和微分修正系数。根据 e 、 Δe 的大小来建立判别当前调整状态的规则。

各调整状态的判别规则及 PID 修正系数如表 1 所示。表中 E_M 为温度震荡峰值, E_1 、 E_2 为两个变化界限, 且 $E_2 < E_1$ 。

表 1 PID 修正系数表

$E_M/^\circ\text{C}$	判别依据		参数修正系数		
	$E/^\circ\text{C}$	$EC/^\circ\text{C}$	α_P	α_I	α_D
首振之前	$E_1 > E > E_2$		1	/	1
$E_2 < E_M < E_1$	< 0	< 0	1/4	1/2	1/2
	< 0	> 0	1/2	1/2	1/2
	> 0	> 0	3/4	1/2	1/2
	> 0	< 0	1/2	1/2	1/2
$ E_M < E_2$			1/2	1	0

另外, 在调整状态变化后, 为防止由于 PID 参数的改变而引起控制量 u 的过大变化, 从而造成新的振荡, 需要对 PID 算法求出的 u 的变化量加以限制, 即

$$\Delta u < \Delta u_{\max}, \quad (3)$$

式中 Δu_{\max} 为最大控制变化允许值。

3 CAT 变容二极管电压的温度补偿

对于目前氢钟 CAT，其控制电压 V_{dio} 在钟运行过程中，特别是在工作环境条件（主要是指温度环境）较差的场合，存在慢性单向变化甚至超出控制范围。这给氢钟的正常工作及性能指标带来影响，这种影响的根源主要来自腔泡结构细微机械形变及环境温度变化所致的腔频 (f_c) 变化 (Δf_c)、与之对应的 ΔV_{dio} 将引起腔品质因子 Q 值变化、腔插入损耗 ($Loss$) 变化（这一项对被动型氢钟的影响更大）、其他原因引起的钟输出频率变化。

下式表明了 Q 值变化对钟频率稳定度的影响^[3,4]：

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} = \frac{1}{V_0} \left\{ \frac{kT}{2P} \left[\frac{F\Delta w_1 Q_0}{w^2 t^2 Q_L} (1 - e^{-\Delta w_1 t}) + \frac{1}{Q_0^2 t} \left(1 - \frac{1 - e^{-\Delta w_1 t}}{\Delta w_1 t} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中右边第二项是氢激光器本身的振荡噪声贡献。 $\Delta\gamma/\gamma_0$ 为相对频率不确定性， V_0 为变容二极管两端电压， k 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度， P 为激光器振荡功率， F 为接收机噪声因数， w_1 为接收机带宽， w 为原子振荡频率， Q_0 为空腔 Q 值， Q_L 为有载 Q 值， t 为时间。

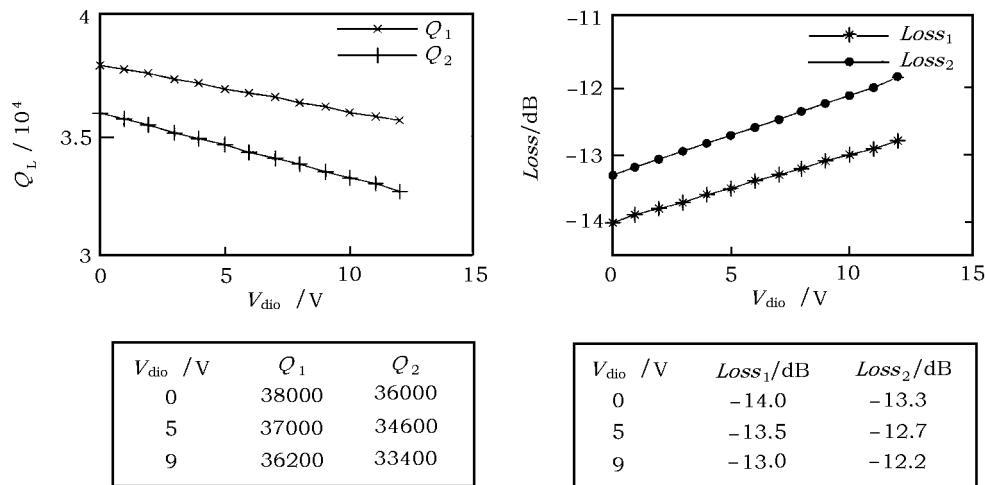


图2 Q_L 及 $Loss$ 值随 V_{dio} 值变化的试验曲线

图2是氢钟H49的 Q_L 和 $Loss$ 值随 V_{dio} 值变化的试验曲线图。图中 Q_1 、 Q_2 以及 $Loss_1$ 、 $Loss_2$ 代表不同变容二极管位置时的实测曲线。由图可见， Q_L 存在 2×10^3 左右的最大变化，其变化对稳定度的影响是显然的，而插入损耗的变化则和 Q_L 变化是同一问题的不同反映方式，这里不作分析。

采用自动腔温补偿，可改变 f_c ，消除 Δf_c ，最终消除 ΔV_{dio} ，提高氢钟的频率稳定度，同时有利于改善钟漂移率指标。考虑到在补偿过程中引起的二级多普勒频移，因此这种补偿

将限定在一个允许的范围内。

4 系统硬件设计

原有的氢钟温控电路为 3 个相互独立的电路板, 每一个电路板控制一个单元。而现有的设计对系统的硬件部分有了全新的改变 (见图 3)。

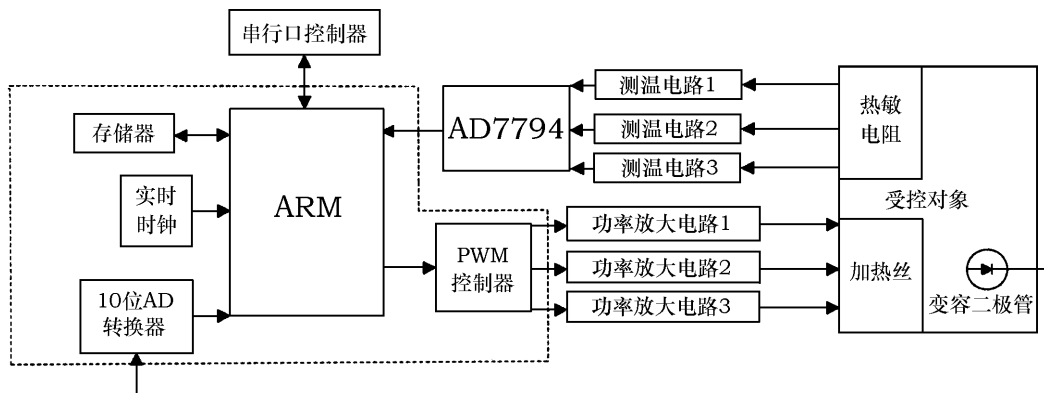


图 3 温控电路的硬件结构

从图 3 可以看到, 系统以 32 位 ARM (Advanced Risc Machine) 微处理器核作为控制中心, 采集钟罩顶部、筒部和底部 3 个控温区的温度, 同时输出脉宽调制信号对 3 个控温区加热丝的控制。另外, ARM 处理器核还负责变容二极管电压的采集、实时时钟的运行控制和串行口的控制。

在硬件结构上, 微控制器 (LPC2132, 图 3 中虚线圈定部分)^[5] 把 ARM 处理器核、存储器、10 位 AD 转换器、实时时钟和 PWM (Pulse Width Modulation) 控制器等集成到一个芯片封装里。AD7794 是 24 位 Δ - Σ AD 转换器, 负责将从 3 路测温电路获得的电压信号转换成数字信号, 并通过串行方式把数据送微控制器处理。由于 LPC2132 为 32 位系统, 所以很方便处理从 AD7794 送来的 24 位数字信号。为了便于监测系统的运行情况, LPC2132 通过 RS232 接口与上位机进行通信。

由于各器件功能强大, 封装小 (如 LP2132 只有 $1.2\text{ cm} \times 1.2\text{ cm}$), 所以在制作印刷电路板时, 采用了相对较小的版图。这样, 最终的电路板由原来的 3 块缩减为一块, 且这一块电路板的面积比原来的单个电路板的面积还小。

5 软件设计

考虑到在一个控制器上实现对 3 路温度的控制, 如果软件采用顺序结构的方式, 则系统的实时性很难得到满足, 所造成的结果是, 3 路温度控制互相影响, 最终降低甚至破坏控制效果。针对这个问题, 微内核操作系统 UCOS-II 被引入到设计中^[6]。与之相应的软件设计就

把各路温度控制作为一个单独的任务，3个温区控制就形成了3个任务。在UCOS-II调度和管理下，各任务以几乎并行的方式运行，从而消除了3路温度控制之间的相互影响，使控制的实时性得到了很好的满足。另外，UCOS-II还以系统硬件为基础，为应用程序(各任务)的运行提供一个环境，使我们在编制应用程序时，可以很少考虑或者不考虑硬件配置；同时，它也将CPU执行时间、中断以及定时器等资源封装起来，留给用户API接口，同时赋予任务以优先级，各任务根据自己的优先级获得CPU执行时间以及各种资源。

通过调节温度对变容二极管进行补偿是系统的另一重要功能，在软件设计时还需要建立一个任务来检测变容二极管的电压变化情况，并在条件成熟时，将电压的变化情况告知温度控制电路，对温度进行调节。这里又涉及到任务之间的通信问题。系统的软件流程图如图4所示。从图中可以清楚地看到，各任务的执行情况和任务之间的通信情况(由于3个温控任务的

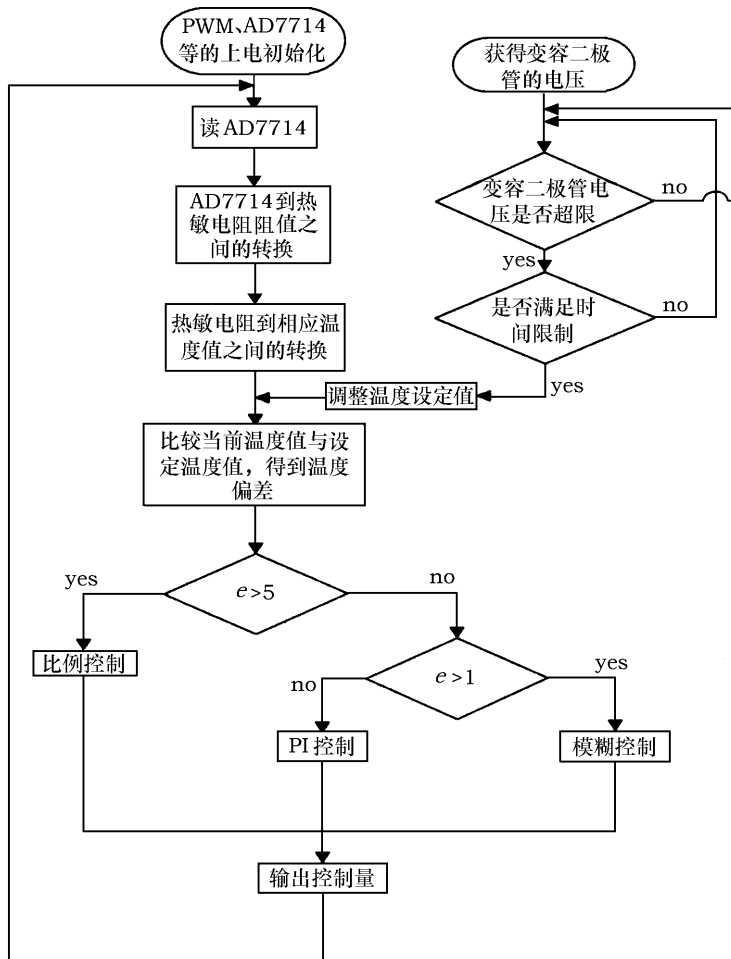


图4 程序流程

实现方式相同，图中只给出其中一个流程)。这里变容二极管电压采集任务和其他3个温度控制任务之间的通信没有采用传统的消息邮箱方式，而是采用全局变量方式，即设定一个全局

变量, 在变容二极管电压采集任务里对这个变量进行只写操作, 而在 3 个温度控制任务里对这个变量进行只读操作。这样, 既达到了任务之间通信的目的, 又不像采用消息邮箱那样耗费系统的资源。实验证明, 这种方式运行良好。

考虑到微控制器的存储器容量有限 (64 KB), 在程序设计时要兼顾程序的执行效率与占用资源的情况。这就要求认真分析程序结构。除此之外, UCOS-II 的映像占去了存储器的一大部分 (可能是几 K 到几十 K)。由于 UCOS-II 的可裁减性, 我们对 UCOS-II 进行了配置, 去除了不需要的功能。在这个设计中, UCOS-II 的代码量为 7.8 KB, 加上应用程序, 总的代码量约为 25 KB, 相比系统的存储容量 64 KB 还有近 40 KB 的余量。

6 小 结

用以上所设计的控制方法对系统进行控制 (设定温度为 50°C), 通过 MATLAB 仿真^[7], 可以得到系统温度控制指标如下: 稳定时间为 1900 s; 无超调量; 控制精度为 0.00005°C 。图 5 为系统的阶跃响应曲线。

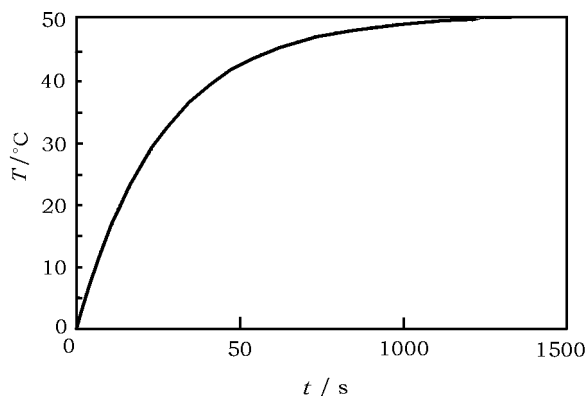


图 5 系统的阶跃响应

显然, 这是在理想情况下得到的控制效果。事实上, 由于各方面的误差 (传感器误差、执行机构输出的误差等) 和环境温度变化的影响, 系统达不到这样的控温精度, 但从这个仿真结果可以得到对系统的定性分析结果。实际系统的设计目标就是在基本实现控制功能的基础上, 缩小实际系统跟理想系统之间的差距, 提高系统性能。

致谢: 衷心感谢彭纪兴高级工程师及林传富研究员对完成本文所给予的帮助和支持。

参考文献:

- [1] Stuart R, Ball P E. Embedded Microprocessor Systems: Real World Design, New york: Newnes, 2002: 134~138
- [2] 潘新民, 王燕芳. 微型计算机控制技术, 北京: 高等教育出版社, 2001: 294
- [3] 王义遵. 量子频标原理, 北京: 科学出版社, 1974: 403
- [4] Cutle L S, Seavle C L. Proc. IEEE, 1996, 56: 147
- [5] 周立功. 深入浅出 ARM7-LPC213X/214X, 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 49~50
- [6] Labrosse J J. 嵌入式实时操作系统 UCOS-II. 2. 邵贝贝译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 7~9
- [7] 黄文梅. 系统仿真分析与设计——MATLAB 语言工程应用, 湖南: 国防科技大学出版社, 2001: 234

Design and Analysis of Intelligent Temperature Control and Temperature Compensating System of CAT for Hydrogen Clock

LU Hua-yu

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper presents a new design of temperature control system of hydrogen clock. By integrating three temperature control units into one system, the design can reduce size of circuit and simplify temperature control. This design includes two parts: hardware and software. In the hardware design, we select 32 bits ARM (Advanced RISC Machine) processor LPC2132, which is powerful and helpful to reduce the complexity of circuit board. In the software design, we introduce real time operation system UCOS-II (Micro Controller Operation System). By using it, we can enhance real time performance of the temperature control system. In addition, voltage of varactor which controls CAT (cavity auto tuning) in hydrogen clock may drift out of normal range, and the voltage drift will influence frequency stability and drift rate of hydrogen clock directly. Therefore, we bring forward an idea of temperature compensating for CAT, which based on the new temperature control system.

Key words: astronomical facilities and technique; hydrogen clock; CAT (Cavity Auto Tuning); temperature control; ARM (Advanced Risc Machine); UCOS-II (Micro Controller Operation System)