

三自由度直升机的嵌入式控制系统*

吴 剑, 苗晋玲, 代冀阳

(南昌航空大学 自动化学院, 江西 南昌 330063)

摘 要: 实验室配备的三自由度直升机采用 PC 机+运动控制卡的控制方案, 该方案偏离了真实直升机的飞行控制系统方案。为此, 采用 ARM+ μ C/OSII 设计了三自由度直升机的嵌入式控制系统。由外接的飞行摇杆给出三自由度直升机平台姿态角的指令信号, 通过以 EasyARM1138 为核心的嵌入式控制系统, 采用闭环反馈的数字 PID 控制, 实现了对三自由度直升机俯仰角和横侧角的精确控制, 并可模拟真实飞机的“辅助操纵”、“全自动驾驶”、“改平”3 种工作模式。

关键词: μ C/OSII; ARM; 数字 PID; 三自由度直升机

中图分类号: V233.7, TP273+.5

文献标识码: A

Embedded control system for 3-DOF helicopter

WU Jian, MIAO Jin Ling, DAI Ji Yang

(College of Automation Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The 3-DOF helicopter equipped in the laboratory adopts the plan of PC computer added with motion-control card, which deviates from the flight control system plan adopted by the practical helicopter, so this essay works out the embedded control system of 3-DOF helicopter by using ARM+ μ C/OSII. With reference signals of 3-DOF helicopter's pose angle send by external flight rockers, through embedded control system centered by EasyARM1138, and by adopting closed-loop feedback PID control, the accurate control of 3-DOF helicopter's pitching and elevation angle can be realized. The embedded control system can also simulate three operating mode of practical helicopter which are "assistant operation of man", "fully automatic driving of helicopter" and "keeping the helicopter at a horizontal level".

Key words: μ C/OSII; ARM; digital PID; 3-DOF helicopter

三自由度直升机可以应用于飞行器控制系统的半实物仿真试验和性能测试等场合, 用以模拟横列式直升机, 即倾转旋翼机的直升机状态^[1]。其控制系统属于典型的多输入-多输出系统, 具有非线性和强交叉耦合性, 不易用传递函数和状态方程描述, 是控制系统中较为复杂的被控对象^[2,3]。实验室配备的三自由度直升机平台采用 PC 机+运动控制卡的控制方案, 运动控制卡实时测量并控制三自由度直升机平台的飞行姿态, 控制量的计算则由 PC 机完成^[4]。该方案偏离了真实直升机的飞行控制系统方案。为此, 本文采用嵌入式设计方法重新设计了三自由度直升机的控制系统。在此基础上, 改变外接的飞行摇杆的俯仰角和横侧角, 并以此为指令信号, 实时控制三自由度直升机平台的飞行姿态。通过对

飞行摇杆上快捷键的控制, 可以实现系统在“辅助操纵”、“全自动驾驶”和“改平”3 种工作模式之间的切换。

1 系统工作原理

1.1 系统的整体方案

系统整体方案如图 1 所示。其中三自由度直升机由 2 个直流无刷电机带动, 模拟横列式直升机, 即倾转旋翼机^[1]的直升机状态。

三自由度直升机可以绕 3 个相互垂直的轴旋转, 分别对应直升机模型的俯仰角、横侧角和航向角。飞行摇杆选用北通公司的幻影 318 飞行摇杆, 利用摇杆的俯仰和横侧转动, 输出与摇杆的俯仰角和横侧角对应的直流电压, 用于控制三自由度直升机的俯仰角和横侧角的指令信号; 利用摇杆手柄上的按钮, 输出脉冲信号, 用于控

* 基金项目: 航空科技支撑基金(05C56001), 江西省教育厅基金(GJJ09196)

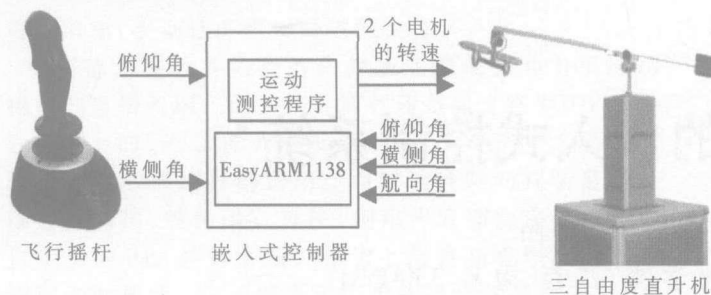


图1 三自由度直升机的嵌入式系统整体方案

1.3 系统功能模块

在图1方案的基础上,可以制定出系统实现“辅助操纵”功能时的整体策略,如图2所示。

由图2可知,三自由度直升机平台的嵌入式控制器整体上包含接口与控制两方面的功能。接口功能对应为图2中的ADC采样、旋转编码器解码、PWM输出3个功能模块。控制功能是采用基于反馈系统的PID控制方法计算控制信号,对应为图中的PID控制功能模块。

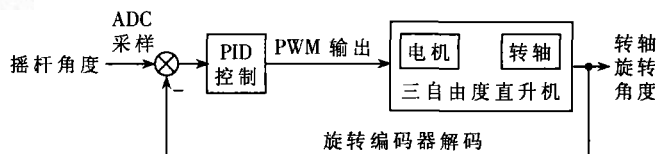


图2 “辅助操纵”工作模式的整体实现策略

制三自由度直升机在不同工作模式之间切换。

1.2 系统的工作模式

系统具有辅助操纵(有人工操作)、全自动驾驶(无人操作)、(强制)改平3种工作模式^[5]。由飞行摇杆上的若干快捷按钮实现对各种工作模式的切换。

1.2.1 辅助操纵

由人工操纵飞行摇杆的俯仰和倾斜,以此作为三自由度直升机俯仰角和横侧角的指令信号,由嵌入式控制器依据闭环反馈的PID控制律实现整体操纵。

这种工作模式用于模拟飞机的有人驾驶状态。此时飞行控制系统辅助飞行员通过摇杆对飞机操纵,可以减轻操纵者的工作负担;同时对飞机进行控制增稳,既确保飞机的稳定,又可抵御阵风等外部干扰,减轻扰动对飞行品质的影响。

1.2.2 全自动驾驶

飞行摇杆对系统的控制被屏蔽,系统以进入该工作模式时刻三自由度直升机的俯仰角和横侧角的当前值为指令信号,由嵌入式控制器依据闭环反馈的PID控制律实现整体操纵。

这种工作模式用于模拟飞机的无人控制全自动飞行状态。当飞行员人工把飞机操纵到理想的飞行姿态后,通过切换按钮进入这种模式,由飞行控制系统对飞行姿态的当前值进行稳定,保证飞机按刚进入该状态时的各种姿态角、速度、高度、航向飞行;同时对飞机进行控制增稳,提高飞行品质。该工作模式突出体现了飞行控制系统的功能,可以大大降低飞行员的工作量,减轻疲劳。

1.2.3 改平

系统强制俯仰角和横侧角的指令值都为0,飞行摇杆对系统的控制被屏蔽,以此强制控制三自由度直升机俯仰角和横侧角为0,实现三自由度直升机的水平稳定运行。

这种工作模式用于模拟飞行控制系统的改平功能。当飞行员遇到突发情况时(如飞行员受伤等),采用这种功能可以很方便地把飞机由任何姿态改变为匀速平飞的稳定状态。当然这种功能也可以用于飞行员平时把飞机拉平的过程,即采用“改平”模式可以方便飞行员的操作。

在图2的基础上进行修改,就可以获得嵌入式控制器的“全自动操纵”和“改平”工作模式的实现方法。区别在于闭环控制系统指令信号的来源不同。这两种模式下,图2中的指令信号不再由摇杆给定,摇杆的功能被屏蔽。“全自动操纵”模式下,指令信号为刚刚进入该工作模式时刻三自由度直升机平台输出的测量值;“改平”模式下,俯仰角和横侧角值的指令信号都为0。

2 硬件与软件设计

2.1 硬件设计

硬件部分的主体是嵌入式控制盒。控制盒由EasyARM1138开发板^[6]、信号调理板和机箱外壳3部分组成。

2.1.1 EasyARM1138 开发板

EasyARM1138使用32bit ARM Cortex-M3内核,具有丰富的接口资源。具体配置如下:

(1)采用EasyARM1138的2个ADC端口(ADC0、ADC1)测量飞行摇杆输入的模拟电压信号,采用软件等比例地换算成对应的角度信号,由此实现对飞行摇杆的指令角度信号的测量。

(2)采用EasyARM1138的3个GPIO口(PB0、PF6、PF4)测量三自由度直升机的俯仰角信号的输出脉冲,3个GPIO口(PB2、PF1、PF2)测量三自由度直升机的横侧角信号的输出脉冲。通过软件编程,采用中断的方法实现脉冲计数,由此实现对三自由度直升机飞行姿态的测量。

(3)采用EasyARM1138的Time2模块产生PWM信号,将Timer2模块中的TimerA和TimerB配置为16位的递减计数器,其对应的EasyARM1138上的2个GPIO口(PF7和PC4)的PWM输出作为三自由度直升机的2个直流无刷电机的控制信号,通过调整TimerA和TimerB中的匹配值来等效地调整2个直流无刷电机的输入电压,从而实现对这两个直流无刷电机转速的控制。

2.1.2 信号调理板

由于 GPIO 测量的 8 个信号(三自由度直升机的角度信号对应的 6 个脉冲信号和飞行摇杆对应的 2 个角度信号)在实际测量时不可避免地存在噪声,被噪声污染的信号直接送入 EasyARM1138 会使测量出现很大的误差,从而对系统产生不利影响。严重时会使三自由度直升机的电机以最大转速运行,此时系统实际上已经发散,无法平衡。

EasyARM1138 的 GPIO 需要测量的 8 个信号量先经过信号调理电路调理以后,再送入 EasyARM1138。经过实际测试发现系统可以稳定运行,而且动态性能理想。

2.1.3 控制盒

嵌入式控制器的外部采用通用的塑料机箱外壳,在其侧面开口用于安放各种接口。控制盒整体采用外接的 5 V、2 A 电源供电,盒上保留了与外部稳压整流电源的插口。盒上安放了一个电源开关用于对控制盒的供电进行控制,并用一个 LED 二极管指示灯指示电源的开关状态。

控制盒的端面安放了一个橙色的无锁开关,用来对 EasyARM1138 进行复位操作。在该端面同时有一个 DB9 的插孔,用于和来自飞行摇杆(北通瞬风 318 飞行摇杆改装)的 DB9 插头相连接。在另一端面安放了一个 DB25 插孔,用于和来自三自由度直升机的 DB25 插头相连。

2.2 软件设计

全部软件基于 IAR Embedded Workbench for ARM 编程平台^[7],在 $\mu C/OSII$ 操作系统中使用 C 语言进行开发。生成的全部软件通过外接的 USB 电缆下载至 EasyARM1138。软件整体上分为接口和控制两个功能模块。

2.2.1 接口功能的实现

(1)ADC 采样

飞行摇杆上下摇动给出俯仰信号,左右摇动给出横侧信号,2 路信号通过滤波电容进行整形,送到 EasyARM1138 开发板的 ADC,ADC 同时将 2 路连续的模拟电压转换成离散的数字量。通过电压的比例换算,计算出飞行摇杆给出的俯仰与横侧的角度。

EasyARM1138 开发板的 ADC 采样模块提供的最大电压为 3.3 V,设置摇杆输入的电压量程为 0 V~3.3 V,ADC 采样率为 125 kS/s。ADC 模块的转换分辨率为 10 bit,其转换范围为 0~1 024。当摇杆模拟信号输入到 ADC,ADC 将其转换成对应的数字量 ulVal0,则摇杆输入的电压值 $ulVal1=(ulVal0/1\ 024)\times 3\ 300$ 。再根据三自由度直升机俯仰角的范围 $0^\circ\sim 60^\circ$ 将摇杆的电压值转换成对应的角度值,即摇杆输入俯仰的角度 $angle02=ulVal1/3\ 300\times 60$ 。同理可以将摇杆输入横侧的角度算出来。

(2)旋转编码器解码

三自由度直升机实时姿态信号是通过 3 个光电旋

转编码器检测传送到控制盒中的,为了检测俯仰与横侧的角度,需要对编码器的脉冲计数,算出当前俯仰与横侧的角度。

编码器输出的是相位差为 90° 的 A 相和 B 相两对差分脉冲信号。从 A、B 2 个输出信号的相位关系(超前或滞后)可判断编码器旋转的方向。当编码器码盘正转时,A 道脉冲波形比 B 道超前 $\pi/2$,而反转时,A 道脉冲波形比 B 道滞后 $\pi/2$ ^[8]。旋转编码器输出的波形信号如图 3。

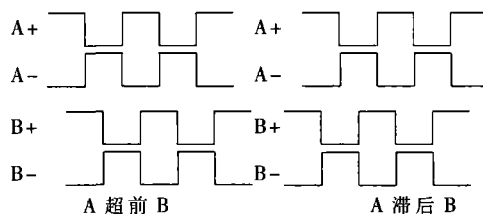


图 3 旋转编码器输出的波形信号

对于俯仰时编码器输出的两对差分信号 A+与 A-和 B+与 B-,可以只用 A+、B+、B-这 3 个信号测量俯仰角度数。采用 EasyARM1138 开发板 GPIO 的边沿触发中断,设 B+与 B-的脉冲上升沿触发产生中断。当 B+脉冲产生中断时,检测 A+脉冲输入的高低电平,同时对 B+脉冲进行计数。如图 4 所示,若 A+为高电平可判断 A 超前 B,计数变量 FA1 自动加 1(设计数变量初值 $FA1=30\ 000$);若为低电平可判断 A 滞后 B,计数变量 FA1 自动减 1。为了消除三自由度直升机平衡杆抖动带来的脉冲计数误差,对 B-脉冲设置了中断计数,这样相当于对脉冲 B 进行了二倍频计数。当 B-上升沿脉冲产生中断时,检测 A+脉冲输入的高低电平,同时对 B-脉冲进行计数。若 A+为高电平可判断 A 滞后 B,计数变量 FA1 自动减 1;若为低电平可判断 A 超前 B,计数变量 FA1 自动加 1。

编码器码盘上的圆周等分条纹数为 600,被测轴旋转一周,编码器的 A、B 两相分别发出 600 个脉冲,A、B 两相的脉冲当量即对应的角度 $P=360^\circ/600$ 。由于对 B 脉冲一个周期进行了 2 次计数,则 FA1 计数的每一个脉冲对应的角度为 $P/2$ 。编码器的旋转角度即三自由度直升机的俯仰角 $angle00=(FA1-30\ 000)\times P/2$ 。

同理,对三自由度直升机横侧时编码器输出的 3 个信号进行测量,算出横侧的角度。

(3)PWM 输出

通过 PID 控制算出的电压,经由 EasyARM1138 开发板 Timer2 产生 PWM 方波信号,以此来输出控制 2 个直流无刷电机的电压输入。

设置 Timer2 模块中 TimerA 和 TimerB 的初值为 6 000,其输出的电压范围为 0 V~3.3 V。PID 控制算出的电压 V00 与 TimerA 和 TimerB 装载的匹配值对应成线性变化,比例系数为 $K=0.3$ 。匹配值 $MP1=V00\times K\times 6\ 000(0\leq$

$V_{00} \times K \leq 1$)。匹配值随着 PID 控制算出的电压变化而变化,然后根据 PWM 占空比输出对应的电压控制三自由度直升机的 2 个电机。

2.2.2 控制律生成方法

控制律生成方法分为系统建模和 PID 控制两部分。系统建模的过程具体可以参见固高公司的产品手册^[4]。

2 个电机的输出电压采用增量式数字 PID 控制算法,用 C 语言编程实现:

电机 1: $V_{01} = V_{00} + K_{ep} \times (1 + K_{ei} \times T + K_{ed}/T) \times E_e[2] - K_{ep} \times (1 + 2 \times K_{ed}/T) \times E_e[1] + K_{ep} \times K_{ed} \times E_e[0]/T$;

电机 2: $V_{11} = V_{10} + K_{pp} \times (1 + K_{pi} \times T + K_{pd}/T) \times E_p[2] - K_{pp} \times (1 + 2 \times K_{pd}/T) \times E_p[1] + K_{pp} \times K_{pd} \times E_p[0]/T$;

V_{01} 是电机 1 当前的电压, V_{00} 是电机 1 上一次采样时的电压, $E_e[i]$ 是三次采样俯仰角的角度误差值;

V_{11} 是电机 2 当前的电压, V_{10} 是电机 2 上一次采样时的电压, $E_p[i]$ 是三次采样横侧角的角度误差值。

3 系统测试及结果

为了对系统的运行结果进行测试,特采用数字示波器(Tektronix TDS220)和万用表对飞行摇杆给出的俯仰角和横侧角的指令信号,以及三自由度直升机的旋转编码器的输出的实际俯仰角和横侧角信号进行测试和分析。测试工具还需要 EasyARM1138 调试开发软件 IAR Embedded Workbench for ARM 5.11 及相应的内嵌 USB 接口的下载仿真器。

摇杆信号与三自由度直升机信号分别接到控制盒的两端,这时将程序加载到 EasyARM1138 开发板中,对控制系统进行整体调试。

3.1 三自由度直升机的启动与稳定运行

打开三自由度直升机电机的电源,保持摇杆的平衡状态及运行程序,三自由度直升机的俯仰轴会平稳地向上转动,俯仰角稳定地由 -30° 变化到 0° 。当俯仰角稳定下来后,俯仰轴基本上不发生旋转,这时的俯仰角轴旋转编码器的测量信号理想值应该是一条平稳的直线,没有任何脉冲产生。但实际上可能会存在小幅振动,对应信号图形为少数的脉冲信号。

图 4 中每格的时间长度为 1 s。由图 4 可知,在 10 s

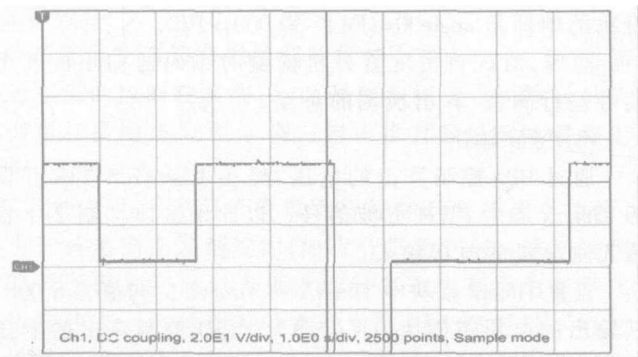


图 4 直升机稳定运行时俯仰轴旋转编码器的输出波形

的时间长度内,俯仰角旋转编码器输出了少量脉冲信号,每个脉冲对应角度变化为 0.3° (上下波动)。

在理解此图的基础上,对图 5 所示的图形也就不难理解了。图 5 中给出的是俯仰角由 -30° 变化到 0° 时旋转编码器的输出波形。

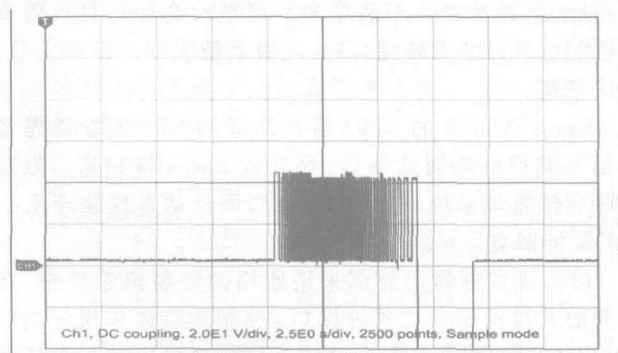


图 5 直升机启动时俯仰轴旋转编码器的输出波形

可以看出,俯仰角为 -30° 和 0° 时,旋转编码器的输出都近似为直线,或只有很少的脉冲。而在从 -30° 变化到 0° 的变化过程中,旋转编码器的输出表现为密集的脉冲信号,而且刚开始的时候脉冲比较密,后面稍微稀疏。对应为俯仰角的变化过程,开始时角度变化速度比较快,后面稍慢。

对于该过程,采用 EasyARM1138 串口通信把旋转编码器的角度数据读入电脑,然后通过 Matlab 绘制得到如图 6 所示的数据变化曲线。

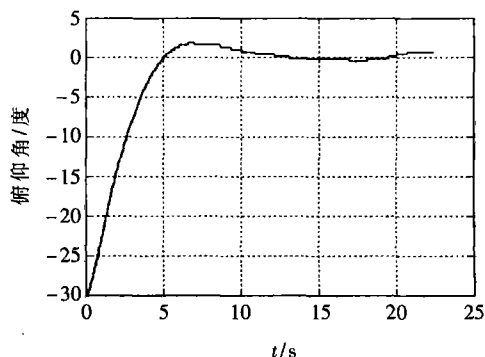


图 6 直升机启动时俯仰角的数值波形

3.2 三自由度直升机的增稳

当三自由度直升机稳定运行后,若有外部扰动,例如阵风等冲击信号作用在三自由度直升机的旋转轴上,则在控制器的作用下,系统应该能自动抵御该扰动,扰动消除后,系统恢复到原来位置。

图 7 给出了三自由度直升机的俯仰轴受到冲击扰动时的俯仰角旋转编码器输出信号波形。由图 7 可以看出,扰动作用刚发生瞬时,旋转编码器开始输出密集的脉冲,表明此时俯仰轴在做持续运动。而扰动发生以前和扰动过去一定时间后,旋转编码器的输出为少量的脉冲信号,表明俯仰轴基本上处于平衡状态。

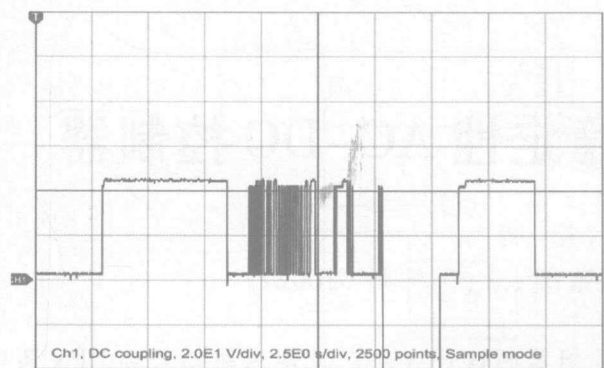


图7 扰动作用下俯仰轴旋转编码器的输出波形

在该过程中,采用 EasyARM1138 串口通信把旋转编码器的角度数据读入电脑,然后通过 Matlab 绘制得数据变化曲线如图 8。

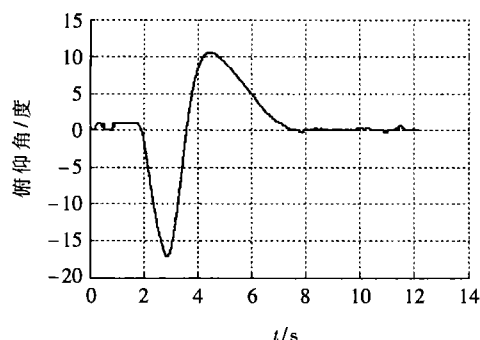


图8 扰动作用下俯仰角的数值波形

3.3 讨论

(1)系统的连调过程只给出了系统的辅助操纵过程的输出通道效果。因为所用的 Tektronix TDS220 数字示波器在测试双通道信号时,2 个通道信号的波形存在时间偏差,所以无法同时给出理想的输入信号与输出信号的对比波形。

(2)对于系统的另外两个工作模式,“全自动驾驶”的效果与图 8 类似,而“改平”功能的效果与图 6 相似,在

此不多叙述。

(3)由于三自由度直升机的旋转编码器为增量式的旋转编码器,只能反映角度的变化量,因此,看到的稳态情况下编码器输出脉冲数都近似为零。而当前角度的计算方法是:初始角度+角度变化量。系统对俯仰角和横侧角的稳定,实际上是对相对初始角度变化量的稳定。

本文讨论了三自由度直升机嵌入式控制系统设计的全部开发过程。控制系统经过测试,各项功能满足设计要求。因此整体控制系统的设计思路可行,设计结果合理、可靠。其方法可以推广应用于实现小型无人直升机的飞行控制系统,可以为研制真实的数字式飞行控制系统提供技术储备,可以应用于其他运动测控系统的嵌入式设计。

参考文献

- [1] 蔡汝鸿.美国陆军着重研究倾转旋翼机[J].直升机技术, 2008(1): 64.
- [2] SHAN J, LIU H T, NOWOTNY S. Synchronised trajectory-tracking control of multiple 3-DOF experimental helicopters[J]. IEE Proc.-Control theory Appl, 2005, 152(6).
- [3] Malgorzata S Zywno, Derek Pereira. Innovative initiative in control education at ryerson polytechnic University—Fuzzy logic control of the 3D helicopter simulator[C]. Proceedings of the american control conference, 2006.
- [4] 固高科技.三自由度直升机系统实验参考手册.固高科技(深圳)有限公司, 2004.
- [5] 吴森堂, 费玉华.飞行控制系统[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2006: 258-262.
- [6] 周立功公司. EasyARM1138——内嵌 USB 仿真器的 Cortex-M3 开发板[EB/OL]. http://www.embedtools.com/pro_kaifa/ARM/EasyARM1138.asp. 2008.
- [7] 徐爱钧. IAR EWARM 嵌入式系统编程与实践[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2006.
- [8] 段海滨, 王道波, 黄向华. 光电轴角编码器在飞行仿真伺服系统中的应用[J]. 传感器技术, 2004(23).

(收稿日期: 2009-04-10)



行业聚焦
Focus on Industry

微软推出基于 Windows 7 的 Windows Embedded Standard 2011 CTP

2009 年 9 月 14 日,微软公司面向全球的原始设备制造商(OEM)和专用设备开发商推出了基于 Windows 7 的 Windows Embedded Standard 2011(之前代码为“Quebec”)Community Technology Preview(CTP,社区技术预览版)。该产品可通过登录 <http://connect.microsoft.com/windowsembedded> 即刻下载。

Windows Embedded Standard 2011 为原始设备制造商提供了最新的 Windows 7 技术,帮助其更快地向市场推出高性能的专用设备,同时通过创新的用户体验使得这些设备脱颖而出。此外,通过向原始设备制造商提供新产品,可将 Windows 用户体验从基于 Windows 的个人电脑、服务器和在线服务延伸到专用设备,从而提高客户满意度。

通过高度的定制化与组件化,Windows Embedded Standard 2011 操作系统显示出了 Windows 7 强大的功能,延续了用户熟悉的界面与可靠性,从而使得工业自动化、娱乐、消费电子产品及其他市场的原始设备制造商能够集中力量实现产品差异化。无需用户投资平台开发,Windows Embedded Standard 2011 使得原始设备制造商可以按需挑选组件、构建平台以满足其设备的特殊要求。常见而易于使用的开发工具和可嵌入功能可以帮助其进一步降低瘦客户端、服务点(POS)、自助信息服务亭(Kiosk)、医疗、多功能打印机及其他设备的开发成本,加速产品上市。(微软公司供稿)